



LADEN2020

Schlussbericht

Konzept zum Aufbau einer
bedarfsgerechten
Ladeinfrastruktur in
Deutschland von heute bis 2020

15.12.2016

Institut für Verkehrsforschung
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Institut für Fahrzeugkonzepte
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Institut für Verkehrswesen
Karlsruher Institut für Technologie



Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des
Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem
Förderkennzeichen 01MX15001 gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projektträger:
Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V. (DLR)

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Schlussbericht des Vorhabens
LADEN2020
*Konzept zum Aufbau einer bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur
in Deutschland von heute bis 2020*

Web: <http://www.dlr.de/vf>

Ansprechpartner

Dr.-Ing. John Erik Anderson
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Verkehrsforschung
Rutherfordstraße 2
12489 Berlin
Tel.: 030 67055-374
Fax.: 030 67055-283
E-Mail: John.Anderson@dlr.de

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichwohl für beiderlei Geschlecht.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis.....	4
Abbildungsverzeichnis	4
Abkürzungsverzeichnis.....	5
Executive Summary	6
1. Einleitung	7
2. E-Fahrzeugbestandsszenarien.....	9
3. Abschätzung von Nutzbarkeit und Attraktivität von Ladepunkten nach Typ.....	11
4. Abstimmung der Annahmen zu Einflussfaktoren in einem Stakeholder-Prozess.....	14
5. Ableitung des Bedarfs an Ladepunkten für Ladevorgänge im Alltagsverkehr.....	15
6. Ableitung des Bedarfs an Ladepunkten für Ladevorgänge im Fernverkehr.....	25
9. LI-Bedarf besonderer Flotten.....	33
10. Internationaler Vergleich von LI-Strategien	37
11. Fazit und Ausblick.....	41
Literaturverzeichnis.....	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Normreichweiten und reale Reichweiten von E-Fahrzeugen im Jahr 2020.	10
Tabelle 2: Ergebnisse der Nutzbarkeit und Attraktivität von Ladepunkten nach Typ und Nutzerprofil.	12
Tabelle 3: Annahmen des Referenzszenarios für die Analyse der Ladeinfrastruktur	18
Tabelle 4: Hochrechnung der E-Fahrzeuge	20
Tabelle 5: Ergebnis Referenzszenario: Maximale Belegung	22
Tabelle 6: Ergebnis der Robustheitsanalyse der Sensitivitätsanalyse	23
Tabelle 7: Darstellung des Ladeinfrastrukturbedarfs im Fernverkehr	31
Tabelle 8: Bestand besonderer Flotten im Jahr 2016 und 2020	33
Tabelle 9: BEVs besonderer Flotten im Jahr 2020	34
Tabelle 10: Annahmen für die Berechnungen des Ladeinfrastrukturbedarfs besonderer Flotten	35
Tabelle 11: Fahrzeugbestand und Ladeinfrastrukturbedarf besonderer Flotten	36
Tabelle 12: Internationaler Vergleich von aktuellem Stand und Zielen	37
Tabelle 13: Internationaler Vergleich von Strategien für E-Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur	39

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektstruktur von LADEN2020	8
Abbildung 2: Ergebnisse für gewünschte Ladestationen	13
Abbildung 3: Ablauf zur Entwicklung einer robusten Ladeinfrastruktur Strategie.	14
Abbildung 4: Übersicht der Methodik zur Bestimmung von bedarfsgerechter Ladeinfrastruktur	16
Abbildung 5: Entscheidungslogik für die Wahl einer Ladestation	19
Abbildung 6: Ergebnis des Referenzszenarios im Alltagsverkehr	21
Abbildung 7: Ergebnis des Referenzszenarios im Alltagsverkehr (ohne zuhause)	21
Abbildung 8: Gesamtmodellübersicht zur Abschätzung des Ladeinfrastrukturbedarfs im Fernverkehr.	26
Abbildung 9: Ladevorgänge im Fernverkehr	27
Abbildung 10: Verteilung des Ladebedarfs auf das Autobahnnetz in Deutschland	30

Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom (Englisch: Alternating Current)
BAB	Bundesautobahn
BEV	Reines Elektrofahrzeug (Englisch: Battery Electric Vehicle)
DC	Gleichstrom (Englisch: Direct Current)
E-Fahrzeug	Elektrofahrzeug
GIS	Geographische(s) Informationssystem(e)
km	Kilometer
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
LI	Ladeinfrastruktur
MiD	Mobilität in Deutschland
PHEV	Aufladbares Hybrid Fahrzeug (Englisch: Plug-in Hybrid Electric Vehicle)
Pkw	Personenkraftwagen

Executive Summary

Der Elektromobilität wird in Deutschland für die Verwirklichung von energie- und klimapolitischen Ziele eine wichtige Rolle beigemessen. Aus aktuellen Forschungsarbeiten geht hervor, dass unzureichende öffentliche Ladeinfrastruktur ein wesentliches Hindernis für den erfolgreichen Übergang zur Elektromobilität darstellt. Es existiert jedoch bisher keine fundierte Methode, um den Gesamtbedarf an öffentlicher Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge zu bestimmen. Demzufolge entwickelt das Forschungsprojekt LADEN2020 eine systematisch nachvollziehbare Strategie zum Aufbau einer robusten und bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge im Alltags- und Fernverkehr.

Der ermittelte Ladeinfrastrukturbedarf für eine Million Elektrofahrzeuge in Deutschland im Jahr 2020 beträgt circa 33.000 öffentliche- und halböffentliche Ladepunkte für den Alltagsverkehr, sowie circa 2.600 öffentliche Ladepunkte für den Fernverkehr. Je nach Ausgestaltung der Normalladeinfrastruktur und angestrebter Versorgungssicherheit sind zusätzlich bis zu etwa 4.000 Schnellladepunkte sinnvoll.

Darüber hinaus können wichtige Erkenntnisse für den Aufbau von Ladeinfrastruktur im Alltagsverkehr abgeleitet werden. Erstens ist eine öffentliche Ladeinfrastruktur am Straßenrand in Wohngebieten sehr ineffizient. Zweitens, um nennenswerte batterieelektrische Fahranteile zu erreichen, benötigen Plug-In Hybride mehr öffentliche Ladeinfrastruktur als rein batteriebetriebene Fahrzeuge. Drittens, bei einer steigenden elektrischen Reichweite sinkt der Ladeinfrastrukturbedarf, jedoch nur in geringem Maße. Viertens, ein höherer Anteil von privaten Ladepunkten verringert den Bedarf an öffentlicher- und halböffentlicher Ladeinfrastruktur deutlich. Letztlich variiert die benötigte Ladeinfrastruktur deutlich je nachdem, ob tatsächliche Netto-Ladezeiten oder Gesamtparkzeiten im Zuge von Ladevorgängen betrachtet werden.

Zudem wurden ebenso entscheidende Ergebnisse zur Ladeinfrastruktur im Fernverkehr festgestellt. Eine Grundversorgung von Ladeinfrastruktur im Fernverkehr muss zusätzlich ergänzt werden, da in Abhängigkeit der Fahrtzweckstruktur die Nachfrage das durch die Grundversorgung abgedeckte Angebot überschreitet. Hierzu sind die Nachfragestruktur am Wochenende und Ferienverkehre entscheidend. Zudem entsteht bei höherer elektrischer Reichweite ein deutlich geringerer Ladebedarf im Fernverkehr und damit auch eine geringere Erfordernis, Ladeinfrastruktur bereitzustellen. Komfortüberlegungen (Ladewartezeiten) sind eine der weiteren und entscheidenden Einflussgrößen.

Die den Analysen zugrundeliegenden Annahmen wurden zusammen mit nationalen sowie internationalen Stakeholdern und Experten entwickelt. Als Grundlage für Analysen des Nutzerverhaltens dienten Daten der nationalen Verkehrsbefragung „Mobilität in Deutschland“ und des „Deutschen Mobilitätspanels“. Um die Robustheit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden neben einem Referenzszenario unterschiedliche Sensitivitäten zu Reichweite, Flottenverteilung und verschiedenen Ladeperspektiven untersucht. Weitere zukünftige Forschungsthemen sind die Entkopplung von Parken und Laden, die Rolle von induktivem Laden nach 2020 und der Gebrauch von Elektrofahrzeugen als Speicher für erneuerbare Energien.

Durch die Entwicklung einer robusten Strategie für eine bedarfsgerechte Ladeinfrastruktur in Deutschland von heute bis 2020, schafft das Projekt LADEN2020 Grundlagen für einen erfolgreichen Hochlauf der Elektromobilität hierzulande.

1. Einleitung

Motivation und Problemstellung

Der Elektromobilität wird eine besondere Bedeutung bei der Verwirklichung der energie- und klimapolitischen Ziele Deutschlands zugesprochen (1). Forschungen haben ergeben, dass die Nutzung elektrisch angetriebener Fahrzeuge zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen und der Luftverschmutzung beitragen kann (2). Daher haben sich zahlreiche Regierungen ambitionierte Ziele bei der Einführung der Elektromobilität gesetzt (1, 3). Unter anderem strebt Deutschland bis zum Jahr 2020 eine Elektrofahrzeugflotte von einer Million Fahrzeugen an (1). Bei Betrachtung eines Bestandes von knapp 60.000 registrierten Elektrofahrzeugen (E-Fahrzeugen) im Oktober 2016 wird jedoch die große Lücke zwischen dem gesetzten Ziel für 2020 und dem bisher erreichten Flottenanteil ersichtlich (4). Dieser geringe Anteil von E-Fahrzeugen stellt die Realisierung der ökologischen Ziele in Frage. Hieraus ergibt sich die Frage: warum erreichen die E-Fahrzeuge die gesetzten Ziele bislang nicht?

Nie und Ghamami identifizieren fehlende Ladeinfrastruktur (LI) als einen der Hauptfaktoren für den ausbleibenden Erfolg von E-Fahrzeugen (5). Laut Haddadian et al. liegt eine wesentliche Herausforderung bei der Entwicklung von Märkten für E-Fahrzeuge bei der Bereitstellung einer geeigneten Ladeinfrastruktur. Zahlreiche weitere Forscher halten ebenfalls den Mangel an öffentlicher Ladeinfrastruktur für eine zentrale Hürde bei der Etablierung von E-Fahrzeugen (6-9). Somit zeigen hinreichende Forschungen den Bedarf einer ausreichenden öffentlichen Ladeinfrastruktur auf, um den Erfolg von E-Fahrzeugen zu sichern.

Durch diese Herausforderung motiviert, hat eine Vielzahl von Forschungsprojekten neue Methoden für die Planung und Optimierung öffentlicher Ladeinfrastruktur entwickelt. Forschungen zur Ladeinfrastruktur fokussieren sich vorzugsweise auf folgende drei Bereiche: 1) Optimierung, 2) Analysen zur räumlichen Verteilung und 3) Empfehlungen zur Aufstellung von Ladestationen. Während zahlreiche Studien wertvolle Einsichten in die Planung von Ladeinfrastruktur bieten, haben sie alle eine umfassende Einschränkung: es gibt bislang keinen Ansatz zur Berechnung, wieviel Ladeinfrastruktur insgesamt benötigt wird (10-19).

Infolgedessen ist das Ziel des Projektes LADEN2020 die Entwicklung einer systematisch nachvollziehbaren und konsistenten Strategie zum Aufbau einer Ladeinfrastruktur für eine Million E-Fahrzeuge bis zum Jahr 2020 in Deutschland. Dabei liegt der Fokus auf Pkws und leichten Nutzfahrzeugen.

Aufgabenstellung

Das Projekt LADEN2020 wurde von dem DLR-Institut für Verkehrsforschung, dem DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte und dem Institut für Verkehrswesen des Karlsruher Instituts für Technologie durchgeführt. Die Durchführung des Projektes fand in mehreren Arbeitspaketen statt (Abbildung 1). Hauptaufgabe des DLR-Instituts für Fahrzeugkonzepte lag in der Ermittlung der E-Fahrzeugbestandsszenarien. Das KIT-Institut für Verkehrswesen hat sich vornehmlich auf die Abschätzung des Ladeinfrastrukturbedarfs für den Fernverkehr konzentriert. Das DLR-Institut für Verkehrsforschung hat die weiteren Arbeitspakete bearbeitet mit besonderem Augenmerk auf den Ladeinfrastrukturbedarf im Alltagsverkehr. Im Folgenden werden die Ergebnisse zum Bedarf an öffentlicher und privater Ladeinfrastruktur für Deutschland präsentiert.

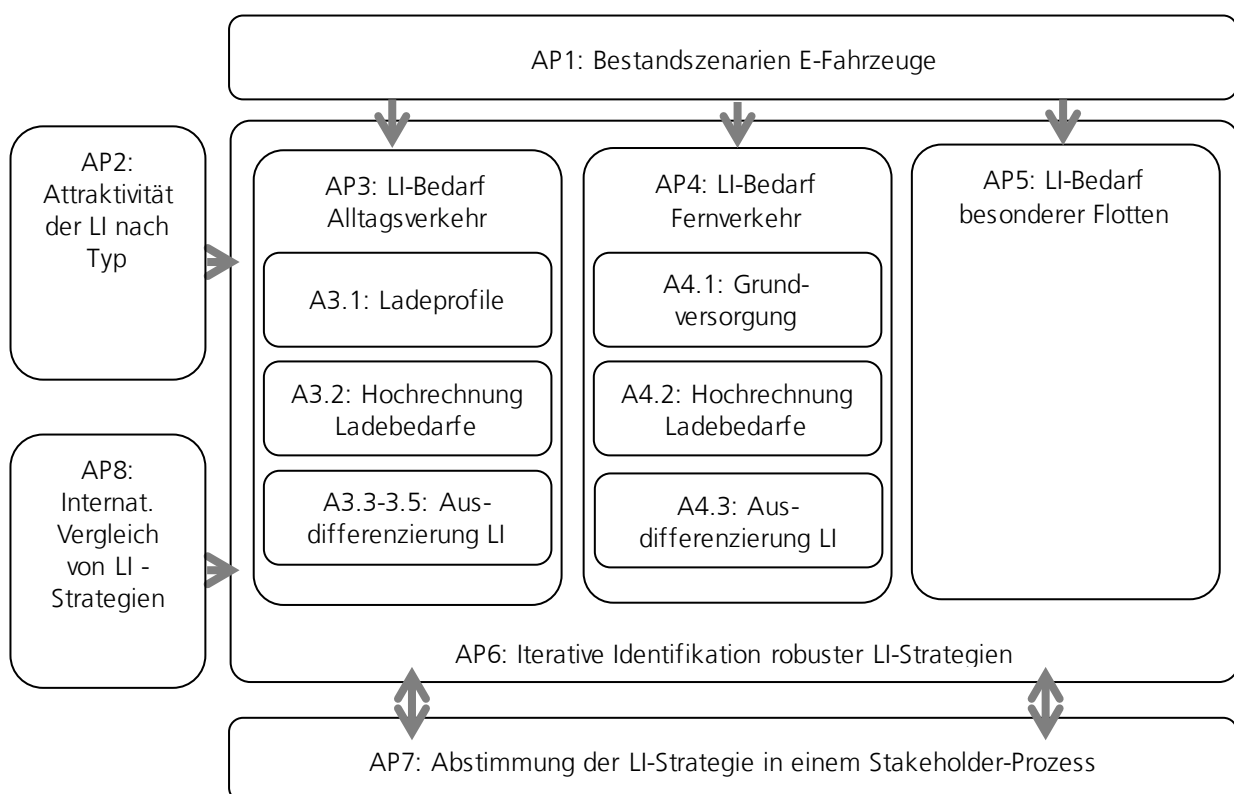


Abbildung 1: Projektstruktur von LADEN2020 zur Ermittlung szenarioabhängiger Ladeinfrastrukturbedarfe und Identifikation robuster Ladeinfrastrukturstrategien (AP – Arbeitspaket).

2. E-Fahrzeugbestandsszenarien

Im Rahmen des Projekts wurden die technischen Eigenschaften von E-Fahrzeugen auf Basis aktuell am Markt verfügbarer Fahrzeugkonzepte untersucht. Dabei wurde nach batterieelektrischen Fahrzeugen (BEVs) und Plug-in-Hybriden (PHEVs) unterschieden. Unter Berücksichtigung von Konzeptfahrzeugen und Prototypen, ergänzt um bereits bestätigte Modellankündigungen, findet eine Abschätzung der Lademöglichkeiten und der elektrischen Reichweiten von E-Fahrzeugen für das Jahr 2020 statt. Dazu wurden 45 aktuelle E-Fahrzeugmodelle (29 BEVs, 16 PHEVs) betrachtet.

Bis auf wenige Ausnahmen verfügen alle BEVs über die Möglichkeit der Schnellladung. In diesem Bericht wird das Laden ab einer Leistung von 22 kW als Schnellladen definiert. Die Schnellladung wird hierbei überwiegend über ein Schnellladesystem mit Gleichstrom (DC) realisiert. Die maximale Übertragungsleistung variiert je nach Hersteller zwischen 40 kW, 50 kW und 120 kW. Daher ist davon auszugehen, dass überwiegend eine DC-Schnellladetechnologie mit einer maximalen Übertragungsleistung von 50 kW zum Einsatz kommen wird. BEVs verfügen zudem über ein Ladesystem mit Wechselstrom (AC). Diesbezüglich variiert die maximale Übertragungsleistung je nach Hersteller zwischen 2,3 kW und 43 kW. Dabei sind fahrzeugseitige Wechselstrom-Schnelllader mit einer maximalen Übertragungsleistung von 22 kW oder 43 kW eher selten. Mit einer Ausnahme verfügen PHEV-Fahrzeuge derzeit nicht über die Möglichkeit der DC-Schnellladung. Werden die Fahrzeuge der nächsten Generation mit dem Combined Charging System ausgestattet, besteht jedoch die Möglichkeit der DC-Schnellladung. Ob dies jedoch für PHEV zutreffen wird, ist derzeit noch offen. Vor diesem Hintergrund gilt für LADEN2020 die Prämisse, dass die nächste Modellgeneration an PHEV über eine maximale Ladeleistung von 11,1 kW verfügt. Dies wurde im projektbegleitenden Stakeholderprozess auch bestätigt.

Die elektrischen Reichweiten innerhalb und zwischen BEVs und PHEVs unterscheiden sich. Für die Zukunft wird für Kleinwagen und die Mittelklasse eine Steigerung der maximalen elektrischen Reichweite für BEVs erwartet, wobei davon ausgegangen wurde, dass weiterhin eine Bandbreite von Reichweiten bei den Fahrzeugen vorhanden sein wird. In der Klasse großer Fahrzeuge wird die maximale Reichweite hingegen bei circa 500 km konstant bleiben. Hinsichtlich der elektrischen Reichweite von PHEVs wurde davon ausgegangen, dass diese sich teilweise an den gesetzlichen Rahmenbedingungen orientiert. Im Elektromobilitätsgesetz werden solche Fahrzeuge als E-Fahrzeuge gewertet, welche unter ausschließlicher Nutzung der elektrischen Antriebsmaschine eine Reichweite von mindestens 40 km vorweisen (20). Dies entspricht in etwa

der mittleren Reichweite aktueller und angekündigter PHEV-Modelle der nächsten Generation (die Bandbreite liegt hierbei zwischen 25 und 56 km). Für die aktuelle Fahrzeuggeneration wurde demnach davon ausgegangen, dass diese im Mittel über eine elektrische Normreichweite von 40 km verfügen. Für Fahrzeugmodelle der nächsten Generation wurde eine Steigerung der elektrischen Normreichweite auf 50 km antizipiert.

Die Entwicklung beziehungsweise der Markthochlauf des Bestandes von E-Fahrzeugen bis zum Jahr 2020 ist aufgrund des volatilen Charakters entscheidender Einflussfaktoren (z.B. Entwicklung der Batterietechnologie) ungewiss. Um dieser Unsicherheit Rechnung zu tragen, wurden in LADEN2020 zwei unterschiedliche Szenarien der Flottenzusammensetzung berücksichtigt: auf der einen Seite steht eine BEV-dominierte Flottenzusammensetzung (2/3 BEVs und 1/3 PHEVs); auf der anderen Seite eine PHEV-dominierte Flottenzusammensetzung (1/3 BEVs und 2/3 PHEVs). Für ein mittleres, repräsentatives Fahrzeug im Jahr 2020 ergeben sich unterschiedliche Normreichweiten für die betrachteten Szenarien (Tabelle 1). In der Realität kann die Reichweite der Fahrzeuge von den Angaben der Hersteller mitunter deutlich abweichen. Auf Basis einer Auswertung von 118 E-Fahrzeugen, mit insgesamt 2,3 Millionen Kilometer zu unterschiedlichen Jahreszeiten und in verschiedenen Regionen in Deutschland und den angrenzenden Ländern, ist eine mittlere Reduktion der Reichweite von circa 13 Prozent gegenüber den Herstellerangaben ermittelt worden (Tabelle 1) (21).

Tabelle 1: Normreichweiten und reale Reichweiten von E-Fahrzeugen im Jahr 2020.

Szenario		Elektrische Normreichweite (km)	Reale elektrische Reichweite (km)
2/3 BEV, 1/3 PHEV	BEV	325	283
	PHEV	49	43
1/3 BEV, 2/3 PHEV	BEV	288	251
	PHEV	49	43

3. Abschätzung von Nutzbarkeit und Attraktivität von Ladepunkten nach Typ

Zusätzlich zur Bereitstellung einer geeigneten Anzahl an Ladepunkten ist ebenso die Nutzbarkeit und Attraktivität von Ladeinfrastruktur für den Erfolg der Elektromobilität in Deutschland von Bedeutung. Unter Verwendung zweier Methoden wurden die beiden Kriterien untersucht. Zum einen fand eine Bewertung von Ladeinfrastruktur unter den Gesichtspunkten Kosten, Zeit, Umwelt und Aufwand statt. Zum anderen wurde die Nutzbarkeit und Attraktivität von Ladepunkten mit Hilfe einer Umfrage von mehr als 800 E-Fahrzeugnutzern analysiert.

Nutzerprofilanalyse auf Grundlage einer Quellenrecherche

Ausgangspunkt für die Abschätzung der LI-Attraktivität und Nutzbarkeit war eine umfangreiche Quellenrecherche. Diese diente der Identifikation relevanter Einflussfaktoren. Im Ergebnis waren vier wesentliche Faktoren festzustellen, von denen die LI-Attraktivität abhängt: Ladekosten, Ladezeit, Umwelt und Aufwand. Um die Attraktivität von Ladepunkttypen quantifizieren zu können, wurden die folgenden Annahmen getroffen: Die Berechnung der Ladezeiten erfolgt beispielhaft für ein BEV mit einer Batteriekapazität von 25 kWh und einer elektrischen Reichweite von 200 km. Die Abschätzung der Ladekosten basiert auf den aktuellen Marktpreisen. Für das Jahr 2016 lag der durchschnittliche Stromverbrauchspreis für Haushaltsstrom bei rund 0,29 €/kWh (22, 23). Bei Ladeleistungen bis zu 22 kW erfolgt eine Vollladung der Batterie auf 100 Prozent Batterieladestand. Liegt dagegen die Ladeleistungen über 22 kW wird eine Aufladung auf 80 Prozent Batterieladestand begrenzt. Grundsätzlich sind niedrige Ladeleistungen umweltfreundlicher (24) und der Nutzungsaufwand ergibt sich aus der Anmeldung und der Abrechnung an der jeweiligen Ladestation.

Auf der Grundlage der Quellenrecherche ergibt sich eine Entscheidungsmatrix, die anschließend von folgenden fünf Nutzerprofilen bewertet wurde: kostenempfindlich (P1), ohne Kosten-Zeit-Präferenz (P2), zeitempfindlich (P3), umweltbewusst (P4) und bequem (P5). Dabei wird unterschieden zwischen privatem Laden ohne Zeitaufwand und kostenpflichtigem Laden im halböffentlichen Raum. Auf Basis der aktuell verfügbaren Daten ergibt sich, dass für alle Nutzerprofile privates Laden am attraktivsten ist (Tabelle 2). Die geringste Attraktivität weisen Ladepunkte im öffentlichen Raum mit normaler Anschlussleistung (11,1 kW) auf.

Tabelle 2: Ergebnisse der Nutzbarkeit und Attraktivität von Ladepunkten nach Typ und Nutzerprofil.

Kriterien			Nutzerprofile				
Parkraum	Ladeleistung		P1	P2	P3	P4	P5
	maximal	im Mittel					
privat (zu Hause)	3,7 kW	2,86 kW	1	1	1	1	1
	11,1 kW	7,06 kW	2	2	2	2	2
	22,2 kW	14,06 kW	3	3	3	3	3
halböffentlich	11,1 kW	7,06 kW	8	8	8	4	5
	22,2 kW	14,06 kW	6	6	6	8	4
öffentlich	11,1 kW	7,06 kW	9	9	9	5	9
	22,2 kW	14,06 kW	6	6	6	8	8
	43,6 kW	30,07 kW	5	5	5	7	7
	50 kW (DC)	35,00 kW	4	4	4	6	6

Analyse auf Grundlage einer Nutzerbefragung

Zusätzlich zur Analyse von Kosten, Zeit, Umweltgesichtspunkten und Aufwand sind Nutzerpräferenzen wertvoll, um die Nutzbarkeit und Attraktivität von Ladepunkten aus Sicht aktueller E-Fahrzeugnutzer festzustellen. Um Nutzerpräferenzen zu erfassen, wurde eine Online-Umfrage mit insgesamt 843 Personen in Deutschland durchgeführt. Die Nutzer wurden zu ihrem persönlichen zusätzlichen Bedarf an öffentlicher Ladeinfrastruktur befragt.

Abbildung 2 stellt die Ergebnisse der Umfrage für Ladestationspräferenz je nach Ladeleistung, Nutzungshäufigkeit und Standort dar. Die Ergebnisse zeigen, dass Nutzer eine 22 kW AC-Ladeleistung bevorzugen. Für die Nutzungshäufigkeit ergibt sich ein heterogenes Bild. Allerdings ist die Angabe „1–3 Tage pro Monat“ die am häufigsten gewählte. Generell wünschen sich Nutzer öffentliche Ladeinfrastruktur an Standorten, an denen sie oft parken (Arbeit, Einkauf und Freizeit) und während kurzer Fahrtunterbrechungen (Stopp zum Laden). Die Stationen sind überwiegend außerhalb des Autobahnsystems (81 Prozent) erwünscht.

Aus der Umfrage ergeben sich drei zentrale Resultate hinsichtlich der Nutzbarkeit und Attraktivität von Ladepunkten. Erstens wird eine schnelle Wechselstrom-Ladeinfrastruktur (22 kW AC) präferiert. Zweitens ist langsame Ladeinfrastruktur (3,7 kW AC) für Stationen mit höheren Nutzungshäufigkeiten akzeptabel. Drittens ist eine schnelle Ladeinfrastruktur (50 kW DC) für selten benutzte Stationen erwünscht. Viertens ist eine langsame Ladeinfrastruktur akzeptabel für Standorte, an denen Fahrzeuge ohnehin lang stehen.

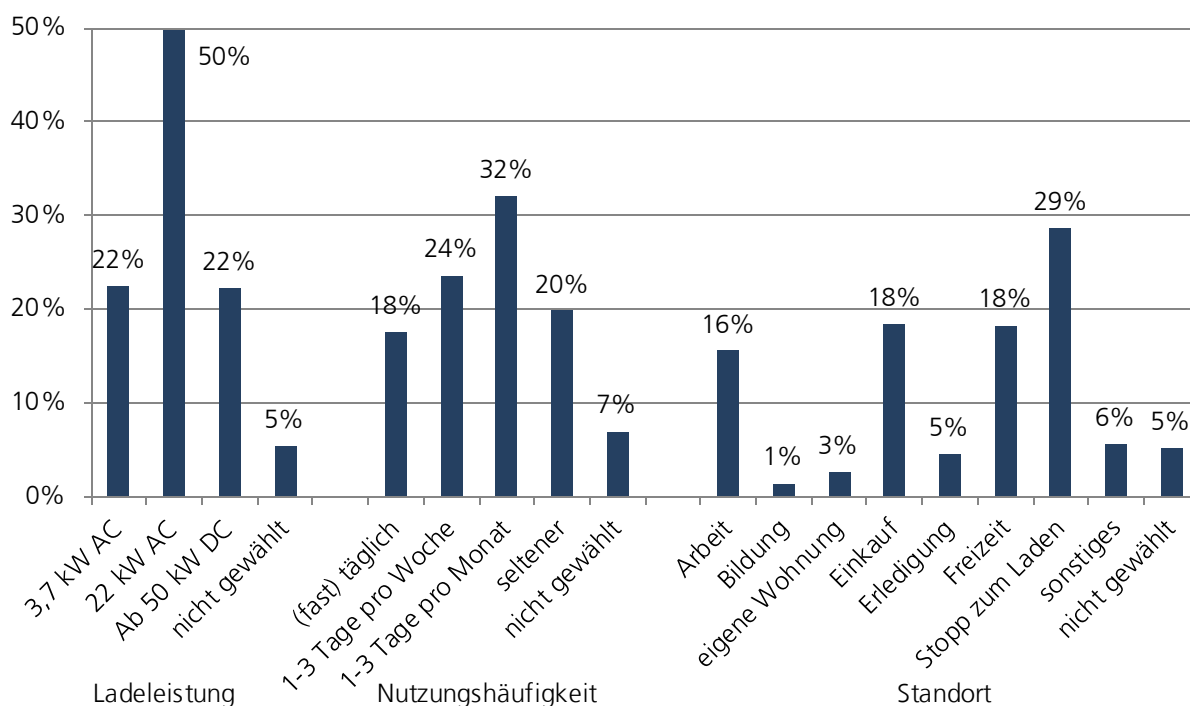


Abbildung 2: Ergebnisse für gewünschte Ladestationen von 843 E-Fahrzeugnutzern je nach Ladeleistung, Nutzungshäufigkeit und Standort.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Nutzer eine Mischung von allen Ladeinfrastruktureigenschaften erwartet. Zum einen sind unterschiedliche Ladeleistungen gefragt, wobei ebenso niedrige Ladeleistungen von den Nutzern akzeptiert werden. Zum anderen sollte sich die Ladeinfrastruktur über verschiedene Standorte verteilen, an denen die Nutzer ohnehin parken. Des Weiteren wird eine ausreichende Schnellladeinfrastruktur erwartet, die von den Nutzern zwar nicht so häufig aufgesucht wird, jedoch als Standort umso mehr gefragt ist. Insgesamt liegt die Mehrzahl der gewünschten Ladestationen außerhalb des Autobahnsystems. Die Auswertung der Umfrage hilft, die zur Ermittlung des Ladeinfrastrukturbedarfs geeigneten Annahmen zu bestimmen und die Ergebnisse für eine bedarfsgerechte Ladeinfrastruktur zu überprüfen.

4. Abstimmung der Annahmen zu Einflussfaktoren in einem Stakeholder-Prozess

Im Projekt musste im Rahmen der Analyse verschiedener möglicher LI-Strategie eine Vielzahl von Annahmen getroffen werden. Diese Annahmen und zugrundeliegenden Informationen wurden zusammengefasst, auf internationalen und nationalen Workshops präsentiert und mit Stakeholdern und Experten diskutiert. Der Schwerpunkt der Workshops lag darin, Anstöße und Rückmeldungen von nationalen und internationalen Experten im Bereich Elektromobilität zu bekommen. Der zeitliche Ablauf des Stakeholderprozesses ist in Abbildung 3 dargestellt.

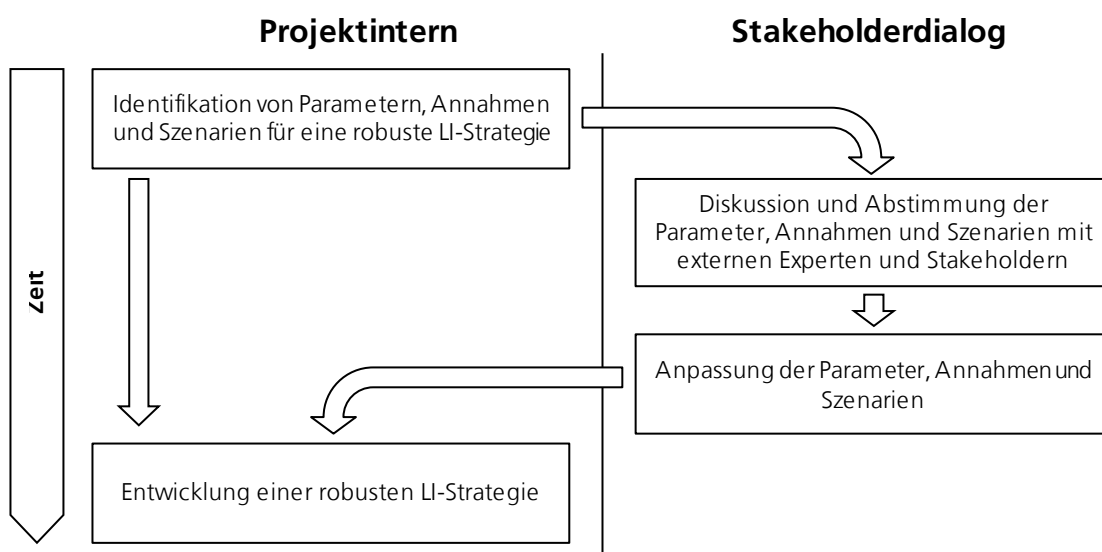


Abbildung 3: Ablauf zur Entwicklung einer robusten Ladeinfrastruktur Strategie.

Das Ergebnis des Stakeholder-Prozesses war im Wesentlichen die Definition eines Referenzszenarios für das Projekt LADEN2020 sowie sinnvolle Variationen von Annahmen, auf deren Grundlage mittels Sensitivitätsanalysen im weiteren Projektverlauf eine robuste LI-Strategie abgeleitet werden konnte. Insbesondere wurde für das Referenzszenario eine Flottenverteilung von 1/3 BEVs und 2/3 PHEVs gewählt. Durch die Entwicklung des E-Fahrzeugangebots, des E-Mobilitätmarkts, der allgemeinen Verbraucherpräferenzen und der Umweltvorschriften ist jedoch eine Verschiebung der Flottenanteile hin zu mehr BEVs vorstellbar. Daher wurde zusätzlich eine Sensitivitätsanalyse für eine Flottenverteilung von 2/3 BEVs und 1/3 PHEVs untersucht.

Darüber hinaus wurden im Rahmen des Stakeholderprozesses Annahmen zu zahlreichen weiteren Einflussfaktoren auf den Ladeinfrastrukturbedarf abgestimmt. Diese sind im Einzelnen im weiteren Bericht an den jeweils relevanten Stellen aufgeführt und erläutert.

5. Ableitung des Bedarfs an Ladepunkten für Ladevorgänge im Alltagsverkehr

Die Analyse der Ladeinfrastruktur für E-Fahrzeuge wurde wegen methodischer Unterschiede in Alltags- und Fernverkehr aufgeteilt. Die Abgrenzung von Alltags- und Fernverkehr liegt bei einer Wegelänge von 100 km. In diesem Kapitel werden das Konzept und die daraus resultierenden Ergebnisse zur Infrastruktur für den Alltagsverkehr präsentiert. Zusätzlich werden Sensitivitätsanalysen vorgenommen, um umfassende Infrastrukturstrategien abzuleiten und hieraus Schlüsse für den Aufbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur zu ziehen.

Methodik und übergreifende Annahmen

Viele Faktoren, die den Bedarf an Ladeinfrastruktur in der Zukunft beeinflussen, sind noch immer ungewiss. Dies gilt beispielsweise für technische Faktoren (z.B. elektrische Reichweite und Ladegeschwindigkeit), für Charakteristika von Nutzern (z.B. Verfügbarkeit von privater Ladeinfrastruktur) oder das Nutzerverhalten in Bezug auf Fahrverhalten und Ladepräferenzen. Daher wurde ein Konzept entwickelt, dass es erlaubt, Annahmen zu variieren und eine zeiteffiziente Analyse durchzuführen. Die meisten Annahmen in dem Konzept sind variabel und ermöglichen so eine große Bandbreite von Sensitivitätsanalysen. Es gibt jedoch zwei analysen-übergreifende Annahmen, die die Grundlage des Konzepts bilden:

- 1) *E-Fahrzeugnutzungsprofile in der nahen Zukunft entsprechen weitgehend den Nutzungsprofilen konventioneller Fahrzeuge heute*

Es wurde angenommen, dass die Nutzungsmuster von E-Fahrzeugen denen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ähneln. Es wurde lediglich von leichten Anpassungen in der Zielwahl, z.B. die Wahl eines Supermarktes mit Lademöglichkeit statt ohne, ausgegangen. Durch diese Annahme ist es möglich, die Daten von heute allgemein verfügbaren Verkehrserhebungen zu nutzen.

- 2) *E-Fahrzeuge werden bevorzugt dort geladen, wo sie ohnehin parken*

Außerdem wurde davon ausgegangen, dass E-Fahrzeuge vorzugsweise dort geladen werden, wo sie ohnehin parken. Forschungen zeigen, dass Erstnutzer von E-Fahrzeugen bevorzugt dort laden, wo sie bereits parken (z.B. zuhause, bei der Arbeit) (25). Daher wurden ähnliche Präferenzen für alle Nutzer von E-Fahrzeugen angenommen. Nur unter seltenen Umständen werden Nutzer halten, um an Schnellladestationen zu laden, da erhebliche Wartezeiten in Kauf zu nehmen sind.

Eine Übersicht der Methode der Ladeinfrastrukturanalyse ist in Abbildung 4 dargestellt. Basierend

auf dieser Methode wurde ein Analysemodell erstellt (*Current – Charging infrastructure for electric vehicles analysis tool*). Die folgenden Abschnitte beschreiben diese Methode im Detail und präsentieren die entsprechenden Ergebnisse für den Alltagsverkehr.

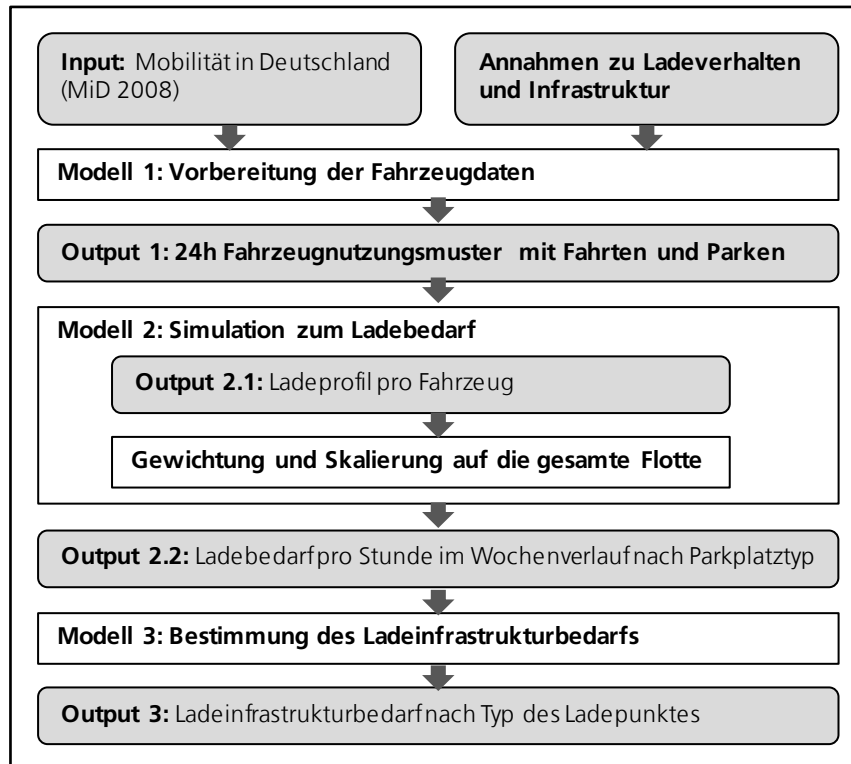


Abbildung 4: Übersicht der Methodik zur Bestimmung von bedarfsgerechter Ladeinfrastruktur, wie im *Current*-Modell implementiert (MiD: 2008 Mobilität in Deutschland).

Eingangsdaten und Datenvorbereitung

Als Datengrundlage für die Analyse wurde die aktuellste Version der deutschen Verkehrserhebung „Mobilität in Deutschland“ (MiD 2008) genutzt (26). Die Erhebung umfasst 25.922 Haushalte, 60.713 Personen, 34.601 Fahrzeuge und 193.290 Wege. Aus den verschiedenen Personen-, Fahrzeug- und Fahrtensätzen wurden für jedes Fahrzeug ein 24-Stunden Fahrtenbuch erzeugt. Die so entstandenen Fahrtenbücher enthalten alle Fahrt- und Parkaktivitäten, sowie die weiteren Eigenschaften von Fahrzeug, Fahrten und Parken, die nötig sind, um das später beschriebene Ladeverhalten zu simulieren. Die wichtigsten Schritte in der Datenaufbereitung werden im Folgenden beschrieben.

Auswahl von jüngeren Fahrzeugen und Klassifizierung nach Fahrzeugnutzungskategorie

Im Jahr 2020 wird die elektrische Fahrzeugflotte in Deutschland aus relativ jungen Fahrzeugen bestehen. Um der Tatsache gerecht zu werden, dass neuere Fahrzeuge andere Nutzungsmuster als ältere Fahrzeuge aufweisen, wurden alle Fahrzeuge, die älter als sechs Jahre sind, aus dem

Datensatz ausgeschlossen und nur die verbliebenden 16.419 Fahrzeuge genutzt. Darüber hinaus wurden alle Fahrzeuge, basierend auf der Jahresgesamtfahrleistung und der Einsatzhäufigkeit im Fernverkehr, in sechs Nutzungskategorien unterteilt (Tabelle 4). Die Einsatzhäufigkeit im Fernverkehr wurde auf Basis des *CUMILE*-Modells (*Car Usage Model Integrating Long Distance Events*) abgeschätzt (27). Diese Einteilung dient der Hochrechnung der 16.419 Fahrzeuge auf eine Million E-Fahrzeuge im weiteren Verlauf.

Ermittlung und Simulation der Parkplatzzugänglichkeit

Schließlich wurden die generierten Fahrtenbücher durch Parkinformationen ergänzt. 73 Prozent der Fahrzeuge in der MiD haben Zugang zu einem privaten Parkplatz zuhause. Für das Referenzszenario wurde jedoch eine 85-prozentige Wahrscheinlichkeit für einen privaten Parkplatz zuhause mit Ladestation angenommen. Diese Annahme basiert auf dem Durchschnittswert der nationalen Verkehrserhebung und dem Wert von 92 Prozent bei den Erstnutzern (25).

Informationen zur Parkplatzzugänglichkeit (privat, öffentlich zugänglich, öffentlich) an anderen Orten/Aktivitäten (z.B. Arbeit, Shopping und Freizeitaktivitäten) werden ebenfalls benötigt. Da hierzu keine Informationen aus der MiD verfügbar sind, wurden Wahrscheinlichkeiten für die Parkplatzzugänglichkeit nach Zweck und Parkdauer aus der Erhebung „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland“ (KiD 2010) abgeleitet. Auf dieser Grundlage wurden mittels Monte-Carlo-Simulation Parkplatzzugänglichkeiten für die Standvorgänge im MiD-Untersuchungsdatensatz ergänzt (28).

Simulation des Ladebedarfs

Auf Grundlage der 24-Stunden-Fahrtenbücher der Fahrzeuge wurde nun der Ladebedarf für jedes einzelne Fahrzeug und anschließend für die ganze Flotte bestimmt. Zuerst wurden spezifische Annahmen für das Referenzszenario getroffen. Daraufhin wurden Ladebedarfsprofile für jedes einzelne Fahrzeug bestimmt. Anschließend wurden diese Profile für den Verlauf einer Woche für die gesamte Flotte skaliert und gewichtet. Das Ergebnis ist letztlich der Ladebedarf der gesamten E-Fahrzeugflotte je Stunde im Wochenverlauf.

Annahmen des Referenzszenarios

Zusätzlich zu den zuvor beschriebenen übergreifenden Annahmen, wurden weitere spezifische Annahmen getroffen, die nötig waren, um die Analyse zum Ladebedarf durchzuführen. Tabelle 3 fasst alle Annahmen für das Referenzszenario zusammen. Potentiell entscheidende Maßnahmen

werden später in einer Sensitivitätsanalyse variiert, um die umfassende Infrastrukturstrategie auf ihre Robustheit zu überprüfen.

Tabelle 3: Annahmen des Referenzszenarios für die Analyse der Ladeinfrastruktur in Deutschland bei einer Million E-Fahrzeugen im Jahr 2020.

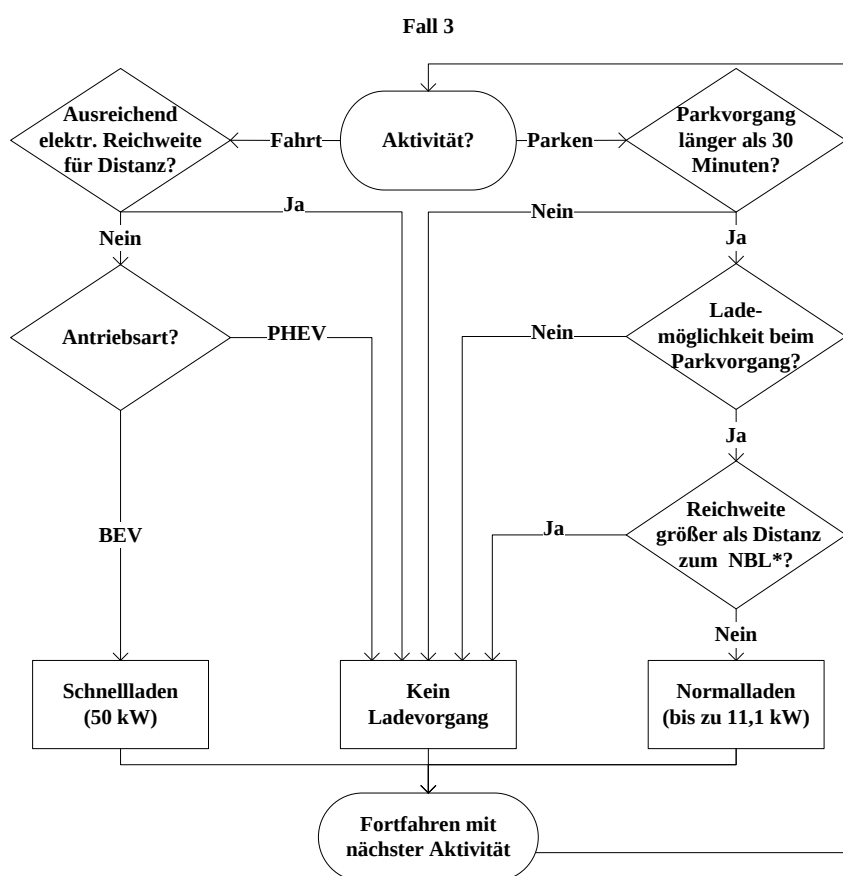
	Details	PEV Typ	Annahmen
Flotte	Verteilung einer Million E-Fahrzeugen nach Fahrzeugtyp	BEV PHEV	333,000 667,000
elektrische Reichweite	durchschnittliche elektrische Reichweite für das Jahr 2020	BEV PHEV	200 km 40 km
maximale Streckenlänge	limitierte Streckenlänge von Einzelfahrten in Abgrenzung zum Fernverkehr	BEV/PHEV	100 km
Normale Ladeinfrastruktur	Beim Laden zuhause und an sonstigen Orten	BEV/PHEV BEV/PHEV	3.7 kW AC 11.1 kW AC
Schnelle Ladeinfrastruktur	Fahrtunterbrechung ¹	BEV	50 kW DC
Mindestens benötigte Zeit für einen Ladevorgang	Normales Laden	BEV/PHEV	30 Minuten
Laden zuhause	Anteil der Fahrzeuge mit privater Park- und Lademöglichkeit zuhause	BEV/PHEV	85%
Ladestand am Anfang des Tages	Verfügbare Reichweite, falls kein Laden Zuhause möglich ist	BEV/PHEV	50% der elektrischen Reichweite
Erwartete Distanz zum nächsten Ladepunkt (nächster Tag)	Erwartete Entfernung zum nächsten verfügbaren Ladepunkt, falls kein Laden zuhause oder bei der Arbeit möglich ist	BEV/PHEV	100 km
Verlängerung der Reichweite mit Verbrennungsmotor	Reichweitenverlängerung mit herkömmlichem Verbrenner, um den nächsten optimalen Ladepunkt zu erreichen	PHEV	25 km
Elektrischer Fahranteil	Anteil der elektrisch zurückgelegten Strecke	PHEV	60%

¹ Reichweite auf 80% der Batteriekapazität limitiert

Generierung von individuellen 24-Stunden Ladeprofilen

Nach der Bestimmung der Fahrtenbücher für alle Fahrzeuge des Datensatzes wurde der Ladebedarf für jedes einzelne Fahrzeug mithilfe eines Ladealgorithmus analysiert. Jedes Fahrzeug

wurde sowohl als BEV, wie auch als PHEV bewertet und musste die täglichen Fahrten mit den für die jeweilige Klasse spezifischen Laderegeln absolvieren. Es wurden vier Fälle identifiziert: Fall 0 – Es wird kein Laden benötigt, da das Fahrzeug nicht benutzt wird, Fall 1 – Laden zuhause ist ausreichend, Fall 2 – Laden zuhause und/oder bei der Arbeit ist ausreichend, Fall 3 – Laden zuhause und/oder bei der Arbeit reicht nicht aus, sodass eine zusätzliche öffentliche Ladeinfrastruktur benötigt wird (Abbildung 5). Dies führt für alle Ladeereignisse zur benötigten Ladezeit, der gesamten Parkzeit und zum Ort des Ladeereignisses. Dadurch ergeben sich zeitspezifische Ladeprofile (Mikrodaten) für jedes Fahrzeug.



*NBL = Nächster bevorzugter Ladepunkt zuhause oder bei der Arbeit

Abbildung 5: Entscheidungslogik für die Wahl einer Ladestation, falls das Laden zuhause und bei der Arbeit nicht ausreichend ist (Fall 3).

Skalierung des Datensatzes auf die gewünschte Flottengröße

Aus den generierten 24-Stunden-Ladeprofilen für die Einzelfahrzeuge wurde der Datensatz auf die gesamte Flottengröße skaliert. Wie vorher beschrieben (*Auswahl von jüngeren Fahrzeugen und Klassifizierung nach Fahrzeugnutzungskategorie*) wurden dafür die Daten zur Fahrzeugverteilung basierend auf der jährlichen Gesamtfahrleistung und dem Fernverkehrsanteil

genutzt. Die ursprünglichen Fahrzeugdaten wurden auf eine Matrix verteilt (Werte in runden Klammern in Tabelle 4). Anschließend wurde die Verteilung der E-Fahrzeuge geringfügig hin zu einer höheren Jahresfahrleistung und zu einem geringeren regelmäßigen Einsatz im Fernverkehr verschoben (Werte ohne Klammern in Tabelle 4). Auf Grundlage der so bestimmten Anteile wurden die 16.419 Fahrzeuge auf 333.000 BEVs und 667.000 PHEVs hochgerechnet.

Tabelle 4: Hochrechnung der E-Fahrzeuge basiert auf Annahmen zur Verteilung der E-Fahrzeuge auf Nutzungstypen in 2020 (geringe Fahrleistung – unter 10.000 km/a, mittlere Fahrleistung – zwischen 10.000 und 20.000 km/a, hohe Fahrleistung – über 20.000 km/a) (kein regelmäßiger Einsatz – null bis elf Fahrten von über 150 km/a, regelmäßiger Einsatz – zwölf oder mehr Fahrten von über 150 km/a).

	kein regelmäßiger Einsatz im Fernverkehr	← Regelmäßiger Einsatz im Fernverkehr
geringe Jahresfahrleistung	20% (26%)	0% (0%)
mittlere Jahresfahrleistung	30% (25%)	13% (16%)
hohe Jahresfahrleistung	10% (2%)	27% (31%)

%-Verteilung der Elektrofahrzeuge (E-Fzg.) im Jahr 2020
 (%)-Verteilung der Fahrzeuge bis 6 Jahre auf Nutzungstypen im Jahr 2008, Originaldaten aus MiD 2008

Analyse der Ladebedarfsprofile

Letztlich wurden die 24-Stunden Ladebedarfsprofile von unterschiedlichen Wochentagen kombiniert, um den Ladebedarf für eine typische repräsentative Woche zu erhalten. Das daraus resultierende Ladebedarfsprofil für eine Million E-Fahrzeuge ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Ladeprofile basieren auf der Zeit, in der die Ladeinfrastruktur belegt ist: Das beinhaltet die Zeit des Ladevorgangs und die Zeit nach dem Ladevorgang während das geparkte Fahrzeug den Ladepunkt weiterhin blockiert.

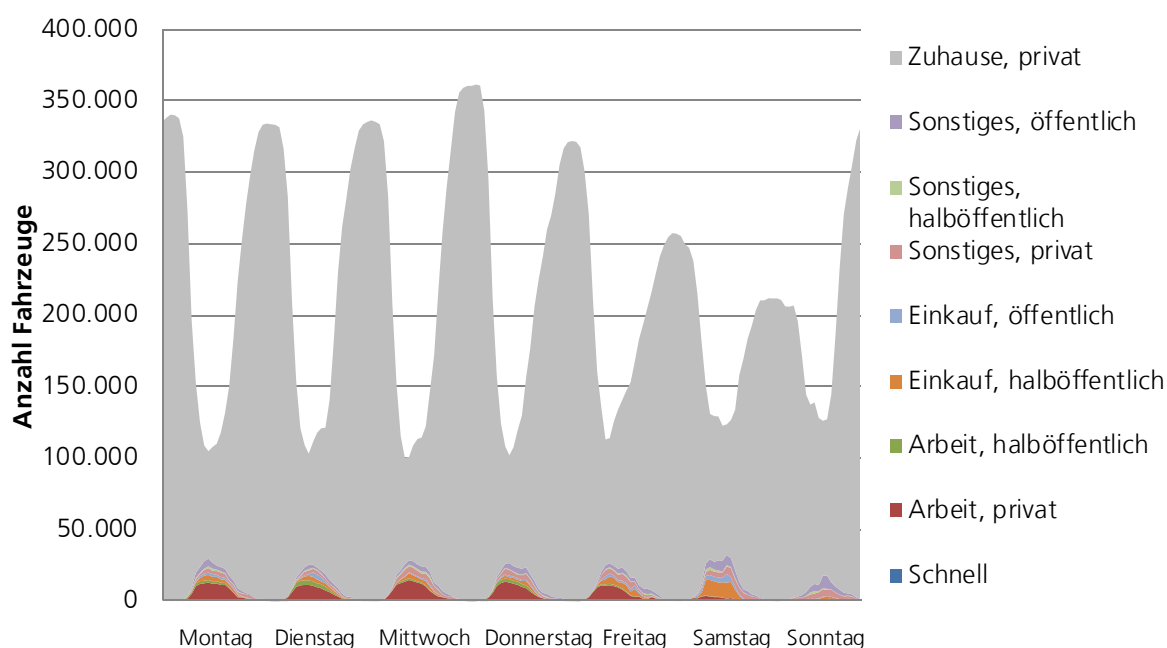


Abbildung 6: Ergebnis des Referenzszenarios im Alltagsverkehr: Belegung der Ladeinfrastruktur durch E-Fahrzeuge im Wochenverlauf.

Die Ergebnisse zeigen, dass das private Laden zuhause die anderen Ladeereignisse klar dominiert. Um die Ladeprofile für die anderen Standorte klarer darzustellen, werden die Ergebnisse in Abbildung 7 ohne Laden zuhause dargestellt.

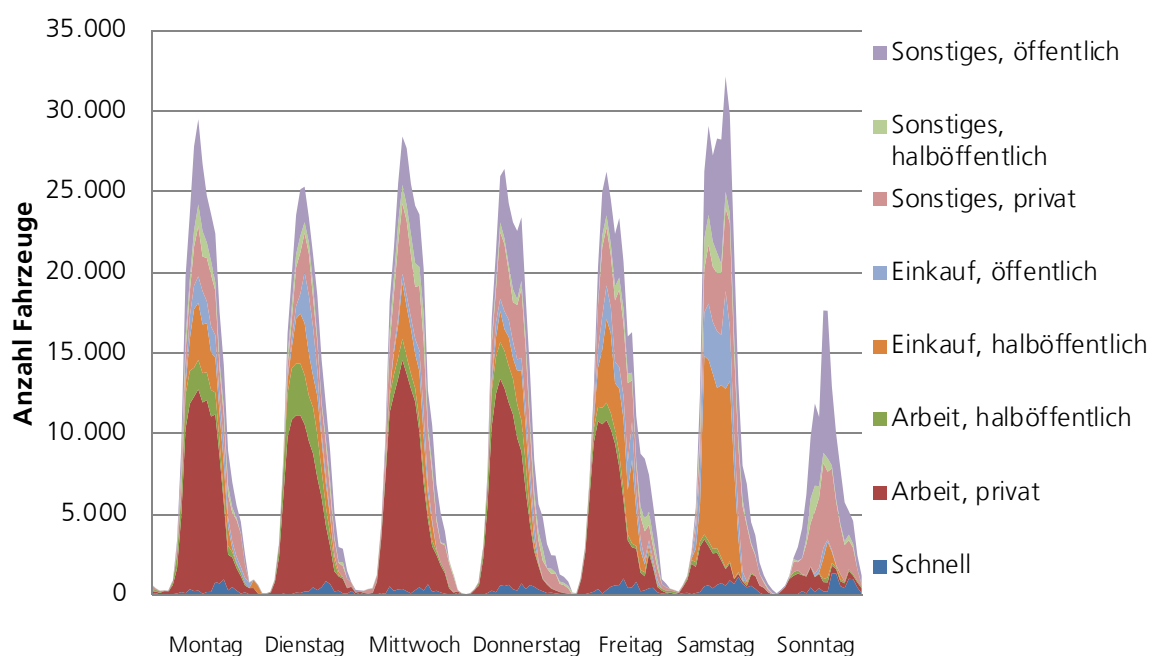


Abbildung 7: Ergebnis des Referenzszenarios im Alltagsverkehr (ohne zuhause): Belegung der Ladeinfrastruktur durch E-Fahrzeuge im Wochenverlauf.

Bestimmung des Ladeinfrastrukturbedarfs

Nachdem der Ladebedarf für jede Stunde einer Woche und die Ladestandorte für die gesamte Flotte bestimmt wurden, wird in dem nächsten Schritt der Methode der Ladebedarf in Ladeinfrastrukturbedarf überführt. Es gibt verschiedene potenzielle Ansätze, um die Ladeinfrastruktur aus dem Ladebedarf zu berechnen. Ein Ansatz ist beispielsweise die Verwendung einer Kurve des Infrastrukturangebotes und des Bedarfs, um ein effizientes und benutzerfreundliches Infrastruktursystem sicherzustellen (29). Ein anderer Ansatz für Normal- und Schnellladeinfrastruktur wird unten ausgeführt.

Bedarf an normaler Ladeinfrastruktur

Die Ladebedarfsprofile geben die Anzahl elektrischer Fahrzeuge an, welche die Ladeinfrastruktur im Verlauf einer Woche beanspruchen. Aus diesen Profilen kann die maximale Anzahl von ladenden Fahrzeugen je Standorttyp im Wochenverlauf bestimmt werden. Diese Zahl kann als Anzahl notwendiger Ladepunkte in Deutschland interpretiert werden, wenn die Ladeinfrastruktur je Standorttyp einmal im Wochenverlauf gänzlich ausgelastet ist. Die so ermittelte nachfrageorientierte Ladeinfrastruktur für das Referenzszenario ist in Tabelle 5 ausgeführt.

Tabelle 5: Ergebnis Referenzszenario: Maximale Belegung der Ladeinfrastruktur im Wochenverlauf (für die halböffentlichen und öffentlichen Ladepunkte entspricht dies dem jeweiligen Gesamtbedarf an Ladepunkten nach Standorttyp und Zugänglichkeit).

Typ	Ort	Ladeleistung	Privat	Halböffentlich	Öffentlich
Normal	Zuhause	3,7 kW (AC)	361.200	–	–
	Arbeit	11,1 kW (AC)	14.200	3.200	–
	Einkaufen	11,1 kW (AC)	–	11.200	6.100
	Sonstiges	11,1 kW (AC)	6.500	1.900	9.100
Schnell	Alltagsverkehr	50 kW (DC)	–	1.300	

Bedarf an Schnellladeinfrastruktur

Wie Tabelle 5 zeigt, werden nach dem Referenzszenario 1.300 Schnellladepunkte für tägliche Fahrten benötigt. In Anbetracht einer räumlichen Verteilung über Deutschland scheinen diese Werte für ein qualitativ hochwertiges Ladeinfrastrukturnetzwerk zu gering zu sein. Aus einem psychologischen Blickwinkel betrachtet, benötigt ein BEV-Nutzer einen Grad an Sicherheit bei der Suche nach der nächstgelegenen Schnellladestation in einer akzeptablen Entfernung. Daher wurde eine ergänzende Methode entwickelt, um die Anzahl zusätzlicher Schnellladepunkte für eine ausreichende Dichte zu ermitteln.

Unter der Annahme, dass die Schnellladepunkte gleichmäßig über Deutschland verteilt sind, kann eine angestrebte Netzwerkdichte bestimmt werden. Indem die Fläche Deutschlands in identische, ringförmige Gebiete für jeden Ladepunkt geteilt wurde, kann so die durchschnittliche Entfernung zum nächstgelegenen Ladepunkt dargestellt werden. Bei einer durchschnittlichen Entfernung von 4 km zum nächsten Ladepunkt werden bei maximaler Nachfrage im Wochenverlauf zusätzlich zu den 1.300 oben aufgeführten Schnellladepunkten 2.500 bis 4.000 Schnellladepunkte benötigt. Die exakte Zahl an zusätzlichen Schnellladestationen hängt von der Ausstattung der Normalladestationen mit Schnellladefunktionalität ab.

Sensitivitätsanalyse

Zum besseren Verständnis, welche Attribute den Ladeinfrastrukturbedarf beeinflussen, wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Zuerst wurde eine BEV-dominierte Flotte untersucht (2/3 BEVs, 1/3 PHEVs). Als Zweites wurde Laden am Straßenrand in Wohngebieten vorgesehen. Daraufhin wurde die elektrische Reichweite von BEVs und PHEVs um je 50 Prozent erhöht. Zuletzt wurde der Prozentanteil von Fahrzeugen, die zuhause laden können, auf 95 Prozent beziehungsweise 73 Prozent (gemäß dem Anteil der MiD-Studie) erhöht. Die Ergebnisse dieser Sensitivitätsanalysen werden in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Ergebnis der Robustheitsanalyse der Sensitivitätsanalyse: Maximale Belegung der Ladeinfrastruktur im Wochenverlauf (Aufgrund von Rundungen weicht die genannte Summe von der Summe der gerundeten Zahlen ab), entspricht der Anzahl benötigter Ladepunkte.

Typ	Ort	Referenz	2/3 BEV, 1/3 PHEV	am Straßen- rand	Reich- weite +50 %	Zuhause 95 %	Zuhause 73 %
Normal	Halb- öffentlich	16.300	15.400	9.100	12.300	11.900	23.200
Normal	Öffentlich	15.200	10.100	69.100	13.700	13.100	17.700
Schnell		1.300	2.700	1.100	1.200	1.300	1.400
Summe		32.900	28.200	79.400	27.200	26.400	42.400

Diskussion

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse liefern interessante Einsichten im Hinblick auf Bedarf an öffentlicher Ladeinfrastruktur. Eine PHEV-dominierte Flotte benötigt im Ganzen betrachtet demnach mehr Ladeinfrastruktur als eine von BEVs dominierte Flotte. Wegen der kleineren Batterien von PHEVs benötigen sie für einen hohen elektrischen Fahranteil mehr Ladeinfrastruktur. Aufgrund der Tatsache, dass technologiebedingt einzig BEVs Schnellladestationen benutzen können, benötigt eine PHEV-dominierte Flotte jedoch

erwartungsgemäß weniger Schnellladeinfrastruktur.

Des Weiteren ist ein Angebot von Ladestationen am Straßenrand in Wohngebieten extrem ineffizient: Die notwendige öffentliche Ladeinfrastruktur wird dadurch mehr als verdoppelt. Grund hierfür ist hauptsächlich der durch die langen Belegungszeiten ineffiziente Gebrauch dieser Infrastruktur. Aufgrund dieser Informationen raten wir davon ab, Wohngebiete mit einer solchen Infrastruktur auszurüsten, es sei denn, es bieten sich hierfür sehr kostengünstige Lösungen.

Eine wachsende Reichweite von elektrischen Fahrzeugen reduziert die Infrastruktur, aber in einem geringeren Maß als Reichweite zunimmt. Bei einer Erhöhung der Reichweite der BEVs und PHEVs um 50 Prozent reduziert sich die öffentliche Ladeinfrastruktur lediglich um 17 Prozent. Dies lässt den Schluss zu, dass nahezu unabhängig von der Reichweite auf absehbare Zeit ein Bedarf für Ladeinfrastruktur vorhanden sein wird. Vor allem für Nutzer ohne Lademöglichkeiten daheim oder am Arbeitsplatz ist diese Infrastruktur essenziell.

Zuletzt zeigt sich, dass die Möglichkeit am eigenen Haus zu laden, einen signifikanten Effekt auf die öffentliche Ladeinfrastruktur hat. Ein zehn prozentiger Anstieg von Haushalten mit privater Lademöglichkeit reduziert die öffentliche Ladeinfrastruktur um 20 Prozent, eine zwölf prozentige Abnahme hingegen lässt die öffentliche Ladeinfrastruktur um 29 Prozent steigen. Selbst für den Fall, dass jeder eine solche Lademöglichkeit zuhause besitzt, werden trotzdem 23.300 öffentliche Ladepunkte benötigt (eine Reduzierung um 29 Prozent). Die Ergebnisse lassen daher den Schluss zu, dass allein eine private Ladeinfrastruktur zuhause nicht alle Ladebedürfnisse abdeckt.

Unterm Strich zeigen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen, dass je nach Annahmen bzw. Ladeinfrastrukturstrategie die Bandbreite der Anzahl notwendiger Ladepunkte sehr groß ist. Auch die in anderen Quellen als Größenordnung ausgewiesenen etwa hunderttausend Ladepunkte für eine Million Fahrzeuge bzw. ein Verhältnis von einem öffentlichen Ladepunkt zu zehn Elektrofahrzeugen kann – je nach Konstellation – notwendig sein. Im Jahr 2020 sieht die Nationale Plattform für Elektromobilität (NPE) einen Bedarf von circa 181.000 öffentlich zugängliche Ladepunkte für 1,1 Millionen E-Fahrzeuge (30), während Blaser in seinen Berechnungen einen Bedarf von 126.000 Ladepunkten identifiziert (31). Gleichzeitig zeigen die obigen Ergebnisse, dass es möglich ist, die Ladeinfrastruktur effizient aufzubauen und damit mit deutlich weniger Ladeinfrastruktur auszukommen, indem insbesondere schlecht ausgelastete Ladeinfrastruktur am Straßenrand von Wohngebieten vermieden wird.

6. Ableitung des Bedarfs an Ladepunkten für Ladevorgänge im Fernverkehr

Methodisches Vorgehen, Datengrundlagen und Annahmen

Um eine bedarfsgerechte und nachfrageorientierte Abschätzung der Ladeinfrastruktur im Fernverkehr durchzuführen, wird ein anderer Modelansatz genutzt. Dieser ermittelt den Bedarf im Fernstraßennetz aus der Nutzung der Kraftfahrzeuge auf bestimmten Distanzen im Fernverkehr unter Berücksichtigung typischer Nutzungsmuster. Dazu muss zunächst eine Abbildung des Ladebedarfs für diese Nutzungsmuster und anschließend die räumliche Verortung des Ladebedarfs im Fernstraßennetz erfolgen. Vor diesem Hintergrund erfolgte eine Kombination unterschiedlicher Datenquellen und Modellansätze, um sowohl den Ladebedarf zu bestimmen, als auch Hinweise abzuleiten, wie eine räumliche Verortung dieses Bedarfs an Ladeinfrastruktur zu erfolgen hat. Das Modell besteht aus drei Komponenten und bildet einen flexiblen Rahmen, um variierende Annahmen und Szenarien in ihren Auswirkungen auf den Ladebedarf bestimmen zu können. Damit können auch die relevanten Einflussfaktoren auf den Ladebedarf im Fernstraßennetz ermittelt und quantifiziert werden (Abbildung 8).

Bestimmung von Umfang und Struktur der Nachfrage im Fernverkehr

Eine wesentliche Ausgangsprämisse für eine Abschätzung der Nutzung elektrischer Fahrzeuge ist, dass die Nutzungsmuster konventionell betriebener Fahrzeuge im Fernverkehr als Referenz herangezogen werden. Damit beschreibt der erste Teil des Modells (Nutzungsmodell Fahrzeuge), wie konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor im Fernverkehr genutzt werden. Hierfür wurde das Pkw-Nutzungsmodell CUMILE (Car Usage Model Integrating Long Distance Events) benutzt (27). CUMILE modelliert die Tagesfahrleistung einer repräsentativen Pkw-Flotte für jeden Tag eines Jahres. Damit liegen Informationen einer großen Stichprobe vor, die Daten zur Nutzung der Fahrzeuge im Verlauf eines Jahres an verschiedenen Tagen im Alltags- und Fernverkehr liefert.

Räumliche Darstellung der Nachfrage

Der zweite Teil des Abschätzungsmodells (Nachfrageseite und Berücksichtigung der Netzbelastung) basiert auf dem Umlegungsergebnis eines deutschlandweiten Verkehrsmodells (VALIDATE (32)) und bildet die Grundlage zur Abschätzung des Ladebedarfs im Fernverkehr. Es besteht aus einem attribuierten Netzmodell des Hauptstraßennetzes, den Verkehrsmengen und damit der Nachfrage (Pkw und Lkw) sowie der Umlegung dieser Nachfrage auf das Netz. Unter Nutzung des VALIDATE-Modells erfolgt in der Umlegung eine streckenfeine Abbildung der Nachfrage. Darin sind alle relevanten Quell-Ziel-Relationen (Matrix-Elemente mit Nachfrage) und

deren Routen aufgelistet.

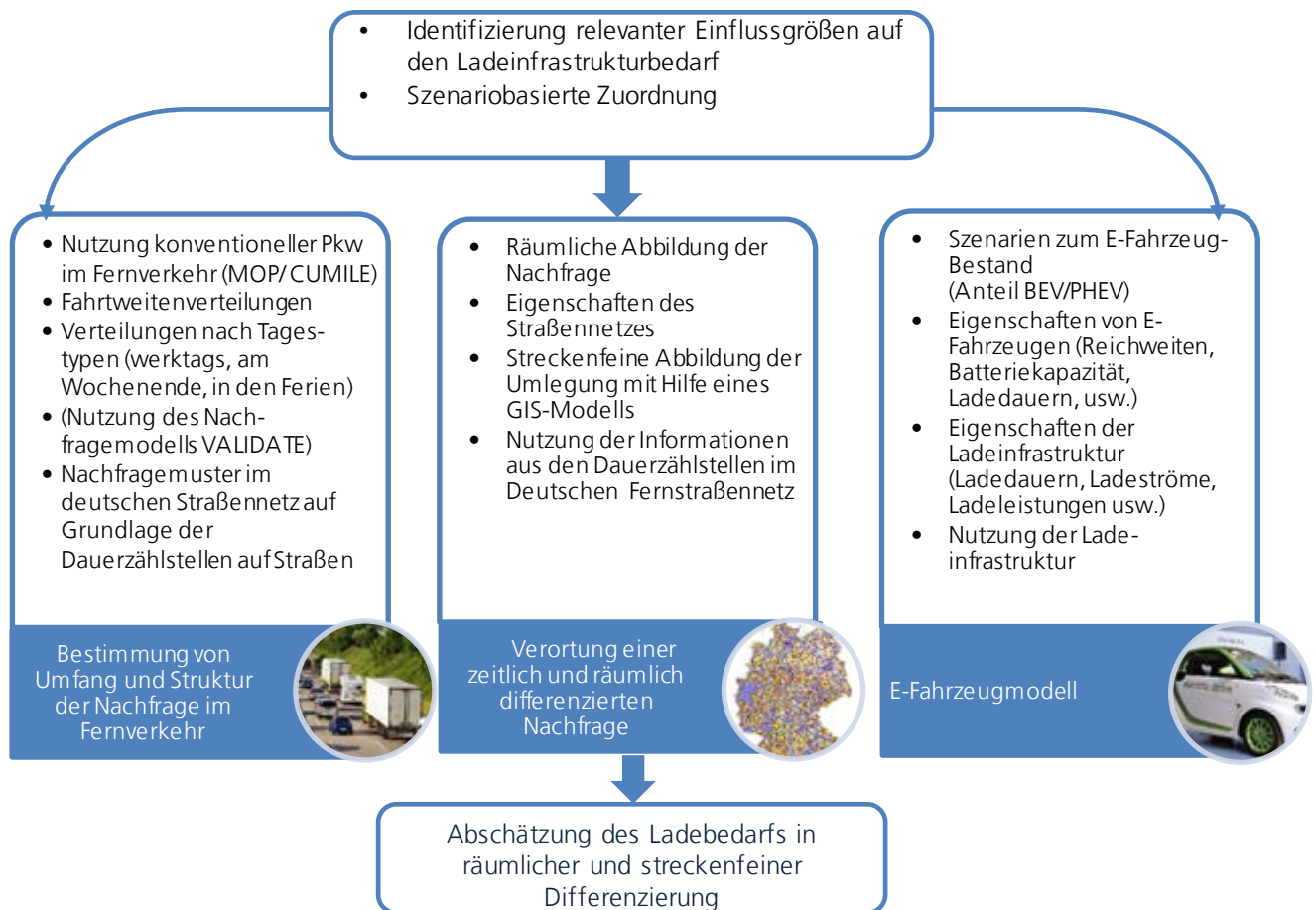


Abbildung 8: Gesamtmodellübersicht zur Abschätzung des Ladeinfrastrukturbedarfs im Fernverkehr.

Nutzung eines Geographischen Informationssystems

Die relevanten Routeninformationen aus VALIDATE wurden in einem Geographischen Informationssystem (GIS) für alle Netzelemente einer Route als Knotenabfolge mit ihren jeweiligen Geokoordinaten gelistet. Aufbauend auf dem Knotenabfolge-Modell im GIS-System wurden zunächst die Ladevorgänge auf den jeweiligen Routen räumlich verortet. Zur Abschätzung eines Ladebedarfs wurden unter der Annahme eines relevanten Anteils von E-Fahrzeugen die Anzahl der relevanten Fahrten für jede Quell-Ziel-Relation aus der jeweils betrachteten Verkehrszelle berechnet. Darauf aufbauend wurden die Anzahlen der Ladevorgänge für alle Quell-Ziel-Relationen bestimmt. Schließlich wurden die Ladevorgänge je Streckenelement (über alle dieses Streckenelement nutzenden Quell-Ziel-Relationen) aufsummiert. Daraus resultiert die kumulierte Anzahl der Ladevorgänge je Streckenelement, welche sich wiederum als

Ladevorgangsdichten abbilden lassen. Insgesamt lässt sich über die Summation und Hochrechnung der Nachfrage und Berücksichtigung des Anteils an E-Fahrzeugen ein räumlich differenzierter Ladebedarf ableiten (Abbildung 9).

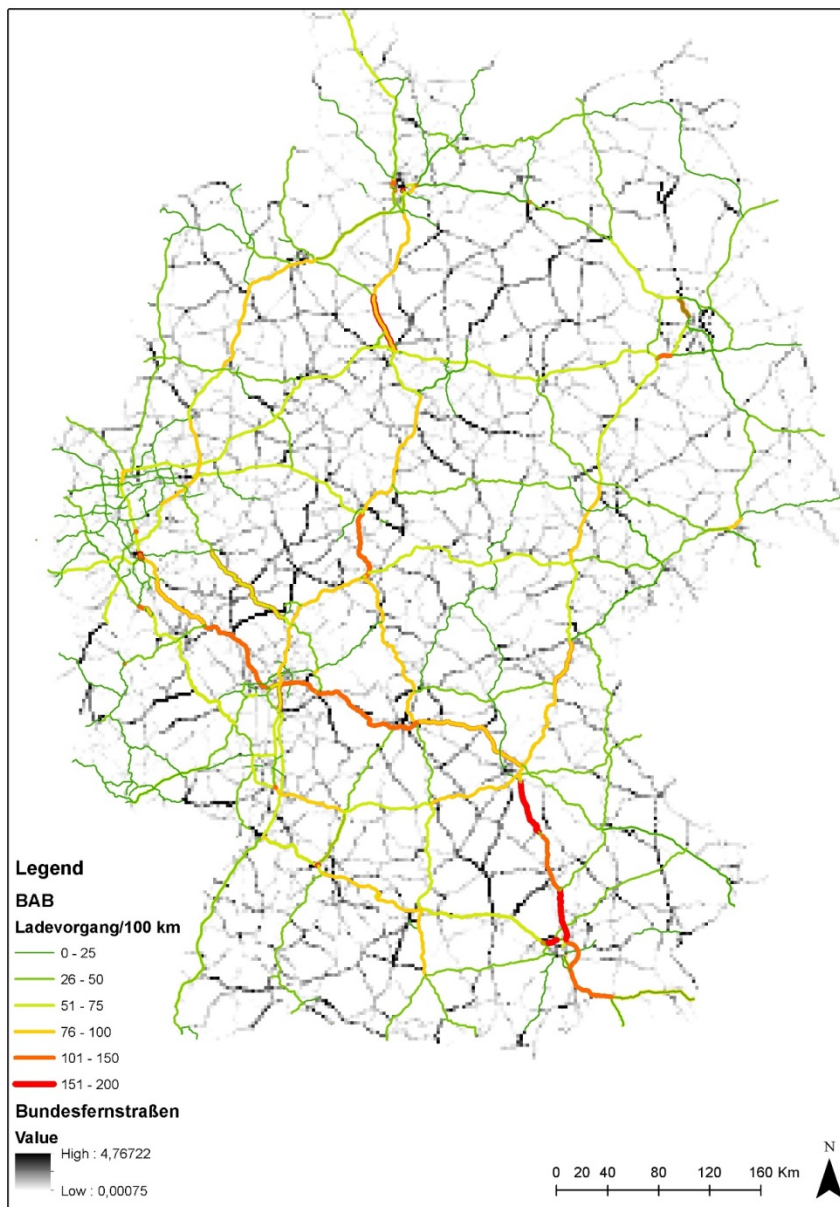


Abbildung 9: Ladevorgänge im Fernverkehr als Dichte (Ladevorgang pro 100 km Streckenabschnitt). Ladevorgänge auf Bundesfernstraßen werden in Rasterzellen dargestellt, dabei bilden schwarze Zellen eine hohe und graue Zellen eine entsprechend niedrigere Anzahl von Ladevorgängen ab.

Nutzung der Informationen aus den Dauerzählstellen im Deutschen Fernstraßennetz

Es ist davon auszugehen, dass sich die Nachfrage im Fernverkehr zwischen Werktagen und dem Wochenende aber auch in der Ferienzeit aufgrund des Ferienreiseverkehrs deutlich unterscheidet. Um diese Nachfrageunterschiede in Verbindung mit dem VALIDATE-Modell abzuschätzen und

räumlich differenziert betrachten zu können, wurden die durch die Bundesanstalt für Straßenwesen herausgegebenen Zählergebnisse der Dauerzählstellen genutzt (33).

Eigenschaften der E-Fahrzeuge und der Ladeinfrastruktur

Der dritte Teil des Abschätzungsmodells (E-Fahrzeugmodell) beschreibt die E-Fahrzeugeigenschaften basierend auf den Szenarien und Annahmen, die im Kapitel 5 (Alltagsverkehr) beschrieben sind. Grundsätzlich wird die Annahme getroffen, dass alle Fahrzeuge voll aufgeladen starten (100 Prozent Ladestand vor dem Reisebeginn). Es findet ein Aufladen statt, sobald der Ladezustand auf circa 20 Prozent der Gesamtladekapazität gesunken ist. Aufgeladen wird bei einem Schnellladevorgang jeweils bis zu einem Ladezustand von 80 Prozent der Gesamtladekapazität. PHEV fahren zunächst im elektrischen Modus, anschließend wird im Verbrennungsmodus gefahren: Aufgeladen wird erst, wenn ohnehin ein Tankvorgang erfolgen würde (nach einer Fahrtweite von 400 km).

Die Ladeleistung der Ladeinfrastruktur wird einheitlich für die Modellüberlegungen mit 50 kW angesetzt. Ein Ladevorgang kurz vor dem Erreichen des Ziels (Schwellenwert ≤ 20 km) findet nicht statt. Hier wird unterstellt, dass die Fahrer dann bis zum eigentlichen Ziel durchfahren.

Zeitliche Verteilung des Ladebedarfs

Das zeitliche Profil der Netzbelastung durch Pkw-Fahrten differenziert nach Fahrtweitenklassen verdeutlicht, dass das Niveau der Fernverkehrsnachfrage (=Netzbelastung) über einen Zeitraum von zehn Stunden weitestgehend stabil ist und keine Nachfragespitzen wie im Alltagsverkehr aufweist. Daraus lässt sich ableiten, dass für eine Dimensionierung der Ladeinfrastruktur im Fernverkehr ein stündliches Nachfragevolumen von acht Prozent des Tageswertes anzusetzen ist. Unter Berücksichtigung der Mischung der Flotte (BEV/PHEV), unterschiedlichen Fahrzeuggrößen sowie von zufälligen Ankunftsverteilungen wurde ein Warteschlangenmodell entwickelt, um die benötigte Anzahl von Ladepunkten abzuschätzen, die unter Komfortüberlegungen erforderlich sind. Letztendlich ist es damit möglich, für unterschiedliche Ankunftsraten, Bediendauern und dementsprechende Auslastungsraten die daraus resultierenden Wartezeiten zu berechnen, um daraus wiederum die unter Komfortüberlegungen benötigte Anzahl der Ladepunkte zu berechnen (Überdimensionierung des Ladeinfrastrukturangebots um zu hohe Wartezeitverluste zu vermeiden).

Parameter mit Einfluss auf den Ladeinfrastrukturbedarf

Für die Ermittlung des Bedarfs an Ladepunkten für eine Million E-Fahrzeuge spielen die

nachfolgend aufgeführten Einflussparameter eine Rolle, die in Bezug auf ihren relativen Einfluss überprüft wurden: veränderte Reichweiten, Komfort beziehungsweise resultierende Wartezeiten und zeitlich variierender Nachfragevolumina.

Mit zunehmender batterieelektrischer Reichweite entfällt für viele Fahrten die Notwendigkeit, im Fernverkehrsnetz aufzuladen. Da die Anzahl der Fahrten im Fernverkehr mit zunehmender Fahrtweite exponentiell fällt, sinkt bei steigender Reichweite die Zahl der Fahrten mit Ladenotwendigkeit schnell ab und der Ladepunktbedarf reduziert sich deutlich.

Bezüglich Komfort beziehungsweise resultierender Wartezeiten zeigt sich: je weniger Ladesäulen grundsätzlich zur Verfügung stehen, desto mehr Ladesäulen werden pro Standort als Reserve benötigt, um ein komfortables Laden sicherzustellen. Diese Analysen verdeutlichen weiterhin, dass es grundsätzlich sinnvoll ist, Ladepunkte zu ballen, da dadurch die Wahrscheinlichkeit, einen freien Ladepunkt zu finden für das einzelne Fahrzeug größer ist, als einen einzelnen Ladepunkt anzufahren, der möglicherweise belegt ist.

Letztlich müssen die unterschiedlichen Nachfragestrukturen an Werktagen, im Wochenendverkehr und in Ferienzeiten berücksichtigt werden. Die im Modell verwendeten Fahrtweitenverteilungen aus VALIDATE wurden anhand der Daten des Mobilitätspanels (MOP) entsprechend korrigiert (34). Der Fernverkehr an Wochenenden (Freitag und Sonntag) macht erheblich höhere Anteile der Fahrleistung aus. Gerade der - bezogen auf das einzelne Fahrzeug oder den einzelnen Pkw-Nutzer seltene - Ferienverkehr, spielt für die Dimensionierung der Infrastruktur eine wesentliche Rolle. Dieser wurde anhand der modellierten Nutzung von Pkw in Privathaushalten über den Zeitraum eines Jahres (Modell CUMILE) erfasst.

Ermittlung der notwendigen Ladeinfrastruktur

Basisladeinfrastruktur (Grundversorgung)

Die Basisladeinfrastruktur erlaubt grundsätzlich das Durchqueren Deutschlands mit einem E-Fahrzeug. Diese Grundversorgung erlaubt jedoch nur einen geringen Komfort (unter Umständen lange Wartezeiten) und ist nicht auf Nachfragespitzen (Wochenende, Ferien) hin dimensioniert.

Bundesautobahnen (BAB) (Netzlänge circa 13.000 km): Unter der Annahmen eines Ladepunktes alle 40 km und je Fahrtrichtung wird hierfür ein Grundversorgungsbedarf von circa 650 Ladepunkten erforderlich. Der Abstand von circa 40 km liegt in der Größenordnung des durchschnittlichen Abstandes von Raststätten im deutschen BAB-Netz.

Bundesstraßen (Netzlänge circa 40.000 km): Mit Ausnahme von bestimmten Korridoren, in denen gewisse Lücken im BAB-Netz erkennbar sind, haben die Bundesstraßen eher eine Zubringerfunktion für das BAB-Netz. Eine Kumulation der Nachfrage auf Rasterzellen einer Kantenlänge von 50 km ergibt einen Bedarf von circa 170 Ladepunkten.

Erhöhte Nachfragevolumina unter Berücksichtigung des Wochenendes

Die Anwendung dieses Ansatzes ermittelt die Gesamtnachfrage an Ladevorgängen an einem Wochenendtag im deutschen Fernstraßennetz. Damit wurde die Struktur des Verkehrs in Normalwochen unter Berücksichtigung des Wochenendverkehrs abgebildet. Daraus ergibt sich ein Zusatzbedarf. Dieser Zusatzbedarf entspricht circa 550 Ladepunkten im BAB-Netz sowie 100 Ladepunkten für das Netz der Bundesstraßen.

Wie Abbildung 10 verdeutlicht, ist der Ladebedarf im Netz ungleich verteilt. So entsteht auf circa der Hälfte des Netzes nur etwa 23 Prozent des Ladebedarfs. Für diese 23 Prozent ist die Grundversorgung strukturell ausreichend. Der Mehrbedarf konzentriert sich damit auf bestimmte Netzelemente.

Verteilung des Ladebedarfs auf das BAB-Netz in Deutschland

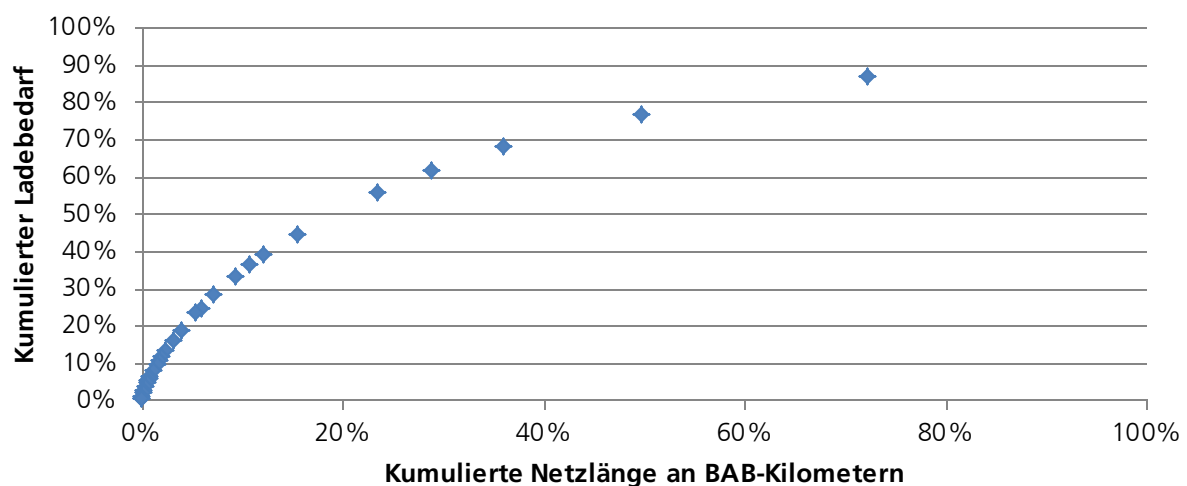


Abbildung 10: Verteilung des Ladebedarfs auf das Autobahnnetz in Deutschland.

Erhöhte Nachfragevolumina unter Berücksichtigung von seltenen Ereignissen wie Urlaubsfahrten

Die Verwendung des Modells CUMILE ermöglicht die Ermittlung der relevanten Fahrtweitenverteilungen gerade für Fahrten mit Pkw im Urlaubsverkehr. Die sich daraus ergebenden Fahrtweitenstrukturen wurden ebenfalls im Modell angewendet; daraus ergibt sich ein zusätzlicher Ladesäulenbedarf, der Ferienereignisse wie Urlaubsreisen berücksichtigt. Diese

Ferienreiseereignisse haben andere Ziele und benutzen zwangsläufig zum Teil auch andere Netzelemente der Infrastruktur. Der hierfür entstehende Bedarf an weiteren Ladepunkten wird mit zusätzlich 850 Punkten entlang des BAB-Netzes und mit zusätzlich 90 Punkten entlang des Bundesstraßennetzes abgeschätzt. Hierbei wird ein geringerer Komfort beim Laden unterstellt.

Ergebnis

Insgesamt wird damit ein Bedarf von circa 2.560 Ladepunkten mit Schnelllademöglichkeit im deutschen Fernstraßennetz für eine Flotte von einer Million E-Fahrzeugen (1/3 BEV, 2/3 PHEV) als erforderliche Startlösung angesehen (Tabelle 7).

Tabelle 7: Darstellung des Ladeinfrastrukturbedarfs im Fernverkehr(LP – Ladepunkt).

	Basisladeinfrastruktur (Grundversorgung) Erlaubt das Durchqueren Deutschlands mit einem elektrischen Fahrzeug	Ergänzungen, da in Abhängigkeit der Fahrtzweckstruktur eine Nachfrage das durch die Grundversorgung abgedeckte Angebot überschreitet			Insgesamt
		Erforderliche zusätzliche Ladeinfrastruktur über die Grundversorgung hinaus Di - Do	In Normalwochen unter Berücksichtigung der Nachfragestruktur am Wochenende Fr, So	Unter Berücksichtigung von Ferienereignissen mit anderer Zielwahl	
Auto- bahnen (BAB)	650 LP alle 40 km ein Ladepunkt	+ 150 LP	+ 550 LP	+ 850 LP	<u>2.200 LP</u>
Bundesstraßen	170 LP Ein Ladepunkt je Rasterzelle (50 x 50 km)	+ 0 LP	+ 100 LP	+ 90 LP	<u>360 LP</u>

Diskussion

Die oben dargestellten Ergebnisse sind insgesamt plausibel. Sowohl der modellorientierte Ansatz mit VALIDATE als auch die analytische Herangehensweise (Annahme bestimmter Pkw-

Nutzungsmuster unter Verwendung des Modells CUMILE, Auswertungen zur Pkw-Nutzung auf der Grundlage von Daten des Deutschen Mobilitätspanels) liefern auf einer aggregierten Ebene ähnliche Ergebnisse. Allerdings weist VALIDATE als Grundlage nur Verkehrsnachfragewerte an Werktagen auf. Hier wurden Parametrisierungen vorgenommen, um bestimmte Fahrtweitenmuster und Fahrthäufigkeiten, wie sie typischerweise im Wochenendverkehr oder in der Ferienreisesaison auftreten, geeignet zu berücksichtigen.

Zudem wurden weitere Einflussgrößen bestimmt, die Einfluss auf den Ladeinfrastrukturbedarf haben. Von beträchtlichem Einfluss auf den Ladeinfrastrukturbedarf ist etwa die Reichweite der elektrischen Fahrzeuge. Gerade für die erheblich wahrscheinlicheren Fahrten kürzerer Strecken entsteht bei einer höheren elektrischen Reichweite ein deutlich geringerer Ladebedarf und damit auch eine geringere Anforderung, Ladeinfrastruktur bereitzustellen.

Die Komfortüberlegungen (Wartezeiten) sind eine der weiteren und entscheidenden Einflussgrößen. Hierfür wurden für unterschiedliche Ankunftszeiten je Stunde und Bedienraten (Ladezeiten pro Fahrzeug) die notwendigen Ladepunkte bei akzeptabler Wartezeit bestimmt. Deshalb sind aus Komfortgründen Überkapazitäten vorzusehen, die die Wartezeiten auf ein akzeptables Maß senken.

9. LI-Bedarf besonderer Flotten

Im Zuge des Markthochlaufs der Elektromobilität stehen Fahrzeuge besonderer Flotten häufig besonders im Fokus. Dies betrifft z.B. Taxiunternehmen, Carsharing-Anbieter und Kurier-Express-Paket-Dienstleister (KEP-Dienste). Derzeit sind in Deutschland 53.000 Taxis, 16.100 Carsharing-Fahrzeuge und mehr als 60.000 KEP-Fahrzeuge unterwegs. Dies entspricht mit etwa 0,2 Prozent nur einem geringen Teil des gesamten deutschen Fahrzeugbestandes. Allerdings gilt diesen Fahrzeugen eine besondere Aufmerksamkeit im Zusammenhang der Elektromobilität. Gründe sind die hohen, oft innerstädtischen, Fahrleistungen dieser Fahrzeuge sowie ihre hohe Sichtbarkeit bzw. der Umstand, dass über diese Fahrzeuge potentielle Kunden in Kontakt mit Elektrofahrzeugen gebracht werden können. Besonders Carsharing- und KEP-Dienste verbuchen zudem in den letzten Jahren ein stetiges Wachstum und werden bis 2020 eine noch größere Rolle im städtischen Verkehr einnehmen. Apotheken- oder Essenslieferanten wurden aufgrund der schwierigen Erfassung und der geringen Zahl nicht in die Analyse miteinbezogen (35). Dieses Kapitel berücksichtigt ausschließlich BEVs und keine PHEVs, da die Berechnungen auf Annahmen beruhen, die nur eingeschränkt für PHEVs gelten.

Zunächst wurde eine Prognose für Fahrzeug- und Nutzerkennzahlen für die drei Nutzungssegmente vorgenommen und daraus die Zahl der batterieelektrischen Fahrzeuge für 2020 ermittelt. Anschließend wurden die Kennzahlen für die zehn größten Städte Deutschlands detailliert aufgelistet. Daraufhin folgen zentrale Annahmen zur Berechnung der benötigten Ladeinfrastruktur und abschließend die Ergebnisse zum Ladeinfrastrukturbedarf besonderer Flotten.

Die Taxiflotte in Deutschland für 2020 ergibt sich aus der durchschnittlichen Bestandsentwicklung von 1992 bis 2015 (36). Wegen fehlender Prognosen wurde eine proportionale Steigerung des Gesamtanteils von BEVs an der Taxiflotte angenommen. 2015 waren 40 Prozent der Taxis in den zehn größten Städten unterwegs (37). Für die Berechnungen wurde angenommen, dass sich die Taxis entsprechend der Einwohnerzahl auf die Städte verteilen (Tabelle 8 und Tabelle 9).

Tabelle 8: Bestand besonderer Flotten im Jahr 2016 und 2020 Gesamt und BEVs.

Segment	Fahrzeugbestand			
	2016		2020	
	Gesamt	BEVs	Gesamt	BEVs
Taxi	53.500	50	52.142	969
Carsharing	15.400	1.561	46.200	29.380
KEP-Dienste	60.000	500	73.209	9.690

Tabelle 9: BEVs besonderer Flotten im Jahr 2020 differenziert nach Städten und im Vergleich zu 2016.

Stadt nach Einwohnerdichte	BEVs in 2020		
	Taxigewerbe	Carsharing	KEP-Dienste
Berlin	118	5.389	1333
Hamburg	60	2.738	677
München	49	2.220	549
Köln	36	1.626	402
Frankfurt a.M.	25	1.115	276
Stuttgart	21	951	235
Düsseldorf	21	938	232
Dortmund	20	902	223
Essen	20	891	220
Bremen	19	857	212
Sonstige Regionen	581	11.752	5329
Gesamt 2020	969	29.380	9690

Den Nutzerzahlen beim Carsharing wird ein starkes Wachstum vorausgesagt. In der Berechnung wurde davon ausgegangen, dass die Zahl der Fahrzeuge sich gleich der Nutzerzahlen entwickelt. Studien sehen eine Verdopplung bis Verdreifachung der Nutzer bis 2020 bei einem Potential von 4,15 Millionen Nutzern (38, 39). 2016 macht die elektrische Carsharing-Flotte circa drei Prozent der E-Fahrzeuge in Deutschland aus. Bleibt dieses Verhältnis bestehen, wird der Anteil von BEVs im Carsharingsegment von 10 auf 65 Prozent steigen. Der Großteil der Carsharing-Fahrzeuge (60 Prozent) konzentriert sich hierbei auf die zehn größten Städte Deutschlands. Die Verteilung der Fahrzeuge richtet sich ebenfalls nach der Einwohnerdichte (Tabelle 8 und Tabelle 9) (40).

Für die KEP-Branche wird ein Zuwachs der Lieferungen um 5,1 Prozent für jedes Jahr bis 2020 prognostiziert (41). Daraus wurde geschlossen, dass der Fahrzeugbestand gleichermaßen wächst. KEP-Fahrzeuge machen knapp ein Prozent des Bestands von E-Fahrzeugen in Deutschland aus. Es wurde davon ausgegangen, dass sich dieser Anteil bis 2020 nicht ändert. Im Jahr 2020 würden batterieelektrische KEP-Fahrzeuge demnach 13 Prozent des KEP-Gesamtbestandes ausmachen. Die KEP-Fahrzeuge wurden nach der Einwohnerverteilung aus dem Zensus 2011 verteilt (Tabelle 8 und Tabelle 9).

Tabelle 10: Annahmen für die Berechnungen des Ladeinfrastrukturbedarfs besonderer Flotten.

Annahmen und Parameter

Taxis	969 Fahrzeuge im Jahr 2020 (Tabelle 8 und Tabelle 9) - E-Taxis fahren im Durchschnitt 151 km pro Tag (42) - E-Taxis befördern im Durchschnitt 15,8 Kunden am Tag bei einer Strecke von 9,5 km pro Kunde (42) - pro Kunde muss ein Taxi 0,078 Ladevorgänge durchführen (43) - Akku kann an Taxistand / Depot geladen werden (42) - Voll geladener Akku bei Schichtbeginn (42) - Im öffentlichen Raum wird nur Schnellladeinfrastruktur benutzt; 40 % der Ladevorgänge finden im öffentlichen Raum statt (44) - Eine neue Ladestation wird nur bei genügend Nachfrage und Wirtschaftlichkeit einbezogen (ab 10 Ladevorgängen pro Tag) (45)
-------	---

Carsharing Allgemeines:

- Privates peer-to-peer Carsharing wird nicht betrachtet, da Randerscheinung (38)
- Jeder Nutzer fährt durchschnittlich 737 km pro Jahr (46)
- Ein Trip hat eine durchschnittliche Länge von 10,9 km (47)
- Nach jedem 18. Trip muss das BEV geladen werden (47)
- 70 % FreeFloating / 30 % stationsgebundene Angebote (38)
- Der Betrieb von Ladesäulen muss wirtschaftlich sein (ab 10 Ladevorgängen pro Tag) (45)

FreeFloating (Fahrzeug kann überall im Einsatzgebiet abgestellt werden):

- Fahrzeuge laden nur an öffentlicher Schnellladeinfrastruktur (47)
- 1,365 Mio. Nutzer im Jahr 2020
- 20.566 BEVs im Jahr 2020 (70 % der Carsharing Fahrzeuge aus Tabelle 8)

Stationsgebundene Angebote (Abholung und Rückgabe an fester Station):

- Laden an dafür vorgesehenen halböffentlichen und privaten Ladepunkten (48)
- 0,585 Mio. Nutzer im Jahr 2020
- 8.814 BEVs im Jahr 2020 (30 % der Carsharing Fahrzeuge aus Tabelle 8)

KEP	9.690 Fahrzeuge im Jahr 2020 (Tabelle 8 und Tabelle 9) - Fahrzeuge laden über Nacht auf dem Betriebshof (35) - Wegen geringer Fahrleistung ist kein Zwischenladen erforderlich (35); daher wird keine öffentliche Ladeinfrastruktur benötigt
-----	--

Die Berechnungen mit den Annahmen aus Tabelle 10 führen zu den in Tabelle 11 dargestellten Ergebnissen. Öffentliche Ladepunkte werden jedoch nur von Taxis und FreeFloating Carsharing-Anbietern, insgesamt 21.535 BEVs, benötigt. Um eine möglichst dauerhafte Verfügbarkeit und Nutzbarkeit der Fahrzeuge zu gewährleisten, sind ausschließlich Schnellladepunkte nötig und

sinnvoll. Insgesamt werden 2.900 Schnellladepunkte für besondere Flotten benötigt, diese werden aber schon durch die zusätzliche Schnellladeinfrastruktur (d.h. 2.500 – 5.000) für den Alltagsverkehr (Kapitel 5) abgedeckt.

Tabelle 11: Fahrzeugbestand und Ladeinfrastrukturbedarf besonderer Flotten im Jahr 2020 differenziert nach Städten.

Stadt nach Einwohnerdichte	E-Taxis		Carsharing		KEP-Dienste	
	BEVs	Öffentliche Ladepunkte	BEVs	Öffentliche Ladepunkte	BEVs	Öffentliche Ladepunkte
Berlin	118	12	5.389	516	1333	0
Hamburg	60	6	2.738	262	677	0
München	49	4	2.220	213	549	0
Köln	36	4	1.626	156	402	0
Frankfurt a.M.	25	2	1.115	107	276	0
Stuttgart	21	2	951	91	235	0
Düsseldorf	21	2	938	90	232	0
Dortmund	20	2	902	86	223	0
Essen	20	2	891	85	220	0
Bremen	19	2	857	82	212	0
Sonstige Regionen	581	58	11.752	1.125	5329	0
SUMME	969	96	29.380	2.813	9690	0
BEVs Gesamt		40.039	Öffentliche Ladepunkte Gesamt		2.909	

10. Internationaler Vergleich von LI-Strategien

In diesem Kapitel findet ein internationaler Vergleich der Ladeinfrastrukturbestände und Strategien statt. Die ausgewählten Länder (China, Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Japan, Niederlande und Norwegen) bzw. Regionen (Kalifornien) sind entweder führend im Bereich der Elektromobilität oder entscheidende Akteure bei der Einführung der Elektromobilität auf dem Automobilmarkt. Für die ausgewählten Länder wurde der aktuelle Bestand an E-Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur ermittelt und mit den länderspezifischen Aufbau- und Flottenzielen verglichen. Daraufhin wurde untersucht, ob und welche Strategien zum Aufbau einer Ladeinfrastruktur vorhanden sind. Im letzten Schritt wurde überprüft, inwieweit die gewonnenen Erkenntnisse auf Deutschland anwendbar sind. Tabelle 12 zeigt eine Übersicht der vorhandenen und bis 2020 geplanten E-Fahrzeugflotten im Personenverkehr, sowie der dazugehörigen öffentlichen Ladeinfrastruktur in den untersuchten Ländern. Unstimmigkeiten zu anderen Quellen können durch die unterschiedliche Aktualität der Quellen, sowie unterschiedliche Definitionen der Begriffe „öffentliche Ladeinfrastruktur“, „Ladepunkte“ und „Schnellladeinfrastruktur“ entstehen.

Tabelle 12: Internationaler Vergleich von aktuellem Stand und Zielen beim Ausbau von E-Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur (in Tausend), Stand Oktober 2016 (NPE – Nationale Plattform Elektromobilität).

Land		öffentliche Ladepunkte [in 1.000]			E-Fahrzeuge ¹ [in 1.000]			E-Fahrzeuge /Ladepunkte
		normal	Schnell ²	gesamt	BEV	PHEV	gesamt	
Deutschland (1, 49-51)	Ist	13,0	1,1	14,1	30,6	21,7	52,3	3,7
	Soll EU	---	---	150	---	---	1.000	6,7
	Soll NPE	70,0	7,1	77,1	---	---	1.000	13
	Soll DLR	31,5	3,9	35	---	---	1.000	28
Frankreich (49-51)	Ist	11,7	1,1	12,8	53,4	11,8	65,2	5,1
	Soll 2020	---	---	97	---	---	2.000	20,6
Großbritannien (49-51)	Ist	8,7	2	10,8	25,3	37	62,3	5,8
	Soll 2020	---	---	122	---	---	1.550	12,7
Niederlande (49-51)	Ist	20,5	0,5	21	10,6	80,5	91	4,3
	Soll 2020	---	---	32	---	---	200	6,3
Norwegen (52-54)	Ist	5,9	1	6,9	75	12	87	12,6
	Soll 2018	---	---	---	---	---	50	---
Kalifornien (55-58)	Ist	9,2	0,9	10,2	94,2	97,5	191,7	18,9
	Soll 2020 ³	35,2	1,1	36,2	---	---	1.000	27,6
China (59, 60)	Ist	46,7	12,1	58,8	225,7	86,6	312,3	5,3
	Soll 2020	---	---	---	---	---	5.000	---
Japan (52, 59, 61)	Ist	16,1	6	22,1	70,9	55,5	126,4	5,7
	Soll 2020	2.000	5	2.005	500	500	1.000	0,5

¹ im Personenverkehr

² Ab 22 kW

³ Für geplante LI: Mittelwert aus Empfehlungen des NREL

Ein konkretes Ziel beim Ausbau der Ladeinfrastruktur gibt keines der betrachteten Länder an.

Beim Vergleich von Deutschland, Kalifornien und Japan ist zu erkennen, dass sich die geplante Ladeinfrastruktur, trotz des identischen Ziels von einer Million E-Fahrzeugen bis 2020, sehr stark unterscheidet. Eine mögliche Erklärung sind die unterschiedlichen Annahmen für Ladepräferenzen. Während Kalifornien mit einem großen Anteil von privaten Ladestationen rechnet, gehen die Planungen von Japan von einer geringen Zahl an privaten Lademöglichkeiten aus.

Im Folgenden sind die wichtigsten Strategiepunkte der Länder, die zum Aufbau der Ladeinfrastruktur verfolgt werden, aufgeführt (Tabelle 13). In Verbindung mit dem Projekt LADEN2020 können die Strategien und Erfahrungen aus anderen Ländern Deutschland helfen, den Aufbau der Ladeinfrastruktur möglichst effizient zu gestalten. Es lassen sich jedoch nicht alle Strategien miteinander kombinieren. Ansätze, die auch beim Ausbau der Ladeinfrastruktur in Deutschland helfen können, sind in der Übersicht kursiv geschrieben.

Tabelle 13: Internationaler Vergleich von Strategien für E-Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur (D – Deutschland, USD – US Dollars, Mio. – Million).

Deutschland <i>(Referenzland)</i>	• Steuerliche Anreize für Arbeitgeber beim Ausbau von Ladeinfrastruktur (62) • Staatliche Förderung beim Ausbau von Ladeinfrastruktur bis 2020 (63) • privater und gewerblicher Betrieb von Ladestationen durch Gesetzesänderungen vereinfacht (64) • Aufbau eines Schnellladenetzes für Achsen und Metropolen (65) • In vier Schaufensterregionen wird Ladeinfrastruktur für Demonstrationsprojekte zur Alltagstauglichkeit ausgebaut (66)
Frankreich <i>(2 Mio. E-Fahrzeuge bis 2020)</i>	• Neue Ladestationen beim Bau von Parkplätzen, bei Parkplatzrenovierung und in Parkhäusern nahe Einkaufszentren (67) • Ab 2017 ist die Voraussetzung für die Nachrüstung von Ladestationen bei allen Neubauten verpflichtend (68) • Steuererleichterung und Subvention für Bau und Inbetriebnahme von Ladestationen (67) • Städtische Schnellladestationen für Gewerbefahrzeuge (69)
Großbritannien <i>(starkes Netz an Schnellladestationen)</i>	• Min. eine Schnellladestation an jeder Autobahnraststätte vorhanden (70) • Bis zu 75 % Subvention für den Kauf und die Installation einer privaten Ladestation (71) • Ausbau von Ladestationen für Taxis (72)
Niederlande <i>(hohe Dichte an öffentlichen Ladepunkten)</i>	• Min. eine Schnellladestation an jeder Autobahnraststätte vorhanden (73) • 1,7 Ladepunkte pro E-Fahrzeug (74) • Effizientere Nutzung vorhandener Ladestationen durch Echtzeit-Informationen und vereinfachte Strombesteuerung (52)
Norwegen <i>(Vorreiter in Elektromobilität)</i>	• Min. zwei Schnellladestationen alle 50 km an einer Hauptverkehrsstraße • Ausbau der Ladestationen an Wohnorten und Parkhäuser für E-Fahrzeuge (75, 76) • Schnelllademöglichkeiten für gewerbliche Fahrzeuge (76) • Steigerung der Nutzerfreundlichkeit durch Echtzeitinformationen (76)
Kalifornien <i>(ähnliche Fläche wie D; ebenfalls eine Mio. E-Fahrzeuge bis 2020)</i>	• Gut 1/10 der öffentlichen Ladepunkte werden von Tesla betrieben (77) • Es werden zwei verschiedene Szenarien berücksichtigt (Erstens: Nutzer laden hauptsächlich zuhause, Zweitens: Nutzer laden hauptsächlich öffentlich) • Prämien bis 6.000 USD, Steuererleichterungen und günstige Kredite für den Bau von Ladeinfrastruktur (77) • Schnelles und effizientes Genehmigungsverfahren beim Aufbau der Ladeinfrastruktur (78)
China <i>(voraussichtlicher Aufschwung der Elektromobilität in den nächsten Jahren)</i>	• Öffentliche Ladestationen sollen hauptsächlich an Wohnorten, Arbeitsplätzen und anderen öffentlichen Orten aufgestellt werden (79) • Zusätzliche Ladestationen für Busse und Taxis (80)

Japan

*(ähnliche Fläche wie D;
ebenfalls eine Mio. E-
Fahrzeuge bis 2020)*

- Normale Ladestationen nahe an Wohnorten (81)
- Automobilhersteller bauen Ladeinfrastruktur in Japan aus (82)
- *Alle Ladestationen können mit dem gleichen Bezahlungssystem genutzt werden (82)*

Für die Ladeinfrastrukturstrategie für Deutschland lässt sich bei Betrachtung der einzelnen Länder feststellen, dass in einigen Bereichen noch Optimierungspotentiale bestehen. Insbesondere eine Vereinheitlichung der Bezahlungssysteme unterstützt mit Echtzeitinformationen verbessert die Ladeinfrastruktursituation für den Kunden. Ebenso findet oftmals eine Förderung der privaten Ladestation am Wohnort statt. Länderübergreifend ist zudem festzustellen, dass eine überregionale Ladestruktur von öffentlicher Hand unterstützt wird.

11.Fazit und Ausblick

Handlungsempfehlungen

Im Laufe des Projekts LADEN2020 konnten essentielle Einflüsse auf Ladeinfrastruktur und den Erfolg der Elektromobilität abgeleitet werden. Die daraus gewonnenen Handlungsempfehlungen zum Aufbau einer bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur für eine Million E-Fahrzeuge bis 2020 werden im Folgenden präsentiert:

- 1) Es sollte sichergestellt werden, dass die grundlegenden Annahmen auch in der Realität umgesetzt werden. Die technische Kompatibilität von E-Fahrzeugen und Ladepunkten sollte gewährleistet werden. Des Weiteren erlauben Echtzeitinformationen und Reservierungen von Ladepunkten eine erhebliche Steigerung des Nutzerkomforts und eine effizientere Auslastung der Ladepunkte.
- 2) Der Aufbau der Ladeinfrastruktur sollte progressiv erfolgen. Zum einen werden zu Beginn mehr Ladepunkte pro E-Fahrzeug benötigt, um eine flächendeckende Versorgung zu gewährleisten und zum anderen steigert die Sichtbarkeit der Ladeinfrastruktur das Vertrauen potentieller Nutzer in die Elektromobilität. Bis zum Jahresende von 2016 sollten 15 Prozent der notwendigen Ladeinfrastruktur bereitstehen. In den beiden folgenden Jahren 2017 und 2018 ist mit 30 respektive 40 Prozent nahezu der komplette Ladeinfrastrukturausbau zu verwirklichen, um für die wachsende Zahl an E-Fahrzeugen die notwendige Ladeinfrastruktur bereitzuhalten. Im Jahr 2019 sind die abschließenden 15 Prozent der Ladestationen aufzubauen, damit im Jahr 2020 eine bedarfsgerechte Ladeinfrastruktur für eine Million E-Fahrzeuge zur Verfügung steht.
- 3) Es sollte ein Monitoring der Flottenentwicklung stattfinden, um gegebenenfalls Anreize für mehr BEVs setzen zu können. Ein höherer Anteil von BEVs verringert den Bedarf an Ladeinfrastruktur.
- 4) Eine Weiterentwicklung des Lademanagements kann zu einer besseren Auslastung und damit einem geringeren Bedarf von Ladepunkten führen. Werden Ladestationen mit Sensoren ausgestattet und ein Preissystem eingeführt, welches Laden und Parken voneinander trennt, können die Zeiten, in denen die Ladepunkte durch parkende Fahrzeuge blockiert werden, minimiert werden.
- 5) Ein hoher Anteil an privaten Ladestationen führt zu einem großen Anteil von E-

Fahrzeugen, die über Nacht laden. Dieser Bedarf stellt die erneuerbaren Energien vor neue Herausforderungen, da zumindest von Photovoltaikanlagen nachts keine Stromerzeugung zu erwarten ist. Durch einen Ausbau des Smart-Grid und den Aufbau von großen Energiespeichern kann dieser Effekt vermindert werden. Eine Steuerung der Ladezeiten, sodass nicht alle Fahrzeuge in den frühen Abendstunden laden, kann ebenfalls sinnvoll sein.

Fazit

Das Forschungsprojekt LADEN2020 entwickelt eine systematisch nachvollziehbare Strategie zum Aufbau einer robusten und bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur für E-Fahrzeuge. Als Ergebnis wird der Ladeinfrastrukturbedarf für eine Million E-Fahrzeuge in Deutschland von heute bis 2020 ermittelt. Im ersten Schritt wurden verschiedene Bestandszenarien für E-Fahrzeuge untersucht und festgelegt. Daraufhin wurden Nutzbarkeit und Attraktivität von Ladepunkten nach Typ abgeschätzt und verschiedene Annahmen und Ladeinfrastrukturstrategien mit Experten in einem Stakeholder-Prozess vereinbart. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde der inhaltliche Kern der Studie, eine Methodik zur Ableitung des Ladeinfrastrukturbedarfs, entwickelt und angewandt. Angesichts grundsätzlicher Unterschiede fand die Untersuchung von Alltags- und Fernverkehr separat statt. Zusätzlich wurde der Ladeinfrastrukturbedarf für besondere Flotten analysiert.

Im Jahr 2020 liegt der ermittelte Ladeinfrastrukturbedarf für eine Million E-Fahrzeuge in Deutschland bei circa 33.000 öffentlichen- und halböffentlichen Ladepunkten für den Alltagsverkehr, sowie bei circa 2.600 öffentlichen Ladepunkten für den Fernverkehr. Je nach Ausgestaltung der Normalladeinfrastruktur und angestrebter Versorgungssicherheit sind zusätzlich bis zu etwa 4.000 Schnellladepunkte sinnvoll.

Abschließend wurde ein internationaler Vergleich von Ladeinfrastrukturstrategien durchgeführt. Die Ergebnisse und Empfehlungen aus dem Bericht sollen einem zielführenden Aufbau der Ladeinfrastruktur dienen. Das Projekt LADEN2020 trägt hiermit zur Verwirklichung von energie- und klima-politischen Ziele im Bereich Verkehr bei.

Zukünftiger Forschungsbedarf

Aus den Erkenntnissen zu LADEN2020 wurden neue Forschungsthemen im Bereich der Elektromobilität ersichtlich. Erstens ist die Entkopplung von Parken und Laden von besonderem Interesse, um die Ladeinfrastruktur effizient zu gestalten. Zweitens könnte sich das induktive Laden ab dem Jahr 2020 zu einer neuen und bereichernden Variante der öffentlichen

Ladeinfrastruktur entwickeln. Zuletzt ist festzuhalten, dass das Zusammenspiel von E-Fahrzeugen und erneuerbaren Energien eine entscheidende Rolle bei der Energiewende einnimmt.

Veröffentlichungen der Ergebnisse

Ergebnisse auf Basis des Projekts LADEN2020 wurden in den folgenden wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht:

Anderson, J. E., N. Böttcher, and T. Kuhnimhof. An approach to determine charging infrastructure for one million electric vehicles in Germany. In *Transportation Research Board, 95th Annual Meeting*, Washington D.C., USA, 2016, P. 22.

Soylu, T., J. E. Anderson, N. Böttcher, C. Weiß, B. Chlond, and T. Kuhnimhof. Building up demand-oriented charging infrastructure for electric vehicles in Germany. In *International Scientific Conference on Mobility and Transport Transforming Urban Mobility, mobil.TUM 2016, 6-7 June 2016, Munich, Germany, No. 00*, Transportation Research Procedia, Munich, Germany, 2016, P. 15.

Literaturverzeichnis

1. Bundesregierung. *Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung*, Berlin, 2009. https://www.bmbf.de/files/nationaler_entwicklungsplan_elektromobilitaet.pdf. letzter Zugriff: 15.11.2016.
2. Huo, H., H. Cai, Q. Zhang, F. Liu, und K. He. Life-cycle assessment of greenhouse gas and air emissions of electric vehicles: A comparison between China and the U.S. *Atmospheric Environment*, Vol. 108, 2015, S. 107-116. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.02.073>.
3. U.S. Department of Energy. Recovery Act Announcement: President Obama Announces \$2.4 Billion for Electric Vehicles, EERE News Archives and Events, 2009.
4. Kraftfahrt-Bundesamt. *Neuzulassungsbarometer im Oktober 2016*. http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/2016/201610GV1monatlich/201610_nzbarometer/201610_n_barometer.html?nn=1475106. letzter Zugriff: 15.11.2016.
5. Nie, Y., und M. Ghamami. A corridor-centric approach to planning electric vehicle charging infrastructure. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 57, 2013, S. 172-190. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2013.08.010>.
6. Steinhilber, S., P. Wells, und S. Thankappan. Socio-technical inertia: Understanding the barriers to electric vehicles. *Energy Policy*, Vol. 60, 2013, S. 531-539. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.076>.
7. Li, Y. Infrastructure to Facilitate Usage of Electric Vehicles and its Impact. *Transportation Research Procedia*, Vol. 14, 2016, S. 2537-2543. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.337>.
8. Madina, C., I. Zamora, und E. Zabala. Methodology for assessing electric vehicle charging infrastructure business models. *Energy Policy*, Vol. 89, 2016, S. 284-293. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2015.12.007>.
9. Rahman, I., P. M. Vasant, B. Singh M. Singh, M. Abdullah-Al-Wadud, und N. Adnan. Review of recent trends in optimization techniques for plug-in hybrid, and electric vehicle charging infrastructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 58, 2016, S. 1039-1047. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.353>.
10. Sathaye, N., und S. Kelley. An approach for the optimal planning of electric vehicle infrastructure for highway corridors. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 59, 2013, S. 15-33. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2013.08.003>.
11. Ghamami, M., A. Zockaie, und Y. Nie. A general corridor model for designing plug-in electric vehicle charging infrastructure to support intercity travel. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 68, 2016, S. 389-402. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2016.04.016>.
12. Paffumi, E., M. De Gennaro, und G. Martini. Innovative Technologies for Smart Cities: Towards Customer Driven Infrastructure Design for Large Scale Deployment of Electric Vehicles and Vehicle-to-Grid Applications. *Transportation Research Procedia*, Vol. 14, 2016, S. 4505-4514. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.373>.
13. Dong, J., C. Liu, und Z. Lin. Charging infrastructure planning for promoting battery electric vehicles: An activity-based approach using multiday travel data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 38, 2014, S. 44-55. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2013.11.001>.
14. Xi, X., R. Sioshansi, und V. Marano. Simulation–optimization model for location of a public electric vehicle charging infrastructure. *Transportation Research Part D: Transport*

- and Environment, Vol. 22, 2013, S. 60-69.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2013.02.014>.
15. De Gennaro, M., E. Paffumi, und G. Martini. Customer-driven design of the recharge infrastructure and Vehicle-to-Grid in urban areas: A large-scale application for electric vehicles deployment. *ENERGY*, Vol. 82, 2015, S. 294-311.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.039>.
 16. Namdeo, A., A. Tiwary, und R. Dziurla. Spatial planning of public charging points using multi-dimensional analysis of early adopters of electric vehicles for a city region. *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 89, 2014, S. 188-200.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2013.08.032>.
 17. Yi, Z., und P. H. Bauer. Optimization models for placement of an energy-aware electric vehicle charging infrastructure. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 91, 2016, S. 227-244.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2016.04.013>.
 18. Morrissey, P., P. Weldon, und M. O'Mahony. Future standard and fast charging infrastructure planning: An analysis of electric vehicle charging behaviour. *Energy Policy*, Vol. 89, 2016, S. 257-270. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2015.12.001>.
 19. Guo, Z., J. Deride, und Y. Fan. Infrastructure planning for fast charging stations in a competitive market. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 68, 2016, S. 215-227. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2016.04.010>.
 20. Bundesregierung. Gesetz zur Bevorrechtigung der Verwendung elektrisch betriebener Fahrzeuge (Elektromobilitätsgesetz - EmoG), 2015, S. 3.
 21. Klötzke, M., und F. Kleiner. Bericht: Technische Eigenschaften von Elektrofahrzeugen bis 2020, Institut für Fahrzeugkonzepte, DLR, 2016, S. 7.
 22. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft. Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken, Berlin, 2015, S. 94, [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20150511-o-energie-info-erneuerbare-energien-und-das-eeeg-zahlen-fakten-grafiken-2015-de/\\$file/Energie-Info_Erneuerbare_Energien_und_das_EEG_2015_11.05.2015_final.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20150511-o-energie-info-erneuerbare-energien-und-das-eeeg-zahlen-fakten-grafiken-2015-de/$file/Energie-Info_Erneuerbare_Energien_und_das_EEG_2015_11.05.2015_final.pdf). letzter Zugriff: 15.11.2016.
 23. BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. BDEW-Strompreisanalyse Mai 2016 - Haushalt und Industrie, 2016, S. 45, [https://www.bdew.de/internet.nsf/res/886756C1635C3399C1257FC500326489/\\$file/160524_BDEW_Strompreisanalyse_Mai2016.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/res/886756C1635C3399C1257FC500326489/$file/160524_BDEW_Strompreisanalyse_Mai2016.pdf). letzter Zugriff: 15.11.2016.
 24. Stella, K. Über 300.000 Kilometer unter Strom, Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, 2015, S. 48, https://www.competence-e.kit.edu/downloads/Studie_Rheinmobil_web_final.pdf. letzter Zugriff: 15.11.2016.
 25. Frenzel, I., J. Jarass, S. Trommer, und B. Lenz. Erstnutzer von Elektrofahrzeugen in Deutschland: Nutzerprofile, Anschaffung, Fahrzeugnutzung. *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.*, 2015, S. 69.
 26. Follmer, R., D. Gruschwitz, B. Lenz, und C. Nobis. Mobilität in Deutschland 2008 - Ergebnisbericht; im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (FE-Nr. 70.801/2006), Bonn und Berlin, 2010.
 27. Chlond, B., C. Weiss, M. Heilig, und P. Vortisch. Hybrid Modeling Approach of Car Uses in Germany on Basis of Empirical Data with Different Granularities. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2412, 2014, S. 67-74.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3141/2412-08>.
 28. Wermuth, M., C. Neef, H. Hautzinger, B. Lenz, und H. J. Heinzmann. Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010-Schlussbericht, Braunschweig, 2012, S. 822.
 29. Anderson, J. E., N. Böttcher, und T. Kuhnimhof. An approach to determine charging

- infrastructure for one million electric vehicles in Germany. In *Transportation Research Board, 95th Annual Meeting*, Washington D.C., USA, 2016, S. 22.
30. Nationale Plattform Elektromobilität. *Fortschrittsbericht 2014 - Bilanz der Marktvorbereitung*. Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO) (Hg.), Berlin, 2014. <http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/die-npe/publikationen/>. letzter Zugriff: 15.11.2016.
31. Blaser, F. Entwicklung eines Modells zur räumlichen und quantitativen Ermittlung benötigter Lade- bzw. Betankungsinfrastruktureinheiten hinsichtlich alternativer Antriebstechnologien, Masterarbeit, Technische Universität Darmstadt, Institut für Fahrzeugkonzepte, DLR 2015, S. 93.
32. PTV Planung Transport Verkehr AG. VALIDATE. Verkehrsmodell und Verkehrsdatenlieferant für Deutschland, Karlsruhe, 2015.
33. Fitschen, A., und H. Nordmann. Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2013. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Verkehrstechnik Heft V 244*, Vol. September, 2014.
34. T. Streit, B. Chlond, C. Weiss, und P. Vortisch. Deutsches Mobilitätspanel (MOP) - Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen Bericht 2013/2014: Alltagsmobilität und Fahrleistung, 2015, S. 121.
35. Aichinger, W. *Elektromobilität im städtischen Wirtschaftsverkehr*, 2014.
36. Statista. *Anzahl der Taxis in Deutschland in den Jahren 1960 bis 2012*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/36475/umfrage/anzahl-der-taxis-in-deutschland-seit-1960/>. letzter Zugriff: 15.11.2016.
37. Statista. *Anzahl der Taxis in deutschen Großstädten im Jahr 2015*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/429385/umfrage/anzahl-der-taxis-in-deutschen-grossstaedten/>. letzter Zugriff: 15.11.2016.
38. TÜV. Gemeinsame Studie von TÜV Rheinland, FSP und BBE Automotive belegt: CarSharing wird die automobile Welt nicht entscheidend verändern 2015.
39. Doll, C., M. Gutmann, und M. Wietschel. Integration von Elektrofahrzeugen in Carsharing-Flotten. Simulation anhand realer Fahrprofile, Fraunhoferinstitut, Karlsruhe, 2011.
40. Nehrke, G. CarSharing-Städteranking 2015: Die CarSharingVersorgung verbessert sich weiter. Auch viele kleinere Städte sind vorne dabei., 2015, S. 4, http://presse.karlsruhe.de/db/meldungen/21403/pm_stadteranking_2015_regionale_version_karlsruhe.pdf. letzter Zugriff: 15.11.2015.
41. BIEK. KEP-Studie 2016 - Analyse des Marktes in Deutschland, 2016.
42. Pfeil, R., M. Grimm, und H.-C. Reuss. Identifikation und Analyse einflussrelevanter Parameter des E-Taxibetriebs – Erste technische Projektergebnisse aus GuEST, Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart FKFS, Stuttgart, 2015, S. 12, http://www.fkfs.de/uploads/publikationen/2015_Betriebsparameter_ETaxi_TAE_FKFS.pdf. letzter Zugriff: 15.11.2016.
43. Jung, J., J. Y. J. Chow, R. Jayakrishnan, und J. Y. Park. Stochastic dynamic itinerary interception refueling location problem with queue delay for electric taxi charging stations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 40, 2014, S. 123-142.
44. Hardinghaus, M., M. Lehne, und D. Kreyenberg. Charging behaviour and energy consumption of various electric vehicles in Berlin using different charging infrastructure (slow and fast) over one year. In *EVS29 - 2016 Electric Vehicle Symposium*, Montréal, Québec, Canada, 2016.
45. Nationale Plattform Elektromobilität. Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in

- Deutschland Statusbericht und Handlungsempfehlungen, 2015, S. 36.
46. Loose, W. Aktueller Stand des Car-Sharing in Europa-Endbericht D 2.4 Arbeitspaket 2, 2010, http://www.carsharing.de/images/stories/pdf_dateien/wp2_endbericht_deutsch_fin_al_4.pdf. letzter Zugriff: 15.11.2016.
47. Müller, J., S. Schmöller, und F. Giesel. Identifying Users and Use of (Electric-) Free-Floating Carsharing in Berlin and Munich. *18th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2015)*, Las Palmas, Gran Canaria, 2015.
48. Schulz, A. Batterieelektrische Fahrzeuge im gewerblichen Flottenbetrieb, 2015, S. 155, https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/4812/2/schulz_alexandra.pdf. letzter Zugriff: 15.11.2016.
49. European Alternative Fuels Observatory. *Europe*. http://www.eafo.eu/europe#europe_fleet_table_block_anchor. letzter Zugriff: 15.11.2016.
50. European Alternative Fuels Observatory. *Electric vehicle charging infrastructure*. <http://www.eafo.eu/electric-vehicle-charging-infrastructure>. letzter Zugriff: 15.11.2016.
51. European Commission. Clean power for transport, 2013, http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-13-24_fr.htm. letzter Zugriff: 15.11.2016.
52. International Energy Agency. The Electric Drive Commutes - Hybrid and Electric Vehicles, Paris, France, 2016, S. 339, [http://www.ieahev.org/assets/1/7/2016_IA-HEV_BOOK_web_\(1\).pdf](http://www.ieahev.org/assets/1/7/2016_IA-HEV_BOOK_web_(1).pdf). letzter Zugriff: 15.11.2016.
53. NOBIL. *Welcome to the charging station database NOBIL*. <http://info.nobil.no/index.php/english>. letzter Zugriff: 15.11.2016.
54. Vergis, S. A. The Norwegian Electric Vehicle Market: A Technological Innovation Systems Analysis. In *TRB 2014 Annual Meeting*, Washington, D.C., 2014.
55. California New Car Dealers Association. California Auto Outlook - Covering Fourth Quarter 2014, Vol. 11, 2015, http://www.cncda.org/CMS/Pubs/Cal_Covering_4Q_14.pdf. letzter Zugriff: 15.11.2016.
56. California New Car Dealers Association. California Auto Outlook - Covering Fourth Quarter 2015, Vol. 12, 2016, <http://www.cncda.org/CMS/Pubs/Cal%20Covering%204Q%2015.pdf>. letzter Zugriff: 15.11.2016.
57. U.S. Department of Energy. *Alternative Fuels Station Locator*. <http://www.afdc.energy.gov/locator/stations/>. letzter Zugriff: 15.11.2016.
58. Melaina, M., und M. Helwig. California statewide plug-in electric vehicle infrastructure assessment, National Renewable Research Laboratory, 2014, <http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/60729.pdf>. letzter Zugriff: 15.11.2016.
59. International Energy Agency. Global EV Outlook 2016 - Beyond one million electric cars, Paris, 2016.
60. Morris, C. China proposes "game-changing" goals for EV charging infrastructure. *ChargedEV*, 2015.
61. Ministry of Economy Trade and Industry. *Compilation of the Road Map for EVs and PHVs toward the Dissemination of Electric Vehicles and Plug-in Hybrid Vehicles*. http://www.meti.go.jp/english/press/2016/0323_01.html. letzter Zugriff: 15.11.2016.
62. Bundesregierung. Verbesserte Förderung von Elektrofahrzeugen, 2016, <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Infodienst/2016/05/2016-05-18-elektromobilitaet1/2016-05-18-elektromobilitaet.html>. letzter Zugriff: 15.11.2016.
63. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. BMVI erstellt Förderrichtlinie zur Ladeinfrastruktur Elektrofahrzeuge. In *Dobrindt: Startschuss für die Ladesäulen-Offensive*,

- Berlin, 2016.
64. Harendt, B., und C. Wolf. Energierechtliche Einordnung der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge - Information über geplante Änderungen des Energierechts im Jahre 2016, 2016, http://schaufenster-elektromobilitaet.org/media/media/documents/dokumente_der_begleit_und_wirkungsfor_schung/Ergebnispapier_Nr_19_. letzter Zugriff: 15.11.2016.
 65. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Startsignal für flächendeckendes Schnellladenet in Deutschland, 2014, <http://www.slam-projekt.de/pdfs/2014-04-07-PM-SLAM.pdf>. letzter Zugriff: 15.11.2016.
 66. Deutsches Dialog Insitut. *Schaufenster Elektromobilität*. http://schaufenster-elektromobilitaet.org/de/content/ueber_das_programm/foerderung_schaufensterprogramm_m/foerderung_schaufensterprogramm_1.html. letzter Zugriff: 15.11.2016.
 67. Ministry of Ecology Sustainable Development and Energy. Energy Transition for Green Growth, 2015, S. 28, http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/14123-8-GB_loi-TE-mode-emploi_DEF_light.pdf. letzter Zugriff: 15.11.2016.
 68. AVERE-France. *Le décret sur le pré-équipement des immeubles neufs pour la recharge des véhicules électriques publié!* http://www.avere-france.org/Site/Article?article_id=6655.
 69. CHAdEMO. City of Paris Inaugurates a Network of 60 Three-Standard Semi-Fast Charging Stations, 2016, http://www.chademo.com/wp/wp-content/uploads/2016/02/2016-01-20_Belib_network_Paris.pdf. letzter Zugriff: 15.11.2016.
 70. Office for Low Emission Vehicles. Investing in ultra low emission vehicles in the UK, 2015 to 2020, 2014, S. 26, https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/307019/ulev-2015-2020.pdf. letzter Zugriff: 15.11.2016.
 71. Office for Low Emission Vehicles. Electric Vehicle Homecharge Scheme Office for Low Emission Vehicles, 2014, S. 20, [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/413009/EVHS_GUIDANCE FOR_](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/413009/EVHS_GUIDANCE_FOR_). letzter Zugriff: 15.11.2016.
 72. Office for Low Emission Vehicles. 20 Million Pounds Ultra Low Emission Vehicle Taxi Scheme, 2014, S. 10, https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/382190/taxis-preliminary-. letzter Zugriff: 15.11.2016.
 73. Ministry of Infrastructure and the Environment. Fast Charging in the Netherlands, Ministry of Infrastructure and the Environment, 2015.
 74. van Kerkhof, M. Public charging in The Netherlands, APPM management consultants, 2015.
 75. International Energy Agency. Global EV Outlook 2016 - Beyond one million electric cars, International Energy Agency, Paris, 2016.
 76. Agency for Urban Environment City of Oslo Sture Portvik. Norway - Home of EVs, Agency for Urban Environment City of Oslo Sture Portvik, 2016.
 77. U.S. Department of Energy. *Alternative Fuels Data Center*. http://www.afdc.energy.gov/laws/search?utf8=%E2%9C%93&keyword=charging&search_by=keyword. letzter Zugriff: 15.11.2016.
 78. U.S. Department of Energy. *Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE) Local Permitting Policies*. <http://www.afdc.energy.gov/laws/11660>. letzter Zugriff: 15.11.2016.
 79. The State Council the People's Republic of China. *New guideline aims to drive electric car infrastructure*. http://english.gov.cn/policies/latest_releases/2015/10/09/content_2814752_07750410.htm. letzter Zugriff: 15.11.2016.
 80. China Daily. *China to build 12,000 NEV chargers by 2020*. <http://www.chinadaily.com.cn/business/motoring/2015->

-
- 10/13/content_22170160.htm. letzter Zugriff: 15.11.2016.
81. Ministry of Economy Trade and Industry. *Compilation of the Road Map for EVs and PHVs toward the Dissemination of Electric Vehicles and Plug-in Hybrid Vehicles*. Ministry of Economy, Trade and Industry. http://www.meti.go.jp/english/press/2016/0323_01.html.
82. International Energy Agency. *The Electric Drive Commutes. Hybrid and Electric Vehicles*, International Energy Agency, Paris, 2016, [http://www.ieahev.org/assets/1/7/2016_IA-HEV_BOOK_web_\(1\).pdf](http://www.ieahev.org/assets/1/7/2016_IA-HEV_BOOK_web_(1).pdf).

IMPRESSUM

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Herausgeber Institut für Verkehrsforschung

Anschrift Rutherfordstraße 2
12489 Berlin

Redaktion und Autoren DLR – Institut für Verkehrsforschung
John E. Anderson (Ansprechpartner: John.Anderson@dlr.de)
Moritz Bergfeld
Niklas Hoffmann
Tobias Kuhnimhof
Barbara Lenz
Felix Steck

DLR – Institut für Fahrzeugkonzepte
Horst E. Friedrich
Florian Kleiner
Matthias Klötzke
Stephan Schmid

Karlsruher Institut für Technologie – Institut für Verkehrswesen
Bastian Chlond
Tamer Soylu
Christine Weiß

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Förderkennzeichen: 01MX15001

Zuwendungsempfänger www.DLR.de/vf