

JUNI 2021, WIEN



ENERGIE



RAUM



PLANUNG

ENERGIERAUMPLANUNG - EIN ZENTRALER FAKTOR ZUM GELINGEN DER ENERGIEWENDE

Herausgegeben von

Rudolf Giffinger, Martin Berger, Kurt Weninger und Sibylla Zech



Technische
Universität Wien
Institut für Raumplanung
Institute of Spatial Planning

Herausgegeben von

Rudolf Giffinger

Martin Berger

Kurt Weninger

Sibylla Zech

Die Beiträge kamen entweder auf Basis eines Vortrags bei der Fachkonferenz zum Thema „*Energie-raumplanung – Herausforderungen, Lösungen und Next Level*“ oder durch gezielte Einladung von Kolleginnen und Kollegen mit entsprechender Expertise zustande. Alle eingelangten Beiträge wurden einem offenen und teilweise mehrfachen Review-Prozess durch die Herausgeber/-in und weitere Expertinnen und Experten unterzogen.

Publiziert im **ReposiTUm der TU Wien**.

Open Access Publication

Creative Commons — Attribution 4.0 International — CC BY 4.0

DOI: 10.34726/808

Layout von Text und Abbildungen

Dipl.-Ing. Clemens Beyer

BSc Pia Carolin Rickel

Mag. Hannah Schetl

Abbildungen Cover

Die Abbildungen sind Public Domain Bilder der Pixabay GmbH und dürfen dementsprechend freundlicherweise ohne Genehmigung genutzt und frei bearbeitet werden.

© 2021 Institut für Raumplanung, TU Wien
Karlgasse 11 und 13
1040 Wien
Österreich



Elektromobilität: Integration von Elektromobilität in die Verkehrsplanung – welche Anpassungen unserer Werkzeuge brauchen wir?

Martin Kagerbauer (1)

DOI: 10.34726/1027

(1) Dr.-Ing.
Institut für Verkehrswesen (IfV)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Abstract

Die Integration von Elektromobilität in die Verkehrsplanung und im Speziellen in Verkehrserhebungen und Verkehrsnachfragemodellierung, kann mit einigen Anpassungen und der Verwendung von agentenbasierten Modellen gut durchgeführt werden. Dabei sind die Charakteristika der Nutzenden/Besitzenden von elektrisch betriebenen Fahrzeugen, die Eigenschaften der Elektrofahrzeuge v.a. hinsichtlich Reichweite und die zusätzliche Berücksichtigung der Ladevorgänge bzw. Ladeinfrastruktur zu berücksichtigen. Zur Abbildung der Ladevorgänge sind Erhebungs- und Modellierungszeiträume notwendig, die einen so langen Zeitraum umfassen, so dass hinreichend viele Ladevorgänge und somit eine Fahrleistung jenseits der Reichweiten vorhanden sind. Nur so können Variationen im Verkehrsverhalten und bei Ladestrategien berücksichtigt werden.

Schlüsselbegriffe

Erhebung, agentenbasierte Nachfragemodellierung, integrierte Planung

Kagerbauer, M. (2021): Elektromobilität: Integration von Elektromobilität in die Verkehrsplanung – welche Anpassungen unserer Werkzeuge brauchen wir? In: Giffinger, R.; Berger, M.; Weninger, K.; Zech, S. (Hrsg.): *Energieraumplanung – ein zentraler Faktor zum Gelingen der Energiewende*. Wien: repositUM, S.83-98.

Inhalt

Ausgangslage	85
Definition	86
Anforderungen der Elektromobilität an die Planungswerkzeuge	87
Anpassung der Planungswerkzeuge	91
Erhebung	91
Modellierung	92
Schlussfolgerung	96
Literatur	96

Ausgangslage

Elektromobilität im Personenverkehr löst grundsätzlich nicht die Verkehrsprobleme in unseren Städten. Selbst wenn Elektrofahrzeuge kleiner wären als konventionelle Fahrzeuge, beispielsweise der Elektro-Smart, oder sich das Fahrverhalten mit Elektro-Pkw hinsichtlich Beschleunigung und Bremsvorgängen verändert, handelt es sich immer noch um einen Pkw, der Platz benötigt und ähnlich wie ein konventioneller Privat-Pkw genutzt wird. Durch den Elektroantrieb werden jedoch die Emissionen durch das Fahrzeug reduziert, beispielsweise hinsichtlich CO₂, NO_x und, im niedrigen Geschwindigkeitsbereich, auch Lärm. Elektro-Pkw sind somit lokal emissionsfrei. Die grundsätzliche Umweltfreundlichkeit der Elektromobilität hängt jedoch maßgeblich vom Strommix ab. Im 1. Quartal des Jahres 2020 kamen 54,8 % des Stroms in Deutschland aus erneuerbaren Energien (vgl. Abb. 1).

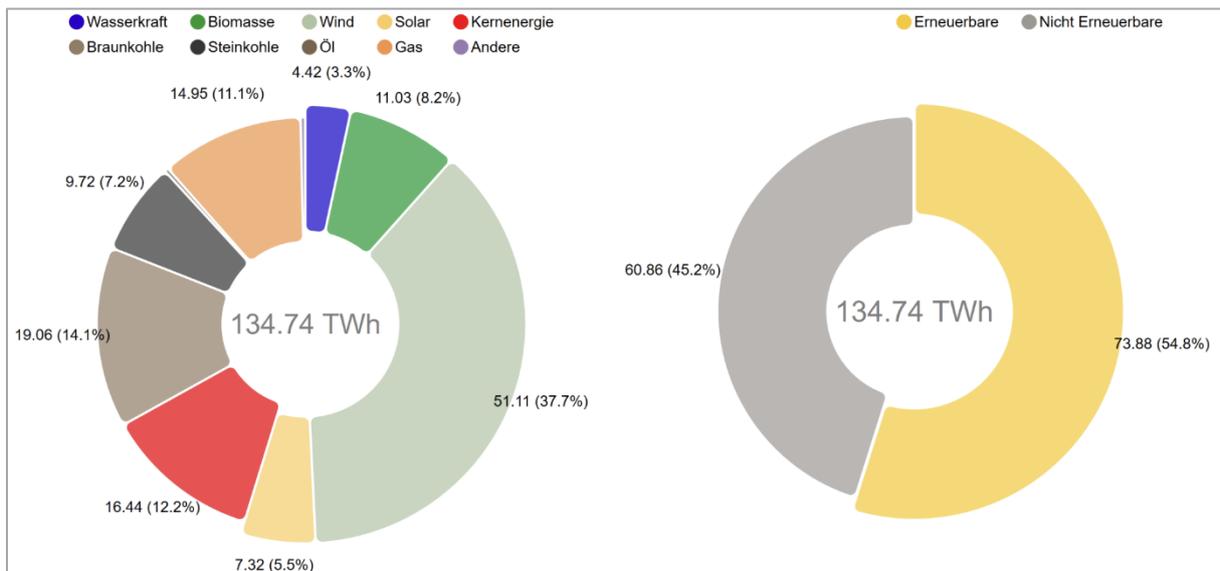


Abb. 1: Nettostromerzeugung zur öffentlichen Stromversorgung in Deutschland im ersten Quartal 2020¹, Quelle: Burger 2020.

Über die letzten Jahre ist in Deutschland der Anteil an regenerativem Strom, wie Abb. 2 zeigt, massiv gestiegen, so dass Elektromobilität zunehmend umweltfreundlicher wird.

¹ Die Grafik zeigt die Nettostromerzeugung aus Kraftwerken zur öffentlichen Stromversorgung. Das ist der Strommix, der tatsächlich aus der Steckdose kommt. Die Erzeugung aus Kraftwerken von „Betrieben im verarbeitenden Gewerbe sowie im Bergbau und in der Gewinnung von Steinen und Erden“, d.h. die industrielle Erzeugung für den Eigenverbrauch, ist bei dieser Darstellung nicht berücksichtigt.

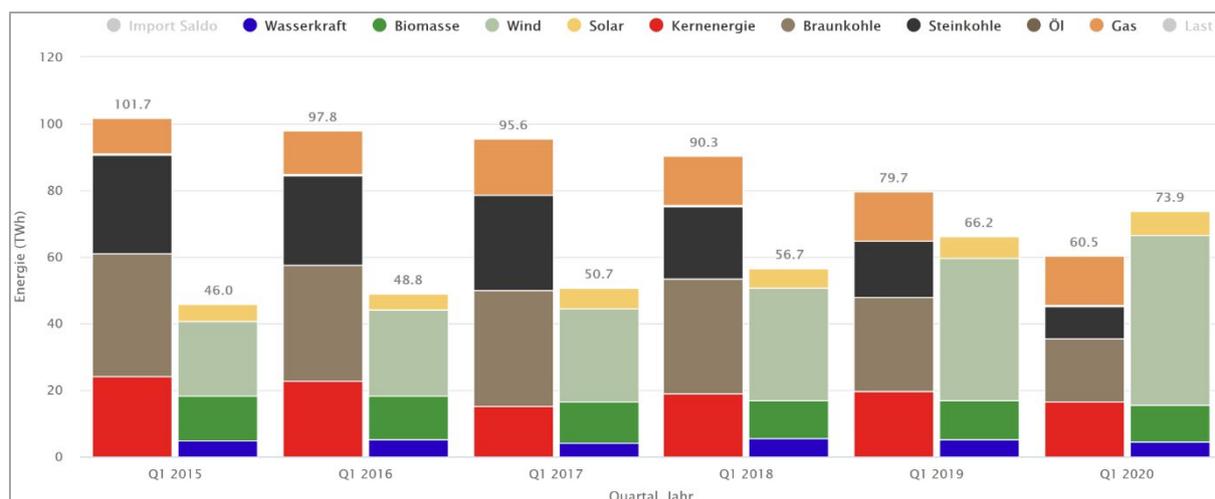


Abb. 2: Entwicklung der Nettostromerzeugung zur öffentlichen Stromversorgung in Deutschland im ersten Quartal von 2015 bis 2020², Quelle: Burger 2020.

Grundsätzlich ist Elektromobilität also eine umweltfreundlichere Art der Mobilität im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen, vor allem mit Blick auf den Betrieb der Fahrzeuge. Wegen steigender Zulassungszahlen der Elektrofahrzeuge ist es sinnvoll, diese neben den konventionellen Fahrzeugen in künftigen Planungsprozessen gesondert zu berücksichtigen, da deren Restriktionen hinsichtlich Reichweiten und Ladevorgängen, die Verkehrsnachfrage aber auch das Verkehrsangebot (Verfügbarkeit und (Lade-)Infrastruktur) beeinflussen.

Definition

Eine Million Elektrofahrzeuge (gemeint waren Pkw) sollten bis zum Jahr 2020 in Deutschland zugelassen sein. Dieses Ziel wurde im Jahr 2009 von der Bundesregierung im Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität (Die Bundesregierung 2009) festgelegt. Das Ziel wurde nicht erreicht. Im Jahr 2020 waren zum Stand 01.01.2020 136.617 Elektro-Pkw, 102.175 Plug-In-Hybrid-Pkw und 437.208 weitere Hybrid-Pkw zugelassen. Laut Definition in Deutschland umfasst Elektromobilität im Sinne der Bundesregierung nicht nur reine Elektro-Pkw, sondern „all jene Fahrzeuge, die von einem Elektromotor angetrieben werden und ihre Energie überwiegend aus dem Stromnetz beziehen, also extern aufladbar sind. Mit umfasst sind damit auch solche Fahrzeuge, die zum Zwecke einer größeren Reichweite neben einem Elektro- auch über einen Verbrennungsmotor verfügen, etwa Plug-In Hybridfahrzeuge (PHEV) und Elektrofahrzeuge mit sogenannten Range Extendern (REEV). Wichtig ist vor allem, dass diese Fahrzeuge extern über das Stromnetz aufgeladen werden können“ (BMU 2017). Nach dieser Zählart sind zum 01.01.2020 238.792 Elektro-Pkw in Deutschland von insgesamt 47,7 Millionen Pkw, also rund 0,5 %, zugelassen.

Diese Steigerungstendenzen an elektrmobilen Pkw sind in den meisten Ländern der Welt festzustellen. Wie Abbildung 3 zeigt, steigen die Bestandsentwicklungen der Elektroautos auch weltweit an. Vor allem in China sind die Zuwächse an Elektro-Pkw sehr hoch.

² Siehe Fußnote davor.

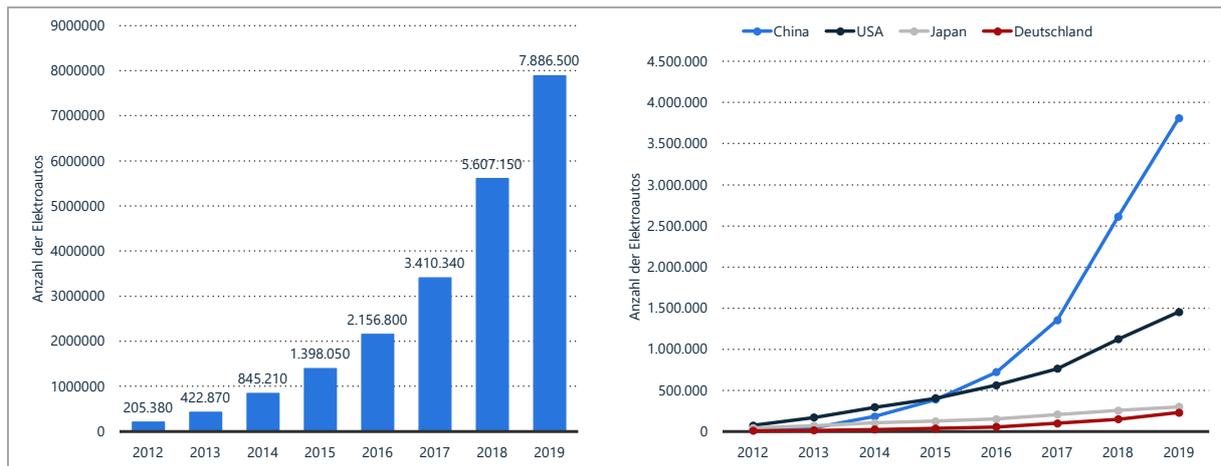


Abb. 3: Bestandsentwicklung von Elektro-Pkw (weltweit und in ausgewählten Ländern in den Jahren 2012 bis 2019), Quelle: Statista 2020b.

Obwohl die Reichweite der Elektro-Fahrzeuge mit zunehmender technischer Entwicklung steigt, ist sie immer noch eine wichtige Charakteristik für die Akzeptanz und die Nutzung der Elektromobilität. Aktuell reicht die Spanne der Reichweite bei Elektrofahrzeugen (BEV) von ca. 450 km/Batterieladung bei einem Tesla (Model X 100D) bis zu ca. 110 km/Batterieladung bei einem Smart (Modell fortwo coupé EQ prime) (ADAC 2020). Maßgeblich hängt die Reichweite von der Größe der Batterie in den Fahrzeugen ab.

Neben den hohen Anschaffungskosten, sind die Restriktionen in der Reichweite und der Mangel an Ladeinfrastruktur (LIS) die Haupthemmnisse der Elektromobilität (Kagerbauer und Heilig 2013; Gnan et al. 2017). So gilt es für Verkehrsplanungszwecke in der Erhebung und Prognose des Verkehrs in Verbindung mit Elektromobilität, zum einen die technischen Leistungsfähigkeiten der Fahrzeuge und zum anderen die Entscheidungen hinsichtlich der Ziel- und Verkehrsmittelwahl unter diesen Rahmenbedingungen zu berücksichtigen (FGSV 2018). Dann kann das Verkehrsverhalten der Menschen allumfassend abgebildet und modelliert werden. Darüber hinaus ist es sinnvoll, die Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur mit zu betrachten. Eine Integration der Elektromobilität in die Verkehrsplanungsprozesse ist heute und vor allem künftig notwendig, um bedarfsgerechte Infrastruktur planen zu können und Finanzmittel beim Aufbau der Ladeinfrastrukturnetzwerke sinnvoll einzusetzen.

Anforderungen der Elektromobilität an die Planungswerkzeuge

Der Besitz von Elektrofahrzeugen im Privatgebrauch unterscheidet sich im Vergleich zum Besitz von konventionellen Fahrzeugen, vor allem in industrialisierten Ländern, dass die konventionellen Fahrzeuge nahezu allen Bevölkerungsschichten gleichermaßen zur Verfügung stehen. Gerade die sogenannten „innovators“ und „early adopters“, also Personen, die nach der Diffusionsforschung sehr früh neue Technologien annehmen, sind Gruppen, die sich von der Allgemeinheit unterscheiden. Vor allem hinsichtlich der Soziodemografie, eines höheren ökonomischen Status und deswegen auch hinsichtlich des Verkehrsverhaltens, da mit zunehmendem zur Verfügung stehenden Einkommen das Verkehrsaufkommen steigt. Abb. 4 zeigt systematisch die Verteilung der Personengruppen.

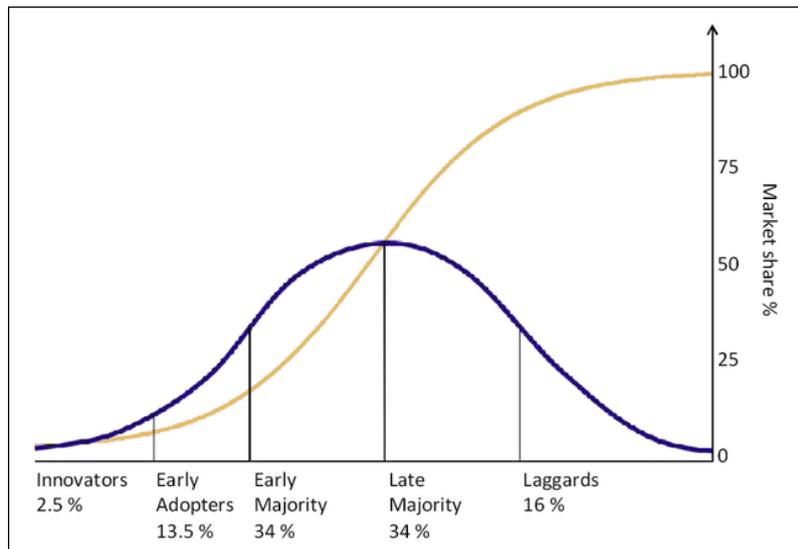


Abb. 4: Verbrauchergruppen bei der Einführung von neuen Technologien (blau) und Marktanteil (gelb), Quelle: Rogers 2010.

Wie bei vielen neuen Technologien hat sich ebenfalls beim Besitz der Elektro-Pkw herausgestellt, dass eher junge Männer mit gutem ökonomischen Status Erstanwender der Elektromobilität waren (Plötz et al. 2017; Plötz et al. 2013). Da die Elektromobilität noch einen geringen Anteil an den Gesamt-Pkw hat (vgl. Definition) sind die Charakteristika und das Mobilitätsverhalten dieser Besitzenden der Elektro-Fahrzeuge auch ein wesentlicher Aspekt, der in der Verkehrsplanung berücksichtigt werden sollte. In den Hochlaufszenerarien für Elektromobilität, wurden die Entwicklung, z. B. in Form von Anzahl an Elektro-Fahrzeugen nach Jahren, und die Charakteristika der Besitzenden abgeschätzt und berücksichtigt. Im Laufe der nächsten Jahrzehnte, sofern sich die Elektromobilität zu einem Massenmarkt entwickelt, werden Besitzende über alle Bevölkerungsschichten hinweg verteilt sein, so dass diese Unterschiede in Soziodemografie und Struktur nicht mehr so ausgeprägt sein werden. Allerdings kann das je nach gesetzlichen Rahmenbedingungen (Förderung), Verfügbarkeit von verschiedenen (kostengünstigeren) Modellen und Sensibilisierung der Bevölkerung für umweltfreundliche Pkw-Mobilität noch etwas dauern. Da übliche Planungshorizonte in 10 bis 15 Jahren liegen, ist es sinnvoll, diese Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Ein weiterer Grund die Nutzergruppe der Elektromobilität gesondert zu betrachten ist, dass die Betriebskosten für Elektrofahrzeuge wegen der Strompreise günstiger sind im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen. Dadurch werden E-Fahrzeuge unter Umständen auch häufiger genutzt. Die Fahrleistungen der Elektrofahrzeuge können somit tendenziell höher sein. Dies ist aber in Relation zu den Reichweiten zu betrachten.

Folge für Verkehrsplanungswerkzeuge: Integration von Elektro-Pkw-Besitz und die Charakteristika der Nutzenden (z. B. Soziodemographie, ökonomischer Status)

In den aktuellen Zulassungszahlen der Elektro-Pkw in Deutschland sieht man auch, dass ca. 60 % in das Fahrzeugsegment „Klein“ (=Mini, Kleinwagen, Kompaktklasse) und 25% in das Fahrzeugsegment „Groß“ (Oberklasse, SUV Sport, Geländewagen) fallen (Statista 2020a). Diese unterschiedlichen Fahrzeugsegmente haben unterschiedliche Charakteristika. Kleinfahrzeuge werden eher als Zweit- oder Drittwagen genutzt mit kleiner Reichweite und häufiger Nutzung für kurze Strecken. Die Großfahrzeuge haben eine große Reichweite (z. B. Tesla- oder Porsche-Fahrzeuge mit ca. 400 km) und werden eher für alle, auch weite Fahrten genutzt. Diese unterschiedlichen Nutzungen und Charakteristika spielen für die Verkehrsnachfrage eine wesentliche Rolle, da je nach zur Verfügung stehendem Fahrzeug unterschiedliche Nutzungsmöglichkeiten vorhanden sind. Eine Diversifizierung der Fahrzeugkategorien in Bezug auf Elektromobilität ist daher sinnvoll. Zudem gibt es mit neuen Fahrzeugansätzen, wie Pedelecs/E-Bikes, neue Möglichkeiten Wege zurückzulegen, die in verschiedenen Modi wirken. Auch hier spielt die Elektromobilität eine Rolle, die in den Planungen zu berücksichtigen ist.

Folge für Verkehrsplanungswerkzeuge: Integration von Eigenschaften der Elektro-Pkw (Fahrzeugart, Größe des Akkus, Reichweite)

Grundsätzlich unterscheiden sich die Elektrofahrzeuge von konventionellen Fahrzeugen hinsichtlich der Reichweite und der Dauer der Ladevorgänge. Während außer bei speziellen Erhebungen zu Verbrauch und Fahrleistung (Chlond et al. 2009) die Tankvorgänge in der Verkehrsplanung keine große Rolle spielen, haben die Ladevorgänge bei der Elektromobilität eine größere Bedeutung, da das Laden eine größere Zeitdauer einnimmt und besser geplant werden sollte, als das Tanken, das innerhalb weniger Minuten durchgeführt wird.

Grundsätzlich gibt es zwei Ladearten:

- Normalladen (AC-Laden): Ausschließlich über Wechselstrom in Ladeleistungsbereichen zwischen 3,7 kW (einphasig) über 11 bzw. 22 kW bis zu max. 43 kW (dreiphasig);
- Schnellladen (DC-Laden): Ausschließlich über Gleichstrom mit einer Ladeleistung von bis zu 170 kW.

Abhängig von dem Ladestand (SOC, state of charge) sowie von der Spezifikation des Akkus, dauert eine Ladung eines 30-kW-Akkus mit 3,7 kW ca. 8 Stunden (h), mit 11 kW ca. 1,5 h und mit 170 kW ca. 15 bis 30 Minuten. Je nach Umfeldsituation (Temperatur, Streckenprofil etc.) kann damit eine Strecke von ca. 150 km zurückgelegt werden. Diese unterschiedlichen Ladeeigenschaften haben auch Auswirkungen auf den Einsatz der Ladungen. Während Normalladen geeignet ist für Situationen, in denen das Fahrzeug sowieso steht, z. B. zu Hause nachts oder während der Arbeit, ist das Schnellladen für kurze Zwischenstopps, z. B. bei einer Fernreise an Autobahnen, geeignet. Dazwischen sind alle Variationen denkbar. Im Vergleich zum konventionellen Tanken dauert das Laden länger, und das Angebot an LIS ist zumindest zu heutiger Zeit noch nicht so dicht, so dass die Information über die Existenz und Verfügbarkeit von LIS eine große Rolle spielt. Mit Hilfe von IKT (Informations- und Kommunikations-Technologie) stehen die Charakteristiken und Verfügbarkeiten von LIS beispielsweise durch Apps und anderen digitalen Plattformen zur Verfügung. Beispiele hierfür sind e-stations.de, chargemap.com, goin-electric.de, lemnet.org u. v. a.

Folge für Verkehrsplanungswerkzeuge: Integration von Ladeinfrastruktur mit deren Eigenschaften (Kenngrößen, Ladedauer, Verortung).

Wegen der Reichweiterestriktionen der E-Fahrzeuge kann auch verändertes Verkehrsverhalten der Nutzenden eine Folge sein. Falls beispielsweise aufgrund eines aktuell niedrigen SOC eines E-Pkw einige Ziele nicht mehr erreicht werden können, stehen den Nutzenden verschiedenen alternative Handlungsweisen zur Verfügung. Erstens kann der Weg auf einen anderen Zeitpunkt oder Tag verschoben werden, wenn die Reichweite ausreicht. Zweitens kann ein anderes Ziel zur Durchführung der Aktivität gewählt werden, bei dem die Reichweite noch ausreicht oder drittens kann ein anderes Verkehrsmittel für den Weg gewählt werden. Die beiden letztgenannten Fälle können auch eintreten, sofern die Reichweite auch bei voller Ladung nicht ausreicht. Im Verkehrsnachfragemodellierungsprozess bedeutet dies einen Eingriff in die Module Verkehrsentstehung/Aktivitätenwahl, Zielwahl und/oder Verkehrsmittelwahl. Die Restriktionen der Elektromobilität und das veränderte Verhalten können somit Auswirkungen auf die Wahlentscheidungen haben.

Folge für Verkehrsplanungswerkzeuge: Aktivitäten-, Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodelle sind hinsichtlich des Verkehrsverhaltens mit Elektromobilität anzupassen.

Im Alltagsverkehr treten Ereignisse von weiten Fahrten nur selten auf. Pkw, werden gewöhnlich in Deutschland im Mittel an wenigen Tagen über 100 km benutzt (im Jahr 2012 waren es 13 Tage (Streit et al. 2014)). Sofern nur ein zufälliger Tag im Jahr berücksichtigt wird, fahren rund 90 % der Fahrzeuge in Deutschland unter 100 km. Sofern das ganze Jahr betrachtet wird, fahren nur rund 10 % der Fahrzeuge in Deutschland immer unter 100 km. Bei der Betrachtung einer Woche sind es 75 %, bei 8 Wochen 30 %. Das hat zur Folge, dass bei Fernfahrten in der Regel ein längerer Betrachtungszeitraum für Aussagen zu Reich- bzw. Fahrtweiten notwendig ist (vgl. Abb. 5).

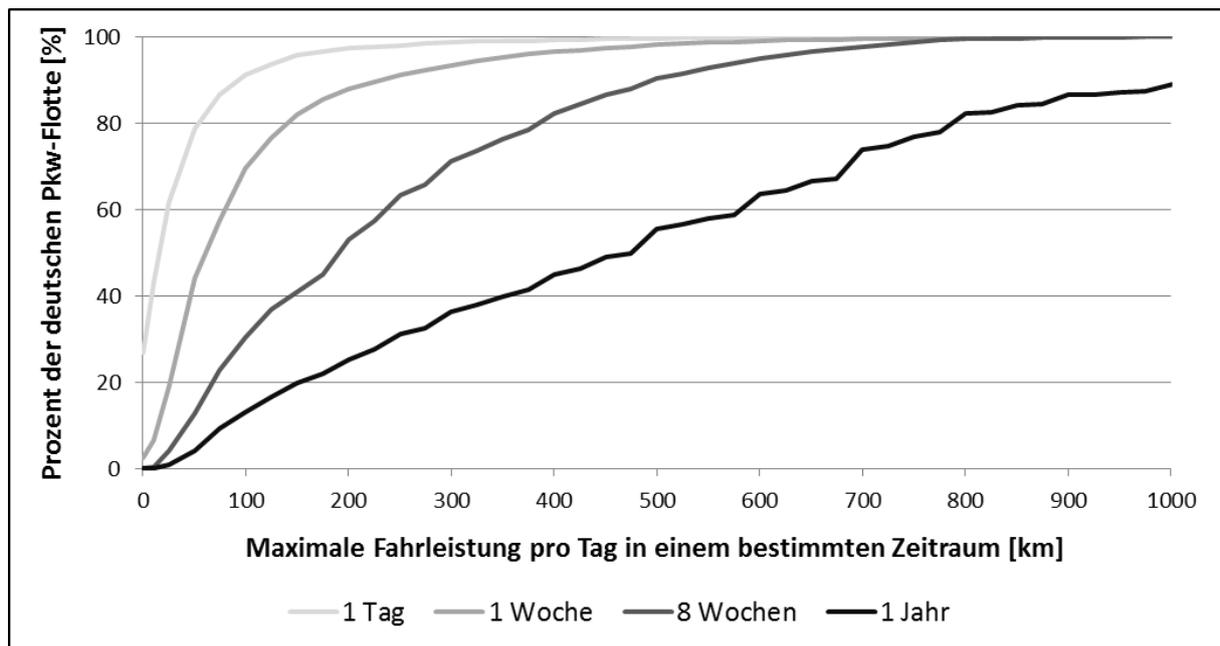


Abb. 5: Verteilung der maximalen Fahrleistung pro Pkw und Tag für verschiedene Betrachtungszeiträume, Quelle: Streit et al. 2014.

Diese Aussage gilt aber nicht nur für Fernfahrten, sondern auch für Fahrten im Alltagsverkehr, da die E-Pkw in der Regel nicht jeden Tag geladen werden und deshalb die Fahrtweiten über mehrere Tage addiert werden müssen, um die Ladevorgänge, Lademengen und Restreichweiten realistisch abzubilden.

Folge für Verkehrsplanungswerkzeuge: Für die Elektromobilität sind längere Untersuchungszeiträume notwendig.

Anpassung der Planungswerkzeuge

Eine Umsetzung dieser dargestellten Folgen der Elektromobilität für die Verkehrsnachfrageplanung beinhaltet die Anpassungen von Erhebungen und Modellen.

Erhebung

Um geeignete Daten als Grundlage für die Modellierung zu erhalten, sind die Erhebungen dahingehend anzupassen, dass zurückgelegte Entfernungen mit elektrisch betriebenen Fahrzeugen über einen längeren Zeitraum erhoben werden können. Längere Zeiträume sind hier mindestens eine Woche, wegen der Laderhythmen, besser noch vier bis acht Wochen.³ Optimal ist, Wege mit elektrisch betriebenen Pkw zu erheben, um so die Ladevorgänge zu ermitteln. Wegen der relativ geringen Menge an Elektrofahrzeugen heutzutage kann die Stichprobengewinnung schwierig sein. Hier können auch Analogieschlüsse mit konventionellen Fahrzeugen helfen, indem Fahrtweiten mit den Reichweiten in Beziehung gesetzt werden, um Ladevorgänge zu berechnen. Voraussetzung dafür ist, dass die Fahrtweiten mit konventionellen Fahrzeugen analog den elektrischen Fahrzeugen angenommen werden (Chlond et al.). Das Verkehrsaufkommen als Anzahl der durchgeführten Fahrten zu bestimmten Zwecken mit und ohne Elektromobilität wird in diesem Fall als gleich vorausgesetzt. Hilfreich für die Modellierung ist zudem, wenn zu der Aufzeichnung der Fahrtweiten mit den Fahrzeugen auch Informationen zu den Fahrenden (z. B. welche Person eines Haushalts fährt) bekannt sind, da beispielsweise eine agentenbasierte Modellierung von den Einzelpersonen (Agenten) ausgeht. Die Aufzeichnungen der gefahrenen Wegestrecken mit den Fahrzeugen können über Fragebogen oder Listen geschehen oder technisch über ein Tracking der Fahrzeuge beispielsweise über GPS/Apps etc. Oft sind hier zusätzliche Angaben, z. B. über Wegezwecke, Besetzungsgrad etc., sinnvoll.

Vor allem am Anfang stehende Neuerungen, auch bei neuen Mobilitätsformen, haben die Eigenschaft, dass Menschen mit spezifischen Charakteristika diese nutzen. Dabei ist es für die Modellierung des Besitzes von Elektrofahrzeugen wichtig, diese Charakteristika der Nutzenden zu kennen, um den Zusammenhang zwischen Mobilitätsverhalten und Nutzung von neuen Mobilitätsformen gut abbilden zu können (Chlond et al. 2012). Beispiele für die Charakteristika sind soziodemografische Eigenschaften (Alter, Erwerbsstatus, Einkommen) oder auch räumliche (Wohnen im Ballungsraum oder im ländlichen Bereich) oder mobilitätsbezogene Verhaltensweisen (regelmäßiges Pendeln). Diese Charakteristika der Elektromobilitätsnutzenden können über Befragungen der Fahrzeugnutzenden erhalten werden. Dies hängt jedoch davon ab, wie weit verbreitet die Technik ist und ob ein guter Zugang zu den Elektromobilitätsnutzenden möglich ist. Bei der Elektromobilität befindet man sich derzeit an Grenze hinsichtlich der Besitzquoten (vgl. Abb. 3), um Menschen mittels Revealed-Preference-Befragungen (RP-Befragungen)⁴ nach dem realisierten Verhalten zu befragen. Zu Beginn der technischen Entwicklung oder auch noch im Markthochlauf können derartige Daten zudem über Befragungen der beabsichtigten Nutzung oder des Kaufs von Elektromobilität erhalten werden. Dies ist vor allem auch dann sinnvoll, wenn Informationen zum künftigen Besitz von Elektromobilität für Prognosen notwendig sind (Plötz et al. 2017). Bei konventionellen Fahrzeugen sind diese Informationen meist über Statistiken oder bereits bestehende Erhebungen verfügbar. Bei der Elektromobilität sind dieses Daten nur sehr spärlich vorhanden.

Im Vergleich zur bisherigen Fahrzeugnutzung mit konventionellen Pkw sind bei der Elektromobilität die Ladevorgänge und die Rahmenbedingungen des Ladens ein neuer Aspekt. Hier handelt es sich um

³ Das MOP (Deutsches Mobilitätspanel) führt z. B. die Erhebung zu Fahrleistungen und Tankvorgängen über acht Wochen durch.

⁴ Revealed-Preference-Befragungen (RP-Befragungen) erheben ein bereits durchgeführtes Verhalten. Es werden z. B. retrospektiv durchgeführte Wege berichtet.

den Zeitpunkt der Ladung (z. B. wenn der Akku leer ist, wenn sich eine Lademöglichkeit bietet, während der Durchführung einer bestimmten Aktivität oder nur nachts). Die Erhebung dieser Situationen oder der Präferenzen zur Ladung der Fahrzeuge, kann zum einen durch die Erhebung der Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen selbst erfolgen. Dies erfordert aber das Vorhandensein von genügend Fallbeispielen in der Praxis, analog zum E-Fahrzeug-Besitz. Zum anderen können diese Informationen mit Stated-Preference-Befragungen (SP-Befragungen)⁵ erhoben werden. In diesen Befragungen werden potenzielle Situationen durchgespielt, in welchen die Testpersonen entscheiden, wann und wie lange sie laden. Fragestellungen wären, ab welchem SOC Fahrzeuge geladen werden oder bei welchen Situationen (zu Hause, am Arbeitsplatz oder beim Einkaufen). Diese Daten ermöglichen es in Verbindung mit Eigenschaften der Elektrofahrzeuge und der Nutzenden, Ladestrategien abzuleiten und in Modelle zu integrieren (Hilgert et al. 2016).

Elektromobilität hat durch Reichweitenrestriktion und Verfügbarkeit der Fahrzeuge für bestimmte Wege Auswirkungen auf die Ziel- und Verkehrsmittelwahl. Grundsätzlich können die Wahlmodelle so aufgebaut sein, dass sie Ziel- und Verkehrsmittel unabhängig voneinander und sukzessiv modellieren. Die notwendige Datengrundlage dazu stammt meist aus RP-Befragungen, wie beispielsweise Reisezeiten und die zugespielten Reisezeiten der nicht gewählten Alternativen. Die Alternativen können auch aus SP-Befragungen stammen. Bei der Elektromobilität hängt die Wahl der Ziele und Verkehrsmittel jedoch enger zusammen als bei konventionellen Verkehrsmitteln, da die Reichweiten und SOC der Fahrzeuge sowohl die möglichen Weglängen als auch das Infragekommen des Verkehrsmittels E-Fahrzeug beeinflussen. Zum Beispiel könnte eine Person einen Weg zum Einkaufen in einem 40 km entfernten Möbelhaus mit einer Restreichweite eines E-Fahrzeuges von 30 km nicht mehr mit diesem Fahrzeug zurücklegen. Alternativ könnte die Person ein anderes Verkehrsmittel wählen oder zu einem näher gelegenen Möbelhaus fahren. Um diese Zusammenhänge zwischen Reichweite, Ladezustand sowie Ziel- und Verkehrsmittelwahl zu erheben, bietet sich ein Choice-Experiment in einer SP-Befragung an. Dabei werden den Testpersonen verschiedene Auswahlmöglichkeiten vorgeschlagen, aus denen sie sich für eine Alternative entscheiden. Durch die vorgeschlagenen Alternativen stehen auch die nicht gewählten Alternativen zur Verfügung. Diese Daten können dann zu einer Modellschätzung für die kombinierte Ziel- und Verkehrsmittelwahl verwendet werden (Kagerbauer und Heilig 2013; Heilig et al. 2017b).

Modellierung

Die beschriebenen Datengrundlagen aus den an Elektromobilitätsanforderungen angepassten Erhebungen erlauben es, statistische Modelle zu schätzen, die in die Verkehrsnachfragemodellierung integriert werden können. Die Abbildung von Ladevorgängen und den Ladezustand der E-Fahrzeuge setzt voraus, dass die Fahrzeuge einzeln betrachtet und deren Eigenschaften individuell verändert werden können. Hier bietet sich die Umsetzung der Nachfragemodellierung in einer agentenbasierten Simulation an, die in diesen Ausführungen am Beispiel der am KIT-IfV entwickelten Software mobiTopp dargestellt wird.

In agentenbasierten Modellen werden Personen als Agenten, die diese repräsentieren, abgebildet. Die Agenten haben Eigenschaften (z.B. Alter, Geschlecht, Erwerbsstatus) und weitere Charakteristika (z. B. Zeitkarte für ÖV oder Pkw-Besitz). Zur Abbildung der Elektromobilität und der Integration von Reichweiten und Fahrzeugeigenschaften werden die Fahrzeuge ebenfalls als Agenten (Fahrzeug-Agenten) modelliert. Die Fahrzeug-Agenten sind Personen bzw. Haushalten zugeordnet und haben ebenfalls Eigenschaften (Antriebsart oder Reichweite). Diese Eigenschaften werden in der Simulation der Wege hinsichtlich der Verfügbarkeit für bestimmte Einsatzbereiche berücksichtigt und fortgeschrieben. Das

⁵ Stated-Preference-Befragungen (SP-Befragungen) sind Befragungen in hypothetischen Märkten bzw. Situationen.

bedeutet, wenn mit einem Elektro-Fahrzeug eine bestimmte Strecke zurückgelegt wird, reduziert sich dementsprechend die Reichweite. Das Verkehrsnachfrageverhalten der Personen-Agenten liegt den Bewegungen der Fahrzeug-Agenten zu Grunde. Die Zuordnung der E-Fahrzeuge zu Haushalten erfolgt in mobiTopp mit Hilfe eines Logit-Modells, basierend auf Erhebungs- bzw. Statistikdaten zum Besitz oder künftigen Besitzquoten der Fahrzeuge bzw. E-Fahrzeuge. Somit können auch in Prognosen Wirkungen künftiger Durchdringungsquoten mit Elektromobilität berechnet werden. Abb. 6 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer Modellierung des E-Fahrzeugbesitzes in der Region Stuttgart für das Jahr 2030. Zudem unterscheidet mobiTopp verschiedene Fahrzeugtypen; derzeit werden meist drei Klassen (klein, mittel und groß) verwendet, die in den Fahrzeugeigenschaften, z. B. hinsichtlich Batteriekapazität und Reichweite, variieren können.

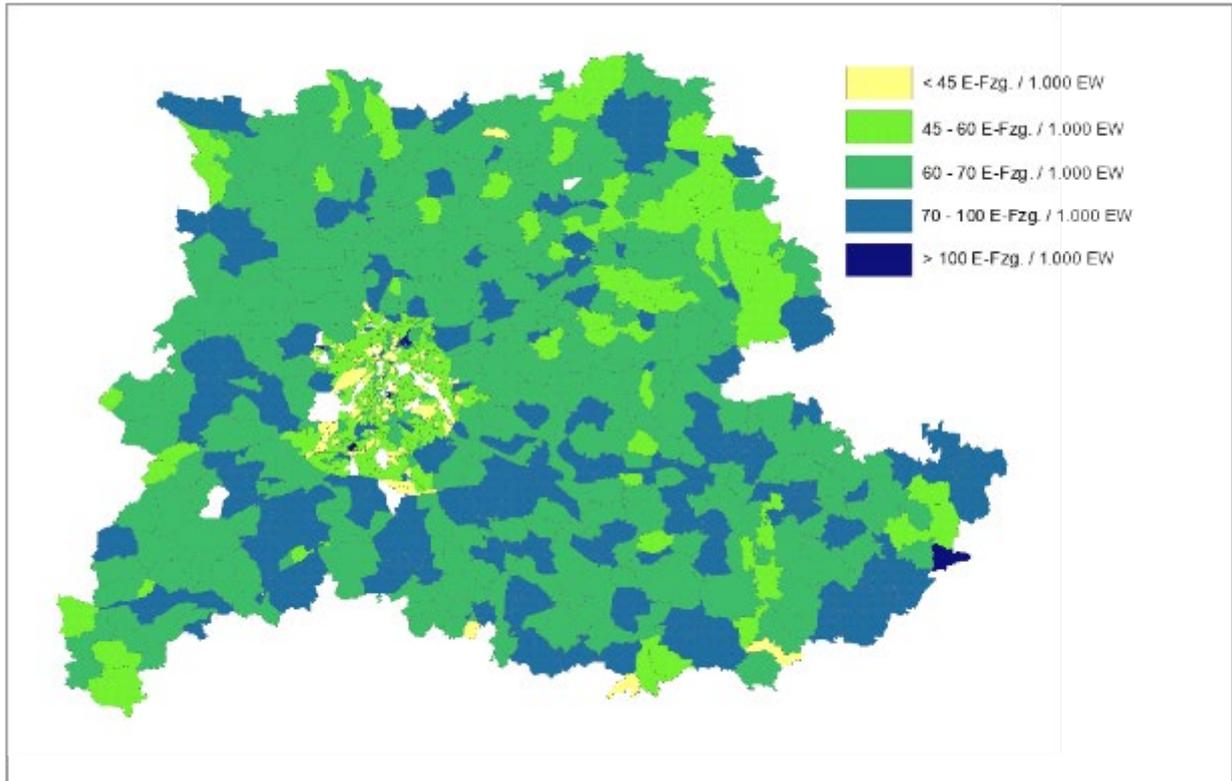


Abb. 6: Verteilung der E-Fahrzeuge in der Region Stuttgart 2030, Quelle: Projekt eVerkehrsraum Stuttgart.

Um bei den Fahrzeug-Agenten mit Elektroantrieb die gesamten Ladevorgänge zu modellieren, werden neben der Entladung durch Fahrleistung auch die Ladevorgänge der Fahrzeuge integriert. Zu diesem Zweck wird die Ladeinfrastruktur (LIS) in Form von Ladeorten mit Ladepunkten abgebildet (Gnann et al. 2017). Die Ladepunkte sind die eigentlichen Lademöglichkeiten. Es können mehrere Ladepunkte an einem Ladeort sein. Die Ladepunkte haben ebenfalls Eigenschaften, wie beispielsweise die Ladeleistung. Somit ist es möglich, sowohl Normal-LIS als auch Schnellladeinfrastrukturen (vgl. Definition) zu berücksichtigen (Soylu et al. 2018a). Die Ladepunkte werden entweder nach aktuellen Gegebenheiten oder künftigen Ausbauszenarien im Raum angeordnet und in das Modell integriert. Sofern sich ein E-Fahrzeug-Agent in der Simulation in der Nähe eines Ladeortes befindet, dieser nicht durch andere E-Fahrzeug-Agenten belegt ist und die Ladestrategie des E-Fahrzeugs einen Ladevorgang ermöglicht/berätigt, kann das E-Fahrzeug geladen werden. Dabei wird die Ladeleistung der LIS, der aktuelle SOC des Fahrzeugs und die Akkukapazität sowie die Standzeit der E-Fahrzeuge berücksichtigt. Durch die minutenfeinen Simulationsschritte in mobiTopp können alle Ladevorgänge und Ladestände der Fahrzeuge aber auch der Energiebedarf der LIS ermittelt werden.

Da die meisten täglichen Fahrtweiten mit konventionellen Fahrzeugen aber auch mit E-Fahrzeugen unter der Reichweite der E-Fahrzeuge liegen (vgl. Abb. 5), ist es analog zur Erhebung sinnvoll bzw. notwendig, in der Modellierung einen längeren Zeitraum zu betrachten, um Ladevorgänge und Ladebedarf auf mikroskopischer Basis abzubilden. Nur so ist es möglich, reale Fahrtweiten und Fahrleistungen mit der LIS in Bezug zu setzen, da oft, wegen geringer Fahrleistung, über mehrere Tage nicht geladen werden muss und Ladestrategien erst über einen längeren Zeitraum abgebildet werden können. Da mit zunehmendem Simulationszeitraum auch die Anforderungen an Hardware, Speicherplatz und Berechnungsdauer steigen, ist hier ein sinnvoller Zeitraum zu wählen, der lang genug ist, um Ladevorgänge zu erfassen, und kurz genug ist, um nicht zu hohe Anforderungen an die Simulationsrahmenbedingungen zu erzeugen. Es hat sich gezeigt, dass der Simulationszeitraum von einer Woche ausreicht, um beiden Forderungen gerecht zu werden. Fast alle E-Fahrzeuge in einer Simulation innerhalb einer Woche laden mindestens einmal und die Rechenzeiten und Speicherbedarfe sind akzeptabel. Abb. 7 zeigt als Beispiel den aktuellen Ladebedarf auf Grund von Ladevorgängen der E-Fahrzeuge zu einem bestimmten Zeitpunkt (Montag um 8.28 Uhr) in der Region Stuttgart auf Verkehrszellenbasis. Je größer die blauen Kreise, desto höher ist der Energiebedarf in der Zelle.

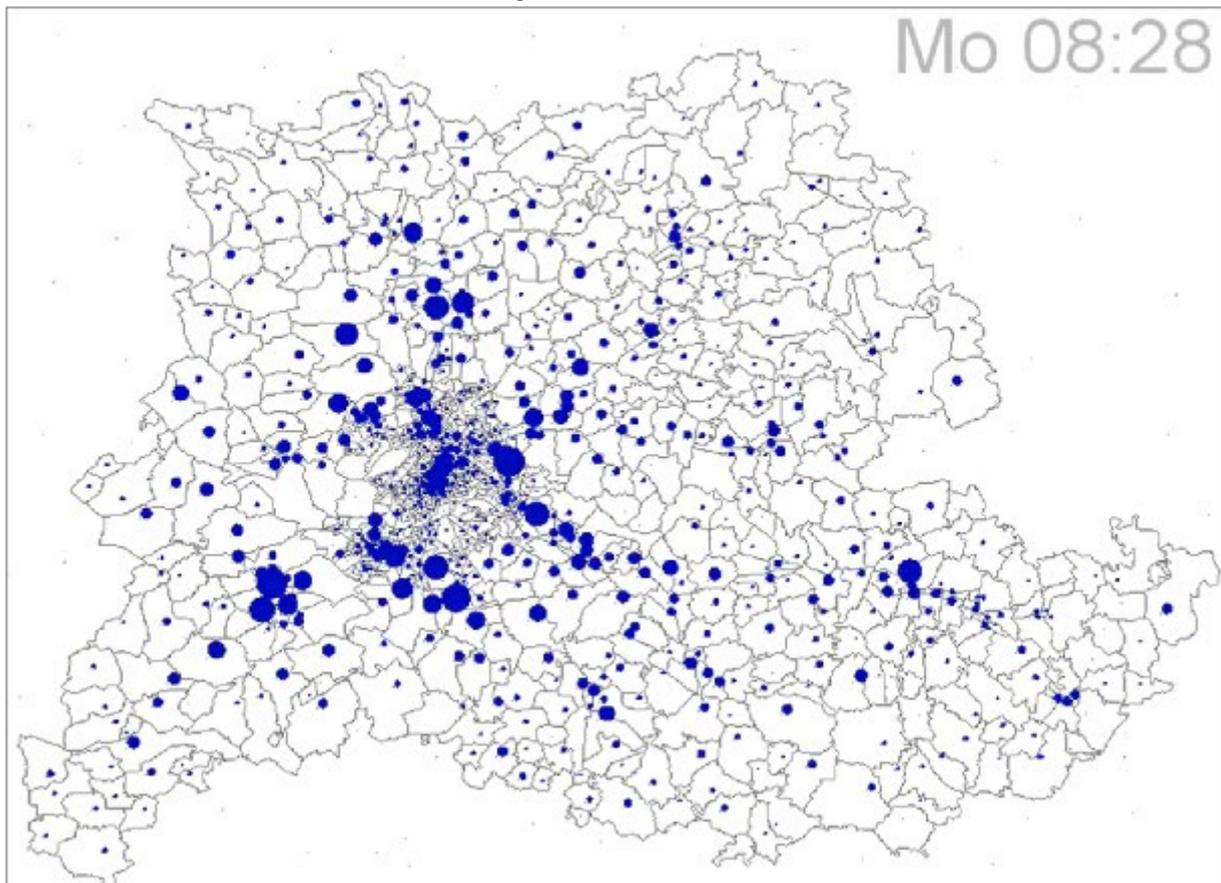


Abb. 7: Lademenge je Ladeort in der Region Stuttgart, Quelle: Projekt eVerkehrsraum Stuttgart (Kagerbauer und Heilig 2013).

Grundlage zur Abbildung der Ladevorgänge sind die modellierten Wege der Personen-Agenten. E-Fahrzeuge dienen wie andere Verkehrsmittel dazu, Personen-Agenten von einer Quelle zu einem Zielort für eine Aktivität fortzubewegen (Wegezzweck). Auf Basis von Aktivitätsbedürfnissen der Personen-Agenten und der Attraktivität zur Befriedigung dieser Bedürfnisse am Zielort werden die Relation des Weges (von wo nach wo) und die verwendeten Verkehrsmittel bestimmt. Insbesondere wenn die Reichweitenrestriktionen am Beginn der technischen Entwicklung noch groß sind, ist in der Elektromobilität die Berücksichtigung der Reichweiten von E-Fahrzeugen notwendig. Daher ist es sinnvoll, eine

Ziel- und Verkehrsmittelwahl kombiniert durchzuführen, da Reichweitenrestriktionen bei einem Verkehrsmittel die Ziele beeinflussen können oder Ziele die Wahl von Verkehrsmitteln (beispielsweise wird im Choice-Set der Verkehrsmittel kein E-Fahrzeug mehr ausgewählt, wenn mit der aktuellen Restreichweite das Ziel nicht mehr erreicht werden kann). Abb. 8 zeigt den Ablauf einer Schätzung eines kombinierten Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodells auf Basis einer SP- und RP-Befragung (Ortúzar und Willumsen 2011), die im Projekt eVerkehrsraum Stuttgart durchgeführt wurde (Kagerbauer und Heilig 2013). Mit einem Nested-Logit-Modell wird eine kombinierte Ziel- und Verkehrsmittelwahl je Zielzelle und Verkehrsmittel erstellt. Zuerst werden in Ebene 1 die Parameter der Nutzenfunktion der Verkehrsmittel geschätzt. Zur kombinierten Schätzung dient ein Nested-Logit-Modell in der Ebene Z. Dabei sind die Verkehrsmittel jeweils ein eigenes Nest. Datengrundlage kann dabei die RP- oder SP-Befragung sein. Danach werden die Parameter für die Zielwahl geschätzt, indem im Nested-Logit-Modell die Log-Summe der Nutzen aus Ebene 1 bei der Schätzung der Parameter der Ebene 2 berücksichtigt wird. In der Nutzenfunktion der Zielwahl sind die Anzahl der Gelegenheiten, die Anzahl der Ladestationen, die Zeit und die Entfernung der jeweiligen Zielzelle enthalten, um diese in die Modelle integrieren und abbilden zu können. Im Modell (unterer Teil der Grafik) wird dann die so ermittelte Nutzenfunktion mit den geschätzten Parametern angewendet. Somit können bei nicht ausreichenden Restreichweiten nur relevante Entscheidungsmöglichkeiten berücksichtigt werden, so dass nur erreichbare Ziele und nutzbare Verkehrsmittel in den Wahlentscheidungen enthalten sind. Es ist möglich bei Restreichweitenrestriktionen die Wahl von näheren Zielen oder anderen Verkehrsmitteln in einem Modellschritt zu berücksichtigen.

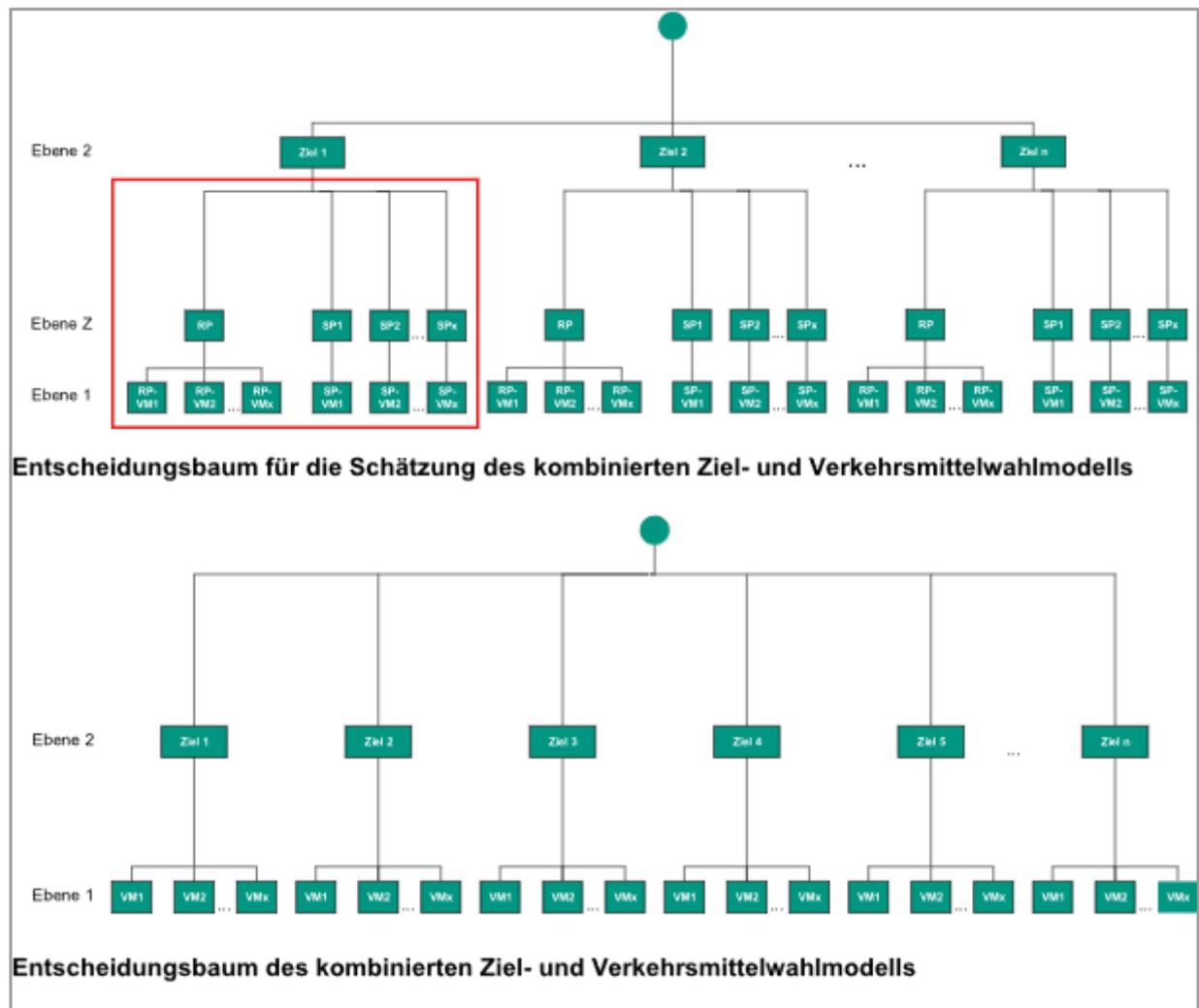


Abb. 8: Beispiel für ein kombiniertes Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodell, Quelle: Projekt eVerkehrsraum Stuttgart (Kagerbauer und Heilig 2013).

Mit diesem Vorgehen können sowohl mögliche Veränderungen durch Elektromobilität im Verkehrsverhalten abgebildet (Heilig et al. 2017a), als auch die vorhandene oder benötigte Ladeinfrastruktur bewertet werden (Heilig et al. 2018).

Schlussfolgerung

Die Integration von Elektromobilität in die Verkehrsplanung und im Speziellen in Verkehrserhebungen und Verkehrsnachfragemodellierung, kann mit einigen Anpassungen und der Verwendung von Modellen, die auf Agentenebene für Personen und Fahrzeuge arbeiten, gut durchgeführt werden. Besonderes Augenmerk ist auf die Abbildung der Charakteristika der Nutzenden oder Besitzenden von elektrisch betriebenen Fahrzeugen, die Eigenschaften der Elektrofahrzeuge vor allem hinsichtlich Reichweite und die zusätzliche Berücksichtigung der Ladevorgänge bzw. Ladeinfrastruktur zu legen. Die Wechselwirkungen zwischen Ziel- und Verkehrsmittelwahl sowie Reichweiten der Fahrzeuge können in der Verkehrsnachfragemodellierung mit kombinierten Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodellen abgebildet werden. Zur sinnvollen Abbildung der Ladevorgänge sollten längere Erhebungs- und Modellierungszeiträume angesetzt werden, um Variationen im Verkehrsverhalten und Ladestrategien erfassen zu können. Diese sollten mindestens eine Woche betragen – besser noch länger.

Im Vergleich zu Tankvorgängen mit konventionellen Fahrzeugen, die aufgrund der kurzen Dauer oft nicht oder nur mit einer kurzen Einkaufsaktivität zum Zwecke des Tankens abgebildet werden, setzt das Laden voraus, dass die Ladevorgänge während einer Aktivität der Personen durchgeführt werden und sonst keinen weiteren Einschränkungen unterliegt, so dass diese Ladevorgänge nicht explizit in den Aktivitätenplänen der Agenten hinterlegt werden müssen. Allerdings ist es notwendig, die Verfügbarkeiten der Ladeinfrastrukturen mit zu betrachten. Zu überlegen wäre, ob bei Schnellladevorgängen, die je nach Ladebedarf in der Größenordnung von 5 bis ca. 20 Minuten liegen, eine zusätzliche Aktivität „Laden“ in die Aktivitätenpläne der Personen-Agenten zu integrieren ist. Theoretisch ist das möglich, allerdings ist dies vor dem Hintergrund des Aufwands der Integration und des Nutzens zu entscheiden. Da diese Schnellladevorgänge meist für Langstreckenfahrten nötig wären, kann angenommen werden, dass der Ladeprozess einer kurzen Pause innerhalb einer Langstrecke entspricht und die Wirkungen auf das Verkehrsverhalten vernachlässigbar sind.

Für eine detaillierte und (minuten-)genaue Abbildung des Energiebedarfs aufgrund von Elektromobilität ist es in der Regel notwendig, genaue Modelle zu haben, um Prognosen erstellen zu können. Zur Bewertung und Abschätzung der LIS auf einer abstrakteren Ebene ist es auch möglich, nicht detailliert die Verkehrsnachfrage zu modellieren, sondern Abschätzungen anhand von Mittelwerten und Verteilung der Fahrzeugnutzung und Quelle-Ziel-Relationen sowie der Struktur des Planungsraums durchzuführen. Mögliche Ansätze sind der Literatur zu entnehmen (Soylu et al. 2018a; Plötz et al. 2016; Soylu et al. 2018b).

Literatur

ADAC (2020): Aktuelle Elektroautos im Test: So hoch ist der Stromverbrauch. Hg. v. ADAC. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/elektromobilitaet/stromverbrauch-elektroautos-adac-test/> (letzter Zugriff 01.07.2020)

BMU (2017): Fahrzeugkonzepte für Elektroautos. <https://www.bmu.de/themen/luft-laerm-verkehr/verkehr/elektromobilitaet/allgemeine-informationen/fahrzeugkonzepte-fuer-elektroautos/>, (letzter Zugriff 16.06.2020)

Burger, Bruno (2020): Stromerzeugung in Deutschland im ersten Quartal 2020. FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE. Freiburg. https://www.energy-charts.de/energy_pie_de.htm?year=2019, (letzter Zugriff 16.06.2020)

Chlond, Bastian; Kagerbauer, Martin; Ottmann, P.; Zumkeller, Dirk (2009): Mobilitätspanel: Pkw-Fahrleistungen und Treibstoffverbrauch im Vergleich. In: Internationales Verkehrswesen 61 (3), 71-75.

Chlond, Bastian; Kagerbauer, Martin; Vortisch, Peter (2012): Welche Anforderungen sollen Elektrofahrzeuge erfüllen? – Hinweise aus der Perspektive der Mobilitätsforschung. In: Proff, Schönharting et al. (Hrsg.) – Zukünftige Entwicklungen in der Mobilität, 445-454.

Chlond, Bastian; Kagerbauer, Martin; Vortisch, Peter; Wirges, Johannes (2012): Market Potential for Electric Vehicles from a Travel Behavior Perspective. In: Transportation Research Board (Hrsg.): TRB 91st Annual Meeting Compendium of Papers. Washington, D.C.

Die Bundesregierung (2009): Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. <https://www.bmu.de/download/nationaler-entwicklungsplan-elektromobilitaet-der-bundesregierung/> (letzter Zugriff 01.07.2020)

FGSV (2018): Elektromobilität – Systembedingungen, Einsatzbedingungen und Systemintegration. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV).

Gnann, Till; Plötz, Patrick; Globisch, Joachim; Schneider, Uta; Dütschke, Elisabeth; Funke, Simon et al. (2017): Öffentliche Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. Ergebnisse der Profilregion Mobilitätssysteme Karlsruhe. Eggenstein. <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-474648.html>.

Heilig, Michael; Gnann, Till; Plötz, Patrick; Mallig, Nicolai; Briem, Lars; Kagerbauer, Martin; Vortisch, Peter (2017a): Do plug-in electric vehicles cause a change in travel behavior? In: EVS30 (Hrsg.): International Electric Vehicle Symposium & Exhibition. Stuttgart, Germany.

Heilig, Michael; Mallig, Nicolai; Hilgert, Tim; Kagerbauer, Martin; Vortisch, Peter (2017b): Large-Scale Application of a Combined Destination and Mode Choice Model Estimated with Mixed Stated and Revealed Preference Data. In: Transportation Research Record (2669), 31-40. DOI: 10.3141/2669-04.

Heilig, Michael; Plötz, Patrick; Soylu, Tamer; Briem, Lars; Kagerbauer, Martin; Vortisch, Peter (2018): Assessment of fast charging station locations - an integrated model based approach. In: International Association for Travel Behaviour Research (IATBR) (Hrsg.): 15th International Conference on Travel Behavior Research. Santa Barbara, 15.-19.07.2018.

Hilgert, Tim; Kagerbauer, Martin; Weiss, Christine; Vortisch, Peter (2016): Integrating BEV into daily travel behaviour. In: Johannes Schäuble, Patrick Jochem und Wolf Fichtner (Hrsg.): Cross-border Mobility for Electric Vehicles - Selected results from one of the first cross-border field tests in Europe. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 195-207.

Kagerbauer, Martin; Heilig, Michael (2013): Projekt eVerkehrsraum Stuttgart. In: Internationales Verkehrswesen 3/2013, 68.

Ortúzar, Juan de Dios; Willumsen, Luis G. (2011): Modelling Transport. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons. <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10510502>

Plötz, Patrick; Gnann, Till; Kagerbauer, Martin; Heilig, Michael (2017): Can Models Predict Electric Vehicle Users? In: EVS30 (Hrsg.): International Electric Vehicle Symposium & Exhibition. Stuttgart, Germany.

Plötz, Patrick; Gnann, Till; Kühn, André; Wietschel, Martin (2013): Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge – Langfassung. Studie im Auftrag der acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und der Arbeitsgruppe 7 der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE). Karlsruhe: Fraunhofer Institute for Systems and Innovation.

Plötz, Patrick; Kagerbauer, Martin; Soylu, Tamer (2016): Öffentliche Ladeinfrastruktur in Baden-Württemberg. Gutachten im Auftrag der e-mobil BW GmbH. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Rogers, Everett M. (2010): Diffusion of innovations: Simon and Schuster.

Soylu, Tamer; Heilig, Michael; Briem, Lars; Plötz, Patrick; Kagerbauer, Martin; Vortisch, Peter (2018a): GIS-based modelling of fast-charging infrastructure at the city-regional level. In: International Scientific Conference on Mobility and Transport: Urban Mobility – Shaping the Future Together. mobil.TUM 2018, 13.-14. June 2018.

Soylu, Tamer; Kagerbauer, Martin; Vortisch, Peter (2018b): Ermittlung des Ladeinfrastrukturbedarfs in den Gemeinden der Metropolregion Rhein-Neckar. Gutachten im Auftrag der Metropolregion Rhein-Neckar GmbH. Karlsruhe.

Statista (2020a): Bestand an Elektro-Pkw in Deutschland nach Segmenten in den Jahren 2015 bis 2019. Unter Mitarbeit von Andreas Ahlswede. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1097903/umfrage/bestand-an-elektro-pkw-in-deutschland-nach-segmenten/>.

Statista (2020b): Weltweite Bestandsentwicklung von Elektroautos in den Jahren 2012 bis 2019. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/168350/umfrage/bestandsentwicklung-von-elektrofahrzeugen/> (letzter Zugriff 01.07.2020)

Streit, Tatjana; Chlond, Bastian; Vortisch, Peter; Kagerbauer, Martin; Weiss, Christine; Zumkeller, Dirk (2014): Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen, Bericht 2012/13: Alltagsmobilität und Fahrleistungen. Karlsruhe: Institut für Verkehrswesen (KIT).