



Markthochlaufszzenarien für Elektrofahrzeuge – Rückblick und Ausblick bis 2030

Autoren:

Till Gnann, Daniel Speth, Patrick Plötz, Martin Wietschel, Michael Krail

No. S 05/2022

Impressum

Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge – Rückblick und Ausblick bis 2030

Autoren

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI,
Karlsruhe:

Till Gnann, till.gnann@isi.fraunhofer.de;

Daniel Speth, daniel.speth@isi.fraunhofer.de;

Patrick Plötz, patrick.ploetz@isi.fraunhofer.de;

Martin Wietschel, martin.wietschel@isi.fraunhofer.de;

Michael Krail, michael.krail@isi.fraunhofer.de;

Bildnachweis

Deckblatt: Shutterstock.com/ TechSolution

Zitierempfehlung

Gnann, T.; Speth, S.; Plötz, P.; Wietschel, M.; Krail, M. (2022): Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge – Rückblick und Ausblick bis 2030. Working Papers Sustainability and Innovation, No. S 05/2022. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.

Veröffentlicht

April 2022

Kontakt

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI << Impressum Firma >>

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe

Till Gnann, till.gnann@isi.fraunhofer.de

Hinweise

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr. Die Darstellungen in diesem Dokument spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung des Auftraggebers wider.

Zusammenfassung

Die Verbreitung von Elektrofahrzeugen spielt eine wichtige Rolle zur Erreichung der Klimaziele im Verkehrssektor und kann auch zu einer größeren Unabhängigkeit der Energieversorgung beitragen. Die Erforschung ihrer Verbreitung ist daher weiterhin von großer Relevanz.

Im Rahmen einer Studie für die Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) wurden im Jahr 2013 Markthochlaufszzenarien für Elektrofahrzeuge bis zum Jahr 2020. Fast zehn Jahre später wird ihm Rahmen dieses Working Papers die damalige Methodik und die Ergebnisse mit realen Entwicklungen abgeglichen. Zudem werden methodische Neuerungen erläutert und ein Ausblick auf Modell-ergebnisse für das Jahr 2030 gewagt, um die neue politisch gesetzte Zielerreichung von 15 Millionen reinen Elektrofahrzeugen und die Treibhausgas(THG)-Minderungsziele unter die Lupe zu nehmen.

Es zeigt sich, dass viele Entwicklungen gut eingeschätzt wurden und man aufgrund der niedrigen Kraftstoffpreise lange keine nennenswerte Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen sehen konnte. Mit zahlreichen politischen Fördermaßnahmen und der EU-Regulierung über die Flottengrenzwerte lag Deutschland Ende 2020 jedoch im mittleren Bereich des 2013 aufgespannten Ergebnisraums. Auch für 2030 ist die Zielerreichung maßgeblich abhängig vom Niveau der Flottengrenzwerte und ambitionierten Zwischenschritten bei der THG-Emissionsminderung. Nur dann können 15 Millionen reine Elektrofahrzeuge 2030 erreicht werden.

Inhaltsverzeichnis

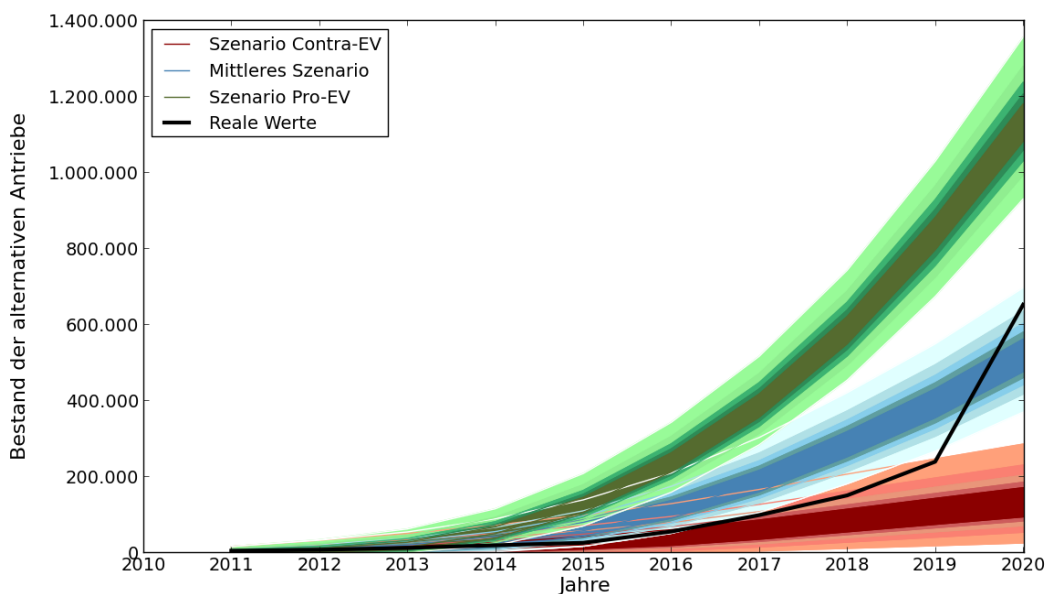
Zusammenfassung	3
1 Einleitung	5
2 R#ckblick und Review	7
2.1 Marktentwicklung bis 2020	7
2.2 Review Markthochlaufmodellierung	8
2.2.1 Review Methodik.....	8
2.2.2 Review-Annahmen.....	9
2.2.3 Review Ergebnisse	11
3 Weiterentwicklung von Methodik und Annahmen	13
3.1 Erweiterung der Methodik.....	13
3.2 Erweiterung und Aktualisierung der Annahmen.....	13
4 Ergebnisse bis 2030	15
5 Diskussion	19
6 Schlussfolgerungen und Ausblick	21
6.1 Fazit.....	21
6.2 Zuk#nftige Arbeiten	21
Literaturverzeichnis	23

1 Einleitung

Der Markthochlauf von Elektrofahrzeugen ist ein wichtiger Baustein zur Erreichung der Klimaziele des Verkehrssektors und daher von hoher Relevanz für Industrie, Politik und Gesellschaft. Vor acht Jahren wurde das Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung ISI von der Arbeitsgruppe 7 Rahmenbedingungen der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) beauftragt diesen Markthochlauf für Elektrofahrzeuge zu bestimmen. Ein im Aufbau befindliches Markthochlaufmodell wurde weiterentwickelt, um den gestellten Anforderungen eines wissenschaftlich fundierten Total-Cost-of-Ownership (TCO)-Modells, das auch hemmende und fördernde Faktoren berücksichtigt, zu genügen. In zahlreichen Diskussionen wurden die notwendigen Parameter für die Marktentwicklung bis 2020 ermittelt und in einem umfangreichen Abschlussbericht veröffentlicht (Plötz et al. 2013). Damals wurden drei Szenarien berechnet – eines das für Elektrofahrzeuge hinderliche Rahmenbedingungen zusammenfasst (contra-EV-Szenario), eines mit positiven Rahmenbedingungen (pro-EV-Szenario) und eines das zwischen den beiden Szenarien lag (mittleres Szenario).

Heute kann man feststellen, dass die wesentliche Entwicklung des Markthochlaufs getroffen wurde und der Wert für 2020 nun leicht oberhalb des mittleren Szenarios liegt (vgl. Abbildung 1). Die Entwicklung der Vorjahre deutete aber eher auf einen niedrigeren Wert hin, der am oberen Rand des pessimistischen Contra-EV Szenarios lag.

Abbildung 1: Markthochlauf für Elektrofahrzeuge im Rahmen der NPE-Studie und tatsächliche Entwicklung



Der reale Markthochlauf unterliegt einer Reihe von Entwicklungen, die indirekt mit der Verbreitung von Elektrofahrzeugen zu tun haben, wie der Diesel- und Corona-Krise. Beide Entwicklungen waren nicht vorherzusehen, hatten aber durch verstärkte Konzentration auf Elektrofahrzeuge von Industrie und Politik letztlich positive Auswirkungen auf den Markthochlauf von Elektrofahrzeugen. Ebenso war der Instrumentenmix der Politikmaßnahmen im Jahr 2013 noch unklar, aber die Veränderung

der Dienstwagenbesteuerung zugunsten von Elektrofahrzeugen, die Versch#rfung der Flottengrenzwerte, der Ausbau der Ladeinfrastruktur und die Erh#hung der Kaufpr#mie beschleunigten die positive Entwicklung.

Die Vielzahl an Rahmenbedingungen, die in den Markthochlaufberechnungen zu betrachten waren, ver#nderten sich jedoch ganz unterschiedlich und auch methodisch wurde nach 2013 einiges im zugrundeliegenden Modell ALADIN (Alternative Antriebe Diffusion und Infrastruktur) ver#ndert. F#r die vorliegende Studie stellen sich daher drei Forschungsfragen:

- Warum hat sich der Markt so entwickelt?
- Wie gut waren die Analysen f#r 2020?
- Wie geht es bis 2030 weiter? Und wie k#nnte es 2050 aussehen?

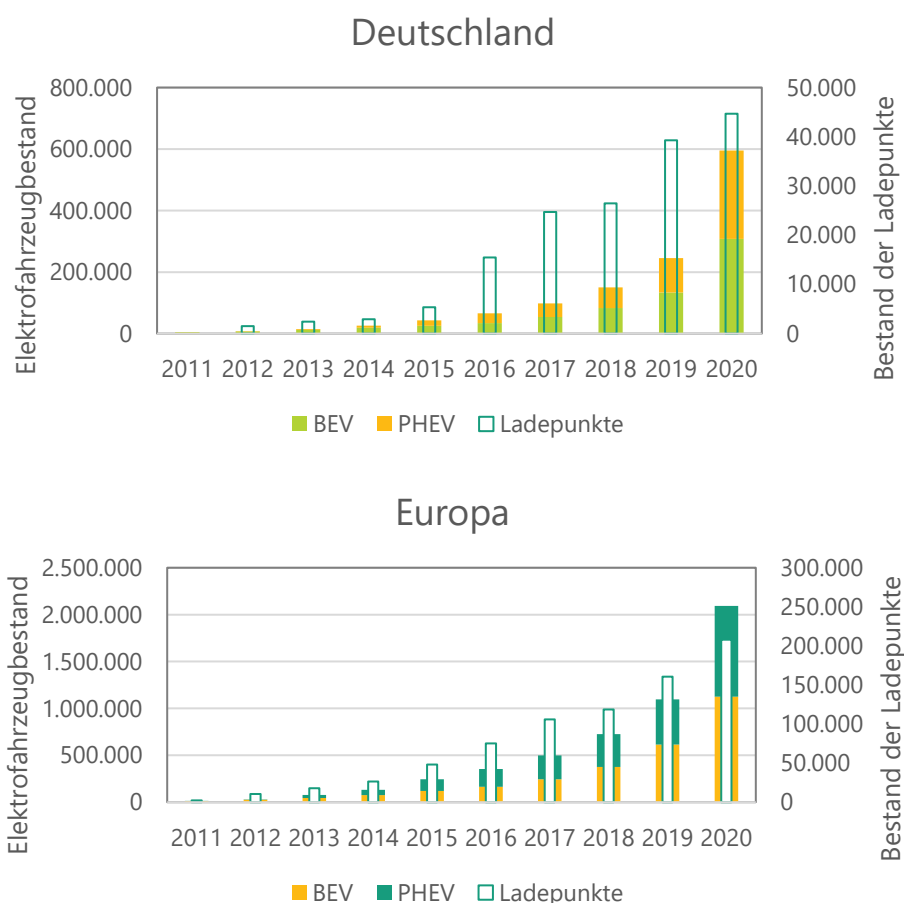
In Folgeabschnitt wird vor allem auf die ersten beiden Fragen eingegangen und ein R#ckblick auf die Marktentwicklung geworfen sowie Methodik, Annahmen und Ergebnisse kritisch hinterfragt und mit der Realit#t abgeglichen (Abschnitt 2). Anschlie#end werden methodische Weiterentwicklungen und Szenarien f#r einen Markthochlauf bis 2030 beschrieben (Abschnitt 3). Die Ergebnisse des Markthochlaufs bis 2030 werden im vierten Abschnitt gezeigt, bevor eine Diskussion (Abschnitt 5) und Schlussfolgerungen diese Arbeit abschlie#en (Abschnitt 6).

2 Rückblick und Review

2.1 Marktentwicklung bis 2020

Der Markt für Elektrofahrzeuge entwickelte sich bis 2019 nur sehr langsam und der Bestand von Elektrofahrzeugen lag bei knapp 250.000 Fahrzeugen Ende 2019. Die deutliche Förderung ab 2020 und die zunehmende Bedeutung der Flottengrenzwerte erhöhte die Zahl der Elektrofahrzeuge deutlich auf rund 600.000 zum Jahresende 2020 (vgl. Abbildung 2). Reine Batteriefahrzeuge (BEV) umfassten dabei rund die Hälfte der elektrischen Fahrzeuge, Plug-in Hybride (PHEV) die andere Hälfte. Die Batteriefahrzeuge sind zu 54 % von privaten, zu 46 % von gewerblichen Haltern gemeldet, bei PHEV sind 39 % privat und 61 % gewerblich zugelassen.

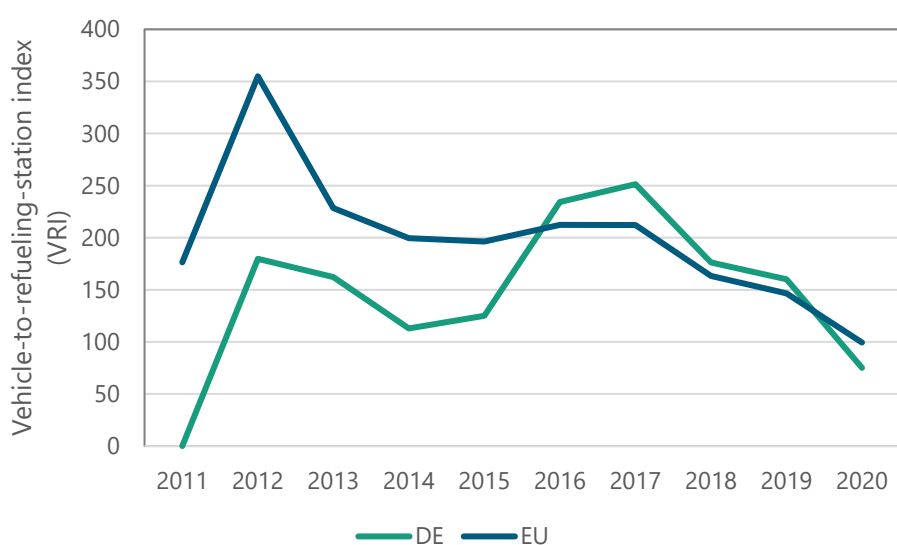
Abbildung 2: Bestand von Elektrofahrzeugen unterschieden nach BEV und PHEV, sowie Ladepunkte in Deutschland und Europa 2011 bis 2020. Daten von (EAFO 2021)



Im Vergleich mit den europäischen Bestandszahlen zeigt sich, dass es zwar Länder gab, die schneller höhere Bestände als Deutschland erreicht haben, aber nun rund 30 % der europäischen Elektrofahrzeuge in Deutschland zugelassen sind – also mehr als der deutsche Anteil für konventionelle Fahrzeuge an den europäischen beträgt (knapp 20 %). Dies ist u. a. mit höheren Einkommen in Deutschland und Unterschieden in der Förderpolitik im Vergleich zu anderen europäischen Ländern erklärbar.

Interessant ist hierbei aber auch die Entwicklung der Ladeinfrastruktur. Zu Beginn des deutschen Markthochlaufs von Elektrofahrzeugen war das Verhältnis von Elektrofahrzeugen zu öffentlichen Ladepunkten noch deutlich geringer, was der Vehicle-to-refueling-station Index (VRI) in Abbildung 3 zeigt. Hier wird die Anzahl der Elektrofahrzeuge mit 1000 multipliziert und anschließend durch die Anzahl der Ladepunkte geteilt – für konventionelle Fahrzeuge liegt dieser Wert bezogen auf die Anzahl der Tankstellen (nicht Zapfsäulen) bei 0,7. Deutlich zu sehen ist hier, dass Deutschland in puncto Ladeinfrastruktur sehr stark in Vorleistung gegangen ist, auch deutlich stärker als das europäische Mittel, sich nun aber zu konsolidieren scheint, nachdem ein initialer Ladeinfrastrukturaufbau geschafft ist.

Abbildung 3: VRI (Verhältnis von Ladepunkten zu Elektrofahrzeugen multipliziert mit 1000) in Deutschland und EU 2011 bis 2020. Daten von (EAFO 2021)



2.2 Review Markthochlaufmodellierung

2.2.1 Review Methodik

In der NPE-Studie wurde das Modell ALADIN (**A**lternative **A**ntriebe **D**iffusion und **I**nfrastruktur) erstmals eingesetzt und aufgebaut. Dabei wurden bestehende Elemente von früheren Studien zu einem Gesamtmodell überführt, das den Markthochlauf der Elektrofahrzeuge abbildete. Das Modell ALADIN beruht auf agentenbasierter Simulation. Aktuelle Untersuchungen, in denen das Modell mit Discrete-Choice-Modellen verglichen wurde, zeigen, dass die agentenbasierte Modellierung sehr gut geeignet ist, um die Wirkung einzelner Effekte – zum Beispiel Fördermaßnahmen oder Preisentwicklungen für Batterien – zu untersuchen. Diese hohe Nachvollziehbarkeit beruht gleichzeitig auf einem hohen Detailgrad der Inputparameter, die einen vergleichsweise hohen Einfluss auf die Ergebnisse haben (Gnann et al. 2022).

Tabelle 1 fasst die methodischen Aspekte der NPE-Studie und einige Veränderungen zusammen. Die technische Analyse der Fahrprofile und die TCO-Berechnung wurde in zahlreichen weiteren Veröffentlichungen nicht verändert und ist auch im internationalen Vergleich sehr üblich (Gnann et al. 2018a). Die Integration der Ladeinfrastrukturkosten wurde leicht angepasst, sodass in weiteren Analysen nicht nur der heimische, sondern auch der Ladepunkt bei der Arbeit einem Nutzer zuge-

ordnet wird (vgl. Kühnbach et al. 2020). Die Ergebnisse bis 2020 werden dadurch aber nicht beeinflusst, da Lademöglichkeiten am Arbeitsplatz auch heute eher die Ausnahme als die Regel darstellen. In unveröffentlichten Analysen, in denen Nutzern ohne Garage oder Stellplatz am Haus, sogenannten Laternenparkern, die Möglichkeit eingeräumt wurde in dieser Zeit öffentlich zu laden, konnten keine maßgeblichen Änderungen auf den Markthochlauf festgestellt werden.

Tabelle 1: Methodische Umsetzung in der NPE-Studie und Veränderungen in der Realität

Kapitel*	Thema	Veränderungen	Auswirkung auf EV-Markthochlauf
3.2.1	Technische Analyse der Fahrprofile	Nein	
3.2.2	Total-Cost-of-Ownership-Methodik generell	Nein	
3.2.3	Integration der Ladeinfrastrukturkosten	Ja	keine
3.2.4	Integration des Kundenverhaltens bezüglich Marke und Größe	Nein	
3.2.5	Integration einer Mehrpreisbereitschaft	Nein	
3.2.6	Integration von Politikmaßnahmen	Ja	negativ

* Kapitelnummern in (Plötz et al. 2013)

Auch der Nutzen öffentlicher Langsamladeinfrastruktur wurde in mehreren Folgearbeiten intensiv untersucht (Gnann 2015, Gnann et al. 2018b, Gnann et al. 2019). Das klare Ergebnis war, dass kein positiver Effekt von Langsamladeinfrastruktur auf den Markthochlauf ermittelt werden konnte und die Annahmen im Rahmen der NPE-Studie Bestand haben. Der Nutzen öffentlicher Schnellladeinfrastruktur wurde in zwei Folgearbeiten als positiv erachtet (Gnann 2015, Jakobsson et al. 2016), der Bestand an Schnellladesäulen war aber bis 2019 noch so gering, dass der Effekt als nachrangig erachtet werden sollte.

Beim Kundenverhalten und der Mehrpreisbereitschaft gab es keinen Anlass zu methodischen Veränderungen, anders als bei den Politikmaßnahmen. Hier wurde der Effekt von geringen Anreizen im Vergleich zu real erhobenen Daten (Münzel et al. 2019) deutlich überschätzt, sodass in späteren Arbeiten eine geringere Wirkung über eine Halbierung oder Drittelung der Förderhöhe implementiert wurde.

2.2.2 Review-Annahmen

Im Rahmen der NPE-Studie wurden die Parameter in die sieben Gruppen Fahrzeugmarkt, Fahrzeugparameter, Fahrprofilaten, Ladeinfrastruktur, energiewirtschaftliche Rahmendaten und Kundenverhalten und nicht-monetäre Faktoren unterschieden (siehe Tabelle 2).

Beim Fahrzeugmarkt gab es keine bedeutenden Änderungen zu den 2013 getroffenen Annahmen. Die Gesamtzahl und Segmentierung veränderten sich im Wesentlichen nicht. Auch für die Restwertberechnung, die Haltedauern und die Lebensdauer der Fahrzeuge können keine wesentlichen Abweichungen ermittelt werden.

Hinsichtlich der Fahrzeugparameter gab es vor allem Änderungen hinsichtlich der Batterieeigenschaften. Über die Jahre wurden deutlich größere Batterien in Fahrzeugen verbaut, was die Reichweite klar erhöhte. Eine gleichzeitige deutlichere Kostendegression als 2013 angenommen wurde, erlaubte es, die höheren Reichweiten bei nicht deutlich höheren Fahrzeugpreisen zu realisieren.

Tabelle 2: Verwendete Parameter in NPE-Studie und Veränderungen in der Realität

Kapitel*	Thema	Veränderungen	Auswirkung auf EV-Markthochlauf
4.2	Rahmendaten Fahrzeugmarkt		
4.2.1	Zahl der Neuzulassungen	Nein	
4.2.2	Aufteilung nach Segmenten	Nein	
4.2.3	Restwertberechnung	Nein	
4.2.4	Haltedauern	Nein	
4.2.5	Lebensdauer und Verschrottung der Fahrzeuge	Nein	
4.3	Fahrzeugparameter		
4.3.1	Batteriegrößen und Entladetiefen	Ja	positiv
4.3.2	Batteriepreise	Ja	positiv
4.3.3	Nettolistenpreise	Ja	?
4.3.4	Energieverbräuche konventionell	Nein	
4.3.5	Energieverbräuche elektrisch	Nein	
4.3.6	Wartungskosten	Nein	
4.3.7	Kfz-Steuer	Nein	
4.3.8	Versicherung	Nein	
4.4	Fahrprofilaten		
4.4.1	Einleitung und Übersicht		
4.4.2	Fahrprofile Privatverkehr	Ja	keine
4.4.3	Fahrprofile Wirtschaftsverkehr	Ja	keine
4.5	Ladeinfrastrukturdaten und -varianten		
4.5.1	Einleitung und Abbildung im Modell	Ja	keine
4.5.2	Ladeinfrastrukturzenarien	Ja	keine
4.6	Energiewirtschaftliche Rahmendaten		
4.6.1	Kraftstoffpreise	Ja	negativ
4.6.2	Strompreise	Nein	
4.6.3	Erlöspotenziale durch Netzdienstleistungen	Nein	
4.6.4	Übersicht Szenariodaten	Nein	
4.7	Kundenverhalten und nicht-monetäre Faktoren		
4.7.1	Mehrpreisbereitschaft	Ja	negativ
4.7.2	Marken- und Segmenttreue	Nein	
4.7.3	Markenverfügbarkeit von Elektrofahrzeugen	Ja	negativ
* Kapitelnummern in (Plötz et al. 2013)			

Beide Entwicklungen wirkten sich also positiver auf die Elektrofahrzeugentwicklung aus als noch 2013 angenommen. Bezüglich der Energieverbräuche, Wartungskosten, Kfz-Steuer und Versicherung können keine wesentlichen Abweichungen zwischen den Annahmen der NPE-Studie und der Realität festgestellt werden (siehe Wietschel et al. 2021).

Bei den Fahrprofilen konnten nach 2013 weitere erhoben werden. Wesentliche Änderungen im Fahrverhalten ergaben sich dadurch aber nicht. Nach 2013 wurden eine Reihe an weiteren Analysen zur Ladeinfrastruktur durchgeführt (Gnann 2015, Gnann et al. 2018b, Gnann et al. 2019), allerdings ergaben diese keine deutlichen Veränderungen zu den damals getroffenen Annahmen. Auch in internationalen Vergleichen wurden diese Erkenntnisse bereits bestätigt Funke et al. (2019).

Klare Veränderungen gab es bei den konventionellen Kraftstoffpreisen. Die NPE-Studie ging damals von deutlichen Steigerungen des Ölpreises aus, sodass im Contra-EV-Szenario der Benzinpreis im Jahr 2020 bei 1,53 €/l und der Dieselpreis bei 1,43 €/l lag. Im Pro-EV-Szenario waren 1,78 bzw. 1,73 €/l noch deutlicher über der realen Entwicklung von 1,29 €/l für Benzin und 1,12 €/l für Diesel (MWV 2021). Diese Entwicklungen hatten einen deutlich negativen Einfluss auf die Verbreitung von Elektrofahrzeugen. Hinsichtlich der Strompreise und Erlöspotenziale für Netzdienstleistungen können keine wesentlichen Abweichungen zu den 2013 getroffenen Annahmen festgestellt werden.

Beim Kundenverhalten und der Fahrzeugverfügbarkeit wurden 2013 etwas zu optimistische Annahmen getroffen. Die Mehrpreisbereitschaft für den Kauf von Elektrofahrzeugen wurde damals für 2011 basierend auf (Peters et al. 2011) ermittelt und ihre Abnahme bis 2020 auf 60 % geschätzt. In einer erneuten Befragung zur Mehrpreisbereitschaft im Jahr 2015 konnte jedoch ein stärkerer Rückgang beobachtet werden (Gölz et al. 2015), sodass eher eine Reduktion auf 50 % bis 2020 wahrscheinlich schien. Auch das Angebot deutscher Hersteller entwickelte sich etwas langsamer als noch 2013 angenommen. Beides hatte negative Auswirkungen auf die Markthochlaufentwicklung.

2.2.3 Review Ergebnisse

Die Ergebnisse der NPE-Studie waren vielfältig: Von TCO-Lücken, über elektrische Fahranteile von PHEV, Markthochlauf unterteilt nach Nutzergruppen, Größenklassen und Elektrofahrzeugvarianten, über den Einfluss der Ladeinfrastruktur, Erstnutzern und Sensitivitäten bis hin zur Wirkung von Politikmaßnahmen. Auf diese soll im Folgenden jeweils kurz eingegangen werden.

Bei den PHEV ist nach dem TCO-basierten der elektrische Fahranteil oder engl. Utility Factor (UF) ein wichtiger Faktor für die Wirtschaftlichkeit eines PHEV. Hier zeigt sich in mancher Hinsicht die Richtigkeit des verwendeten Ansatzes: Vor allem Privatnutzer mit eigenen Garagen oder anderen einfach Lademöglichkeiten zuhause nutzen PHEV. Allerdings zeigt sich in der Auswertung realer Fahrdaten (vgl. Plötz et al. 2020 und Plötz et al. 2021), dass vor allem bei Dienstwagen die Benzin-kosten i.d.R. gar nicht vom Nutzer getragen werden und der die Modellierung an ihre Grenzen stößt. Daher haben gerade Dienstwagen zu relevanten Anteilen PHEV genutzt ohne täglich zu laden und ohne die Benzin-kosten zu berücksichtigen, da diese durch Tankkarten bei Ihnen oft nicht anfallen. Inzwischen haben viele Unternehmen reagiert und sind etwas strenger bei der Vergabe von PHEV als Dienstwagen. In Summe stimmt die simulierte Streuung realer UF vor allem für Privatnutzer aber sehr gut mit der realen Streuung überein.

Betrachtet man die **Markthochlaufprojektionen** von 2013 und die reale Entwicklung in Abbildung 1, so lässt sich hinsichtlich der Parameter klar festhalten: Die deutlich positive Entwicklung der Batteriepreise konnte bis 2019 nicht die auf den Markthochlauf alternativer Fahrzeuge dämpfend wirkende Entwicklung der günstigen Kraftstoffpreise, der Nutzerwahrnehmung sowie der kleinen Angebotspalette kompensieren, sodass bis dahin der Markthochlauf eher dem Contra-EV-Szenario folgte. Erst die deutlichen Kaufpreissubventionen (Umwelt- und Innovationsprämie) konnte die Entwicklung hin zum mittleren Szenario verschieben.

Ein wichtiges Element der Markthochlaufszszenarien ist die Unterteilung in verschiedene Nutzergruppen anhand der Sozio-Demographie und Mehrpreisbereitschaft. Auch wenn die Zuordnung zu den Fahrprofil aufwendig ist, hat die spätere Literatur die Eigenschaften der hier verwendeten Erstnutznerprofile in fast allen Aspekten bestätigt (vgl. insb. Frenzel et al. 2015).

Seit 2010 hat sich die Anzahl und Vielfalt der Elektrofahrzeuge im Angebot sehr stark verändert und insbesondere verbreitert. Das begrenzte Angebot ist in einer frühen Marktphase ein wichtiges Hemmnis im Kauf für viele potenzielle Nutzer. Zur Zeit der Modellierung im Jahr 2013 war das Angebot noch überschaubar und es wurden für die zukünftige Entwicklung eine steigende Modellpalette nach BEV und PHEV sowie getrennt nach Fahrzeugklassen vorhergesagt. Die Vorhersagen haben sich in weiten Teilen als plausibel und richtig erwiesen: PHEV werden besonders breit bei großen Fahrzeugen und der Mittelklasse angeboten, BEV eher bei Kleinwagen und der Mittelklasse, es gibt aber heute auch zahlreiche große BEV zu kaufen.

Beim **Verhältnis zwischen PHEV und BEV** wurde im Rahmen der NPE ein Verhältnis von ca. 30 % BEV und rund 70 % PHEV und REEV, die damals unterschieden wurden, ermittelt. In Realität ist das Verhältnis heute eher 50:50. Das liegt zum einen an den deutlich größeren Batterien, die in BEV verbaut werden, zum anderen an den kaum mehr in Erscheinung tretenden REEV. Diese Fahrzeugvariante wurde 2013 noch stark favorisiert, während sie nun kaum noch erwähnt wird – zum einen, da größere Reichweiten mit den heutigen BEV-Batterien möglich sind, zum anderen, da PHEV mit elektrischen Reichweiten von 50 km auch für viele Fahrzwecke ausreichen. In späteren Veröffentlichungen wurde dieser Veränderung auch Rechnung getragen (Gnann et al. 2019).

Hinsichtlich der **Ladeinfrastruktur** wurde von viel heimischer Ladung ausgegangen, einigen gewerblichen Wallboxen und wenig öffentlicher Ladeinfrastruktur. In neueren Studien zum Laden von Elektrofahrzeugen könnten dieser Trend bestätigt werden und die überwiegende Menge an Energie wird zuhause geladen (Scherrer et al. 2019, Funke et al. 2019). Das spiegelt sich zum Großteil auch im Ladeinfrastrukturbestand wider, wobei eine große Menge öffentlicher Langsam- und Schnellladeinfrastruktur aufgebaut wurde, die bislang noch wenig genutzt wird.

Auch die **Erstnutzner**, die im Rahmen der NPE-Studie als eher vollbeschäftigte, mittelalte, männliche Personen beschrieben wurden, konnten in Akzeptanzstudien belegt werden (Scherrer et al. 2019, Frenzel et al. 2015). Ebenso wurden gewerbliche Flottenfahrzeuge als wichtiger Erstmarkt in der NPE-Studie identifiziert und in der Realität bestätigt (vgl. KBA 2021).

In den **Sensitivitätsrechnungen** wurden vor allem die Energieträger- und Batteriepreise als wichtiger Stellhebel erachtet. Hier wurde, wie bereits beschrieben, die Entwicklung für Kraftstoffpreise deutlich höher eingeschätzt als sie in Realität tatsächlich war, mit einem deutlich negativen Effekt auf den Elektrofahrzeughochlauf. Auch die zu pessimistische Einschätzung der Batteriepreisentwicklung konnte die sehr niedrigen Kraftstoffpreise nicht kompensieren.

Die Wirkung der **Politikmaßnahmen**, insbesondere der Kaufpreissubvention, wurde vor acht Jahren deutlich zu positiv eingeschätzt. Eine Subvention von 1.000 € sollte den Fahrzeugbestand um knapp 50 % erhöhen. Spätere Studien zeigten, dass vor allem auch weitere Faktoren wie Energieträgerpreise, Ladeinfrastrukturverfügbarkeit und nicht-monetäre Politikmaßnahmen in die Wirkung einbezogen werden müssen (Münzel et al. 2019). Die Arbeit ermittelte eine Erhöhung der Marktanteile um fünf Prozentpunkte je 1.000 € und demnach deutlich weniger als 2013 angenommen wurde.

3 Weiterentwicklung von Methodik und Annahmen

3.1 Erweiterung der Methodik

Im Rahmen verschiedener Projekte wurden einige Teile der Methodik erweitert, um neuen Anforderungen gerecht zu werden. Dies waren zum einen verschiedene Ergänzungen zur Ladeinfrastruktur, zur Ermittlung von Lastprofilen und zur Regionalisierung der Ergebnisse. Diese werden im Folgenden kurz erläutert.

Während in den Rechnungen bis 2020 für die NPE primär die individuelle Ladeinfrastruktur für die ersten Nutzer relevant war, muss eine gemeinsam genutzte (öffentliche) Ladeinfrastruktur vor allem in den Jahren nach 2020 berücksichtigt werden. Die öffentliche Ladeinfrastruktur mit geringen Ladeleistungen wurde ausführlich in (Gnann et al. 2019) analysiert und beschrieben. Auch das Schnellladen war Teil von Modellerweiterungen, um dessen Einfluss zu ermitteln (Jakobsson et al. 2016). In aktuellen Rechnungen wird ein vereinfachter Ansatz verwendet, der die Erkenntnisse beider Vorarbeiten vereint. Es werden Teile von Nutzern definiert, die nur zuhause, zuhause und bei der Arbeit und zuhause, bei der Arbeit und öffentlich laden können. Die Anteile der beiden letzten Nutzergruppen nehmen über die Zeit zu, was sich mit der Realität deckt. Die Nutzer werden zufällig ermittelt und zahlen unterschiedliche Preise an den jeweiligen Ladeinfrastrukturen. Dies ermöglicht auch eine Ermittlung von Wochenlastprofilen durch Elektrofahrzeuge, denen keine Laststeuerung zugrunde liegt. Eine Laststeuerung oder Demand-Side-Management kann durch die Kopplung mit weiteren Modellen erfolgen (Kühnbach et al. 2020, Gnann et al. 2018b).

Des Weiteren wurde ein Modul zur Regionalisierung der Ergebnisse auf NUTS3-Ebene ergänzt. Hierbei werden die Ergebnisse des nationalen Markthochlaufs auf die Landkreisebene heruntergebrochen. Es finden dafür die landkreisspezifischen Neuzulassungen der letzten Jahre, die Bevölkerungsentwicklung, die Flächen der Kreise, das kreisspezifische BIP und die Beschäftigungsquote in einer Regression Eingang, um die Anteile der Fahrzeugzulassungen zu berechnen (Speth et al. 2020). Dies ist insbesondere für die regional unterschiedlichen energiewirtschaftlichen Auswirkungen von großer Relevanz.

3.2 Erweiterung und Aktualisierung der Annahmen

Seit die NPE-Studie Ende 2013 veröffentlicht wurde, gab es eine Reihe von Annahmen, die aktualisiert und erweitert wurden. Auf die wichtigsten soll im Folgenden kurz eingegangen werden.

Die Mehrpreisbereitschaft wurde 2011 im Rahmen einer Nutzerbefragung erhoben und mit einer weiteren Nutzerakzeptanzstudie auf die Fahrprofile verteilt (Peters et al. 2011, Dütschke et al. 2013, Plötz et al. 2014). Da nur Daten für einen Zeitpunkt vorlagen, wurde angenommen, dass sich die Mehrpreisbereitschaft bis 2020 auf etwa 60 % reduziert. Im Rahmen weiterer Arbeiten wurde eine Reduktion auf etwa 50 % bis 2020 und auf 0 % bis 2030 bestätigt (Gölz et al. 2015).

Das beschränkte Fahrzeugangebot wurde mit Hilfe von Ankündigungen der Hersteller ermittelt, die Pressemitteilungen zu entnehmen waren. Die Daten werden regelmäßig mit der aktuellen Modellauswahl abgeglichen. Dafür wird die ADAC-Autodatenbank (ADAC 2022) abgeglichen. Die auf wenigen Datenpunkten beruhenden Kurven aus 2013 lagen dabei aber erstaunlich nahe an den nun integrierten Werten und überschätzen die Entwicklung bis 2020 nur leicht.

Bei den Fahrzeugbatterien hat der Verfall der Batteriepreise zu einem deutlich anderen Ergebnis geführt, als 2013 angenommen wurde. Die Batteriekapazitäten der Fahrzeuge nahmen über die Jahre deutlich zu und sind jetzt sehr viel größer als das im Rahmen der NPE-Studie angenommen

wurde. Das hat insbesondere Auswirkungen auf die Reichweite der Fahrzeuge, ihren Einsatzradius und die notwendige Ladeinfrastruktur.

Für die NPE-Studie lag der Fokus auf Elektrofahrzeugen und deren Markthochlauf. Während diese Antriebsart weiterhin einen großen Teil der Markthochlaufüberlegungen im Pkw-Bereich ausmacht, wurden auch Brennstoffzellen- und Gasfahrzeuge detaillierter integriert, um die Konkurrenztechnologien und die Wechselwirkungen auf den jeweiligen Markthochlauf besser zu verstehen.

Und zu guter Letzt wurden die Fahrprofil Datensätze für gewerbliche Flottenfahrzeuge aktualisiert (Fraunhofer ISI 2015). Diese umfassen nun 630 gewerbliche Flottenfahrzeuge und stellen die Detailanalysen auf eine größere Datenbasis.

Eine detaillierte Übersicht aller Annahmen für die Markthochlaufmodellierung im nächsten Abschnitt findet sich in (Krail et al 2021).

4 Ergebnisse bis 2030

Im Rahmen des Projektes „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ (Langfristszenarien 3) wurde mit dem Szenario TN-Strom ein Markthochlaufszzenario entwickelt, das die oben beschriebenen Anpassungen im Modell ALADIN enthält. Dabei wurden in Bezug auf Batterie- und Strompreise günstige Rahmenbedingungen für die Diffusion batterieelektrischer Antriebe unterstellt. Die Ausgestaltung des Szenarios ist detailliert in Krail et al. (2021) beschrieben.

Im Folgenden soll untersucht werden, ob das beschriebene Szenario dazu geeignet ist das im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) festgelegte Reduktionsziel für den Verkehrssektor zu erreichen. Das KSG sieht vor, den Ausstoß von Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor bis 2030 auf jährlich 85 Mt CO₂ zu reduzieren. Dies entspricht eine Reduktion um 48 % gegenüber dem Jahr 2019. Außerdem sollen die im Koalitionsvertrag (SPD et al. 2021) für den Verkehr angekündigten Maßnahmen in das Modell ALADIN integriert und ihre Auswirkungen quantifiziert werden.

Unter Berücksichtigung der im Koalitionsvertrag von SPD, Bündnis90 / die Grünen und FDP für die Jahre 2021 bis 2025 angekündigten Maßnahmen, wird das Szenario TN-Strom der Langfristszenarien weiter verschärft (SPD et al. 2021). Die Anpassungen umfassen im Einzelnen: (1) Die Kaufpreisförderung elektrischer Antriebe bis Ende 2025, (2) die Mindestanforderung von 80 km Reichweite für förderfähige PHEV ab 2023, (3) die Beendigung der Finanzierung der EEG-Umlage über den Strompreis ab 2023, (4) die Dienstwagenbesteuerung in Höhe von 0,25 % für BEV mit einem maximalen Bruttolistenpreis von 60.000 € bis 2030, (5) die Dienstwagenbesteuerung in Höhe von 0,5 % für PHEV bis 2025, ab 2023 nur bei einem elektrischen Fahranteil von mindestens 50 %. Die Koalition hat sich zum Ziel gesetzt bis 2030 einen Bestand von 15 Millionen rein batterieelektrischer Fahrzeuge (BEV) zu erreichen.

Zudem werden Maßnahmen aus dem Fit-for-55-Paket der Europäischen Kommission ergänzt: (1) Erhöhung der Mineralölsteuer nach CO₂-Gehalt für Diesel aufgrund der Aktualisierung der Energy Taxation Directive (EC 2021) ab 2023 und (2) die Verschärfung der Flottengrenzwerte für Pkw auf 55 % Reduktion gegenüber 2021 bis zum Jahr 2030 und 100 % bis 2035.

Relevant für die Entwicklung der Fahrzeugflotte ist zudem, ob sich die Fahrzeughersteller eher konservativ verhalten und nur das Nötigste tun, um die Flottengrenzwerte einzuhalten, was man heute vereinzelt an Lieferzeiten und Verschiebungen in die Folgejahre für Elektrofahrzeuge sehen kann. Oder ob ein klares Bekenntnis zu Elektrofahrzeugen eingegangen wird und man ein großes Fahrzeugangebot zur Verfügung hat, das den Markt bestimmt.

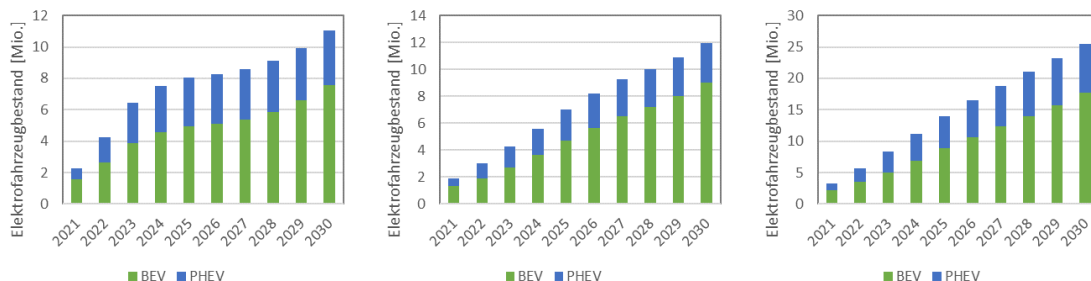
Im Folgenden werden daher drei Szenarien betrachtet:

- Szenario "TN-Strom" aus (Krail et al. 2021)
- Szenario "TN-Strom KV konservativ" mit den Maßnahmen aus dem Koalitionsvertrag (KV) und dem gerade notwendigen Aufwand zu Erreichung der jährlichen Flottengrenzwerte
- Szenario "TN-Strom KV progressiv" mit den Maßnahmen aus dem Koalitionsvertrag und einer großen Überzeugung und Engagement für Elektrofahrzeuge seitens der Hersteller

In Abbildung 4 sind die Entwicklungen der Elektrofahrzeugbestände (jeweils zum Jahresende) zwischen 2021 und 2030 dargestellt. Man erkennt, dass die Anzahl der Elektrofahrzeuge deutlich ansteigt, in den Szenarien TN-Strom KV konservativ (Mitte) und TN-Strom KV progressiv (rechts) noch deutlich mehr als in TN-Strom. Der Bestand aller Elektrofahrzeuge liegt bei 8 Mio. BEV und 3 Mio. PHEV in TN-Strom, 9 Mio. BEV und 3 Mio. PHEV in TN-Strom KV konservativ und 17 Mio. BEV und 8 Mio. PHEV in TN-Strom KV progressiv. Es ist also ein klarer Unterschied zwischen einem starken

Commitment der Hersteller zu Elektromobilität und einem eher konservativeren Szenario zu erkennen. Nur im progressiven Szenario wird die Zielsetzung von 15 Mio. BEV erreicht.

Abbildung 4: Pkw-Bestand an Elektrofahrzeugen bis 2030 in den Szenarien TN-Strom (links), TN-Strom KV konservativ (Mitte), TN-Strom KV progressiv (rechts)



In den Neuzulassungen (Abbildung 5) erkennt man zwischen den Szenarien TN-Strom und TN-Strom KV progressiv die Wirkung der Fördermaßnahmen bis 2025 (Kaufpreissubvention über Umwelt- und Innovationsprämie, Abschaffung der EEG-Umlage, Erhöhung der Mineralölsteuer für Diesel) deutlich. Nach dem Auslaufen 2023 (TN-Strom) und 2025 (TN-Strom KV konservativ und TN-Strom KV progressiv) ist ein Rückgang der Elektrofahrzeugverkäufe erkennbar, jedoch im Szenario TN-Strom KV progressiv weniger deutlich. In diesem Fall spielen Diesel ab 2023 und Benziner spätestens ab 2029 nur noch eine sehr untergeordnete Rolle.

Abbildung 5: Pkw-Neuzulassungen bis 2030 in den Szenarien TN-Strom (links), TN-Strom KV konservativ (Mitte), TN-Strom KV progressiv (rechts)

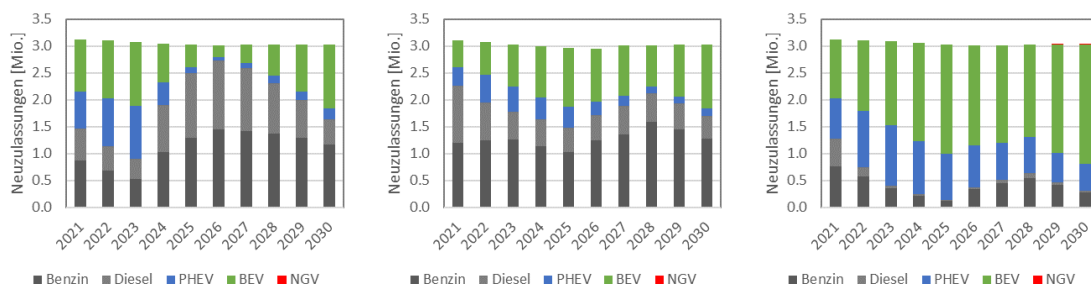
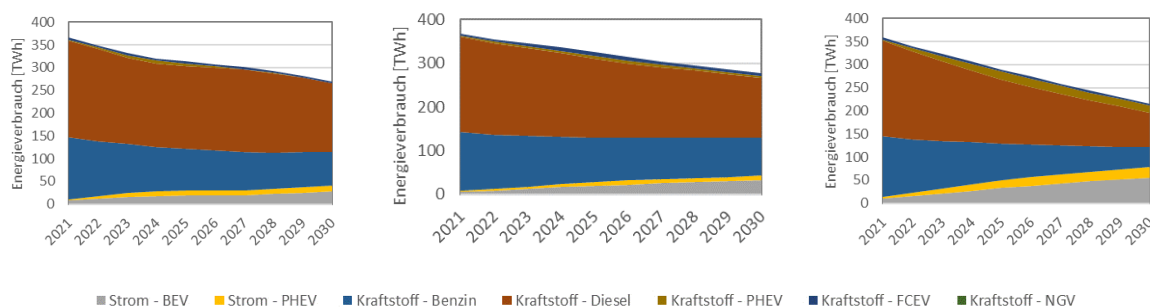


Abbildung 5 zeigt den Endenergieverbrauch der Szenarien unterschieden nach Energieträgern. Es ist eine Abnahme in allen Szenarien zu verzeichnen, die mit höherer Elektrifizierung (Szenario TN-Strom KV progressiv) deutlich steigt. Der Rückgang beziffert sich auf 26 %, 25 % und 40 % (TN-Strom, TN-Strom KV konservativ, TN-Strom KV progressiv), womit deutlich wird, dass die Energieeinsparung sogar mit den Maßnahmen aus dem Koalitionsvertrag geringer sein kann als ohne, wenn die Hersteller sich wenig um die Flottenerneuerung bemühen (TN-Strom KV konservativ).¹ Der Rückgang der Energiemenge, ist vor allem bei Diesel zu verzeichnen, wo der Endenergieverbrauch in TN-Strom KV progressiv auf etwa ein Drittel reduziert wird.

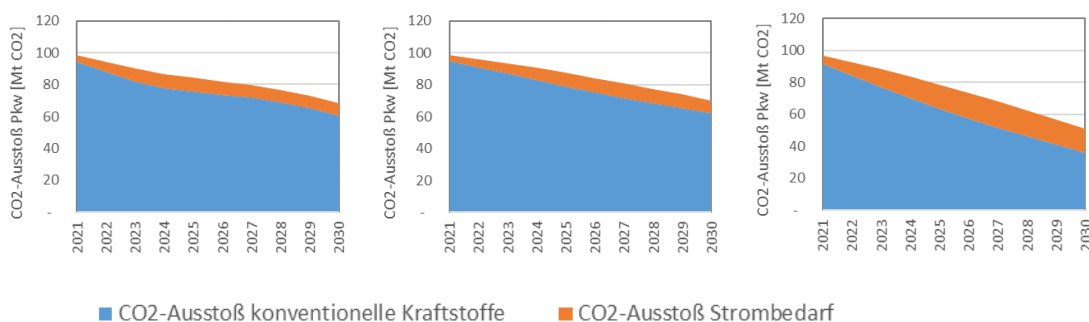
¹ Es muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass in TN-Strom keine Beschränkung durch die Flottengrenzwerte berücksichtigt wurde, sodass hier nicht ganz gleiche Annahmen zugrunde liegen.

Abbildung 6: Endenergieverbrauch von Pkw bis 2030 in den Szenarien TN-Strom (links), TN-Strom KV konservativ (Mitte), TN-Strom KV progressiv (rechts)



Zu guter Letzt stellt sich die Frage, welche CO₂-Einsparung mit den Maßnahmen zu erreichen ist. Für die Sektorziel (Verkehr – 48 % im Jahr 2030 ggü. 2021) werden Elektrofahrzeuge mit null Gramm CO₂/kWh bewertet, da die Emissionen der Stromproduktion zugerechnet werden. Diese sind in Abbildung 7 nachrichtlich mit Emissionen für die Stromerzeugung gemäß (BMUB 2015) angegeben. Werden nur konventionelle Fahrzeuge berücksichtigt, so ist in den Szenarien TN-Strom und TN-Strom KV konservativ eine Einsparung von 35 % der CO₂-Emissionen möglich. Im Szenario TN-Strom KV progressiv können 60 % erreicht werden. Bezieht man für ein ganzheitliches Bild auch die Emissionen der Elektrofahrzeuge ein, so liegt die Verbesserung bei 30 % bzw. 47 %. Auch wenn das Sektorziel von -48 % bis 2030 gegenüber 2021 für den gesamten Verkehrssektor gilt, so wird deutlich, dass nur bei einem starken Mitwirken der Pkw-Hersteller (TN-Strom KV progressiv) die Minderungsziele einzuhalten sind.

Abbildung 7: Entwicklung der CO₂-Emissionen von Pkw bis 2030 in den Szenarien TN-Strom (links), TN-Strom KV konservativ (Mitte), TN-Strom KV progressiv (rechts)



Hierbei sollte auch erwähnt werden, dass der Pkw-Verkehr eventuell sogar größere Verbesserungen erreichen muss, damit schlechter zu dekarbonisierende Verkehrsträger gegengerechnet werden können. Der Pkw-Verkehr verursacht, die Emissionen aus der Stromerzeugung nicht berücksichtigt, im Szenario TN-Strom 70 % der für den gesamten Verkehrssektor zur Verfügung stehenden Treibhausgasemissionen. Es verbleiben 2030 25 Mt CO₂ für Nutzfahrzeuge, den inländischen Luftverkehr, den inländischen Schiffsverkehr sowie den Schienenverkehr. Diese verursachten 2019 circa 63 Mt CO₂ (UN 2021). Berücksichtigt man, dass diese Verkehrsträger deutlich schwerer zu defossilisieren sind als Pkw, so erscheint es unwahrscheinlich, dass der im Szenario TN-Strom gezeigte Entwicklungspfad ausreichend ist, um das Sektorziel von 85 Mt CO₂ zu erreichen. Biogene oder synthetische Kraftstoffe stehen 2030 voraussichtlich nur in begrenztem Umfang zur Verfügung und werden primär im Luft- und Seeverkehr benötigt (vgl. Krail et al. 2021).

Die CO₂-Emissionen der Pkw TN-Strom KV progressiv sinken bis 2030 auf 46 Mt aus konventionellen Kraftstoffen. Damit verbleiben 2030 39 Mt CO₂ für Nutzfahrzeuge, den inländischen Luftverkehr, den inländischen Schiffsverkehr sowie den Schienenverkehr. Dies entspräche auch bei diesen Verkehrsträgern einem notwendigen Rückgang von knapp 40 %.

5 Diskussion

Das entwickelte Modell und die Markthochlaufszzenarien haben viele der Ergebnisse bis 2020 trotz der Unsicherheiten von Batterie- und Energiepreisen gut beschrieben. Die zukünftige Marktentwicklung bis 2030 ist aber mit weiteren Unsicherheiten behaftet. Einige Aspekte sollen hier im Folgenden kurz diskutiert werden.

PHEV machen derzeit ca. 50 % des E-Pkw-Bestandes in Deutschland aus, leicht mehr als in den Modellierungsergebnissen. Hier zeigt sich, dass besonders die Dienstwagenförderung einen sehr positiven Einfluss auf die PHEV-Neuzulassungen hatte. Die Beschaffungsentscheidung bei Dienstwagen ist komplex durch die Rolle sowohl des Nutzers als auch der Organisation als Halter: beide haben verschiedene Kosten und Interessen. Hierzu ist die wissenschaftliche Literatur noch unzureichend und zukünftig könnte das Modell hier verbessert werden.

Die Betrachtung von nur Deutschland im Modell hat Vor- aber auch Nachteile. Auf der einen Seite ermöglicht die Konzentration auf ein Land einen hohen Detailgrad und eine genaue Abbildung des Nutzungsverhaltens und der nationalen Rahmenbedingungen. Auf der anderen Seite entwickeln sich die Märkte und damit sowohl das Fahrzeugangebot als auch Batterie- und Fahrzeugpreise international. In einem ersten Schritt wurde das Modell auf Europa ausgeweitet und zwar weniger Details der Fahrzeugnutzung abgebildet, aber dafür ein konsistenter Markthochlauf für ganz Europa berechnet².

Eine starke Verbreitung von Elektrofahrzeugen führt zu einem steigenden nationalen Strombedarf. Insgesamt hat die Energiesystemintegration von E-Fahrzeugen erhebliches Interesse in der Literatur gefunden. Dabei zeigt sich, dass zeitversetztes Laden und Eigenstromversorgung, z.B. durch heimische Photovoltaikanlagen (PV) und stationären Batteriespeicher, wichtige langfristige Aspekte sind, die sich auf die Wirtschaftlichkeit auswirken. Während das erste wenig Auswirkungen auf den Markthochlauf haben sollte (unter der Annahme, dass stets als Mobilitätsbedürfnisse mit dem E-Pkw bedient werden können), hat die Verwendung von selbst erzeugtem PV-Strom Auswirkungen auf den Markthochlauf. Befragungen zeigen, dass derzeit zwischen 30 und 50 % der Batteriefahrzeugnutzer in Deutschland über eine eigene PV-Anlage verfügen³. Damit zahlen diese Nutzer effektiv nur circa 10 €cent/kWh für den Eigenstrom. Das senkt noch einmal erheblich die Nutzungskosten und macht BEV und PHEV für diese Nutzer noch attraktiver. Dieser Aspekt findet im hier verwendeten und in anderen Modellen noch wenig Aufmerksamkeit und sollte in Zukunft genauer betrachtet werden.

Bei Elektrofahrzeugen sollten künftig auch mögliche Rebound-Effekte beachtet werden. Mit Rebound-Effekt wird der Effekt bezeichnet, der dazu führt, dass das Einsparpotenzial von Effizienzsteigerungen nicht oder nur teilweise verwirklicht wird. Bei den alternativen Antrieben könnte ein tatsächlicher oder vermeintlich positiverer Umwelteffekt zur höheren Nutzung der Fahrzeuge führen oder zu mehr Neuanschaffungen führen. Hier fehlen allerdings bisher empirische Daten.

Die Rohstoffverfügbarkeit bei Batteriefahrzeugen wird oft kritisch diskutiert. Hier sind insbesondere Kobalt und Lithium als kritisch einzustufen. Bei den kritischen Rohstoffen kann es zu Preissprüngen und Versorgungsengpässen kommen. Derartiges ist bisher in den Modellen nicht abgebildet.

Schließlich erleben viele Fahrzeugkäufer gerade erhebliche Lieferzeiten bei BEV und PHEV. Dies hat verschiedene Gründe, lässt sich aber prinzipiell als begrenzte Produktionskapazitäten zusammenfassen. Dieser Aspekt der langen Lieferzeiten, der mögliche Einfluss auf eine Kaufentscheidung aber

² Weitere Information hier <https://www.aladin-model.eu/aladin-en/> und Ergebnisse auf Anfrage (Veröffentlichung ist in Vorbereitung).

³ Vgl. Scherrer et al. 2019 sowie Preuß et al. 2021.

auch die generelle Lieferbarkeit von E-Fahrzeugen beeinflussen deren Markthochlauf, sind aber nicht im Modell abgebildet. Hierf#r w#re ein deutlich anderer Ansatz notwendig, der deutlich #ber das aktuelle Modell hinausgeht. Generell ist zu erwarten, dass l#ngere Lieferzeiten und begrenzte Produktionskapazit#ten den berechneten Markthochlauf leicht nach hinten verschieben werden.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

6.1 Fazit

Der Markthochlauf von Elektrofahrzeugen in Deutschland war eine Zukunftsvision zum Zeitpunkt der ersten großen Markthochlaufmodellierung 2010 bis 2013. Seitdem haben sich viele Dinge weiterentwickelt und ein Vergleich der Markthochlaufszzenarien mit dem realen Markthochlauf zeigt, dass einige wichtige Entwicklungen damals bereits richtig eingeschätzt und ermittelt wurden. Auf der methodischen Seite zeigte sich, dass die verwendete empirische agentenbasierte Modellierung auf Basis realer Fahrprofile, die nach dem Wissensstand der Autoren in diesem Umfang erstmalig durchgeführt wurde, einen nennenswerten Fortschritt im Modell bedeutet und erlaubt vielfältige Analysen hinsichtlich Nutzergruppen, Politikmaßnahmen und dem Markthochlauf durchzuführen.

Für den kommenden Markthochlauf bis 2030 zeigt die Modellierung, dass eine sehr schnelle Durchdringung der Neuzulassungen mit BEV und PHEV zu erwarten ist. Die derzeitigen Rahmenbedingungen sind aber nur dann ausreichend, um das Ziel der neuen Bundesregierung von 15 Mio. BEV im Bestand 2030 zu erreichen, wenn auch von Herstellerseite ein klares Bekenntnis zu Elektrofahrzeugen erkennbar ist. Auch das Sektorziel bezüglich der Minderung von THG-Emissionen für den Verkehr ist nur unter diesen Rahmenbedingungen zu erreichen. Hierfür sind zusätzliche Maßnahmen zur Steigerung der Attraktivität von BEV und PHEV bzw. Senkung der Attraktivität rein verbrennungsmotorischer Alternativen notwendig, ggf. aber auch Verschärfungen der Flottengrenzwerte vor 2025 und zwischen 2026-2029. Hier kann die Politik ebenfalls deutliche Anreize setzen.

6.2 Zukünftige Arbeiten

Im Rahmen des NPE-Projekts wurden eine Reihe an Detailanalysen durchgeführt, die auch heute prinzipiell interessant wären. Eine Analyse der Nutzergruppen (nach Fahrzeugsegmenten, Altersgruppen und Fahrleistungen) wäre ebenso denkbar wie die Bewertung weiterer Politikinstrumente oder Sensitivitätsrechnungen. Darüber hinaus können neue Modellschwerpunkte wie die Verbreitung von Elektrofahrzeugen auf NUTS3-Regionen in Deutschland oder das europäische Ausland untersucht werden. Auch die Auswirkungen auf das Energiesystem sind in unserem aktuellen Portfolio.⁴

⁴ Weitere Informationen und Kontakt unter: www.aladin-model.eu.

Danksagung

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

Literaturverzeichnis

- ADAC (2022): ADAC-Autodatenbank. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/>, zuletzt geprüft am 07.04.2022.
- BMUB (2015): Klimaschutzszenario 2050 – 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Autorinnen und Autoren: Öko-Institut e.V.: Repenning J.; Emele L.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Dehoust, G.; Förster, H. et al. Fraunhofer ISI: Braungardt, S.; Eichhammer, W.; Elsland, R.; Fleiter, T.; Schade, W.; Schlomann, B. et al. Berlin, Karlsruhe: Öko-Institut, Fraunhofer ISI.
- Dütschke, E.; Paetz, A.-G.; Wesche, J. (2013): Integration Erneuerbarer Energien durch Elektromobilität? Inwieweit sind Konsumenten bereit, einen Beitrag zu leisten? *uwf UmweltWirtschaftsForum*, 21:233–242.
- EAFO (2021): Vehicle and charging infrastructure stock. Data gathered by the European Alternative Fuels Observatory, commissioned by contract by the European Commission. DG Mobility and Transport.
- European Commission (EC) (2021): Revision of the Energy Taxation Directive (ETD): Questions and Answers. 14 July 2021, Brussels. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_21_3662, zuletzt geprüft am 24.03.2022.
- Fraunhofer ISI (2015): REM2030 Driving Profiles Database V2015. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Frenzel, I.; Jarass, J.; Trommer, S.; Lenz, B. (2015): Erstnutzer von Elektrofahrzeugen in Deutschland. Nutzerprofile, Anschaffung, Fahrzeugnutzung. Berlin-Adlersdorf: DLR.
- Funke, S. Á.; Sprei, F.; Gnann, T.; Plötz, P. (2019): How much charging infrastructure do electric vehicles need? A review of the evidence and international comparison; *Transportation research. Part D, Transport and environment* 77 (2019), S.224-242; DOI: 10.1016/j.trd.2019.10.024.
- Gnann, T. (2015): Market diffusion of plug-in electric vehicles and their charging infrastructure. Dissertation. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag.
- Gnann, T.; Stephens, T. S.; Lin, Z.; Plötz, P.; Liu, C.; Brokate, J. (2018a): What drives the market for plug-in electric vehicles? – A review of international PEV market diffusion models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 93C (2018) pp. 158-164.
- Gnann, T.; Klingler, A.-L.; Kühnbach, M. (2018b): The load shift potential of plug-in electric vehicles with different amounts of charging infrastructure. *Journal of power sources* 390 (2018), pp. 20-29.
- Gnann, T.; Plötz, P.; Wietschel, M. (2019): Can public slow charging accelerate plug-in electric vehicle sales? A simulation of charging infrastructure usage and its impact on plug-in electric vehicle sales for Germany; *International Journal of Sustainable Transportation* 13 (2019), Nr.7, S.528-542; DOI: 10.1080/15568318.2018.1489016.
- Gnann, T.; Speth, D.; Seddig, K.; Stich, M.; Schade, W.; Gómez Vilchez, J. (2022): How to integrate real-world user behavior into models of the market diffusion of alternative fuel in passenger cars – An in-depth comparison of three models for Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 158; DOI: 10.1016/j.ser.2022.112103.

- Gölz, S.; Wedderhoff, O.; Dütschke, E.; Peters, A.; Plötz, P.; Gnann, T.; Graff, A.; Hoffmann, C.; Dobrzinski, J.; Nick, A. (2015): Strategien zum Marktausbau der Elektromobilität in Baden-Württemberg: Elektromobilität im LivingLab BWe Mobil; Schaufenster Elektromobilität. Eine Initiative der Bundesregierung; Freiburg: Fraunhofer ISE, 2015, 77 S.
- Jakobsson, N.; Gnann, T.; Plötz, P.; Sprei, F.; Karlsson, S. (2016): Are multi-car households better suited for battery electric vehicles? – Driving patterns and economics in Sweden and Germany, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 65, April 2016, Pages 1-15.
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2021): Fahrzeugzulassungen (FZ) Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen Jahr 2020 FZ 14.
- Krail, M.; Speth, D.; Gnann, T.; Wietschel, M. (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Treibhausgasneutrale Hauptszenarien. Modul Verkehr; Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), Consentec GmbH; Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI; Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg ifeu; Technische Universität Berlin.
- Kühnbach, M.; Stute, J.; Gnann, T.; Wietschel, M.; Marwitz, S.; Klobasa, M. (2020): Impact of electric vehicles: Will German households pay less for electricity? *Energy strategy reviews* 32 (2020), Art. 100568, 12 S.; DOI: 10.1016/j.esr.2020.100568.
- Münzel, C.; Plötz, P.; Sprei, F.; Gnann, T. (2019): How large is the effect of financial incentives on electric vehicle sales? – A global review and European analysis; *Energy Economics* 84 (2019), Art. 104493; DOI: 10.1016/j.eneco.2019.104493.
- MWV (2021): Statistiken – Preise. Online verfügbar unter <http://www.mwv.de/index.php/daten/statistikenpreise>, zuletzt geprüft am 08.03.2021. Berlin: Mineralölwirtschaftsverband e.V. (MWV).
- Peters, A.; Agosti, A.; Popp, M.; Ryf, B. (2011). Electric mobility – a survey of different consumer groups in Germany with regard to adoption. *Proceedings of the 2011 ECEEE summer study*, Toulon, France.
- Plötz, P., Gnann, T., and Wietschel, M. (2014). Modelling market diffusion of electric vehicles with real world driving data – part i: Model structure and validation. *Ecological Economics*, 107(0):411 – 421.
- Plötz, P.; Moll, C.; Biecker, G.; Mock, P.; Li, Y. (2020): Real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles: Fuel consumption, electric driving, and CO₂ emissions. Berlin: ICCT. Online verfügbar unter <https://theicct.org/sites/default/files/publications/PHEV-white%20paper-sept2020-0.pdf>, zuletzt geprüft am 18.04.2022.
- Plötz, P.; Moll, C.; Bieker, G.; Mock, P. (2021): From lab-to-road: real-world fuel consumption and CO₂ emissions of plug-in hybrid electric vehicles. *Environmental Research Letters*, 16(5), 054078.
- Plötz, P.; Gnann, T.; Kühn, A.; Wietschel, M. (2013): Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge; Studie im Auftrag der acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und der Arbeitsgruppe 7 der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE); Karlsruhe: Fraunhofer ISI, 2013, 211 S. (Langfassung).

- Preuß, S.; Kunze, R.; Zwirnmann, J.; Meier, J.; Plötz, P.; Wietschel, M. (2021) The share of renewable electricity in electric vehicle charging in Europe is higher than grid mix. Working Paper Sustainability and Innovation No. S 11/2022. Karlsruhe: Fraunhofer ISI. Online verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2021/WorkingPaper-S11-21_Preu%C3%9F_etal-final.pdf, zuletzt geprüft am 19.04.2022.
- Scherrer, A.; Burghard, U.; Wietschel, M.; Dütschke, E. (2019): Early Adopter von E-Fahrzeugen: Ladeleistungen, Eigenerzeugung und Einstellungen zum Lademanagement; *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 69 (2019), Nr.11, S.23-26.
- SPD; Bündnis 90 / Die Grünen; FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen SPD, Bündnis 90 / Die Grünen und FDP.
- Speth, D.; Gnann, T.; Plötz, P.; Wietschel, M.; & George, J. (2020): Future regional distribution of electric vehicles in Germany. EVS33. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4026722>.
- UN (2021): Germany. 2021 Common Reporting Format (CRF) Table. Online verfügbar: <https://unfccc.int/documents/271972>, zuletzt geprüft am 18.04.2022.
- Wietschel, M.; Biemann, K.; Link, S.; Helms, H. (2021): Schwerpunktstudie „Nachhaltige Mobilität“. Los 2: Langfristige Umweltbilanz und Zukunftspotenzial alternativer Antriebstechnologien. Los 2 der Schwerpunktstudie „Nachhaltige Mobilität“ für die Expertenkommission Forschung und Innovation. Studie unter Beteiligung des Ifeu-Instituts für Energie- und Umwelttechnik Heidelberg gGmbH. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.