

Prognosen einer elektromobilen Offensive im urbanen Raum am Beispiel des Großraums Stuttgart - Konsequenzen und Handlungsoptionen -

Ralf Wörner, Inna Morozova, Daniela Schneider, Mario Oncken, Patrick Bauer

Hochschule Esslingen, Institut für nachhaltige Energietechnik und Mobilität, Kanalstraße 33, 73728 Esslingen a.N., +497113974670, ralf.woerner@hs-esslingen.de, www.hs-esslingen.de

Markus Blesl, Michael Wiesmeth, Lukasz Brodecki

Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Heßbrühlstrasse 49a, 70565 Stuttgart, +49(0)71168587800, markus.blesl@ier.uni-stuttgart.de, www.ier.uni-stuttgart.de

Patrick Jochem, Alexandra März

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Hertzstr. 16, 76187 Karlsruhe, +49 721 608-44460, patrick.jochem@kit.edu, www.iip.kit.edu

Martin Kagerbauer, Nadine Kostorz

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Verkehrswesen (IfV), Otto Ammann-Platz 9, 76131 Karlsruhe, +49 721 608-42251, martin.kagerbauer@kit.edu, www.ifv.kit.edu

Kurzfassung:

Im Rahmen dieser Studie wurde die Marktdurchdringung batterieelektrisch betriebener Fahrzeuge für motorisierten Individualverkehr (MIV) aus unterschiedlichen Quellangaben für das Jahr 2030 prognostiziert, sowie das Ladeverhalten unter Berücksichtigung der Ladeinfrastruktur sowie verschiedenen Fahrzeugparametern wie z.B. Reichweite und Ladedauer hinterlegt. Basierend auf einer Simulation der Region Stuttgart konnte damit das Mobilitätsverhalten der ca. 2,7 Millionen Einwohner innerhalb einer Woche sowie alle Bewegungsmuster der Fahrzeuge inkl. Ladevorgänge als Modell abgebildet werden. Die Nutzung der zum Stadtgebiet gehörigen umfassenden Energienetztopologie und Energieversorgung aus regionalen wie nationalen Quellen erlaubt eine Modellierung der sog. Sektorkopplung, die weiterreichende Aussagen zur Versorgungssicherheit und Nachhaltigkeit erlaubt eine Hochrechnung der Energie- und Leistungsbedarfe im Spannungsfeld konventioneller Energiebedarfe aller Sektoren zu der spezifischen des Mobilitätssektors. Der Modellraum wurde in einer Prognose zum Jahr 2030 betrachtet und beschreibt die Konsequenzen der aktuell in Vorbereitung befindlichen Transformation zur Elektromobilität für Verkehrsräume, deren Handlungsoptionen abschließend dargelegt werden.

Keywords: Elektromobilität, motorisierter Individualverkehr, Ladeinfrastruktur Sektorkopplung, Energiebedarfe

1 Marktanalysen und Prognosen zur Elektromobilität

Europaweit sind weitergehende Klimaschutzziele in Umsetzung, die sowohl den Markt der Primärenergieversorgung als auch den Verkehr beeinflussen. Für den Verkehr ist dabei die europaweit einheitliche Flottenbesteuerung ein wesentliches Instrument zur Transformation in effizientere Antriebstechnologien (Europäischer Rat 2019). Seitens der Automobilhersteller wird derzeit eine Produktoffensive von batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugen vorbereitet, welche bis 2030 als wesentliches Element zur Erreichung der Flottenverbrauchsziele dienen soll. Der Erfolg dieser Technologie hängt jedoch wesentlich von der Kundenakzeptanz und Verfügbarkeit einer zugehörigen Ladeinfrastruktur ab, wobei innerhalb des europäischen Raumes mit erheblichen Unterschieden zu rechnen ist. Nachfolgend werden ausgehend von einer gesamteuropäischen Sicht lokale Kennzahlen für E-Mobilität am Fallbeispiel des Großraum Stuttgart abgeleitet.

1.1 Kraftfahrzeugbestand und Marktverteilung nach Zulassungstypen

Die Europäische Union bestätigte im Oktober 2018 im Rahmen einer Einigung zwischen europäischem Rat und europäischem Parlament die Reduktion der Flottendurchschnittsverbrauchsziele für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge bis 2030. Die Vorgabe trifft die Automobilhersteller, da die Ziele an eine Steuerabgabe auf Basis der jährlichen Neuzulassungen gekoppelt sind. Aus Sicht der Fahrzeughersteller stellt sich zunächst die Frage nach der Bedeutung der jeweiligen Absatzmärkte innerhalb der europäischen Union, um das Angebot effizienter und verbrauchsarmer Fahrzeuge zielgerichtet platzieren zu können. Hierzu sei zunächst ein Überblick über die Fahrzeugneuzulassungen im europäischen Vergleich gegeben (Abb. 1).

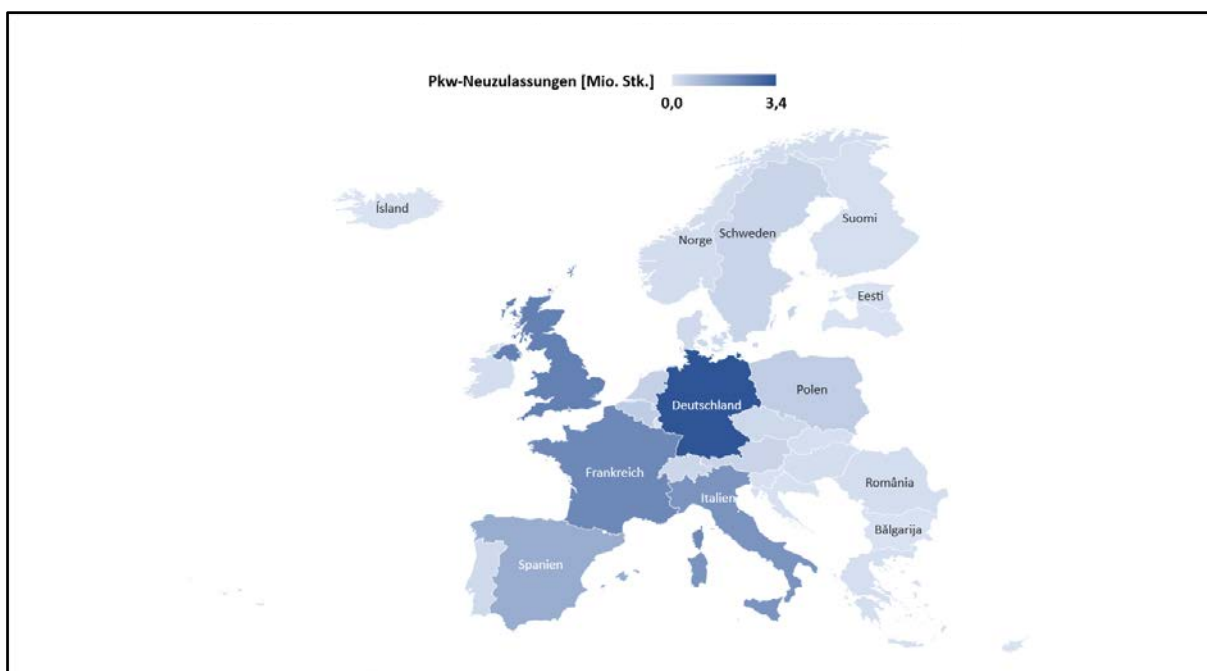


Abbildung 1: Fahrzeugneuzulassungen im europäischen Vergleich (Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA) 2019)

Erkennbar konzentriert sich der Absatz an Neufahrzeugen in Europa von in Summe 15,6 Mio. Stk. auf die Länder Großbritannien (2,4 Mio. Stk.), Frankreich (2,2 Mio. Stk.), Italien (1,9 Mio. Stk.), Spanien (1,3 Mio. Stk.) sowie als führender Absatzmarkt Deutschland (3,4 Mio. Stk.). Unter Berücksichtigung des Austritts Großbritanniens aus der europäischen Union entsteht eine weitergehende Konzentration der Absatzmärkte, bei der Deutschland eine maßgebliche Rolle einnimmt.

Dabei sind innerhalb Deutschlands mehr als 58 Mio. Fahrzeuge zugelassen, wovon der Anteil der Personenkraftwagen (Pkw) den Markt mit anteilig 46 Mio. Fahrzeugen dominiert. Ergänzend zum sog. motorisierten Individualverkehr (MIV) sind auch Krafträder zu rechnen, die mit mehr als 4,3 Mio. Zulassungen den Individualverkehr ergänzen (Abb. 2).

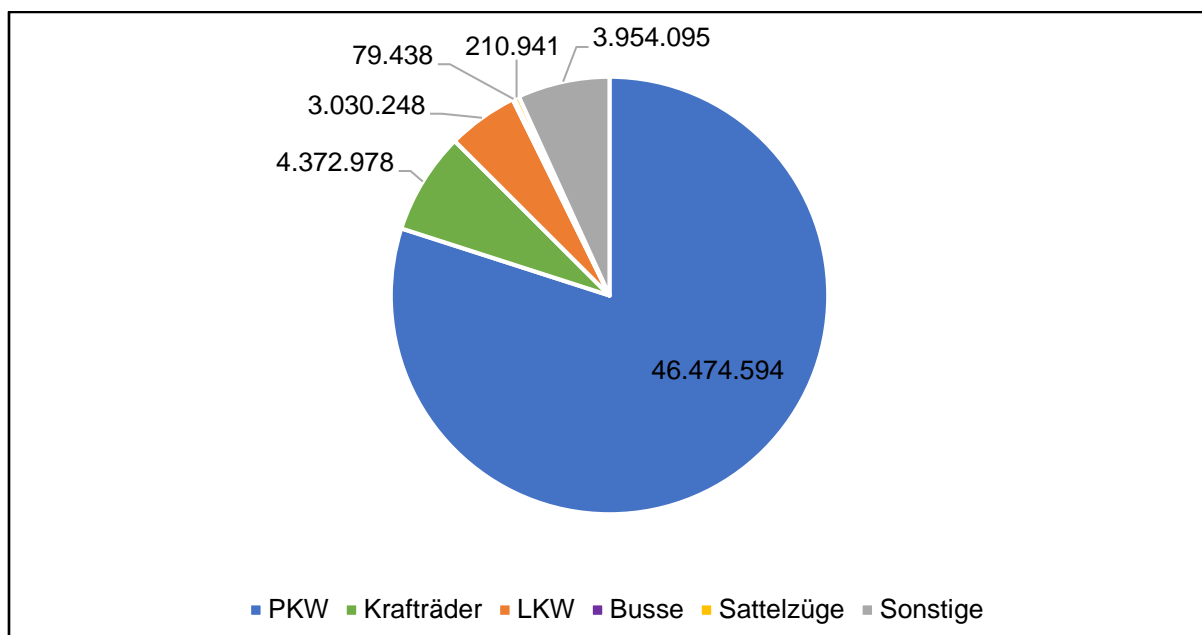


Abbildung 2: Gesamtfahrzeugbestand in Deutschland (Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2018a)

Vergleicht man die Bedeutung der Fahrzeuge nach ihrer Fahrleistung, fällt das Gewicht des motorisierten Individualverkehrs noch deutlicher aus, hier umfasst der Anteil des MIV mit 630.481 Mio. km fast 90 % der jährlichen Gesamtfahrleistung auf den Straßen Deutschlands (Abb. 3).

Damit nimmt der motorisierte Individualverkehr sowohl mengen-, als auch auf die Gesamtfahrleistung bezogen eine Schlüsselrolle im Hinblick auf die Transformation für zukünftige elektrische Fahrzeugantriebe ein. Ebenso wichtig ist die Tatsache, dass innerhalb der Klasse der Güterfahrzeuge sowohl in Stückzahl als auch Gesamtfahrleistung die sog. leichten Nutzfahrzeuge mit zul. Gesamtgewicht von < 3,5 t den Marktanteil mit ca. 50 % dominieren.

Der sich aus den Fahrzeugzulassungen ergebende Flottendurchschnittsverbrauch für Pkw konnte in den vergangenen kontinuierlich gesenkt werden. Der von der EU vorgegebene Grenzwert von 95 gCO₂/km hingegen erscheint für das Zieljahr 2020 derzeit nicht mehr erreichbar (Abb. 4), dies aus unterschiedlichen Gründen.

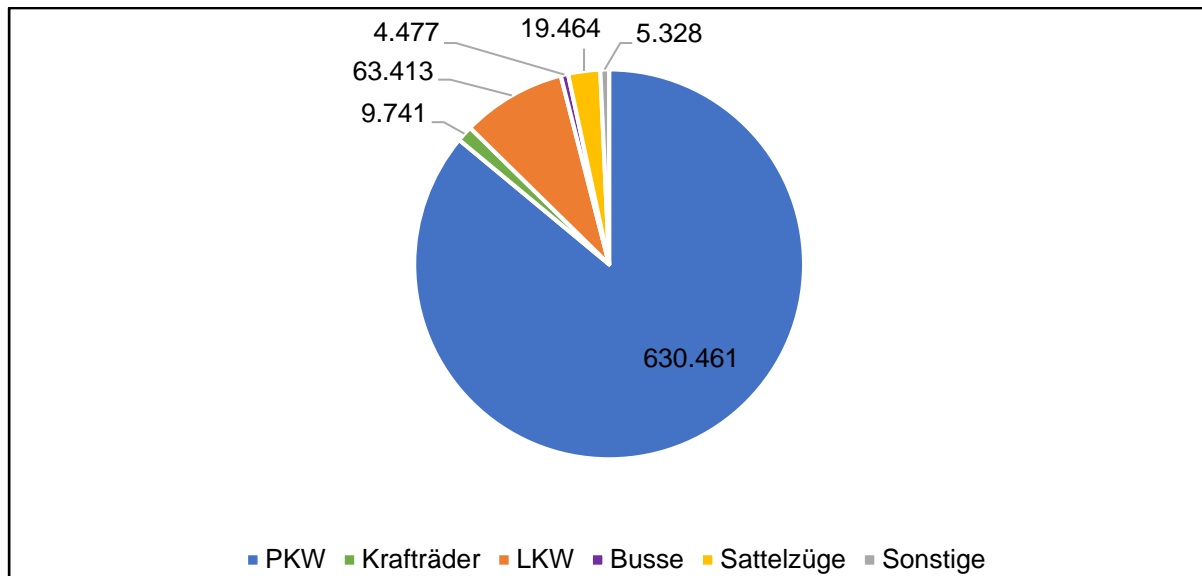


Abbildung 3: Jährliche Gesamtfahrleistung in Deutschland (Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2017b)

Eine stufenweise Verkehrs deregulierung begründet sich über durch eine Limitierung der Abgasemissionen in wichtigen Metropolen sowie einer zumindest zeitlich befristeten Preisderegulierung der Regierungen zur Erhöhung der Kundenakzeptanz (Abb. 5).

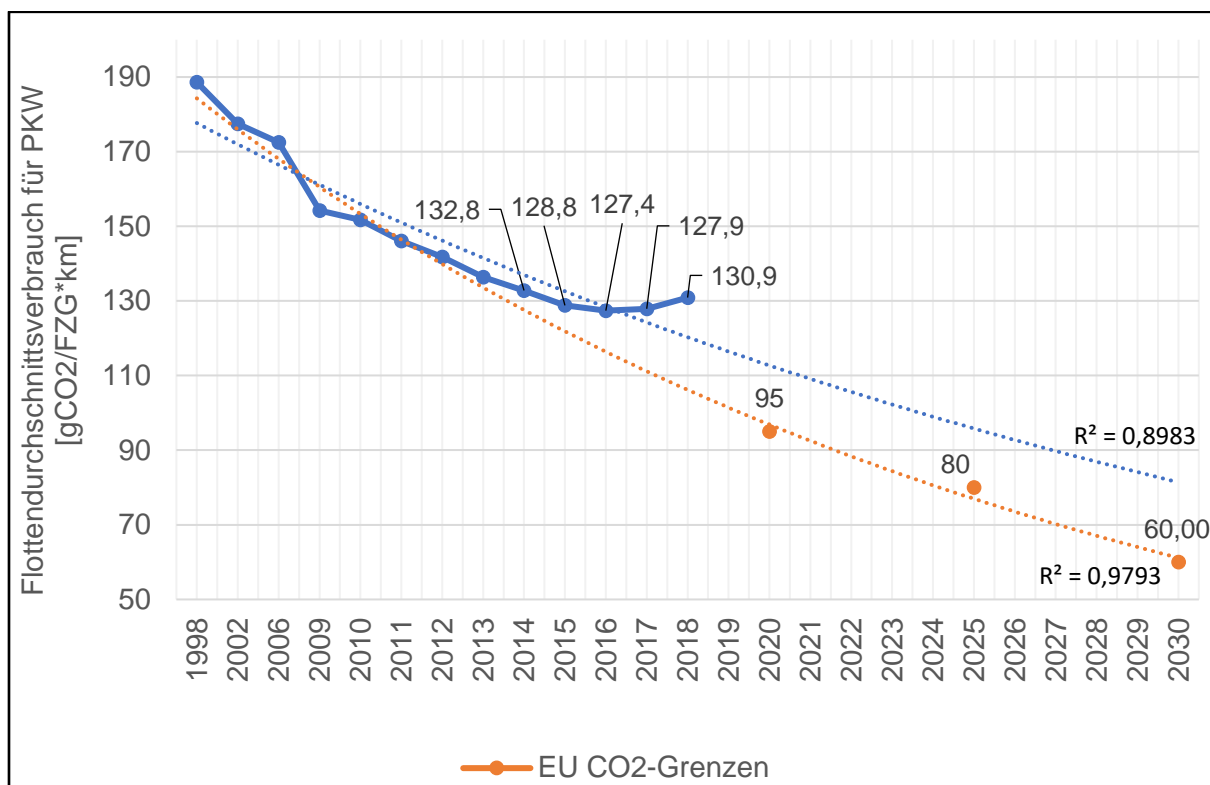


Abbildung 4: Flottendurchschnittsverbrauch für Pkw in Deutschland (Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2017a)

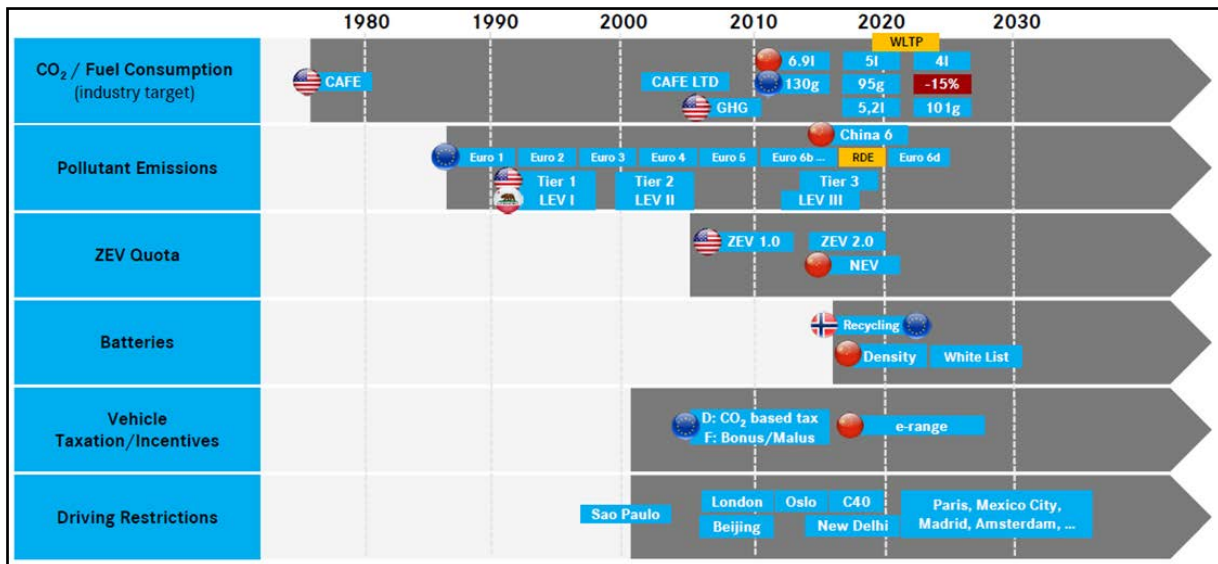


Abbildung 5: Übersicht legislativer Einflussfaktoren auf alternative Antriebe (Döring 2018)

Im Zuge eines verstärkten Angebotes an elektrifizierten Fahrzeugen stellt sich zunächst die Frage nach der bisherigen Reaktion des Marktes auf dieses Angebot. Als Aufsatzpunkt für die Mengenverteilung von Fahrzeugen unterschiedlicher Antriebsvarianten kann die Zulassungsstatistik gemäß Kraftfahrzeugbundesamt (KBA) genutzt werden. In diesem Fall wurden die offiziellen Daten vom Jahr 2017 herangezogen, von Interesse ist dabei der Anteil der sog. Plug-In-Hybrid-Antriebe (PHEV) als auch der batterieelektrischen Antriebe (BEV) im Vergleich zu den verbrennungsmotorischen Antrieben (ICE). Da im Rahmen dieser Studie die Konsequenzen aus einer zunehmenden Elektrifizierung des motorisierten Individualverkehrs für den Ballungsraum Stuttgart diskutiert wird, sind neben den Zulassungszahlen von Deutschland auch unmittelbar diejenigen von Baden-Württemberg sowie auch Großraum Stuttgart mit aufgenommen (siehe Tabelle 1).

Fahrzeugzulassungen	Deutschland	Baden-Württemberg	Großraum Stuttgart
ICE [Anzahl]	46.410.016	6.502.582	1.617.090
PHEV [Anzahl]	44.419	8.493	4.558
BEV [Anzahl]	53.861	10.568	4.617
xEV-Quote [%]	0,21 %	0,29 %	0,56 %

Tabelle 1: Pkw-Fahrzeugzulassungen in Deutschland (Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2018b)

Ungeachtet des in der Tabelle 1 klar erkennbaren und derzeit noch enorm geringen Anteils an (teil-)elektrisch betriebenen Fahrzeugen (sog. xEV's) von weniger als 1 %, gemessen am Gesamtmarkt, ist jedoch eine bereits heute prozentual verhältnismäßig höhere Anzahl an Elektrofahrzeugen (Faktor 2x) im Raum Stuttgart dokumentiert. Dies legt den Schluss nahe, dass an zentralen Industriestandorten eine auch zukünftig überproportional hohe Durchdringung an xEV zu erwarten ist. Zunächst stellt sich im Hinblick auf notwendige Energiebedarfsberechnungen des Verkehrskollektivs die Frage nach den Häufigkeiten und Verteilungen zugelassener xEV's. Nachfolgend wird dies am Fallbeispiel der BEV aus Zulassungszahlen für Deutschland anhand des Großraumes Stuttgart näher untersucht.

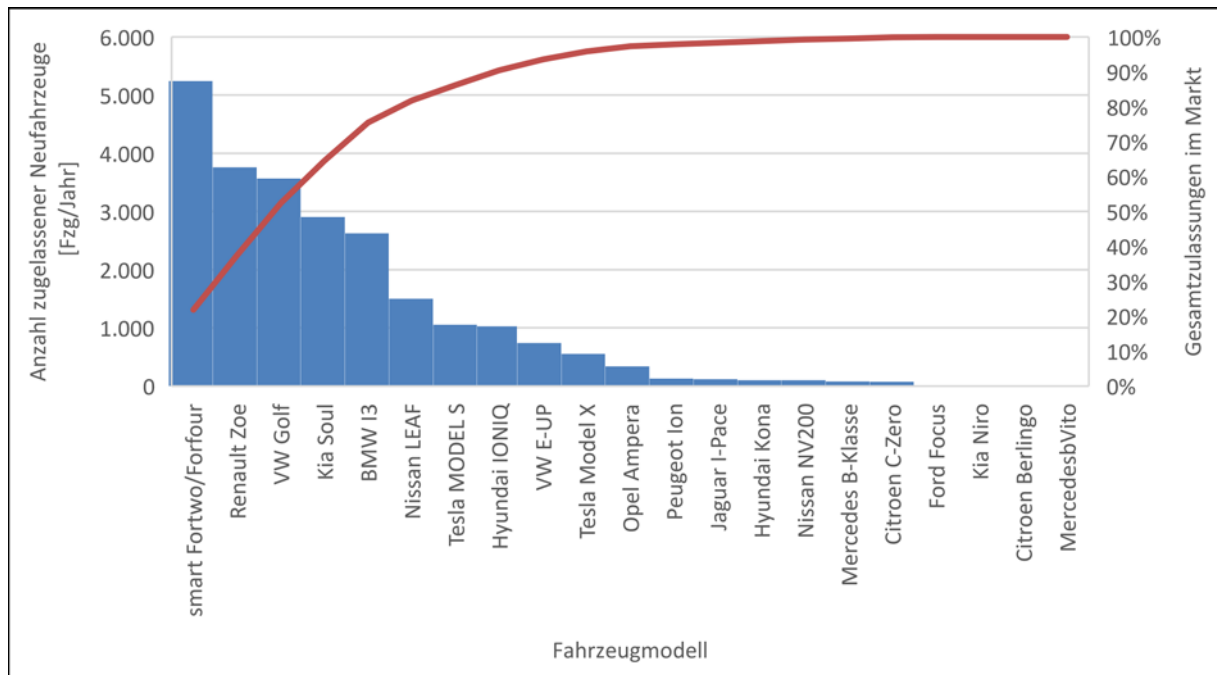


Abbildung 6: BEV-Fahrzeugneuzulassungen in Deutschland (Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2018c)

Gemäß den durch die Zulassungsämter dokumentierten Daten (Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2018c) sind derzeit mit insgesamt fünf Fahrzeugtypen bereits mehr als 80 % aller Neuzulassungen für BEV definiert. Es handelt sich um Fahrzeuge des A-/B- und C-Segments, die in jeweils ähnlich hoher Stückzahl derzeit am Markt vertrieben werden können (Abb. 6). Die Verbräuche dieser Fahrzeuge liegen im Bereich von 16,0 - 20,5 kWh/100km.

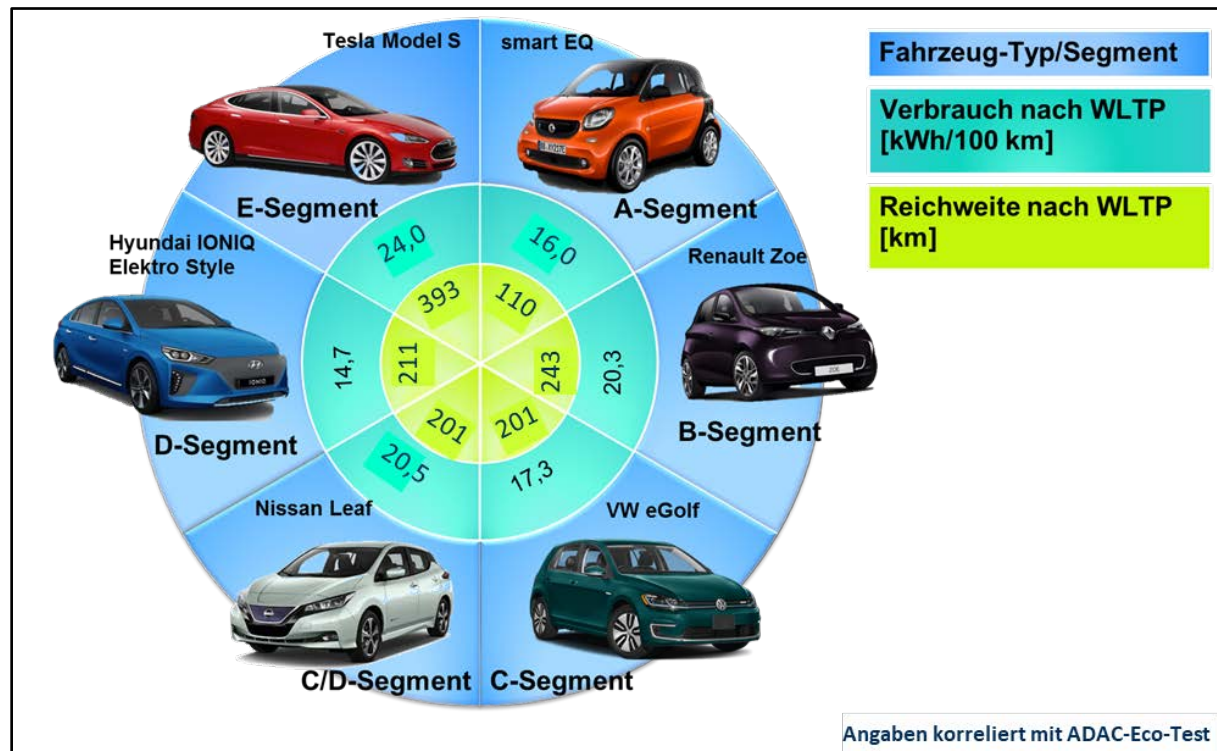


Abbildung 7: Verbrauchs- & Reichweitenangaben der meistverkauften BEV (Allgemeine Deutsche Automobil-Club e.V. (ADAC)), (Volkswagen AG), (Daimler AG).

Die batterieelektrischen Reichweiten liegen mehrheitlich im Bereich kleiner 300 km, referenziert zu dem ADAC-Eco-Test in Korrelation zu dem seit 09/2017 gültigen EU-Fahrzyklus WLTP (Abb. 7). Dabei muss man das E-Segment Tesla Model S als Sonderfall aus dieser Verallgemeinerung ausklammern.

Damit kann überraschenderweise für BEV in Deutschland eine Kaufbereitschaft auch ungeachtet der Reichweitenbeschränkung im Segment der Kompaktfahrzeuge dokumentiert werden, die für eine spätere Eroberung von größeren Käufergruppen von zentraler Bedeutung ist, nachdem die volumenstarken Fahrzeugtypen ebenfalls dem o.g. Kompaktwagensegment zuzurechnen sind. Im Hinblick auf das Volumenpotential differenziert nach Absatzregionen kann ferner angenommen werden, dass die Kaufbereitschaft in Metropolen überproportional größer ausfällt. In welcher Größenordnung bleibt jedoch noch zu klären.

1.2 Prognosen zu xEV-Fahrzeugzulassungen bis 2030

Im Vorgriff auf die internationale Automobilausstellung 2019 in Frankfurt werden bereits jetzt neue BEV angekündigt, die zu einer Steigerung der Absatzzahlen am Markt führen sollen.

Diese BEV zeichnen sich allesamt durch deutlich höhere Reichweiten aus, die im Bereich von 330 km bis über 500 km liegen, verursacht durch angepasste Batteriekapazitäten mit 50 kWh bis ca. 95 kWh (Abb. 8). Eine Erhöhung der Reichweite zählt sicherlich zu den Hauptanforderungen der Käufer, jedoch stellt sie zeitgleich eine Belastung für die Herstellkosten und Erlösaussichten für die Fahrzeughersteller dar. Daher ist mit zu bewerten, inwieweit für spätere und höhere Fahrzeugneuzulassungen mit einer Verbesserung der Kostenbelastung durch Batteriespeicher zu rechnen ist.

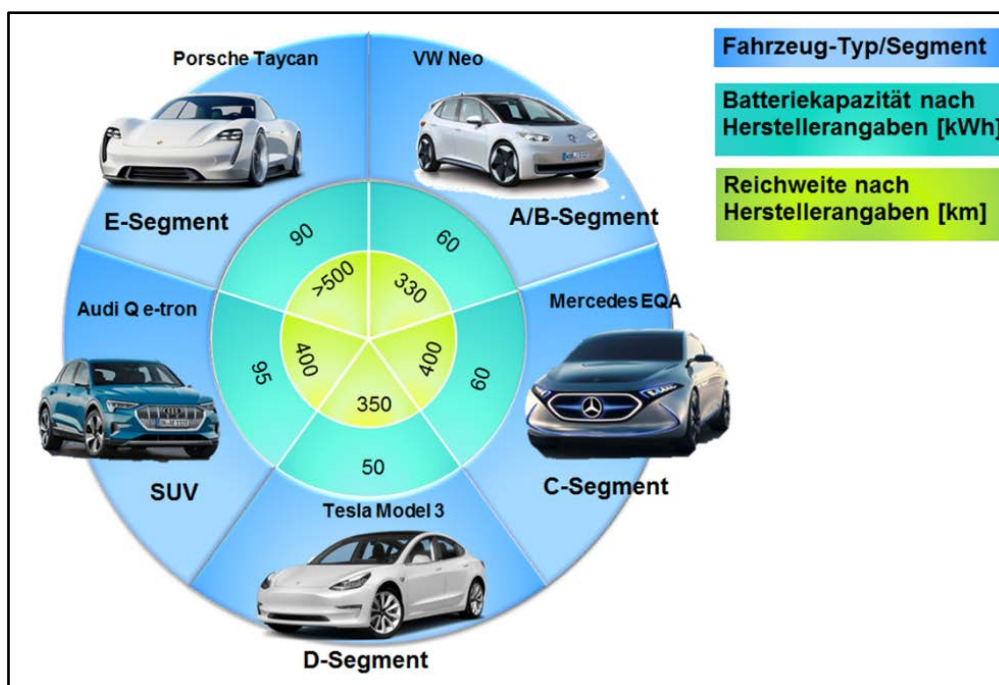


Abbildung 8: Verbrauchs- & Reichweitenangaben angekündigter BEV (Utopia GmbH), (Seibt 2018)

1.2.1 Kosteneinfluss der Fahrzeuge und elektrischen Energiespeicher

Hauptsächlich ausschlaggebend für die Investitionen von BEV ist derzeit die Entwicklung der Kosten der Traktionsbatterie. Daher wurde eine Recherche zu den spezifischen Kosten von

Batteriemodulen durchgeführt. Die Recherche zeigt, dass im Zeitraum der letzten Jahre eine rapide Kostendegression der spezifischen Batteriemodulkosten zu beobachten war. Überwiegende Teile der vergangenen Prognosen haben bereits ihre Gültigkeit verloren und wurden durch die reale Entwicklung überholt. Die folgende Grafik zeigt eine Zusammenstellung der bisherigen Entwicklung, einzelner Datenpunkte zu den geschätzten Modulkosten aus Tear-Down-Analysen sowie gegenwertigen Prognosen zur Kostenentwicklung (Abb. 9).

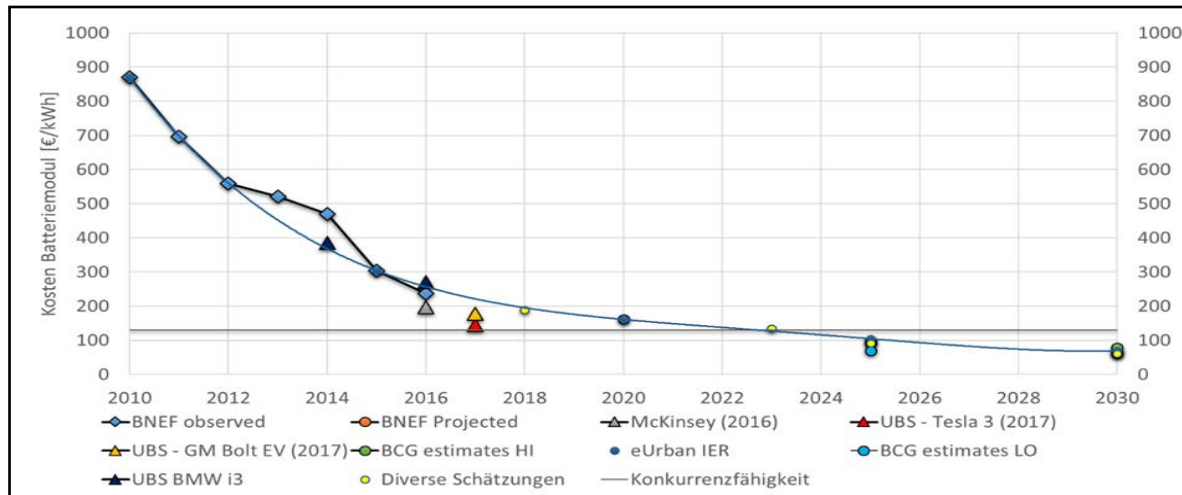


Abbildung 9: Entwicklung der spezifischen Kosten für Traktionsbatteriemodule im Zeitraum bis 2030 (UBS Global Research 2018; BNEF – Bloomberg New Energy Finance 2017; BCG – The Boston Consulting Group 2018; McKinsey&Company 2017)

Auf Basis dieser Datenpunkte wurde die folgende Kostenentwicklung für die Energie-systemanalyse angenommen:

Zeitpunkt:	2020	2025	2030
Herstellkosten	161 €/kWh	104 €/kWh	70 €/kWh

Tabelle 2: Kostenentwicklung für Batteriesysteme bis 2030 (auf Basis Abbildung 9)

Die Gesamtkosten der Traktionsbatterien resultieren aus den spezifischen Kosten (€/kWh) und der angenommenen Batteriegröße (kWh). Als Eingangsgrößen in die Modellierung werden die Elektrofahrzeuge in die Größenklassen „Klein“ (A & B Segment) - „Mittel“ (C & D Segment) - und „Groß“ (E, F, J Segment) eingeteilt. Für die Größenklassen wurden auf Basis aktuell verfügbarer Fahrzeuge sowie Ankündigungen Annahmen zur Entwicklung der typischen Traktionsbatteriegrößen getroffen. Die Annahmen weisen dabei eine große Überschneidung zum Meinungsbild eines Expertenworkshops auf, der innerhalb der AG2 „Netze und Infrastruktur“ des Themenfeldes Energie im Strategiedialog Automobilwirtschaft Baden-Württemberg am 04.12.2018 durchgeführt wurde (siehe Tabelle 3).

PKW	Einheit	IER - 2010	IER - 2020	IER - 2030	SDA - 2030
BEV Klein	kWh	18	23	30	30
BEV Mittel	kWh	30	40	60	60 - 80
BEV Groß	kWh	74	95	125	125 - 150

Tabelle 3: Annahmen zur Größe der Traktionsbatterien nach FZG-Typ & Prod.-Jahr [Quelle: eigene Annahmen, Kagerbauer et al. 2018]

Zur Ermittlung der Fahrzeugkosten im Zeitverlauf wird auf einen komponentenbasierten Ansatz zurückgegriffen. Das Fahrzeug wird dabei aus der Karosserie, Verbrennungsmotor und Getriebe bzw. Karosserie, Elektromotor, Leistungselektronik und Traktionsbatterie zusammengesetzt. Hinsichtlich der konventionellen Fahrzeuge ergeben sich steigende Kosten aufgrund eines verstärkten Aufwands für Abgasreinigung und vermehrten Anstrengungen hinsichtlich Kraftstoffeinsparung.

Die BEV hingegen erfahren einen Kostenrückgang, hauptsächlich getrieben durch fallende spezifische Kosten der Traktionsbatteriemodule. Die Kostendegression wird jedoch durch steigende Batteriegrößen gemindert. Hinsichtlich der Größe der Traktionsbatterien gelten die folgenden Annahmen:

- BEV Klein: 20 kWh (2015) - 30 kWh (2030)
- BEV Mittel: 30 kWh (2015) - 60 kWh (2030)
- BEV Groß: 80 kWh (2015) - 125 kWh (2030)

In Abhängigkeit der Fahrzeugklasse und Kraftstoffart zeigt sich eine Parität der Anschaffungskosten im Zeitraum zwischen 2025 - 2030, wobei die Kostenparität in der Fahrzeuggruppe „Groß“ zuerst erreicht wird. Damit stellt sich die Erwartung einer zunehmenden Angebots- und Nachfragekonstellation zugunsten von BEV als gerechtfertigt dar. Diese Größenordnung soll nunmehr bewertet werden.

1.2.2 Prognosen zur Marktdurchdringung an xEV-Fahrzeugen

Im Hinblick auf Prognosen zu den bis zum Jahr 2030 ermittelten Stückzahlen zugelassener BEV verbleibt eine (Rest-)Ungenauigkeit, nachdem die reale Kundenbereitschaft zum Wechsel auf xEV-Fahrzeugkonzepte unbeachtet bleibt.

Es wurden daher vergleichend zu einer derartigen Extrapolation weitere Marktstudien mit herangezogen. Betrachtet wurden dabei aktuelle Prognoserechnungen der Boston Consulting Group, der Royal Dutch Shell Gruppe sowie eine Studie seitens Öko-Institut e.V. Die Ergebnisse der Studien weichen z.T. erheblich voneinander ab.

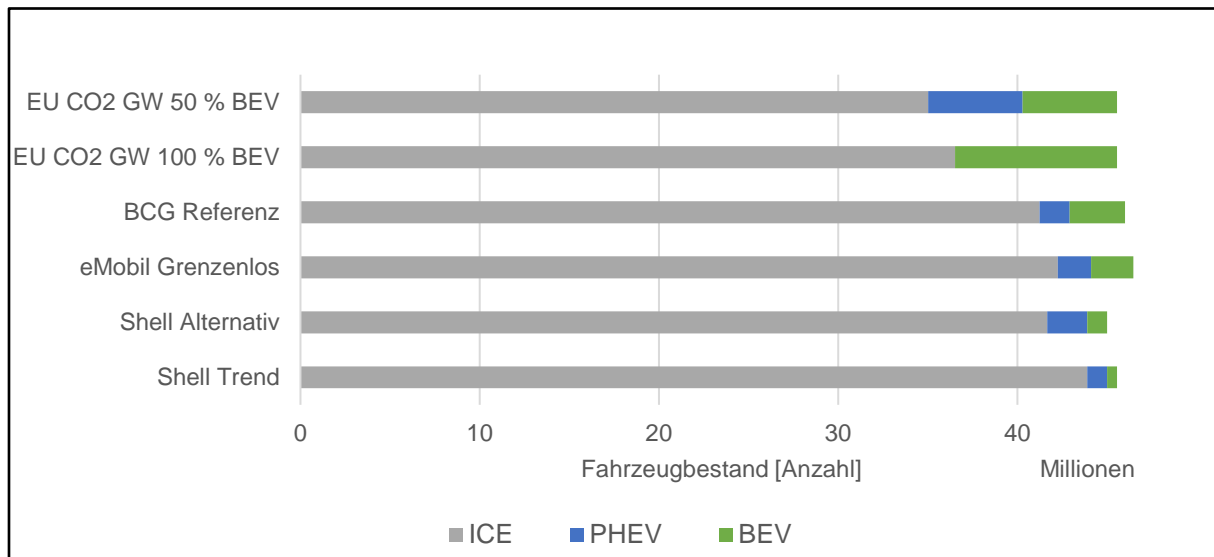


Abbildung 10: Prognosen der Fahrzeugbestände in Deutschland, differenziert nach ICE, PHEV, BEV (Shell Deutschland Oil GmbH 2014), (Öko-Institut e.V. 2014), (Boston Consulting Group 2018), (Europäischer Rat 2019).

Ursache bilden sowohl angenommene Prämissen (z.B. Klimazielerreichung, Erfüllung Flottenverbrauchsziele, Energiepreisveränderung, etc.) als auch Wachstumsprognose-rechnungen in Abhängigkeit diverser Einflussfaktoren (Marktakzeptanz, Preisentwicklung, Verfügbarkeit Infrastruktur, ...).

Die Ergebnisse der jeweiligen Prognoserechnungen gehen allesamt davon aus, bis 2030 eine BEV-Quote aller zugelassenen Fahrzeuge von weniger als 15 % zu erreichen. Dies stellt eine signifikante Abweichung von mehr als 50 % ggü. dem Ziel einer vollständigen Erfüllung des Flottenverbrauchszieles dar und würde in letzter Konsequenz die Automobilwirtschaft zu erheblichen Steuernachzahlungen zwingen (Abb. 10).

Die Automobilhersteller wiederum wären in diesem Fall gezwungen, eine Überkompensation der nicht gemäß Vorgabewert verkauften xEV-Fahrzeuge durch stärkere Penetration in den urbanen Zentren zu leisten. Anreizsysteme wären die Spielräume durch veränderte Herstellkosten (über sinkende Batteriesystempreise), oder aber verbesserte TCO-Bilanzen aus Endkundensicht bei Wechsel in neue Energieträger (mittelfristige Entkoppelung der Stromkosten ggü. Rohöl) sowie eine dort ausreichend ausgebaute Ladeinfrastruktur. Für den Beispielfall des Großraumes Stuttgart wurde eine derartige Hochrechnung im Rahmen dieser Studie geleistet, die deutlich höhere xEV-Quoten von mehr als 30 % bis 2030 prognostiziert (Abb. 11).

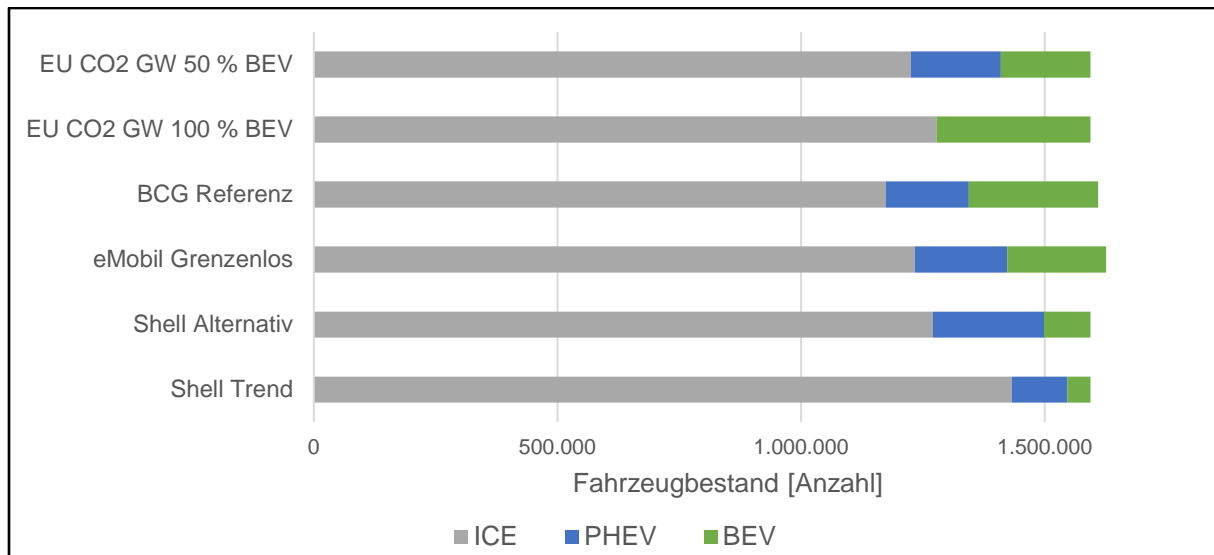


Abbildung 11: Prognosen der Fahrzeugbestände für den Großraum Stuttgart, differenziert nach ICE, PHEV, BEV (Shell Deutschland Oil GmbH 2014), (Öko-Institut e.V. 2014), (Boston Consulting Group 2018), (Europäischer Rat 2019).

Erstmals kann von einer Kohärenz der Prognosen zwischen den Marktstudien durch Boston Consulting Group, Öko-Institut e.V. sowie den EU-Flottenzielvorgaben ausgegangen werden, dies wird verursacht über eine faktorielle (Über-)Gewichtung der Marktstudien-Prognosen im Falle einer Anwendung auf urbane Zentren bedingt durch deren erhöhten Akzeptanz zum Technologiewechsel hin zu xEV-Konzepten.

2 Verkehrs- und Energienetze - Fallstudie Stuttgart

2.1 Verkehrsmodellierung, Energiebedarfe, Ladeinfrastruktur

Zur Ermittlung des Energiebedarfs durch BEV werden verschiedene Szenarien mit mobiTopp simuliert (Mallig et al. 2013). mobiTopp ist ein agentenbasiertes Verkehrsnachfragemodell, welches die gesamte Mobilität inkl. Ortsveränderungen und Verkehrsmittelwahl und Dauern für den Zeitraum einer Woche für jede Person des Planungsraums abbildet. Es wurde vom Institut für Verkehrswesen am KIT entwickelt und gliedert sich in zwei Teilmodelle: das Long-Term- und das Short-Term-Modell, welche nachfolgend genauer erläutert werden.

Im Rahmen der Fallstudie Stuttgart wird der Verkehr im Großraum Stuttgart in mobiTopp betrachtet. Das Ziel der Simulation ist eine bessere Kenntnis über die räumliche und zeitliche Verteilung des durch BEV bedingten Energiebedarfs zu erhalten. mobiTopp simuliert die Verkehrsnachfrage aller Personen minutenfein und berücksichtigt Rahmenbedingungen wie Reichweiten und Ladeinfrastruktur.

Für eine realitätsnahe Abbildung des Ladeverhaltens wurde zunächst die im Jahre 2018 bestehende öffentliche Ladeinfrastruktur im Planungsraum analysiert und die 529 identifizierten Ladepunkte in mobiTopp hinterlegt (Bundesnetzagentur 2019), (KELAG-Kärntner Elektrizitäts-AG), (LEMNET Europe e.V.), (Weemaes). In einem Fachworkshop sprach sich die Mehrheit der Teilnehmer für einen Zuwachs an Ladepunkten in der Region Stuttgart bis zum Jahre 2030 aus. Entsprechend wurden 500 neue Ladepunkte in Verkehrszellen mit hoher Einkaufs- oder Freizeitaktivität verortet. Im Folgenden wird der Aufbau und der Modellablauf von mobiTopp genauer spezifiziert.

Long-Term-Modell

Im Long-Term-Modell werden alle Eigenschaften festgelegt, die über den gesamten Simulationszeitraum konstant sind. Zunächst wird die Bevölkerung (ca. 2,7 Mio. Personen) inklusive soziodemographischer Eigenschaften im Rahmen einer Bevölkerungssynthese generiert. Jede Person ist einem Haushalt zugeordnet, welcher einen festen Wohnort hat. Zudem verfügen erwerbstätige Personen über einen festen Arbeitsplatz und Schüler bzw. Studenten über einen Schul- bzw. Ausbildungsort. Anschließend werden Zeitkarten- und Pkw-Besitz modelliert und ein individueller Aktivitätenplan erzeugt. Im Rahmen dieser Studie ist insbesondere die Modellierung des Besitzes von BEV relevant.

BEV-Besitz-Modell

Das BEV-Besitz-Modell berücksichtigt einerseits die Kompatibilität des Mobilitätsverhaltens einer Person mit BEV-Fahrzeugeigenschaften und andererseits das Interesse an neuen Technologien wie BEV. Es basiert auf Daten von CUMILE (= Car Usage Model Integrating Long Distance Events) und den Daten der MINI E Berlin Studien (Weiss et al. 2017). CUMILE wurde genutzt, um Personen zu identifizieren, deren Mobilitätsverhalten auch mit BEV realisierbar ist. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die Person mit ihrem Pkw häufig kurze und weniger als 12 Mal im Jahr lange Strecken (> 90 km) fährt. Basierend auf dieser Gruppe wurde ein Logit-Modell entwickelt, welches die Wahrscheinlichkeit der Eignung als Funktion von Geschlecht, Einkommen, Pendeldistanz, Lage des Wohnsitzes, Anzahl der Pkw

im Haushalt und Haushaltsgröße berechnet. Dadurch soll gewährleistet werden, dass Personen ihr Mobilitätsverhalten auch bei Besitz eines BEV beibehalten können.

Zur Abbildung des Interesses der Agenten in mobiTopp an BEV wurde basierend auf Daten der MINI E Berlin Studien ein Ähnlichkeitsmaß bestimmt. Dies vergleicht Geschlecht, Altersgruppe, Beschäftigungsstatus, Anzahl Fahrzeuge im Haushalt, Fahrzeugsegment und die Pendeldistanz des Agenten mit den Teilnehmern der MINI E Berlin Studien. Da das Ähnlichkeitsmaß Werte im Intervall $[0,1]$ annehmen kann, eignet es sich ebenfalls zur Interpretation als Wahrscheinlichkeit für das Interesse. Durch Multiplikation beider Wahrscheinlichkeiten erhält man die Wahrscheinlichkeit für den BEV-Besitz eines Agenten.

Short-Term-Modell

Im Short-Term-Modell erfolgt die Simulation der Aktivitäten aller Agenten in 1-Minuten-Schritten chronologisch und simultan über den Zeitraum einer kompletten Woche. Dabei wird in jedem Zeitschritt geprüft, welche Agenten gerade eine Aktivität beendet haben. Diese Agenten führen im nächsten Schritt eine Zielwahl für die Folgeaktivität durch. Hierfür wird ein Gravitationsmodell verwendet, welches beispielsweise die Attraktivität einer möglichen Zielzelle, bedingt durch die Anzahl der Gelegenheiten, an der die Aktivität durchgeführt werden kann. Zudem werden die Reisekosten von dem aktuellen Standort zur Zielzelle sowie die Entfernung zum nächsten Fixpunkt (Zuhause bzw. Arbeit) berücksichtigt. Bei Aktivitäten mit vordefiniertem Ziel (Arbeit, Schule, zu Hause) entfällt diese Entscheidung. Anschließend findet unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel eine Verkehrsmittelwahl statt. Grundsätzlich gibt es die Möglichkeit Wege zu Fuß, mit dem Rad, mit dem Pkw, dem ÖV oder als Mitfahrer zu machen. Die tatsächlichen Alternativen bei der Auswahlentscheidung hängen jedoch vom aktuellen Standort, dem zuvor genutzten Verkehrsmittel und auch der Pkw-Verfügbarkeit im Haushalt ab. Ist beispielsweise ein anderes Mitglied des Haushalts mit einem Pkw unterwegs, so ist dieser nicht mehr verfügbar. Die Auswahlentscheidung wird mittels eines multinomialen Logit modelliert und vergleicht den Nutzen der verschiedenen Verkehrsmittelalternativen (Mallig et al. 2013).

2.2 Simulationsszenarien

Die Rahmenbedingungen für die Simulation wurden beim Fachworkshop mit Experten aus der Automobil- und Energiebranche festgelegt. Die Simulation soll den Raum Stuttgart im Jahre 2030 zeigen. Thematische Schwerpunkte waren die Marktdurchdringung von BEV, Fahrzeugeigenschaften der Fahrzeuge in den verschiedenen Segmenten sowie die Eigenschaften der Ladeinfrastruktur. In mobiTopp kann zwischen verschiedenen Fahrzeugarten differenziert werden, welche sich in Reichweite und Verbrauch unterscheiden. Da bezüglich der zukünftigen Fahrzeugeigenschaft weitgehend Einigkeit herrschte, werden diese in allen Simulationsläufen konstant bleiben. Die Reichweiten und der Verbrauch können Tabelle 4 entnommen werden.

	Kleinwagen (A/B Segment)	Mittelklasse (C/D Segment)	Oberklasse (E Segment)
Verteilung der BEV auf Segmente	20 %	55 %	25 %
Reichweite (km)	250	350	550
Verbrauch (kWh/100km)	12	17	23

Tabelle 4: Prognosen der durchschnittlichen Fahrzeugbestandsparameter (Kagerbauer et al. 2018)

Die einzelnen Simulationsläufe werden sich durch eine Variation der Marktdurchdringung, des Ladeverhaltens sowie der Ladeinfrastruktur unterscheiden. Für eine gute Interpretierbarkeit der Ergebnisse bei der Ursachen-Wirkungs-Analyse findet die Variation der Parameter „ceteris paribus“ statt.

2.3 Ergebnisse im Vergleich zu weiteren Studien

Parallele Studien (Veröffentlichung in Vorbereitung) betrachten einen früheren Planungshorizont als 2030 und entsprechend auch eine geringere Marktdurchdringung von BEV. Bei Simulationen mit 75.000 BEV in der Region Stuttgart (ca. 5 % der gesamten Pkw) resultierte unter der Annahme, dass bei Unterschreitung eines Schwellwerts von 50 % die Batterie geladen wird, an öffentlichen Ladepunkten ein zusätzlicher Energiebedarf von ca. 339.000 kWh innerhalb einer Woche. Durchschnittlich wurden an jedem öffentlichen Ladepunkt 327 kWh Energie getankt. Bereits die Erhöhung des Lade-Schwellwertes auf 90 %, führte unter der Annahme, dass Ladepunkte immer verfügbar sind, wenn Ladebedarf besteht, zu einer Steigerung der Gesamtenergiemenge innerhalb einer Woche um den Faktor 2,6. Dies zeigt die Sensitivität der Ergebnisse und hebt die Relevanz der Simulation mit verschiedenen Parametern hervor.

2.4 Methode zur Kopplung von Verkehrsmodellen und Netzberechnungen (Beispielhafte Modellkopplung mobiTopp und MATPOWER)

Um Netzengpässe identifizieren zu können, sind Lastflussberechnungen ein zentrales Werkzeug. Mittels einer Lastflussberechnung können einerseits die Spannungshaltung im Netz andererseits auch die Auslastung der operativen Netzkomponenten, wie Transformator und Leitungen, untersucht werden.

Für die im Rahmen der Untersuchung durchzuführende Netzanalyse wird die Lastflussberechnung mittels MATPOWER (Zimmerman et al. 2011) durchgeführt. MATPOWER ist dabei ein auf MATLAB-basierendes open-source Paket zur Lösung von stationären Simulations- und Optimierungsproblemen. Somit können mittels MATPOWER Lastflussberechnungen durchgeführt werden.

Die Lasten des zu untersuchenden Netzes werden als Knoten und die entsprechenden Leitungen als Kanten modelliert („Kanten-Knoten-Modell“). Haushaltslasten sowie - falls vorhanden - weitere Lastprofile von Photovoltaik (PV)-Anlagen, PV-Batteriespeicheranlagen oder Wärmepumpen werden den entsprechenden Knoten zugeordnet. Die konstanten Leistungslasten werden dabei für jeden Knoten als Summe von Wirk- und Blindleistung modelliert. Um die zusätzliche Last durch EV zu berücksichtigen, werden zu den vorher beschriebenen Lasten zusätzlich die Lasten der EV addiert.

In einem ersten Schritt werden die Marktpenetration und das Mobilitätsverhalten der Fahrzeuge analysiert, um darauf aufbauend Aussagen über den künftigen Leistungsbedarf von E-Pkw treffen zu können. Hierbei werden die Ergebnisse der in Kapitel 2.2 beschriebenen Simulationsläufe herangezogen. Um das zukünftige Mobilitätsverhalten explizit in die Lastflussberechnungen mit einfließen zu lassen, wird das mikroskopische Verkehrsnachfragemodell mobiTopp (vgl. Kap 2.1.) mit MATPOWER verknüpft. Somit wird in

Lastflussberechnungen erstmals eine konkrete Verkehrsnachfragemodellierung berücksichtigt. In Abbildung 12 ist die Kopplung der beiden Modelle graphisch abgebildet.

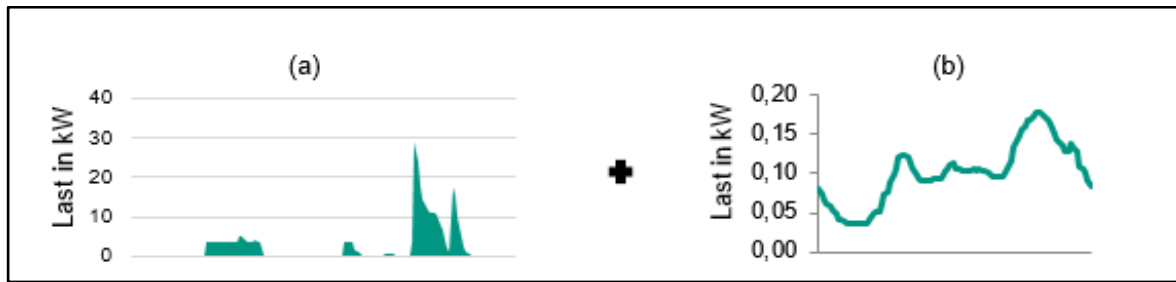


Abbildung 12: (a) Beispielhafte aggregierte Ladeprofile innerhalb einer Verkehrszelle, (b) „Typisches“ Haushaltslastprofil

Aus dem Modell mobiTopp werden individuelle Ladeprofile innerhalb einer Verkehrszelle über den Betrachtungszeitraum von einer Woche in minutengenauer zeitlicher Auflösung generiert. Diese einzelnen Ladeprofile werden in einem ersten Schritt aggregiert (Abb. 12 (a)), um in einem zweiten Schritt dem aggregierten Ladeprofil aggregierte Haushaltslastkurven (Abb. 12 (b)) hinzuzufügen. Diese spiegeln die künftige Standardlast 2030 unter Berücksichtigung der verwendeten Technologien (PV, Wärmepumpen, Batteriespeicher, etc.) wider. Aus dieser summierten Gesamtlast wird der Lastpeak während des Betrachtungszeitraums sowie die zugehörige Uhrzeit bestimmt, welche auch den anschließenden Netzanalysen zu Grunde liegen. Auf Basis des ermittelten Lastpeaks wird jedem, im zu untersuchenden Netzabschnitt befindlichen Haushalt ein gleichmäßiger Anteil der Peaklast zugeordnet. Dieser spiegelt die Last an den modellierten Knoten wider. Im Anschluss werden die Netzdaten sowie die damit verbundenen technischen Restriktionen (Spannungsgrenzen, maximale Bemessungscheinleistung) für die Verkehrszelle in MATPOWER integriert. Auf Basis dieser Eingaben in MATPOWER wird im Anschluss die Lastflussberechnung durchgeführt. Die Lastflussmodellierung wird am Ende kritische Netzsituationen der Netzkomponenten für die verschiedenen Szenarien identifizieren. Aufbauend auf der abschließenden Analyse der Szenarienergebnisse können dann Handlungsempfehlungen zur Vermeidung dieser Engpässe abgeleitet werden.

3 Energiebilanzierung der Systemteilnehmer - Fallstudie Stuttgart

Im Rahmen dieser Studie wurde für die Stadt Stuttgart eine modellbasierte Energiesystemanalyse vorgenommen. Das Energiesystemmodell bildet alle Vorgänge der Energieumwandlung und Nutzung auf dem Gebiet der Stadt Stuttgart ab. Die Entwicklung dieses Energiesystems unter energiepolitischen Rahmenseetzungen wird anschließend im Zeitverlauf betrachtet.

In die Energiesystemanalyse gehen neben den Energiepolitischen Rahmenseetzungen weiter die Zulassungszahlen der Elektrofahrzeuge auf Basis der Prognosen zu xEV-Fahrzeugzulassungen bis 2030 ein. Neben dem Energieverbrauch der Fahrzeuge ergeben sich durch die erhöhte Durchdringungsrate der Elektromobilität Systemrückwirkungen auf den übrigen Verkehr, Stromerzeugung und -verbrauch sowie die Erreichung lokaler Treibhausgasemissionsminderungsziele.

3.1 Modellbeschreibung TIMES Local Stuttgart

Grundlage bildet das Energiesystemmodell TIMES Local, basierend auf dem Modellgenerator TIMES, welcher innerhalb des Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP) der Internationalen Energieagentur (IEA) entwickelt wurde. In TIMES wird das Energiesystem bottom-up, technologiebasiert, detailliert als ein Netzwerk von Prozessen (z. B. Kraftwerkstypen, Verkehrstechnologien), Gütern (Energieträgern, Material) und den entstehenden Emissionen in Form eines Referenzenergiesystems abgebildet (ETSAP und IEA, Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP) 2002; Remme; R. Loulou, A. Lehtilä, A. Kanudia, U. Remme und G. Goldstein 2016).

Vorgegeben werden bei dem linearen Optimierungsmodell der Anlagenbestand, die zukünftigen Nachfragen in den einzelnen Sektoren und Primärenergieträgerpreise sowie die Technologien und Energieträger charakterisierenden Parameter. TIMES Local stellt dabei eine Anwendung mit dem Schwerpunkt auf die Betrachtung von denjenigen Prozessen dar, die für ein Stadt- oder Quartiersmodell relevant sind. Die Zielfunktion ist die integrale Kostenminimierung unter Einhaltung technischer und ökologischer Restriktionen (Blesl 2011).

Der Modellierungszeitraum ist von 2010 bis 2050 in 5-Jahresschritte eingeteilt. Im Rahmen der Optimierung wird eine integrale Ausbau- und Einsatzoptimierung über den gesamten Modellierungszeitraum durchgeführt. Das Referenzenergiesystem berücksichtigt dabei die Sektoren öffentliche Strom- und Wärmebereitstellung, private Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, Transport, Industrie und den Import von Energieträgern. Nachfrageseitig wird zwischen sechs verschiedenen Wohngebäudetypen (jeweils drei für den Bestand und Neubau) unterschieden. Des Weiteren wird der GHD Sektor in kleine und große Nichtwohngebäude unterteilt. Im Verkehrssektor wird zwischen Kurz- und Langstrecken im motorisierten Individualverkehr sowie zwischen ÖPNV und leichtem und schwerem Nutzverkehr differenziert. Dabei ist für jede Nachfragekategorie ein separates Technologieportfolio zur Bereitstellung der entsprechenden Systemdienstleistung mit spezifischen Leistungsklassen, Investition und technischen Parametern hinterlegt. Auf der Erzeugungsseite sind für die zentrale Strom- und Wärmebereitstellung verschiedene Technologien implementiert. Dabei liegt der Fokus auf der Modellierung netzgebundener Versorgungskapazitäten in Verknüpfung mit Erneuerbaren Energien, wie solarthermisch

unterstützte Nahwärme oder die Integration von Abwasserwärmepumpen ins Energiesystem. Der öffentlichen Strombereitstellung steht ein Technologieportfolio bestehend aus KWK-Anlagen, Wasserkraft, Photovoltaik oder Wind zur Verfügung. Zusätzlich kann die lokale Stromversorgung aus Stromimporten aus der übergreifenden Mittelspannungsebene erfolgen. Um den Anforderungen flexibler Einspeisungen aus erneuerbaren Energien und dynamischer Verbraucher wie beispielsweise Elektrofahrzeugen gerecht zu werden, ist die zeitliche Auflösung in fünf Typwochen mit stündlichen Zeitschritten unterteilt. Dabei entsprechen vier Typwochen je einer Jahreszeit (672 Zeitsegmente pro Jahr) und die fünfte charakterisiert eine Peak-Woche mit einer stündlichen Auflösung (zusätzlich 168 Zeitsegmente pro Jahr) zur Abbildung einer hohen Einspeisung fluktuierender Erneuerbarer Energien.

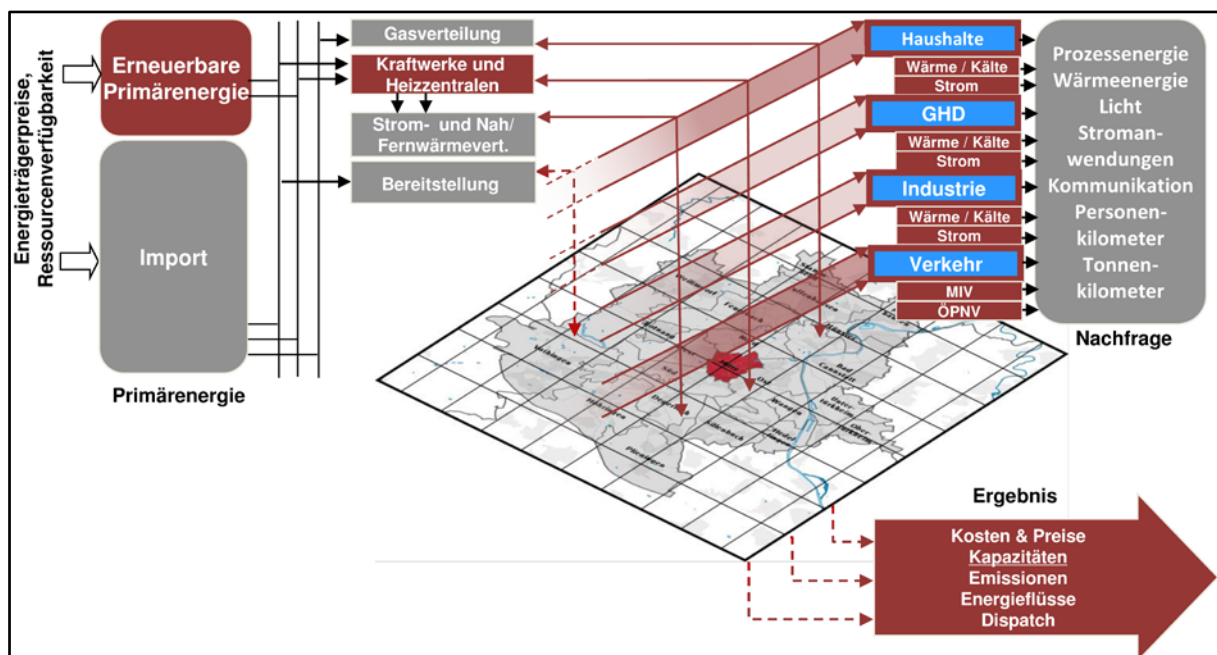


Abbildung 13: Schematische Darstellung des Referenzenergiesystems in TIMES Local Stuttgart

Die Abbildung der Elektromobilität zur Bereitstellung von Fahrleistungen (aufgeteilt in Kurz- und Langstrecke) erfolgt im Modell in Form von drei verketteten Prozessen, einem Beladungsprozess, einem Speicherprozess und dem Elektrofahrzeug. Zusätzlich ist durch die Implementierung eines Vehicle-to-Grid Prozesses die Option für eine Rückspeisung des Stroms aus der Autobatterie ins Verteilnetz vorgesehen. Durch diesen Ansatz ist es möglich eine Entkopplung zwischen der Stromnachfrage (dem Beladungsprozess) auf Netzebene und dem Stromverbrauch, der während der Fahrt anfällt, zu erreichen. Die Beladungskurve wird dabei dem Energiesystemmodell exogen vorgegeben. Die Inputparameter liefert hierbei die Mobilität in Deutschland Studie und eine anschließende Markov Chain Monte Carlo Simulation des Mobilitäts-Verbraucherverhaltens (infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. 2010). Im Zuge der Simulation der Mobilitätsganglinien werden Wochenprofile der Personen- und Fahrzeugkilometer sowie der Lasten der Ladeinfrastruktur erstellt (Liebhart). Durch Vorgabe der maximalen Verfügbarkeit der Elektroauto-Beladung im Energiesystemmodell ergibt sich endogen ein Speicherinhalt je Zeitsegment. Der Beladungszustand der Batterie bestimmt dabei den Einsatz der Elektrofahrzeuge.

3.2 Szenariodefinition - Elektromobilität in Stuttgart

Die Betrachtung basiert auf einem, an den Masterplan der Stadt Stuttgart (Fraunhofer IBP 2017) angelehnten Szenario. Entsprechend des Masterplans gilt im Betrachtungsraum das Ziel der Treibhausgasemissionsminderung um 95% ggü 1990 bis zum Jahr 2050. Nach Planung der Stadt Stuttgart ergibt sich eine sinkende Mobilitätsnachfrage im motorisierten Individualverkehr, die im Modell entsprechend zu einer Verlagerung der Verkehrsleistung auf den ÖPNV sowie den Schienenverkehr führt. Parallel dazu erfolgt auch eine teilweise Verlagerung des Güterverkehrs vom LKW-Verkehr auf den Schienenfrachtverkehr. Die Nutzung von Biokraftstoffen wird ab dem Jahr 2040 aufgrund der Umweltrückwirkungen dieser Kraftstoffe aufgegeben. Der Zuwachs der Elektrofahrzeuge ist bis 2030 vorgegeben und basiert auf den Betrachtungen des Abschnitts: 1.2.2 Prognosen zur Marktdurchdringung an xEV-Fahrzeugen.

3.3 Die Wirkung der Elektromobilität im Energiesystem

Die Energiesystemanalyse für die Stadt Stuttgart wird im Folgenden mit Fokus auf die Wirkung der Elektromobilität im lokalen Energiesystem vorgenommen.

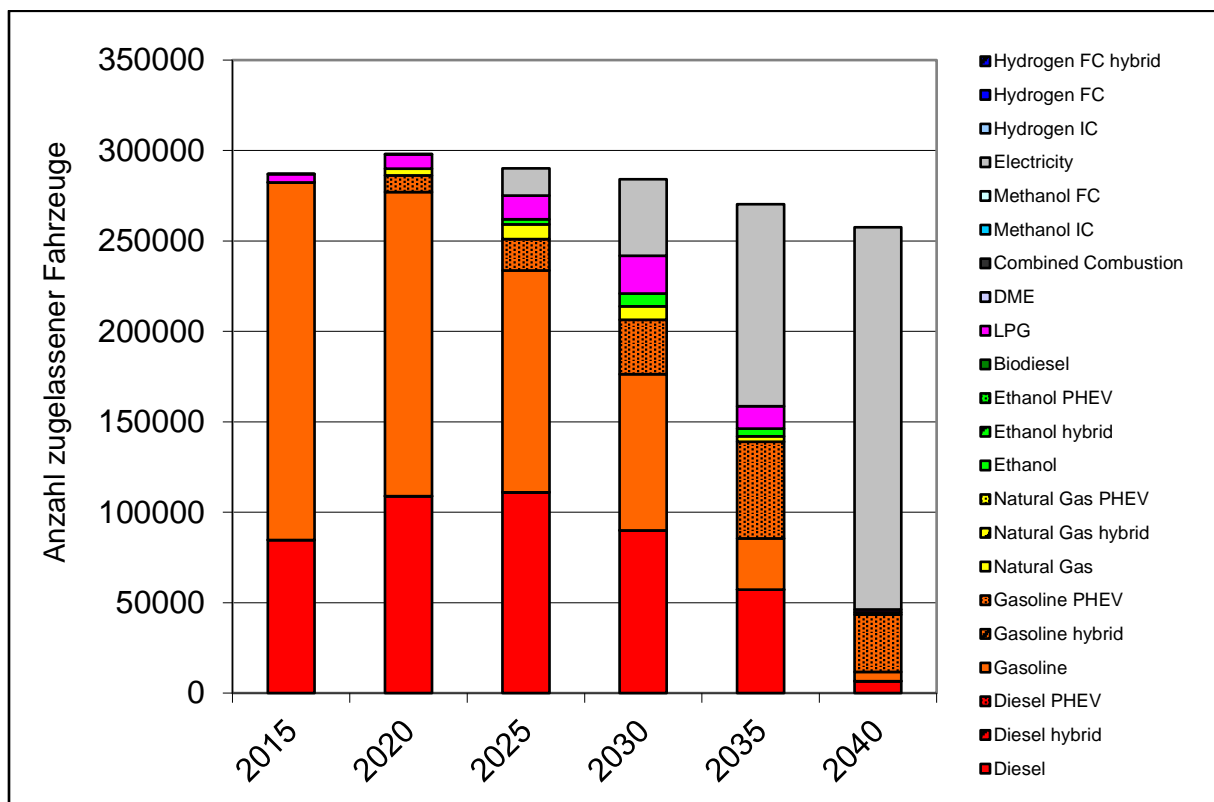


Abbildung 14: Zugelassene PKW auf dem Gebiet der Stadt Stuttgart nach Antriebsart

Im Raum Stuttgart sind im Zeitverlauf rund 250.000 bis 300.000 PKW zugelassen. Die Zulassungszahlen erreichen dabei bis zum Jahr 2020 ihren vorläufigen Höhepunkt und verhalten sich im Anschluss ruckläufig, bedingt durch die sukzessive Verlagerung der Beförderungsleistung des motorisierten Individualverkehrs auf den ÖPNV sowie Schienenverkehr.

Hinsichtlich der Zusammensetzung dominieren bis 2025 Benzin- und Dieselgetriebene Fahrzeuge. Ab der Periode 2025 gewinnen jedoch BEV und PHEV an Bedeutung im Bestand, wobei für 2030 ein Anteil der Elektrofahrzeuge von rund 26% am Bestand resultiert.

Ab der Periode 2030 basieren die weiteren Neuzulassungen nahezu vollständig auf BEV und PHEV-Fahrzeugen, wodurch sich bis 2040 eine Marktdurchdringung um 95% ergibt.

Hinsichtlich der Busse (21% in 2030) und des leichten (11,6 % in 2030) und schweren Güterverkehrs vollzieht sich die Durchdringung der elektrischen Antriebe entsprechend der Vorgaben bis 2030 langsamer.

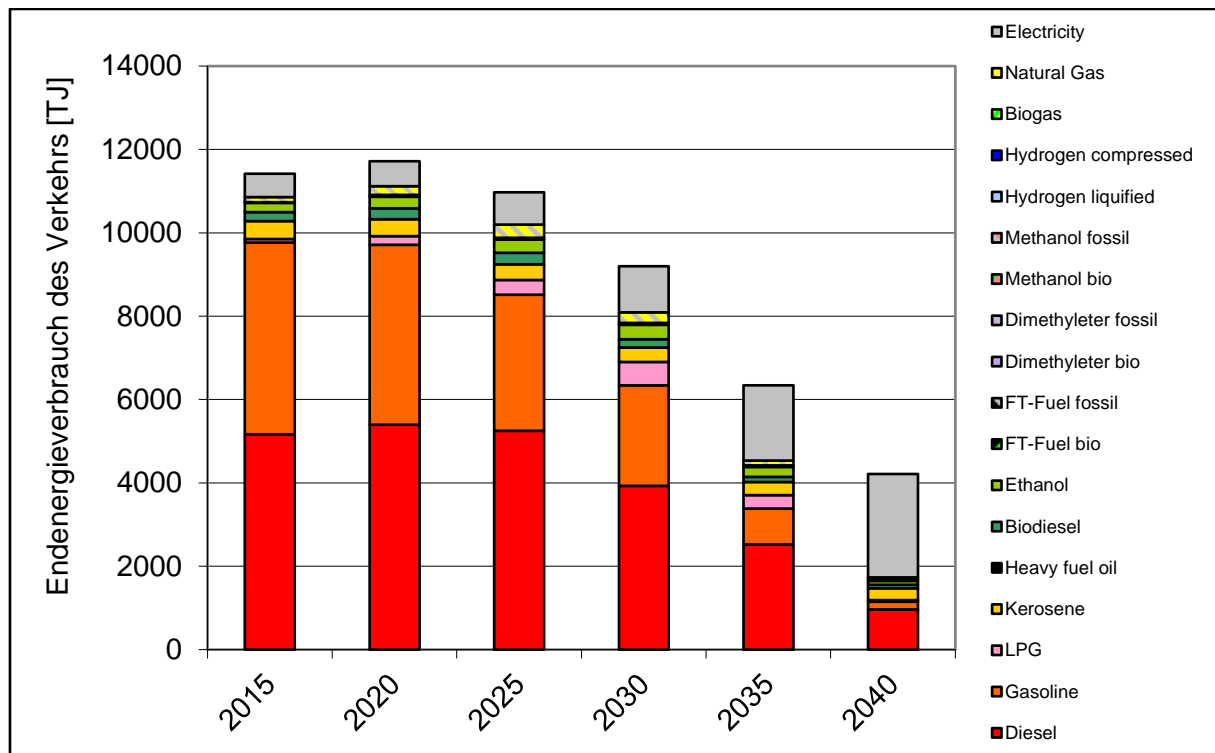


Abbildung 15: Endenergieverbrauch des Verkehrs auf dem Gebiet der Stadt Stuttgart im Zeitverlauf

Niveau des Endenergieverbrauchs des Verkehrs nimmt von rund 11.000 TJ pro Jahr im Jahr 2015 auf etwas mehr als 4000 TJ im Jahr 2040 ab. Dies basiert hauptsächlich darauf, dass die anfängliche Dominanz von Dieselmotoren sowie Benzin, nach 2025 durch die Elektromobilität und damit einhergehend einer deutlich rückläufigen Entwicklung im Verbrauchsniveau ersetzt wird. Zu erklären ist dies durch die hohen Wirkungsgrade der Energieumwandlung in Elektrofahrzeugen gegenüber Verbrennungsmotoren. Wobei zu beachten ist, dass sich abhängig von der Vorkette der Stromerzeugung entsprechend verlustbehaftete Umwandlungsschritte in den Umwandlungssektor verschieben können.

Hinsichtlich der Nutzung der Elektrizität im Verkehr ergibt sich zwischen 2015 und 2030 bereits eine Verdoppelung auf rund 1100 TJ (300 GWh), gefolgt von einer weiteren, deutlichen Zunahme auf rund 2500 TJ (700 GWh).

Bezogen auf den Endenergieverbrauch Strom aller Sektoren entspricht dies einem Anteil von rund 4% (2015), 11% (2030) sowie 25% (2040).

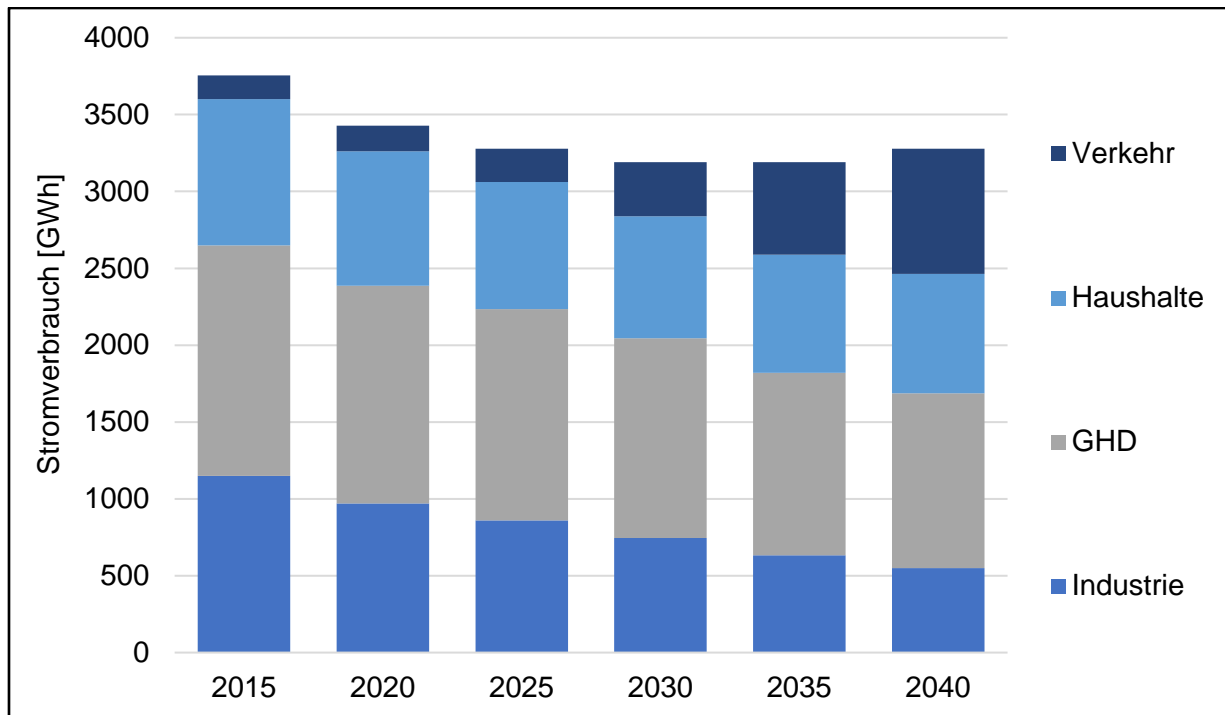


Abbildung 16: Stromverbrauch nach Sektoren auf dem Gebiet der Stadt Stuttgart im Zeitverlauf

In Abbildung 16 wird der Stromverbrauch, aufgeschlüsselt nach Sektoren dargestellt. Hieraus wird ersichtlich, dass Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) sowie Haushalte einen im Zeitverlauf um rund 30% rückläufigen Stromverbrauch aufweisen. Im Gegensatz hierzu steht der kontinuierlich steigende Strombedarf für PKW, LKW und Busse, wodurch der Rückgang ab 2030 stagniert und anschließend eine leichte Trendumkehr eintritt.

Aus dem steigenden Stromverbrauch des Verkehrs sowie dem steigenden Anteil dieses Stromverbrauchs am Endenergieverbrauch leitet sich die Frage nach den Rückwirkungen auf die Stromerzeugung- und Bereitstellung auf dem Gebiet der Stadt Stuttgart ab.

Abbildung 17 zeigt die Entwicklung der Strombereitstellung im Zeitverlauf. Erkennbar ist hier, dass die Stromnachfrage anfangs zu rund 85% aus Stromimporten befriedigt wird. Die Zunahme überwiegend dachgestützter Photovoltaikanlagen führt zu einem höheren Autarkiegrad für Stuttgart mit entsprechend reduzierter Importabhängigkeit von rund 35% in den Perioden 2035 und 2040. Zwischen den Jahren 2035 und 2040 nimmt die lokale Stromerzeugung nur mehr geringfügig zu und der weitere Bedarf durch die Elektromobilität wird durch zusätzliche Stromimporte kompensiert.

In Summe ergibt sich eine steigende Bedeutung der Elektromobilität im Stromverbrauch mit entsprechenden Rückwirkungen auf die Bereitstellung dieser Strommengen. Dieser erhöhte Bedarf kompensiert dabei die Einsparungen der übrigen Sektoren und führt nach 2030 zu einer Trendumkehr in der Entwicklung der Stromverbrauchsmengen.

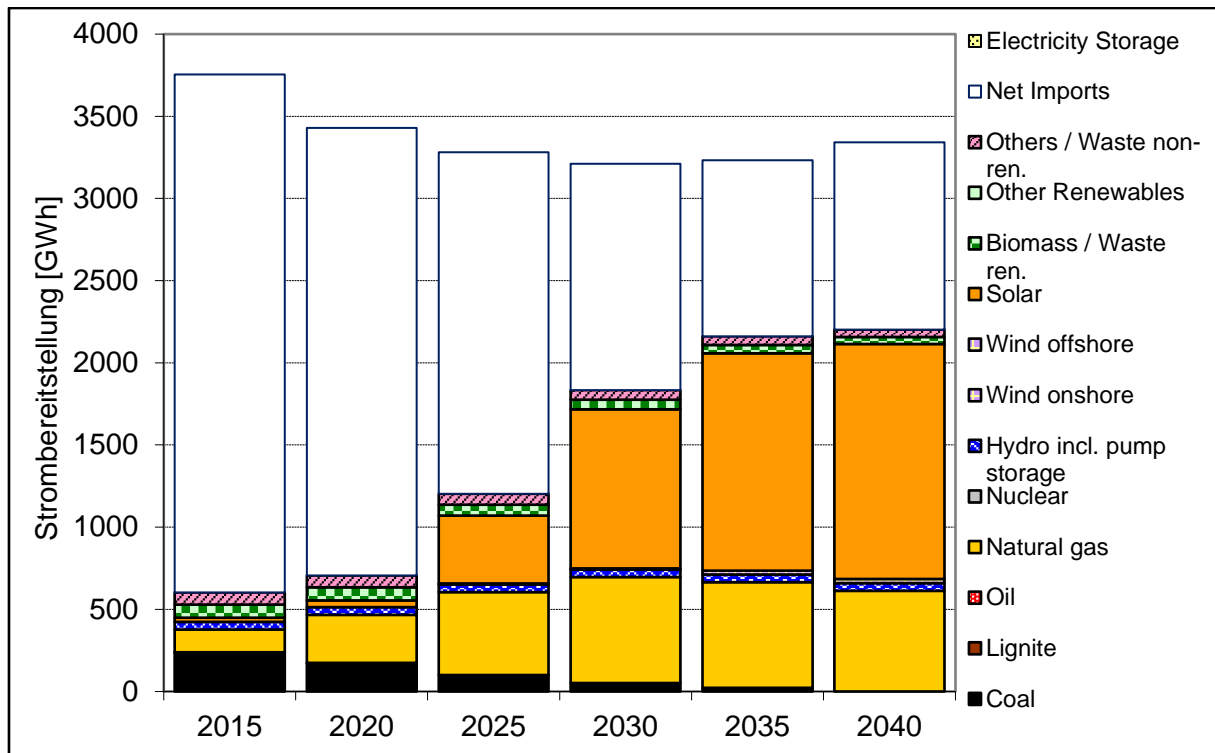


Abbildung 17: Stromerzeugung und Stromimporte auf dem Gebiet der Stadt Stuttgart im Zeitverlauf

Als ein weiteres Ergebnis der Energiesystemmodellierung liegt die resultierende Ladeleistung der Elektrofahrzeuge vor. Abbildung 18 zeigt die Entwicklung der durchschnittlichen (P_{Avg}) sowie der maximalen Ladeleistung (P_{Max}) in Summe der PKW, der Nutzfahrzeuge sowie der Busse. Deutlich sichtbar ist hierbei die Diskrepanz zwischen dem Jahresdurchschnitt der Ladeleistungen sowie den Maximalleistungen die sich durch ungesteuertes Laden ergeben. Das resultierende Verhältnis erreicht dabei in 2030 mit 11,8:1 ein Maximum, welches unter qualifizierten Voraussetzungen durch systemdienliches Laden deutlich gemindert werden kann.

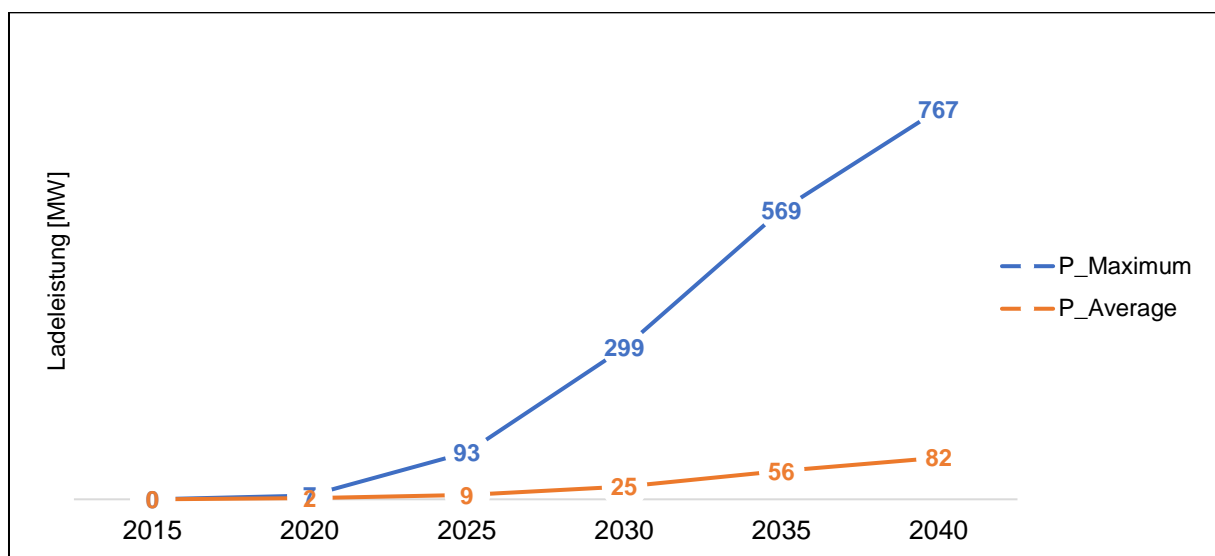


Abbildung 18: Durchschnittliche ($P_{Average}$) und maximale ($P_{Maximum}$) auftretende Ladeleistung der Elektrofahrzeuge auf dem Gebiet der Stadt Stuttgart in Megawatt

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Studie wurde die Marktdurchdringung batterieelektrisch betriebener Fahrzeuge für motorisierten Individualverkehr (MIV) aus unterschiedlichen Quellenangaben für das Jahr 2030 prognostiziert, sowie das Ladeverhalten unter Berücksichtigung der Ladeinfrastruktur sowie verschiedenen Fahrzeugparametern wie z.B. Reichweite und Ladedauer hinterlegt. Basierend auf einer Simulation der Region Stuttgart konnte damit das Mobilitätsverhalten der ca. 2,7 Millionen Einwohner innerhalb einer Woche sowie alle Bewegungsmuster der Fahrzeuge inkl. Ladevorgänge als Modell aufgebaut werden. Die Nutzung der zum Stadtgebiet gehörigen, umfassenden Energienetztopologie und Energieversorgung aus regionalen wie nationalen Quellen erlaubt eine Modellierung der sog. Sektorkopplung, die weiterreichende Aussagen zur Versorgungssicherheit und Nachhaltigkeit erlaubt. Ergänzt wurde dies durch eine Hochrechnung der Energie- und Leistungsbedarfe im Spannungsfeld konventioneller Energiebedarfe aller Sektoren zu der spezifischen des Mobilitätssektors. Der Modellraum wurde in einer Prognose zum Jahr 2030 betrachtet und beschreibt die Konsequenzen der aktuell in Vorbereitung befindlichen Transformation zur Elektromobilität für Verkehrsräume, deren Handlungsoptionen abschließend dargelegt werden.

Dabei zeigt sich, dass der Anteil an elektrischer Energieversorgung getrieben durch den Mobilitätssektor durchgängig hohe Wachstumsraten aufweist, sowie zu einer progressiv zunehmenden elektrischen Spitzenbelastung führt. Durch Paralleleffekte der veränderten Bedarfslagen sonstiger Sektoren wird jedoch der jährliche Gesamtenergiebedarf im regionalen Raum Stuttgart näherungsweise konstant gehalten. Damit wird im Zuge einer Transformation hin zur Elektromobilität im Wesentlichen die höhere elektrische Spitzenlast als Herausforderung für die Netzverteilung zu verstehen sein, als dass eine grundsätzlich höhere elektrische Energieversorgung bereitzustellen wäre.

Es gilt daher, die Konsequenzen höherer punktueller bzw. momentaner Leistungsbedarfe im Netzverbund näher zu untersuchen, um eine Energieversorgung entsprechend der Bedarfe des Mobilitätssektors sicherstellen zu können.

5 Literaturverzeichnis

Allgemeine Deutsche Automobil-Club e.V. (ADAC) (Hg.): ADAC Ecotest. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/infotestrat/tests/eco-test/default.aspx>.

Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA) (Hg.) (2019): Passenger car registrations. +0.1% in 2018; -8.4% in December. Online verfügbar unter https://www.irabb.de/Lde/start/Service+_+Verwaltung/EU_Bericht.html, zuletzt geprüft am 12.12.2018.

BCG – The Boston Consulting Group (2018): The Electric Car Tipping Point. Unter Mitarbeit von X. et al. Mosquet.

Blesl, Markus (2011): Kraft-Wärme-Kopplung im Wärmemarkt Deutschlands und Europas - eine Energiesystem- und Technikanalyse. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung. Stuttgart.

BNEF – Bloomberg New Energy Finance (2017): Lithium-ion Battery Costs and Market. Unter Mitarbeit von C. Curry.

Boston Consulting Group (Hg.) (2018): Klimapfade für Deutschland.

Bundesnetzagentur (Hg.) (2019): Ladesäulenregister.

Daimler AG (Hg.): smart EQ fortwo: Technische Daten. Online verfügbar unter <https://www.smart.com/de/de/index/smart-eq-fortwo-453/technical-data.html>, zuletzt geprüft am 31.01.2019.

Döring, Jürgen (2018): Weltweite Anforderungen an Mobilitätskonzepte im urbanen Verkehrsraum. Daimler AG. Hochschule Esslingen. Esslingen, 19.12.2018.

ETSAP und IEA, Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP) (2002): Contributing to the Kyoto Protocol. Summary of Annex VII (1999-2002).

Europäischer Rat (Hg.) (2019): CO₂-Emissionsnormen für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge: Rat bestätigt Einigung auf strengere Grenzwerte. Online verfügbar unter <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2019/01/16/co2-emission-standards-for-cars-and-vans-council-confirms-agreement-on-stricter-limits/>, zuletzt geprüft am 22.01.2019.

Fraunhofer IBP (2017): Entwurf Masterplan 100% Klimaschutz der Landeshauptstadt Stuttgart (IBP-Bericht WB 198/2017), zuletzt geprüft am 04.02.2019.

infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (2010): Mobilität in Deutschland 2008. Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends. Ergebnisbericht. Hg. v. Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Bonn und Berlin, zuletzt geprüft am 04.02.2019.

Kagerbauer, Martin; Kostorz, Nadine; Jochem, Patrick (2018): Workshop im Rahmen des Strategiedialogs Automobilwirtschaft mit Experten aus dem Themenfeld „Energie“ AG 2 „Netze und Infra-struktur“ am 4. Dezember 2018 beim Umweltministerium BW, Stuttgart. Umweltministerium Baden-Württemberg, 04.12.2018.

- KELAG-Kärntner Elektrizitäts-AG (Hg.): E-Tankstellenfinder. powered by KELAG. Online verfügbar unter <https://e-tankstellen-finder.com/at/de/elektrotankstellen>, zuletzt geprüft am 31.01.2019.
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (Hg.) (2017a): Fahrzeugzulassungen. Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt Merkmalen Jahr 2017 (FZ 14).
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (Hg.) (2017b): Verkehr in Kilometern der deutschen Kraftfahrzeuge. Gesamtfahrleistung und durchschnittliche Fahrleistung nach Fahrzeugarten. Online verfügbar unter https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr_in_kilometern_node.html, zuletzt geprüft am 28.01.2019.
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (Hg.) (2018a): Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen 1. Januar 2018. Flensburg (FZ 13).
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (Hg.) (2018b): Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken. 1. Januar 2018. Flensburg (FZ 1).
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (Hg.) (2018c): Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach Marken und Modellreihen. FZ 10. Flensburg.
- LEMNET Europe e.V. (Hg.): LEMNET Verzeichnis von Stromtankstellen für Elektrofahrzeuge. Online verfügbar unter <http://lemnet.org/de>, zuletzt geprüft am 31.01.2019.
- Liebhart, J.: Simulation akteursspezifischer, zeitlich hochaufgelöster Mobilitätsganglinien zur Analyse des Einflusses von Elektromobilität auf Energiesystemmodelle. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung.
- Mallig, Nicolai; Kagerbauer, Martin; Vortisch, Peter (2013): mobiTopp – A Modular Agent-based Travel Demand Modelling Framework. In: *Procedia Computer Science* 19, S. 854–859. DOI: 10.1016/j.procs.2013.06.114.
- McKinsey&Company (2017): Electrifying insights: How automakers can drive electrified vehicle sales and profitability.
- Öko-Institut e.V. (Hg.) (2014): eMobil 2050. Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz. Berlin.
- Passenger car registrations: +0.1% in 2018; -8.4% in December | European Automobile Manufacturers' Association (ACEA). Online verfügbar unter <https://www.acea.be/press-releases/article/passenger-car-registrations-0.1-in-2018-8.4-in-december>, zuletzt geprüft am 28.01.2019.
- R. Loulou, A. Lehtilä, A. Kanudia, U. Remme und G. Goldstein (2016): Documentation for the TIMES Model Part II,“ Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP).
- Remme, Uwe: Zukünftige Rolle erneuerbarer Energien in Deutschland : Sensitivitätsanalysen mit einem linearen Optimierungsmodell.
- Seibt, Torsten (2018): Diese Modelle kommen im neuen Jahr. Hg. v. Auto-Motor und Sport. Online verfügbar unter <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/alle-elektroautos-neuvorstellungen-2019-bev-phev/>.

Shell Deutschland Oil GmbH (Hg.) (2014): Shell PKW-Szenarien bis 2040. Fakten, Trends und Perspektiven für Auto-Mobilität. Hamburg.

UBS Global Research (2018): Is Tesla Revolutionary or Evolutionary? Hg. v. UBS Securities LLC.

Utopia GmbH (Hg.): Übersicht Elektroautos: Die wichtigsten Modelle 2018, 2019 & 2020. Online verfügbar unter <https://utopia.de/galerien/elektroautos-2017-2018-ueberblick-vergleich/#4>.

Volkswagen AG (Hg.): Der e-Golf. Online verfügbar unter <https://www.volkswagen.de/de/models/e-golf.html>, zuletzt geprüft am 31.01.2019.

Weemaes, Guy: GoingElectric.de Stromtankstellen Verzeichnis. Hofgeismar. Online verfügbar unter <https://www.goingelectric.de/stromtankstellen/>, zuletzt geprüft am 31.01.2019.

Weiss, Christine; Heilig, Michael; Mallig, Nicolai; Chlond, Bastian; Franke, Thomas; Schneiderei, Tina; Vortisch, Peter (2017): Assessing the effects of a growing electric vehicle fleet using a microscopic travel demand model. In: *European Journal of Transport and Infrastructure Research EJTIR* 17 (3), S. 330–345.

Zimmerman, R. D.; Murillo-Sánchez, C. E.; Thomas, R. J. (2011): MATPOWER: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education. In: *Power Systems, IEEE Transactions* (vol. 26), S. 12–19.