

Markthochlaufszzenarien für Elektrofahrzeuge

Langfassung

Studie im Auftrag der acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und der Arbeitsgruppe 7 der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE)

Autoren:

Patrick Plötz
Till Gnann
André Kühn
Martin Wietschel

Fraunhofer ISI

Karlsruhe, 17. September 2013

Disclaimer

Diese Studie wurde im Auftrag von acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und der Arbeitsgruppe 7 (AG 7) der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) erstellt. Die Annahmen und die Methodik sowie die Ergebnisse und Schlussfolgerungen wurden mit Vertretern der AG 7 sowie weiteren Vertretern der NPE umfangreich diskutiert. Für die Inhalte der Studie ist allerdings das Fraunhofer ISI alleine verantwortlich, sie geben nicht die Meinung von acatech oder der NPE wieder.

Kontakt

Prof. Dr. Martin Wietschel
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe
E-Mail: martin.wietschel@isi.fraunhofer.de
Telefon: +49 (0) 721 6809 254

Danksagung

Die Autoren danken den Mitgliedern der AG7 sowie weiteren Vertretern der NPE für die intensive und konstruktive Zusammenarbeit. Zusätzlicher Dank gilt Elisabeth Dütschke, Dirk Höhmann, Robert Rampp, Florentine Bröll, David Dallinger und David Biere für Ihre Mitarbeit und viele gute Hinweise und Diskussionen.

Inhaltsverzeichnis

1	Executive Summary	1
2	Problemstellung und Zielsetzungen	3
3	Methodik	5
3.1	Einleitung und Überblick	5
3.2	Erweitertes TCO-Modell ALADIN	9
3.2.1	Technische Analyse der Fahrprofile	9
3.2.2	Total-Cost-of-Ownership-Methodik generell	10
3.2.3	Integration der Ladeinfrastrukturkosten	13
3.2.4	Integration des Kundenverhaltens bezüglich Marke und Größe	15
3.2.5	Integration einer Mehrpreisbereitschaft	16
3.2.6	Integration von Politikmaßnahmen	19
3.3	Szenarien und Sensitivitäten	20
3.4	Formale Berechnung der TCO und des Markthochlaufs	23
3.4.1	Simulation des Batterieladestandes	23
3.4.2	Formale Berechnung der TCO	26
3.4.3	Formale Berechnung des Markthochlaufs	29
3.4.4	Formale Integration von Politikmaßnahmen	32
3.5	Diskussion	36
4	Daten, Parameter und Szenarien	38
4.1	Einleitung	38
4.2	Rahmendaten Fahrzeugmarkt	39
4.2.1	Zahl der Neuzulassungen	39
4.2.2	Aufteilung nach Segmenten	40
4.2.3	Restwertberechnung	45
4.2.4	Haltedauern	47
4.2.5	Lebensdauer und Verschrottung der Fahrzeuge	48
4.3	Fahrzeugparameter	50
4.3.1	Batteriegrößen und Entladetiefen	51
4.3.2	Batteriepreise	53
4.3.3	Nettolistenpreise	55
4.3.4	Energieverbräuche konventionell	60
4.3.5	Energieverbräuche elektrisch	64
4.3.6	Wartungskosten	65
4.3.7	Kfz-Steuer	67
4.3.8	Versicherung	69
4.4	Fahrprofildaten	70
4.4.1	Einleitung und Übersicht	70
4.4.2	Fahrprofile Privatverkehr	72
4.4.3	Fahrprofile Wirtschaftsverkehr	77
4.4.4	Diskussion	81

4.5	Ladeinfrastrukturdaten und –varianten	82
4.5.1	Einleitung und Abbildung im Modell	82
4.5.2	Ladeinfrastrukturszenarien	84
4.6	Energiewirtschaftliche Rahmendaten	86
4.6.1	Kraftstoffpreise.....	86
4.6.2	Strompreise	88
4.6.3	Erlöspotenziale durch Netzdienstleistungen	90
4.6.4	Übersicht Szenariodaten	91
4.7	Kundenverhalten und nicht-monetäre Faktoren	93
4.7.1	Mehrpreisbereitschaft	93
4.7.2	Marken- und Segmenttreue	97
4.7.3	Markenverfügbarkeit von Elektrofahrzeugen.....	100
5	Ergebnisse	107
5.1	Total Cost of Ownership.....	107
5.2	Elektrische Fahranteile und Fahrzeugverbräuche	113
5.3	Markthochlauf in den drei Szenarien	118
5.4	Ladeinfrastruktur.....	125
5.5	Potenzielle Erstnutzer	128
5.6	Ergebnisse der Sensitivitätsrechnungen	131
5.7	Auswirkungen von Politikmaßnahmen	134
6	Diskussion und Schlussfolgerungen	138
7	Anhang	144
7.1	Übersicht Eingangsdaten und Parameter.....	144
7.2	Szenarien und Kosten zur Ladeinfrastruktur	150
7.3	Weitere TCO- und Markthochlauf-Ergebnisse.....	154
7.4	Eingangsdaten zur Markenverfügbarkeit.....	160
7.5	Genauigkeit der elektrischen Fahranteile	164
7.6	Aufbereitung und Verteilung der Fahrprofilaten.....	173
7.7	Kundengruppen und Mehrpreisbereitschaften.....	181
7.8	Batteriealterung	192
8	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	196
9	Quellen.....	202
10	Glossar	211

1 Executive Summary

Welcher Anteil an Elektrofahrzeugen am Markt ist in Deutschland bis zum Jahre 2020 zu erwarten? Dieser Frage geht die vorliegende Studie nach. Dazu wird das ökonomische Potenzial von Elektrofahrzeugen unter Berücksichtigung von mehreren tausend realen Fahrprofilen konventioneller Fahrzeuge und technischen sowie ökonomischen Daten für verschiedene Szenarien erhoben. Hemmende Faktoren für die Verbreitung von Elektrofahrzeugen, beispielsweise die begrenzte Reichweite und das limitierte Fahrzeugangebot, werden ebenso integriert wie fördernde Faktoren, wie beispielsweise eine Mehrpreisbereitschaft für eine innovative Technologie.

Die wesentlichen Ergebnisse der Studie sind:

- Es gibt eine hohe Unsicherheit beim Markthochlauf, da dieser stark von externen Rahmenbedingungen wie der Batterie-, Rohöl- und Strompreisentwicklung abhängt.
- Unter günstigen Rahmenbedingungen für Elektrofahrzeuge kann das gemeinsame Ziel der Bundesregierung und der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) von einer Million Elektrofahrzeugen bis 2020 ohne Kaufförderung erreicht werden.
- Selbst unter ungünstigen Rahmenbedingungen kann eine nennenswerte Anzahl von Elektrofahrzeugen bis 2020 in den Markt kommen (etwa 150.000 bis 200.000 Fahrzeuge im Bestand).
- Hohe elektrische Fahranteile (über 80 %) bei gleichzeitig hohen Jahresfahrleistungen (über 15.000 km) sind entscheidende Voraussetzungen für die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen. Ein nennenswerter Anteil an Fahrprofilen erfüllt diese Prämissen.
- Die Range-Extender- und Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge werden in den nächsten Jahren voraussichtlich größere Marktanteile (ca. drei Viertel) erzielen können als reine Batteriefahrzeuge.
- In den nächsten Jahren werden bei niedrigen jährlichen Fahrleistungen unter Wirtschaftlichkeitsaspekten weiterhin Benziner dominieren, bei sehr hohen die Dieselfahrzeuge.
- Der private Bereich ist ein relevanter Markt für Elektrofahrzeuge. Besonders Vollzeitbeschäftigte aus ländlichen Gebieten und kleinen bis mittelgroßen Städten bzw. Vororten von größeren Städten weisen hohe Potenziale für die Umstellung auf Elektrofahrzeuge auf. Sie machen circa ein Drittel der privaten Pkw-Besitzer aus.
- Für Nutzer mit Garagen (ca. 60 % der privaten Pkw-Halter) oder mit festen Stellplätzen am Haus bietet sich die Umstellung ökonomisch deutlich mehr an als für die sogenannten Laternenparker, weil die Kosten der Ladeinfrastruktur einen klaren Ein-

fluss auf die Wirtschaftlichkeit haben. Weiterhin ist die Gesamtanzahl an Laternenparkern im Vergleich zu denen mit Garagen oder eigenen Stellplätzen am Haus vergleichsweise gering (je nach Definition zwischen 3 bis 20 %).

- Ein interessantes ökonomisches Potenzial weisen rein gewerbliche Flotten auf, die rund 30 % des Neuwagenmarktes ausmachen. Die Gründe liegen in den entsprechenden Fahrprofilen mit oftmals planbaren Routen, den spezifischen ökonomischen Rahmenbedingungen wie dem Wegfall der Mehrwertsteuer, was sich gerade bei den höheren Kaufpreisen von Elektrofahrzeugen positiv auswirkt, und der hohen Relevanz der Wirtschaftlichkeit im Entscheidungsprozess bei der Fahrzeuganschaffung.
- Verschiedene Politikmaßnahmen wie die Einführung von Sonderabschreibungsmöglichkeiten, eine Pauschalsubvention oder das Angebot zinsgünstiger Kredite könnten den Markthochlauf beschleunigen. Mit vergleichsweiser überschaubarer finanzieller Förderung kann man bei gewerblichen Flotten ein deutliches Marktwachstum erzielen. Sonderabschreibungen bieten sich hier an. Allerdings erfordert eine umfassende Bewertung von Politikmaßnahmen auch die Analyse volkswirtschaftlicher Effekte. Diese werden in der vorliegenden Studie nicht betrachtet.
- Zur Gruppe der Dienstwagennutzer, die einen relevanten Marktanteil von ca. 30 % bei den Neuwagen ausmachen und die insbesondere für das Pkw-Premium-Segment wichtig sind, liegen bislang wenig öffentlich verfügbare empirische Daten und Untersuchungen vor. Der Entscheidungsprozess ist komplex und noch wenig untersucht, da hier Firmen- wie auch Pkw-Nutzerinteressen in Einklang zu bringen sind. Das Umstellungspotenzial ist aus rein ökonomischer Sicht vermutlich beschränkt, da die Nutzer teilweise ungünstige Fahrprofile mit oftmals langen Einzelwegstrecken aufweisen. Im Dienstwagen-Bereich besteht noch weiterer Forschungsbedarf.
- Relevante Unsicherheiten in den Szenarienanalysen bestehen bei den Annahmen zur Mehrpreisbereitschaft beim Kauf von Elektrofahrzeugen sowie der Bereitschaft, trotz derzeit noch eingeschränkter Modellauswahl auf Fahrzeuge mit Elektroantrieb umzusteigen. Beides hat jedoch einen großen Einfluss auf den Markthochlauf. Die eingeschränkte Modellauswahl wird in den nächsten Monaten teilweise aufgehoben, da deutsche Pkw-Hersteller eine Vielzahl an Modellen (16 Stück bis Ende 2014) angekündigt haben.

2 Problemstellung und Zielsetzungen

Elektrofahrzeuge (engl. electric vehicles (EV)) werden im Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität als wesentliche Elemente für einen zukunftsfähigen Verkehr identifiziert. Durch einen zunehmenden Umstieg auf elektrische Fahrzeuge besteht die Möglichkeit, die Abhängigkeit Deutschlands von Ölimporten zu reduzieren, Emissionen sowohl global (CO₂) als auch lokal (Schadstoffe, Lärm) zu minimieren, dabei zur Schonung der Ressourcen beizutragen und zudem ein multi- und intermodales Verkehrssystem weiterzuentwickeln.¹ Deutschland hat dabei das Ziel, im internationalen Wettbewerb zum Leitanbieter und Leitmarkt für Elektrofahrzeuge zu werden, um so seine Führungsrolle in der Automobil- und Zulieferindustrie sowie in der Wissenschaft zu erhalten. Als Etappenziel strebt die Bundesregierung und die Nationale Plattform Elektromobilität² an, dass bis 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen fahren.³

Ziel des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität ist es, die Marktvorbereitung und die Markteinführung von Elektrofahrzeugen in Form von reinen Batteriefahrzeugen und Plug-in-Hybride sowie Range-Extender-Fahrzeugen in Deutschland voranzubringen. Dabei gilt es, neben der Förderung von Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet, geeignete Anreize für die Verbreitung von Elektrofahrzeugen zu schaffen. Diese können finanzieller, aber auch verkehrs- und ordnungsrechtlicher Art sein.

Die Bundesregierung kann jedoch nur dann zielgerichtete und effektive Maßnahmen ergreifen, wenn eine empirisch begründete Entscheidungsgrundlage für einen möglichen Markthochlauf von Elektrofahrzeugen besteht. Hierfür ist es wichtig, potenzielle frühe Kundengruppen von Elektromobilität zielgenau zu identifizieren und ihr Verhalten zu verstehen, um so empirisch belastbare Markthochlaufmodelle zu entwickeln.⁴ Fundierte Ergebnisse sind in diesem Zusammenhang bisher noch rar.⁵

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es daher, aufbauend auf den bisherigen Arbeiten der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) ein transparentes Modell zur Berechnung der Gesamtnutzungskosten von Elektrofahrzeugen zu erarbeiten. Darüber hinaus sollen verschiedene hemmende Faktoren (beispielsweise Ladeinfrastrukturverfügbarkeit und mangelndes Fahrzeugangebot) und fördernde Faktoren (beispielsweise

1 Vgl. Bundesregierung (2009), BMVBS (2013), TAB (2013).

2 Vgl. NPE (2010).

3 Vgl. Bundesregierung (2009).

4 Siehe auch Wietschel et al. (2012).

5 TAB (2013) gibt hierzu einen guten Überblick.

höhere Mehrpreisbereitschaft durch Innovativität und Umweltfreundlichkeit) berücksichtigt und verschiedene Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge bis 2020 entwickelt werden. Weiterhin bilden Szenarien mehrere Möglichkeiten ab, wie sich wichtige Einflussgrößen, darunter die Batterie-, Rohöl- und Strompreise, entwickeln könnten und wie sich das jeweils auf die EV-Verbreitung auswirken kann. Zudem soll die Wirkung verschiedener Politikmaßnahmen auf den Markthochlauf analysiert werden. Eine zentrale Forderung an das Modell besteht zudem in einem hohen Maß an Transparenz in allen Eingangsdaten und Ergebnissen.

Explizit nicht Ziel des Vorhabens ist eine Modellierung volkswirtschaftlicher Aspekte wie beispielsweise Bruttowertschöpfung oder Auswirkungen auf den deutschen Arbeitsmarkt. Betrachtungsbereich ist die Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2020. Die Entwicklungen oder Auswirkungen anderer Länder werden nicht betrachtet. Für alle weiteren Betrachtungen werden unter Elektromobilität Pkw und leichte Nutzfahrzeuge verstanden, sofern diese ganz oder teilweise elektrisch angetrieben und über das Stromnetz direkt geladen werden können. Dazu gehören reine Batteriefahrzeuge (BEV), Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge (PHEV) und Range-Extender-Fahrzeuge (REEV).⁶ Nicht betrachtet werden Brennstoffzellen-Fahrzeuge, da bisher wenige Serien-Fahrzeuge für den deutschen Markt angekündigt sind und die Stückzahlen bis 2020 im Vergleich zu den genannten Elektrofahrzeugen zu vernachlässigen sind.⁷

Dieser Bericht ist wie folgt gegliedert. Kapitel 3 gibt eine Einführung zur Methodik und einen Überblick der wichtigsten Annahmen wie Szenarien, Nutzergruppen und Mehrpreisbereitschaft. Alle technisch-ökonomischen Parameter und weitere Eingangsdaten werden in Kapitel 4 ausführlich vorgestellt und diskutiert. In Kapitel 5 werden die Ergebnisse dargelegt und anschließend in Kapitel 6 zu den Schlussfolgerungen abgeleitet. Der Anhang in Kapitel 7 umfasst weitere Details zur Auswertung.

Eine Kurzfassung des vorliegenden Berichts wurde zudem unter dem Titel *Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge – Kurzfassung*⁸ veröffentlicht.

⁶ Das Glossar am Ende des Berichtes enthält eine Erläuterung dieser und anderer Begriffe. Siehe auch TAB (2013).

⁷ Siehe auch TAB (2013), besonders Kapitel II.2.

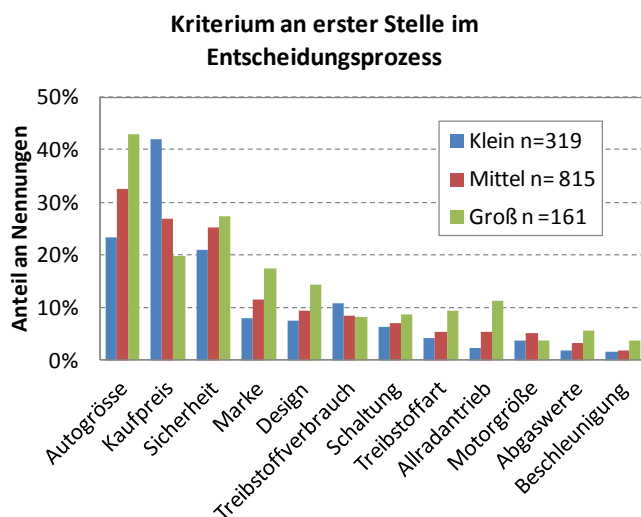
⁸ Wietschel et al. (2013).

3 Methodik

3.1 Einleitung und Überblick

In der Kaufentscheidung für Pkw spielen eine Reihe Faktoren eine Rolle. Dabei ist einzuschränken, dass es weniger *die eine* Kaufentscheidung gibt, als dass der Entscheidungsprozess eher mehrstufig ist.⁹ Abbildung 3-1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Faktoren, die bei den Kaufentscheidungen von privaten Käufern eine Rolle spielen (links), und zeigt weiterhin, welche davon im Modell berücksichtigt werden (rechts).

Wichtige Faktoren im Entscheidungsprozess PKW-Kauf:



Im Modell berücksichtigt:

- ✓ Autogröße
- ✓ Kaufpreis
- ✓ Marke
- ✓ Treibstoffverbrauch
- ✓ Treibstoffart (teilweise)
- ✓ Abgaswerte (teilweise)

Als **gleichwertig** angenommen:

- Sicherheit
- Design
- Beschleunigung

Nicht berücksichtigt:

- Schaltung
- Motorgröße (=Leistung)
- Allradantrieb

Abbildung 3-1: Wichtige Faktoren im Kaufentscheidungsprozess¹⁰ bei Privatkäufern und deren Berücksichtigung im Modell

Einige dieser Faktoren können im vorliegenden Markthochlaufmodell berücksichtigt werden, wie Kaufpreis und Treibstoffverbrauch (lassen sich direkt über die Gesamtnutzungskosten zusammenfassen) oder Marke und Fahrzeuggröße. Andere Faktoren hingegen können nicht direkt modelliert werden, wie beispielsweise Design, Sicherheit oder Motorgröße. Hier ist davon auszugehen, dass die angebotenen Fahrzeuge den Kundenwünschen nach Sicherheit oder Leistung in gleichem Maße entgegenkommen

⁹ Vgl. Mueller und De Haan (2006) und die dort zitierte Literatur.

¹⁰ Eigene Auswertung auf Basis von Peters und de Haan (2006). Die Legende bezieht sich auf die Fahrzeuggröße und Anzahl der Befragten. Die Daten in Peters und de Haan (2006) wurden entsprechend der in diesem Bericht verwendeten Fahrzeuggrößen aggregiert.

unabhängig von der Antriebsart. Zudem zeigen Studien, dass ein Teil der Kunden im allgemeinen, aber auch bei Elektrofahrzeugen, bereit ist, einen Aufpreis gegenüber konventionellen Vergleichsfahrzeugen in Kauf zu nehmen.¹¹

In diesem Kapitel wird das Vorgehen zur Berechnung des Markthochlaufs für Elektrofahrzeuge beschrieben. Kernelement der Methodik ist das Simulationsmodell ALADIN (**A**lternative **A**ntriebe **D**iffusion und **I**nfrastruktur)¹². Die Berechnung des Markthochlaufs erfolgt dabei sukzessive, ausgehend von einem Wirtschaftlichkeitsvergleich verschiedener Antriebe über die Berücksichtigung hemmender bis hin zur Betrachtung fördernder Faktoren für insgesamt 6.500 Fahrprofile. Ein Fahrprofil umfasst alle Wege eines Fahrzeugs in mindestens einer repräsentativen Woche. Die sukzessive Vorgehensweise erlaubt ein getrenntes Nachvollziehen der Effekte der einzelnen Einflussgrößen auf einen Markthochlauf und dient damit der Herstellung einer Transparenz.

Als eine wesentliche und entscheidende Neuerung gegenüber bisher bekannten TCO-Analysen (TCO = Total Cost of Ownership) wird die Berechnung nicht auf durchschnittlichen Jahresfahrleistungen basierend durchgeführt, sondern erfolgt stattdessen auf Basis realer Fahrprofile. Ein Fahrprofil umfasst alle Wege samt Streckenlänge, Abfahrts- und Ankunftszeitpunkt, Dauer sowie Informationen zum Fahrzeug über einen Beobachtungszeitraum von mindestens einer Woche. Sie variieren je Nutzer auch innerhalb der Gruppen sehr stark und haben dabei einen sehr hohen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen. Zusätzlich wird die Barriere der begrenzten Reichweite von BEV explizit in den Analysen berücksichtigt. Jedes einzelne Fahrprofil wird dahingehend analysiert, ob der Nutzer alle seine Fahrten mit einem BEV abdecken kann. Weiterhin wird der elektrische Fahranteil bei Plug-in-Hybriden beziehungsweise Range-Extendern individuell für jedes Fahrprofil simuliert. Dies ist für realitätsnahe Ergebnisse und die Wirtschaftlichkeit wichtig, die gerade bei PHEV und REEV stark vom elektrischen Fahranteil abhängt. Auf dieser Basis werden die TCO-Rechnungen durchgeführt.

Reine Wirtschaftlichkeitsüberlegungen oder rein ökologisch motivierte Überlegungen können die Kaufentscheidungen im Fahrzeugbereich allerdings nicht vollständig erklären. So stellt sich zum Beispiel mit Blick auf die geringe Verbreitung von Gasfahrzeugen die Frage nach den Gründen, denn Berechnungen auf der Basis von Fahrdaten

¹¹ Siehe Rogers (1962) für verschiedene Nutzergruppen im Marktdiffusionsprozess und Mehrpreisbereitschaften sowie Wietschel et al. (2012) für Elektrofahrzeuge in Deutschland.

¹² In seiner Gesamtheit wurde das Modell ALADIN bislang nicht publiziert, die einzelnen Datenbanken und Berechnungen für bestimmte Haltergruppen jedoch mehrfach: u.a. in Wietschel et al. (2012), Gnann et al. (2012), Plötz et al. (2012), BMVBS (2012), Kley (2011).

aus dem „Mobilitätspanel Deutschland“ ergeben, dass ein Großteil der benzinbetriebenen Pkw durch monovalente Erdgas-Pkw kostensparend ersetzbar ist.¹³ Weiterhin zeigen in den USA geführte Interviews mit Käufern von Autos mit Hybrid- und anderen Antrieben, dass ihnen allgemein das Basiswissen für solch ein Entscheidungsverhalten (z. B. die Kenntnis des Treibstoffverbrauchs sowie ihrer Treibstoffkosten) fehlt.¹⁴ Die in der Studie über Early Adopter von Elektrofahrzeugen in Deutschland¹⁵ durchgeführten empirischen Erhebungen zu Elektrofahrzeugnutzern belegen ebenfalls, dass neben der Wirtschaftlichkeit auch andere Kriterien die Antriebswahl mitbestimmen. Deshalb wird in diesem Kapitel gezeigt, wie andere Kriterien (vgl. Abbildung 3-1) in die Kaufentscheidung integriert werden.

Basierend auf der Modellierung der Kaufentscheidung vieler Einzelnutzer bzw. Fahrprofile ergeben sich Neuzulassungen und damit wird der Markthochlauf für Elektrofahrzeuge in Deutschland bis 2020 berechnet. Aus den vorangegangenen Analysen werden die Fahrprofile, für die sich ein Elektrofahrzeug rechnet, für jedes Jahr ermittelt. Über die Hochrechnung dieser Nutzer auf ihren Anteil an den Neuzulassungen wird dann der Markthochlauf berechnet. Abbildung 3-2 gibt einen Überblick über die Vorgehensweise im Modell ALADIN.

An dieser Stelle wird noch auf den Unterschied zwischen privaten und gewerblichen Haltern hingewiesen. Bei den gewerblichen spielen der Anschaffungspreis und die TCO eine größere Rolle, denn sie stellen das wichtigste Kriterium überhaupt bei der Kaufentscheidung dar.¹⁶

Neben der hier vorgestellten Vorgehensweise zur Modellierung des Markthochlaufs von Elektrofahrzeugen in Deutschland sind andere Ansätze denkbar.¹⁷ Für die Gesamtziele des Forschungsvorhabens (transparente Berechnung der Gesamtnutzungskosten von Elektrofahrzeugen, Integration von hemmenden und fördernden Faktoren für einen Markthochlauf und Berechnung von Markthochlaufszszenarien) ist ein TCO-basiertes Vorgehen mit Berücksichtigung verschiedener psychologischer Faktoren un-

¹³ Siehe Plötz, Kley und Wietschel (2012).

¹⁴ Siehe Turrentine und Kurani (2007).

¹⁵ Siehe Wietschel et al. (2012).

¹⁶ Siehe Öko-Institut (2011a) und Dataforce (2011).

¹⁷ Siehe beispielweise Fraunhofer ISI (2012); Öko-Institut (2011a), ESMT (2011), Kley (2011), McKinsey (2011), NPE (2011a), (2011b), Plötz et al. (2012), Wietschel et al. (2009) u. (2011), Schmid (2012), Mock (2010) sowie TAB (2013, Kapitel II.2) für einen Überblick.

umgänglich.¹⁸ Besonderheit des hier vorgelegten Modells ist zum einen die Verwendung einer großen Anzahl realer Fahrprofile, um die sehr heterogene Nutzung von Pkw adäquat abbilden zu können. Zum anderen werden die hemmenden und fördernden Faktoren einzeln und getrennt basierend auf empirischen Studien eingeführt. Damit werden diese Faktoren näherungsweise empirisch messbar und zukünftige Studien können das Vorgehen mit zukünftigen Daten aktualisieren.



Abbildung 3-2: Überblick über die Vorgehensweise im Modell ALADIN

Der nachfolgende Abschnitt 3.2 ist analog zu Abbildung 3-2 aufgebaut. Zunächst wird die technische Analyse (3.2.1) und TCO-Berechnung (3.2.2) der einzelnen Fahrprofile erläutert. Anschließend folgt die Erweiterung der Entscheidung auf Basis des Kundenverhaltens, namentlich die Integration der Ladeinfrastruktur (3.2.3) sowie der Marken- und Segmenttreue (3.2.4), um abschließend die Mehrpreisbereitschaft zu erläutern (3.2.5). In Abschnitt 3.3 werden die Sensitivitätsrechnungen dargestellt, während die formale Beschreibung der TCO-Berechnung in Abschnitt 3.4 beschrieben wird. Eine Diskussion der Methodik (3.5) schließt Kapitel 3 ab.

¹⁸ Entsprechend wurde in NPE (2011a) ein ähnlicher Ansatz verfolgt. Top-down-Verfahren wie logistische oder andere Diffusionskurven, vgl. Geroski (2000), sind dagegen hierbei nicht zielführend.

3.2 Erweitertes TCO-Modell ALADIN

3.2.1 Technische Analyse der Fahrprofile

Den ersten Schritt im Modell ALADIN stellt die technische Analyse der Fahrprofile dar. Die Barriere der begrenzten Reichweite von BEV wird hierin explizit berücksichtigt, da jedes einzelne Fahrprofil dahingehend analysiert wird, ob der Nutzer alle seine Fahrten mit einem BEV abdecken kann. Nur wenn dies möglich ist,¹⁹ folgt die TCO-Berechnung für die BEV. Weiterhin wird der elektrische Fahranteil bei Plug-in-Hybriden beziehungsweise Range-Extendern individuell berechnet. Beide Analysen erfolgen über eine Simulation des Ladestandes der Batterie.²⁰ In der Abbildung 3-3 ist die Vorgehensweise an einem Beispiel schematisch dargestellt.

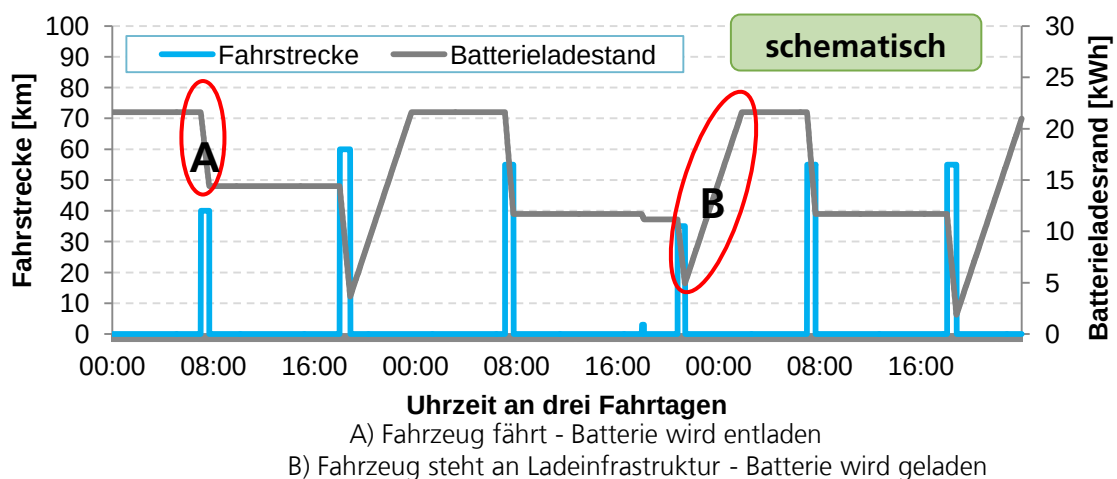


Abbildung 3-3: Technisches Potenzial mit Hilfe von Batteriesimulation dargestellt an einem beispielhaften Fahrprofil

Derartige Berechnungen können durchgeführt werden, weil die Fahrprofile mit näheren Angaben zu den Fahrten, z. B. Fahrtzwecken wie zum Wohnort oder zur Arbeit, sowie zu den Fahrzeugen, wie z. B. der Größe oder der Verfügbarkeit von Garagen und Stellplätzen verknüpft sind. Den Pkw-Nutzern wird szenarienabhängig eine unterschiedliche Menge an Ladeinfrastruktur zur Verfügung gestellt²¹ (bspw. nur Laden zu Hause für private Nutzer und nur Laden am Arbeitsplatz für gewerbliche Nutzer).

¹⁹ Nicht berücksichtigt werden mögliche Angebote, vereinzelt Ersatzfahrzeuge an Stelle eines BEV zu nutzen ebenso wie das Vorhandensein eines Zweitwagens.

²⁰ Eine entsprechende Simulation wurde von Kley (2011) eingesetzt und von den Autoren weiterentwickelt, vgl. z. B. Gnann, Plötz und Kley (2012).

²¹ Vgl. hierzu Abschnitt 4.5.2.

3.2.2 Total-Cost-of-Ownership-Methodik generell

Die Kosten für Erwerb und Nutzung eines Fahrzeugs spielen für potenzielle Käufer bei der Entscheidung über den Kauf eine wichtige Rolle.²² Viele Indikatoren im Hinblick auf die Wahl zwischen verschiedenen Kraftstoff- und Antriebssystemen weisen darauf hin, dass Wirtschaftlichkeitserwägungen die Entscheidung stark beeinflussen. So fahren in Deutschland Diesel-Pkw im Durchschnitt 22.300 Kilometer im Jahr, während Benzinern im Schnitt nur 11.800 Kilometer fahren²³ – das heißt, ihre Fahrprofile entsprechen im Mittel auch ihrer Wirtschaftlichkeit unter den in Deutschland vorhandenen Bedingungen.²⁴

Diese Tatsache legt es nahe, die Gesamtnutzungskosten als Grundlage für die Berechnung von Marktanteilen verschiedener Antriebsarten zu verwenden. Abbildung 3-4 zeigt, dass sich die Marktanteile von Diesel-Fahrzeugen gewerblicher Halter innerhalb verschiedener Wirtschaftszweige mit einer solchen Rechnung gut reproduzieren lassen.

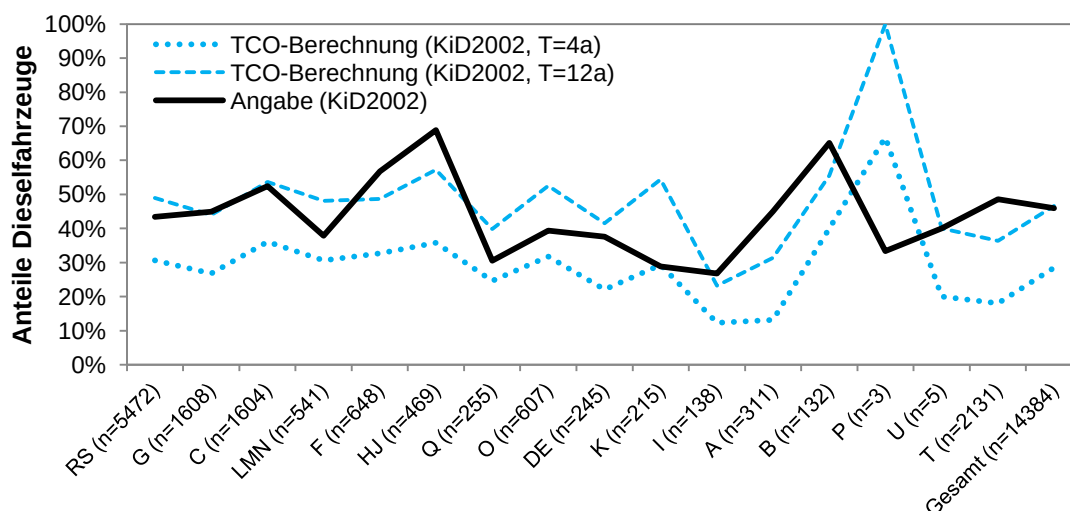


Abbildung 3-4: Anteil der Dieselfahrzeuge im Bestand gewerblicher Halter²⁵

Für Abbildung 3-4 wurden für eine große Stichprobe von Pkw (basierend auf KiD2002) die Gesamtnutzungskosten für Diesel- und Benzin-Fahrzeuge individuell berechnet

²² Siehe z. B. Peters et al. (2006) für private und Dataforce (2011) für gewerbliche Halter.

²³ Siehe MiD (2008, S. 164).

²⁴ Ähnliches sollte dementsprechend für Elektrofahrzeuge gelten (vgl. Tabelle 5-3)

²⁵ Eigene Berechnung nach KiD2002, siehe Gnann, Plötz, Zischler und Wietschel (2012).

und für jedes Fahrzeug die günstigere Antriebsart gewählt. Daraus ergeben sich Anteile von Dieselfahrzeugen in den einzelnen Wirtschaftszweigen. Diese sind in der Abbildung aufgrund der Datenverfügbarkeit teilweise aggregiert und absteigend nach Anzahl der Fahrzeuge im Bestand sortiert. Das heißt, in den ersten drei Wirtschaftszweigen sind 70 % des gewerblichen Pkw-Bestandes zu finden und in den ersten zehn Wirtschaftszweigen über 90 %.²⁶ Zusätzlich ist in der Achsenbeschriftung die Stichprobengröße angegeben. Man erkennt, dass die Stichprobe in den letzten Wirtschaftszweigen sehr klein war, da diese aber auch kaum zum gewerblichen Pkw-Bestand beitragen, sind diese vernachlässigbar. Die blauen Linien zeigen den erwarteten Anteil von Dieselfahrzeugen aufgrund einer Gesamtnutzungskosten-Rechnung, und die schwarze Linie zeigt den tatsächlichen Anteil. Die beiden blauen Linien unterscheiden sich dabei durch die angenommene Amortisationszeit für Dieselfahrzeuge (4 oder 12 Jahre). Dies ist äquivalent zur Berechnung mit hohen Restwerten der Fahrzeuge bei Verkauf nach kurzer Haltedauer ($T = 12$ Jahre) oder sehr geringen Restwerten ($T = 4$ Jahre Amortisationszeit).²⁷ Man erkennt, dass gerade bei der Annahme hoher Restwerte die Anteile von Dieselfahrzeugen (vor allem in den großen Wirtschaftszweigen R, S, G und C) gut mit einer Rechnung auf Basis der Gesamtnutzungskosten reproduziert werden können.

Im Vergleich zu konventionellen Pkw sind auch Elektrofahrzeuge in der Regel in der Anschaffung teurer, weisen aber oft geringere laufende Kosten auf, unter anderem wegen geringerer Kraftstoff- und Wartungskosten. Eine Betrachtung der Gesamtkosten ist also notwendig, um zu bestimmen, bei welchen Nutzungs- beziehungsweise Fahrprofilen Elektrofahrzeuge in Bezug auf die Gesamtnutzungskosten wirtschaftlicher als konventionelle sein können und welche Marktanteile für Elektrofahrzeuge in Zukunft zu erwarten sind. Gesamtkostenrechnungen für Fahrzeuge sind dementsprechend ein gängiger Bestandteil von Modellen für die Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen.²⁸ Verschiedene Studien weisen darauf hin, dass die derzeitigen Gesamtnutzungskosten neben der beschränkten Reichweite eine wesentliche Hürde für potenzielle Käufer von Elektrofahrzeugen sind.²⁹

²⁶ Siehe TAB (2013).

²⁷ Siehe Gnann, Plötz, Zischler und Wietschel (2012).

²⁸ Siehe bspw. ESMT (2011), McKinsey (2011), NPE (2011a) und (2011b), Plötz et al. (2012), TAB (2013), Schmid (2012), Mock (2010).

²⁹ Siehe hierzu Fraunhofer ISI (2012); BMVBS (2011); Götz et al. (2011); Wietschel et al. (2012), Knie et al. (1999).

Daher werden im Markthochlaufmodell die Kosten der Gesamtnutzung, die „TCO“ für Elektrofahrzeuge und konventionelle Fahrzeuge in Deutschland ermittelt. Die TCO setzen sich zusammen aus Anschaffungsausgaben und laufenden Kosten für das jeweilige Fahrzeug und wird aus Nutzersicht berechnet. In diesem und den nächsten Abschnitten wird ein kurzer Überblick über die Methodik gegeben. Die formale TCO-Berechnung einschließlich der Ladeinfrastrukturkosten und Mehrpreisbereitschaft wird in Abschnitt 3.4 vorgestellt. Weitere Details wie beispielsweise Nettolistenpreise oder Wartungskosten finden sich in Kapitel 4.

Tabelle 3-1 liefert einen Überblick über die einbezogenen ökonomischen Größen. Unter anderem aufgrund unterschiedlicher Besteuerung und Abschreibungsmöglichkeiten sowie abweichenden Nutzungsmustern werden die drei Nutzergruppen Privatanutzer, Gewerbliche Nutzer (reine Flottenfahrzeuge) und Dienstwagennutzer differenziert. Da die TCO auch maßgeblich durch die Fahrzeuggröße beeinflusst werden, werden verschiedene Fahrzeugsegmente unterschieden.

Tabelle 3-1: Im Modell ALADIN betrachtete ökonomische Größen

Parameter	Privat	Gewerblich	Dienstwagen
Anschaffungspreis	✓	✓	✓
Diskontierung zukünftiger Kosten	✓	✓	✓
Restwert am Ende der Haltedauer	✓	✓	✓
Kraftstoffpreise (Benzin, Diesel, Strom)	✓	✓	✓
Reparatur- und Wartungskosten	✓	✓	✓
Mehrwertsteuer	✓	✗	✗
Kfz-Steuer	✓	✓	✓
Versteuerung geldwerter Vorteil ³⁰	✗	✗	✓
Mehrpreisbereitschaft	je nach Variante		✗
Ladeinfrastrukturkosten	je nach Variante		

Tabelle 3-2 zeigt, auf welche Haltergruppen und Fahrzeugsegmente die Neuzulassungen verteilt sind. Es werden demnach zehn Nutzergruppen unterschieden. Diese Ein-

³⁰ In den Szenarien wurde noch mit der alten Regel der geldwerten Versteuerung der Dienstwagen gerechnet. Allerdings wurden gegen Projektabschluss die EV hier steuerlich besser gestellt, was aber nicht mehr umfänglich in den Rechnungen berücksichtigt werden konnte. Aber in den Berechnungen zu den Politikmaßnahmen ist die aktuelle Gesetzeslage entsprechend berücksichtigt.

teilung gibt natürlich nur eingeschränkt die Fahrzeug- und Haltervielfalt wieder, aber eine tiefere Differenzierung scheitert am Aufwand und der Datenverfügbarkeit.³¹

Tabelle 3-2: Betrachtete Kombinationen von Nutzergruppe und Fahrzeugsegment

Segment	Privat	Gewerblich	Dienstwagen
Klein	✓	✓	✓
Mittel	✓	✓	✓
Groß	✓	✓	✓
Leichte NFZ	✗	✓	✗

Bei den betrachteten Antriebstechnologien stehen reine Batteriefahrzeuge (BEV), Range Extender Fahrzeuge (REEV) und Plug-in-Hybride (PHEV)³² als Elektrofahrzeuge (EV) dem konventionellen Benzin- und Dieselantrieb gegenüber. Bei den TCO-Rechnungen wird die jeweils günstigste Antriebstechnologie gewählt.

Als eine wesentliche und entscheidende Neuerung gegenüber bisher bekannten TCO-Analysen wird die Berechnung nicht basierend auf durchschnittlichen Jahresfahrleistungen durchgeführt, sondern erfolgt stattdessen auf Basis realer Fahrprofile³³, die in großer Zahl für die drei betrachteten Gruppen Flottenfahrzeuge, Dienstwagnutzer und private Nutzer vorliegen. Diese variieren je Nutzer auch innerhalb der Gruppen sehr stark und haben dabei einen sehr hohen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen.

3.2.3 Integration der Ladeinfrastrukturkosten

Anschließend werden die TCO-Berechnungen um die Kosten der Ladeinfrastruktur erweitert. Dies geschieht, um die Bewertung der Wirtschaftlichkeit bei den TCO-Berechnungen auf eine breitere Basis zu stellen. Je nach Ladeort und -art sind die Ladeinfrastrukturkosten sehr unterschiedlich. So ist die Nutzung privater Ladeinfrastruktur für Nutzer mit Garagen i.d.R. günstiger als öffentliche Ladeinfrastruktur, auf die die sogenannten Laternenparker zurückgreifen müssen.³⁴ Damit kann die Ladeinfrastruktur

³¹ Gerade in der Segmentgruppe Mittelklasse sind rund 56 % der Fahrzeuge (siehe Abschnitt 4.2.2) vertreten und in künftigen Arbeiten bietet sich hier eine weitere Differenzierung an.

³² Diese Konzepte werden im Glossar (S. 205) erläutert.

³³ Siehe Abschnitt 4.4 für eine Beschreibung der verwendeten Fahrprofile.

³⁴ Siehe Gnann, Plötz und Haag (2013).

tur einen deutlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen für die verschiedenen Nutzergruppen haben.

Für die technischen Parameter der Ladeinfrastruktur wurden verschiedene Szenarien in Abstimmung mit der AG3 und AG7 der NPE entwickelt. Diese Szenarien sind in Abschnitt 4.5 vorgestellt und diskutiert. Hinsichtlich der Kosten wird nur eine Option betrachtet, die im Folgenden als Basisvariante bezeichnet wird.³⁵

- Private Nutzer, die über eine Garage verfügen oder nachts auf dem eigenen Grundstück parken,³⁶ nutzen und bezahlen eine einfache Wallbox als Primärladepunkt.
- Private Nutzer auf die das nicht zutrifft, nutzen zu zweit einen einfachen öffentlichen Ladepunkt als Primärladepunkt und bezahlen ihn jeweils zur Hälfte.³⁷
- Flottenfahrzeuge nutzen und zahlen eine Wallbox als Primärladepunkt.
- Über die Primärladepunkte hinaus steht im Basisszenario keine Ladeinfrastruktur zur Verfügung.

Da es sich bei der Methodik um eine Simulation handelt, die keine räumlich aufgelöste Modellierung darstellt, sondern nur Weg-Zwecke (wie bspw. „nach Hause“, „zur Arbeit“, „zum Einkaufen“) zur Verfügung stehen, sind weitere Aussagen zur Infrastruktur nur beschränkt möglich.

Den Pkw-Nutzern kann abweichend von der oben beschriebenen Basisvariante szenarioabhängig eine unterschiedliche Menge an Ladeinfrastruktur zur Verfügung gestellt werden, um die Batteriesimulation und Berechnung der technischen Ersetzbarkeit in Abschnitt 3.2.1 zu erweitern (beispielsweise Laden zu Hause und am Arbeitsplatz für private Nutzer und nur Laden am Arbeitsplatz für gewerbliche Nutzer). Kostenseitig wird ihnen jedoch nur der Primärladepunkt (z. B. bei Garagenbesitzern die private Wallbox) zugerechnet.³⁸ Eine genauere Verteilung der Kosten öffentlicher Ladeinfrastruktur erfordert Verkehrsflussmodelle oder Geoinformationen, die in den hier verwendeten Fahrprofilen nicht enthalten sind. Weitere Details zur Integration von Ladeinfrastruktur in das Modell finden sich in Abschnitt 4.5.

³⁵ Diese Basisvariante ist im Abschnitt 4.5 als IP1IG1 inklusive der Kosten beschrieben.

³⁶ Eine entsprechende Information ist in den Fahrprofilen enthalten.

³⁷ Siehe hierzu eine detaillierte Begründung in Abschnitt 4.5.

³⁸ Hier und im Weiteren fällt die Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur unter die technischen Ladeinfrastrukturparameter.

3.2.4 Integration des Kundenverhaltens bezüglich Marke und Größe

Marke und Größe eines Fahrzeugs (und in dem Sinne auch die Marken- und Segmenttreue) sind wichtige Faktoren in der Kaufentscheidung (siehe Abbildung 3-1). So sind beispielsweise viele Pkw-Käufer einer bestimmten Marke sehr treu oder schließen umgekehrt andere Marken komplett vom Kauf aus.³⁹ Hinzu kommt, dass Kunden sich beim Kauf eines Pkw teilweise für ein größeres oder kleineres Fahrzeug als ihr Vorgängermodell entscheiden. Ebenso sind Kunden teilweise skeptisch beim Wechsel der Antriebsart.

Eine wirklich umfassende Berücksichtigung der Marke, Fahrzeuggröße und Antriebsart sowie der Wechselbereitschaft erfordert eine sehr gute und breite Datenbasis, insbesondere da es Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen den Faktoren gibt. Beispielsweise könnten Dieseld Käufer eine höhere Markentreue zeigen als Benzinfahrer. Diese Datenbasis ist auch für Kaufentscheidungen bei konventionellen Modellen nur im geringen Maße bekannt.⁴⁰ Erschwerend kommt hinzu, dass sich die verschiedenen neuen Antriebsarten der Elektrofahrzeuge in ihren Merkmalen (Beschleunigung, Reichweite, Lärmemissionen) deutlich unterscheiden. Erste Ergebnisse zeigen, dass Kunden, die Hybridfahrzeuge kaufen, eher die Marke wechseln als Käufer von Autos mit klassischen Antriebsarten.⁴¹ Allerdings ist die Datenlage auch hier eingeschränkt, künftige Entwicklungen lassen sich deshalb schwer prognostizieren.

Die erste Modellannahme betrifft den Wechsel eines Käufers zwischen den Segmenten beim Kauf eines Neuwagens. Eine Auswertung umfangreicher Daten⁴² zeigt, dass Kunden ihrem ursprünglichen Segment überwiegend treu bleiben und häufig nur zwischen benachbarten Segmenten wechseln, beispielsweise zwischen Mini und Kleinwagen. Im Markthochlauf-Modell sind die verschiedenen Segmente teilweise aggregiert. Die Bedeutung der Größe eines Fahrzeugs (im Sinne von Kleinwagen, Mittelklasse- oder Großklassenwagen) und damit eine Segmenttreue wird insofern abgebildet, als dass ein bisheriger Nutzer eines großen Fahrzeugs beim Kauf weiterhin ein großes Fahrzeug wählt und analog dazu für die beiden anderen Größenklassen ein kleines beziehungsweise mittleres). Allerdings ist dies nur eine grobe Erfassung der Segmenttreue. Weiterhin wird dabei nicht berücksichtigt, dass das Platzangebot innerhalb eines

³⁹ Siehe Mock (2010) sowie Mueller und de Haan (2006).

⁴⁰ Siehe Abschnitt 4.7.2 für ein Beispiel und die nötigen Datenmengen.

⁴¹ Siehe de Haan und Peters (2005).

⁴² Siehe Mueller und de Haan (2006).

Fahrzeugs (beispielsweise das Kofferraumvolumen) durch die EV-Antriebssysteme oder die Batterien evtl. eingeschränkt werden kann und dadurch potenzielle Käufer von einem Kauf Abstand nehmen könnten.

Neben dem Segmentwechsel wäre auch eine segment- oder markenabhängige Bereitschaft denkbar, die Antriebsart zu wechseln. Zum einen liegen aber für Deutschland keine ausreichenden Daten vor (insbesondere müssten diese Daten auch alternative Antriebe umfassen), zum anderen basiert die Wahl der Antriebsart im vorliegenden Modell hauptsächlich auf den Gesamtnutzungskosten eines Antriebs sowie der technischen Realisierbarkeit eines Fahrprofils mit den verschiedenen Antrieben (begrenzte Reichweite von BEV und elektrischer Fahranteil von PHEV/REEV). Die Antriebswahl erfolgt daher im Markthochlaufmodell ausschließlich nach den Aspekten Technik und Gesamtnutzungskosten. Eine Antriebstreue wird somit im Modell nicht berücksichtigt.

Die in den nächsten Jahren noch begrenzte Modellauswahl und Markenverfügbarkeit von Elektrofahrzeugen stellen einen limitierenden Faktor im Markthochlauf von Elektrofahrzeugen dar (siehe Abbildung 3-1). Daher wird die begrenzte Auswahlmöglichkeit und Markenverfügbarkeit im Modell vereinfacht berücksichtigt.⁴³ Im ersten Schritt wird hierzu das derzeitige und künftige Marktangebot an Elektrofahrzeugen erhoben. Für einen zukünftigen Zeithorizont von zwei Jahren liegen Ankündigungen für neue Fahrzeugmodelle vor. Basierend auf diesen Ankündigungen wird ein logistisches Wachstum der Zahl der verfügbaren Marken mit dem Antrieb BEV beziehungsweise REEV/PHEV mittels Regression bestimmt. Diese Fahrzeugverfügbarkeit wird für die Auswahl des Antriebs der Fahrprofile verwendet. Falls ein Elektrofahrzeug der Marke und Größe angekündigt ist, wird dieses im Modell vom jeweiligen Nutzer gekauft. Falls nicht, entscheidet sich ein Teil der Käufer (gemäß Verfügbarkeitskurve) für ein EV einer anderen Marke. Der Rest der Käufer wählt die zweitbeste TCO-Option. Zusätzlich werden BEV im Segment Großklassewagen nur für Flotten zugelassen, da diese in der Regel keine seltenen langen Fahrten (beispielsweise Urlaubsfahrten) zurücklegen.

3.2.5 Integration einer Mehrpreisbereitschaft

Mit der Wirtschaftlichkeit, der Reichweitenangst und dem begrenzten Angebot an Elektrofahrzeugen sind die wichtigsten hemmenden Faktoren für die Marktdiffusion von Elektrofahrzeugen berücksichtigt. Nun geht es im abschließenden Schritt darum, mögliche andere Aspekte der Marktpenetration von Elektrofahrzeugen, die eher fördernd wirken, zu integrieren, beispielsweise umweltfreundliche Mobilität, geringe Lärmemis-

⁴³ Die Details sind in Abschnitt 4.7.3 dargestellt.

sionen oder der Reiz einer neuen Technologie. Diese fördernden Aspekte werden im Modell für Privatkunden über die Mehrpreisbereitschaft integriert.⁴⁴ Die Erfahrungen zeigen allerdings, dass eine angegebene Mehrpreisbereitschaft nicht gleichzusetzen ist mit tatsächlich beobachtetem Kaufverhalten.⁴⁵ Trotzdem gibt sie erste Hinweise auf die Wertschätzung der neuen Technologien und die ungefähre Größe der Mehrpreisbereitschaft. Der Ansatz, über Mehrpreisbereitschaften zu gehen, ist ein durchaus üblicher Ansatz bei Marktdiffusionsmodellen zur Elektromobilität.⁴⁶

Um die Kaufpreisbereitschaft in dem hier vorgeschlagenen Ansatz mit dem Modell ALADIN zu berücksichtigen, wird wiederum auf eine umfangreiche empirische Datenbasis des Fraunhofer ISI zurückgegriffen.⁴⁷ Hier wurde die Mehrpreisbereitschaft getrennt nach folgenden vier Gruppen mit unterschiedlicher Affinität für Elektromobilität unterschieden:⁴⁸

- Nutzer von Elektrofahrzeugen
- Interessierte mit Kaufabsicht für die nähere Zukunft
- Interessierte ohne konkrete Kaufabsicht
- Nicht-Interessierte.

Die Mitglieder dieser Gruppen unterscheiden sich signifikant in verschiedenen soziodemographischen Variablen wie Haushaltseinkommen, Umfang der Berufstätigkeit, Haushaltsgröße, Größe des Wohnorts und der Bereitschaft, einen Mehrpreis für die Anschaffung eines Elektrofahrzeugs zu akzeptieren.⁴⁹ Zudem liegen zur weiteren Charakterisierung Informationen über Alter, Geschlecht und Schulabschluss vor. Die gleichen Informationen liegen für die privaten Fahrprofile vor, weshalb die Fahrprofile der Nutzergruppe zugeordnet werden können, mit deren Mitgliedern sie die meisten Übereinstimmungen in den genannten Eigenschaften zeigen. Die Daten zur Definition der Nutzergruppen verfügen über einen guten Stichprobenumfang auch für die kleinen Nutzergruppen,⁵⁰ die Gruppengrößen sind allerdings nicht repräsentativ für deutsche

⁴⁴ Genau genommen handelt es sich um eine „Mehr-TCO-Bereitschaft“. Da dieser Ausdruck unüblich ist, wird im Folgenden weiterhin „Mehrpreisbereitschaft“ verwendet.

⁴⁵ Das Phänomen ist bekannt unter *stated preference* versus *revealed preference*, vgl. Huang et al. (1997) und Bradley et al. (1991).

⁴⁶ Siehe beispielsweise Mock (2010) und Pfahl (2013).

⁴⁷ Siehe Wietschel et al. (2012), Peters et al. (2011a und b), vgl. aber auch ADAC (2009), GfK (2010) und FOM (2010), Knie et al. (1999).

⁴⁸ Die Zuordnung erfolgt anhand der erfragten Nutzung, dem Interesse und der Intention, in den nächsten Jahren ein Elektrofahrzeug zu kaufen, vgl. Agosti (2011) und Abschnitt 4.7.1.

⁴⁹ Siehe Wietschel et al. (2012, S. 20ff), es wurden Mittelwertvergleiche angestellt.

⁵⁰ Siehe Wietschel et al. (2012, S. 17), Peters et al. (2011) sowie Agosti (2011).

Pkw-Käufer. Daher wird die Größe der Nutzergruppen für die Fahrprofile anhand der Verteilung einer repräsentativeren Befragung im Rahmen des Projektes iZeus festgelegt.⁵¹

Für jedes einzelne Fahrprofil wird eine Mehrpreisbereitschaft gemäß der Zugehörigkeit zu einer von vier Gruppen im Innovationsprozess zugeordnet (siehe Kapitel 4.7.1 für die Details und Genauigkeit der Zuordnung). Damit ergeben sich 0,5 % Innovatoren (Gruppe mit der höchsten Mehrpreisbereitschaft von 30 %), 1 % Early Adopter (15 % Mehrpreisbereitschaft), 48 % Early bzw. Late Majority (15 % Mehrpreisbereitschaft) und 50,5 % Laggards (die Gruppe mit der geringsten Mehrpreisbereitschaft: 1 %). Die Höhe der Mehrpreisbereitschaft pro Gruppe ist der Median der erfragten Mehrpreisbereitschaft aus der entsprechenden Gruppe der Befragung.⁵² Die prozentuale Mehrpreisbereitschaft bezieht sich dabei auf den Anschaffungspreis eines konventionellen Fahrzeugs gleicher Größe (klein: Benzin; Mittel: Benzin; Groß: Diesel; NFZ: Diesel). Das Ergebnis der Zuordnung zeigt Abbildung 3-5.

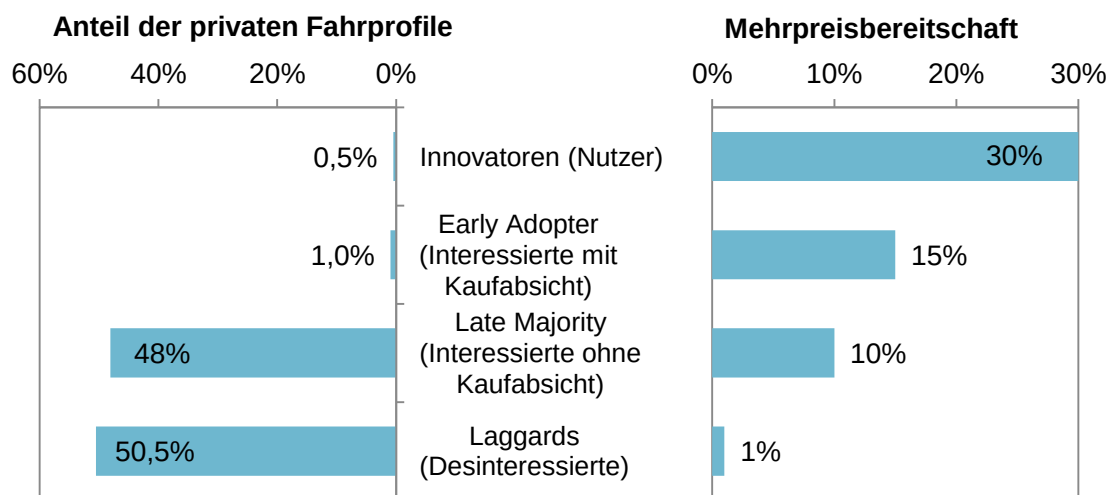


Abbildung 3-5: Höhe und Verteilung der Mehrpreisbereitschaft der privaten Nutzer

Bei Dienstfahrzeugen, die überwiegend privat genutzt werden, ist zu berücksichtigen, dass dieses Kundensegment in der Fahrzeugauswahl stärker reguliert ist und steuerliche Besonderheiten gelten: Ein Dienstwagen muss unter anderem als geldwerter Vor-

⁵¹ Die Daten des iZeus-Projektes liegen dem Fraunhofer ISI vor. Zum iZeus-Projekt selber wird auf <http://www.izeus.de/> verwiesen.

⁵² Siehe Kapitel 4.7.1 für die Datenquelle und Definition der Kundengruppen. Der letzten und größten Gruppe könnte auch 0 % Mehrpreisbereitschaft zugeordnet werden. Dies hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Ergebnisse in Kapitel 5.

teil versteuert werden. Einschränkend kommt hinzu, dass zum Teil die Firmen auch die Unterhaltskosten für Dienstwagen übernehmen. Die Fahrer profitieren also nicht von niedrigen Kosten in diesem Bereich. Zum anderen spielen firmeninterne Vorgaben eine Rolle, die im Einzelnen stark variieren können, aber die Wahl des Fahrzeugs deutlich beeinflussen dürften (z. B. Exklusivverträge mit bestimmten Herstellern, Leasing-Verträge). Weiterhin kann auch eine Firmenpolitik hinsichtlich Image und Umweltbilanz die Fahrzeugbereitstellung beeinflussen. Es sind also Überlegungen der Firmenleitung, des Fuhrparkmanagements und der Nutzer zu berücksichtigen. Über diese komplexen Entscheidungsprozesse liegen keine umfangreichen öffentlich zugänglichen Erhebungen vor, und entsprechend gibt es hier Forschungsbedarf. Mehrpreisbereitschaften für Dienstwagennutzer können deshalb nicht integriert werden.

Zahlreiche Studien zur Akzeptanz beschränken sich auf den Privatkundenbereich, für gewerbliche Flottennutzer liegen weniger Studien vor. Ein Ergebnis der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung der Modellregionen I und II zeigt, dass Elektrofahrzeuge von beiden Gruppen (privat und gewerblich) in entscheidenden Aspekten unterschiedlich wahrgenommen werden.⁵³ So sind gewerbliche Nutzer hinsichtlich des sehr wichtigen Aspekts der Reichweite, aber unter anderem auch in der Servicezufriedenheit nach ausgiebiger Nutzungszeit klar zufriedener als Privatkunden. Weiterhin sind bei gewerblichen Nutzern weitere fördernde Kriterien bezüglich der Imagewirkung einzu-beziehen. Die existierenden Studien im gewerblichen Verkehr zeigen, dass für einige gewerbliche Nutzer durchaus eine Mehrpreisbereitschaft besteht, sie aber insgesamt wohl im Vergleich zu den privaten Nutzern geringer ausfällt.⁵⁴ Eine Mehrpreisbereitschaft für gewerbliche Nutzer wird basierend auf den Ergebnissen von Dataforce (2011) eingeführt und gemäß der Unternehmensgröße zugeordnet (siehe Abschnitt 4.7.1).

3.2.6 Integration von Politikmaßnahmen

Im Rahmen des Projektes sollen zudem eine Reihe von Politikmaßnahmen betrachtet werden, um deren Auswirkungen abschätzen zu können. Folgende monetäre Politikmaßnahmen, die in Abstimmung mit der AG 7 der NPE ausgewählt wurden, werden mit ihrem Einfluss auf den Markthochlauf über den Einbezug in die TCO berücksichtigt:

- *Kaufpreisreduktion* (alle Nutzer): Die Investition, die ein Elektrofahrzeugnutzer zu tätigen hat, wird einmalig reduziert. Es werden zwei Varianten gerechnet: (a) Reduk-

⁵³ Siehe Dütschke et al. (2012).

⁵⁴ Siehe Öko-Institut (2011a), Dataforce (2011), Globisch und Dütschke (2013).

tion um 1.000 € im Jahr 2013, danach linear abnehmend bis 2020 auf 300 € und (b) Reduktion um 2.000 € im Jahr 2013, danach linear abnehmend auf 600 €.

- *Zinssatzverringerung für Private* (Private Nutzer): Privatanutzer erhalten einen Sonderkredit, mit einem verringerten Investitionszinssatz (Senkung des Investitionszinssatzes von 5 % auf 4 %).
- *Dienstwagenbesteuerung* (Dienstwagennutzer): Hier wird analog zur Maßnahme des JStG (2013) der zur Berechnung des geldwerten Vorteils maßgebliche Bruttolistenpreis abhängig von der Batteriegröße reduziert. Die Reduktion beträgt 500€/kWh (2013) und 150€/kWh (2020), maximal jedoch 10.000 € (2013) und 6.500€ (2020).⁵⁵
- *Sonder-AfA* (Dienstwagen und Flottenfahrzeuge): Bei der Sonder-AfA können 50 % der Investitionssumme im ersten Jahr abgeschrieben werden, wodurch dieses „Vorziehen“ wie eine Zinsreduktion (analog zur Zinsverringerung für Private) wirkt.
- *Dienstwagenbesteuerung und Sonder-AfA* (Dienstwagen und Flottenfahrzeuge): Diese Politikmaßnahme stellt eine Kombination der beiden vorhergehenden Maßnahmen dar.
- *Kfz-Steuer-Minderung für PHEV und REEV* (alle Nutzer): Derzeit sind BEV bereits vollständig steuerbefreit, in dieser Politikmaßnahme wird der Wegfall des hubraum-basierten Sockelbetrages für REEV und PHEV simuliert.

Diese Politikmaßnahmen werden in Absprache mit den Mitgliedern der AG7 einzeln in das Modells ALADIN integriert (formale Beschreibung in Abschnitt 3.4.4) und ihre Wirkung untersucht (vgl. Abschnitt 5.7).

3.3 Szenarien und Sensitivitäten

Der Markthochlauf von Elektrofahrzeugen hängt stark von einer Reihe an Einflussgrößen ab.⁵⁶ Dazu gehören die Rohölpreisentwicklung, die Strompreisentwicklung, die Batteriepreise und die Kundenakzeptanz, deren zeitliche Entwicklungen mit großen Unsicherheiten behaftet sind. In der vorliegenden Studie wird deshalb keine Prognose zum Markthochlauf von Elektrofahrzeugen erstellt, sondern es werden drei Szenarien entwickelt. Es wird dabei kein Backcasting-Ansatz verfolgt, bei dem man sich eine oder mehrere Zielgrößen in der Zukunft setzt und überlegt, wie man diese erreichen kann.

⁵⁵ In den Szenarien wurde noch mit der alten Regel der geldwerten Versteuerung der Dienstwagen gerechnet. Allerdings wurden gegen Projektabschluss die EV hier steuerlich besser gestellt, was aber nicht mehr umfänglich in den Rechnungen berücksichtigt werden konnte. In den Berechnungen zu den Politikmaßnahmen ist die aktuelle Gesetzeslage entsprechend berücksichtigt. Letztere zeigen, dass die Gesetzesänderungen kaum Auswirkungen auf die Ergebnisse haben.

⁵⁶ Die Parameter wurden mit den Mitgliedern der NPE AG7 ausführlich abgestimmt, aber die letzte Verantwortung für die Festlegung der Parameter liegt bei den Studienverfassern.

Es wird ein klassischer Forecasting-Ansatz gewählt, bei dem man den Einfluss verschiedener Größen auf eine mögliche zukünftige Entwicklung analysiert.

Szenarien sind auf eine bestimmte Fragestellung bezogene, möglichst vollständige und in sich plausible Zusammenstellungen von Ereignissen.⁵⁷ Mittels Szenarien werden denkbare alternative Entwicklungspfade unter bestimmten Rahmenbedingungen ermittelt. Im vorliegenden Anwendungsfall werden keine Aussagen über die Eintrittswahrscheinlichkeit oder die Wünschbarkeit eines gewählten Szenarios gemacht. Es werden weiterhin keine extremen Szenarien formuliert. Die entwickelten Szenarien sind keine Prognosen für die Zukunft und enthalten auch keine Bewertungen der zu Grunde liegenden Annahmen.

Die drei festgelegten Szenarien unterscheiden sich in der Festlegung ihrer Rahmenbedingungen folgendermaßen: Im Pro-EV-Szenario werden eher optimistische Annahmen bezüglich eines Markterfolgs von Elektrofahrzeugen gesetzt, im Contra-EV-Szenario werden eher pessimistische Annahmen zusammengefasst und im dritten Szenario werden mittlere Annahmen unterstellt. Die drei Szenarien beschreiben Entwicklungen für Deutschland bis 2020 und werden wie folgt benannt:

- Annahmen Pro-Elektrofahrzeuge („**Pro-EV-Szenario**“)
- Annahmen Kontra Elektrofahrzeuge („**Contra-EV-Szenario**“)
- Mittlere Annahmen („**Mittleres Szenario**“).

In keinem Szenario werden extreme Annahmen getroffen, weshalb zusätzlich für besonders relevante Einflussgrößen Sensitivitätsrechnungen durchgeführt werden. Ziel der Sensitivitätsanalyse ist neben der Prüfung der Stabilität der Entwicklungen die Identifikation von Parametern, die einen starken Einfluss auf das Ergebnis haben. Es ergibt sich ein Bild über die Unsicherheiten aufgrund der unbekannten Entwicklung äußerer Faktoren.

Die Konsequenz aus dem gewählten Vorgehen mit Szenarien und Sensitivitätsanalysen ist, dass eine Vielzahl an Ergebnissen erzeugt wird.

Folgende Parameter variieren in den drei Szenarien: Batteriepreise, Rohölpreise (Kraftstoffpreise) und Strompreise. Die Kraftstoffpreise, die aus den Rohölpreisen abgeleitet werden, unterteilen sich in Diesel- und Benzinpreise, die Strompreise in gewerbliche und private. Die jeweiligen Werte sind mit ihren Werten für 2013 und 2020 in

⁵⁷ Siehe Dieckhoff et al. (2011) für eine Einführung in und Beispiele zu Energieszenarien.

Tabelle 3-3 dargestellt. Zwischen 2013 und 2020 wird eine lineare Entwicklung angenommen.⁵⁸

Tabelle 3-3: Parameterwerte für die drei Szenarien⁵⁹

Parameter	Jahr	Pro-EV-Szenario	Mittleres Szenario	Contra-EV-Szenario
Dieselpreis	2013		1,45	
[€/Liter]	2020	1,73	1,58	1,43
Benzinpreis	2013		1,57	
[€/Liter]	2020	1,79	1,65	1,54
Strompreis Privat	2013		0,265	
[€/kWh]	2020	0,29	0,29	0,33
Strompreis gew.	2013		0,20	
[€/kWh]	2020	0,215	0,215	0,25
Batteriepreis	2013	470	520	575
[€/kWh]	2020	320	335	370

Besonders die für die Diesel- und Benzinpreisentwicklung wichtig Prognose des Rohölpreises ist mit starken Unsicherheiten behaftet. In dieser Studie wird der Ölpreis für das Mittlere Szenario aus dem aktuellen WEO (2012) genommen.⁶⁰ Für die beiden anderen Szenarien wird ein 20-prozentiger Aufschlag nach oben (Pro-EV-Szenario) beziehungsweise eine 20-prozentige Minderung (Contra-EV-Szenario) unterstellt. Die Steuern auf Benzin- und Diesel werden konstant auf heutigem Niveau gehalten. Mehrere aktuelle Studien gehen von weiter steigenden Strompreisen in Deutschland aus.⁶¹ Für das mittlere Szenario wird die McKinsey-Studie als Basis herangezogen, für das Contra-EV-Szenario eine Studie der Boston Consulting Group.⁶² Die Entwicklung der Batteriepreise ist eng an den drei Prognosen der NPE angelehnt.⁶³ Sie liegen in der Größenordnung von anderen nationalen und internationalen Studien. Detaillierte Be-

⁵⁸ Die Ableitung aus den Annahmen des Markthochlaufmodells von 2011 und der zeitliche Verlauf sind in Abschnitt 4.6 detailliert dargestellt.

⁵⁹ Alle Preise sind reale Bruttopreise inkl. Mehrwertsteuer (mit 2012 als Basisjahr).

⁶⁰ Siehe WEO (2012), New Policy Scenario.

⁶¹ Siehe Schlesinger et al. (2011), BCG (2013), Leipziger Institut für Energie GmbH (2012), McKinsey (2012).

⁶² Siehe McKinsey (2012), BCG (2013).

⁶³ Siehe NPE (2011a) und (2011b).

gründungen und Diskussionen zu den einzelnen Parameterentwicklungen werden Kapitel 4 gegeben.

Für die Sensitivitätsrechnungen im mittleren Szenario werden folgende Parameter untersucht:

- Batteriepreis
- Investitionszinssatz
- Kraftstoffpreise (Benzin- und Dieselpreis)
- Strompreise.

Die Parameter werden unter Betrachtung der Ergebnisgrößen um bis zu 50 % reduziert bzw. erhöht, wodurch sowohl die Robustheit der Rechnungen, als auch der Einfluss des Parameters analysiert wird.

3.4 Formale Berechnung der TCO und des Markthochlaufs

Während in Abschnitt 3.2 eine qualitative Beschreibung des Modells ALADIN gegeben wurde, wird in diesem Abschnitt die formale Beschreibung ergänzt. Zunächst wird die Berechnung des Batterieladestands zur technischen Analyse erläutert (3.4.1), um anschließend die Formeln zur Berechnung der TCO unter expliziter Berücksichtigung der begrenzten elektrischen Reichweite, der Kosten für Ladeinfrastruktur und der Mehrpreisbereitschaft darzustellen (3.4.2). Aus den Anteilen der Fahrprofile innerhalb einer Nutzergruppe erfolgt die Hochrechnung auf die Neuzulassungen (3.4.3). Diese werden über ein Bestandsmodell zu einem Bestand aggregiert. Den Abschluss bildet die formale Beschreibung der Politikmaßnahmen (3.4.4).

3.4.1 Simulation des Batterieladestandes

Die Simulation des Batterieladestandes eines potenziellen Elektrofahrzeugs erfolgt folgendermaßen: Jedes Fahrprofil wird als ein mögliches Elektrofahrzeug simuliert. Dafür wird unter Berücksichtigung der Annahmen bzgl. Batteriegröße und Verbrauch jedes Fahrprofil als BEV, PHEV und REEV simuliert. Rein technische wird dafür der Batterieladestand (SOC = State of Charge) jedes Fahrprofils simuliert:

$$\text{SOC}_{t,f}(\tau + 1) = \begin{cases} \text{SOC}(\tau) - d_{\Delta\tau_f} \cdot c_{e_{r,s,t}} & \text{für } d_{\Delta\tau_f} > 0 \\ \min(\text{SOC}(\tau) + \Delta\tau_f \cdot P_{loc_{\tau_f}}, C_{r,s}) & \text{für } d_{\Delta\tau_f} = 0 \end{cases}$$

mit $\text{SOC}(0) = C_{r,s}$, das heißt, eine volle Batterie wird als Anfangszustand angenommen. Dabei bezeichnen:

$\text{SOC}_{t,f}(\tau)$: Ladestand der Batterie [kWh] zum Zeitpunkt τ im Jahr t für Fahrprofil f
 r : Fahrzeuggröße; $r \in \{\text{klein, mittel, groß}\}$; r wird aus f bestimmt

- s : Fahrzeugtypen; $s \in \{\text{Benzin, Diesel, PHEV, BEV, REEV}\}$
 f : Fahrprofil
 $C_{r,s}$: Kapazität der Batterie für Fahrzeuggröße r und Fahrzeugtyp s
 $\Delta\tau_f$: Zeitraum zwischen zwei Zeitpunkten [h] aus Fahrprofil f
 $d_{\Delta\tau_f}$: Strecke die im Zeitraum $\Delta\tau$ zurückgelegt wurde [km] aus Fahrprofil f
 $c_{e_{r,s,t}}$: elektrischer Verbrauch [kWh/km] eines Fzgs. der Größe r des Antriebs s im Jahr t
 t : Beobachtungsjahr [a]
 $P_{loc_{\tau_f}}$: Ladeleistung am Standort loc_{τ_f} zum Zeitpunkt τ

Ein Fahrprofil f besteht dabei aus mehreren Wegen, die in diesem Fahrprofil zurückgelegt wurden. In der Batterieladestandssimulation wird die Batterie immer entladen, wenn in einem Zeitabschnitt $\Delta\tau_f$ ein Weg zurückgelegt wird ($d_{\Delta\tau_f} > 0$) und geladen, wenn das Fahrzeug steht ($d_{\Delta\tau_f} = 0$) und Ladeinfrastruktur zur Verfügung steht ($P_{loc_{\tau_f}} > 0$). Wird das Fahrzeug im Zeitraum zwischen τ und $\tau + \Delta\tau_f$ demnach bewegt, so wird der Ladestand zum Zeitpunkt τ ($SOC(\tau)$) reduziert um den Stromverbrauch für die Strecke $d_{\Delta\tau_f}$ multipliziert mit dem elektrischen Verbrauch, den das Fahrzeug der Größe r , des Typs s im Jahr t hat. Wird das Fahrzeug in diesem Zeitraum nicht bewegt, so wird der Ladestand zum Zeitpunkt τ ($SOC(\tau)$) erhöht um die Strommenge, die während dem Zeitraum $\Delta\tau_f$ bei der angegebenen Leistung $P_{loc_{\tau_f}}$ geladen werden kann.

Mit welcher Leistung geladen werden kann, hängt davon ab, was im Infrastrukturszenario für den Ortstyp festgelegt wurde, zu dem die letzte Fahrt gemacht wurde (siehe Abschnitt 4.5.2). Ist der letzte Weg beispielsweise ein Heimweg gewesen und kann man dort der Annahme nach mit 3,7 kW laden, so wird diese Leistung mit dem Zeitabschnitt multipliziert. Übersteigt die Summe aus Ladestand der Batterie vor der Ladung und der ladbaren Energiemenge im Zeitraum $\Delta\tau_f$, so wird der Ladestand auf die Batteriekapazität $C_{r,s}$ gesetzt, die auch den Startwert der Simulation zum Zeitpunkt $\tau = 0$ bildet. Die verwendeten Fahrprofile werden in Abschnitt 4.4 erläutert. Sämtliche Fahrzeugparameter für die Berechnung werden in Abschnitt 4.3, die Parameter zur Infrastruktur in Abschnitt 4.5 dargelegt.

Anhand des simulierten Batterieladestandes lässt sich entscheiden, ob alle Wege eines Fahrzeuges, d. h. alle Fahrten eines Fahrprofils, technisch durch ein BEV ersetzbar wären. Diese technische Ersetzbarkeit eines Fahrprofils f durch ein BEV wird berechnet gemäß:

$$T_{f,t} = \begin{cases} 0, & \text{wenn } \exists w_f: SOC_t(\tau_{w_f}) < 0 \\ 1, & \text{sonst} \end{cases}$$

- f : Fahrprofil
 $T_{f,t}$: Technische Ersetzbarkeit des Fahrprofils mit einem BEV im Jahr t
 w_f : Weg innerhalb des Fahrprofils f
 τ_{w_f} : Ankunftszeitpunkt nach Weg w_f

Das heißt, wenn der simulierte Ladestand für ein BEV stets positiv ist, kann dieses Fahrzeugs alle Fahrten im Beobachtungszeitraum mit einem BEV zurücklegen und dieses Fahrprofil ist in der Simulation technisch durch ein BEV ersetzbar.⁶⁴ Man beachte, dass sich die elektrischen Verbräuche jedes Jahr verändern und die Simulation daher für alle Jahre getrennt durchgeführt werden muss. Die verwendeten Verbräuche sind außerdem Realverbräuche, also inklusive Heizung oder anderen Nebenverbrauchen. Zudem sind keine „Sicherheitsbereiche“ für die Restreichweite oder ähnliches berücksichtigt. Jahreszeitliche Effekte wie eine verminderte Batteriekapazität durch tiefe Umgebungstemperaturen im Winter oder einen Mehrverbrauch durch Klimatisierung im Sommer können aufgrund der Durchschnittsverbrauchsbetrachtung auch nicht berücksichtigt werden.

Aus den Batterieladeständen kann auch der elektrische Fahranteil für PHEV und REEV bestimmt werden:

$$s_{ef,t} = \frac{\sum_{w \in f^+} d_w}{\sum_{w \in f} d_w}.$$

$s_{ef,t}$: elektrischer Fahranteil des Fahrprofils f im Jahr t

f^+ : Entfernungen im Fahrprofil f mit positivem Batterieladestand ($\text{SOC}(t_w) > 0$); auch Teilstrecken möglich

d_w : Länge des Wegs w

Es wird stets davon ausgegangen, dass ein Nutzer zuerst alle Wege rein elektrisch zurücklegt und je nach Verfügbarkeit von Infrastruktur lädt⁶⁵, mindestens aber am „Heimatstandort“ (zu Hause für private Nutzer und Dienstwagen, auf dem Firmengelände bei Flottenfahrzeugen). Nachdem die elektrische Reichweite des Fahrzeuges entlang eines Weges aufgebraucht wurde, wird davon ausgegangen, dass im Range-Extender-Modus weitergefahren wird. Der elektrische Fahranteil ist schließlich einfach der Quotient aus rein elektrisch zurückgelegter Entfernung und der insgesamt zurückgelegten Entfernung. Zu beachten ist, dass der elektrische Fahranteil der Quotient der Wegstrecken ist, nicht der Quotient der Anzahl der Wege. Beispielsweise hätte ein Fahrer mit 20 km elektrischer Reichweite, der an vier Tagen je zwei mal 12,5 km und

⁶⁴ Falls dies nicht der Fall sein sollte, wird BEV als Kaufoption für das Fahrprofil ausgeschlossen. Diese Restriktion berücksichtigt nicht das mögliche Vorhandensein eines Zweitwagens oder alternativer Mobilitätsangebote. Allerdings liegen kaum belastbare Informationen über die Mehrkosten eines alternativen Mobilitätsangebots vor und wenn im Beobachtungszeitraum von einer bis vier Wochen (wie hier verwendet) bereits zu lange Fahrten vorkommen, ist anzunehmen, dass dies häufiger im Jahr geschieht.

⁶⁵ Dafür wird der Batterieladestand nicht „ad hoc“ aufgeladen sondern mit der gegebenen Ladeleistung langsam wieder angehoben (siehe vorangegangene Ausführungen und Abschnitt 4.5).

am fünften Tag einmal 40 km fährt einen elektrischen Fahranteil von $(5 \cdot 20) / (4 \cdot 25 + 40) = 100/140 = 71,4\%$ und ist 4 von 9 Wegen rein elektrisch gefahren, sofern er nur je einmal am Tag lädt. Aufgrund der Fahrprofilinformationen ist es für Privatanutzer und Nutzer von Dienstwagen jedoch auch möglich, dass die Fahrer mehrmals am Tag an privaten (oder halböffentlichen und öffentlichen) Standorten ankommen und mehrmals täglich laden können.⁶⁶

3.4.2 Formale Berechnung der TCO

Die jährliche TCO für Fahrprofil f im Jahr t ($TCO_{f,t}^a$) setzt sich wie oben beschrieben aus der Summe der einzelnen Kosten zusammen:

$$TCO_{f,t}^a = a_{capex}^{f,t} + a_{opex}^{f,t} - afa_{capex}^{f,t} - afa_{opex}^{f,t} + g_{f,t}.$$

Dabei bezeichnen

$TCO_{f,t}^a$: jährliche TCO eines Fahrprofils f im Jahr t

$a_{capex}^{f,t}$: Annuität für die Kapitalkosten eines Fahrprofils f im Jahr t

$a_{opex}^{f,t}$: Annuität für die operativen Kosten eines Fahrprofils f im Jahr t

u : Nutzergruppe; $f \in \{\text{privat, gewerblich(Flotte), Dienstwagen}\}$, bestimmt aus f

$afa_{capex}^{f,t}$: Abschreibung auf die Annuität für die Kapitalkosten eines Fahrprofils f im Jahr t
(nur für gewerblich gehaltene Fahrzeuge)

$afa_{opex}^{f,t}$: Abschreibung auf die Annuität für die operativen Kosten eines Fahrprofils f im Jahr t
(nur für gewerblich gehaltene Fahrzeuge)

$g_{f,t}$: geldwerter Vorteil eines Fahrprofils f im Jahr t (nur für Dienstwagen)

Dies sind insbesondere die Anschaffungsausgaben die auf ein Jahr diskontiert werden ($a_{capex}^{f,t}$) und die laufenden Kosten ($a_{opex}^{f,t}$). Bei gewerblich gehaltenen Fahrzeugen ist die Abschreibung zu subtrahieren ($afa_{capex}^{f,t}$ und $afa_{opex}^{f,t}$) und bei Dienstwagen der geldwerte Vorteil zu addieren. Die einzelnen Summanden werden im Folgenden einzeln dargestellt.

Die Annuität⁶⁷ der Anschaffungsausgaben $a_{capex}^{f,t}$ für ein Fahrprofil f im Jahr t ergibt sich gemäß

⁶⁶ Damit sind höhere elektrische Fahranteile möglich als wenn Fahrzeuge nur je einmal pro Tag geladen werden. Vgl. Abschnitt 4.4 zu Detailinformationen über die Fahrprofile.

⁶⁷ Siehe Wöhe und Döring (2002, S. 622) für eine Einführung in die Investitionsrechnung.

$$a_{capex}^{f,t} = \left(\left((NLP_{r,s,t} + \kappa_{r,s,t} \cdot p_{Batt_{s,t}} - M_{f,t}) \cdot (1 + i_{u,t})^{T_u} - RW_{f,s,t} \right) \cdot \frac{i_{u,t}}{(1 + i_{u,t})^{T_u} - 1} + I_{LIS_{f,t}} \cdot \frac{(1 + i_{u,t})^{T_{LIS_{f,t}}} \cdot i_{u,t}}{(1 + i_{u,t})^{T_{LIS_{f,t}}} - 1} \right) \cdot (1 + VAT)_f.$$

$NLP_{r,s,t}$: Nettolistenpreis für Fahrzeuggröße r mit Antrieb s im Jahr t [€]

$\kappa_{r,s,t}$: Batteriegröße für Fahrgröße r mit Antrieb s im Jahr t [kWh]

$p_{Batt_{s,t}}$: Batteriepreis für Antrieb s im Jahr t [€/kWh]

$M_{f,t}$: Mehrpreisbereitschaft des Nutzers des Fahrprofils f im Jahr t

$i_{u,t}$: Zinssatz der Nutzergruppe u zum Zeitpunkt t

$RW_{f,s,t}$: Restwert für Fahrzeug f mit Antrieb s bei Kauf im Jahr t und Verkauf nach Haltedauer [€]

T_u : Nutzungsdauer des Fahrzeugs in Nutzergruppe u [a]

$I_{LIS_{f,t}}$: Investition für Ladeinfrastruktur gemäß Fahrprofil f zum Zeitpunkt t [€]

$T_{LIS_{f,t}}$: Nutzungsdauer der Ladeinfrastruktur gemäß Fahrprofil f zum Zeitpunkt t [a]

VAT : Mehrwertsteuer

Die Investitionen setzen sich dabei zusammen aus den Investitionen für das Fahrzeug ($NLP_{r,s,t}$), und denen für die Batterie ($\kappa_{r,s,t} \cdot p_{Batt_{s,t}}$), welche abzüglich einer Mehrpreisbereitschaft ($M_{f,t}$) und des Restwertes ($RW_{f,s,t}$) auf ein Jahr diskontiert werden (obere Zeile). Für die Investitionen der Ladeinfrastruktur ($I_{LIS_{f,t}}$) wird dieselbe Berechnung ohne Restwerte durchgeführt. Je nach Nutzergruppe wird die Mehrwertsteuer (VAT) hinzugezogen. Die Parameter für die einzelnen Kostenbestandteile finden sich in den Abschnitten 4.3 und 4.5, die Haltedauern und Restwertparameter in Abschnitt 4.2. Die Mehrpreisbereitschaft wird in Abschnitt 4.7.1 erläutert und bezieht sich jeweils auf ein konventionelles Vergleichsfahrzeug (siehe Abschnitt 4.7.1).

Die Annuität der laufenden Kosten $a_{opex}^{f,t}$ für ein Fahrprofil f im Jahr t ergibt sich aus:

$$a_{opex}^{f,t} = (JFL_f \cdot (s_{ef,t} \cdot c_{er,s,t} \cdot k_{et} + (1 - s_{ef,t}) \cdot c_{cr,s,t} \cdot k_{ct} + k_{rr,s,t}) + k_{sr,s,t}) \cdot (1 + VAT)_f$$

JFL_f : Jahresfahrleistung des Fahrprofils f [km]

$s_{ef,t}$: elektrischer Fahranteil des Fahrprofils f im Jahr t

$c_{er,s,t}$: elektrischer Verbrauch eines Fahrzeugs der Größe r und Antriebs s zum Zeitpunkt t [kWh/km]

k_{et} : Kosten für elektrischen Strom im Jahr t [€/kWh]

$c_{cr,s,t}$: konventioneller Verbrauch (Benzin oder Diesel) eines Fahrzeugs der Größe r und Antriebs s zum Zeitpunkt t [l/km]

k_{ct} : Kraftstoffkosten (Benzin oder Diesel) zum Zeitpunkt t [€/l]

$k_{rr,s,t}$: Kosten für Wartung und Instandhaltung eines Fahrzeugs der Größe r und Antriebs s zum Zeitpunkt t [€/km]

$k_{sr,s,t}$: Kosten für Kfz-Steuer eines Fahrzeugs der Größe r und Antriebs s zum Zeitpunkt t [€]

Es gibt also einen Teil, der von der Jahresfahrleistung (JFL_f) abhängt, namentlich der elektrische Verbrauch ($s_{ef} \cdot c_{er,s,t} \cdot k_{et}$), der konventionelle Verbrauch ($((1 - s_{ef}) \cdot c_{cr,s,t} \cdot k_{ct})$)

und die Wartungs- und Instandhaltungskosten ($k_{r,s,t}$), sowie einen fahrleistungsunabhängigen Teil, die Kfz-Steuer ($k_{s,r,s,t}$). Auch hier wird die Mehrwertsteuer (VAT) je nach Nutzergruppe eingerechnet. Die Parameter der einzelnen Kostenfaktoren sind in den Abschnitten 4.3, 4.5 und 4.6 dargestellt, die Jahresfahrleistung entstammt den Fahrprofilen (Abschnitt 4.4).

Für Flottenfahrzeuge und Dienstwagen besteht die Möglichkeit der Abschreibung auf die Kapitalkosten:

$$afa_{capex}^{f,t} = \left(\left((NLP_{r,s,t} + \kappa_{r,s,t} \cdot p_{Batt_{s,t}}) \cdot (1 + i_{u,t})^{T_u} - RW_{f,s,t} \right) \cdot \frac{i_{u,t}}{(1 + i_{u,t})^{T_u} - 1} + I_{LIS_{f,t}} \cdot \frac{(1 + i_{u,t})^{T_{LIS_{f,t}}} \cdot i_{u,t}}{(1 + i_{u,t})^{T_{LIS_{f,t}}} - 1} \right) \cdot AR$$

$NLP_{r,s,t}$: Nettolistenpreis für Fahrzeuggröße r mit Antrieb s im Jahr t [€]

$\kappa_{r,s,t}$: Batteriegröße für Fahrgröße r mit Antrieb s im Jahr t [kWh]

$p_{Batt_{s,t}}$: Batteriepreis für Antrieb s im Jahr t [€/kWh]

$i_{u,t}$: Zinssatz der Nutzergruppe u zum Zeitpunkt t

$RW_{f,s,t}$: Restwert für Fahrzeug f mit Antrieb s bei Kauf im Jahr t und Verkauf nach Haltedauer [€]

T_u : Nutzungsdauer des Fahrzeugs in Nutzergruppe u [a]

$I_{LIS_{f,t}}$: Investition für Ladeinfrastruktur gemäß Fahrprofil f zum Zeitpunkt t [€]

$T_{LIS_{f,t}}$: Nutzungsdauer der Ladeinfrastruktur gemäß Fahrprofil f zum Zeitpunkt t [a]

VAT : Mehrwertsteuer

AR : Abschreibungsrate

Die Berechnung erfolgt analog zur Annuität der Kapitalkosten ($a_{capex}^{f,t}$, weiter oben), jedoch wird die Mehrpreisbereitschaft nicht in die Berechnung einbezogen und zu guter Letzt die Abschreibungsrate (AR) multipliziert. Die einzelnen Parameter finden sich in den Abschnitten 4.2, 4.3 und 4.5.

Ebenso können Flottenfahrzeuge und Dienstwagen eine Abschreibung auf die operativen Kosten vornehmen:

$$afa_{opex}^{f,t} = a_{opex}^{f,t} \cdot AR$$

$a_{opex}^{f,t}$: Annuität für die operativen Kosten eines Fahrprofils f im Jahr t

AR : Abschreibungsrate

Für Dienstwagnutzer ist zusätzlich der geldwerte Vorteil zu berechnen, der im Modell als zusätzlicher Kostenfaktor eingeht:

$$g_{f,t} = (NLP_{r,s,t} + \kappa_{r,s,t} \cdot p_{Batt_{s,t}}) \cdot (1 + VAT)_f \cdot (EA_{f,t} + 0.0003 \cdot \theta d_t) \cdot st \cdot 12$$

$NLP_{r,s,t}$: Nettolistenpreis für Fahrzeuggröße r mit Antrieb s im Jahr t [€]

$\kappa_{r,s,t}$: Batteriegröße für Fahrgröße r mit Antrieb s im Jahr t [kWh]

$p_{Batt_{s,t}}$: Batteriepreis für Antrieb s im Jahr t [€/kWh]

VAT : Mehrwertsteuer

$EA_{f,t}$: zu versteuerndes Einkommen bei Dienstwagen
 θd_t : durchschnittliche Pendelstrecke
 st : privater Spitzensteuersatz

Der geldwerte Vorteil eines Fahrzeugs ist ein Anteil des Bruttolistenpreises ($(NLP_{r,s,t} + \kappa_{r,s,t} \cdot p_{Batt_{s,t}}) \cdot (1 + VAT)_f$), der durch den Fahrzeugnutzer zu versteuern ist. Der Faktor setzt sich zusammen aus dem durchschnittlichen zu versteuerndem Einkommen ($EA_{f,t}$), der durchschnittlichen Pendelstrecke und dem privaten Steuersatz ($EA_{f,t}$; meist der Spitzensteuersatz). Da es sich um eine monatliche Versteuerung handelt, wird dieser Anteil mit zwölf multipliziert. Die Werte für diese Berechnung sind in Abschnitt 4.3 dargestellt.

3.4.3 Formale Berechnung des Markthochlaufs

Die obige TCO-Rechnung wird nach der Simulation des Batterieladestandes für jedes Fahrprofil für jedes Jahr durchgeführt. Dabei ändern sich in den einzelnen Jahren bspw. die durchschnittlichen Energieverbräuche der Fahrzeuge, sodass sich die elektrischen Fahranteile über die einzelnen Jahre auch leicht ändern. Ebenso ändern sich die Nettolistenpreise und die Batteriekosten.

Die Neuzulassungen werden für jedes Jahr berechnet indem der Anteil $p_{rsu} = k_{rsu}/n_{rsu}$ eines Antriebes s im Fahrzeugsegment r über deren Anteil k_{rsu} an der Stichprobe n_{rsu} auf die gesamten Neuzulassungen in der Gruppe (siehe Tabelle 4-2) hochgerechnet werden:

$$N_{rsu}(t) = p_{rsu}(t) \cdot N_{ru}(t)$$

$N_{rsu}(t)$: Gesamtzahl der Neuzulassungen mit Antrieb s in Nutzergruppe u im Fahrzeugsegment r im Jahr t
 $p_{rsu}(t)$: Anteil der Fahrprofile in Nutzergruppe u im Fahrzeugsegment r im Jahr t , für die Antrieb s die geringste TCO hat
 $N_{ru}(t)$: Gesamtzahl der Neuzulassungen in Nutzergruppe u im Fahrzeugsegment r im Jahr t – siehe Tabelle 4-2

Sie setzen sich also zusammen aus dem Anteil der Fahrprofile mit der jeweils geringsten TCO an der Gesamtmenge der Fahrprofile in dieser Nutzergruppe und Größenklasse im jeweiligen Jahr (vorderer Teil der Formel) multipliziert mit der Anzahl der Neuzulassungen in den jeweiligen Fahrzeughaltergruppen ($N_{ru}(t)$). Der erste Teil erfolgt aus der vorangegangenen Berechnung der Fahrprofile, die gesamten Neuzulassungen sind in Abschnitt 4.2.1 dargestellt.

Aus den Neuzulassungen ergibt sich schließlich der Fahrzeugbestand über das folgende Bestandsmodell:⁶⁸

$$B_{rsu}(t) = \sum_{t'=t_0}^t N_{rsu}(t') \cdot P_{rsu}(t')$$

$B_{rsu}(t)$: Bestand eines Fahrzeugs der Fahrzeuggröße r , des Fahrzeugtyps s und der Nutzergruppe u im Jahr t

$N_{rsu}(t)$: Neuzulassungen eines Fahrzeugs der Fahrzeuggröße r , des Fahrzeugtyps s und der Nutzergruppe u im Jahr t

$P_{rsu}(t)$: Überlebenswahrscheinlichkeit aller Fahrzeuge der Fahrzeuggröße r , des Fahrzeugtyps s und der Nutzergruppe u im Jahr t

Dabei werden die Neuzulassungen ($N_{rsu}(t)$) mit der Überlebenswahrscheinlichkeit in jedem Jahr ($P_{rsu}(t)$) multipliziert. Weitere Details finden sich in Abschnitt 4.2.5.

Die Zahl der Primärladepunkte, das heißt der Ladepunkte an denen jeder Nutzer eines Elektrofahrzeuges hauptsächlich und regelmäßig sein Fahrzeug lädt, ergibt sich aus der Summe der neu zugelassenen Elektrofahrzeuge:

$$LIS_{rul}(t) = \sum_{\tau=t_0}^t N_{r,s=BEV|PHEV|REEV,u}(\tau)$$

$LIS_{rul}(t)$: Zahl der Ladepunkte vom Typ l für Nutzergruppe u und Fahrzeuggröße r im Jahr t

Das heißt, für die Ladeinfrastruktur wird für die einzelnen Nutzergruppen die Zahl der Elektrofahrzeuge summiert und dabei in Abhängigkeit von der Nutzergruppe nach dem Typ der Ladeinfrastruktur unterschieden (siehe Abschnitt 3.2.3).

Eher komplex ist der Übergang von Fahrzeugen aus dem gewerblichen Bestand nach Ende der Haltedauer in den privaten Bestand (es wird davon ausgegangen, dass gewerbliche Halter ihre Fahrzeuge nach Ende der Haltedauer⁶⁹ an Privatpersonen verkaufen). Einem gewerblichen Halter wird in der Basisvariante stets eine Wallbox zugeordnet. Wenn das Elektrofahrzeug später in die private Hand übergeht, kann der Privatanutzer über eine Garage verfügen oder auch nicht. Allerdings wird hier davon ausgegangen, dass der Käufer des gebrauchten Elektrofahrzeuges ähnliche TCO-Überlegungen anstellt. Da sich eine öffentliche Ladesäule in weniger als 1 % der Fälle für private Nutzer rechnet, wird davon ausgegangen, dass der private Nutzer auch über eine Garage verfügt und entsprechend für sein Elektrofahrzeug eine Wallbox installiert.

⁶⁸ Siehe Plötz, Gnann und Wietschel (2012) für weitere Details.

⁶⁹ Siehe Abschnitt 4.2.4 zu den Haltedauern.

Berechnung der Konfidenzintervalle für den Markthochlauf

Aus statistischer Sicht wird der Marktanteil p_{rsu} eines Antriebes s im Fahrzeugsegment r über deren Anteil k_{rsu} an der Stichprobe n_{rsu} (alle Fahrprofile mit Antrieb s und Größe r in Nutzergruppe u) geschätzt:

$$\hat{p}_{rsu} = \frac{k_{rsu}}{n_{rsu}}.$$

Der Hut ^ zeigt dabei an, dass $\hat{p}$ ein Schätzer für den „wahren“ Marktanteil p ist. Die Aufgabe ist nun die Unsicherheiten dieser Schätzung aus einer begrenzten Stichprobe zu bestimmen. Statistisch erfolgt dies durch Berechnung eines Konfidenzintervalls zu einem gegebenen Vertrauensniveau $0 < \alpha < 1$. Das heißt, „dass in $(1 - \alpha) \cdot 100\%$ der Fälle, in denen Konfidenzintervalle geschätzt werden, die resultierenden Intervalle den wahren Wert enthalten.“⁷⁰ Zu vorgegebenem Vertrauensniveau α werden also der mögliche oberen Wert p_{rsu+} und der untere Wert p_{rsu-} gesucht, so dass der Wert von p_{rsu} in vielen Wiederholungen des Versuches im Intervall $[p_{rsu-}, p_{rsu+}]$ liegt. Falls das Intervall symmetrisch um $\hat{p}_{rsu}$ ist, bezeichnet $\Delta p_{rsu} = (p_{rsu+} - p_{rsu-})/2$ die halbe Intervallbreite und das Gesamtergebnis wird häufig in der Form

$$p_{rsu} = \hat{p}_{rsu} \pm \Delta p_{rsu} \quad \text{angegeben.}$$

Für den vorliegenden Fall (Konfidenzintervall für den Parameter der Erfolgswahrscheinlichkeit p einer Binomialverteilung $B(k | p, n)$ – der Wahrscheinlichkeit für k Erfolge bei n Versuchen) gibt es mehrere Ansätze in der Literatur. Die Standardnäherung einer Normalverteilung gibt aber gerade für den hier vorliegenden Fall kleiner Werte von n und k häufig ungenaue und insbesondere zu kleine Konfidenzintervalle.⁷¹ Es wird hier daher ein eher konservatives Verfahren gewählt, das von vielen Autoren als exakt bezeichnet wird.⁷² Dabei sind die Intervallgrenzen gegeben durch

$$p_{rsu+} = \text{Beta}^{-1}\left(\frac{\alpha}{2}, k_{rsu}, n_{rsu} - k_{rsu} - 1\right) \& p_{rsu-} = \text{Beta}^{-1}\left(1 - \frac{\alpha}{2}, k_{rsu} + 1, n_{rsu} - k_{rsu}\right).$$

Hier bezeichnet $\text{Beta}^{-1}(x; a, b)$ die Inverse der kumulativen Betaverteilung⁷³.

⁷⁰ Fahrmeir et al. (2009, S. 387). Je nach Disziplin sind verschiedene Werte für α üblich, häufig sind 95 %-Intervalle ($\alpha = 0,05$).

⁷¹ Siehe Brown, Cai und DasGupta (2001) für eine Diskussion dieses Problems.

⁷² Das sog. Clopper-Pearson-Intervall, siehe Brown, Cai und DasGupta (2001, S. 113).

⁷³ Genauer: regularisierte unvollständige Betafunktion $\text{Beta}(x; a, b) = \frac{1}{B(a, b)} \int_0^x t^{a-1} (1-t)^{b-1} dt$, ihre Inverse ist bspw. in MS Excel als $\text{BETAINV}(x, a, b)$ verfügbar.

Das Intervall ist zwar nicht immer symmetrisch, aber für die weitere Rechnung wird die Intervallbreite $\Delta p_{rsu} = (p_{rsu+} - p_{rsu-})/2$ verwendet. Durch einfache Fehlerfortpflanzung⁷⁴ erhält man die Intervallbreite der Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen $N(t)$ insgesamt (die Summation erstreckt sich über alle Fahrzeuggrößen r und Haltergruppen u aber bei den Antrieben s nur über die elektrischen Antriebe):

$$N(t) = \sum_{rsu} \hat{p}_{rsu} N_{rsu}(t) \pm \sqrt{\sum_{rsu} (\Delta p_{rsu})^2 (N_{rsu}(t))^2}.$$

Diese werden für alle Jahre berechnet und zu einem Bestand an Elektrofahrzeugen kumuliert.⁷⁵ Das Ergebnis der Berechnung für alle drei Szenarien zeigt Abbildung 5-10 in Abschnitt 5.3.

3.4.4 Formale Integration von Politikmaßnahmen

In Ergänzung zur TCO-Rechnung soll ebenfalls eine Abschätzung der Auswirkung unterschiedlicher Politikmaßnahmen Gegenstand dieser Untersuchung sein. Im Fokus steht vor allen Dingen die Reduktion der technologiebedingten Mehrkosten, die in den ersten Jahren der Markteinführung entstehen. Folglich sind einige der Maßnahmen unter einem zeitlich begrenzten Horizont zu sehen. Wichtig ist zudem, dass die Fördermaßnahmen stetig auf ihre Wirksamkeit hin überprüft werden müssen und eine dynamische Anpassung an die technologischen Entwicklungen jederzeit möglich sein sollte.

Beispiele der Vergangenheit (z. B. die Umweltprämie) lassen vermuten, dass die Wirkung von Fördermaßnahmen neben rationalen auch psychologische Komponenten aufweist. Wie stark die psychologischen Effekte der untersuchten Politikmaßnahmen ausfallen soll nicht Gegenstand dieser Untersuchung sein. Eine detaillierte Betrachtung würde den Rahmen dieser Studie sprengen. Diese Studie trifft auch keine Aussagen über die Mittelherkunft der für die Fördermaßnahmen benötigten Gelder. Je nachdem ob es sich um Mittelumschichtungen im Bundeshaushalt oder um Beschaffung am Kapitalmarkt handelt, können die Kosten um teilweise zweistellige Millionenbeträge schwanken (z. B. Kapitalkosten für 500 Mio. € Fördersumme betragen bei 3 % Zins 15 Mio. € jährlich).

⁷⁴ Die Unsicherheit Δf einer Funktion $f(x_1, \dots, x_n)$ bei Unsicherheiten Δx_i der Eingangsvariablen x_i ist gegeben durch $\Delta f = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 (\Delta x_i)^2}$ (vgl. DIN1319-3).

⁷⁵ Dies ist eine Vereinfachung im Vergleich zum „echten“ Bestandsmodell. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse ergab jedoch, dass der Unterschied im Bereich 0,1 % liegt.

Um die grundsätzlichen Wirkungen unterschiedlicher Politikmaßnahmen beurteilen zu können wurden zunächst in enger Abstimmung mit der NPE (Parameterworkshop am 26. Februar 2013) eine Reihe von Maßnahmen diskutiert und ausgewählt. Eine Reduktion der Investition für private und gewerbliche Nutzer um einen festen Betrag wird ebenso betrachtet wie eine Sonder-AfA für rein gewerbliche Halter und eine Senkung des Investitionszinsses für private Käufer. Die Wirkung der Änderung der Dienstwagenbesteuerung – wie im Jahressteuergesetz 2013 enthalten – wird ebenfalls dargestellt. Abschließend werden die Auswirkungen einer vollständigen Befreiung der Kfz-Steuer von PHEV und REEV dargestellt.

Kaufpreisreduktion

Um die Anfangsinvestitionen (Fahrzeugpreis und Ladeinfrastruktur) für den Käufer zu senken ist eine Pauschalsubvention von 1.000 bis 2.000 € denkbar. Beträge in dieser Spannweite lassen sich durch das Entstehen der positiven externen Effekte, die mit der Nutzung von Elektrofahrzeuge verbunden sind, rechtfertigen.⁷⁶ Analog zur Entwicklung der Batteriepreise muss dieser Betrag über die Jahre abnehmen. Entsprechend der vorgeschlagenen Entwicklung für die Dienstwagenbesteuerung im JStG 2013 sinken die Beträge bis zum Jahr 2020 auf 300 bzw. 600 €, was einer jährlichen Abnahme um 100 bzw. 200 € entspricht. Durch den Pauschalbetrag profitieren besonders kleinere, gewerblich genutzte, Fahrzeuge mit niedrigeren Kaufpreisen. Die folgende Gleichung stellt die Änderungen des Capex für private und gewerbliche Nutzer dar:

$$a_{capex}^{f,t} = \left(\left((NLP_{r,s,t} + \kappa_{r,s,t} \cdot p_{Batt,s,t} - M_{f,t} - P1_t) \cdot (1 + i_{u,t})^{T_u} - RW_{f,s,t} \right) \cdot \frac{i_{u,t}}{(1 + i_{u,t})^{T_u} - 1} + I_{LISf,t} \cdot \frac{(1 + i_{u,t})^{T_{LISf,t}} \cdot i_{u,t}}{(1 + i_{u,t})^{T_{LISf,t}} - 1} \right) \cdot (1 + VAT)_f$$

$P1_t$: Subvention im Jahr t [€]

Senkung des Investitionszinssatzes

Eine weitere Politikmaßnahme stellt die Einrichtung eines KfW-finanzierten Kreditprogramms zur vergünstigten Finanzierung von Elektrofahrzeugen für private Halter dar. In diesem Zusammenhang würde der Investitionszinssatz $i_{u,t}$ für den finanzierten Kauf eines Elektrofahrzeuges von 5 % auf 4 % gesenkt (vgl. Gleichung oben). Im Gegensatz zur pauschalen Kaufpreisreduktion werden hierbei alle Segmente prozentual gleichermaßen begünstigt. In absoluten Werten profitieren dabei die größeren Segmente am

⁷⁶ Vgl. TAB (2013) für eine Diskussion der externen Effekte und ihrer Höhe.

stärksten. Bei dieser Maßnahme wird davon ausgegangen, dass alle privaten Käufer das Finanzierungsangebot in Anspruch nehmen. Dennoch soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass neben dem kreditfinanzierten Kauf die Bezahlung in bar in Deutschland durchaus verbreitet ist.

Sonder-AfA

Durch die schnelle technologische Entwicklung der Batterietechnologie ist die Möglichkeit der Sonder-AfA für gewerblich genutzte Elektrofahrzeuge zu rechtfertigen. Dies würde dazu führen, dass 50 % der gesamten Abschreibungssumme im ersten Jahr abgeschrieben werden können. Finanziell bedeutet dies eine frühere Wirksamkeit der Abschreibung. Die diskontierte Summe der veränderten Abschreibungen lässt sich mit untenstehender Gleichung berechnen. Das Ergebnis kann gleichgesetzt werden mit einer Senkung des Investitionszinssatzes über die gesamte Zeit von 5 % auf 3,955 %. Da der Förderbetrag prozentual vom Kaufpreis abhängt, werden alle Segmente gleichermaßen bevorteilt.

$$C_0(i) = \sum_{t=1}^N \frac{Z_t}{(1+i)^t}$$

Z_t : Abschreibung im Jahr t [€]

Änderung Dienstwagenbesteuerung⁷⁷

Das Jahressteuergesetz 2013 beinhaltet die Senkung des maßgeblichen Bruttolistenpreises für elektrisch angetriebene Dienstwagen um zunächst 500 € pro kWh Batterieleistung (Rückgang bis 2020 auf 150 € pro kWh). Als Obergrenze der Reduktion wurde 10.000 € für 2013 festgelegt, danach jährlich um 500 € abnehmend bis 2020. Durch die bereits ausführlich beschriebene 1 %-Regelung wird die monatliche finanzielle Belastung des Nutzers gesenkt. Vorweggenommen werden kann an dieser Stelle bereits die Tatsache, dass die Auswirkung auf die TCO eher gering ist, da diese zusätzlich noch aus dem unternehmensseitigen Baustein besteht. Die Summe der TCO des Nutzers und Halters ändert sich dadurch nur gering. Die Schwächen dieses Ansatzes werden an anderer Stelle ausführlich diskutiert. Eine Kombination mit der bereits genannten

⁷⁷ In den Szenarien wurde noch mit der alten Regel der geldwerten Versteuerung der Dienstwagen gerechnet. Allerdings wurden gegen Projektabschluss die EV hier steuerlich besser gestellt, was aber nicht mehr umfänglich in den Rechnungen berücksichtigt werden konnte. In den Berechnungen zu den Politikmaßnahmen ist die aktuelle Gesetzeslage entsprechend berücksichtigt. Letztere zeigen, dass die Gesetzesänderungen kaum Auswirkungen auf die Ergebnisse haben.

Sonder-AfA wird aus diesem Grund zusätzlich betrachtet. Die folgende Gleichung stellt die Änderung in der Berechnung dar.

$$g_{f,t} = \left(NLP_{r,s,t} + \kappa_{r,s,t} \cdot p_{Batt_{s,t}} - \min(P2_{t,max}; \kappa_{r,s,t} \cdot P2_t) \right) \cdot (1 + VAT)_f \cdot (EA_{f,t} + 0.0003 \cdot \theta d_t) \cdot st \cdot 12$$

$P2_t$: Reduktion des Batteriepreises im Jahr t [€/kWh]

$P2_{t,max}$: Obergrenze der Reduktion des Batteriepreises im Jahr t [€]

Kfz-Steuer-Befreiung für REEV und PHEV

Nach derzeitigem Steuerrecht sind BEV komplett Kfz-steuerbefreit, für REEV und PHEV fallen nur hubraumbasierte Sockelbeträge an. Auch bei leichten Nutzfahrzeugen sind BEV komplett steuerbefreit, allerdings wird in diesem Segment sonst die Höhe der Steuer rein gewichtsbasiert ermittelt. PHEV, REEV sowie konventionelle Antriebe werden demnach gleich besteuert (Abbildung 3-6). Die vorgeschlagene Maßnahme zur Förderung von Elektrofahrzeugen beinhaltet die vollständige Steuerbefreiung von PHEV und REEV (Pkw und leichte Nutzfahrzeuge). Besonders bei den leichten Nutzfahrzeugen entsteht dadurch ein erheblicher steuerlicher Vorteil gegenüber den konventionellen Antrieben. Bei Pkw fällt lediglich der hubraumbasierte Sockelbetrag weg, der jedoch ohnehin bei REEV bauartbedingt kleiner als bei konventionellen Motoren ist.

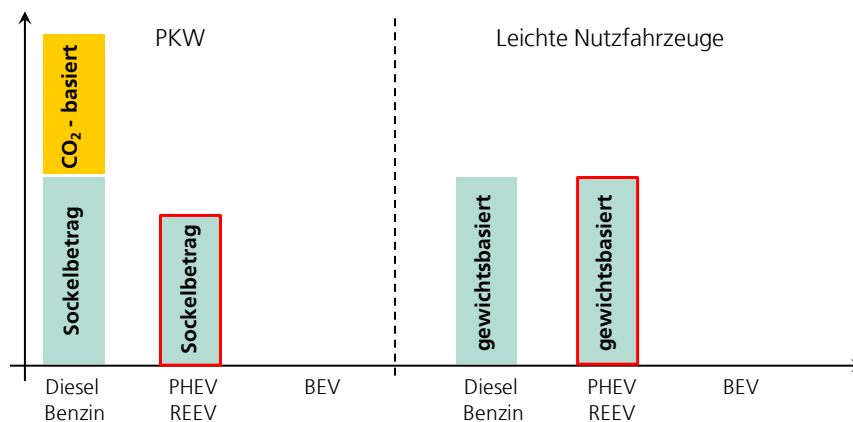


Abbildung 3-6: Schematische Darstellung der Kfz-Steuer

Für alle oben genannten Maßnahmen werden Modellrechnungen durchgeführt um den Einfluss auf die TCO und in der Folge auf die Entscheidung der Neuwagenkäufer abzuschätzen. Neben dem erforderlichen finanziellen Aufwand werden auch die Mitnahmeeffekte der einzelnen Maßnahmen ausgewiesen.

3.5 Diskussion

In diesem Kapitel wurde das generelle Vorgehen im Modell ALADIN zur Berechnung des Markthochlaufes von Elektrofahrzeugen bis 2020 vorgestellt. Zusätzlich wurden zentrale Rahmenbedingungen und die formale Berechnung der TCO sowie des Markthochlaufes erläutert.

Modelle sind stets nur vereinfachte Darstellungen der Realität für einen speziellen Zweck.⁷⁸ Dies gilt ebenso für das Modell ALADIN und die notwendigen Vereinfachungen zur Erreichung der Ziele dieses Forschungsvorhabens (vgl. Kapitel 2). Im Rahmen der Vereinfachungen und durch den Stand der Forschung ergeben sich Unsicherheiten in der Markthochlaufberechnung.⁷⁹ Vier Quellen für Unsicherheiten und der Umgang mit Ihnen in der vorliegenden Studie sind in Abbildung 3-7 dargestellt.

1. Unsicherheiten durch endliche Stichprobe

- Hochrechnung von einigen Fahrzeugen auf viele



Darstellung durch
Konfidenzintervalle

2. Unsicherheiten in den Rahmenbedingungen

- Kraftstoff- und Batteriepreise bis 2020
- Neuzulassungen, Modellangebot



Darstellung
durch Szenarien
und Sensitivitäten

3. Systematische Unsicherheiten in der Modellierung:

- Modell ist Vereinfachung der Kaufentscheidung
- Extremereignisse nicht abgebildet



Nicht darstellbar

4. Unsicherheiten durch Aufzeichnungsdauer:

- Ersetzbarkeit und elektrische Fahranteile basieren auf begrenztem Aufzeichnungszeitraum (1 – 4 Wochen)



Berechnet.

Abbildung 3-7: Übersicht verschiedener Unsicherheiten in den Rechnungen

Es existiert zum einen in der Untersuchung des Fahrverhaltens eine statistische Unsicherheit aufgrund der Stichprobengröße der Fahrprofile. Die resultierende Unsicherheit kann sehr gut durch die gerade vorgestellten Konfidenzintervalle quantitativ angegeben werden. Das Ergebnis für die vorliegende Studie zeigt Abbildung 5-11 in Abschnitt 5.3.

⁷⁸ Siehe Frigg und Hartmann (2012) für eine ausführliche Diskussion des Modellbegriffs.

⁷⁹ An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, dass im vorliegenden Bericht keine Prognosen entwickelt werden, sondern Szenarien für mögliche zukünftige Entwicklungen. Diese sind zusammenfassend dargestellt.

Eine zweite zentrale Quelle von Unsicherheit ist die zukünftige Entwicklung zentraler Rahmenbedingungen wie der Batterie- oder Rohölpreise. Deren Entwicklung ist nicht Gegenstand der vorliegenden Studie. Ihr Einfluss und die Richtung des Einflusses werden aber durch die Verwendung von Szenarien und der Berechnung von Sensitivitäten sehr deutlich und transparent dargestellt (vgl. Abschnitte 3.3 und 5.6).

Eine weitere Quelle der Unsicherheit liegt in der begrenzten Aufzeichnungsdauer der Fahrprofile, auf deren Basis das gesamte Fahrverhalten eines Nutzers beurteilt wird, insbesondere der technischen Ersetzbarkeit aller Fahrten durch BEV und dem elektrischen Fahranteil von PHEV/REEV. Erste Analysen haben den enormen Einfluss der Aufzeichnungsdauer und die möglichen Fehlschlüsse bei der Verwendung einer zu kurzen Aufzeichnungsdauer gezeigt.⁸⁰ Die verbleibende Unsicherheit auch bei längeren Aufzeichnungszeiträumen kann auf ähnliche Art und Weise wie oben durch Konfidenzintervalle analysiert und quantifiziert werden (für jeden einzelnen Nutzer mit seinem individuellen Fahrverhalten). Dies ist erfolgt, das Vorgehen und die Ergebnisse sind in Abschnitt 7.5 auf Seite 164 ausführlich dargestellt. Einzelne bzw. seltene längere Fahrten können aber auch damit nicht abgedeckt werden.

Schließlich stellt jedes Modell notwendigerweise eine Vereinfachung der Wirklichkeit dar. Im vorliegenden Falle gilt dies insbesondere für die Kaufentscheidungen der verschiedenen Nutzergruppen (Privatnutzer, Flotten, Dienstwagen). Diese sind teilweise sehr komplex und nicht vollständig nachzuvollziehen. Zudem sind Extremereignisse (bspw. eine Wirtschaftskrise) oder ein grundlegender Politikwechsel nicht im Modell abgebildet. Diese Unsicherheiten in der Modellierung können nicht quantifiziert sondern nur diskutiert werden. Dies erfolgt in Kapitel 6.

Im Rahmen der Zielsetzung des Forschungsvorhabens sei darauf hingewiesen, dass volkswirtschaftliche Effekte eines Markthochlaufes von Elektrofahrzeugen in Deutschland im Rahmen der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt werden können.

Nachdem in diesem Kapitel das Modell und die nötigen Vereinfachungen vorgestellt wurden, sind neben den Rahmenbedingungen die techno-ökonomischen Daten für die Modellierung der Fahrzeuge und des Fahrzeugmarktes sowie die verwendeten Fahrprofile von entscheidender Bedeutung. Diese Daten werden im folgenden Kapitel ausführlich erläutert und vorgestellt.

⁸⁰ Siehe Gnann, Plötz, Zischler und Wietschel (2012).

4 Daten, Parameter und Szenarien

4.1 Einleitung

Im vorherigen Kapitel ist die generelle Methodik für das Markthochlaufmodell und dessen Umsetzung mit dem Simulationsmodell ALADIN beschrieben worden. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Methodik und dem generellen Forschungsvorgehen. In diesem Kapitel werden zusätzliche Eingangsdaten und Annahmen sowie methodische Details beschrieben.

Um ein möglichst transparentes Vorgehen in der Bestimmung der Gesamtnutzungskosten für Elektrofahrzeuge und dem möglichen Markthochlauf zu gewährleisten, werden alle Daten – soweit rechtlich möglich – und Annahmen der Berechnungen veröffentlicht. Es wird nur auf öffentlich zugängliche Studien verwiesen und die Berechnungsformeln für alle Berechnungen werden offengelegt. Öffentliche Studien betreffen beispielweise Bestands- und Neuzulassungsdaten des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA), der Zweiten Zwischenbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität (inkl. Anhang) sowie Studien verschiedener Einrichtungen (bspw. IFEU, Statistisches Bundesamt). An einigen Stellen haben auch Experten der NPE direkt die Datengrundlage geliefert. Auf die konkreten Quellen wird in den einzelnen Abschnitten verwiesen. Im Folgenden werden zudem einige zentrale Datenquellen kurz beschrieben und erläutert.

Einen wichtigen Bezugspunkt bilden die Annahmen aus den bisherigen Arbeiten der NPE. Für den zweiten Zwischenbericht der NPE wurde in der Nationalen Plattform Elektromobilität ein Total Cost of Ownership-/Volumenmodell entwickelt und für einen Markthochlauf von Elektrofahrzeugen sowie eine Bewertung von Fördermaßnahmen eingesetzt.⁸¹ Dieses wird im Folgenden als *Markthochlaufmodell 2011* bezeichnet. Bei der Festlegung von Fahrzeugparametern (Nettolistenpreise, Verbräuche, Batteriegrößen, Entladetiefen) sowie energiewirtschaftlichen Rahmendaten (Kosten für Installation und Betrieb von Ladeinfrastruktur sowie Preise für Energieträger und Kraftstoffe) werden die Angaben der Nationalen Plattform Elektromobilität aus dem Zweiten Zwischenbericht verwendet, teilweise aktualisiert und erweitert. In diesem Kapitel werden diese Daten ausführlich vorgestellt eine Übersicht findet sich in Abschnitt 7.1.⁸²

⁸¹ Siehe NPE (2011a), NPE (2011b) und Pfahl (2013).

⁸² Diese Daten sind auf einem Workshop am 26. Februar 2013 mit Vertretern der AG7 besprochen und abgestimmt worden. Die letzte Entscheidung und Verantwortung bzgl. der Daten und Parameter liegt jedoch bei den Autoren.

4.2 Rahmendaten Fahrzeugmarkt

4.2.1 Zahl der Neuzulassungen

Die Anzahl der Neuzulassungen bei den Pkw war in den vergangenen Jahren relativ konstant, lediglich im Krisenjahr 2009 gab es größere Abweichungen (siehe Abbildung 4-1). Dies erklärt sich u. a. durch die Umweltprämie, die besonders den Kauf von kleineren und mittleren Fahrzeugen stimuliert hat.⁸³

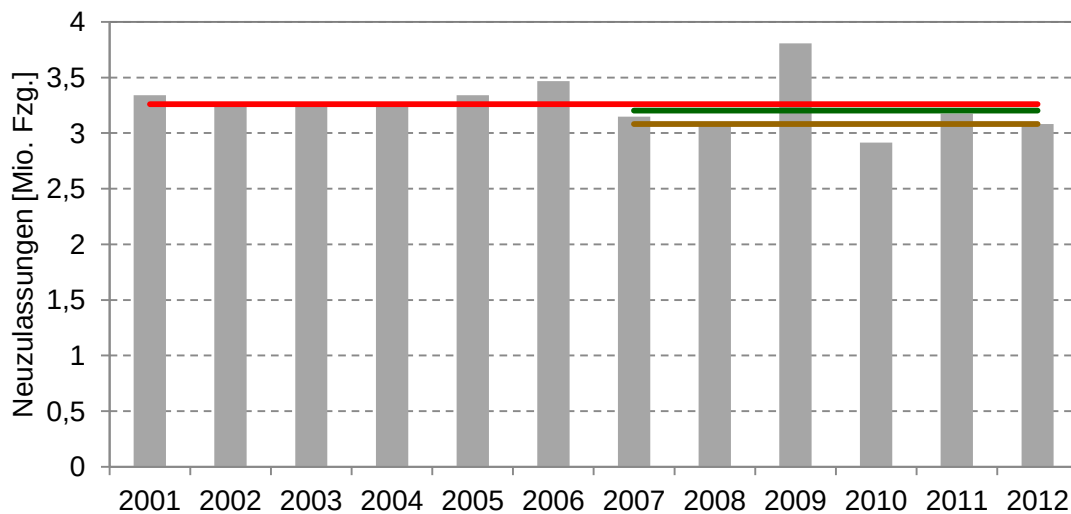


Abbildung 4-1: Anzahl Neuzulassungen 2001 bis 2012⁸⁴

Zur Festlegung der zukünftigen Entwicklung der Neuzulassungen für das Markthochlaufmodell wird zunächst der Mittelwert der Neuzulassungen über unterschiedliche Zeiträume gebildet. Dabei zeigt sich, dass das langjährige Mittel (rote Linie) der letzten 11 Jahre mit 3,26 Millionen deutlich über den Absatzzahlen der letzten Jahre liegt. Das Mittel von 2007 bis 2012 ohne die Berücksichtigung des Wertes von 2009 (braune Linie) scheint mit etwa 3,1 Millionen Neuzulassungen pro Jahr den leicht rückläufigen Trend gut abzubilden. Berücksichtigt man hingegen den hohen Wert von 2009 (grüne Linie), so liegt der Durchschnitt deutlich über den heutigen Verkaufszahlen. Das Mittel von 2007 bis 2012 (ohne die Berücksichtigung des Wertes von 2009) ergibt etwa

⁸³ Siehe Höpfner, Hanusch und Lambrecht (2009) für eine Analyse der Umweltprämie.

⁸⁴ Eigene Auswertung von KBA: Neuzulassungen von Personenkraftwagen im Januar 2001 - (2012) nach Segmenten und Modellreihen (FZ 11)

3,1 Millionen Neuzulassungen pro Jahr. Diese Zahl wird für die Anzahl der Neuzulassungen pro Jahr verwendet.⁸⁵

Bei den leichten Nutzfahrzeugen gestaltet sich diese Bewertung ungleich schwieriger. Im Gegensatz zum Pkw-Markt fanden dort in der Vergangenheit Wellenbewegungen bei den Absatzzahlen statt, die eher mit Konjunkturzyklen zu korrelieren scheinen. Aus Abbildung 4-2, welche den Verlauf der Neuzulassungen von 2002 bis 2011 darstellt, wird ersichtlich, dass eine klare Trendentwicklung nur schwer erkennbar ist. Im Mittel wurden 2007 bis 2011 etwa 200.000 Fahrzeuge pro Jahr neu zugelassen. Das IFEU geht zwar bis 2020 von jährlich 170.000 Neuzulassungen aus,⁸⁶ unter Berücksichtigung, dass der Onlinehandel wahrscheinlich eher zunimmt, scheint dieser Wert etwas niedrig. Es scheint daher realistischer zu sein, das hohe Niveau der Jahre 2010 und 2011 fortzuführen und bis 2020 von 200.000 Neuzulassungen pro Jahr auszugehen.

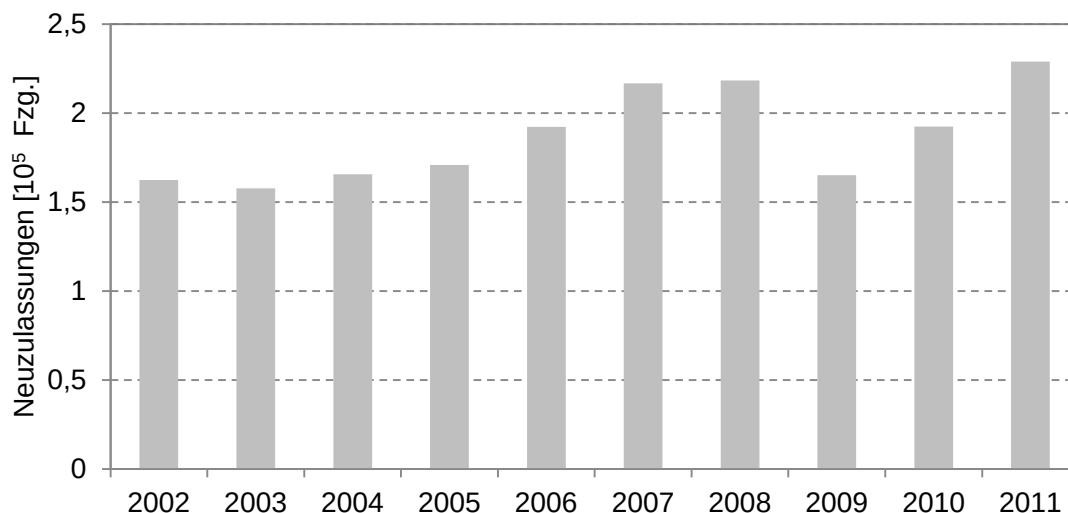


Abbildung 4-2: Anzahl Neuzulassungen leichter Nutzfahrzeuge 2002 bis 2011⁸⁷

4.2.2 Aufteilung nach Segmenten

Der nächste Schritt ist die Aufteilung der jährlichen Neuzulassungen auf die einzelnen Segmente. Aus Gründen der Datenverfügbarkeit der Fahrzeugparameter und der Modellkomplexität wurde entschieden, an dieser Stelle eine Aggregation vorzunehm-

⁸⁵ Auch andere Absatzprognosen gehen mittelfristig von einem konstanten Absatz von etwa 3,1 Millionen Fahrzeugen aus; siehe CAMA (2011).

⁸⁶ Siehe Knörr, Heidt und Schacht (2012, S. 53).

⁸⁷ Eigene Auswertung von KBA (2012b).

men: *Klein* umfasst Mini und Kleinwagen; *Mittel* umfasst Kompaktklasse, Mittelklasse, Mini-Vans und kleine Geländewagen; *Groß* umfasst Obere Mittelklasse, Oberklasse, Große Geländewagen und Großraum-Vans. Die verwendeten Anteile der aggregierten Segmente an den Neuzulassungen orientieren sich an den Mittelwerten von 2007 bis 2012. Abbildung 4-3 zeigt dies in einer Übersicht.⁸⁸

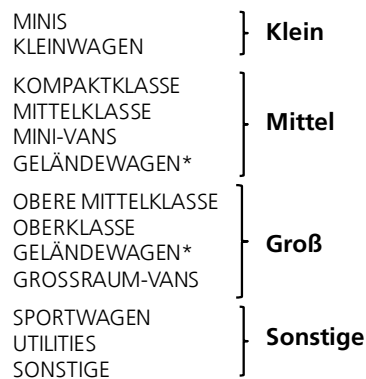
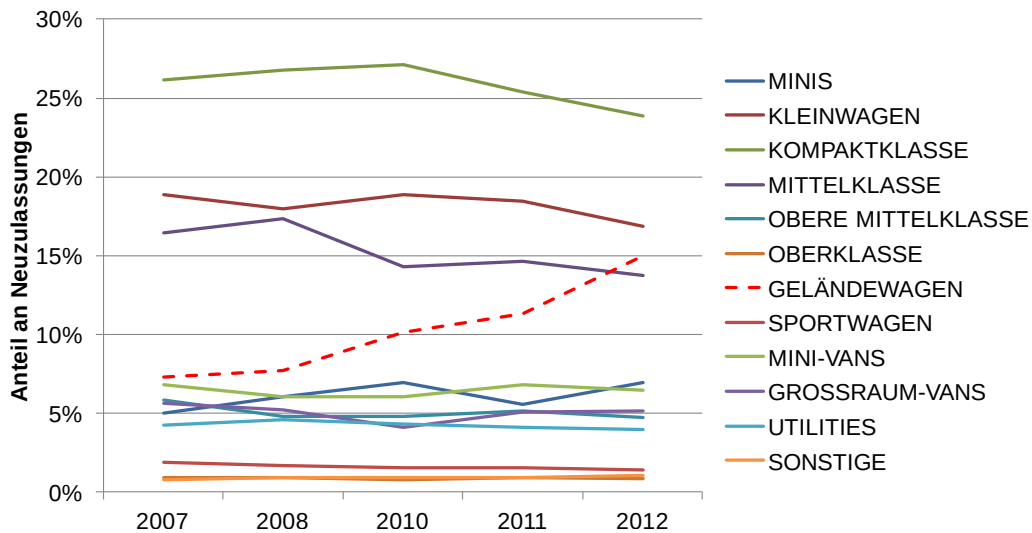


Abbildung 4-3: Aggregationschema der KBA-Segmente⁸⁹

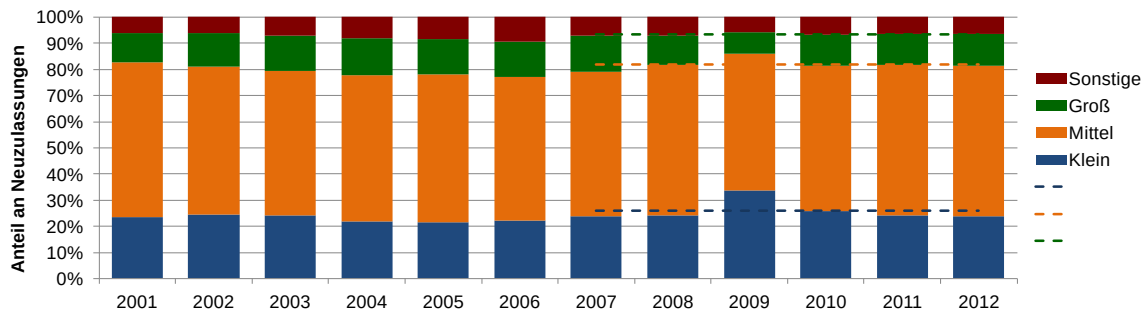
Zur Abschätzung der zukünftigen Entwicklung wird auch an dieser Stelle zunächst untersucht, wie sich die Anteile der Segmente in der jüngeren Vergangenheit veränderten. Bereits vor der ersten Aggregation ist aufgefallen, dass besonders der Anteil der Geländewagen deutlich zugenommen hat. (vgl. Abbildung 4-4). Untersucht man diese Zunahme genauer, so wird klar, dass die erheblich gesteigerte Modellvielfalt bei den SUVs deutlich zu dieser Entwicklung beigetragen hat. Gerade bei kleineren und mittelgroßen SUVs stiegen die Verkaufszahlen kontinuierlich an. Für die Segmentaggregation bedeutet dies aber, dass die Geländewagen zunehmend auch in der Mittelklasse anzutreffen sind und nicht wie Anfang der 2000er Jahre ausschließlich in der Oberklasse. Um diesen Entwicklungen Rechnung zu tragen, wird das Segment Geländewagen anteilig in die Mittel- und Oberklasse aufgeteilt. Die Grenzziehung findet dabei nach Gewicht unterhalb des Audi Q5 statt.

⁸⁸ Die unter *Sonstige* zusammengefassten Segmente machen nur einen geringen Teil der Neuzulassungen aus und werden im Folgenden vernachlässigt.

⁸⁹ Die Geländewagen werden gewichtsabhängig aufgeteilt zu Mittelklasse und Groß.

Abbildung 4-4: Anteile der Segmente 2007 bis 2012⁹⁰

Betrachtet man die daraus folgende Aggregation für die letzten elf Jahre (Abbildung 4-5) so wird deutlich, dass sich bei der grundlegenden Aufteilung keine großen Änderungen ergaben. Nichtsdestotrotz fanden innerhalb der aggregierten Segmente Veränderungen statt. Repräsentativ dafür sind die Wanderungen vom Mittelklassesegment zu den SUVs oder von den Kleinwagen zu den Minis zu nennen (vgl. Abbildung 4-4).

Abbildung 4-5: Anteile der aggregierten Segmente 2001 bis 2012⁹¹

Diese Segmentaufteilung wird aufgrund der konstanten Entwicklung in der Vergangenheit bis 2020 weiterhin verwendet. Der Anteil der aggregierten Segmente an den Neuzulassungen ist in Tabelle 4-1 zusammengefasst.

⁹⁰ Eigene Auswertung von KBA (2012b).

⁹¹ Eigene Auswertung von KBA (2012b).

Tabelle 4-1: Anteil der aggregierten Segmente an den Neuzulassungen

Segment	Klein	Mittel	Groß	Sonstige
Anteil Neuzulassungen	26 %	56 %	11,5 %	6,5 %

Bei der Aufteilung der Neuzulassungen fällt auf, dass die Gruppe *Mittel* mit über 50 % den größten Anteil der Neuzulassungen ausmacht. Hier wäre eine weitere Differenzierung bspw. in die KBA-Segmente Kompaktklasse und Mittelklasse oder kleine und große Mittelklasse denkbar. Dabei ist allerdings zu beachten, dass diese Aufteilung einen hohen Bedarf an weiteren Daten und Informationen in anderen Teilen der TCO- und Markthochlaufrechnungen nach sich zieht. So müssten für diese Segmente jeweils separate Nettolistenpreise, Energieverbräuche und Batteriegrößen bestimmt oder festgelegt werden, die derzeit nicht vollständig empirisch vorliegen und mit vertretbarem Aufwand auch kaum zu generieren sind. Vereinfachungen wie eine lineare Interpolation in zwei Stufen zwischen den Gruppen Klein und Groß bringen eher eine Scheingenauigkeit. D. h. die Daten müssten generell neu bestimmt werden und die Aufspaltung des Segments bringt zusätzliche Unsicherheiten in die Modellierung. Zudem ist bei den verwendeten Fahrprofilen des Mobilitätspanels nur eine Segment-spezifische Zuordnung in den Gruppen Klein, Mittel und Groß möglich, aber keine weitere Differenzierung (derartige Daten wurden im Mobilitätspanel nicht erhoben). Insgesamt scheint die höhere Genauigkeit durch eine Differenzierung der Neuzulassungen in vier Segmente durch die verringerte Genauigkeit aufgrund der Bestimmung bzw. Festlegung weiterer Daten (Verbräuche und Nettolistenpreise) kompensiert zu werden, so dass der mögliche aber geringe Erkenntnisgewinn einem deutlichen Mehraufwand bei der Parameterfestlegung gegenübersteht. Im Rahmen dieser Studie wird der Ansatz, die Mittelklasse zu teilen, daher nicht weiterverfolgt. Im Rahmen weiterführender Studien sollte dies aber in Betracht gezogen werden.

Der letzte Schritt zur Aufteilung der Neuzulassungen stellt die Zuordnung zu Nutzergruppen rein gewerblich (bzw. Flotten), privat und Dienstwagen dar.⁹² Private Nutzer sind dabei diejenigen Nutzer deren Fahrzeug privat gehalten wird. Bei gewerblich gehaltenen Fahrzeugen werden rein gewerblich genutzte Fahrzeuge (oder auch Flottenfahrzeuge) und Dienstwagen unterschieden. Dienstwagen werden dabei auch privat genutzt. Es wird davon ausgegangen, dass etwa 30 % der Neuzulassungen als Dienstwagen genutzt werden, 40 % privat und 30 % rein gewerblich.⁹³ Anhand eigener Auswertungen der Daten des Mobilitätspanels werden die Dienstwagen auf die einzel-

⁹² Diese Aufteilung wurde auch im Markthochlaufmodell 2011 verwendet; siehe NPE (2011a und b) sowie Pfahl (2013).

⁹³ Siehe NPE (2012).

nen Segmente aufgeteilt (12,6 % klein, 58,6 % mittel und 28,8 % groß). Mit Hilfe der KBA-Zulassungszahlen, die auf der Segmentebene nur zwischen gewerblichen und privaten Haltern unterscheiden, können anschließend die verbleibenden Anteile der rein gewerblich und der privat genutzten Fahrzeuge festgestellt werden. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Abbildung 4-6 dargestellt.

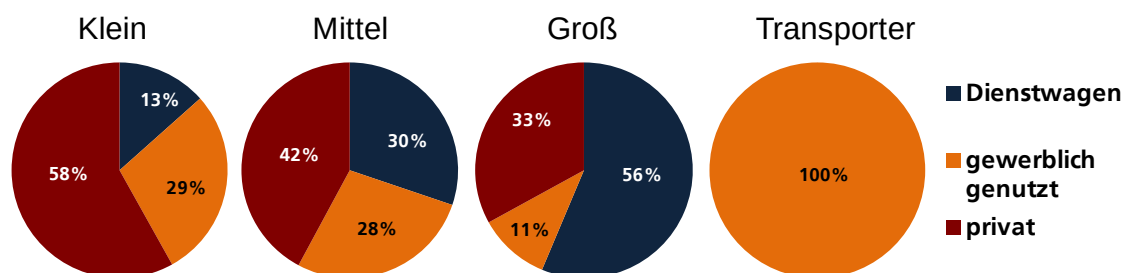


Abbildung 4-6: Anteil der Nutzergruppen in den einzelnen Segmenten

Das Ergebnis der obigen Berechnungen liefert die Anzahl der Neuzulassungen je Segment und Nutzergruppe als grundsätzliches Marktvolumen der Neuzulassungen. Die Zahlen sind in Tabelle 4-2 zusammengefasst. Das Segment Sonstige wird nicht betrachtet.

Tabelle 4-2: Gesamte Neuzulassungen nach Haltergruppen

Segment	Privat	Dienstwagen	Gewerblich	Gesamt
Klein	475.300	107.000	233.200	815.500
Mittel	694.300	497.600	455.000	1.646.900
Groß	143.300	244.600	46.300	434.200
Leichte NFZ	-	-	204.000	204.000
Gesamt	1.312.900	849.200	938.500	3.100.600

Die Marktanteile in den Gruppen werden auf diese Neuzulassungszahlen übertragen.

4.2.3 Restwertberechnung

Restwerte spielen vor allem im gewerblichen Bereich eine wichtige Rolle da die Fahrzeuge oftmals nach kurzer Haltedauer weiterverkauft werden.⁹⁴ Große Datenbanken und Statistiken zu Restwerten (bspw. von DAT und Schwacke) sind nicht vollständig öffentlich zugänglich⁹⁵ und damit intransparent. Als Alternative wird hier eine Berechnung der Restwerte von Pkw basierend auf einer Studie des Statistisches Bundesamtes verwendet.⁹⁶ Dabei wird eine Regression des Verkaufspreises mit mehreren Einflussfaktoren durchgeführt. Für das Vorgehen zur Restwertberechnung sind das Alter, die Fahrleistung und der Neupreis des Fahrzeuges die wichtigsten Faktoren:

$$\ln \text{Verkaufspreis} = \alpha + \beta_1 \text{Alter} + \beta_2 \frac{\text{km}}{\text{Monat}} + \beta_3 \ln \text{Neupreis} + \varepsilon.$$

Dabei bezeichnet $\ln$ den natürlichen Logarithmus und der letzte Summand ε steht für nicht-modellierte normalverteilte Zufallszahlen.⁹⁷ Dieser Zusammenhang ist für festen Neupreis in folgender Abbildung beispielhaft dargestellt (mit den Parameterwerten aus Tabelle 4-7).

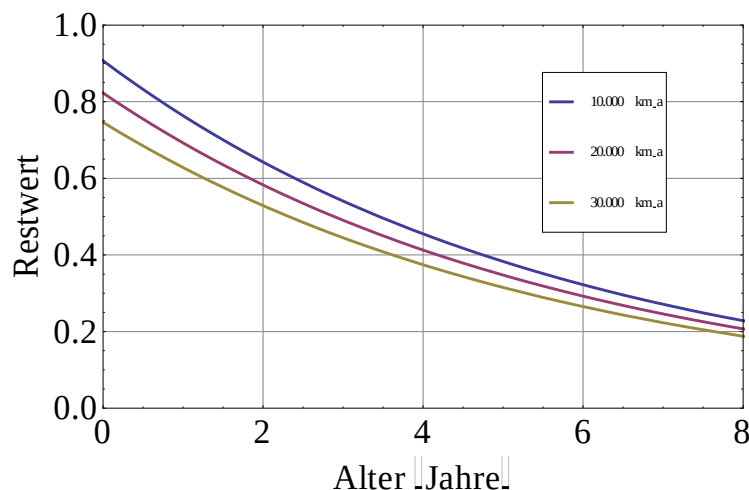


Abbildung 4-7: Restwert eines Pkw in Abhängigkeit des Alters für festen Neupreis und verschiedene Jahresfahrleistungen

⁹⁴ Vgl. NPE (2011a und b).

⁹⁵ Der zugrundeliegende Datensatz kann nicht direkt exportiert werden, nur einfache Abfrage auf Basis der hinterlegten statistischen Modelle ist möglich.

⁹⁶ Der Ansatz und Parameter entstammen Dexheimer (2003); Linz, Dexheimer, Kathe (2003).

⁹⁷ Siehe Dexheimer (2003) für weitere Details. Nicht verwendet werden bspw. die Abhängigkeit der Restwerte von der Fahrzeugmarke, der Fahrzeugfarbe oder dem Monat des Verkaufs (siehe Dexheimer (2003)). Erläuterungen zur Regression allgemein finden sich beispielsweise in Fahrmeir, Kneib und Lang (2009).

Die Berechnung der Restwerte für das TCO-Modell erfolgt damit gemäß:

$$RW_{f,s} = e^{\alpha} \cdot e^{12 \cdot \beta_1 \cdot a} \cdot e^{\frac{\beta_2}{12} JFL_f} \cdot (NLP_{r,s,t} + \kappa_{r,s,t} \cdot p_{Batt_{s,t}})^{\beta_3} \cdot (1 + VAT)_f.$$

$RW_{f,s,t}$: Restwert des Fahrzeugs des Typs s des Fahrprofils f im Jahr t

a : Alter des Fahrzeugs (hier analog zur Fahrzeugnutzungsdauer T)

JFL_f : Jahresfahrleistung des Fahrprofils f

$NLP_{r,s,t}$: Nettolistenpreis eines Fahrzeugs der Größenklasse r und des Typs s ohne Batterie im Jahr t

$\kappa_{r,s,t}$: Kapazität der Batterie eines Fahrzeugs der Größenklasse r und des Typs s im Jahr t

$p_{Batt_{s,t}}$: Batteriepreis für ein Fahrzeug des Typs s im Jahr t

$(1 + VAT)_f$: Faktor zur Berücksichtigung der Mehrwertsteuer (engl. Value Added Tax, VAT), der vom Halter des Fahrprofils abhängt

Die Parameter für die Berechnung sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 4-3: Parameter für Restwertberechnung⁹⁸

Variable	Parameter	Wert	Standard-Abweichung
Alter	β_1	$-1,437 \cdot 10^{-2}$	$2,79 \cdot 10^{-6}$
Monatsfahrleistung	β_2	$-1,17 \cdot 10^{-4}$	$6,13 \cdot 10^{-7}$
In(Neupreis)	β_3	0,91569	$4,42 \cdot 10^{-4}$
Konstante	α	0,97948	$3,6 \cdot 10^{-3}$

Im Gegensatz hierzu wurde in der ursprünglichen TCO-Rechnung, dem Markthochlaufmodell 2011, folgendes Vorgehen verwendet: „Für den Restwert der Elektrofahrzeuge wurde von den empirischen Restwerten des Konventionellen Vergleichsfahrzeugs ausgegangen, der um die höheren Antriebskosten von Elektrofahrzeugen und ihren TCO-Vorteilen in der Zweitnutzung – aufgrund der geringeren Unterhaltskosten – korrigiert wurde.“⁹⁹ Das heißt als Restwert wurde folgendes angesetzt:

$$\text{Restwert} = \text{Restwert konventionelles Fzg.} + \text{TCO-Vorteil im Verbrauch.}$$

Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass er dem derzeit wohl eher vorsichtigen Verhalten von Leasinggesellschaften in der Abschätzung von Restwerten entgegenkommt.¹⁰⁰ Allerdings ist dabei nicht berücksichtigt, dass die Nutzbarkeit der Batterie langfristig abnimmt, da die Batterien nur über eine begrenzte kalendarische Lebensdauer und

⁹⁸ Werte gemäß Dexheimer (2003).

⁹⁹ NPE (2011b, S. 26), vgl. auch Pfahl (2013, S. 95).

¹⁰⁰ Die Gültigkeit des Ansatzes ließe sich anhand der Restwerte für Dieselfahrzeuge prüfen.

Zyklusfestigkeit verfügen.¹⁰¹ Eine Abhängigkeit von der Jahresfahrleistung ließe sich wie oben über einen Regressionsansatz integrieren. In Abstimmung mit den Mitgliedern der AG7 der NPE wird das Verfahren mittels Regression nach dem Statistischen Bundesamt für alle Szenarien verwendet.

Zum Vergleich wird eine Variante gerechnet, in der das gerade beschriebene Verfahren Anwendung findet. Da die Jahresfahrleistung jedoch auch Einfluss auf die Restwerte hat und für die Restwerteberechnung nach Pfahl (2013) bekannt sein muss, welche Jahresfahrleistung der Zweitnutzer zurücklegt, werden für die Variante der Ansatz nach Pfahl (2013) und die Regression verbunden, indem man die Abhängigkeit des Restwertes vom Neupreis ignoriert wird. Das heißt für die Restwert wird $\beta_3 = 0$ und $\alpha = 1$ gesetzt. Das Ergebnis dieser Variante findet sich in Abschnitt 5.6.

4.2.4 Haltedauern

Die Haltedauern der Fahrzeuge bestimmen die Restwerte und Annuität in der TCO. Die Haltedauer eines Fahrzeuges ist zu unterscheiden vom Fahrzeugalter innerhalb einer Haltergruppe, insbesondere da Fahrzeuge, die erstmalig von einem gewerblichen Halter zugelassen wurden, über den Gebrauchtwagenmarkt in private Hand gehen. Der private Halter besitzt dann ein Fahrzeug, das bspw. sieben Jahre alt ist, von ihm aber erst drei Jahre gehalten wird. Die folgende Abbildung verdeutlicht den Unterschied zwischen Fahrzeugalter bei gewerblichen und privaten Haltern.

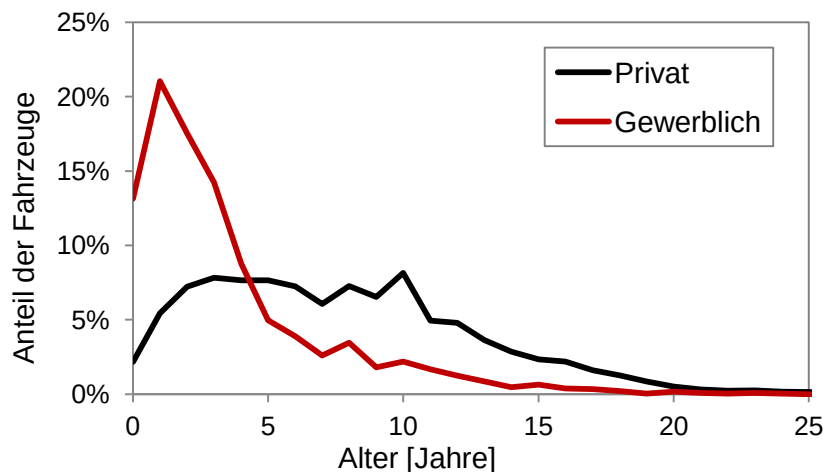


Abbildung 4-8: Fahrzeugalter privater und gewerblicher Halter im Bestand¹⁰²

¹⁰¹ Siehe Abschnitt 7.7 für eine Diskussion der Batterie Lebensdauer von Elektrofahrzeugen.

¹⁰² Eigene Auswertung auf Basis von MiD (2008).

Man erkennt deutlich, dass gewerbliche Fahrzeuge durchschnittlich weniger alt sind als private. Eine Aussage über die Haltedauern ist mit Hilfe der Abbildung nicht möglich, legt jedoch eine kürzere Haltedauer im gewerblichen Bereich nahe. Für die Bestimmung der Haltedauern werden die Annahmen der NPE mit Literaturangaben und dem durchschnittlichen Fahrzeugalter verglichen (siehe Tabelle 4-4).

Tabelle 4-4: Haltedauer und Fahrzeugalter nach verschiedenen Quellen¹⁰³

Haltedauer/Alter [Jahre]	Private Halter			Gewerbliche Halter			LNFZ
<i>Segment</i>	<i>Klein</i>	<i>Mittel</i>	<i>Gross</i>	<i>Klein</i>	<i>Mittel</i>	<i>Gross</i>	
Haltedauer laut NPE ^a	4 + 6	4 + 6	4 + 6	4 + 6	4 + 6	4 + 6	8
Ø Alter MiD2008 ^b	9,0	7,8	8,1	4,8	3,8	3,5	-
Stichprobe MiD2008	5.159	15.160	3.574	202	1.359	777	-
Mittelwert Alter MiD2008	Privat: 8,1			Gewerblich: 3,8			-
Haltedauer (Literatur)	6,2 ^c			3 – 4 ^d			-

Für die Haltedauern werden in Anbetracht der Literaturwerte die Werte in Tabelle 4-5 für die aktuellen Rechnungen verwendet.

Tabelle 4-5: Verwendete Halterdauer nach Haltergruppe

Private Halter:	6,2 Jahre
Gewerbliche Halter (Flotte und Dienstwagen):	3,8 Jahre

4.2.5 Lebensdauer und Verschrottung der Fahrzeuge

Die altersabhängige Außerbetriebnahme von Fahrzeugen ist wichtig für das im Markthochlauf verwendete Bestandsmodell. Dabei erfolgt die Modellierung der altersabhängigen Überlebenswahrscheinlichkeit $L(t)$ durch eine Weibullverteilung¹⁰⁴

$$L(t) = \exp[-(t/\tau)^\beta].$$

Die beiden Parameter τ und β werden anhand historischer KBA-Daten¹⁰⁵ wie folgt bestimmt. Die Wahrscheinlichkeiten werden mit Hilfe der Altersverteilung des Fahrzeugbestandes der Jahre 2001 bis 2009 berechnet. Untersucht wird die Veränderung in aufeinanderfolgenden Jahren (= Wahrscheinlichkeit für Löschung). Dies erfolgt für alle Jahre des Zeitraums mit anschließender Mittelung über alle Jahre. Die Jahre 2010 und

¹⁰³ (a) NPE2011b, S. 27). Summe = Nutzungsdauer 1. Kunde + Nutzungsdauer 2. Kunde; (b) Eigene Auswertung auf Basis von MiD2008; (c) DAT (2011); (d) VCD (2008).

¹⁰⁴ Siehe Plötz, Gnann und Wietschel (2012) für eine Diskussion sowie weitere Quellen.

¹⁰⁵ KBA (2011): Fahrzeugbestand im Überblick.

2011 liegen im Datensatz vor, werden aber wegen der Umweltprämie ausgeschlossen, da diese die Altersverteilung im Bestand deutlich gegenüber den Vorjahren verändern würde. Aus der Wahrscheinlichkeit $P(t)$ für eine Löschung eines Fahrzeuges im Alter t ergibt sich die altersabhängige Überlebenswahrscheinlichkeit gemäß

$$L(t) = 1 - \sum_{s < t} P(s)$$

Die Parameterwerte werden mittels der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt und sind in Tabelle 4-6 zusammengefasst.

Tabelle 4-6: Parameterwerte für Bestandsmodellierung

$\tau = 21,25$ Jahre	$\beta = 4,51$
----------------------	----------------

Die gemittelte altersabhängige Löschungswahrscheinlichkeit und die Überlebenswahrscheinlichkeit sind mit den Daten in folgender Abbildung dargestellt.

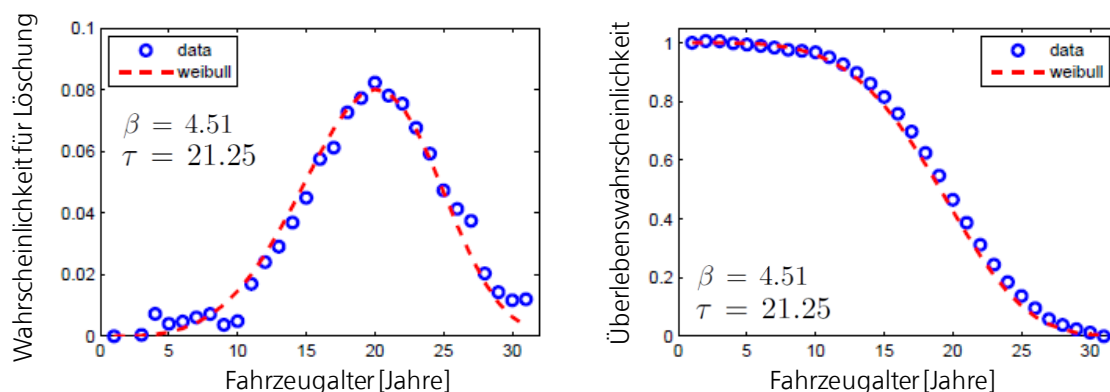


Abbildung 4-9: Lösungs- und Überlebenswahrscheinlichkeit für Pkw in Deutschland¹⁰⁶

Beachtet werden sollte, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit erst bei einem Fahrzeugalter von circa 15 Jahren merklich abnimmt. Hier ist zu bedenken, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit nicht mit der Altersstruktur des Bestandes verwechselt werden darf. Das durchschnittliche Fahrzeugalter der Pkw betrug 2012 circa 8,5 Jahre und steigt seit Jahren kontinuierlich an.¹⁰⁷ Die Überlebenswahrscheinlichkeit hingegen gibt an, bis zu welchem Alter ein Pkw gehalten wird. Dieses Alter ist deutlich höher und entspricht der durchschnittlichen Lebenserwartung eines Pkw und beträgt knapp 20

¹⁰⁶ Plötz, Gnann und Wietschel (2012).

¹⁰⁷ Vgl. KBA (2013).

Jahre¹⁰⁸. Mit der Modellierung obiger Überlebenswahrscheinlichkeit ergibt sich für die mittlere Lebenserwartung

$$T = \int_0^{\infty} L(t) dt = 19,4 \text{ Jahre}$$

und für das Durchschnittsalter des Bestandes

$$\bar{a} = \frac{1}{T} \int_0^{\infty} t L(t) dt = 10,0 \text{ Jahre.}$$

Die verwendete Überlebenswahrscheinlichkeit kann also die Eigenschaften der Altersverteilung des deutschen Pkw-Bestandes reproduzieren. Es ist zu beachten, dass die Verschrottung für den Bestandsaufbau bis 2020 aber kaum eine Rolle spielt.

4.3 Fahrzeugparameter

Im Markthochlaufmodell 2011 der NPE wurde eine Reihe von Antrieben und Fahrzeugsegmenten unterschieden (vgl. Tabelle 4-7).

Tabelle 4-7: Antriebsarten pro Segment im Zweiten Zwischenbericht der NPE¹⁰⁹

	Benzin	Diesel	BEV	PHEV / REEV
Klein	ja	-	ja	-
Mittel	-	ja	-	ja (Benzin)
Groß	-	ja	-	ja (Benzin)
LNF	-	ja	-	ja (Diesel)

Für die aktuellen TCO-Rechnungen und das Markthochlaufmodell werden die folgenden Antriebsarten pro Segment unterschieden (vgl. Tabelle 4-8).

Tabelle 4-8: Antriebsarten pro Segment für die diese Studie

	Benzin	Diesel	BEV	PHEV	REEV
Klein	ja	ja	ja	ja (Benzin)	ja (Benzin)
Mittel	ja	ja	ja	ja (Benzin)	ja (Benzin)
Groß	ja	ja	ja	ja (Benzin)	ja (Benzin)
LNF	ja	ja	ja	ja (Diesel)	ja (Diesel)

¹⁰⁸ Der Unterschied wird durch einen Vergleich mit der deutschen Bevölkerung klar: die Lebenserwartung beträgt circa 80 Jahre, aber das Durchschnittsalter ist deutlich geringer.

¹⁰⁹ Quelle: NPE (2011b)

Es werden also in allen Segmenten drei Elektrofahrzeugtypen betrachtet. Reine Batteriefahrzeuge werden möglicherweise im Segment Groß nur eine untergeordnete Rolle spielen und vermutlich nur von wenigen Herstellern angeboten werden. Dies wird explizit über Marken- und Segmenttreue abgebildet, die in Abschnitt 4.7.2 vorgestellt wird. Zudem werden Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge (PHEV) und Range-Extender-Fahrzeuge (REEV) explizit unterschieden.¹¹⁰ Es wird für die technischen Eigenschaften der Fahrzeuge (Batteriegrößen und Entladetiefen) näherungsweise davon ausgegangen, dass der PHEV über zwei Antriebe verfügt, die parallel betrieben werden können und der REEV seriell betrieben wird.¹¹¹ In diesem Sinne steht der REEV von der Batteriegröße und den Entladetiefen zwischen BEV und PHEV (siehe folgenden Abschnitt). Nicht weiter unterschieden werden sogenannte Micro- oder Mild-Hybride¹¹², also Fahrzeuge die über eine kleinere Batterie verfügen, geringe Strecken elektrisch zurücklegen können aber nicht über das Stromnetz geladen werden können. Es handelt sich daher nicht um Elektrofahrzeuge sondern um effiziente konventionelle Fahrzeuge. Da davon auszugehen ist, dass diese Fahrzeuge in der Zukunft eine zunehmende Rolle spielen werden, werden diese für die vorliegende Studie als Teil der konventionellen Pkw verstanden. Daher sind durch die zunehmende Hybridisierung konventioneller Pkw Preis- und Effizienzsteigerung implizit angenommen. Diese schlagen sich bspw. in den Nettolistenpreisen nieder (vgl. Abschnitt 4.3.3).

4.3.1 Batteriegrößen und Entladetiefen

Die bisher von der NPE betrachteten Batteriegrößen und Entladetiefen (DoD – *Depth of Discharge*) sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 4-9: Batteriegrößen und Entladetiefen Markthochlaufmodell 2011¹¹³

	BEV		REEV		PHEV	
	kWh	DoD	kWh	DoD	kWh	DoD
Klein	20	95 %	-	-	-	-
Mittel	-	-	17	90 %	-	-
Gross	-	-	-	-	8,5	50 %
NFZ	-	-	-	-	32	50 %

¹¹⁰ Diese Antriebskonzepte sind im Glossar grob erläutert.

¹¹¹ Die genaue technische Auslegung verschiedene Hybrid-Elektro-Fahrzeuge ist komplex und nur soweit Gegenstand dieser Studie wie die technischen Details für die TCO relevant sind und von Nutzern in der Kaufentscheidung wahrgenommen werden. Siehe bspw. Helms et al. (2011) für eine Beschreibung beider Konzepte im Rahmen dieser Studie.

¹¹² Siehe TAB (2013) für eine Erläuterung dieser Konzepte und Beispiele.

¹¹³ Vgl. Pfahl (2013).

Für die aktuellen TCO-Rechnungen und Markthochlaufanalysen werden diese Werte mit anderen Studien verglichen und ein neuer Vorschlag für Batteriegrößen und Entladetiefen erarbeitet. Der Vergleich weiterer Studien umfasst die OPTUM-Studie des Öko-Instituts, die Potenzialanalyse für den Wirtschaftsverkehr des Fraunhofer ISI sowie eine Studie zur Netzintegration von Elektrofahrzeugen geleitet vom FZ Jülich und ist in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 4-10: Vergleich von Batteriegrößen und Entladetiefen verschiedener Studien¹¹⁴

	Kleinst		Klein		Mittel		Gross		leichte NFZ	
BEV	<i>kWh</i>	<i>DoD</i>	<i>kWh</i>	<i>DoD</i>	<i>kWh</i>	<i>DoD</i>	<i>kWh</i>	<i>DoD</i>	<i>kWh</i>	<i>DoD</i>
FZ Jülich	19,0	80 %	19,6	80 %	24,6	80 %	-	-	-	-
NPE	-	-	20,0	95 %	-	-	-	-	-	-
OPTUM	19,2	89 %	22,4	89 %	27,2	89 %	-	-	-	-
ISI	-	-	16,0	75 %	20,0	75 %	32,0	75 %	40,0	75 %
PHEV	<i>kWh</i>	<i>DoD</i>	<i>kWh</i>	<i>DoD</i>	<i>kWh</i>	<i>DoD</i>	<i>kWh</i>	<i>DoD</i>	<i>kWh</i>	<i>DoD</i>
FZ Jülich	-	-	-	-	6,1	80 %	-	-	-	-
NPE	-	-	-	-	-	-	17,0	50 %	32,0	50 %
OPTUM	6,5	90 %	7,5	90 %	9,0	90 %	10,5	90 %	-	-
ISI	-	-	6,5	75 %	10,0	75 %	-	-	14,0	75 %
REEV	<i>kWh</i>	<i>DoD</i>	<i>kWh</i>	<i>DoD</i>	<i>kWh</i>	<i>DoD</i>	<i>kWh</i>	<i>DoD</i>	<i>kWh</i>	<i>DoD</i>
FZ Jülich			8,3	80 %	10,4	80 %	-	-	-	-
NPE	-	-	-	-	17,0	90 %	-	-	-	-
OPTUM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ISI	-	-	-	-	-	-	14,0	75 %	-	-

Basierend auf diesen Werten werden für die aktuellen TCO-Rechnungen und das Markthochlaufmodell die folgenden Annahmen getroffen (vgl. Tabelle 4-11).

Tabelle 4-11: Antriebsarten pro Segment für diese Studie

	BEV		REEV		PHEV	
	<i>kWh</i>	<i>DoD</i>	<i>kWh</i>	<i>DoD</i>	<i>kWh</i>	<i>DoD</i>
Klein	20	90 %	13	80 %	7	75 %
Mittel	24	90 %	16	80 %	10	75 %
Groß	28	90 %	19	80 %	13	75 %
LNF	32	90 %	22	80 %	16	75 %

¹¹⁴ Die genannten Quellen sind: OPTUM: Hacker et al. (2011); Fraunhofer ISI: Gnann et al. (2012); FZ Jülich: Linssen et al (2012); NPE: Pfahl (2013).

Bei diesen Parametern besteht große Unsicherheit. Ein Vergleich mit derzeit angekündigten Elektrofahrzeugen ergab auch keine Klarheit, da die Entladetiefen häufig nicht klar genannt werden und das genaue Fahrzeugkonzept (PHEV oder REEV) sowie die Einordnung in ein Segment nicht immer eindeutig sind. Aufgrund dieser Unsicherheit wurde eine Variante mit leicht modifizierten Batteriegrößen gerechnet (siehe Abschnitt 5.6). Es ergaben sich nur geringe Änderungen im Vergleich zur Basisvariante mit den Annahmen gemäß Tabelle 4-11.

4.3.2 Batteriepreise

Für die jährliche Berechnung der Fahrzeugpreise werden jährliche Batteriepreise benötigt. Die folgenden drei Szenarien wurden 2011 von der AG2 der NPE erstellt. Die Gültigkeit dieser Werte wurde im Rahmen des Projektes von der AG2 bestätigt. Die folgende Tabelle fasst die Werte in den drei Szenarien zusammen. Diese Werte sind in Abbildung 4-10 noch einmal grafisch darstellt.

Tabelle 4-12: Spezifische Batteriepreise in €/kWh ohne MwSt.¹¹⁵

Szenario	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Base	850	800	500	450	400	380	350	300	290	285	280
Best	750	700	450	400	370	350	300	270	260	255	250
Worst	950	900	550	500	450	420	380	330	320	315	310

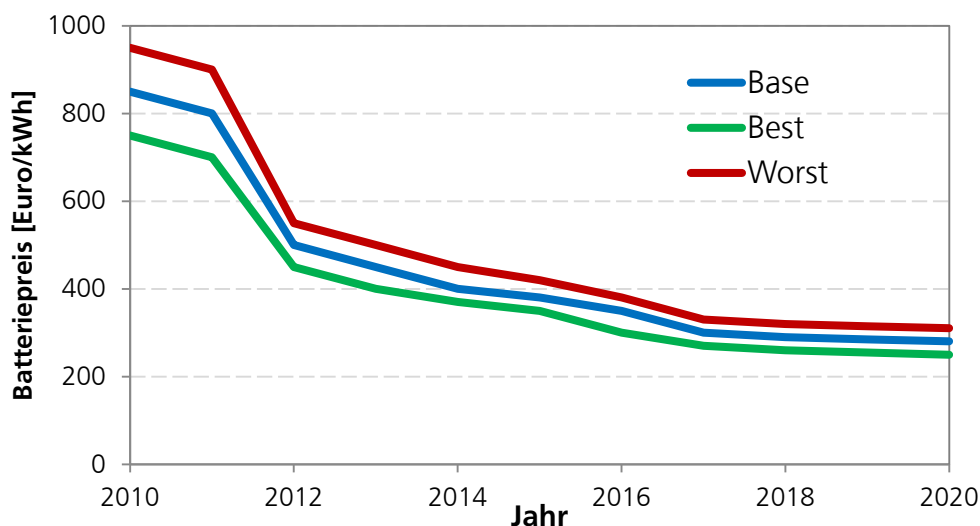


Abbildung 4-10: Spezifische Batteriepreise in €/kWh ohne MwSt.

¹¹⁵ Vgl. Pfahl (2013).

Man beachte, dass bei den Batteriepreisen nicht zwischen Antriebsarten wie PHEV oder BEV unterschieden wird, obwohl teilweise unterschiedliche Anforderungen an die Leistungsdichte vorliegen.¹¹⁶ Dieser unterschiedlichen Beanspruchung der Batterien wird durch Annahmen zu verschiedenen Entladetiefen Rechnung getragen (siehe vorherigen Abschnitt).

Eine genauere Betrachtung (durch numerische Berechnung der ersten Ableitung) der Batteriepreisentwicklung zeigt, dass diese kleinere Sprünge aufweist. Für die Markthochlaufsimulation wurden die Batteriepreisentwicklung daher leicht geglättet. Da die sinkenden Batteriepreise durch Lern- und Skaleneffekte in der Herstellung entstehen sollten, wurde hierfür eine einfache Ein-Faktor-Lernkurve verwendet¹¹⁷

$$c = K_0(1 - L)^{\log_2[1+r(t-t_0)]} \quad (0.1)$$

Die Parameter der Lernkurven wurden für die drei Batteriepreisszenarien durch Regression¹¹⁸ bestimmt und sind in Tabelle 4-13 zusammengefasst.

Tabelle 4-13: Parameter für Batteriepreis-Lernkurven

Szenario	K_0	L	r
Base	798,4	0,198	2,818
Best	698,1	0,207	2,270
Worst	898,2	0,197	3,040

Tabelle 4-14: Geglättete spezifische Batteriepreise in €/kWh ohne MwSt.

Szenario	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Base	798	521	437	390	359	336	318	304	292	281
Best	698	470	394	351	323	302	285	272	260	251
Worst	898	577	483	431	397	371	352	336	322	311

Diese geglätteten Preise sind den ursprünglichen Preisszenarien der NPE sehr ähnlich (siehe Abbildung 4-11), vermeiden aufgrund der hinterlegten funktionalen Form aber Sprünge in der Preisentwicklung, die sich aufgrund der hohen Sensitivität des Modells gegenüber Rahmenbedingungen als Sprünge im Markthochlauf wiederfinden würden.

¹¹⁶ Siehe Axsen, Burke und Kurani (2008); Burke (2007); Mayer et al. (2013).

¹¹⁷ Siehe Kahouli-Brahmi (2008) für eine Diskussion von Lernkurven und Mayer et al. (2013) für eine Anwendung auf Batteriepreise für Elektrofahrzeuge.

¹¹⁸ Nach der Methode der kleinsten Quadrate. Aus Gründen der numerischen Stabilität wurde die Zeit in Tausenden Jahren gemessen. t_0 wurde stets auf 2011 festgesetzt.

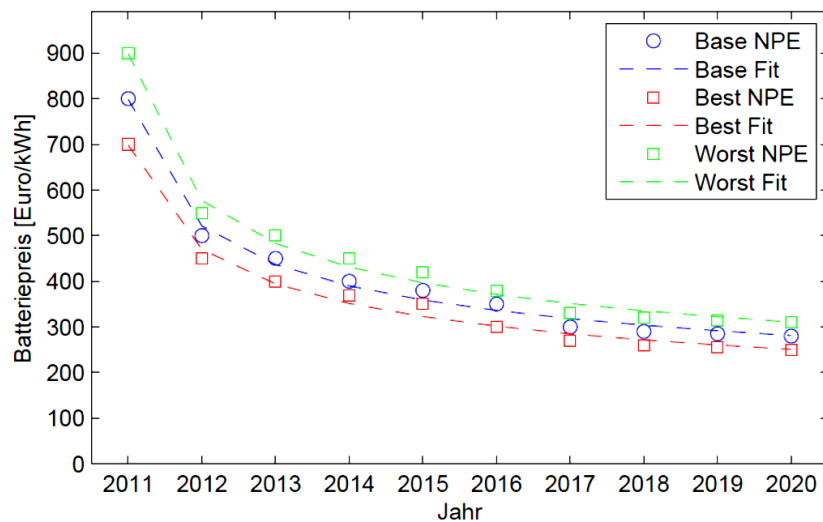


Abbildung 4-11: Geglättete spezifische Batteriepreise in €/kWh ohne MwSt.

4.3.3 Nettolistenpreise

Bei der Bestimmung der Nettolistenpreise für die Fahrzeuge (und deren zeitlicher Veränderung) wird von den Werten der NPE ausgegangen. Diese sind für die Jahre 2011 und 2020 in folgender Tabelle noch einmal dargestellt.

Tabelle 4-15: Nettolistenpreise laut NPE für 2011 und 2020¹¹⁹

	2011				2020			
	klein	mittel	groß	NFZ	klein	Mittel	groß	NFZ
Benzin	10.403				11.176			
Diesel		19.352	32.787	40.000		19.702	33.734	42.000
REEV		20.983				20.983		
PHEV			35.551	43.371			35.551	43.371
BEV	11.280				11.280			

Basierend auf diesen Zahlen werden für die neu hinzugekommen Fahrzeugtypen (alle leeren Felder in der obigen Tabelle) Nettolistenpreise abgeleitet.

Dabei sind verschiedene Punkte zu beachten:

- Die Preise für konventionelle Fahrzeuge steigen über die Zeit an, da diese effizienter werden müssen, um den CO₂-Flottengrenzwerten der EU zu genügen.¹²⁰

¹¹⁹ Siehe NPE (2011b).

¹²⁰ Gemeint ist Verordnung EC 443/2009.

- Die Preise für die verschiedenen Elektrofahrzeuge sind ohne die Batterien. Die Preise für die Batterien müssen aus den Batteriegrößen für die einzelnen Fahrzeuge und den jahresspezifischen Batteriepreisen bestimmt werden.
- Die Nettolistenpreise für Elektrofahrzeuge (ohne Batterie) bleiben über die Zeit konstant, da diese die Flottengrenzwerte erfüllen.
- Für das Markthochlaufmodell sind vor allem die Differenzen zwischen den Antriebsarten innerhalb eines Segmentes entscheidend¹²¹. Vergleicht man die oben angegebenen Preise mit den durchschnittlichen Neuwagenpreisen innerhalb eines Segments sind letztere teilweise klar höher. Dies liegt daran, dass viele Fahrzeuge mit einer umfangreichen Zusatzausstattung angeboten werden. Diese werden aber vmtl. für Elektrofahrzeuge ebenso angeboten, so dass dies aus der Betrachtung der Differenzen rausfällt und damit für das Markthochlaufmodell irrelevant ist.
- Die Bezeichnung „Klein“ bezieht sich hierbei genauer auf das „A/B Segment“, „Mittel“ auf „C-Segment“ und „Gross“ auf das „D-Segment“.¹²²

Bei der Übertragung der Nettolistenpreise des Markthochlaufmodells 2011 auf das aktuelle ist zu beachten, dass verschiedene Einteilungen der Segmente vorgenommen wurden. Das Markthochlaufmodell von 2011 geht von der Klassifikation der Europäischen Kommission aus, das aktuelle hingegen von der Klassifikation des KBA. Ein zentraler Unterschied ist daher, dass im Markthochlaufmodell 2011 Fahrzeuge größer als das D-Segment nicht berücksichtigt wurden, während sie in das aktuelle Modell Eingang finden. Daher sind in den verschiedenen Segmenten kleine Unterschiede zwischen beiden Studien zu sehen (vgl. Tabelle 4-16).

Tabelle 4-16: Vergleich der Fahrzeugsegmente der Markthochlaufmodelle¹²³

Hubraum [Liter]	Klein	Mittel	Gross
NPE2011b	1,0	1,6	2,0
Diese Studie	1,3	1,7	2,3

Insgesamt bildet das vorliegende Markthochlaufmodell eher die Breite des deutschen Pkw-Marktes ab. Da die Differenzen in den Nettolistenpreisen wesentlich ins Modell eingehen und mögliche Zusatzausstattungen für Elektrofahrzeuge gleichermaßen er-

¹²¹ Da bei Privatnutzer die Mehrwertsteuer berücksichtigt wird, haben die absoluten Werte auch einen gewissen Einfluss. Nichtsdestotrotz gehen in der Entscheidungslogik des Modells am Ende nur Differenzen ein.

¹²² Siehe NPE (2011b).

¹²³ Siehe NPE (2011b).

worben werden können, erscheint es sinnvoll die Nettolistenpreise des Markthochlaufmodells 2011 als Ausgangsbasis für das weitere Vorgehen zu verwenden.

Dieselaufpreis

In einem ersten Schritt wird der Aufpreis für Diesel gegenüber einem Benzinfahrzeug bestimmt. Dafür werden Nettolistenpreise von Benzin- und Dieselvarianten der wichtigsten Fahrzeuge im deutschen Markt ausgewertet. „Wichtig“ bezieht sich dabei auf den Anteil eines Modells an den Pkw-Neuzulassungen in Deutschland 2012 (vgl. KBA (2013)). Eine Schwierigkeit besteht darin, welche Benzin- und Dieselvarianten eines Modells jeweils verglichen werden sollen. Hier wird auf eine umfangreiche Liste des ADAC zum direkten Vergleich von Diesel- und Benzinfahrzeugen zurückgegriffen.¹²⁴ Alle Modell-Paare von Benzin- und Dieselfahrzeugvarianten der je Top3 Neuzulassungen (die drei meistverkauften Modelle) pro Pkw-Segment 2012 werden in der ADAC-Liste nachgeschlagen. Es werden aus den Aufpreisen aller Paare jeweils Mittelwert und Median des Aufpreises berechnet und daraus der gewichtete Mittelwert innerhalb eines KBA-Segmentes gebildet (gewichtet nach Anteil an Neuzulassungen innerhalb einer Gruppe).

Tabelle 4-17: Dieselaufpreis-Statistik für die wichtigsten Modelle 2012

KBA-Segment	Modellreihe	Neuzulass. 2012	Anteil [%]	Aufpreis Diesel		Anzahl Modellpaare
				Mittelwert	Median	
MINIS		92.043	43	2.114	2.008	4
	VW UP	42842	20	-	-	-
	SMART FORTWO	28053	13,1	1.447	1.260	3
	RENAULT TWINGO	21148	9,9	3.000	3.000	1
KLEINWAGEN		183.128	35	2.131	2.281	32
	VW POLO	76507	14,7	1.840	2.000	20
	OPEL CORSA	55747	10,7	2.570	2.835	7
	FORD FIESTA	50874	9,8	2.089	2.095	5
KOMPAKT		366.922	50	2.677	2.273	100
	VW GOLF, JETTA	240700	32,8	2.737	2.275	29
	OPEL ASTRA	66981	9,1	2.204	2.068	46
	BMW 1ER	59241	8,1	2.968	2.500	25
MITTELKLASSE		220.891	52	2.563	2.145	62
	VW PASSAT	89333	21	1.769	2.075	9
	MERCEDES C-KLASSE	69052	16,3	2.910	2.142	20

¹²⁴ Siehe ADAC (2012) für diesen Vergleich.

KBA-Segment	Modellreihe	Neuzulass. 2012	Anteil [%]	Aufpreis Diesel		Anzahl Modellpaare
	BMW 3ER	62506	14,7	3.315	2.250	33
<i>OBERE MITTELKLASSE</i>		<i>138.119</i>	<i>95</i>	<i>3.095</i>	<i>2.397</i>	<i>49</i>
	AUDI A6, S6, RS6, A7	52710	36,1	3.400	2.800	9
	BMW 5ER	48107	32,9	2.694	2.200	18
	MERCEDES E- KLASSE	37302	25,5	3.179	2.083	22
<i>OBERKLASSE</i>		<i>12.612</i>	<i>49</i>	<i>4.527</i>	<i>4.527</i>	<i>6</i>
	MERCEDES CLS	4480	17,5	1.428	1.428	2
	BMW 7ER	4457	17,4	3.500	3.500	2
	AUDI A8, S8	3675	14,4	9.550	9.550	2
<i>GELÄNDEWAGEN</i>		<i>111.601</i>	<i>24</i>	<i>2.088</i>	<i>1.959</i>	<i>17</i>
	VW TIGUAN	55615	12,1	1.725	1.900	5
	NISSAN QASHQAI	28982	6,3	2.175	2.175	4
	BMW X1	27004	5,9	2.744	1.850	8
<i>SPORTWAGEN</i>		<i>21.650</i>	<i>49</i>	<i>2.296</i>	<i>1.949</i>	<i>22</i>
	MERCEDES E-KLASSE	8538	19,5	2.898	2.261	20
	MERCEDES SLK	7138	16,3	1.577	1.577	2
	PORSCHE 911	5974	13,6	-	-	-
<i>MINI-VANS</i>		<i>111.152</i>	<i>56</i>	<i>2.046</i>	<i>1.984</i>	<i>27</i>
	MERCEDES B-KLASSE	59420	29,7	1.702	1.576	5
	FORD FOCUS C-MAX	26283	13,2	2.194	2.200	16
	OPEL MERIVA	25449	12,7	2.698	2.715	6
<i>GROSSRAUM- VANS</i>		<i>100.013</i>	<i>63</i>	<i>2.050</i>	<i>2.020</i>	<i>15</i>
	VW TOURAN	53025	33,5	2.233	2.225	3
	OPEL ZAFIRA	29956	18,9	1.910	1.825	10
	VW SHARAN	17032	10,8	1.725	1.725	2
<i>UTILITIES</i>		<i>75.660</i>	<i>62</i>	<i>2.201</i>	<i>1.645</i>	<i>55</i>
	VW CADDY	32326	26,5	2.484	1.690	18
	VW TRANSPORTER, CARVELLE	32152	26,3	1.846	1.511	31
	CITROEN BERLINGO	11182	9,2	2.400	1.900	6
SUMME		1.433.791	47			312

Fasst man nun die Ergebnisse der einzelnen Segmente zu den aggregierten Fahrzeuggrößen zusammen und bildet wiederum gewichtet Mittelwerte ergeben sich die Ergebnisse in folgender Tabelle.

Tabelle 4-18: Statistiken für Dieselaufpreise gegenüber Benzfahrzeugen nach Fahrzeuggröße

	Mittelwert	Median	Anzahl Modell-paare	Betrachtete Neuzulassungen 2012	Anteil an Neuzulassungen 2012
Klein	2126	2189	36	275.171	38 %
Mittel	2541	2187	189	698.965	52 %
Gross	2546	2232	87	362.345	63 %
Gesamt	2457	2200	312	1.336.481	52 %

Die Medianwerte für die Dieselaufpreise werden für die weitere Ableitung der Nettolistenpreise verwendet.

Aufpreis Elektrofahrzeuge

Zur Ableitung der Nettolistenpreise der elektrischen Fahrzeuge werden die Preisdifferenzen aus den bisherigen Preisen der NPE ermittelt. Aus diesen Werten (vgl. Tabelle 4-15) ergeben sich folgende absolute Differenzen:

Tabelle 4-19: Aufpreis der elektrischen Antriebe

Differenz (2011) [€]	Klein	Mittel	Groß	Leichte NFZ
Benzin → BEV	877	-	-	-
Diesel → REEV	-	1.631	-	-
Diesel → PHEV	-	-	2.764	3.371

Da bereits bei der Diesel-Aufpreisberechnung erkennbar ist, dass sich der Aufpreis zwischen den Segmenten absolut nur leicht unterscheidet, wird an dieser Stelle vereinfacht angenommen, dass dies auch bei den Elektrofahrzeugen der Fall ist. Da somit für jede Technologie ein absoluter Aufpreis zur Diesel-/Benzintechnologie vorhanden ist, können diese auf die übrigen Segmenten übertragen werden. Somit lassen sich die Lücken aus Tabelle 4-18 füllen. Wie bereits vorangehend erwähnt, werden die daraus ermittelten Preise für die Elektrofahrzeuge zwischen 2011 und 2020 konstant gehalten.

Gesamtergebnis Nettolistenpreise

Alle obigen Berechnungen zusammenfassend ergeben sich die in Tabelle 4-20 dargestellten Nettolistenpreise (ohne Batteriekosten) für 2011 und 2020.

Tabelle 4-20: Ergebnis Nettolistenpreise 2011 und 2020

	2011				2020			
	klein	mittel	groß	NFZ	klein	mittel	groß	NFZ
Benzin	10.403	17.165	30.555	37.800	11.176	17.515	31.502	39.800
Diesel	12.592	19.352	32.787	40.000	13.365	19.702	33.734	42.000
REEV	14.223	20.983	34.418	41.631	14.223	20.983	34.418	41.631
PHEV	15.356	22.116	35.551	43.371	15.356	22.116	35.551	43.371
BEV	11.280	18.042	31.432	38.677	11.280	18.042	31.432	38.677

Um zwischen den dargestellten Werten von 2011 und 2020 eine Zeitreihen zu erhalten, wird linear interpoliert. Die Annahme, dass sich die Preise linear entwickeln scheint durchaus realistisch, da erhebliche technologische Entwicklungen im Bereich der Batterien zu sehen sind und somit an anderer Stelle mit einbezogen werden.

4.3.4 Energieverbräuche konventionell

Die Energieverbräuche für den konventionellen Antrieb der Fahrzeuge werden weitestgehend den Ergebnissen des UMBReLA-Projektes vom IFEU Heidelberg entnommen.¹²⁵ Die Verbräuche der konventionellen Antriebe sind dabei mit dem etablierten Verkehrsmodell TREMOD¹²⁶ konsistent.

Bei den konventionellen Antrieben geht das IFEU von einer deutlichen Verbrauchsreduktion aus (Abbildung 4-12). Diese Entwicklung beinhaltet zum einen die Einhaltung der EU Grenzwerte von 2009 sowie eine durchschnittliche Verbrauchsreduktion von 1,5 % pro Jahr nach 2015.¹²⁷ Zum Vergleich: Basierend auf Mock et al. (2013, S. 10) hat sich der Realverbrauch der deutschen Neuwagenflotte in den Jahren 2001 bis 2011 um $1 - \sqrt[10]{(180/193)} = 0,7 \text{ \% p.a.}$ verbessert, der Normverbrauch hingegen um insgesamt $1 - \sqrt[10]{(146/180)} = 2,1 \text{ \% p.a.}$ In NPE (2011b) liegt die jährliche Effizienzsteigerung zwischen 1,0 % p.a. (C-Segment) und 2,7 % p.a. (A/B-Segment). Die Annahme von 1,5 % p.a. erscheint damit weder sehr optimistisch noch sehr konservativ zu sein.

Umgerechnet in gCO₂/km geht das Markthochlaufmodell von 2011 von Normverbräuchen aus und erreicht bis 2020 Werte von 95 – 110 gCO₂/km (A/B-Segment 122 → 95,

¹²⁵ Siehe Helms et al. (2011).

¹²⁶ TREMOD = Transport Emission Model. Ziel von TREMOD ist die Beschreibung des motorisierten Verkehrs in Deutschland, der Fahrleistungen, Energieverbräuche und Emissionen; siehe Knörr et al. (2010).

¹²⁷ Siehe Helms et al. (2011).

C-Segment 104 → 95, D-Segment 127 → 110 gCO₂/km). Dabei ist zu beachten, dass sich die Werte des Markthochlaufmodells 2011 auf Normverbräuche (nach NEFZ) für das Jahr 2011 beziehen und die Werte der aktuellen Studie Realverbräuche für das Jahr 2012 sind (Klein 141,5 → 125, Mittelklasse 157 → 139, Gross 199 → 173 gCO₂/km Realverbrauch).¹²⁸ Der Unterschied zwischen Norm- und Realverbräuchen hat sich in den letzten Jahren erhöht und beträgt abhängig von der Fahrzeuggröße (und der Fahrweise) zwischen 15 und 25 %, teilweise auch mehr, mit weiter steigender Tendenz.¹²⁹ Inwieweit im aktuellen Markthochlaufmodell die CO₂-Flottengrenzwerte erfüllt werden, ist nicht Gegenstand der vorliegenden Studie und lässt sich nicht direkt bestimmen, da dies von der weiteren Entwicklung der Diskrepanz zwischen Real- und Normverbrauch abhängt, von der zukünftigen Ausgestaltung der CO₂-Flottenziele (bspw. die Höhe der Anrechnung von Elektrofahrzeugen) sowie dem tatsächlichen Anteil von Elektrofahrzeugen in den Flotten der Hersteller. Zusätzlich ist die deutsche Neuwagenflotte (Gegenstand dieser Studie) nicht repräsentativ für die europäische Neuwagenflotte einzelner Hersteller (Gegenstand der CO₂-Gesetzgebung). Für die vorliegende Studie ist die zukünftige Entwicklung der Realverbräuche entscheidend, da die laufenden Kosten durch die Real- und nicht durch die Normverbräuche entstehen.

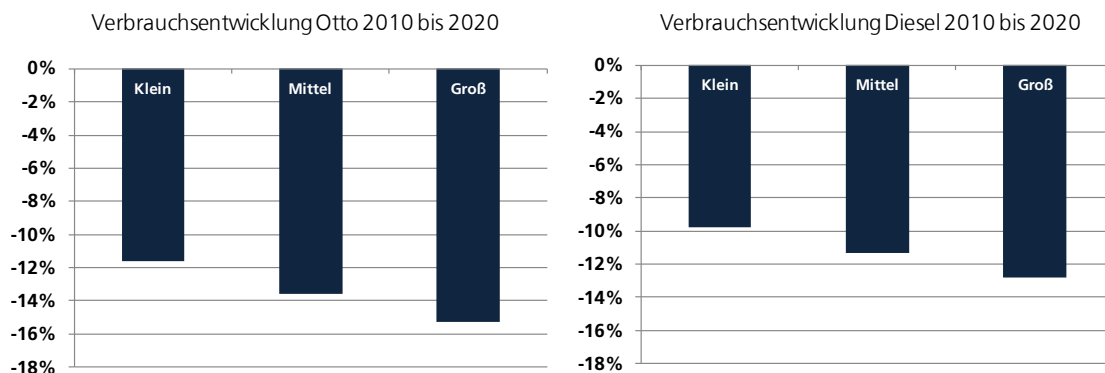


Abbildung 4-12: Verbrauchsreduktion konventioneller Antriebe von 2011 bis 2020¹³⁰

In Absprache mit dem IFEU hat sich gezeigt, dass die Verbräuche von PHEV und REEV mit größeren Unsicherheiten behaftet sind als die der anderen Antriebe, da die

¹²⁸ Kleinwagen: Benzin. Mittelklasse und Gross jeweils Diesel; siehe NPE (2011b) sowie Abschnitt 4.3.7 und 4.3.4. Umrechnungsfaktor Benzin: 1l/100 km entspricht 23,2 gCO₂/km und Diesel: 1l/100 km entspricht 26,2 gCO₂/km, vgl. Bünger und Weindorf (2011) sowie Wietschel und Bünger (2009).

¹²⁹ Eine ausführliche Analyse der wachsenden Diskrepanz und den möglichen Gründen findet sich u.a. in Mock et al. (2013).

¹³⁰ Eigene Darstellung auf Basis von Helms et al. (2011).

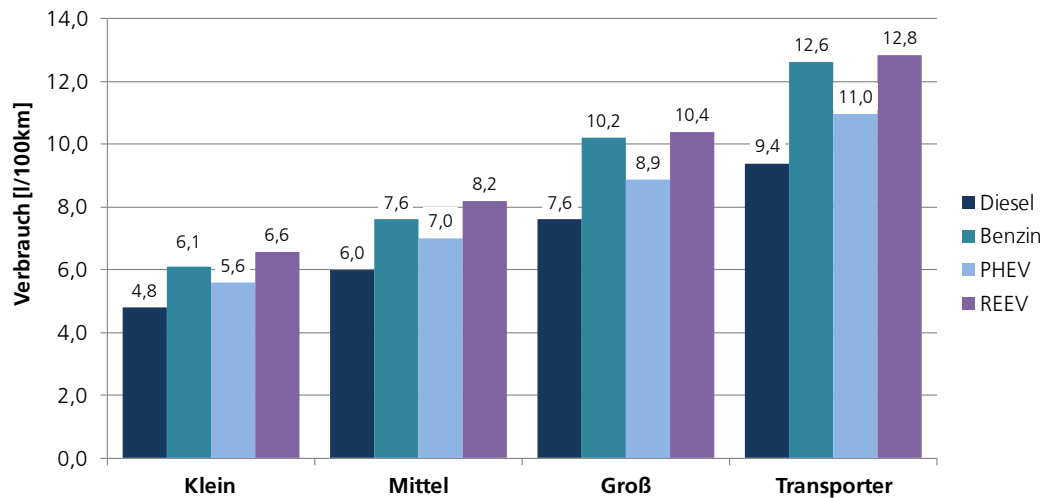
genaue zukünftige Auslegung dieser Fahrzeuge noch nicht klar ist sowie kaum reale empirische Daten vorliegen und somit auf Simulationen zurückgegriffen werden muss. Daher ist hierbei die Konsistenz der Verbräuche innerhalb der Fahrzeuggrößen und innerhalb der Berechnungslogik besonders wichtig. Dabei wurden die Fahrzeugverbräuche von Seiten des IFEU über die Masse der Fahrzeuge von der Mittelklasse ausgehend auf die anderen Klassen übertragen.

Im Vergleich mit den Annahmen des IFEU zeigt sich, dass der hier verwendete Mittelklasse-REEV (und analog für die anderen Fahrzeugklassen) eine etwas größere Batterie als der vom IFEU angenommene hat (16 kWh statt 12 kWh). Bei einer Energiedichte von 70 Wh/kg für das Batteriesystem¹³¹ ergibt sich aus 4 kWh Differenz eine höhere Fahrzeug-Masse von ca. 60 kg. Bei 100 kg Mehrgewicht fallen ca. 0,3 l/100km Mehrverbrauch an.¹³² Daher wurde der Verbrauch des REEV hier um 0,2 l/100km gegenüber den Werten des IFEU erhöht.

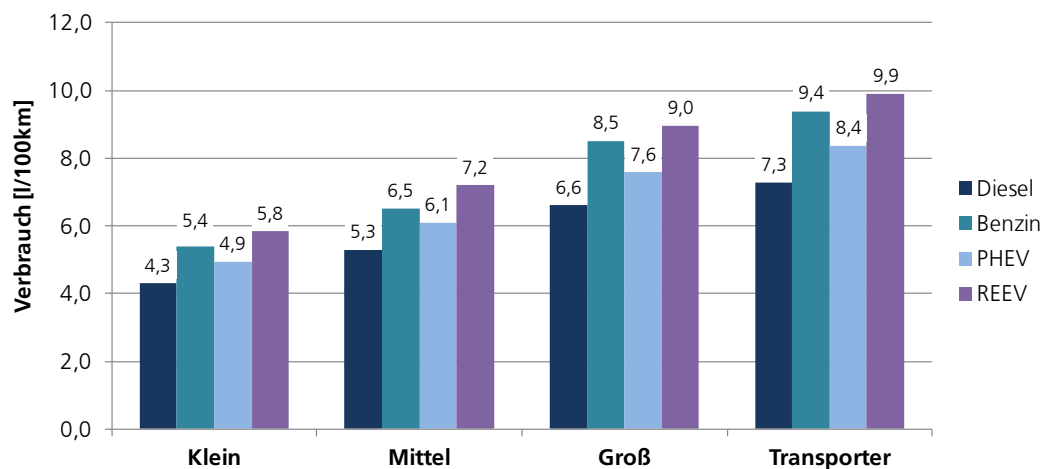
Abbildung 4-13 fasst die konventionellen Energieverbräuche für 2011 zusammen. Dabei ist anzumerken, dass sich die konventionellen Verbräuche der Hybrid-Fahrzeuge (PHEV und REEV) auf einen *rein konventionellen Betrieb* beziehen. Im tatsächlichen Einsatz werden die Fahrzeuge (im Rahmen ihrer elektrischen Reichweite) aber sehr viel elektrisch bewegt. Der konventionelle Verbrauch wird für den elektrischen Betrieb als gleich null angenommen. Der tatsächliche Verbrauch an konventionellem Kraftstoff ist daher stark vom Einsatz des Fahrzeuges abhängig und wird für jedes Fahrprofil individuell berechnet (vgl. Abschnitt 3.4.1).

¹³¹ Vgl. Helms et al. (2011, S. 22) basierend auf Pkw-Herstellerangaben.

¹³² Mock (2011, S. 30).

Abbildung 4-13: Verbräuche konventionell 2012¹³³

Durch die oben genannte Verbrauchsreduktion, die auch einer Teilhybridisierung der konventionellen Antriebe bis 2020 zugeschrieben werden kann, ergeben sich die Werte in Abbildung 4-14. Zur Ermittlung der Werte zwischen 2012 und 2020 wurde exponentiell interpoliert.

Abbildung 4-14: Verbräuche konventionell 2020¹³⁴

¹³³ Eigene Darstellung auf Basis von Helms et al. (2011). Für Hybrid-Fahrzeuge (PHEV und REEV) ist nur der Verbrauch für den rein konventionellen betrieb angegeben.

¹³⁴ Eigene Darstellung auf Basis von Helms et al. (2011). Für Hybrid-Fahrzeuge (PHEV und REEV) ist nur der Verbrauch für den rein konventionellen betrieb angegeben.

4.3.5 Energieverbräuche elektrisch

Für die Verbräuche der elektrischen Antriebe wird angenommen, dass sie sich untereinander nicht unterscheiden, da sowohl bei paralleler (PHEV) als auch bei serieller (BEV und REEV) Auslegung direkt elektrisch angetrieben wird und sich die Massen der Komponenten ungefähr ausgleichen sollten. Im Einzelnen bedeutet dies, dass der REEV eine kleinere Batterie hat als der BEV, aber dafür das zusätzliche Gewicht eines kleinen Verbrennungsmotors tragen muss. Der PHEV hat eine noch kleinere Batterie, aber dafür einen größeren Verbrennungsmotor. Allerdings sorgt die kleinere Batterie von PHEV dafür, dass der Verbrennungsmotor häufiger läuft und der PHEV so in den Nebenaggregaten Heizung und Klimatisierung günstiger sein dürfte. Daher werden die elektrischen Verbräuche leicht gegenüber BEV und REEV gesenkt. Da Nebenverbraucher laut Annahme im Mittel ca. 10 % zum elektrischen Energieverbrauch beitragen, wird angenommen, dass die Hälfte davon durch den häufigeren Einsatz des Verbrennungsmotors eingespart werden kann. Dies führt bspw. für den Mittelklasse PHEV zu einer Reduktion des elektrischen Verbrauches von 0,0126 kWh/km. Für die anderen Fahrzeuggrößen wird eine analoge Rechnung angestellt. Die elektrischen Verbräuche für 2012 sind in Abbildung 4-15 dargestellt.

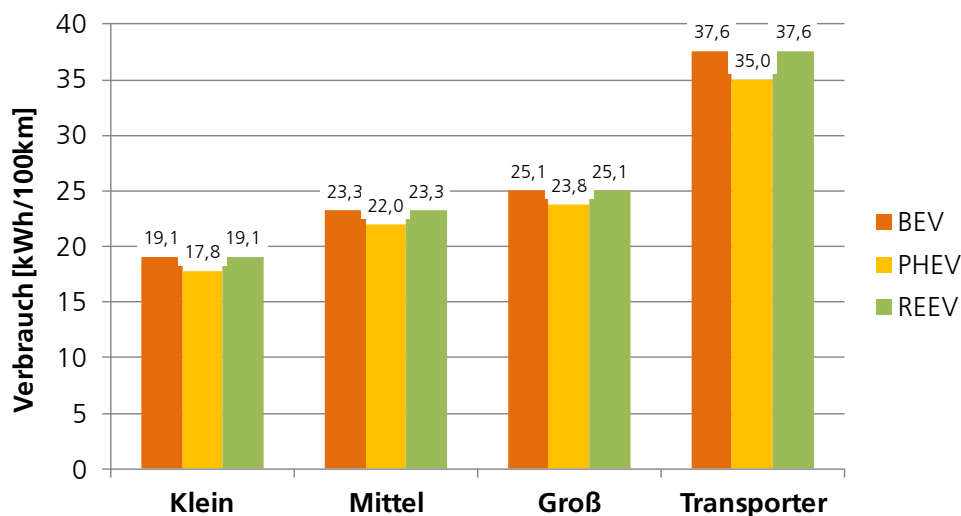


Abbildung 4-15: Verbräuche elektrisch 2012¹³⁵

Die Berechnungen des IFEU gehen auch bei den elektrischen Antrieben von Effizienzsteigerungen bis 2020 aus. Da es sich bei den elektrischen Antrieben aber bereits um sehr effiziente Technologien handelt, fallen die Effizienzsteigerungen im Vergleich zu

¹³⁵ Eigene Darstellung auf Basis von Helms et al. (2011).

den konventionellen Antrieben etwas geringer aus. Der elektrische Verbrauch für das Jahr 2020 ist in Abbildung 4-16 dargestellt. Zwischen den Jahren 2012 und 2020 wird wie bei den konventionellen Verbräuchen ein linearer Verlauf angenommen.

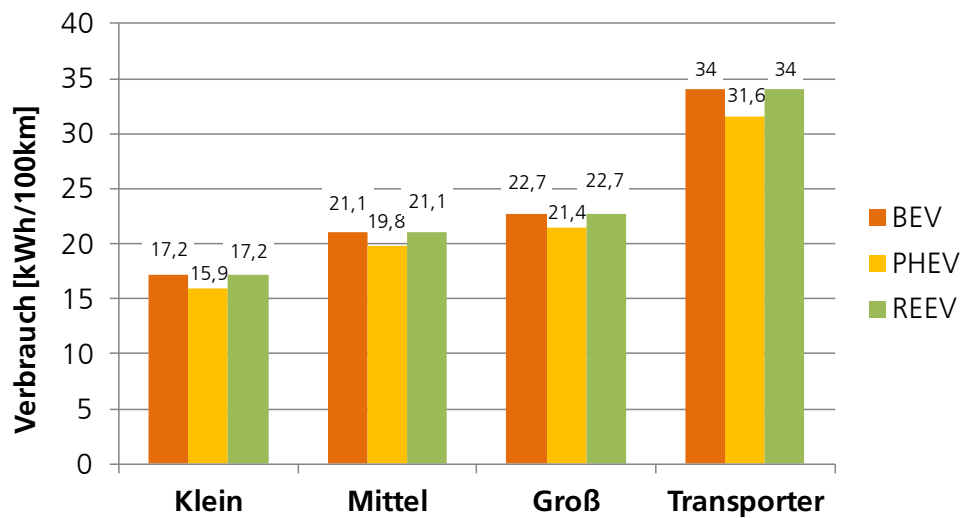


Abbildung 4-16: Verbräuche elektrisch 2020¹³⁶

Die Effizienzsteigerungen im Bereich der elektrischen Antriebe fallen damit mit ca. 1,2 %/p.a. etwas geringer aus als bei den konventionellen Antrieben.

4.3.6 Wartungskosten

Für die Wartungskosten der alternativen Antriebstechnologien existieren derzeit aufgrund mangelnder Erfahrungen kaum real ermittelte Werte. Da sich die Antriebstechnologien hinsichtlich der verbauten Komponenten teilweise deutlich unterscheiden ist jedoch anzunehmen, dass auch die Wartungskosten variieren, Abbildung 4-17 zeigt die auf Basis von Propfe et al. (2012) ermittelten Wartungskosten für Mittelklassefahrzeuge.

¹³⁶ Eigene Darstellung auf Basis von Helms et al. (2011).

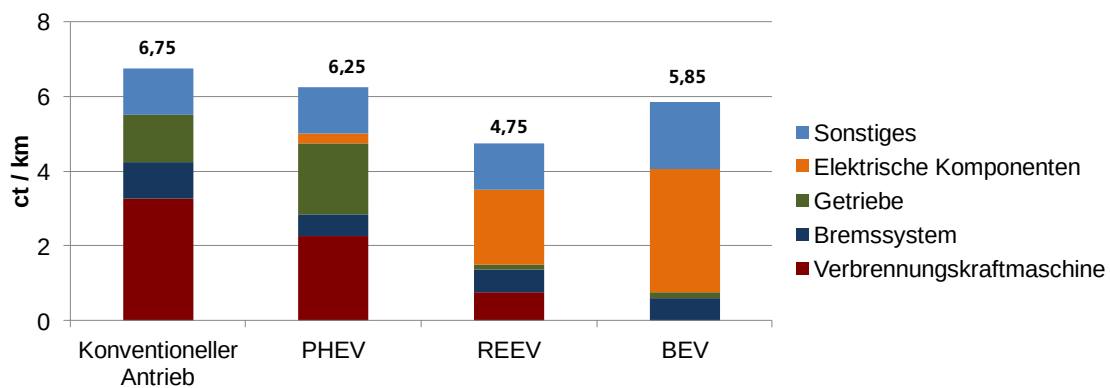


Abbildung 4-17: Vergleich der Wartungskosten der Mittelklasse¹³⁷

Bei den dargestellten Werten handelt es sich um Simulationsergebnisse, das heißt zu Bauteilgruppen zusammengefasste Bauteile werden mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit belegt und der Betrieb über die Zeit simuliert. Jede Bauteilgruppe die in dieser Zeit ausfällt, wird ersetzt und die Kosten dafür ermittelt. Für die Kostenermittlung spielt die Größe der Bauteile eine entscheidende Rolle. Dies erklärt den folgenden Unterschied zwischen konventionellen Antrieben und REEV, der grundsätzlich kleinere Komponenten enthält und zudem durch den Betrieb im optimalen Drehzahlbereich weniger Verschleiß aufweist. Durch den hohen Detaillierungsgrad der Bauteilgruppen scheinen die Ergebnisse realitätsnah.¹³⁸

Die Beschränkung der Ergebnisse auf die Mittelklasse macht eine Transformation hin zu den verbleibenden Klassen notwendig. Hierfür wurden die Ausführungen von Büniger und Weindorf (2011) als Basis verwendet. Diese gehen zwar von ähnlichen Wartungskosten der unterschiedlichen Technologien aus, bilden jedoch technologieabhängige Unterschiede zwischen den Segmenten ab. Da mittelfristig bis 2020 nicht von deutlichen Kostenänderungen ausgegangen werden kann, wird angenommen, dass diese Werte bis 2020 real konstant bleiben. Tabelle 4-20 zeigt die realen Werte bis 2020. Durch die unterschiedlichen Batteriegrößen weichen die Wartungskosten bei den BEV zwischen den Segmenten voneinander ab. Bei den restlichen Antrieben finden sich kaum Unterschiede. Aus diesem Grund wurden die Kosten nicht verändert.

¹³⁷ Eigene Darstellung nach Propfe et al. (2012).

¹³⁸ Siehe Propfe et al. (2012) für weitere Details.

Tabelle 4-21: Wartungskosten 2013 bis 2020

<i>Antrieb</i>	Wartungskosten [Cent/km]			
	<i>Klein</i>	<i>Mittel</i>	<i>Groß</i>	<i>Transporter</i>
Benzin	6,75	6,75	6,75	32,94
Diesel	6,75	6,75	6,75	32,94
PHEV	6,25	6,25	6,25	30,5
REEV	4,75	4,75	4,75	23,18
BEV	5,43	5,85	6,27	28,55

4.3.7 Kfz-Steuer

Bei Berechnung der zu zahlenden Kfz-Steuer gilt es grundsätzlich, die hubraum- und CO₂-basierte Besteuerung bei Pkw von der gewichtsbasierten der leichten Nutzfahrzeuge zu unterscheiden.

Pkw

Die Berechnung der Höhe der Kfz-Steuer lässt sich in Deutschland in zwei große Blöcke unterteilen: Einen hubraumbasierten Grundbetrag und einen CO₂-abhängigen Aufschlag auf diesen Grundbetrag (vgl. Abbildung 4-18). Eine Ausnahme bilden die reinen batterieelektrischen Fahrzeuge. Diese sind bis 2020 vollständig von Grundbetrag und CO₂-abhängigem Aufschlag befreit.

	Benzin	Diesel	PHEV / REEV	BEV
Grundbetrag (je 100 cm ³)	2,00 €	9,50 €	2,00 € (Benzin)	0,00 €
+	+	+	+	+
CO₂-abhängiger Betrag (ab Werte von 95g CO ₂ pro km)	----- 2,00 € je g/km -----			0,00 €
=	=			
Jahressteuer (abgerundet auf volle Euro und fällig zum Kalendertag der Fahrzeugzulassung)				

Abbildung 4-18: Berechnungsschema Kfz-Steuer

Zur Berechnung des hubraumbasierten Grundbetrags werden zunächst durchschnittliche Hubraumgrößen für die einzelnen Antriebe festgelegt. In allen Klassen wird

jeweils davon ausgegangen, dass sich die Hubraumgrößen zwischen den Antrieben nicht unterscheiden. Eine Ausnahme bildet der Range-Extender, der grundsätzlich einen kleiner dimensionierten Verbrennungsmotor verbaut hat (vgl. Opel Ampera). Unter diesen Bedingungen ergeben sich folgenden Hubraumgrößen:

Tabelle 4-22: Durchschnittliche Hubraumgröße je Segment

Hubraum [ccm]	klein	mittel	groß
Benzin	1.300	1.700	2.300
Diesel	1.300	1.700	2.300
PHEV	1.300	1.700	2.300
REEV	1.000	1.000	1.400

Die Berechnung des CO₂-basierten Betrags bezieht sich aus Gründen der Konsistenz auf die bereits verwendeten Verbrauchswerte des IFEU (Helms et al. (2011)). Da die Berechnung die Normverbräuche zugrundelegt, wurden die ermittelten Verbrauchswerte um den Anteil der Nebenverbraucher (mit durchschnittlich 15 % angenommen) reduziert. Sowohl PHEV als auch REEV sind durch den niedrigen Verbrauch im kombinierten Bereich (< 95g CO₂/km) komplett vom CO₂-basierten Anteil der Kfz-Steuer befreit.

Leichte Nutzfahrzeuge

Zul. Gesamt- gewicht	Benzin	Diesel	PHEV / REEV	BEV
bis 2.000kg (je angefangene 200kg)	———— 11,25 € je 200kg ———			0,00 €
+	+			+
2.000 bis 3.000kg (je angefangene 200kg)	———— 12,02 € je 200kg ———			0,00 €
+	+			+
3.000 bis 3.500kg (je angefangene 200kg)	———— 12,78 € je 200kg ———			0,00 €
=	=			
Jahressteuer (abgerundet auf volle Euro und fällig zum Kalendertag der Fahrzeugzulassung)				

Abbildung 4-19: Berechnungsschema Kfz-Steuer für leichte Nutzfahrzeuge

Bei leichten Nutzfahrzeugen berechnet sich die Höhe der Kfz-Steuer bis dato in Abhängigkeit der zulässigen Gesamtmasse. In der Folge bedeutet dies, dass antriebsun-

abhängig besteuert wird und somit die Höhe des CO₂-Ausstoßes unberücksichtigt bleibt. Nach heutiger Gesetzgebung werden einzig die reinen BEV gesondert behandelt und komplett von der Kfz-Steuer befreit (vgl. Abbildung 4-19). Für die Berechnung dieses TCO-Bausteins wurde eine durchschnittliche Gesamtmasse von 2.800 kg betrachtet.

4.3.8 Versicherung

Da sich momentan die Höhe der Versicherungsbeiträge nicht nach der Antriebsart sondern nach zugelassenem Modell und Eigenschaften des Fahrers (Alter) richten, wird darauf verzichtet, die Versicherungsbeiträge in der TCO-Rechnung zu berücksichtigen. Die privatwirtschaftliche Ausrichtung der Versicherungsindustrie wird auch zukünftig an dieser Tatsache aller Voraussicht nach nichts ändern.

4.4 Fahrprofildaten

4.4.1 Einleitung und Übersicht

Die Fahrprofile von Fahrzeugen bilden die Grundlage für sämtliche Berechnungen, auf denen das Markthochlaufmodell aufbaut. Ein Fahrprofil beschreibt dabei sämtliche Fahrten eines Fahrzeugs in einem bestimmten Erhebungszeitraum. Zu den verschiedenen Fahrten gibt es mehrere Informationen, wie den Start- und Endzeitpunkt einer Fahrt, ihre Länge sowie teilweise den Zweck der Fahrt, aus dem der Standort abgeleitet werden kann. Zudem sind eine Reihe von Metainformationen über das Fahrzeug (z. B. seine Größe, Marke und der übliche Standort über Nacht), den Halter (z. B. für private Haushalte: Einkommen, Anzahl der Fahrzeuge im Haushalt oder Stadtgröße; für gewerbliche Halter: Unternehmensgröße, Raumtyp des Unternehmensstandorts) sowie ggf. über den primären Fahrer (z. B. Alter, Bildungsabschluss) enthalten. Mit diesen Fahrprofilen werden Batterieladestände simuliert, um die technische Ersetzbarkeit durch batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und den elektrischen Fahranteil von Plug-In Hybriden (PHEV) sowie Range-Extender Fahrzeugen (REEV) zu ermitteln (vgl. Abschnitt 3.2.1), was direkt in die TCO-Berechnungen einfließt.

Für das Markthochlaufmodell steht eine Reihe von öffentlich zugänglichen Fahrprofil-erhebungen zur Verfügung, die sich in mehrerlei Hinsicht unterscheiden. Die wichtigsten Unterschiede sind hierzu in Tabelle 4-23 dargestellt.

Tabelle 4-23: Fahrprofilerhebungen für den Privat- und Wirtschaftsverkehr in Deutschland

Merkmal	Wirtschaftsverkehr		Privatverkehr	
	KiD2002 (KiD2010)	Fraunhofer ISI REM2030	MiD2002 (MiD2008)	MOP 1994-2010
Erhebungsdesign	Befragung	Aufzeichnung	Befragung	Befragung
Erhebungsdauer und Zeitpunkt	1 Stichtag (verteilt über Jahr)	3 Wochen (verteilt über Jahr)	1 Stichtag (verteilt über Jahr)	7 Tage (zwischen Juli und November)
Umfang der Daten- sätze	76.798 Fahrzeuge, 173.054 Wege	354 Fahrzeuge, 66.899 Wege	33.768 Fahrzeuge, 25.848 Haushalte, 169.759 Wege	6.339 Fahrzeuge ¹³⁹ , 12.812 Haushalte

¹³⁹ MOP betrachtet Personen und deren Mobilitätsverhalten. Eine Zuordnung von Personenwegen zu Pkw-Wege kann nur erfolgen, wenn diese eindeutig ist (Kley (2011)).

Für den Wirtschaftsverkehr gibt es bislang eine umfangreiche Datenerhebung für Deutschland, die Studie „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland (KiD)“.¹⁴⁰ Diese wurde 2002 und 2010 durchgeführt und umfasst im Datensatz von 2002 einen Stichprobenumfang von 76.798 Fahrzeugen, die 2001 und 2002 aufgezeichnet wurden. Die Erhebung erfolgt mittels einer Befragung, in der die Probanden die Wege eines Tages in einem Wegetagebuch aufzeichnen und an einer Befragung teilnehmen.

Die „REM2030-Fahrprofile“ werden seit dem vergangenen Jahr durch das Fraunhofer ISI im Rahmen des regionalen Innovationsclusters REM 2030¹⁴¹ erhoben, um eine Erhebung mit längerem Aufzeichnungszeitraum zu erhalten.¹⁴² Hierbei wurden Fahrten von Fahrzeugen über mindestens drei Wochen mittels GPS-Datenloggern in deutschen Unternehmen mit unterschiedlicher Mitarbeiterzahl in verschiedenen Stadtgrößen aufgezeichnet, um Verzerrungen zu vermeiden. Der Datensatz umfasst derzeit 354 Fahrprofile mit 66.899 Wegen und ist seit Ende März 2013 zum Download auf der Homepage www.rem2030.de verfügbar.

Im Privatverkehr stellt die Erhebung „Mobilität in Deutschland“ eine analoge Datenquelle zur KiD dar, die ebenfalls über einen Tag die Wege der Probanden in einem Wegetagebuch aufschreiben lässt und mit einer anschließenden Befragung die zahlreichen Metadaten abfragt.¹⁴³ Die Erhebung umfasst alle Bewegungen eines Probanden am Stichtag und ist demnach nicht ausschließlich auf Kraftfahrzeugwege ausgelegt. Im Datensatz von 2002 lassen sich 33.768 Fahrzeuge mit 169.759 Wegen ermitteln.

Die zweite große Erhebung im Privatverkehr ist das deutsche Mobilitätspanel, das seit 1994 jährlich etwa 1.000 Haushalte befragt.¹⁴⁴ Auch hier werden nicht ausschließlich Wege von Pkw aufgezeichnet, sondern auch Fuß-, Fahrrad-, oder ÖV-Wege. Von 1994 bis 2010 lassen sich insgesamt 6.339 Fahrprofile von privat genutzten Fahrzeugen ermitteln, die über eine Woche aufgezeichnet wurden. Im weiteren Verlauf dieses Abschnitts erfolgen Vergleiche zwischen den MOP-Daten und den Daten der MiD2002 aber auch der MiD2008.

¹⁴⁰ IVS und TU Braunschweig (2002); WVI u. a. (2010).

¹⁴¹ Siehe zu dem Projekt www.rem2030.de.

¹⁴² Fraunhofer ISI (2012).

¹⁴³ infas und DLR (2002) sowie infas und DLR (2008).

¹⁴⁴ Siehe MOP (2010).

Aufgrund bisheriger Erfahrungen bei der Auswertung von Fahrprofilen ist bei einer kurzen Aufzeichnungsdauer mit einer sowohl technischen¹⁴⁵ als auch einer ökonomischen Überschätzung der Potenziale von Elektrofahrzeugen zu rechnen.¹⁴⁶ Bei der Auswertung der Fahrten nur eines Tages kann es zu deutlichen Verschiebungen der technischen Ersetzbarkeit von konventionellen durch elektrisch betriebene Fahrzeuge kommen, wenn der Proband am Beobachtungstag bspw. wenig oder gar nicht gefahren ist. Mit steigender Dauer der Aufzeichnung sinkt hingegen die Wahrscheinlichkeit, das Fahrverhalten falsch einzuschätzen.¹⁴⁷ Aufgrund dieser Tatsache, die einen grundlegenden Unterschied in den verschiedenen Erhebungen ausmacht, werden im Folgenden für den Wirtschaftsverkehr (Flottenutzer) die REM2030-Fahrprofile verwendet. Für die Privatanutzer wird das Mobilitätspanel ausgewertet, das zudem Informationen über den Halter birgt, wodurch die Privatanutzer mit Privatfahrzeug von denen mit einem Dienstwagen unterschieden werden können.

In den folgenden Abschnitten werden die Fahrprofile für den Privatverkehr (4.4.2) und den Wirtschaftsverkehr (4.4.3) detaillierter beschrieben und in Abschnitt 4.4.4 diskutiert.

4.4.2 Fahrprofile Privatverkehr

Für den Privatverkehr werden im Rahmen dieser Studie die Daten des Mobilitätspanels 1994 bis 2010 verwendet und die personenspezifischen Fahrzeugwege den Fahrzeugen zugeordnet.¹⁴⁸ Dadurch lassen sich 6.339 Fahrprofile extrahieren, welche sich auf die Fahrzeugklassen „Kleinwagen“ ($n = 1714$), „Mittelklasse“ ($n = 3657$) und „Großklasse“ ($n = 968$) unterteilen.

Da die Erhebung das Mobilitätsverhalten privater Haushalte abbilden soll, wird in diesem Abschnitt ein Vergleich mit den ebenfalls verfügbaren MiD-Fahrprofilen gezogen, um die Repräsentativität der MOP-Fahrprofile für die deutschen Neuzulassungen zu analysieren. Dazu wird die Länge der Aufzeichnungsdauer, die Verteilung auf Gemeindegrößen und Beschäftigungsarten, sowie der Jahresfahrleistungen in Betracht gezogen und verglichen.

¹⁴⁵ Vgl. Gnann et al. (2012).

¹⁴⁶ Vgl. Gnann, Plötz, Zischler und Wietschel (2012). Dort sinkt das ökonomische Potenzial innerhalb einer großen Gruppe von Fahrprofilen von ca. 40 % auf 5 bis 10 % durch Vergrößerung der Aufzeichnungsdauer von einem Tage auf circa 20 Tage.

¹⁴⁷ Siehe Abschnitt 7.5 für eine quantitative Abschätzung der Unsicherheit und deren Verringerung bei steigender Aufzeichnungsdauer.

¹⁴⁸ Eine detaillierte Beschreibung der Fahrprofilerstellung befindet sich in Anhang 7.6.

Vergleich der Aufzeichnungs- und Berichts-dauer

In Abbildung 4-20 ist ein Vergleich der absoluten Häufigkeiten der Berichts- und Fahrtage der Fahrprofile dargestellt. Hier wird deutlich, dass über 86 % (5554 v. 6339) der Fahrzeuge an sechs von sieben Tagen im Berichtszeitraum bewegt wurden. An allen Berichtstagen wurden in etwa 66 % (= 4187) der Fahrzeuge bewegt. Bei der Betrachtung der Abbildung wird jedoch auch deutlich, dass es zu 0,74 % der Fahrzeuge mehr als sieben Berichtstage gibt, wobei es sich hierbei um zwei verschiedene Fahrer handelt, bei denen das Wegetagebuch in zwei aufeinanderfolgenden Wochen geführt wurde.¹⁴⁹

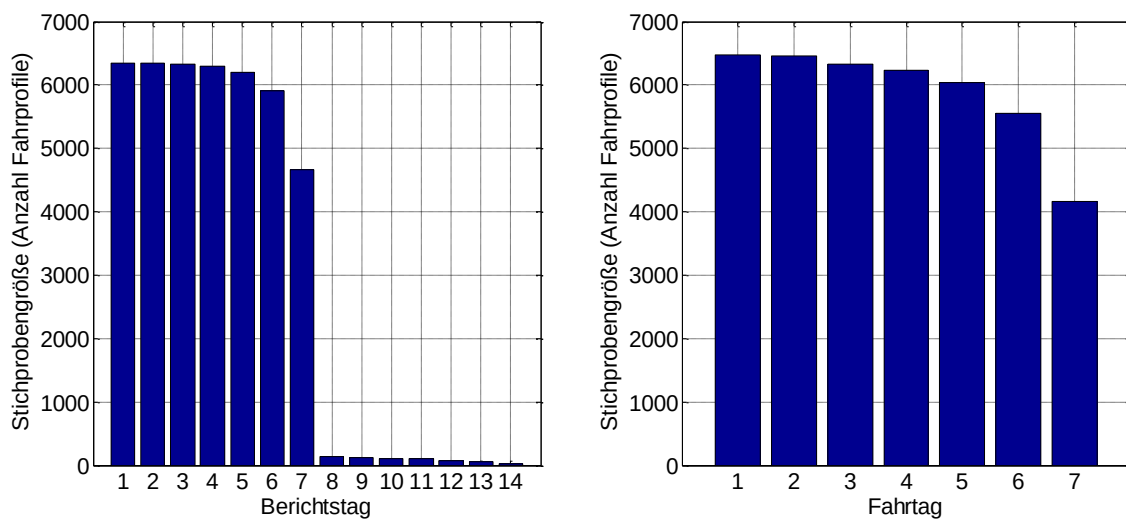


Abbildung 4-20: Stichprobengröße MoP in Abhängigkeit der Berichts- bzw. Fahrtage

Vergleich der Beschäftigungsart und Gemeindegrößen

Die Fahrprofile stammen von Haltern mit unterschiedlichen Beschäftigungen und aus unterschiedlichen Gemeindegrößen. Tabelle 4-24 zeigt die Verteilung der Fahrprofile nach Beschäftigungsart und Wohnort der Pkw-Nutzer. Diese Informationen werden auch zur Charakterisierung der potenziellen Erstnutzer herangezogen (vgl. Abschnitt 5.5).

¹⁴⁹ Vgl. Anhang 7.6.

Tabelle 4-24: MOP-Fahrprofile nach Beschäftigung und Gemeindegröße¹⁵⁰

Beschäftigung	k.A.	Gemeindegröße in Tausend							Gesamt
		< 2	2-5	5-20	20-50	50-100	100-500	> 500	
Vollbeschäftigt	2,8 %	3,5 %	4,1 %	10,7 %	8,0 %	3,2 %	6,4 %	5,5 %	2808
Teilbeschäftigt	0,6 %	1,3 %	1,9 %	4,0 %	2,8 %	1,0 %	1,9 %	1,5 %	958
Nicht beschäftigt	0,6 %	1,1 %	1,0 %	3,4 %	1,8 %	0,9 %	1,2 %	0,9 %	691
Rentner	1,2 %	2,0 %	2,0 %	7,3 %	5,7 %	2,7 %	5,0 %	3,9 %	1882
Gesamt	331	503	567	1614	1164	494	919	747	6339

Zum Vergleich sind in Tabelle 4-25 die Fahrprofile einer anderen großen deutschen Mobilitätserhebung gezeigt.

Tabelle 4-25: MiD2002-Fahrprofile nach Beschäftigung und Gemeindegröße¹⁵¹

Beschäftigung	Gemeindegröße in Tausend						Gesamt
	<5	5-20	20-50	50-100	100-500	>500	
Vollzeit	9,9 %	13,5 %	10,7 %	4,2 %	6,3 %	5,6 %	13084
Teilzeit	4,0 %	5,8 %	4,4 %	1,6 %	2,2 %	2,0 %	5211
Hausfrau	1,5 %	2,6 %	1,8 %	0,8 %	1,0 %	0,8 %	2234
Rentner	3,2 %	5,2 %	4,3 %	1,9 %	3,3 %	3,3 %	5561
Gesamt	4864	7063	5526	2222	3364	3051	26090

Man erkennt, dass die Verteilung der Fahrprofile nach Beschäftigungsart und Wohnortgröße durchaus ähnlich ist. Zudem ist die Stichprobe der MiD2002 klar größer, aber wie oben diskutiert beträgt die Dauer der Beobachtung im Falle der MiD nur einen Tag und führt zu starken Verzerrungen oder Fehlschlüssen bzgl. der Einsatzfähigkeit von Elektrofahrzeugen.

Vergleich der Jahresfahrleistungen

Die folgende Analyse stellt Unterschiede zwischen den Daten von MOP und MiD2002 heraus. Im Kern wird dabei geprüft, ob sich die Mittelwerte eines Merkmals im studienübergreifenden Vergleich statistisch signifikant unterscheiden.¹⁵² Hier werden lediglich einfache Mittelwertvergleiche behandelt. Diese werden als ausreichend erachtet, um

¹⁵⁰ Eigene Auswertung der MOP-Fahrprofile 1994 – 2010. „k.A.“ ist „keine Angabe“.

¹⁵¹ Die Tabelle umfasst die Pkw-Nutzer der MiD2002 (vgl. MID (2002) aber auch Biere et al. (2009) oder Plötz et al. (2013) für eine Auswertung).

¹⁵² Eine Beschreibung des Verfahrens findet sich bspw. in Fahrmeir et al. (2009).

einen einführenden Einblick in die Repräsentativität der Datenquellen zu erhalten.¹⁵³ Während in einer explorativen Datenanalyse die Verteilung der Merkmalsausprägungen im Vordergrund steht, hat die Varianzanalyse die Aufgabe Unterschiede und Gemeinsamkeiten in den verschiedenen Datenquellen aufzudecken: es werden Mittelwerte der untersuchten Stichprobengruppen betrachtet und ermittelt, ob sich diese statistisch signifikant voneinander unterscheiden (bzw. ob die Unterschiede auch zufälliger Natur sein können).

Zunächst wird die Jahresfahrleistung als abhängige Variable betrachtet, in Abhängigkeit von der Fahrzeuggröße und der Gemeindegröße am Halterstandort. Dabei wird untersucht, ob sich die mittlere Jahresfahrleistung zwischen den Gruppen signifikant unterscheidet. Voraussetzung für dieses Verfahren ist u.a., dass die abhängige Variable normalverteilt ist. Im Allgemeinen sind Jahresfahrleistungen jedoch eher rechtsschief verteilt.¹⁵⁴ Deshalb wurde diese logarithmierte Jahresfahrleistung betrachtet um eine symmetrische Verteilung zu erzielen (siehe Abbildung 7-17).¹⁵⁵ Abbildung 4-21 zeigt die mittlere Jahresfahrleistung in Abhängigkeit der Fahrzeuggröße für die unterschiedlichen Datenquellen. Hierbei ist auffällig, dass die mittlere Jahresfahrleistung über alle Fahrzeugklassen für die MOP- und die MiD-2008-Studie vergleichbar ist.

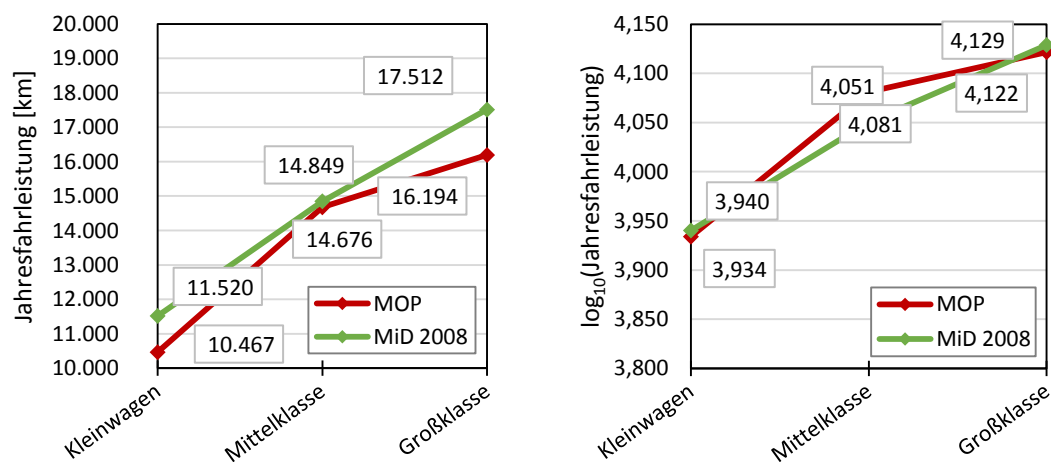


Abbildung 4-21: Mittlere Jahresfahrleistung in Abhängigkeit der Fahrzeuggröße

¹⁵³ Für genauere Untersuchungen lassen sich multiple Mittelwertvergleiche durchführen.

¹⁵⁴ Siehe Plötz, Gnann und Wietschel (2012) und Blum (2013).

¹⁵⁵ Bei der MiD (2008) sowie den MOP-Daten wird die Jahresfahrleistung erfragt. Dabei werden häufig auf tausender gerundete Werte für die Jahresfahrleistung genannt. Dies führt zu einer Art Diskretisierung der Jahresfahrleistung, wodurch die Normalverteilungshypothese der logarithmierten Jahresfahrleistung verletzt wird. Die wichtige Voraussetzung der Symmetrie der Verteilung ist jedoch näherungsweise erfüllt.

Während die Unterschiede in der mittleren Jahresfahrleistung (vgl. auch Tabelle 4-26) bei Kleinwagen und bei Fahrzeugen der Großklasse zwischen der MOP und MiD 2008-Studie statistisch nicht signifikant sind (p -Wert = 84,9 % bzw. p -Wert = 88,1 %), sind die Unterschiede im Bereich der Mittelklasse auch zwischen diesen beiden Fahrprofil-erhebungen statistisch hochsignifikant (p -Wert < 1 %), obwohl sie kleiner ausfallen. Ursächlich hierfür kann der große Stichprobenumfang sein.

Tabelle 4-26: Stichprobengröße, mittlere Jahresfahrleistung und Standardabweichung private Nutzer nach Fahrzeuggröße

Fahrzeugklasse	MiD 2008			MOP 94 - 10		
	n	$\overline{JFL}$	σ	n	$\overline{JFL}$	σ
Kleinwagen	7.885	11.520	11.959	1.714	10.467	9.025
Mittelklasse	16.860	14.849	15.618	3.657	14.676	11.199
Großklasse	4.511	17.512	16.547	968	16.194	11.740
Gesamt	29.256	14.363	15.005	6.339	13.829	10.963

Abbildung 4-22 zeigt die mittlere Jahresfahrleistung in Abhängigkeit der Gemeindegröße am Halterstandort für die unterschiedlichen Datenquellen.

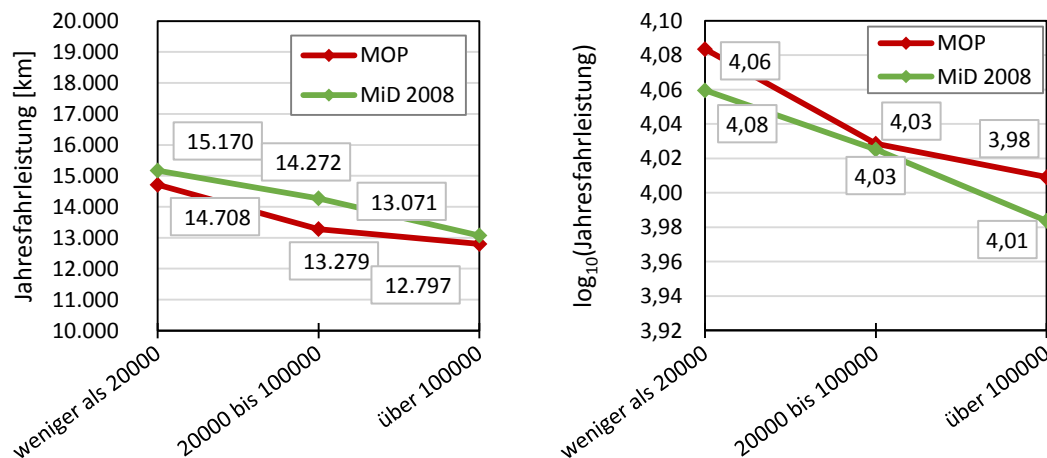


Abbildung 4-22: Mittlere Jahresfahrleistung in Abhängigkeit der Gemeindegröße am Halterstandort und Datenquelle

Man erkennt, dass die mittlere Jahresfahrleistung mit der Gemeindegröße sinkt, d. h. in kleinen Orten wird im Mittel mehr gefahren (vgl. Tabelle 4-27).¹⁵⁶ Die MiD2008- und MOP-Daten unterscheiden sich in der mittleren Jahresfahrleistung lediglich in der Ka-

¹⁵⁶ Der Einfluss der Gemeindegröße bzgl. Siedlungsstruktur scheint allgemeiner gültig zu sein, vgl. Kim und Brownstone (2013) sowie Brownstone und Golob (2009).

tegorie „weniger als 20.000“ statistisch signifikant (p -Werte $< 1\%$). Bei mittleren und großen Gemeinden kann kein statistisch signifikanter Unterschied festgestellt werden (p -Wert = 94,2 % bzw. 7,9 %).

Tabelle 4-27: Stichprobengröße, mittlere Jahresfahrleistung und Standardabweichung private Nutzer nach Gemeindegröße

Einwohner	MiD 2008			MOP 94 - 10		
	n	$\overline{JFL}$	σ	n	$\overline{JFL}$	σ
< 20k Einw.	15.253	15.170	15.727	2.684	14.708	10.993
20k bis 100k	9.271	14.272	15.171	1.658	13.279	9.845
> 100 k	8.263	13.071	14.194	1.666	12.797	11.869
Gesamt	32.787	14.387	15.219	6.008	13.829	10.963

Unter den getroffenen Annahmen (Verwendung der Varianzanalyse, obwohl die Testvoraussetzung der Normalverteilung nicht erfüllt ist) lässt sich nicht ausschließen, dass es geringe Abweichungen in den Mittelwerten der verschiedenen Datenquellen gibt. Der direkte Vergleich der Mittelwerte zeigt jedoch, dass diese Abweichungen sehr gering sind (kleiner 1 %) und die verwendeten MOP-Fahrprofile eine zulässige Datenquelle für den Privatverkehr in Deutschland liefern.

4.4.3 Fahrprofile Wirtschaftsverkehr

Die REM2030-Fahrprofile werden seit dem vergangenen Jahr durch das Fraunhofer ISI im Rahmen des regionalen Innovationsclusters REM 2030 erhoben, um eine Erhebung mit längerem Aufzeichnungszeitraum zu erhalten. Hierbei wurden Fahrten von Fahrzeugen über mindestens drei Wochen mittels GPS-Datenloggern in deutschen Unternehmen mit unterschiedlicher Mitarbeiterzahl in verschiedenen Stadtgrößen aufgezeichnet, um Verzerrungen zu vermeiden. Der Datensatz umfasst derzeit 354 Fahrprofile mit 66.899 Wegen. Aufgrund des unspezifischen Charakters des Fahrzeugtyps „Sonderfahrzeuge“ ($n = 6$) wurden diese in den folgenden Auswertungen nicht berücksichtigt. Somit sind nur die Fahrzeuggröße „Kleinwagen“ ($n = 75$), „Mittelklasse“ ($n = 117$), „Großklasse“ ($n = 43$) und „Transporter“ ($n = 112$) vertreten.

Da die Erhebung das Mobilitätsverhalten gewerblich gehaltener Flottenfahrzeuge abbilden soll, wird in diesem Abschnitt ein Vergleich mit den ebenfalls verfügbaren KiD-Fahrprofilen gezogen, um die Repräsentativität der REM2030-Fahrprofile für die deutschen Neuzulassungen zu analysieren. Dazu wird die Länge der Aufzeichnungsdauer, die Verteilung auf Gemeindegrößen und Beschäftigungsarten, sowie der Jahresfahrleistungen in Betracht gezogen und verglichen.

Vergleich der Aufzeichnungs- und Berichts-dauer

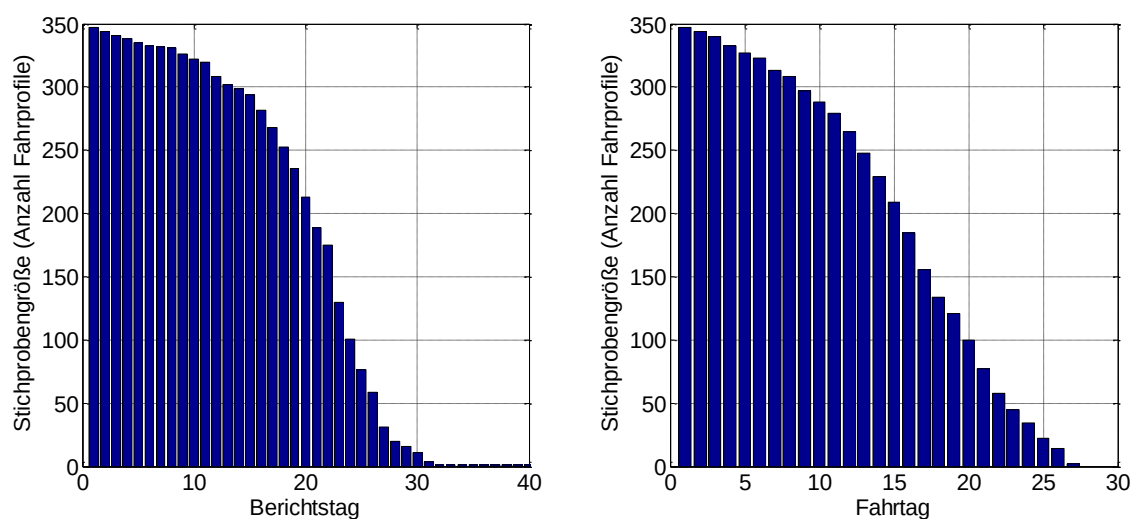


Abbildung 4-23: Stichprobengröße in Abhängigkeit der Berichts- bzw. Fahrtage

Abbildung 4-23 zeigt, dass nur wenige Fahrzeuge über den gesamten Berichtszeitraum täglich bewegt wurden. Viele Fahrzeuge (> 58 %) wurden jedoch an mindestens 15 Tagen bewegt. Des Weiteren sind Fahrten einiger Fahrzeuge über den Berichtszeitraum von drei Wochen hinaus aufgezeichnet wurden.

Im Vergleich dazu zeigt Tabelle 4-28, wie sich die erhobenen Fahrprofile auf die Fahrzeugsegmente und Unternehmensgrößen verteilen. Für die vorliegende Studie wurden Sonderfahrzeuge nicht betrachtet.

Tabelle 4-28: Verteilung der REM2030-Fahrprofile nach Unternehmens- und Fahrzeuggröße.

Segment	Zahl der Mitarbeiter:						Gesamt
	<10	10-50	51-250	251-1000	1001-5000	k. A.	
<i>Grossklasse</i>	14	9	17			3	43
<i>Kleinwagen</i>	15	18	19	6		17	75
<i>Mittelklasse</i>	18	27	45	15	4	8	117
<i>Transporter</i>	21	35	27	20		9	112
Gesamt	69	89	113	41	4	37	353

Man beachte, dass die Unternehmensgröße für die Zuordnung der Mehrpreisbereitschaft für Flottenfahrzeuge verwendet wird (siehe Abschnitt 3.2.5).

Vergleich der Verteilung auf Wirtschaftszweige

Wichtig ist auch die Frage der Repräsentativität der Fahrprofile für den Wirtschaftsverkehr hinsichtlich der Verteilung der Fahrzeuge auf die verschiedenen Wirtschaftszweige.¹⁵⁷ Hierbei stellt sich allerdings die Frage, ob diese Repräsentativität für die Neuzulassungen oder den Bestand an gewerblichen Fahrzeugen angestrebt werden soll. Folgende Abbildung 4-24 zeigt die Verteilung der REM2030-Fahrprofile nach Wirtschaftszweigen und zum Vergleich die Verteilung des Bestandes gewerbliche gehaltenen Fahrzeuge und die Verteilung der Fahrzeuge in der KiD2002.

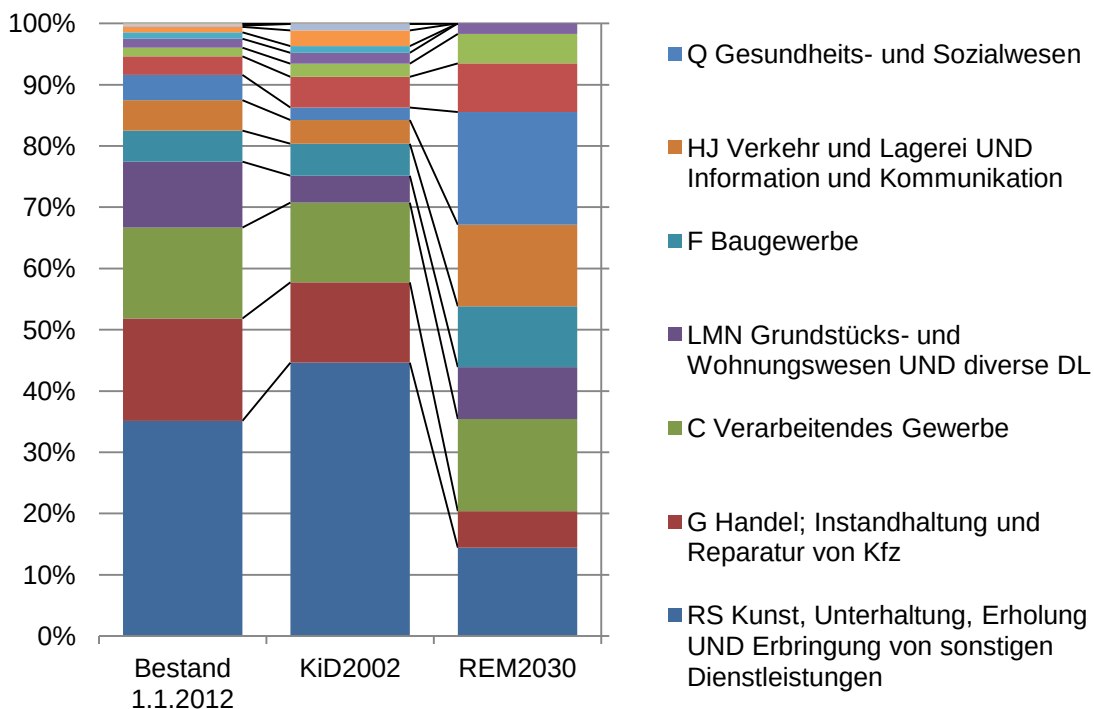


Abbildung 4-24: Aufteilung der REM2030-Fahrprofile und Vergleich mit KiD und Bestand gewerblicher Fahrzeuge

Man erkennt, dass weder die Verteilung der REM2030-Fahrprofile noch die Verteilung der KiD2002-Daten ganz repräsentativ ist für den Bestand an gewerblichen Fahrzeugen. Allerdings ist die Abweichung bei den REM2030-Fahrprofilen etwas größer. Insbesondere konzentrieren sich die REM2030-Fahrprofile etwas stärker auf solche Wirtschaftszweige, die als interessant für Elektromobilität gelten: Verkehr und Lagerei, Gesundheits- und Sozialwesen sowie der öffentliche Dienst. Dies legt die Vermutung

¹⁵⁷ Siehe Gnann, Plötz, Zischler und Wietschel (2012) für Details zur Klassifikation der Wirtschaftszweige.

nahe, dass eine Hochrechnung auf die gesamten Neuzulassungen durch die Anteile der ökonomisch sinnvollen Fahrprofile etwas verzerrt ist. Allerdings weisen erste Untersuchungen der Potenziale innerhalb der Wirtschaftszweige nicht auf wesentliche Unterschiede zwischen den Wirtschaftszweigen hin,¹⁵⁸ so dass dies keinen starken Einfluss auf die Ergebnisse haben sollte. Eine zukünftige Modellierung sollte aber den Effekt einer Korrektur der Anteile berücksichtigen.

Neben der Verteilung ist auch das Nutzungsverhalten innerhalb der Wirtschaftszweige interessant.¹⁵⁹ Abbildung 4-25 zeigt die mittleren Tagesfahrleistungen innerhalb der Wirtschaftszweige für die KiD2002- und die REM2030-Daten.

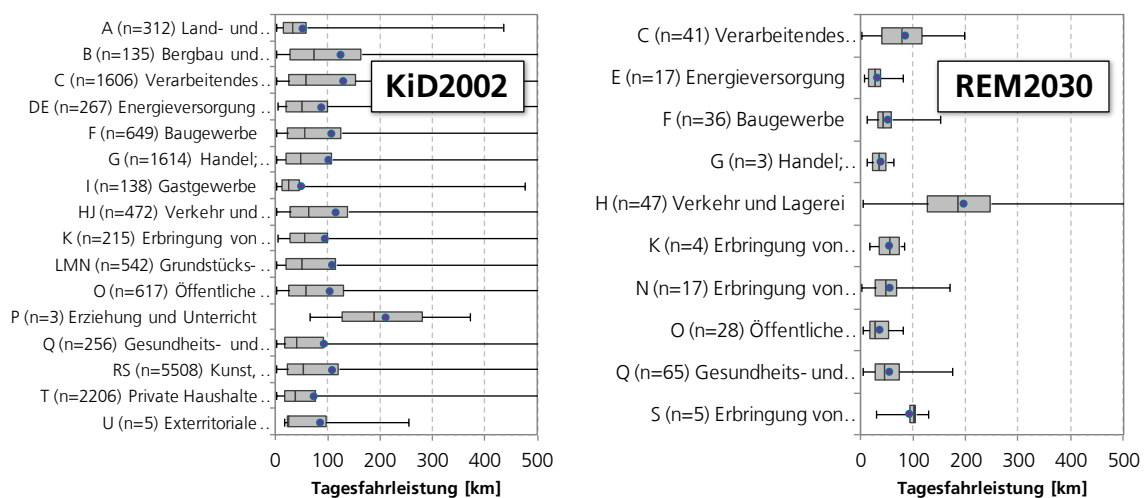


Abbildung 4-25: Boxplot der Tagesfahrleistungen in den KiD2002- und REM2030-Daten¹⁶⁰

Man erkennt, dass (1) die mittleren Tagesfahrleistungen teilweise erheblich zwischen den Wirtschaftszweigen schwanken (sowohl in den KiD- als auch REM2030-Daten) und (2) die Streuung in den Tagesfahrleistungen der KiD-Daten deutlich größer ist als

¹⁵⁸ Vgl. die relativen Potenziale zwischen den Wirtschaftszweigen in Gnann, Plötz, Zischler und Wietschel (2012).

¹⁵⁹ Man beachte jedoch, dass hier gewisse methodische Schwierigkeiten vorliegen: gut die Hälfte der Fahrzeuge in der KiD2002 wird am Stichtag nicht bewegt. Für die durchschnittliche Tagesfahrleistung könnte nun die Zahl der am Stichtag bewegten oder die Zahl aller Fahrzeuge innerhalb der Gruppe verwendet werden. Dies führt jedoch zu starken Verzerrungen. Die REM2030-Fahrprofile mit der längeren Aufzeichnungsdauer haben dieses Problem nicht.

¹⁶⁰ Siehe Gnann, Plötz, Zischler und Wietschel (2012) für Details. Die blauen Punkte im Diagramm geben jeweils das arithmetische Mittel, der mittlere vertikale Balken den Median an und die grauen Flächen begrenzen die mittleren 50 % der Stichprobe.

bei den REM2030-Daten. Ein Grund für letzteres kann die deutlich längere Aufzeichnungsdauer bei den REM2030-Fahrprofilen sein.

4.4.4 Diskussion

Wie oben erläutert, werden für die vorliegende Studie die Daten der MOP1994–2010 als Fahrprofile für die privaten Nutzer und die Dienstwagen verwendet, sowie die REM2030-Daten für die reinen Flottenfahrzeuge. Tabelle 4-29 fasst die Anzahl der verfügbaren Fahrprofile und die Neuzulassungen, auf deren Basis die Neuzulassungen zukünftiger Antriebsarten berechnet werden, zusammen.

Tabelle 4-29: Verteilung der Fahrprofile auf die Neuzulassungen.

Fahrzeug-segment	Nutzer-gruppe	Neuzulas-sungen	Anteile	Fahr-profile	Anteil	Neuzul./ Fahrprofil	Profile/ 1000 Fzg.
klein	privat	475.300	15,3 %	1694	25,3 %	281	3,56
mittel	privat	694.300	22,4 %	3561	53,3 %	195	5,13
groß	privat	143.300	4,6 %	922	13,8 %	155	6,43
Transporter	privat	0	0,0 %	0	0,0 %	0	-
Gesamt	privat	1.312.900	42,3 %	6.177	92,4 %	213	4,70
klein	gewerblich	233.200	7,5 %	75	1,1 %	3109	0,32
mittel	gewerblich	455.000	14,7 %	117	1,7 %	3889	0,26
groß	gewerblich	46.300	1,5 %	44	0,7 %	1052	0,95
Transporter	gewerblich	204.000	6,6 %	112	1,7 %	1821	-
Gesamt	gewerblich	938.500	30,3 %	348	5,2 %	2697	0,37
klein	Dienstwagen	107.000	3,5 %	20	0,3 %	5350	0,19
mittel	Dienstwagen	497.600	16,0 %	96	1,4 %	5183	0,19
groß	Dienstwagen	244.600	7,9 %	46	0,7 %	5317	0,19
Transporter	Dienstwagen	0	0,0 %	0	0,0 %	0	-
Gesamt	Dienstwagen	849.200	27,4 %	162	2,4 %	5242	0,19
GESAMT	ALLE	3.100.600	100 %	6.687	100 %	464	2,16

Es zeigt sich, dass einige Nutzergruppen sehr gut durch Fahrprofile abgedeckt sind, vor allem der Bereich privater Pkw. In anderen Gruppen besteht Bedarf nach weiteren Daten und teilweise wird von einzelnen Fahrprofilen auf eine erhebliche Anzahl an Neuzulassungen hochgerechnet. Allerdings wird die geringere Anzahl an Fahrprofilen im gewerblichen Bereich durch die deutlich längere Aufzeichnungsdauer kompensiert, das heißt die Stichprobe ist zwar kleiner, aber das Fahrverhalten des einzelnen Fahrzeuges wird dafür genauer erfasst. Verbesserungspotenzial besteht vor allem im Bereich Dienstwagen: Diese machen einen erheblichen Anteil der Neuzulassungen aus, werden aber kaum durch öffentlich zugängliche Daten erfasst.

Eine grundlegende Annahme in der Verwendung von Fahrprofilen, die im Zeitraum 1994 bis 2012 aufgezeichnet wurden, für die Simulation des Fahrverhaltens bis 2020 ist, dass sich das Fahrverhalten nicht ändert. Mögliche Änderungen des Nutzerverhaltens über die nahe Zukunft hinweg sind möglich und interessant, können hier aber aufgrund der Datenverfügbarkeit nicht abgebildet werden. Gleiches gilt für Hinweise auf verminderte Pkw-Nutzung und -Besitz bei Jüngeren. Auch Carsharing könnte ein interessanter Markt für Elektrofahrzeuge sein,¹⁶¹ wird aber aufgrund des geringen Anteils an den Neuzulassungen hier nicht detailliert betrachtet.

4.5 Ladeinfrastrukturdaten und -varianten

4.5.1 Einleitung und Abbildung im Modell

In der technischen Analyse (Abschnitt 3.2.1) werden Informationen über die Ladeleistung und Ladeinfrastrukturverfügbarkeit benötigt, um die Batterieprofile zu simulieren. Fahrzeuge können in der Simulation ihre Batterie laden, wenn im festgelegten Szenario am Ort ihrer Ankunft Ladeinfrastruktur zur Verfügung steht. In der ökonomischen Analyse kann die Infrastruktur einbezogen werden (siehe Abschnitt 3.2.3), wofür ihre Kostenparameter von Nöten sind.

Hierbei sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Ladeinfrastruktur als ein Einflussparameter für die Wirtschaftlichkeit der Elektrofahrzeuge modelliert wird und hinsichtlich der Anzahl der Ladepunkte ausschließlich Aussagen über die Primärladepunkte¹⁶² getroffen werden können. Da die Kosten für Ladeinfrastruktur (wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben) in die TCO des potenziellen Nutzers einfließen und nur die Nutzer mit einer positiven TCO gewählt werden, kann man auch von der Menge der gegenfinanzierten Ladeinfrastrukturpunkte sprechen. Kern der Analyse ist jedoch die TCO für den potenziellen EV-Nutzer zu ermitteln und seine Kaufentscheidung darzustellen, was unter den getroffenen Annahmen zur Ladeinfrastruktur geschieht.

Damit ist eine Zuordnung der primären Ladepunkte eines jeden Fahrzeugs möglich, aber aufgrund der verschiedenen technischen Parametervariationen auch die Wirkung halböffentlicher und öffentlicher Ladeinfrastruktur auf die elektrischen Fahranteile und technische Ersetzbarkeit von Fahrten. Eine Auslastung der Lademöglichkeiten kann

¹⁶¹ Vgl. Doll, Gutmann und Wietschel (2011) sowie Knie et al. (2012).

¹⁶² In den Fahrprofilen der Privatanutzer sind die Wegzwecke angegeben, die in private, halböffentliche und öffentliche Ladepunkte überführt werden können. Ebenso enthalten sie Informationen, ob für das betreffende Fahrzeug eine Garage zur Verfügung steht.

nicht dargestellt werden. Hierin ist jedoch eine Weiterentwicklung des bisherigen TCO-Modells zu beachten, dass die Ladeinfrastruktur bislang implizit über Diffusionsfaktoren betrachtet.

Es gilt folgende Abgrenzungen zu beachten:

- Im Rahmen dieser Studie wird ausschließlich das konduktive Laden betrachtet.
- Als Ladeorte werden die bereits in der NPE verwendeten und allgemein gebräuchlichen Kategorien „privat“, „gewerblich“, „halböffentlich“ und „öffentlich“ gewählt.¹⁶³ Ein privater Stellplatz ist nur einem privaten Nutzer zugänglich, analog hierzu wird der gewerbliche Ladepunkt¹⁶⁴ für ein gewerbliches Fahrzeug verwandt. Halböffentliche Ladepunkte stehen nur einer bestimmten Nutzergruppe zur Verfügung, beispielsweise den Mitgliedern eines Sportvereins oder Arbeitnehmern bei ihren Arbeitgebern, und sind damit teilweise zugangsbeschränkt. Öffentliche Ladepunkte hingegen stehen allen Nutzern zur Verfügung und sind nicht zugangsbeschränkt.¹⁶⁵
- Bezüglich der Anschlussleistung an einer Ladesäule sind verschiedene Modi zu berücksichtigen.¹⁶⁶ Auf der untersten Leistungsebene (Modus 1) kann mit 3,7 kW einphasig geladen werden, während Modus 2 eine dreiphasige Ladung mit bis zu 22,2 kW erlaubt. Modus 3 erlaubt Ladungen mit bis zu 173 kW (400 V, 250 A, dreiphasig) und zusätzlich digitale Kommunikation (häufig als „smart charging“ bezeichnet). Während die Modi 1-3 mit Wechselspannung fungieren, wird für Mode 4 Gleichspannung eingesetzt. Hier sind Stromstärken von 400 Ampère und Spannungen von 400 V (Leistung: 276,8 kW) möglich. Im Standardisierungsvorschlag des VDE¹⁶⁷ wird von 3,7 kW auf der untersten Ebene, 11,1 kW auf der zweiten, 22,2 kW auf der dritten Ebene und 43,6 kW in der obersten Ebene zur Schnellladung ausgegangen. Diese Ladeleistungen sind den Ladeorten zuzuordnen, welche in der Fahrprofilsimulation relevant sind. Dabei kann bei privaten Standorten von ein- bis dreiphasiger Ladung ausgegangen werden, respektive 3,7-11 kW, während an allen anderen Standorten sämtliche anderen Modi möglich sind.

¹⁶³ Vgl. z. B. Becker (2009); Wietschel et al. (2009); Wietschel et al. (2011); NPE (2010); NPE (2011); NPE (2012).

¹⁶⁴ Eine Ladesäule kann mehrere Ladepunkte haben, an denen geladen werden kann. Während dies für den Zugang unerheblich ist, ist dies für die Kosten maßgeblich. Im Folgenden wird stets von Ladepunkten die Rede sein.

¹⁶⁵ Hierbei sei erwähnt, dass derzeit zahlreiche Infrastrukturanbieter Ladesäulen aufstellen, die im Moment teilweise Beschränkungen aufweisen. In Zukunft wird durch Projekte wie beispielsweise Hubject ein barrierefreier Zugang angestrebt, siehe Hubject (2013).

¹⁶⁶ Vgl. DIN (2010).

¹⁶⁷ Vgl. VDE (2010).

- Der Einfluss gesteuerter und ungesteuerter Ladung wird nicht weiter betrachtet, da die Kosten die Erlöspotenziale übersteigen.¹⁶⁸

Im Nachfolgenden werden deshalb Szenarien festgelegt, die die Verfügbarkeit von Lademöglichkeiten, deren Ladeleistungen und Kosten umfassen.

4.5.2 Ladeinfrastrukturszenarien

Über die Fahrprofile kann in gewissem Umfang der Einfluss der Ladeinfrastruktur modelliert werden, da die Fahrprofile des MOP Informationen über die Wegstrecke enthalten. Wie in Abschnitt 3.2.3 bereits dargelegt, erfolgt keine räumlich aufgelöste Modellierung: Es werden vereinfachend die Varianten von Ladeinfrastruktur in Tabelle 4-30 betrachtet.

Tabelle 4-30: Ladeleistungen und Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur

Option	Verfügbarkeit	Leistung	Anschlussleistungen (AC) [kW]			
			Privatnutzer			Flottennutzer
			privat	halböffentlich	öffentlich	Gewerblich
IP1IG1	Gering	Gering	3,7	-	-	3,7
IP2IG1	Mittel	Gering	3,7	11,1	-	3,7
IP3IG3	Hoch	Gering	3,7	11,1	22,2	3,7
IP5IG4	Gering	Hoch	11,1	-	-	11,1
IP6IG4	Mittel	Hoch	11,1	22,2	-	11,1
IP7IG6	Hoch	Hoch	11,1	22,2 (DC)	50 (DC)	22,2

Im ersten Infrastrukturszenario können Privatnutzer nur an privaten Standorten laden, das heißt, wenn der Zweck ihrer Wege laut Fahrprofile eine „Fahrt nach Hause“ ist, so können sie ab dem Ankunftszeitpunkt mit 3,7 kW laden. Bei gewerblichen Nutzern steht, wie bereits erwähnt, keine Wegzweckinformation zur Verfügung, so dass angenommen wird, dass sie mit 3,7 kW über Nacht laden können. Im zweiten Infrastrukturszenario wird die Verfügbarkeit der privaten Nutzer um halböffentliche Standorte erhöht. So können diese nun beispielsweise am Arbeitsplatz mit 11,1 kW laden. Für gewerbliche Nutzer bleibt die Ladeleistung und Verfügbarkeit gleich, da diese selten halböffentliche Standorte (wie Sportclubs) anfahren. Im dritten Ladeinfrastrukturszenario wird die Verfügbarkeit nun weiter erhöht – alle Privatnutzer können im öffentlichen

¹⁶⁸ Die derzeitigen Kosten für Ladeinfrastruktur in Tabelle 7-4 und Tabelle 7-5 übersteigen die Erlösmöglichkeiten durch Demand Side Management in Dallinger et al. (2011).

Raum mit 22,2 kW laden, während Flottenutzer immer mit 3,7 kW laden können. Dieses Szenario stellt damit eine obere Verfügbarkeitsgrenze mit geringen Ladeleistungen dar, da unterstellt wird, dass alle Nutzer immer laden (können), sobald sie ihr Fahrzeug abstellen. Die Szenarien 4-6 sind hinsichtlich der Verfügbarkeit analog zum ersten bis dritten Szenario, jedoch wird die Ladeleistung erhöht, um deren Einfluss zu bestimmen.

In der TCO-Rechnung werden, wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben, die Kosten für einen primären Ladepunkt pro Fahrprofil auf den einzelnen Nutzer umgelegt. Diese Option wird jedoch nur für das erste Infrastrukturszenario gerechnet, da hier eine klare Zuordnung von Privatanutzer zu Ladepunkt möglich ist und es den Status quo sehr gut widerspiegelt. Tabelle 4-31 stellt die Kosten für die jeweiligen Nutzer dar.

Tabelle 4-31: Kosten für Ladeinfrastruktur im ersten Infrastrukturszenario (IP1IG1)

Nutzer	Privatanutzer mit Garage	Privatanutzer ohne Garage	Flottenutzer
Investition (2013) [€]	500	850	500
Laufende Kosten (2013) [€/a]	0	363	0
Investition 2020 [€]	440	639	440
Laufende Kosten 2020 [€/a]	0	293	0

Für private Nutzer mit Garage und für Flottenfahrzeuge wird eine Wallbox angenommen (500 € Investition, keine laufenden Kosten). Für private Nutzer ohne Garage ist mindestens eine einfache öffentliche Lademöglichkeit als Primärladepunkt erforderlich. Da die Nutzer eine hohe Nutzung ihres Fahrzeugs benötigen, um es ökonomisch durch ein Elektrofahrzeug ersetzen zu können, müssen diese entsprechend viel Strom laden. Da im ersten Infrastrukturszenario nur eine geringe Leistung angenommen wurde, wird die Ladeinfrastruktur pro Nutzer mindestens vier bis fünf Stunden am Tag belegt. Für die gemeinsame Nutzung einer Ladesäule werden deshalb maximal zwei Nutzer angenommen, die sich die Investitionen und laufenden Kosten teilen. Für diese Option wird demnach ein günstiger öffentlicher Ladepunkt¹⁶⁹ mit 850 € Investition und 363 € laufenden Kosten pro Jahr für jeden Nutzer im Jahr (2013) angenommen, die bis 2020 auf 639 € Investition und 293 € laufende Kosten sinken.

¹⁶⁹ Unterstellt werden die Kosten eines Ladepunkts an einer Laterne, der zwar nicht überall verfügbar sein wird, jedoch eine vergleichsweise kostengünstige Lademöglichkeit darstellt. Detaillierte Annahmen finden sich in Tabelle 7-4 und Tabelle 7-5 bei Lademöglichkeit Ö1.

4.6 Energiewirtschaftliche Rahmendaten

4.6.1 Kraftstoffpreise

Die Kraftstoffpreise für Benzin und Diesel werden zum einen durch die Rohölpreise, deren Transport und Verarbeitung sowie die Gewinnmargen der beteiligten Unternehmen bestimmt und zum anderen durch Steuern. Die wesentlichen Steuern sind die Mehrwertsteuer sowie die Mineralölsteuer. Konkrete Pläne für Steuererhöhung bis 2020 auf Benzin und Diesel in Deutschland sind derzeit nicht bekannt¹⁷⁰. Deshalb wird bei den Steuern davon ausgegangen, dass die Werte von Januar (2013) konstant gehalten werden können bis 2020 (siehe vergleichbare Annahme in Pfahl (2013)). Die Steuern entsprechen dem Stand vom Januar 2013:

- Mehrwertsteuer: 19 %
- Mineralölsteuer Benzin: 0,6545 €/l
- Mineralölsteuer Diesel: 0,4704 €/l.

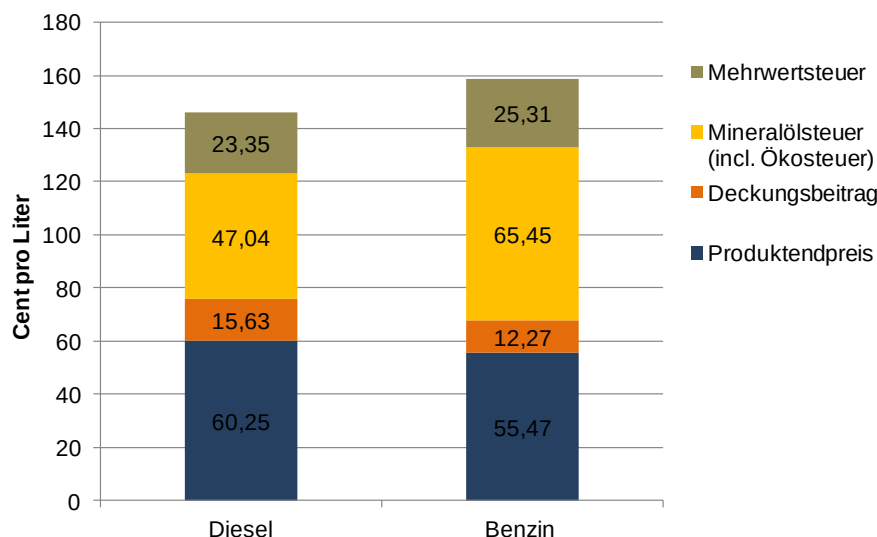


Abbildung 4-26: Zusammensetzung des Benzin-/Dieselpreises zum 31. Dezember 2012 in Cent/Liter¹⁷¹

Die weitere wichtige Komponente bei den Diesel- und Benzinpreisen ist die Entwicklung des Rohölpreises (siehe Abbildung 4-27). Dieser unterlag in der Vergangenheit starken Schwankungen und aktuelle Prognosen zeigen ebenfalls eine große Unsicher-

¹⁷⁰ Die Energiesteuerrichtlinie bspw. der EU greift nach derzeitiger Planung hier frühestens 2023 (siehe EU-Kommission (2011) und DNR (2012)).

¹⁷¹ Siehe MWV (2013)

heit über dessen künftige Entwicklung bis 2020. Die Internationale Energieagentur (IEA) beschäftigt sich seit Jahren ausführlich mit der Rohölpreisentwicklung und in ihren jährlich veröffentlichten World Energy Outlooks (WEO) stellt sie entsprechende Prognosen an. Die Schwankungen in den Prognosen über die Jahre ist allerdings enorm (siehe als Beispiel den Vergleich des Mittleren Szenarios des WEO (2010) zu den neuen Szenarien des WEO (2012) in der Abbildung 4-27).

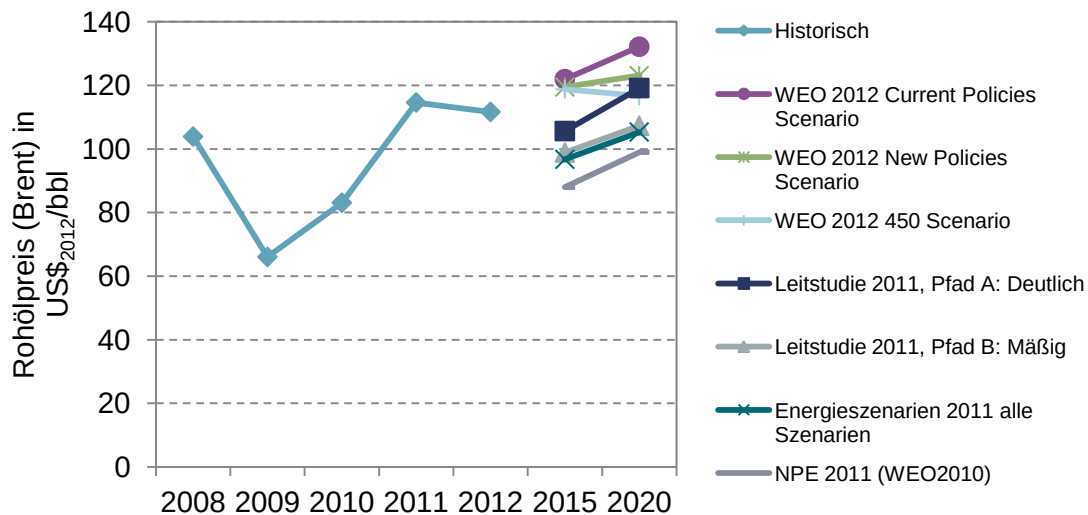


Abbildung 4-27: Entwicklung des Weltrohölpreises¹⁷²

Im Markthochlaufmodell 2011 der NPE wurde der Ölpreis aus dem WEO 2010 abgeleitet.¹⁷³ In dieser Studie wird der Ölpreis aus dem aktuellen WEO 2012 genommen.¹⁷⁴ Hierbei wird die Rohölpreisentwicklung aus dem *New Policy Scenario* ausgewählt, das dort als Referenzszenario bezeichnet wird. Für das alternative Pro-EV-Szenario wird ein Aufschlag von 20 % auf den Rohölpreis unterstellt, beim Contra-EV-Szenario ein Abschlag von 20 %, wobei man dann in vergleichbarer Höhe liegt wie beim Markthochlaufmodell 2011. Somit ergeben sich folgende Rohölpreise:

¹⁷² Quellen: WEO (2010), WEO (2012), Schlesinger et al. (2011), Nitsch et al. (2012), Statista (2013c). Bei den Werten in der Abbildung handelt es sich um die Daten aus den angegebenen Quellen, die mit Hilfe der jährlichen Inflationsraten für USA (US Inflation Calculator (2013)) auf die Preisbasis 2012 bezogen werden.

¹⁷³ Siehe Pfahl (2013).

¹⁷⁴ Vgl. WEO (2012). In Zittel et al. (2013) findet sich u.a. eine aktuelle Diskussion dieser und historischer Ölpreisprognosen.

Mittleres Szenario:

Im Jahr 2012 ein Preis von 112 \$₂₀₁₂/bbl und für 2020 ein Preis von 123 \$₂₀₁₂/bbl.

Pro-EV-Szenario:

Mittleres Szenario +20 % (entspricht ca. 7 % Benzinpreissteigerung gegenüber dem Mittleren Szenario), d. h. für 2020 ein Preis von 148 \$₂₀₁₂/bbl.

Contra-EV-Szenario:

Mittleres Szenario -20 % (entspricht ca. 7 % Benzinpreissenkung gegenüber dem Mittleren Szenario), d. h. für 2020 ein Preis von 2020: 98 \$₂₀₁₂/bbl.

Die resultierenden Endkundenpreise für Benzin und Diesel, die in das Modell einfließen, sind in der Tabelle 4-32 dargestellt. Dabei wird vom Benzin- bzw. Dieselpreis von (2011) linear auf das Jahr 2020 interpoliert. Vor dem Hintergrund der Preissprünge in der Vergangenheit ist die Spreizung zwischen den drei Szenarien als moderat zu bezeichnen. Auf eine Kraftstoffpreisreduzierung nach den Segmenten Haushalte, Handel-Gewerbe-Dienstleistungen und Industrie wird verzichtet, weil entsprechende Recherchen nicht belegen konnten, dass hier relevante Preisvorteile bei den Diesel- und Benzinpreisen für gewerbliche Halter gegenüber privaten Haltern existieren. Diesem Aspekt sollte in weiterführenden Studien allerdings noch einmal nachgegangen werden.

Tabelle 4-32: Benzin- und Dieselpreisentwicklung in den Szenarien in €-Cent₂₀₁₂/l¹⁷⁵

Szenario	Kraftstoff	2011	2020
Mittel	Benzin	155	165
	Diesel	142	158
Pro-EV	Benzin	155	178
	Diesel	142	173
Contra-EV	Benzin	155	153
	Diesel	142	143

4.6.2 Strompreise

Die Strompreise in Deutschland ergeben sich aus Erzeugung, Transport und Vertrieb (Kosten und Gewinnmargen) sowie Steuern, Abgaben, Umlagen (Erneuerbare-Energien-Gesetz, Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz, §19-Umlage, Stromsteuer, Konzessionsabgabe, MWSt.). Sie sind in den letzten Jahren stetig angestiegen (siehe Abbildung 4-28).

¹⁷⁵ Eigene Berechnung (siehe Text). Quelle für 2011-Wert: MWV (2013).

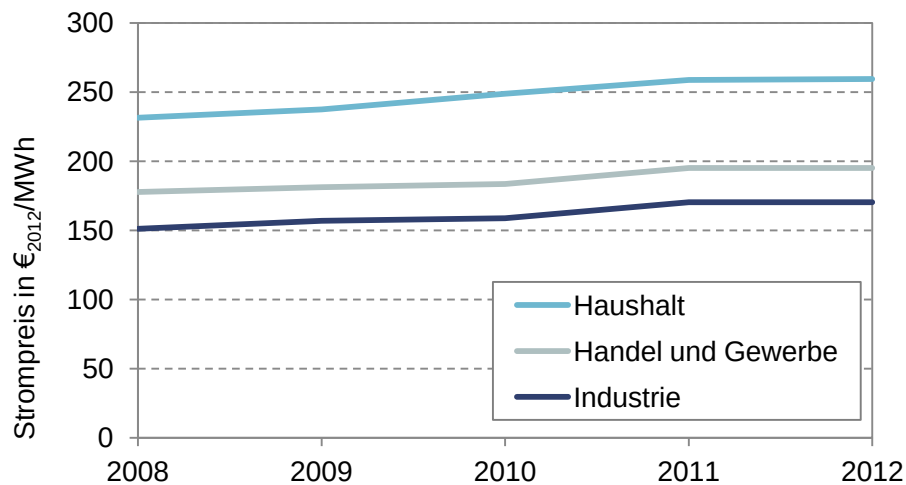


Abbildung 4-28: Historische Entwicklung der Strompreise¹⁷⁶

Im Markthochlaufmodell 2011 wurde ein konstanter Strompreis bis 2020 von 24 Cent/kWh (einschließlich aller Steuern und Abgaben) für alle Segmente – Haushalte, Gewerbe und Handel und Industrie – unterstellt.¹⁷⁷ Begründet wurde dies damit, dass Kostenrisiken (Ausbau der Erneuerbaren Energien und Infrastrukturausbau) versus Kostenchancen (u. a. Ertrag aus Regelleistung) bestehen, die als kaum abschätzbar eingestuft wurden. Abbildung 4-28 zeigt jedoch den recht deutlichen Anstieg in den letzten Jahren. Die Strompreise liegen heute bei Haushalten bereits über den im Markthochlaufmodell 2011 festgelegten Wert für 2020.

Um eine Strompreisprognose für die vorliegende Studie ableiten zu können, wurden verschiedene aktuelle Studien¹⁷⁸ ausgewertet. Alle gehen von steigenden Strompreisen in Deutschland aus, u. a. getrieben durch den Ausbau Erneuerbarer Energien und die Investitionen in den Netzausbau¹⁷⁹. Allerdings variiert die Breite zum Teil recht deutlich. Für das mittlere Szenario wird die McKinsey-Studie als Basis herangezogen

¹⁷⁶ Quelle: Eigene Darstellung, Zahlenwerte aus Eurostat (2013). Endverbraucherpreise differenziert anhand Jahresverbrauch. Klasseneinteilung: Haushalt: Gruppe DC : 2.500 kWh < Verbrauch < 5.000 kWh; Handel und Gewerbe: Gruppe IB : 20 MWh < Verbrauch < 500 MWh; Industrie: Gruppe IC : 500 MWh < Verbrauch < 2.000 MWh.

¹⁷⁷ Siehe Pfahl (2013).

¹⁷⁸ Schlesinger et al. (2011), BCG (2013), Leipziger Institut für Energie GmbH (2012), McKinsey (2012).

¹⁷⁹ Der WEO (2012) geht auch von steigenden Strompreisen für die EU aus, differenziert aber nicht nach einzelnen EU-Ländern.

und für das Contra-EV-Szenario die BCG-Studie.¹⁸⁰ Das Pro-EV-Szenario basiert auf dem mittleren Szenario, es werden jedoch Untersuchungen darüber angestellt, ob Erlöse durch flexible Laststeuerung der Elektrofahrzeuge (*Demand Side Management* DSM) erzielt werden können, was im folgenden Abschnitt extra behandelt wird. In der Tabelle sind die Werte für die drei Szenarien angegeben. Im Modell wird von 2011 bis 2020 in den drei Szenarien linear interpoliert sowie für gewerbliche Halter generell der Strompreis des Handels und Gewerbes unterstellt.

Tabelle 4-33: Strompreisentwicklung in den drei Szenarien in ct₂₀₁₁/kWh¹⁸¹

	Haushalte	Handel und Gewerbe	Industrie (nicht-stromintensive)
2011:	25,9 ct/kWh	19,5 ct/kWh	12,7 ct/kWh
2020:			
Mittleres Szenario	29 ct/kWh	21,5 ct/kWh	14,7 ct/kWh
Pro EV	29 ct/kWh - DSM	21,5 ct/kWh - DSM	14,7 ct/kWh - DSM
Contra EV	33 ct/kWh	25 ct/kWh	17,4 ct/kWh

4.6.3 Erlöspotenziale durch Netzdienstleistungen

Da Elektrofahrzeuge im Durchschnitt zu 95 % ihrer Zeit stehen und dabei zumindest teilweise am Netz angeschlossen sind,¹⁸² ergibt sich die Möglichkeit der Bereitstellung von Netzdienstleistungen. Diese können in Form von steuerbaren Lasten, beispielsweise durch Aufnahme von überschüssigem erneuerbaren Strom bestehen, was im Folgenden als DSM (*Demand Side Management*) bezeichnet wird. Oder es kann auch eine Rückspeisung von Strom aus den Fahrzeugbatterien erfolgen, was als V2G (Vehicle to Grid) gekennzeichnet wird. Im Marktmodell 2011 werden diese Aspekte nicht explizit betrachtet.

Dallinger (2012) berechnet Erlöse von Lastverschiebepotenziale in Deutschland im Jahre 2030 von etwa 100 € pro Jahr bei durchschnittlicher Fahrleistung von 10.000 km (wobei der elektrische Verbrauch entscheidend ist). Bei Vehicle2Grid kann man bei gleicher Fahrleistung mit rund 150 € pro Jahr an Erlösen rechnen, unter Berücksichti-

¹⁸⁰ McKinsey (2012), BCG (2013).

¹⁸¹ Quelle für (2011) und Mittleres Szenario: McKinsey (2012), für Contra EV-Szenario: BCG (2013) sowie für Handel und Gewerbe: eigene Schätzung. Unterstellt wird dabei, dass die Segmententeilung in den beiden Studien die gleiche ist, was anhand der Quellen nicht nachweisbar ist.

¹⁸² Vgl. Dallinger (2012) und Kley (2011).

gung der Mehrkosten durch die Batterieabnutzung. Die Mehrinvestitionen für intelligente Ladepunkte sind allerdings dabei nicht berücksichtigt.

In Linssen et al. (2012) ergeben Berechnungen für Deutschland ein Erlöspotenzial in Höhe von 50 € bis maximal 250 € pro Jahr.¹⁸³ Allerdings ist hier der mögliche Wertverlust des Fahrzeugs durch die vermehrte Batterienutzung bei V2G nicht enthalten.

Berücksichtigt man, dass für intelligentes Laden die technischen Voraussetzung flächendeckend erst noch zu schaffen sind, und dass für die Teilnahme von Fahrzeugen am Markt für Minutenreserve oder Sekundärregelenergieleistung die gesetzlichen Voraussetzungen noch fehlen, kann wohl frühestens ab 2015 mit Erlösen aus Netzdienstleistungen gerechnet werden. Weiterhin ist über die Nutzerakzeptanz von solchen Lösungen recht wenig bekannt.

Unter Abwägung dieser Aspekte wird auf die Berücksichtigung von V2G generell verzichtet. Erlösmöglichkeiten für DSM werden nur im Szenario Pro-EV eingerechnet. Diese werden ab 2015 mit 50 € angesetzt und linear bis 2020 auf 100 € gesteigert. Da sie mengenabhängig sind werden sie auf die Strompreise umgelegt. Eine Strompreisminderung von 2,5 ct/kWh 2015 und 5 ct/kWh 2020 resultiert aus diesen Annahmen. Die Kosten für intelligente Ladesteuerung sind dann noch abzuziehen. Sie hängen von dem jeweiligen Ladeszenario ab (siehe Abschnitt 4.5). Die Berechnungen zeigen, dass die zusätzlichen Ausgaben für eine intelligente Ladesteuerung bis 2020 die möglichen Erlöse deutlich übersteigen, weshalb im Folgenden nicht von intelligentem Laden und damit von DSM ausgegangen wird. Die Strompreise für das Pro-EV-Szenario werden denen des Mittleren Szenarios gleichgesetzt.

4.6.4 Übersicht Szenariodaten

Die Kraftstoffpreise, die aus den Rohölpreisen abgeleitet werden, unterteilen sich in Diesel- und Benzinpreise, die Strompreise in gewerbliche und private. Die jeweiligen Werte sind in ihrer zeitlichen Entwicklung in Tabelle 4-34 bis Tabelle 4-36 dargestellt. Detaillierte Begründungen zu den einzelnen Parameterentwicklungen finden sich in den zuvor beschriebenen Abschnitten.

Im Szenario Pro-EV sinkt der Batteriepreis von 700 €/kWh im Jahr 2011 auf 250 €/kWh im Jahr 2020, während die Kraftstoffpreise deutlich ansteigen. So kostet Benzin im Jahr 2011 1,55 €/l, im Jahr 2020 1,79 €/l und Diesel 1,42 €/l (2011) bzw. 1,73 €/l 2020. Die Strompreise entwickeln sich wie im mittleren Szenario. Im mittleren Szenario ist die

¹⁸³ Vgl. Linssen et al. (2012, S. 221)

Senkung der Batteriepreise moderater: von 800 €/kWh im Jahr (2011) auf 280 €/kWh für das Jahr 2020. Auch der Benzin- und Dieselpreis steigt von 1,55 €/l (Benzin 2011) und 1,42 €/l (Diesel 2011) auf 1,65 €/l (Benzin 2020) und 1,58 €/l (Diesel 2020) moderater an als im Pro-EV- Szenario. Die Strompreise steigen indes leicht an. Im Contra-EV-Szenario sinken die Batteriepreise langsamer als in den vorigen Szenarien (von 900 €/kWh 2011 auf 310 €/kWh 2020) und die Kraftstoffpreise bleiben nahezu konstant (-1 €/l für Benzin und +1 €/l für Diesel von 2011 zu 2020). Die Strompreise steigen um jeweils rund 4 €/kWh im Jahre 2020 gegenüber dem mittleren Szenario an.

Tabelle 4-34: Parameterwerte für Pro-EV-Szenario¹⁸⁴

Pro-EV-Szenario	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Batteriepreis [€/kWh]	700	450	400	370	350	300	270	259	255	250
Benzinpreis [€/l]	1,55	1,57	1,61	1,63	1,65	1,68	1,70	1,73	1,75	1,79
Dieselpreis [€/l]	1,42	1,45	1,49	1,52	1,56	1,59	1,63	1,67	1,70	1,73
Strompreis privat [€/kWh]¹⁸⁵	0,259	0,263	0,265	0,269	0,273	0,276	0,280	0,283	0,287	0,290
Strompreis gew. [€/kWh]	0,195	0,198	0,200	0,201	0,203	0,206	0,208	0,211	0,213	0,215

Tabelle 4-35: Parameterwerte für das mittlere Szenario¹⁸⁶

Mittleres Szenario	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Batteriepreis [€/kWh]	800	500	450	400	380	350	300	290	284	280
Benzinpreis [€/l]	1,55	1,56	1,57	1,58	1,59	1,61	1,62	1,63	1,64	1,65
Dieselpreis [€/l]	1,42	1,44	1,45	1,48	1,49	1,51	1,52	1,55	1,56	1,58
Strompreis privat [€/kWh]	0,259	0,263	0,265	0,269	0,273	0,276	0,280	0,283	0,287	0,290
Strompreis gew. [€/kWh]	0,195	0,198	0,200	0,201	0,203	0,206	0,208	0,211	0,213	0,215

Tabelle 4-36: Parameterwerte für Szenario Contra-EV¹⁸⁷

Contra-EV-Szenario	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Batteriepreis [€/kWh]	900	550	500	450	420	380	330	320	315	310
Benzinpreis [€/l]	1,55	1,55	1,55	1,55	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54
Dieselpreis [€/l]	1,42	1,42	1,42	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43
Strompreis privat [€/kWh]	0,259	0,267	0,275	0,283	0,290	0,299	0,306	0,314	0,322	0,330
Strompreis gew. [€/kWh]	0,195	0,201	0,207	0,213	0,219	0,226	0,232	0,238	0,244	0,250

¹⁸⁴ Alle Preise sind Bruttopreise inklusive Mehrwertsteuer.

¹⁸⁵ Hier fallen noch Kosten für die intelligente Ladesteuerung (Ladeszenario abhängig).

¹⁸⁶ Alle Preise sind Bruttopreise inklusive Mehrwertsteuer.

¹⁸⁷ Alle Preise sind Bruttopreise inklusive Mehrwertsteuer.

4.7 Kundenverhalten und nicht-monetäre Faktoren

Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, ist eine Integration des Kundenverhaltens über monetäre Aspekte hinaus wichtig für eine adäquate Abbildung des Kaufverhaltens verschiedener Nutzergruppen. Im vorliegenden Abschnitt werden diese Aspekte weiter ausgeführt. Dafür werden die Details der Vorgehensweise bei der Zuordnung einer Mehrpreisbereitschaft beschrieben, auf mögliche Segmentwechsel eingegangen und die Abbildung einer Markentreue im Modell ALADIN erläutert.

4.7.1 Mehrpreisbereitschaft

Für eine Modellierung der Mehrpreisbereitschaft¹⁸⁸ muss im Markthochlaufmodell jedem einzelnen Fahrprofil der Simulation eine individuelle Mehrpreisbereitschaft zugeordnet werden. Im Folgenden wird die Vorgehensweise für Privatanutzer weiter erläutert (eine allgemeine Beschreibung erfolgte bereits in Abschnitt 3.2.5), die Zuordnung einer Mehrpreisbereitschaft zu gewerblichen Fahrprofilen wurde ausführlich in Abschnitt 3.2.5 erläutert.

Methodik Privatanutzer

Als Datenbasis für die Zuordnung einer Mehrpreisbereitschaft im Modell ALADIN wird die im Rahmen der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität (FSEM) durchgeführte Breitenbefragung von Nutzern und Nichtnutzern von Elektrofahrzeugen verwendet. Diese Daten wurden in Wietschel et al. (2012) ausführlich beschrieben und dokumentiert. Diese Daten werden mit der aktuellen Erhebung auch von nicht-Nutzern im Rahmen des iZeus-Projektes kombiniert. Eine grobe Beschreibung beider Stichproben erfolgt in Tabelle 4-37.

Tabelle 4-37: Kurzbeschreibung der FSEM- und iZeus-Daten

Kategorie	FSEM-Datensatz	iZeus-Datensatz
Zielgruppen	Private Nichtnutzer und Nutzer	Privatpersonen
Stichprobe	969 Personen	1027 Personen
Erhebung	Online-Befragung	Online-Befragung
Beschreibung der Stichprobe	81 % Männer, im Mittel 41 Jahre alt, Hohe Bildung	49 % Männer, im Mittel 49 Jahre alt, 14 % mit Hochschulabschluss

¹⁸⁸ Genau genommen handelt es sich um eine „Mehr-TCO-Bereitschaft“. Da dieser Ausdruck unüblich ist, wird im Folgenden weiterhin „Mehrpreisbereitschaft“ verwendet.

Die Stichprobe der FSEM-Daten ist nicht repräsentativ für die privaten Pkw-Käufer, hat aber den Vorteil, dass die Gruppen der Nutzer und Kaufbereiten, die für die vorliegende Studie und den Markthochlauf besonders wichtig sind, gut abgedeckt werden. Anhand der FSEM-Daten wird daher die durchschnittliche Mehrpreisbereitschaft pro Kundengruppe bestimmt. Die Korrektur der Repräsentativität erfolgt über eine Kombination mit den Befragungsdaten des iZeus-Projektes, die repräsentativ für die deutsche Bevölkerung ist.¹⁸⁹

Innerhalb der Befragungen wurde auch die Bereitschaft abgefragt, für ein Elektrofahrzeug in der Anschaffung prozentual mehr auszugeben. Die Zuordnung zu den Fahrprofilen erfolgt mittels statistischer Verfahren. Dafür werden die Faktoren Alter, Haushaltseinkommen, Geschlecht, Haushaltsgröße, Wohnortgröße, Beschäftigung (Vollzeit, Teilzeit, etc.) und Schulabschluss verwendet, die sowohl in den FSEM-Daten als auch für die einzelnen Fahrprofile vorliegen. Genauer werden basierend auf den FSEM-Daten die Kundengruppen Nutzer, Interessierte mit Kaufabsicht, Interessierte ohne Kaufabsicht und Desinteressierte gebildet.¹⁹⁰ Die Definition der Kundengruppen erfolgt anhand von drei Fragen und damit unabhängig von der Soziodemographie (vgl. Abbildung 4-29). Diese Zuordnung ist eindeutig.

Nutzer? Interessiert? Kaufabsicht?			
Ja			Innovatoren
Nein	Ja	Ja	Early Adopter
		Nein	Early Majority
	Nein	Ja	Laggard
		Nein	<i>Nicht betrachtet</i>

Abbildung 4-29: Definition der Kundengruppen

Diese Kundengruppen unterscheiden sich signifikant in einigen sozio-demographischen Merkmalen. Die Fahrprofile werden nun mittels der höchsten Übereinstimmung mit den Mitgliedern einer Kundengruppe dieser Kundengruppe zugeordnet und erhal-

¹⁸⁹ Vgl. www.izeus.de für Informationen zum Projekt und Wesche (2013) für die Daten.

¹⁹⁰ Vgl. Wietschel et al. (2012).

ten die mittlere Mehrpreisbereitschaft dieser Kundengruppe. Weitere Informationen finden sich in Abschnitt 7.7 im Anhang.

Höhe der Mehrpreisbereitschaften

Für die Höhe der Mehrpreisbereitschaft wird ein anteiliger Wert des Kaufpreises des konventionellen Referenzfahrzeugs im Jahr der Betrachtung zugrundegelegt. Die verwendeten Werte sind in Tabelle 4-38 beispielhaft für die Jahre 2013 und 2020 dargestellt. In der Tabelle ist eine Reduktion der Mehrpreisbereitschaft von 100 % auf 60 % bis 2020 bereits berücksichtigt. Zudem ist zu beachten, dass die Gruppen der Mehrpreisbereitschaften unterschiedlich groß sind.

Tabelle 4-38: Höhe der Mehrpreisbereitschaften in €¹⁹¹

		Mehrpreisbereitschaften									
Jahr: 2013		2020									
Gruppe ¹⁹²		Innov.	E.A.	E.M.	Lagg.		Innov.	E.A.	E.M.	Lagg.	
Anteil Nutzer		0,5 %	1,0 %	48 %	50,5 %		0,5 %	1,0 %	48 %	50,5 %	
Größe	Typ	BLP	30 %	15 %	10 %	1 %	BLP	30 %	15 %	10 %	1 %
klein	BEV	24.133	3.775	1.888	1.258	126	20.087	2.394	1.197	798	80
	DIESEL	15.189	0	0	0	0	15.904	0	0	0	0
	ICEV	12.584	0	0	0	0	13.299	0	0	0	0
	PHEV	22.022	3.775	1.888	1.258	126	20.606	2.394	1.197	798	80
	REEV	23.887	3.775	1.888	1.258	126	21.257	2.394	1.197	798	80
mittel	BEV	34.322	6.156	3.078	2.052	205	29.467	3.752	1.876	1.251	125
	DIESEL	23.122	0	0	0	0	23.445	0	0	0	0
	ICEV	20.519	0	0	0	0	20.843	0	0	0	0
	PHEV	31.673	6.156	3.078	2.052	205	29.650	3.752	1.876	1.251	125
	REEV	33.538	6.156	3.078	2.052	205	30.301	3.752	1.876	1.251	125
groß	BEV	52.398	11.780	5.890	3.927	393	46.734	7.226	3.613	2.409	241
	DIESEL	39.266	0	0	0	0	40.143	0	0	0	0
	ICEV	36.610	0	0	0	0	37.487	0	0	0	0
	PHEV	49.267	11.780	5.890	3.927	393	46.637	7.226	3.613	2.409	241
	REEV	51.132	11.780	5.890	3.927	393	47.288	7.226	3.613	2.409	241

¹⁹¹ Quelle: Eigene Berechnung auf Basis der Nettolistenpreise. Die Höhe dieser Mehrpreisbereitschaften ist konsistent mit den angegebenen Mehrpreisbereitschaften in Greiner and Deeg (2013); Hacker et al. (2011); Golze (2011).

¹⁹² Die Nutzergruppen sind hier abgekürzt: Innov. – Innovatoren, E.A. – Early Adopter, E.M. – Early Majority und Lagg. – Laggards. Diese entsprechen in den Befragungen den Nutzern, Interessierten mit Kaufabsicht, Interessierten ohne Kaufabsicht und Desinteressierten.

Im Modell findet rein rechnerisch eine Verringerung der TCO in der angegebenen Höhe statt.

Gewerbliche Nutzer

Für die Mehrpreisbereitschaft von Flottenkunden gibt es aus verschiedenen Projekten (bspw. den Modellregionen des BMVBS) erste Ergebnisse zur Mehrpreisbereitschaft von Unternehmen¹⁹³. Leider kann eine feste Mehrpreisbereitschaft aufgrund fehlender Daten hier den Unternehmensfahrprofilen nicht zugeordnet werden (entsprechende Eigenschaften der Unternehmen fehlen für eine Regression). Es sind im Rahmen der Markthochlaufrechnungen deshalb nur qualitative Aussagen möglich, um die prinzipiellen Auswirkungen grob einschätzen zu können.

Die Ergebnisse der Studien zu Mehrpreisbereitschaften deuten darauf hin, dass diese geringer ist als bei privaten Haltern. Dass die Wirtschaftlichkeit das Hauptkriterium bei den gewerblichen Nutzern ist, wird auch in der Studie des Öko-Institutes bestätigt.¹⁹⁴

Bei den gewerblichen Nutzern wird nach einem Quervergleich der verschiedenen Studien unterstellt, dass 55 % der gewerblichen Halter keine Mehrpreisbereitschaft haben. Die anderen 45 % haben eine Mehrpreisbereitschaft von 10 % auf die sogenannte Full-Leasing-Rate.¹⁹⁵ Umgerechnet wird dies im Markthochlaufmodell auf den Anschaffungspreis des konventionellen Vergleichsmodells mit 7 %. Die Zuordnung, welcher Nutzer eine Mehrpreisbereitschaft hat und welcher keine, erfolgt über die Unternehmensgröße. Diese liegt über die Anzahl an Beschäftigten mit den Fahrprofilen vor. Da Studien¹⁹⁶ darauf hinweisen, dass eher große Firmen eine Mehrpreisbereitschaft haben, wird den größeren Firmen die Mehrpreisbereitschaft zugeordnet. Wie bei den privaten Nutzern wird von einer über die Zeit abnehmenden Mehrpreisbereitschaft ausgegangen (auf 60 % im Jahr 2020). Insgesamt sind die hier getroffenen Annahmen zur Mehrpreisbereitschaft gegenüber den Angaben in den zu Grunde liegenden Studien eher vorsichtig angenommen und beispielsweise niedriger als in Pfahl (2013).

¹⁹³ Diese liegen typischerweise in der Form vor: p % der Unternehmen sind nicht bereit mehr zu zahlen; q % würden bis 10 % mehr zahlen, r % der Unternehmen bis 20 % usw.

¹⁹⁴ Siehe Öko-Institut (2011a).

¹⁹⁵ Siehe Öko-Institut (2011a und b) und Dataforce (2011).

¹⁹⁶ Siehe Öko-Institut (2011a und b) und Dataforce (2011).

Diskussion

Alternativ zum beschriebenen Vorgehen könnte die Mehrpreisbereitschaft über eine zweistufige Regression ermittelt werden. Anhand der FSEM-Daten würde eine logistische Regression¹⁹⁷ zur Entscheidung „Mehrpreisbereitschaft – ja oder nein?“ durchgeführt, d. h. anhand der sozio-demographischen Variablen (wie Alter, Geschlecht, Einkommen, etc.) würde die Wahrscheinlichkeit berechnet, überhaupt eine Bereitschaft für die Akzeptanz höherer Anschaffungspreise zu haben. Die Koeffizienten der Regression würden dann verwendet, um die Wahrscheinlichkeit für eine Mehrpreisbereitschaft bei jedem einzelnen Fahrprofil vorherzusagen. Für die Befragten der FSEM-Daten, die tatsächlich mehrpreisbereit waren, könnte dann in einer zweiten Regression die Höhe der Mehrpreisbereitschaft anhand der gleichen sozio-demographischen Variablen erfolgen. Diese könnte dann wiederum auf die Fahrprofile übertragen werden, indem die Regressionskoeffizienten auf den Fahrprofil-Datensatz angewendet werden. Dieses Verfahren wurde für die vorliegenden Daten getestet, erwies sich aber als wenig robust. Zum einen erweisen sich nur wenige Variablen als signifikant in der logistischen Regression, zum anderen kann die nicht repräsentative Größe der Gruppen in der FSEM-Befragung damit nicht korrigiert werden. Daher wurde dieses Verfahren für die vorliegende Studie nicht verwendet.

Weiterhin lässt sich die Annahme der zeitlichen Änderung der Mehrpreisbereitschaft (wie oben ausgeführt) diskutieren. Eine generelle zeitliche Abnahme der Mehrpreisbereitschaft ist sicher plausibel, da die Innovatoren und Early Adopter vor allem für die Neuheit des Produktes mehr zu zahlen bereit sind.¹⁹⁸ Gerade diese ist einige Jahre nach der Markteinführung von Elektrofahrzeuge natürlich geringer als heute. Für die genaue Höhe der zukünftigen Mehrpreisbereitschaft für Elektrofahrzeug in Deutschland gibt es keine Belege. Um dieser Unsicherheit Rechnung zu tragen, wird in Kapitel 5.3 die Wirkung der Mehrpreisbereitschaft auf den Markthochlauf von Elektrofahrzeugen gesondert ausgewiesen.

4.7.2 Marken- und Segmenttreue

Wie Abbildung 3-1 zeigt, sind Marke und Größe eines Fahrzeuges (und in dem Sinne auch die Marken- und Segmenttreue) weitere Faktoren in der Kaufentscheidung. Viele Pkw-Käufer sind einer bestimmten Marke sehr treu oder schließen umgekehrt andere

¹⁹⁷ Siehe Fahrmeir et al. (2009) für eine Einführung.

¹⁹⁸ Vgl. Rogers (1962) und Wietschel et al. (2012).

Marken komplett vom Kauf aus.¹⁹⁹ Hinzu kommt, dass Kunden sich beim Kauf eines Pkw teilweise für ein größeres oder kleineres Fahrzeug als ihr Vorgängermodell entscheiden. Ebenso sind Kunden teilweise skeptisch beim Wechsel der Antriebsart. Insgesamt wären also die folgenden Faktoren zu berücksichtigen:

- Marke und Markentreue bzw. -wechselbereitschaft
- Segment und Segmenttreue bzw. -wechselbereitschaft
- Antriebsart und Antriebstreue bzw. -wechselbereitschaft

Eine wirklich umfassende Berücksichtigung der Marke, Fahrzeuggröße und Antriebsart sowie der Wechselbereitschaft erfordert eine sehr gute und breite Datenbasis, insbesondere da es auch Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen den Faktoren gibt. Beispielsweise könnten Dieselkäufer eine höhere Markentreue zeigen als Benzinfahrer. Dies lässt sich statistisch durch bedingte Wahrscheinlichkeiten ausdrücken. Die resultierende Komplexität sowie die entsprechenden Anforderungen an die Daten demonstrieren Mueller und de Haan (2006) an einer entsprechenden Untersuchung für die Schweiz, in der trotz einer Gesamtstichprobe von 30.000 Käufern verschiedene Fragen offen bleiben müssen. Die Komplexität ist beispielhaft in folgender Abbildung mit den Schweizer Daten für Pkw-Neukäufer dargestellt.

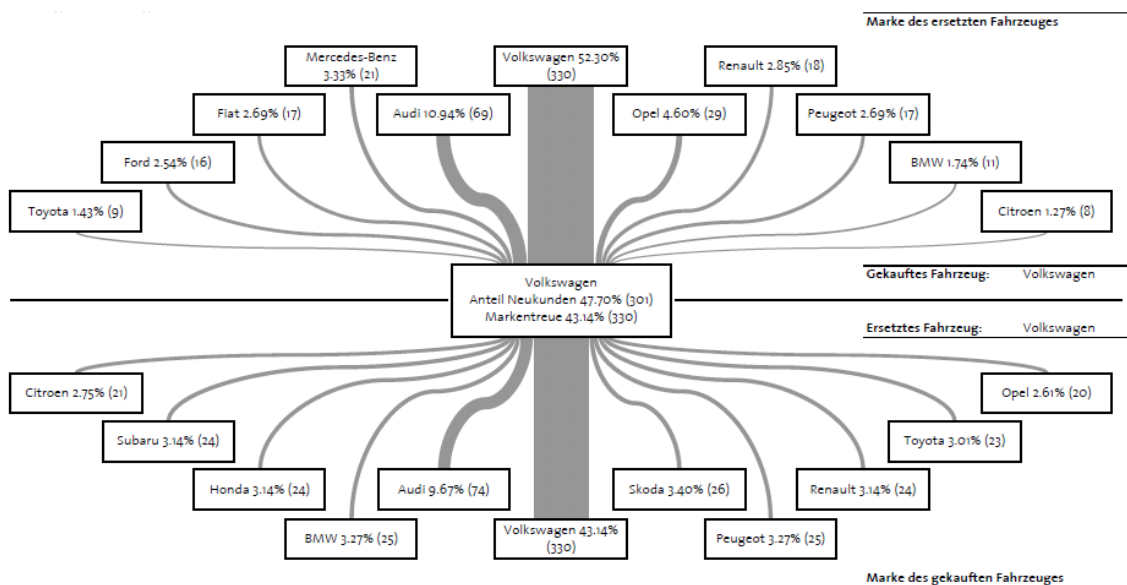


Abbildung 4-30: Markenwechsel am Beispiel VW für die Schweiz²⁰⁰

¹⁹⁹ Vgl. Mock (2010); Mueller und de Haan (2006).

²⁰⁰ Quelle: Mueller und De Haan (2006).

Man erkennt beispielhaft, dass die Wahrscheinlichkeit, von Hersteller X zu Y zu wechseln nicht gleich der Wahrscheinlichkeit ist, von Y zu X zu wechseln. Daher wären für adäquate Beschreibung bedingte Wahrscheinlichkeiten $P(X|Y)$ und $P(Y|X)$ nötig.²⁰¹ Die zusätzliche Berücksichtigung von Fahrzeuggröße G und Antrieb A bei Hersteller X und Y macht die Analyse zusätzlicher komplexer.

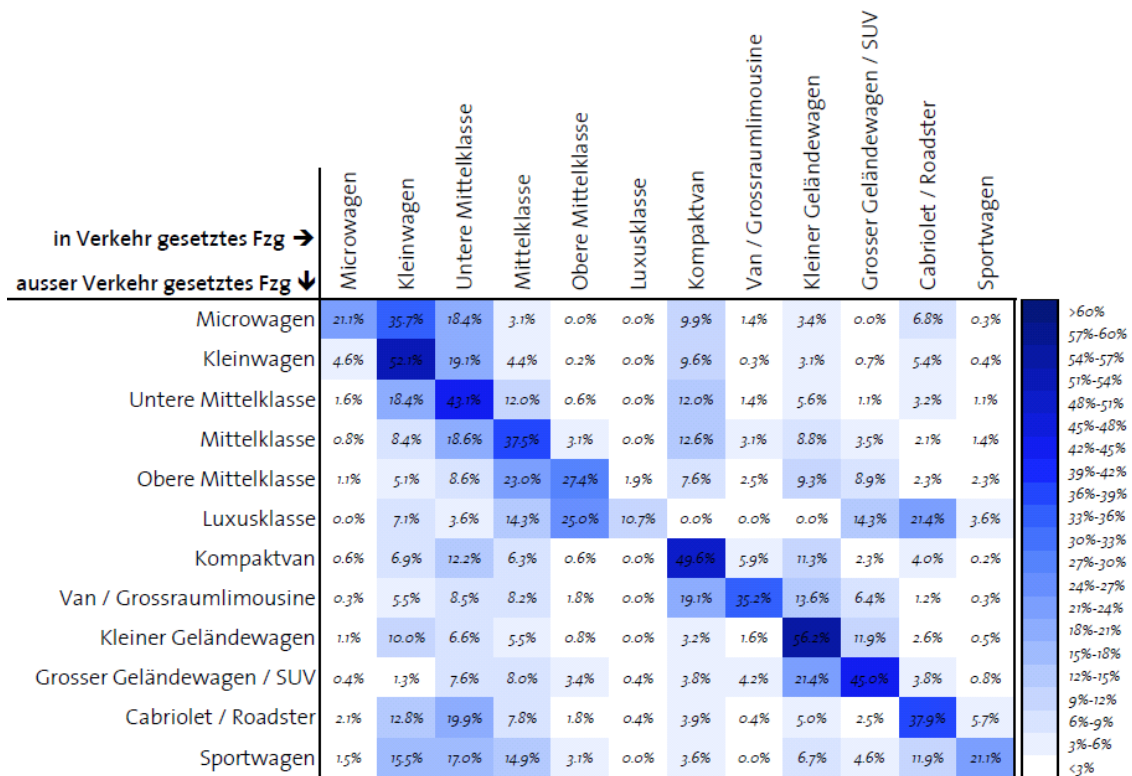
Entsprechende Daten dieses Umfanges und der Qualität liegen derzeit für Deutschland und insbesondere für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben nach Kenntnis der Autoren nicht vor. Daher müssen in der Berechnung des möglichen Markthochlaufes starke Vereinfachungen getroffen werden.

Segmenttreue

Die erste Modellannahme betrifft den Wechsel eines Käufers zwischen den Segmenten beim Kauf eines Neuwagens. Ein Vergleich mit den Schweizer Daten zum Wechselverhalten zwischen Pkw-Segmenten in nachstehender Abbildung 4-31 (man beachte, dass die schweizerischen Pkw-Segmente nicht genau mit den KBA-Segmenten übereinstimmen) zeigt jedoch, dass Kunden ihrem ursprünglichen Segment überwiegend treu bleiben und häufig nur zwischen benachbarten Segmenten wechseln, beispielsweise zwischen Micro- und Kleinwagen. Im Markthochlauf-Modell sind die verschiedenen Segmente teilweise aggregiert (die KBA-Segmente Mini und Kleinwagen sind zu „Klein“ zusammengefasst). Dies ist bei der Interpretation der Wechselmatrix in Abbildung 4-31 zu beachten, denn Wechsel zwischen Microwagen und Kleinwagen sind für das Modell keine Wechsel – der Kunde bleibt im aggregierten Segment „Klein“.

In Anbetracht der überwiegenden Diagonalgestalt der Wechselmatrix und der geringen Anteile der Wechsel zwischen den aggregierten Segmenten Klein, Mittel und Groß (und unter der Annahme, dass die Segment-Wechselmatrix für Deutschland ähnlich ist), wird ein Segmentwechsel im Modell nicht berücksichtigt. Die Bedeutung der Größe eines Fahrzeuges (im Sinne Klein, Mittel oder Groß) und damit eine Segmenttreue wird insofern abgebildet, als dass ein bisheriger Nutzer eines großen Fahrzeuges beim Kauf weiterhin ein großes Fahrzeug wählt (und analoge Annahme dazu für die beiden anderen Klassen Klein und Mittel). Allerdings ist dies zugegebenermaßen nur eine sehr grobe Erfassung der Segmenttreue, zu der sich aber in Anbetracht der Datenverfügbarkeit derzeit keine andere Alternative bietet.

²⁰¹ Vgl. Mueller und de Haan (2006), die entsprechend vorgegangen sind.

Abbildung 4-31: Segment-Wechselmatrix für private Neuwagen in der Schweiz²⁰²

Antriebstreue

Neben dem Segmentwechsel wäre auch eine segment- oder markenabhängige Bereitschaft, die Antriebsart zu wechseln, denkbar. Zum einen liegen aber wie erwähnt für Deutschland keine ausreichenden Daten vor (insbesondere müssten diese Daten auch alternative Antriebe umfassen). Zum anderen basiert die Wahl der Antriebsart im vorliegenden Modell hauptsächlich auf den Gesamtnutzungskosten eines Antriebes sowie der technischen Realisierbarkeit eines Fahrprofils mit den verschiedenen Antrieben (begrenzte Reichweite von BEV und elektrischer Fahranteil von PHEV/REEV). Die Antriebswahl erfolgt daher ausschließlich nach den Aspekten Technik und Gesamtnutzungskosten. Eine Antriebstreue wird somit im Modell nicht berücksichtigt.

4.7.3 Markenverfügbarkeit von Elektrofahrzeugen

Die in den nächsten Jahren noch begrenzte Auswahl an Markenverfügbarkeit von Elektrofahrzeugen ist ein stark limitierender Faktor im Markthochlauf von Elektrofahrzeugen. Daher wird die Markenverfügbarkeit im Modell berücksichtigt.

²⁰² Quelle: Mueller und De Haan (2006).

Das Vorgehen ist dabei wie folgt: Es wird eine Liste angekündigter Elektrofahrzeuge (BEV, PHEV, REEV) mit dem Jahr des angekündigten Markteintritts (2012, 2013, etc.) pro Segment (Klein, Mittel, Gross, LNF) für die wichtigen Marken im deutschen Markt erstellt. Die Liste findet sich in Anhang 7.4.

Für jedes private Fahrprofil liegt zudem die Information vor, von welcher Marke das Fahrzeug dieses Fahrprofils ist (VW, Toyota, Daimler, etc.). Für den Markthochlauf können damit Einschränkungen in der Markenauswahl für potenzielle Käufer hinzugefügt werden: Ein VW-Nutzer kauft ein BEV (Segment klein) im Jahr 2013 nur dann, wenn (1) dies für ihn die ökonomischste Variante ist (aus TCO-Sicht) und (2) ein solches (laut Ankündigung) auch verfügbar sein wird.

Sollten beide Bedingungen nicht erfüllt sein, ist der Nutzer im Modell bereit, andere Marken in Betracht zu ziehen, bleibt jedoch dem für ihn optimalen Antrieb und seinem Segment treu (Antriebs- und Segmenttreue werden aus den oben genannten Gründen vorausgesetzt). Allerdings wird zu einem gegebenen Zeitpunkt auch nur ein Anteil von p % der anderen Marken den TCO-optimalen Antrieb für diesen Nutzer anbieten. Falls also das gewünschte Fahrzeug (Antrieb x EV, Segment i , Marke j) gemäß den Ankündigungen nicht verfügbar ist, entscheiden sich p % der Nutzer für ein Elektrofahrzeug eines anderen Herstellers und die restlichen Nutzer (also $(100 - p)$ % der Nutzer mit Wunsch- Antrieb x EV, -Segment i , -Marke j) für den für sie nächstgünstigeren Antrieb. Sollten der zweitgünstigste Antrieb der präferierten Marke auch nicht verfügbar sein, wählen im Modell wiederum p % diesen zweitgünstigsten Antrieb einer anderen Marke. Der Rest der Nutzer entscheidet sich dann für ein konventionelles Fahrzeug usw. (siehe Abbildung 4-35). Mit diesem mehrstufigen Verfahren wird im Modell der Tatsache Rechnung getragen, dass die begrenzte Auswahl an Marken die Kunden vom Kauf eines Elektrofahrzeuges eher abhält und die Markentreue begrenzt ist.

Der Anteil von p % aller Marken, die im gegebenen Segment Elektrofahrzeuge anbieten, lässt sich für die wichtigen Marken am deutschen Markt aus den vorhandenen Ankündigungen für Elektrofahrzeuge ableiten. Dabei besteht jedoch das Problem, dass diese Ankündigungen derzeit überwiegend nur bis ca. 2015 vorliegen. Die Verbreitung neuer Technologien und die Durchsetzung am Markt erfolgt aber nach einem S-Kurven-förmigen Verlauf, der gut durch eine logistische Funktion beschrieben werden kann.²⁰³ Es wird unterstellt, dass ein solcher Verlauf auch für das Angebot an Modellen mit neuer Antriebstechnologie gilt. Übertragen auf die Markenauswahl folgt dabei

²⁰³ Dies ist ein umfangreich belegtes Ergebnis, vgl. u. a. Rogers (1962), Geroski (2000), Kellner (2008); Massiani (2010), Meade und Islam (2006), Vooren und Alkemade (2010).

der Anteil der Marken, die in einem Segment über Elektrofahrzeuge verfügen, an allen Marken als Funktion der Zeit einer logistischen Kurve

$$p(t) = \frac{1}{1 + \exp[-(t - t_0)/T]}$$

Dabei bezeichnen der Parameter t_0 den Zeitpunkt, zu dem 50 % aller Marken in einem Segment Elektrofahrzeuge anbieten, und der Parameter T die Zeitskala, mit der sich der Anteil der Marken die auch Elektrofahrzeuge anbieten, verändert. Dafür wird in jedem Segment die Zahl der Ankündigungen von Elektrofahrzeugen verschiedener Marken über die Zeit summiert und durch die Zahl der für das Markthochlaufmodell möglichen Zahl von Elektrofahrzeugmarken verglichen. Dabei wurde von der Zahl der Marken bei den Neuzulassungen 2011 in Deutschland ausgegangen. Es sind 26 Marken im Bereich Kleinwagen, 32 im Bereich Mittelklasse und 29 im Bereich Gross aufgetreten. Die Liste der Marken findet sich in Anhang 7.4. Die Liste der angekündigten Elektrofahrzeuge nach Marken findet sich ebenso in Anhang 7.4.

Die genannten Parameter der logistischen Funktion werden für die einzelnen Segmente durch einen Fit nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt und teilweise zwischen den Gruppen übertragen. Dabei wurden die Fahrzeugankündigen von PHEV und REEV zu einer Gruppe PHEV+REEV zusammengefasst, da die beiden Fahrzeugtypen aus Kundensicht vermutlich schwer zu unterscheiden sind (beides Elektrofahrzeuge mit zusätzlichem Verbrennungsmotor) und bei vielen Ankündigungen die genaue technische Ausgestaltung des zukünftigen Serienfahrzeuges auch nicht klar ist.

Es werden zuerst die Parameter für Mittelklasse und Großklasse durch Regression bestimmt. Für Kleinwagen und leichte Nutzfahrzeuge wird dann T von Mittelklasse übernommen und t_0 aus der Verfügbarkeit für 2015 abgeleitet (Kleinwagen: $t_0 = T \ln(1/(1/26) - 1) + 2,015$; Großklasse: $t_0 = T \ln(1/(1/29) - 1) + 2,016$). Es ergeben sich die Parameter wie in Tabelle 4-39 zusammengefasst.

Tabelle 4-39: Regressionsparameter für Markenverfügbarkeit.

Gruppe	Klein		Mittel		Gross		Leichte NFZ	
	BEV	PHEV/REEV	BEV	PHEV/REEV	BEV	PHEV/REEV	BEV	PHEV/REEV
t_0	2015,2	2019,2	2015,2	2014,8	2024,6	2016,6	2018,3	2020,2
$T [10^{-3}]$	2,827	1,292	2,459	1,292	3,091	1,633	3,153	1,292

Die Daten sowie die Regression sind in Abbildung 4-32 dargestellt. Einen gemeinsamen Überblick über die nach oben beschriebenen Verfahren erhaltene zeitliche Entwicklung der Verfügbarkeit von Elektrofahrzeugen zeigt Abbildung 4-33.

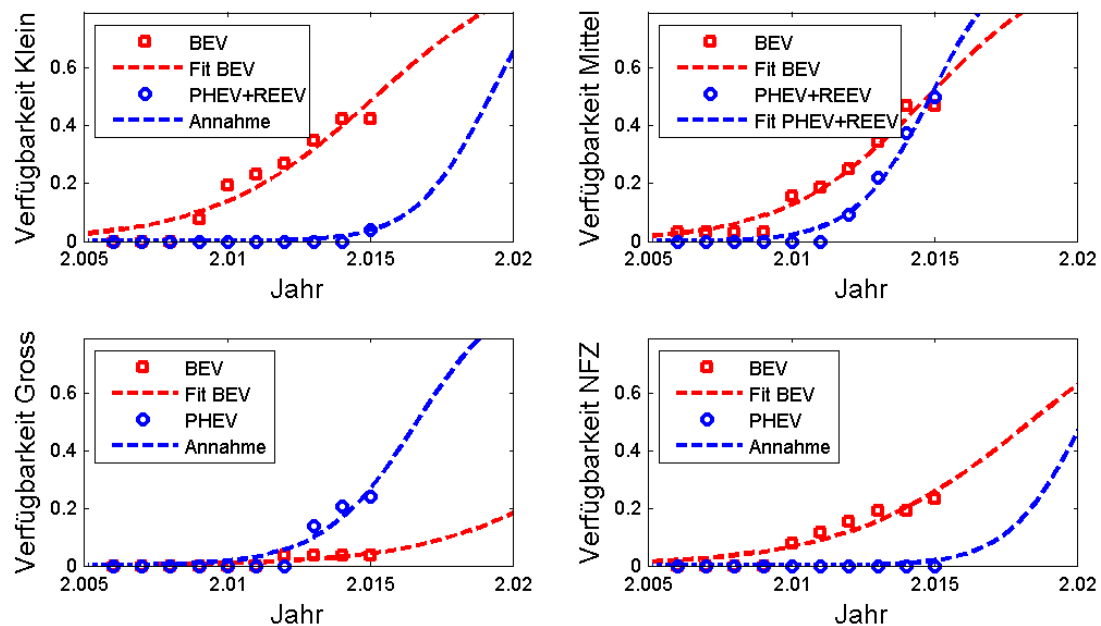


Abbildung 4-32: Daten und Regression zur Verfügbarkeit von Elektrofahrzeugen

Bei der Analyse der angekündigten Marken und Modelle zeigt sich, dass bisher EV überwiegend in der Klein- und Mittelklasse angeboten bzw. angekündigt werden. Weiterhin sieht man, dass im Kleinwagensegment vor allem BEV angekündigt sind, in der Mittel- und Großklasse hingegen überwiegend PHEV und REEV. Die entsprechenden Regressionskurven für die verfügbaren Marken von Elektrofahrzeugen zeigen daher eine gute Abdeckung von circa 50 % für Mittelklasse PHEV/REEV und Kleinwagen BEV bereits im Jahr 2015 (mit weiter steigender Tendenz), und zeitversetzt auch für die anderen Segment-Antriebs-Kombinationen. Nur für BEV im Segment Großklasse wird von einer eher langsamen Angebotsverbreiterung ausgegangen: Es wird unterstellt, dass 20 Prozent der Marken im Jahr 2020 in diesem Segment BEV anbieten.

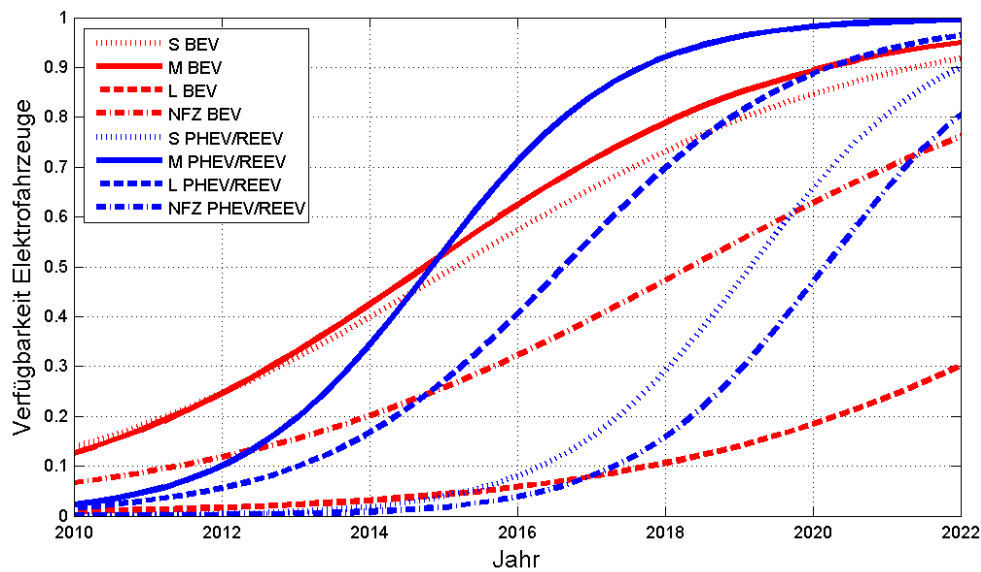


Abbildung 4-33: Übersicht der angenommenen Verfügbarkeit von Elektrofahrzeugen

Das hier beschriebene Vorgehen ist ein Ansatz, einen Teil der in Pfahl (2013) beschriebenen Diffusionsfaktoren zu operationalisieren und messbar zu machen (zudem wird die Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur teilweise direkt modelliert). Eine zukünftige Überarbeitung des hier beschriebenen Vorgehens sollte die Fahrzeugankündigung überprüfen und die entsprechenden Kurven zur erwarteten Verfügbarkeit von Elektrofahrzeugen aktualisieren. Mit steigender Datenverfügbarkeit lässt sich die Genauigkeit des Modells so verbessern.

Formale Integration der Markenverfügbarkeit im Modell

Falls die Option begrenzte Verfügbarkeit gewählt ist und ein EV für dieses Fahrprofil TCO-optimal ist, dann erfolgt die Zuordnung eines Fahrprofils zu einem Elektrofahrzeug-Typ in einer rekursiven Schleife, wie in Abbildung 4-34 dargestellt.

Für jedes Fahrprofil wird nach der TCO-Berechnung (ggf. mit den Varianten Ladeinfrastrukturkosten und Mehrpreisbereitschaft) geprüft, ob das optimale Fahrprofil ein Verbrenner ist. Ist dies der Fall, so wird dem Fahrprofil der Verbrenner zugewiesen. Wenn nicht, so wird geprüft ob ein Fahrzeug der gleichen Größe, gleichen Marke und gleichen Antriebsart (BEV, REEV, PHEV) verfügbar ist. Ist dies der Fall, so wird dem Fahrprofil eindeutig dieses Fahrzeug zugeordnet. Wenn kein derartiges Fahrzeug existiert, so wird ein Teil des Fahrprofils (der Markendiffusionsfaktor) als dieses Fahrzeug gewählt, der restliche wird auf die zweitbeste TCO-Option überprüft und die Schleife beginnt erneut. Die Rekursion endet, sobald ein Verbrenner das TCO-optimale Profil ist (also nach maximal drei Durchläufen).

Dieses Verfahren unterteilt die Fahrprofile in verschiedene Fahrzeuge, da die Ankündigungen der Fahrzeuge nicht weit in die Zukunft reichen und mit Unsicherheiten behaftet sind. Deshalb wird eine Marken- und Antriebsverfügbarkeit mit diesem Ansatz simuliert.

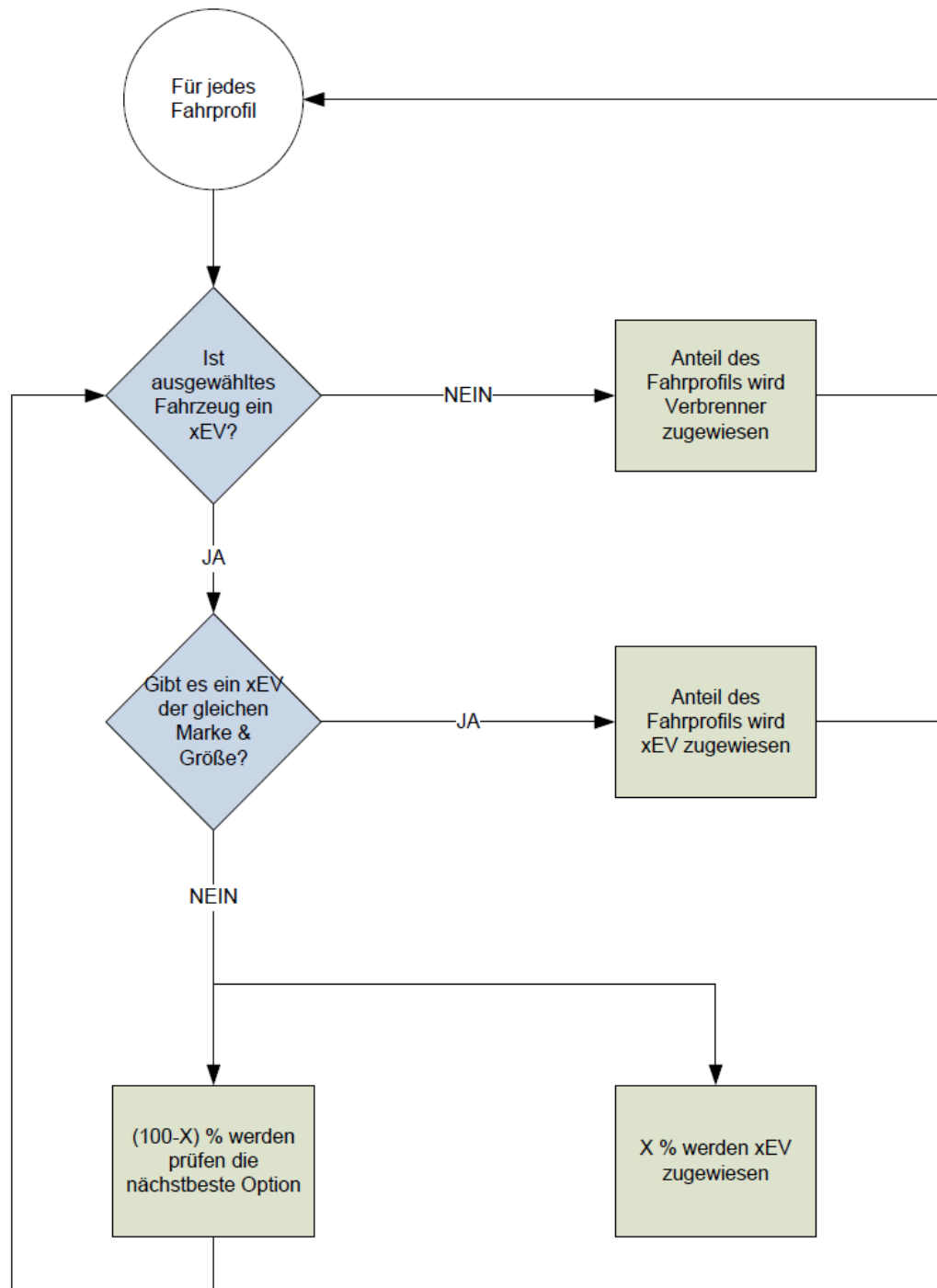


Abbildung 4-34: Flussdiagramm zur Umsetzung der Markentreue in ALADIN

Korrektur Markenanteil

Bei der Berücksichtigung der Markentreue und Hochrechnung auf die Neuzulassungen in Deutschland stellt sich die Frage, ob die verwendeten MOP-Fahrprofile bzgl. der Verteilung der Marken repräsentativ für die Neuzulassungen sind. Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft die Anteile verschiedener Marken an den Neuzulassungen 2011 und den hier verwendeten Fahrprofilen der MOP für private mittelgroße Fahrzeuge.

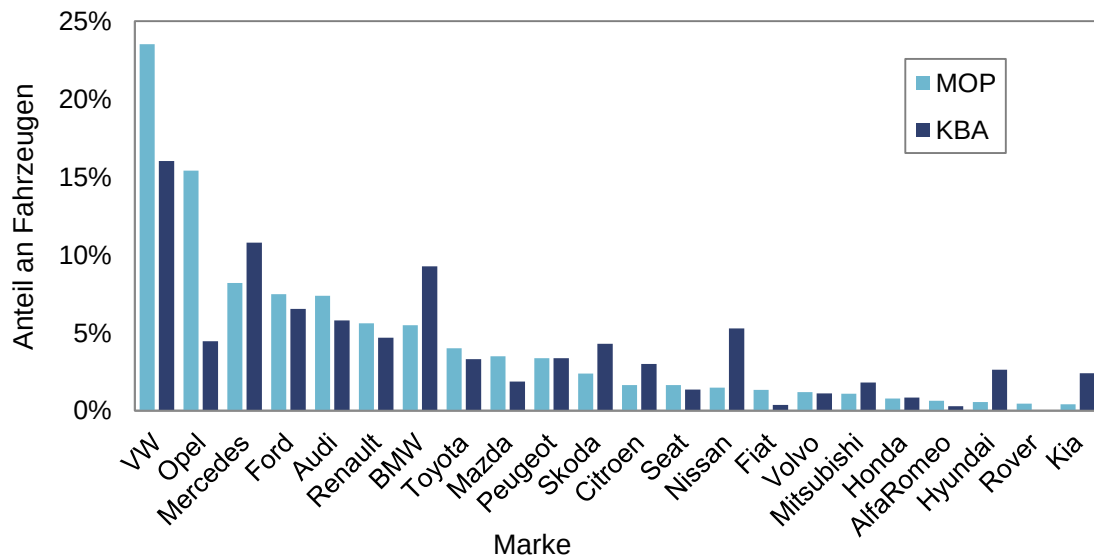


Abbildung 4-35: Anteil verschiedener Marken an den MOP-Fahrprofilen und den Neuzulassungen in Deutschland (private Halter, Fahrzeuggröße Mittel)

Aus den Abweichungen zwischen der Fahrteilung der Fahrprofile und der Neuzulassungen auf Marken, können direkt Gewichtungsfaktoren berechnet werden und die Anteile einzelner Marken in den Fahrprofilen damit korrigiert werden. In der vorliegenden Studie ist dies nicht erfolgt, aber für zukünftige Erweiterungen vorgesehen.

Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur

Ein weiterer begrenzender Faktor, der die Diffusion von Elektrofahrzeugen trotz Wirtschaftlichkeit verlangsamt, ist die begrenzt verfügbare Ladeinfrastruktur. Auch dieser Faktor wird (in begrenztem Umfang) im Modell explizit abgebildet. Da bei den verwendeten Fahrprofilen Informationen über die Verfügbarkeit von Garagen vorliegen, kann für Nutzer mit Garagen eine günstige Infrastruktur und für Nutzer ohne Garagen eine teurere öffentliche Ladeinfrastruktur eingepreist werden. Dies ist ausführlich in Abschnitt 4.5 erläutert.

5 Ergebnisse

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, ein transparentes Modell zur Berechnung der Gesamtnutzungskosten von Elektrofahrzeugen zu erarbeiten und dabei verschiedene hemmende und fördernde Faktoren zu berücksichtigen sowie mit dem Modell Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge in Deutschland bis 2020 zu entwickeln. Dafür wurde in Kapitel 3 die erweiterte TCO-Methodik im verwendeten Modell ALADIN vorgestellt und in Kapitel 4 alle Eingangsdaten ausführlich erläutert und diskutiert. Basierend darauf werden im vorliegenden Kapitel die Ergebnisse der Modellrechnungen vorgestellt.

Aufgrund der Verwendung von über 6.500 Einzelfahrprofilen, fünf Antriebsarten pro Segment und der zeitlichen Entwicklung vieler Rahmenparameter entsteht eine sehr große Zahl einzelner TCO-Ergebnisse. Zudem werden verschiedene Szenarien, Sensitivitäten und Politikmaßnahmen untersucht. Im vorliegenden Bericht werden die wichtigsten Ergebnisse vorgestellt und diskutiert, alle Ergebnisse können aufgrund des Umfangs nicht dargelegt werden.

Gemäß der Zielsetzung des Forschungsvorhabens werden die Ergebnisse der Gesamtnutzungskosten (Abschnitt 5.1), die Wirkung einzelner Faktoren (Abschnitt 5.2 und 5.3) und verschiedene Markthochlaufszszenarien (Abschnitt 5.3 und 5.5) vorgestellt. Zudem wird der Bedarf an Primärladepunkten analysiert (Abschnitt 5.4), es werden Sensitivitätsrechnungen durchgeführt (Abschnitt 5.6) und die Wirkung von Politikmaßnahmen untersucht (Abschnitt 5.7).

5.1 Total Cost of Ownership

TCO-Lücken bei Verwendung von Fahrprofilen

Zunächst ist festzuhalten, dass es aufgrund der Vielzahl von Fahrprofilen mit teilweise sehr unterschiedlichem Nutzungsverhalten eine Vielzahl an TCO-Lücken (Differenzen in den Gesamtkosten zwischen den Antriebssystemen) gibt. Bei der Betrachtung von 6.500 Einzelfahrprofilen, fünf Antriebsarten und 8 Jahren (2013 – 2020) ergeben sich insgesamt 260.000 einzelne TCO. Zwischen fünf Antriebsarten lassen sich zudem zehn TCO-Differenzen bilden, so dass insgesamt für ein Szenario und eine Variante

(bspw. reine TCO ohne Ladeinfrastrukturkosten) rechnerisch über zwei Millionen TCO-Lücken auftreten.²⁰⁴

Um dies darzulegen, sind für Mittelklassefahrzeuge die TCO-Lücken (summiert über die gesamte Haltedauer) im Jahr 2020 in der Abbildung 5-1 für Benzin im Vergleich zu Diesel und für Diesel im Vergleich zu REEV dargestellt (ohne Berücksichtigung der Ladeinfrastrukturkosten und Mehrpreisbereitschaft). Die linke Seite der Abbildung zeigt, dass sich ein Dieselfahrzeug im Vergleich zu einem Benzin-Fahrzeug erst ab einer gewissen Jahresfahrleistung lohnt. Beim Vergleich Diesel und REEV erkennt man den Einfluss der sehr unterschiedlichen elektrischen Fahranteile und die damit verbundene große Streuung (in vertikaler Richtung, rechte Seite in Abbildung 5-1). Trotz gleicher Jahresfahrleistung haben einige Nutzer durch gleichmäßigere Fahrten einen hohen elektrischen Fahranteil. Hohe elektrische Fahranteile wirken sich wegen den Kraftstoffersparnissen deutlich positiv auf ihre TCO aus. Während in bisherigen Studien zur TCO-Berechnung üblicherweise eine jährliche Durchschnittsfahrleistung und ein durchschnittlicher elektrischer Fahranteil unterstellt werden, sieht man anhand der tatsächlichen Streuung die Vorteile einer Betrachtung von Fahrprofilen.

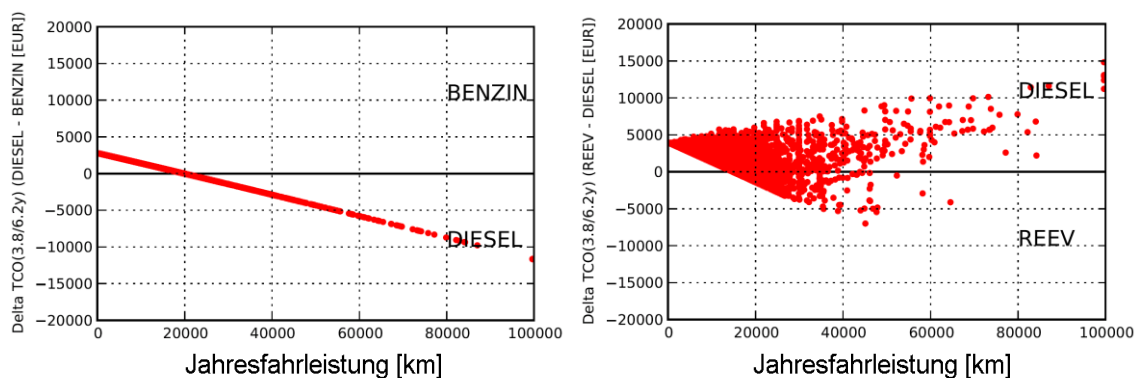


Abbildung 5-1: Beispielhafte TCO-Lücken für ausgewählte Antriebsarten im Vergleich (Mittleres Szenario, Mittelklasse-Pkw, Private Nutzer, 2020) (jeder rote Punkt stellt ein Fahrprofil dar)

Betrachtet man die verschiedenen TCO-Lücken unterschiedlicher Nutzergruppen und Fahrzeuggrößen, so ist zur Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen zu sagen, dass sich diese für einige Nutzer lohnen, ab 2013 mit zunehmender Tendenz. Wichtig dabei

²⁰⁴ Im Folgenden werden die Ergebnisse zweier Varianten vorgestellt: (a) die reine TCO aufgrund der Fahrzeugnutzung ohne die Kosten für Ladeinfrastruktur oder Mehrpreisbereitschaft und (b) die TCO einschließlich der Kosten für Ladeinfrastruktur und einschließlich der Mehrpreisbereitschaft. Die beschränkte Verfügbarkeit hat keinen unmittelbaren Einfluss auf die TCO, sondern nur auf den Markthochlauf.

ist die entsprechende Jahresfahrleistung. Bei geringen Fahrleistungen dominiert immer der Benzinler, da die EV die höheren Anschaffungsausgaben nicht über günstigere Kilometerkosten ausgleichen können (siehe Tabelle 5-1). Bei sehr hohen Fahrleistungen hingegen ist der Diesel die günstigste Option, weil PHEV bzw. REEV-Fahrzeuge dann zu oft verbrennungsmotorisch fahren müssen und reine Batteriefahrzeuge aufgrund der begrenzten Reichweite ausscheiden. Der elektrische Fahranteil ist mit den Jahresfahrleistungen entscheidend für die TCO-Differenz jedes Nutzers. Ausreichende Jahresfahrleistungen alleine reichen nicht aus.

Tabelle 5-1: Übersicht der ökonomisch interessanten Jahresfahrleistungen (TCO mit Infrastrukturkosten)

Segment	Privat	Flotten	Dienstwagen
Klein	20.000 – 25.000 km	um 20.000 km	kein Fenster
Mittel	18.000 – 35.000 km	um 20.000 km	kein Fenster
Groß	15.000 – 40.000 km	18.000 bis 25.000 km	kein Fenster

In Tabelle 5-1 sieht man, dass das Fenster der Jahresfahrleistungen für große Pkw am größten ist, weil hier die Verbrauchseinsparungen der EV gegenüber den konventionellen Fahrzeugen am höchsten sind. Berücksichtigt man weiterhin, dass gerade große Fahrzeuge häufig eine hohe Jahresfahrleistung aufweisen, bieten große EV damit das ökonomisch größte Potenzial. Dienstwagen haben unter den getroffenen Annahmen im mittleren Szenario kein ökonomisches Potenzial.

Statistische Verteilung der TCO-Lücken

Wie oben bereits erwähnt, existiert eine Vielzahl an TCO-Lücken. Um die Ergebnisse übersichtlich darzustellen, werden die TCO-Differenzen zwischen der für die Nutzer jeweils günstigsten konventionellen und günstigsten elektrischen Variante über die Anteile der Fahrzeuge mit dieser oder kleinerer TCO-Lücke aufgetragen dargestellt (siehe Abbildung 5-2 bis Abbildung 5-4).²⁰⁵ Es wird also für jedes Fahrprofil der günstigste konventionelle Antrieb und der günstigste elektrische Antrieb bestimmt und die TCO-Lücke für diese beiden berechnet. Dies erfolgt für jedes Fahrprofil, d. h. für jeden Nutzer. Diese TCO-Lücken werden aufsteigend sortiert. In den Abbildungen sind diese

²⁰⁵ Die Darstellung entspricht statistisch einer relativen kumulierten Häufigkeitsverteilung bzw. empirischen Verteilungsfunktion (Fahrmeir et al. 2011, S. 49) und ist einer CO₂-Vermeidungskosten-Kurve vergleichbar. Ein Vorteil der Darstellung ist die statistische Robustheit gegenüber Ausreißern.

TCO-Lücken auf der y-Achse aufsteigend gezeigt mit dem Anteil der Nutzer bzw. Fahrprofile auf der x-Achse, die diese oder eine kleinere TCO-Lücke aufweisen.

Aus Abbildung 5-2 kann man beispielsweise ablesen, dass 20 % der privaten Nutzer von Kleinwagen 2013 (rote gestrichelte Linie) mit ihrem Fahrverhalten eine TCO-Lücke von insgesamt 6.000 € oder weniger (über die gesamte Haltedauer von angenommenen 6,2 Jahren für private Nutzer) aufweisen. Diese Zahl sinkt bis 2020, so dass 20 % der Nutzer privater Kleinwagen im Jahr 2020 eine TCO-Lücke von circa 3000 € oder weniger haben.

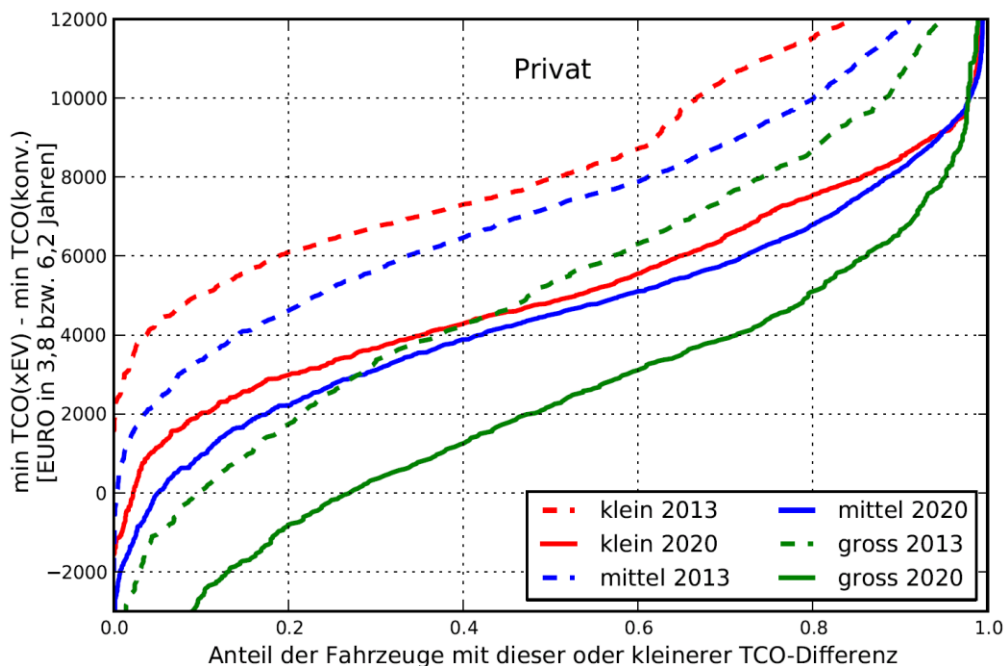


Abbildung 5-2: TCO-Differenzen für private Nutzer in den Jahren 2013 und 2020 im mittleren Szenario mit Infrastrukturkosten und Mehrpreisbereitschaft

Aus den Diagrammen lässt sich auch der Median als eine typische TCO-Lücke ablesen.²⁰⁶ In der Abbildung ist dies die TCO-Lücke, die 50 % der Nutzer maximal haben (also bspw. 4.500 € für private Mittelklasse 2020). Zusätzlich erkennt man in Abbildung 5-2, dass ein Teil der Nutzer im Jahr 2020 über eine TCO-Lücke kleiner oder gleich Null verfügt. Das bedeutet: Für einen Teil der Nutzer ist ein Elektrofahrzeug insgesamt günstiger (im Sinne der TCO einschließlich der Infrastrukturkosten und der angenommenen Mehrpreisbereitschaft). Aus diesen Anteilen (und denen für andere Fahrzeug-

²⁰⁶ Der Median ist der Wert, der die Nutzer in zwei gleich große Gruppen teilt mit 50 % der Nutzer über diesem Wert und 50 % darunter.

größen und Haltergruppen) werden die Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen hochgerechnet. Weitere Ergebnisse für die anderen Szenarien finden sich im Anhang in Abschnitt 7.3.

Aus Abbildung 5-2 bis Abbildung 5-4 erkennt man zudem die hohe Spannweite an TCO-Differenzen. Dabei sieht man die höchste ökonomische Attraktivität der großen Pkw in allen drei Nutzergruppen. Im privaten Sektor ist die Spannweite höher als in den beiden anderen, weil hier neben den Fahrprofilen die Mehrwertsteuer einen Einfluss hat. Da sie auf Kraftstoffe von privaten Haltern gezahlt werden muss, sind bei diesen die Verbrauchseinsparungen zwischen EV und konventionellen Antriebssystemen pro gefahrenem Kilometer höher als bei gewerblichen Haltern.

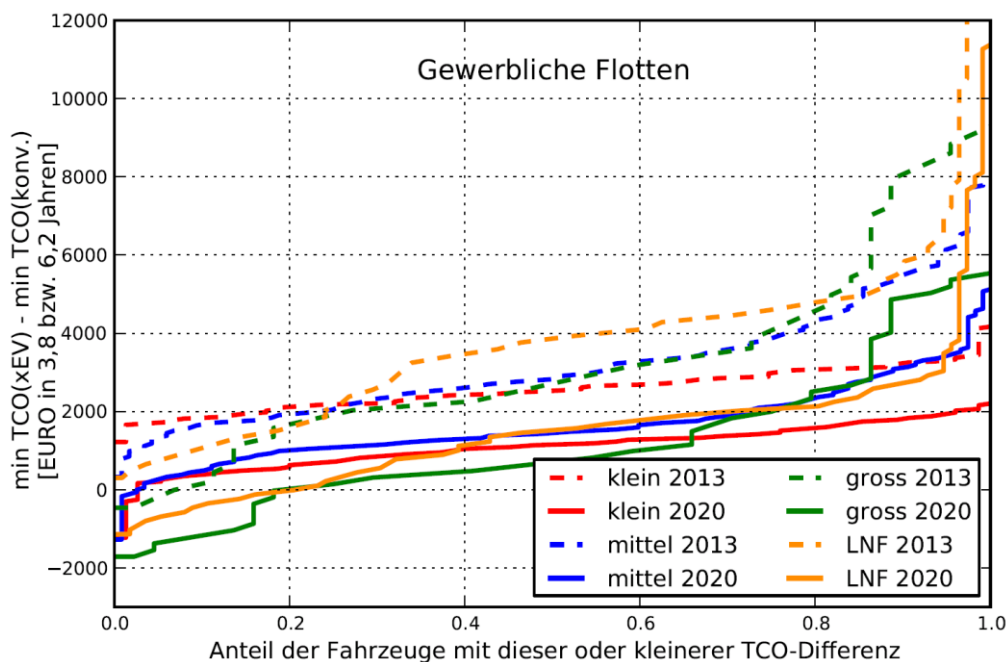


Abbildung 5-3: TCO-Differenzen für Flottenfahrzeuge in den Jahren 2013 und 2020 im mittleren Szenario mit Infrastrukturkosten und Mehrpreisbereitschaft

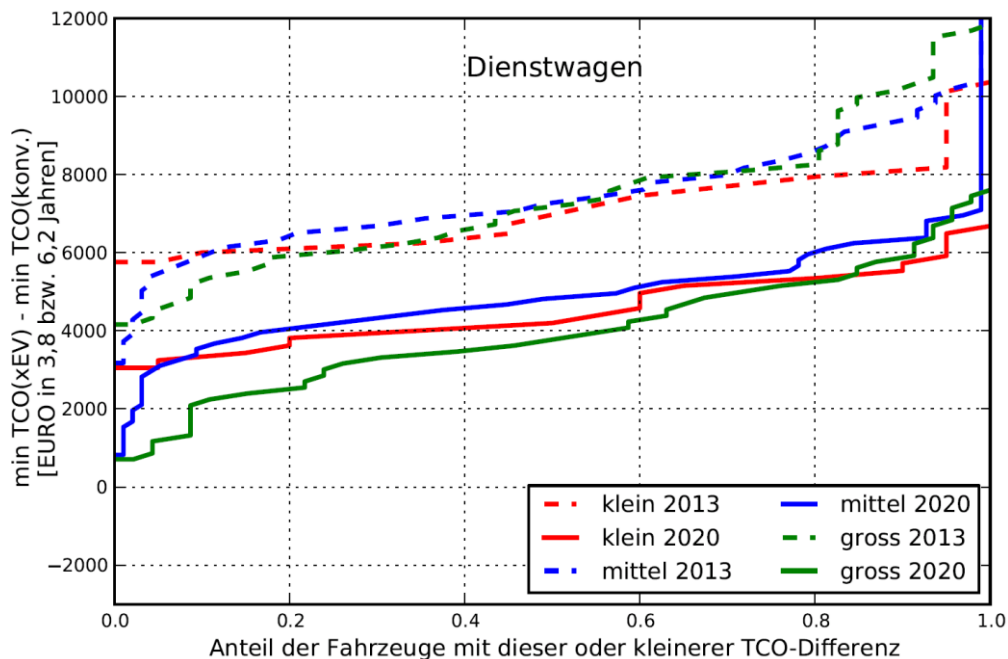


Abbildung 5-4: TCO-Differenzen für Dienstwagen in den Jahren 2013 und 2020 im mittleren Szenario mit Infrastrukturkosten und Mehrpreisbereitschaft

Wenn man die Kurvenverläufe der drei Gruppen vergleicht, fällt auf, dass diese bei den privaten Nutzern am steilsten verlaufen und die gewerblichen Flotten die flachsten Anstiege verzeichnen. Dies hat mehrere Gründe: Einmal ist der bereits andiskutierte Mehrwertsteuereffekt zu nennen. Weiterhin weisen die gewerblichen Nutzer in der Tendenz regelmäßiger Fahrprofile mit selteneren langen Fahrten auf. Damit erzielen sie eher höhere elektrische Fahranteile im Vergleich zu privaten Nutzern, insbesondere aber gegenüber den Dienstwagennutzern. Zusätzlich haben die Abschreibungsmöglichkeiten (AfA) bei gewerblichen Haltern den Einfluss, dass die TCO-Lücken wegen der Steuerersparnisse kleiner werden.

Im Vergleich zwischen den TCO-Lücken des Jahres 2013 und 2020 sieht man, dass unter den getroffenen Annahmen im Jahr 2013 nur ein sehr geringes Potenzial für EV existiert, dieses aber über die Zeit stetig zunimmt.

Die TCO-Lücken für die drei Haltergruppen im Pro- und Contra-EV-Szenario sind ähnlich. Aufgrund der anderen Annahmen zu den Kosten wichtiger Rahmenbedingungen (Batterie-, Strom- und Rohölpreise) sind sie allerdings im Pro-EV-Szenario nach unten und im Contra-EV-Szenario nach oben verschoben. Die Verläufe für Mittelklasse-Fahrzeuge sind in Anhang 7.3 für alle Szenarien jeweils mit und ohne Kosten der Ladeinfrastruktur und Mehrpreisbereitschaft dargestellt.

5.2 Elektrische Fahranteile und Fahrzeugverbräuche

Da wie oben dargestellt die elektrischen Fahranteile bei hybriden Konzepten einen entscheidenden Einfluss auf die TCO-Ergebnisse und damit auf den Markthochlauf haben, wird auf diese im Folgenden gesondert eingegangen.

Streuung und Verteilung der elektrischen Fahranteile

Abbildung 5-5 zeigt die simulierten elektrischen Fahranteile für REEV und PHEV über die Jahresfahrleistung für die ausgewerteten Fahrprofile. Die große Streuung der simulierten elektrischen Fahranteile ist auffällig und gut erkennbar. Weiterhin erreichen REEV höhere elektrische Fahranteile als PHEV aufgrund der größeren Batterie (siehe auch Annahmen in Abschnitt 4.3). Mit zunehmender Jahresfahrleistung sinken die elektrischen Fahranteile.

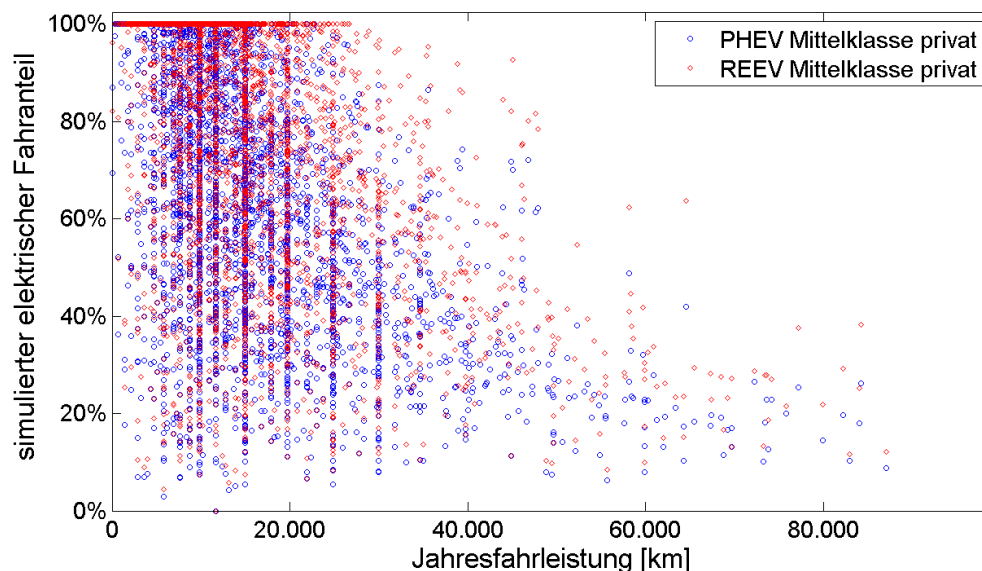


Abbildung 5-5: Übersicht der simulierten elektrischen Fahranteile für einzelne Fahrprofile (private Mittelklasse-Pkw 2020)

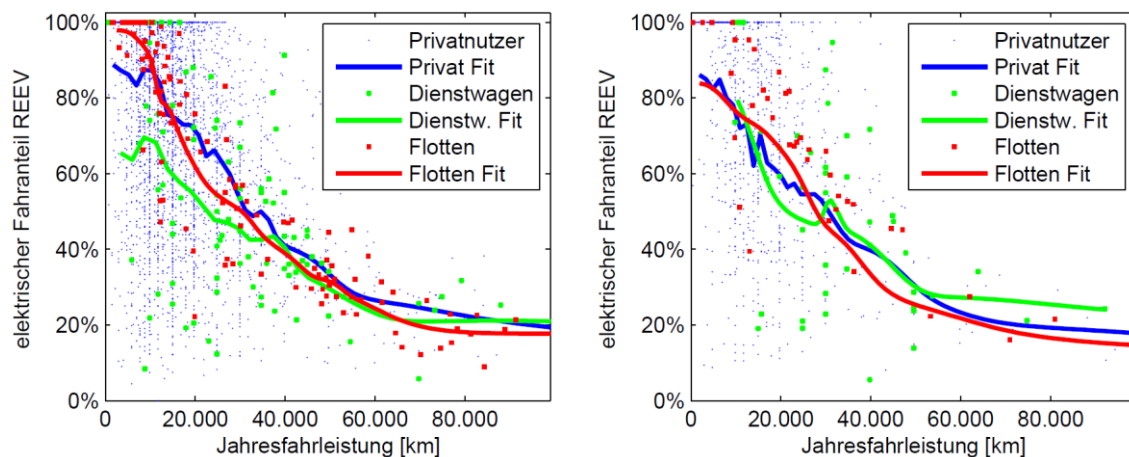


Abbildung 5-6: Simulierte elektrische Fahranteile REEV für verschiedenen Nutzergruppen (links: Mittelklasse 2020, rechts: Großklasse 2020)

Auch zwischen den Nutzergruppen gibt es Unterschiede in den elektrischen Fahranteilen. Abbildung 5-6 zeigt die simulierten elektrischen Fahranteile REEV für private Pkw (blau), Dienstwagen (grün) und Flottenfahrzeuge (rot) für Mittelklasse-Pkw (links) und Großklassenwagen (rechts). Die gestrichelten Linien sind gleitende Durchschnitte durch die Punktwolken.²⁰⁷ Analoge Auswertungen finden sich für alle Fahrzeug- und Nutzergruppen im Anhang in Abschnitt 7.3.

Man erkennt, dass der mittlere elektrische Fahranteil trotz der großen Streuung mit der Jahresfahrleistung abnimmt. Die mittleren elektrischen Fahranteile sind dabei für alle drei Haltergruppen ähnlich hoch. Allerdings sieht man auch, dass die simulierten elektrischen Fahranteile der Flottenfahrzeuge (rot) eine geringere Streuung um den gleitenden Mittelwert aufweisen als die der beiden anderen Nutzergruppen. Gerade die elektrischen Fahranteile bei den Dienstwagen streuen sehr stark.

Ein Vergleich mit realen empirischen Daten (Abbildung 5-7) zeigt, dass die hohe errechnete Streuung bei den elektrischen Fahranteilen durch die teilweise sehr unterschiedliche Fahrzeugnutzung bestätigt wird.

²⁰⁷ Genauer handelt es sich um eine Nadaraya-Watson-Kernel-Regression mit Gauß-Kern über $\sqrt{N}$ nächste Nachbarn (siehe Fahrmeir, Kneib und Lang 2009) mit N jeweils der Anzahl der Fahrprofile in der Gruppe. Es sind *Mittelklasse*: privat $N = 3561 \approx 60^2$, Flotte $N = 117 \approx 11^2$, Dienstwagen $N = 96 \approx 10^2$. *Großklasse*: privat $N = 922 \approx 30^2$, Flotte $N = 44 \approx (6,5)^2$, Dienstwagen $N = 46 \approx (6,5)^2$. Gewählt wurde die nächste ganze Zahl.

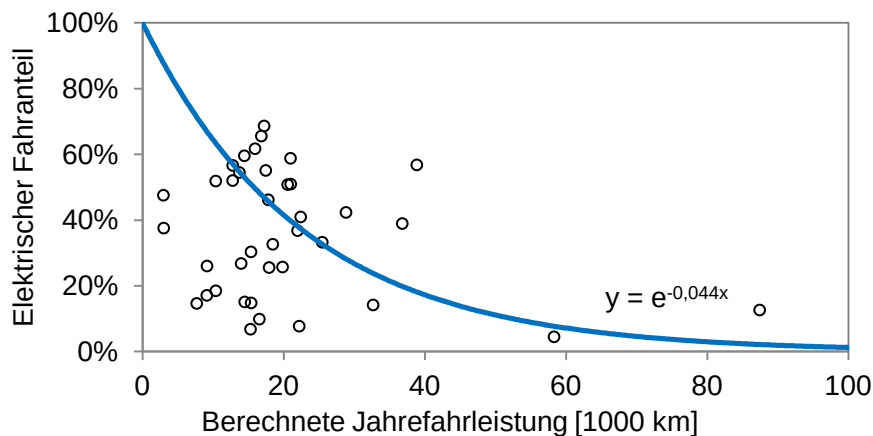


Abbildung 5-7: Berechnete elektrische Fahranteile realer Prius PHEV²⁰⁸

Dabei wurde aus der Differenz zwischen erstem und letztem Eintrag der Tanktagebücher²⁰⁹ und der dabei zurückgelegten Strecke auf ein Jahr und die Jahresfahrleistung umgerechnet. Der elektrische Fahranteil s ergibt sich gemäß $s = 1 - v/c_{\max}$, wobei v der tatsächliche durchschnittliche Kraftstoffverbrauch des Nutzers und $c_{\max}$ der angenommene Maximalverbrauch für das Fahrzeug ist (es wurden 6,5 l/100km für den Prius PHEV angenommen). Die Ausgleichskurve ist eine Exponentialfunktion mit festgelegtem Schnittpunkt mit der y-Achse beim Wert 100 %, denn es wird angenommen, dass die ersten Kilometer stets elektrisch zurückgelegt werden. Die einzelnen Punkte in der Abbildung zeigen die individuellen Jahresfahrleistungen und umgerechneten elektrischen Fahranteile. Abbildung 5-7 bestätigt damit zumindest qualitativ die Simulationsergebnisse für die elektrischen Fahranteile.

Effektive Kraftstoffverbräuche

An diese Auswertung schließt sich die Frage nach den elektrischen und konventionellen Verbräuchen der REEV und PHEV an. Aus der Simulation der elektrischen Fahranteile ergeben sich effektive Kraftstoffverbräuche. In Abbildung 5-8 finden sich die Ergebnisse der Simulation für alle privaten Mittelklasse-Pkw aller Jahresfahrleistungen.

²⁰⁸ Eigene Auswertung auf Basis der 38 Toyota-Prius-PHEV-Nutzer auf www.spritmonitor.de.

²⁰⁹ Der kleinste Beobachtungszeitraum war dabei 19 Tage, der längste 2.112. Im Mittel waren Fahrleistungen und Verbräuche über einen Zeitraum von 365 Tagen (Median: 160 Tage) aufgezeichnet.

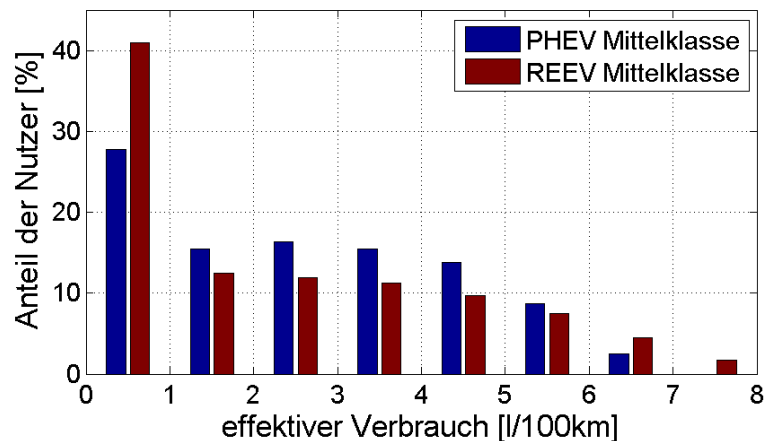


Abbildung 5-8: Verteilung der effektiven konventionellen Kraftstoffverbräuche für die Mittelklasse-Pkw in der Simulation²¹⁰

In der Abbildung 5-8 sieht man, dass die erste Nutzergruppe mit dem niedrigsten konventionellen Kraftstoffverbrauch die größte ist. Allerdings fahren diese Nutzer oftmals nicht genug im Jahr, um die höheren Anschaffungsausgaben für ein EV durch die günstigeren Nutzungskosten pro km zu kompensieren. Aufgrund der nötigen Jahresfahrleistungen für EV werden typische Realverbräuche für REEV und PHEV, die ökonomisch sinnvoller sind als konventionelle Fahrzeuge, eher im Bereich von zwei bis vier Litern auf 100 Kilometern liegen.²¹¹

Potenzial hoher elektrischer Fahranteile

Neben der reinen ökonomischen Ersetzbarkeit zeigen die Analysen der Fahrprofile, dass viele Nutzer vergleichsweise hohe elektrische Fahranteile erreichen könnten. Abbildung 5-9 zeigt, welcher Anteil der Neuzulassungen als PHEV mindestens einen vorgegebenen elektrischen Fahranteil hätte. Dafür werden Fahrprofile als PHEV simuliert, und der Anteil an Fahrzeugen mit einem elektrischen Mindest-Fahranteil wird auf die Neuzulassungen hochgerechnet.

²¹⁰ Eigene Auswertung der Simulation *aller* Fahrprofile, nicht nur der potenziellen Erstnutzer. Der effektive Verbrauch ist ein Real-Verbrauch inkl. Nebenaggregaten, kein NEFZ-Wert.

²¹¹ Dieses Ergebnis ist konsistent mit ersten empirischen Daten. So haben beispielsweise die 38 eingetragenen Toyota-Prius-PHEV-Nutzer auf spritmonitor.de einen Verbrauch zwischen 2 und 6 l/100km mit durchschnittlich 4,5 l/100km. Der Prius hat allerdings mit 4,4 kWh eine kleinere Batterie als der hier angenommene Mittelklasse-PHEV, so dass der mittlere Verbrauch natürlicherweise etwas höher als in den Simulationen ist.

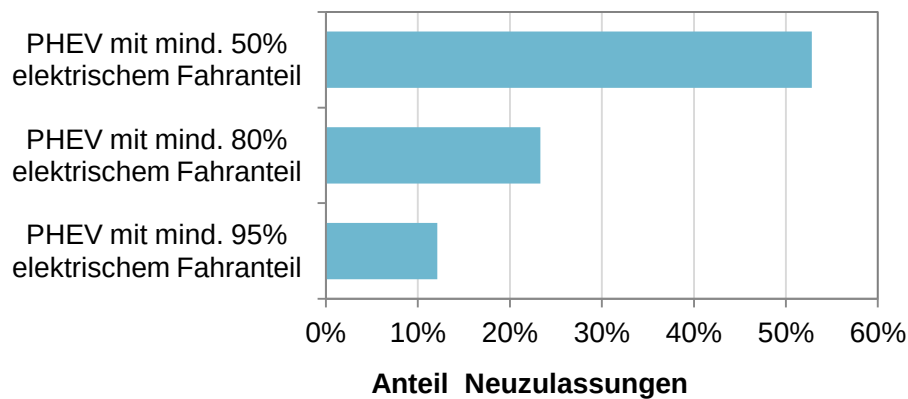


Abbildung 5-9: Anteil der Neuzulassungen, die als PHEV einen gewissen elektrischen Fahranteil bei ihrem Fahrprofil hätten

Man erkennt, dass ein wesentlicher Teil der Neuzulassungen vergleichsweise hohe elektrische Fahranteile haben könnte: Knapp 25 % der Neuzulassungen hätten als PHEV einen elektrischen Fahranteil von 80 % oder mehr, würden also überwiegend elektrisch fahren. Da REEV über eine größere Batterie verfügen, wären die Anteile der Neuzulassungen mit einem elektrischen Mindest-Fahranteil noch höher.

Neben einem hohen elektrischen Fahranteil muss eine hohe Jahresfahrleistung dazu kommen, damit der Einsatz von EV ökonomisch vorteilhaft ist. Die Fahrzeuge, die Elektrofahrzeuge künftig sein könnten, sind nicht die mit den allgemein höchsten elektrischen Fahranteilen sondern die mit ausreichender Jahresfahrleistung und hohen elektrischen Fahranteilen (vgl. auch Abbildung 5-1). Da der elektrische Fahranteil mit zunehmender Jahresfahrleistung tendenziell abnimmt, gibt es bis 2020 nur eine begrenzte, aber doch nennenswerte Zahl von Nutzern, für die beide Bedingungen in ausreichendem Maße erfüllt sind.

Wenn man jetzt nur die Fahrzeuge betrachtet, die nach reiner TCO-Analyse (ohne Infrastrukturkosten, ohne beschränkte Verfügbarkeit und ohne Mehrpreisbereitschaft) in den Markt kommen würden, dann hätten 84 % aller PHEV und REEV einen elektrischen Fahranteil von über 80 %. Nimmt man die Infrastrukturkosten, beschränkte Verfügbarkeit und Mehrpreisbereitschaft in die TCO-Rechnung mit herein, so hätten 60 % der Nutzer von PHEV und REEV einen elektrischen Fahranteil von über 80 %.

Genauigkeit der elektrischen Fahranteile

Die Wahrscheinlichkeit, den mittleren elektrischen Fahranteil korrekt einzuschätzen sinkt bereits bei einer geringen Aufzeichnungsdauer sehr stark. Ab einer Fahrprofillänge von etwa zehn Tagen lässt der Effekt nach und die Breite des Konfidenzintervalls

nimmt im Allgemeinen nicht mehr stark ab.²¹² Lediglich verhältnismäßig breite Intervalle (unregelmäßige Fahrprofile) können in Ihrer Wahrscheinlichkeit, den mittleren Fahranteil richtig einzuschätzen, noch signifikant verbessert werden.

Tabelle 5-2: Statistiken der 95 %-Konfidenzintervalle der elektrischen Fahranteile für PHEV und REEV²¹³

	Fahrprofile Privatverkehr (7 Beobachtungstage)	Fahrprofile Wirtschaftsverkehr (21 Beobachtungstage)
25 %-Quantil	± 10 %	± 5 %
Median	± 20 %	± 10 %
75 %-Quantil	± 30 %	± 15 %

Insgesamt lässt sich festhalten, dass der Median der 95 %-Konfidenzintervall nach sieben Berichtstagen (entspricht den Fahrprofilen der Privat- und Dienstwagennutzer) sowohl für PHEV als auch REEV bei ±20 % liegt und bei 21 Tagen Beobachtungsdauer (entspricht den Flotten-Fahrprofilen) bei ±10 %.

5.3 Markthochlauf in den drei Szenarien

Für den Markthochlauf ist zu beachten, dass gemäß dem Ziel des Forschungsvorhabens die Wirkung von hemmenden und fördernden Faktoren explizit ausgewiesen wird. In der Modellbeschreibung in Abschnitt 3.2 sind dies neben dem TCO-Grundmodell die drei Faktoren Ladeinfrastrukturkosten, begrenzte Verfügbarkeit von Elektrofahrzeugen und die Mehrpreisbereitschaft privater und gewerblicher Halter, die einzeln betrachtet werden können. Daher ergeben sich neben dem TCO-Grundmodell $2^3 = 8$ mögliche Modell-Varianten. Im Folgenden werden vor allem die Ergebnisse zweier Varianten vorgestellt: (a) die reine TCO aufgrund der Fahrzeugnutzung ohne die Kosten für Ladeinfrastruktur oder Mehrpreisbereitschaft und (b) die TCO einschließlich der Kosten für Ladeinfrastruktur und einschließlich der Mehrpreisbereitschaft. Das Ergebnis weiterer Varianten ist in Abbildung 5-11 dargestellt.

Übersicht Markthochlauf

Der berechnete Markthochlauf für die drei Szenarien ist in Abbildung 5-10 angegeben. Unter der Berücksichtigung aller Effekte erhält man rund 400.000 bis 700.000 Fahr-

²¹² Siehe Abschnitt 7.5.

²¹³ Aufgrund der unterschiedlichen Batteriegrößen und Stichproben gibt es leichte Unterschiede zwischen den PHEV- und REEV-Statistiken (siehe Abschnitt 7.5 für Details).

zeuge im mittleren Szenario, während im Szenario Contra-EV 50.000 bis 300.000 und im Szenario Pro-EV 1 bis 1,4 Mio. Elektrofahrzeuge denkbar wären. Die Bandbreiten stellen die Unsicherheiten aufgrund einer beschränkten Stichprobe von Fahrprofilen dar. Man erkennt die hohe Sensitivität der Ergebnisse, die sich aus den doch relativ flachen TCO-Verläufen erklären lässt (siehe auch Abbildung 5-2 bis Abbildung 5-4). Selbst kleine Änderungen der Parameter, die die Wirtschaftlichkeit nach oben oder unten verändern, betreffen recht viele Fahrzeughalter. Dabei wird keines der Szenarien als eher wahrscheinlich oder eher unwahrscheinlich betrachtet. Die Szenarien sind zudem keine Extrem-Szenarien (vgl. Abschnitt 3.3).

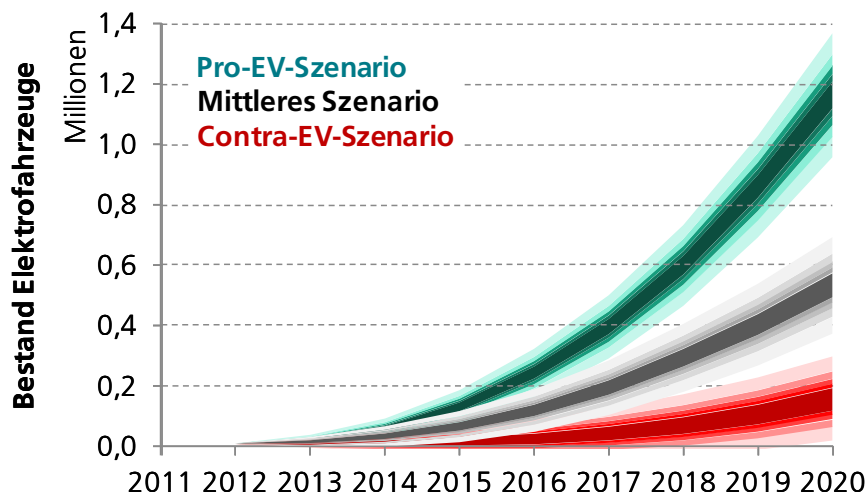


Abbildung 5-10: Markthochlauf nach TCO-Entscheidung inkl. günstigster Infrastrukturkosten, begrenzter Verfügbarkeit und Mehrpreisbereitschaft in den drei Szenarien (Bestand jeweils zum Ende des Jahres)²¹⁴

Nun stellt sich die Frage, welchen Einfluss einzelne Effekte (Berücksichtigung der Infrastrukturkosten, Berücksichtigung der begrenzten Verfügbarkeit und der Mehrpreisbereitschaft) haben. Abbildung 5-11 zeigt die Ergebnisse ohne Unsicherheitsbereiche für das mittlere Szenario. Bei einer „reinen“ TCO-Analyse errechnet sich ein Markthochlauf von knapp 300.000 Elektrofahrzeugen im Bestand bis 2020.

²¹⁴ Die farbigen Flächen zeigen die Projektion der Bestandsentwicklung für Konfidenzintervalle mit 10 %-, 30 %-, 50 %-, 70 %- und 90 %-Konfidenzniveaus basierend auf der Hochrechnung vom Anteil an den jeweiligen Fahrprofilen. Die Konfidenzintervalle umfassen nur die Unsicherheit aufgrund der endlichen Stichprobe. Unsicherheiten zukünftiger Preisentwicklungen oder in der Verfügbarkeit von Marken sind bspw. nicht enthalten.

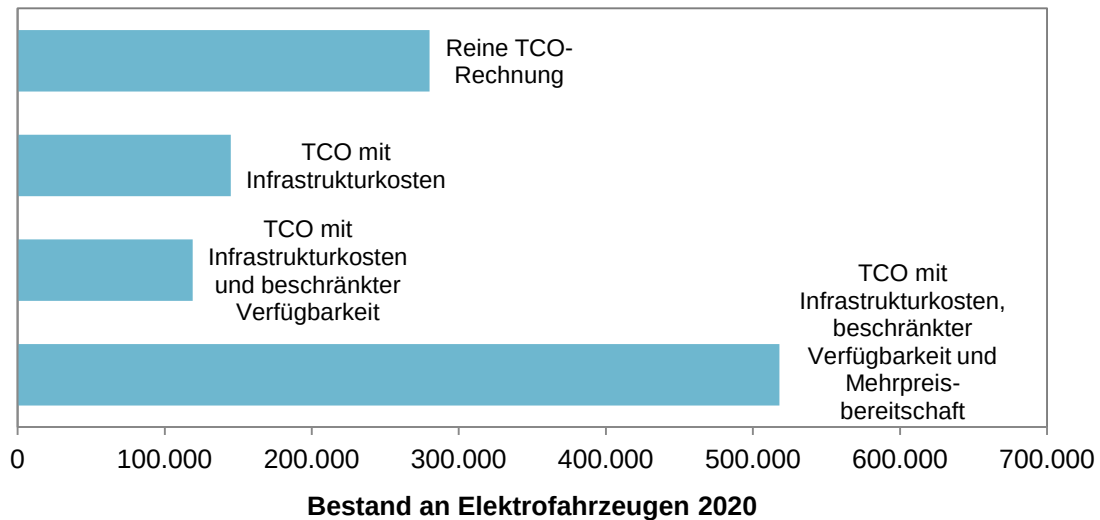


Abbildung 5-11: Bestand an EV in 2020 unter Einbezug unterschiedlicher Aspekte für das mittlere Szenario ohne Unsicherheitsband

Der Einbezug der (günstigsten Variante von) Ladeinfrastrukturkosten reduziert das Potenzial um rund 50 %. Wird weiterhin eine eingeschränkte Verfügbarkeit von Fahrzeugmodellen bestimmter Hersteller unterstellt, so hat diese bei den getroffenen Annahmen nur einen geringen Effekt. Sehr stark wirkt sich hingegen der Einbezug einer Mehrpreisbereitschaft aus, trotz der doch eher vorsichtigen Abschätzung der Mehrpreisbereitschaft von privaten und gewerblichen Haltern (vgl. Abschnitt 3.2.5). Es muss nochmals erwähnt werden, dass die Mehrpreisbereitschaft mit hohen Unsicherheiten behaftet ist und geringfügig andere Annahmen das Ergebnis deutlich beeinflussen können. Dennoch stellt die Mehrpreisbereitschaft die Wertschätzung für eine neue Technologie dar, die nicht außer Acht gelassen werden sollte.²¹⁵

Neben der zeitlichen Entwicklung des Bestandes ist der Anteil der Elektrofahrzeuge an den Neuzulassungen ein weiterer wichtiger Indikator für den Markthochlauf von Elektrofahrzeugen. Abbildung 5-12 zeigt die Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen in den drei Szenarien gemäß der TCO-Rechnung inkl. der Ladeinfrastrukturkosten, der begrenzten Verfügbarkeit und Mehrpreisbereitschaft. Unter der Berücksichtigung aller Effekte steigt die Zahl der Neuzulassungen auf rund 100.000 bis 150.000 Fahrzeuge pro Jahr im mittleren Szenario, während im Szenario Contra-EV 10.000 bis 50.000 und

²¹⁵ Vgl. Rogers (1962) für allgemeine Verbreitung neuer Technologien, aber auch Wietschel et al. (2012), Peters et al. (2011a und b), ADAC (2009), GfK (2010) und FOM (2010), Knie et al. (1999) für Privatanutzer sowie Öko-Institut (2011a) und Dataforce (2011) für gewerbliche Nutzer von Elektrofahrzeugen.

im Szenario Pro-EV 250.000 bis 350.000 neuzugelassene Elektrofahrzeuge im Jahr 2020 denkbar wären.²¹⁶

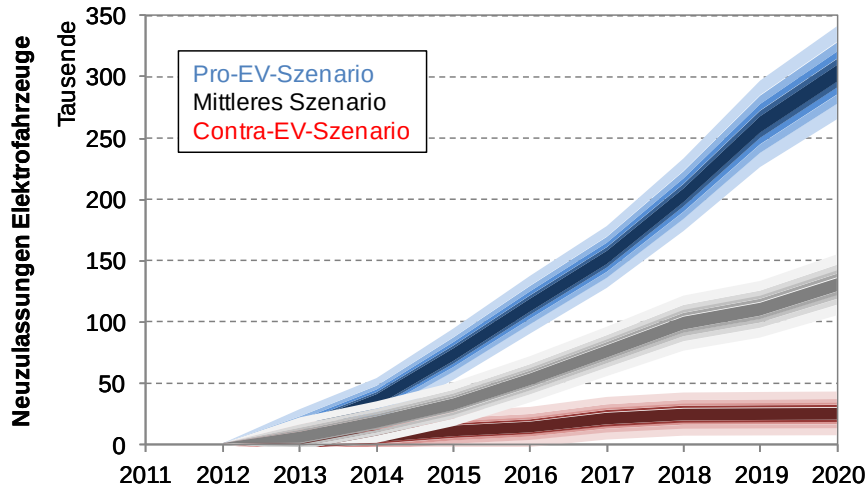


Abbildung 5-12: Neuzulassungen pro Jahr nach TCO- Entscheidung inkl. günstigster Infrastrukturkosten, begrenzter Verfügbarkeit und Mehrpreisbereitschaft in den drei Szenarien²¹⁷

Den Unterschied zwischen reiner TCO-Entscheidung und der Berücksichtigung aller Effekte (Ladeinfrastrukturkosten, begrenzte Verfügbarkeit und Mehrpreisbereitschaft) für den Anteil von Elektrofahrzeugen an den Neuzulassungen im mittleren Szenario zeigt Abbildung 5-13 ohne Konfidenzbänder. Es wird sichtbar, dass nach reiner TCO-Logik circa 3 % der Pkw-Neuzulassungen in Deutschland im Jahr 2020 Elektrofahrzeuge sein könnten, während unter Berücksichtigung aller Effekte im mittleren Szenario von circa 4 % der Neuzulassungen auszugehen wäre. Der Einbezug der zusätzlichen Faktoren (speziell die Mehrpreisbereitschaft) bewirkt also ein „Vorziehen“ der Neuzulassungen im Markthochlauf um ein bis zwei Jahre. Die entsprechenden Werte für den Anteil an den Neuzulassungen im Pro-EV- und Contra-EV-Szenario lassen sich gemeinsam mit den Unsicherheitsbereichen aufgrund der endlichen Stichprobe aus Abbildung 5-12 zusammen mit der angenommenen Zahl der jährlichen Neuzulassungen von 3,1 Mio. Fahrzeugen ableiten.

²¹⁶ Die Bandbreiten in der Abbildung stellen wie oben die Unsicherheiten aufgrund einer beschränkten Stichprobe von Fahrprofilen dar.

²¹⁷ Die farbigen Flächen zeigen die Projektionen der Neuzulassungen für Konfidenzintervalle mit 10 %-, 30 %-, 50 %-, 70 %- und 90 %-Konfidenzniveaus basierend auf der Hochrechnung vom Anteil an den jeweiligen Fahrprofilen.

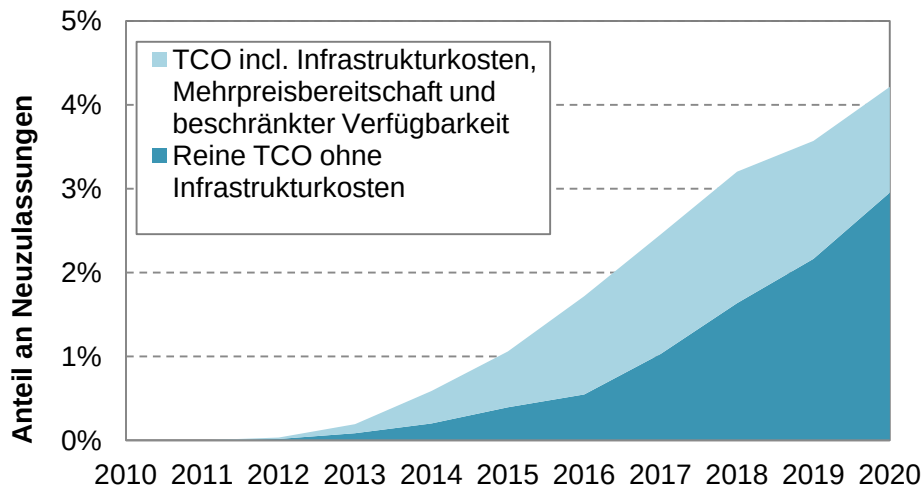


Abbildung 5-13: Anteil von Elektrofahrzeugen an den jährlichen Neuzulassungen im mittleren Szenario

Zusammenfassend lässt sich eine starke Abhängigkeit der Marktentwicklung von den Rahmenbedingungen festhalten und damit verbunden eine hohe Unsicherheit beim Markthochlauf. Unter günstigen Rahmenbedingungen für Elektrofahrzeuge kann das gemeinsame Ziel der Bundesregierung und der Nationalen Plattform Elektromobilität von einer Million Elektrofahrzeugen bis 2020 ohne Kaufförderung erreicht werden. Selbst unter ungünstigen Rahmenbedingungen kann eine nennenswerte Anzahl an Elektrofahrzeugen bis 2020 in den Markt kommen.

Aufteilung Markthochlauf

Bei einer Aufteilung des Markthochlaufs auf die Bereiche private Halter, Flotten- und Dienstwagen dominieren im mittleren Szenario die privaten Halter, gefolgt von den Flottenfahrzeugen (siehe Abbildung 5-13). Dienstwagen kommen erst im Pro-EV-Szenario in den Markt, aber spät und mit geringen Anteilen. Dies lässt sich direkt anhand der statistischen Verteilung der TCO-Lücken und der Entscheidungslogik des TCO-Modells verstehen. Das Fahrverhalten im Privatverkehr ist etwas ungleichmäßiger als im gewerblichen und Dienstwagen-Bereich. Letztes ist gut an den Daten zu den simulierten elektrischen Fahranteilen zu erkennen, bei denen die Streuung der privaten Nutzer um den gleitenden Mittelwert deutlich größer ist.²¹⁸ So findet sich eine nennenswerte Zahl an Nutzern, für die der Kauf eines Elektrofahrzeuges sinnvoll ist (die

²¹⁸ Die Streuung um die Kernel-Regression in Abbildung 5-6 könnte auch statistisch geschätzt werden. Im aktuellen Projekt war dies zeitlich nicht möglich, sollte aber in zukünftigen Erweiterungen weiter verfolgt werden, um die im Text formulierte Interpretation der Daten statistisch zu untermauern.

angenommene Mehrpreisbereitschaft verstärkt diesen Effekt noch). Insgesamt erreicht man damit relativ hohe Anteile an Privatanutzern, für die ein Elektrofahrzeug interessant sein sollte. Dies spiegelt sich entsprechend in Abbildung 5-13 als deutlicher Beitrag von Privat-Pkw wieder. Bei der Interpretation ist allerdings einschränkend zu bemerken, dass die sehr steile TCO-Lücken-Kurve der gewerblichen Nutzer das Bild bei anderen Rahmenbedingungen (das heißt bspw. in einem anderen Szenario) ändert: Im Pro-EV-Szenario spielen die privaten Nutzer auch eine wichtige Rolle im Bestand, aber der Anteil der gewerblichen Nutzer erhöht sich (und Dienstwagen kommen in den Markt – siehe im Anhang Abbildung 7-4).

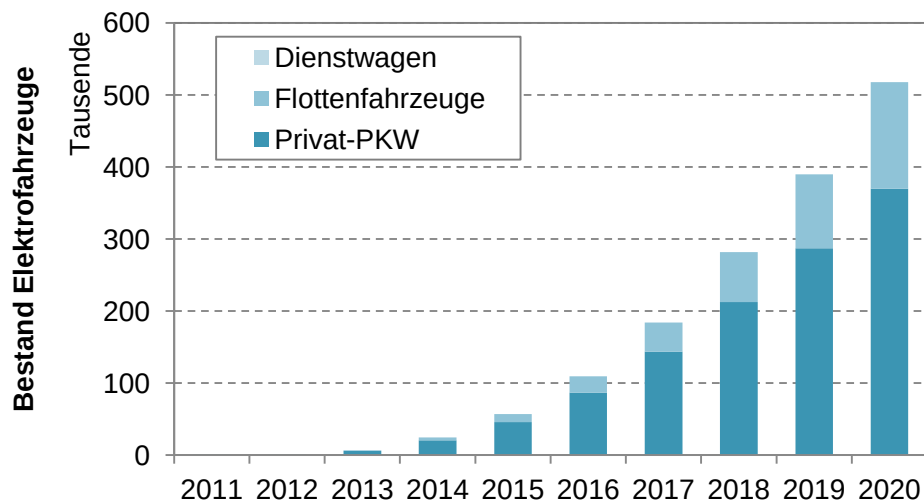


Abbildung 5-14: Aufteilung des Markthochlaufs auf private Halter, Flotten- und Dienstwagen im mittleren Szenario mit Infrastrukturkosten, beschränkter Verfügbarkeit und Mehrpreisbereitschaft

Wie aufgrund der TCO-Analysen nicht anders zu erwarten, überwiegen die Oberklassefahrzeuge vor allem bei privaten Haltern, und die Mittelklassefahrzeuge bei privaten und Flottenfahrzeugen. Oberklassefahrzeuge werden in Flotten kaum eingesetzt. In späteren Jahren gewinnen Kleinwagen sowie leichte Nutzfahrzeuge ebenfalls an Relevanz für den Markthochlauf.

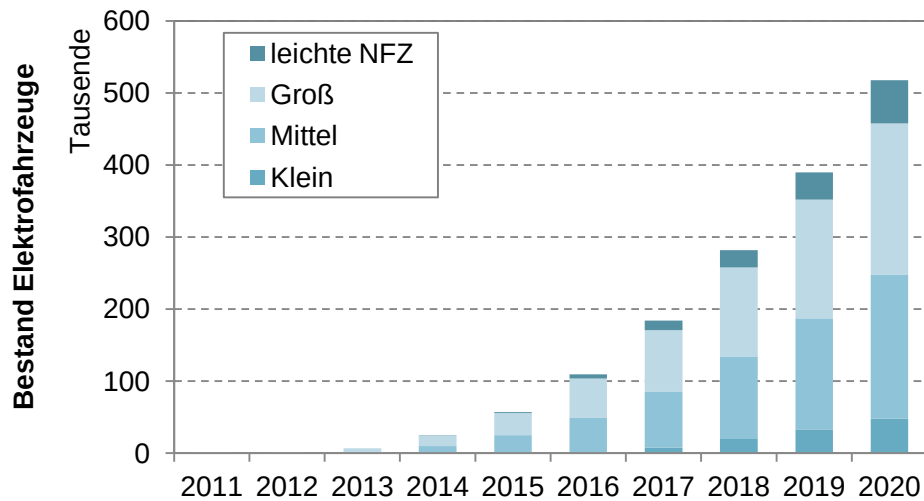


Abbildung 5-15: Aufteilung des Markthochlaufs auf Kleinwagen, Mittelklasse, Großklasse und leichte Nutzfahrzeuge im mittleren Szenario mit Infrastrukturkosten, beschränkter Verfügbarkeit und Mehrpreisbereitschaft

Wenn man die Aufteilung unter den EV-Antriebsarten betrachtet, so haben REEV und PHEV zusammen genommen einen deutlich größeren Marktanteil als BEV. Sie kommen früher in den Markt und haben im Jahr 2020 einen Marktanteil von rund 75 % am Bestand der EV. Trotz der geringeren Batteriekapazitäten der REEV/PHEV erscheinen ausreichend hohe elektrische Fahranteile für relevante Nutzergruppen erzielbar zu sein. Und der Effekt, in wenigen Ausnahmen doch einmal längere Fahrten zurück legen zu können, scheint sich ebenfalls positiv auszuwirken. Da die beiden hybriden Konzepte hinsichtlich ihrer TCO im interessanten Bereich sehr nah beieinander liegen, können sich deren Anteile auch untereinander verschieben – eine eindeutige Trennung von PHEV- und REEV-Anteilen ist nicht eindeutig möglich, jedoch profitieren REEV von den größeren Batterien und der damit verbundenen etwas größeren elektrischen Reichweite.

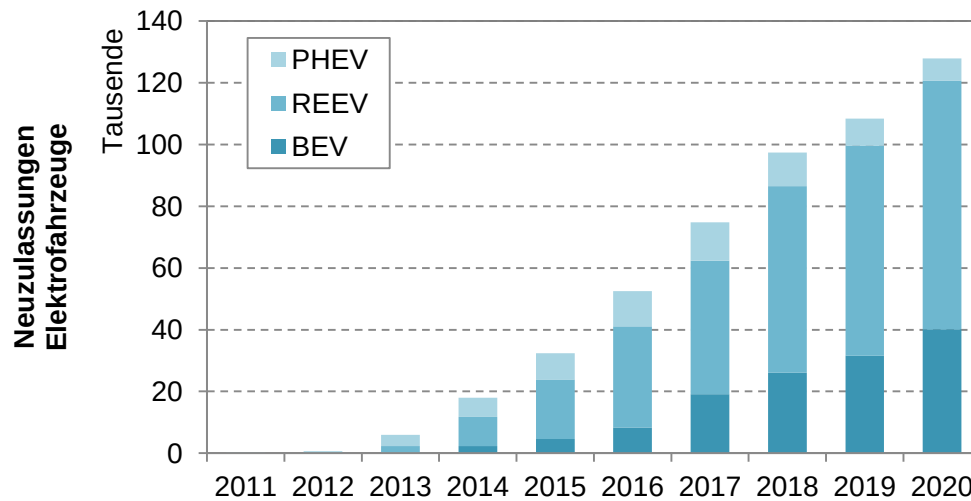


Abbildung 5-16: Aufteilung der Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen auf die Antriebsarten (mittleres Szenario mit Infrastrukturkosten, beschränkter Verfügbarkeit und Mehrpreisbereitschaft)

Interessant ist, dass sich die Wahl des EV-Antriebssystems in den Segmenten unterscheidet. Bei Kleinwagen dominieren die Batteriefahrzeuge, was u.a. auf die geringeren Fahrleistungen in diesem Segment zurückzuführen ist. Bei Mittel- und Oberklasse dominieren wiederum die REEV und PHEV, wobei im wichtigen Segment der Mittelklassefahrzeuge bei gewerblichen Flotten auch BEV einen erheblichen Anteil haben. Der Unterschied im Vergleich zu privaten Haltern ist hier mit den regelmäßigeren Routen und dem geringeren Anteil an Ausreißern bezüglich sehr langer Fahrten zu begründen.

5.4 Ladeinfrastruktur

Ladeinfrastrukturverfügbarkeit

Eine wichtige Rolle für die TCO spielen auch die Kosten für Ladeinfrastruktur. Für gewerbliche Fahrzeuge kann davon ausgegangen werden, dass auf dem Firmengelände relativ günstige und einfache witterungsgeschützte Ladeinfrastruktur (bspw. Wallboxen) aufgebaut werden kann. Dies gilt analog für private Nutzer, sofern diese über eine Garage oder einen festen Stellplatz am Haus verfügen (die Garagenverfügbarkeit liegt als Zusatzinformation bei jedem privaten Fahrprofil im Modell vor). Abbildung 5-5 zeigt die Verteilung typischer Stellplätze deutscher Pkw über Nacht.

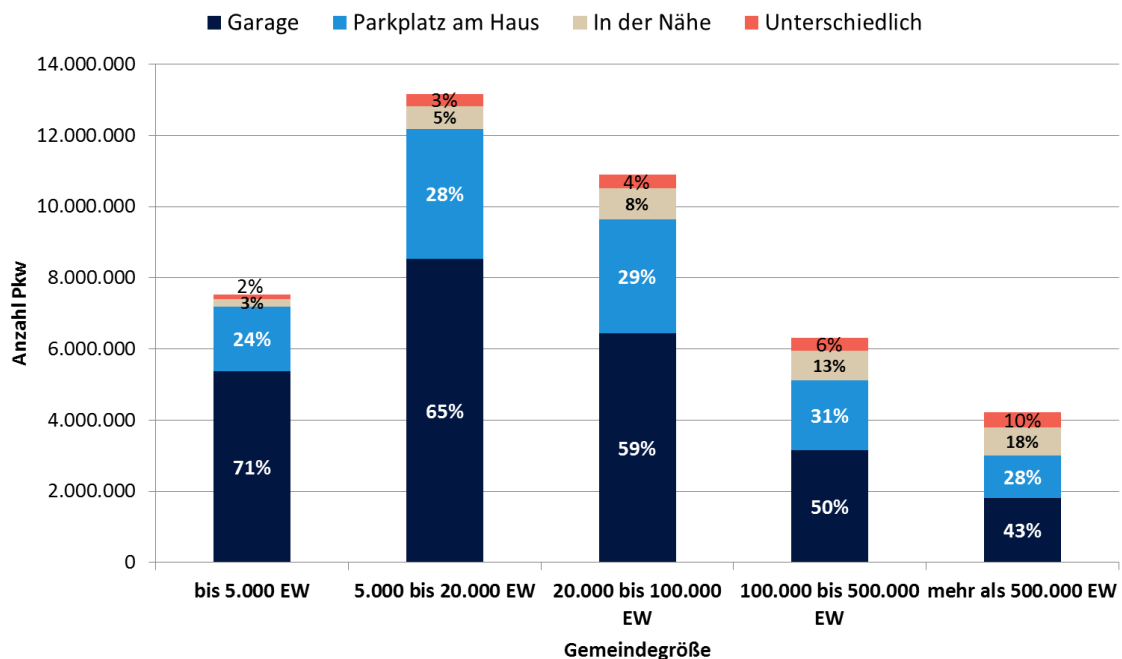


Abbildung 5-17: Verteilung typischer Stellplätze deutscher Pkw über Nacht²¹⁹

Insgesamt stehen etwa 60 % der deutschen Pkw-Nutzer Garagen zu Verfügung. Für diese und die Nutzer mit festen Stellplätzen am Haus sollte relativ günstig Infrastruktur aufgebaut werden können. Nutzer ohne festen Stellplatz bräuchten eine stets nutzbare Ladesäule. Dies gilt vor allem für Nutzer, für die aufgrund hoher Jahresfahrleistungen Elektrofahrzeuge ökonomisch in Frage kommen, denn diese müssen praktisch täglich über Nacht laden, um hohe elektrische Fahranteile zu erreichen. Selbst wenn diese Fahrer eine vergleichsweise günstige Laternenladesäule oder eine günstige Ladesäule nutzen können, sind diese Fahrprofile kaum noch ökonomisch interessant (siehe Abschnitt 3.2.3 für die Annahmen im Modell und auch Abbildung 5-18).

Markthochlauf Primärladepunkte

Abbildung 5-18 zeigt die genutzte Ladeinfrastruktur für die Option mit geringer Ladeleistung und geringer Verbreitung. Es wird davon ausgegangen, dass nur Primärladepunkte zur Verfügung stehen. Das führt beispielsweise dazu, dass private Halter nur zu Hause laden können oder Laternenparker eine öffentliche Lademöglichkeit brauchen. Natürlich ist anzunehmen, dass es auch zusätzlich weitere Infrastruktur geben wird,

²¹⁹ Eigene Auswertung auf Basis von MiD (2002); siehe auch Biere et al. (2009) sowie Gnann, Plötz und Haag (2013). Zum Vergleich eine Auswertung der MiD (2008): 70 % der Pkw-Besitzer parken nachts auf privatem Grundstück und es gibt in Deutschland ca. 11 Millionen-Einfamilienhäuser (vgl. BMVBS (2013)).

beispielsweise halböffentliche. Dieses Ergebnis zeigt jedoch, dass nur wenig Later-nenparker ein sinnvolles ökonomisches Potenzial haben.

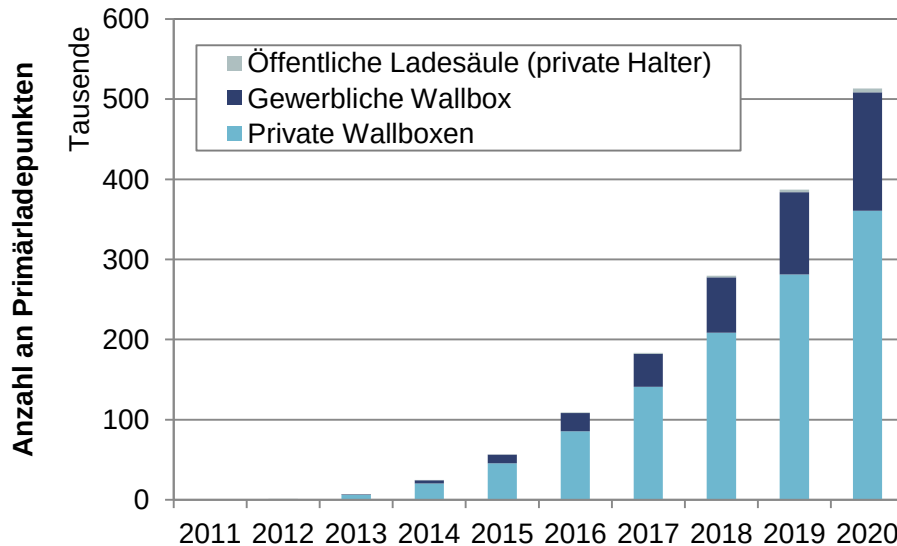


Abbildung 5-18: Markthochlauf für die Ladeinfrastruktur (nur Primärladepunkte enthalten) im mittleren Szenario mit Infrastrukturkosten (siehe Tabelle 4-31), beschränkter Verfügbarkeit und Mehrpreisbereitschaft und der Ladeinfrastrukturopption IP1IG1 (siehe Tabelle 7-2 und Tabelle 7-3)

In den Analysen wird auch die Erhöhung der Ladeleistung simuliert. Selbst wenn man unterstellt, dass keine zusätzlichen Kosten für die Ladeinfrastruktur mit höherer Leistung entstehen, so führt dies zu kaum mehr Nutzern an EV: Die Standzeiten der Fahrzeuge sind in aller Regel vollkommen ausreichend, um auch mit niedrigen Ladeleistungen zurechtzukommen.²²⁰ Wenn die Kosten für eine höhere Ladeleistung eingepreist werden, führt dies sogar zu einem leichten Rückgang an Nutzern. In Abbildung 5-19 sind diese Effekte für zwei Infrastrukturoptionen dargestellt. An dieser Stelle wird aber darauf hingewiesen, dass der Wert, im „Notfall“ mit einer höheren Ladeleistung schneller laden zu können und damit verbunden eine entsprechende Nachfrage nach derartigen Ladeoptionen, nicht im Modell berücksichtigt werden kann.

²²⁰ Ähnliche Ergebnisse werden auch in Kley (2011) ausführlich belegt.

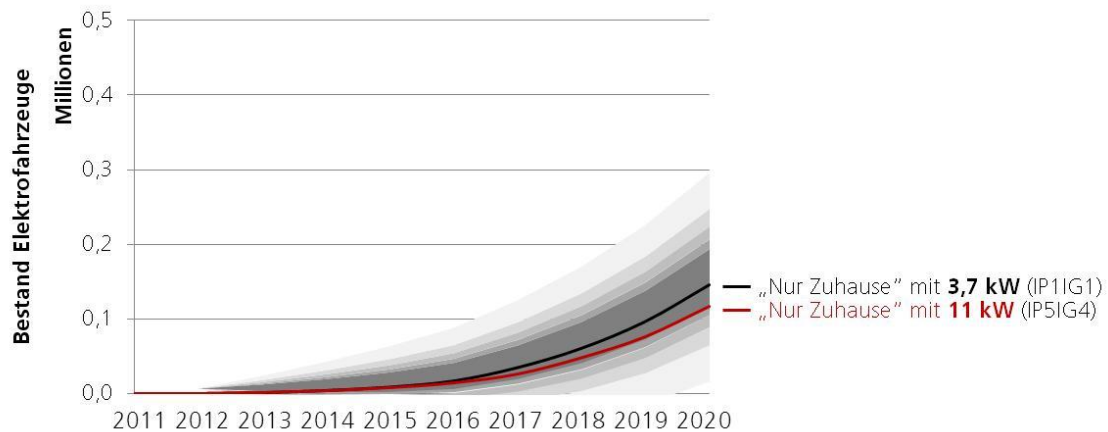


Abbildung 5-19: Markthochlauf von Elektrofahrzeugen im mittleren Szenario nur mit Infrastrukturkosten bei zwei unterschiedlichen Ladeinfrastrukturoptionen (siehe Tabelle 7-2 und Tabelle 7-3)

Weiterführende Analysen haben gezeigt, dass die Erhöhung der Verfügbarkeit (also mehr Lademöglichkeiten im halböffentlichen und öffentlichen Raum) von Ladeinfrastruktur zu deutlich mehr Nutzern führt, wenn die Kosten nicht oder nur zum geringen Teil getragen werden müssen. Eventuell vorstellbar wäre dies, wenn entsprechende Geschäftsmodelle realisiert werden könnten, z. B. in Einkaufszentren oder privaten Parkhäusern, oder eine Kostenübernahme durch Arbeitgeber erfolgt. Nicht analysiert wurden Unterbrechungen von Fahrten der einzelnen Fahrprofile, bei denen Fahrzeuge mit Hilfe von Schnellladung geladen werden könnten, da hierfür keine empirische Datenbasis über die Akzeptanz eines solchen Angebotes bekannt ist.

5.5 Potenzielle Erstnutzer

Anhand der soziodemographischen Informationen, die für die einzelnen Fahrprofile vorliegen, lassen sich auch Aussagen zur Charakterisierung der Erstnutzer von Elektrofahrzeugen bis 2020, wie diese im Modell auftreten, treffen. Abbildung 5-20 zeigt die Verteilung aller Fahrprofile und der Fahrprofile, die ökonomisch sinnvoll als Elektrofahrzeuge eingesetzt werden können, nach Beschäftigungsart und Gemeindegröße des Wohnorts differenziert.

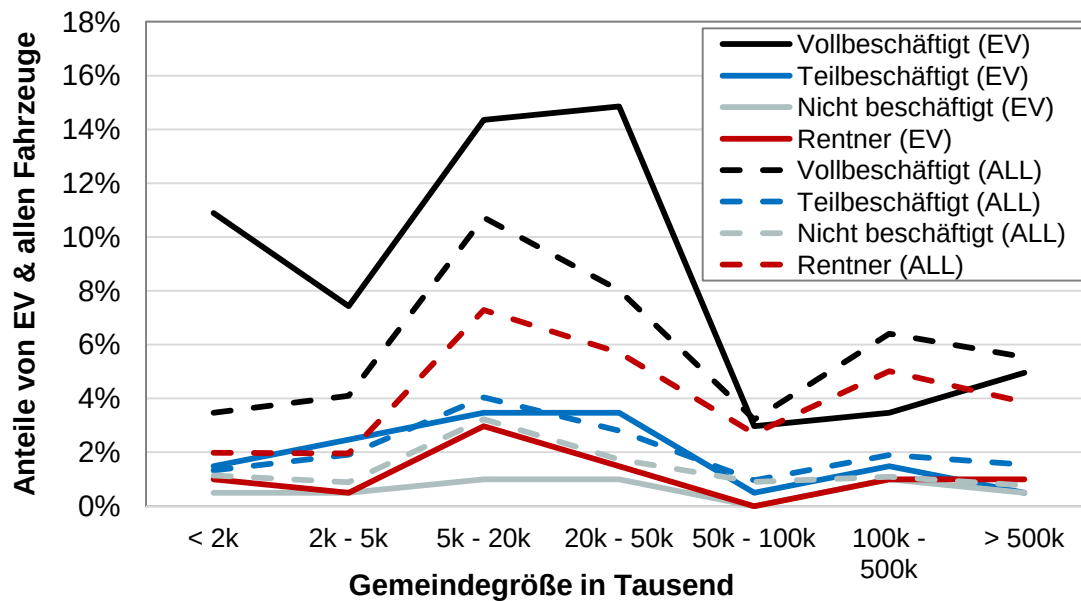


Abbildung 5-20: Verteilung aller Fahrprofile (ALL) und der für EV TCO-optimalen (EV) nach Beschäftigung und Gemeindegröße²²¹

Man erkennt, dass Vollzeitbeschäftigte aus kleinen bis mittelgroßen Gemeinden die größte Gruppe unter den ökonomisch sinnvollen Nutzern von Elektrofahrzeugen ausmachen. Bewohner von Großstädten (mit mehr als 100.000 Einwohnern) spielen entgegen teilweise geäußerter Erwartungen eher eine untergeordnete Rolle. Der Anteil dieser Gruppen an EV-passenden Fahrprofilen ist kleiner als an allen Fahrprofilen überhaupt. Dieses Ergebnis deckt sich sehr gut mit vergleichbaren Studien zur Identifizierung der Erstnutzer von Elektrofahrzeugen.²²² Zu betonen ist auch, dass der Fahrzeugbestand in Städten mit mehr als 100.000 Einwohnern generell „nur“ rund 25 % ausmacht (siehe auch Abbildung 5-17). Zusätzlich zeigen detaillierte Auswertungen der potenziellen Erstnutzer, dass der Anteil der Voll- und Teilzeitbeschäftigten aus kleinen und mittelgroßen Gemeinden höher ist, als deren Anteil an allen Pkw-Nutzern entspricht.²²³

Eine statistische Auswertung der TCO-optimalen Fahrprofile lässt auch Rückschlüsse auf mittlere Jahresfahrleistungen und elektrische Fahranteile von potenziellen Erstnutzern zu (siehe Tabelle 5-3).

²²¹ Ausgewertet wurden die TCO-optimalen Fahrprofile unter Berücksichtigung der Kosten für Ladeinfrastruktur. Die Ergebnisse ohne Ladeinfrastrukturkosten sind jedoch ähnlich.

²²² Siehe Biere et al. (2009), TAB (2013), Wietschel et al. (2012), Plötz und Gnann (2013a, b).

²²³ Siehe Plötz und Gnann (2012a und b) sowie Plötz et al. (2013)

Tabelle 5-3: Durchschnittliche Fahrzeug-Nutzung von Elektrofahrzeugen.²²⁴
(JFL=Jahresfahrleistung)

Gruppe	Antrieb	Contra-EV-Szenario		Mittleres Szenario		Pro-EV-Szenario	
		elektrischer Fahranteil	JFL	elektrischer Fahranteil	JFL	elektrischer Fahranteil	JFL
Privat	Klein	74 %	15.212	74 %	15.212	74 %	15.212
		77 %	13.006	77 %	13.006	77 %	13.006
	PHEV	-	-	-	-	-	-
	BEV	-	-	100 %	23.564	100 %	19.938
	REEV	-	-	88 %	38.351	74 %	33.308
	Mittel	73 %	15.798	73 %	15.798	73 %	15.798
	PHEV	-	-	-	-	60 %	12.775
	BEV	100 %	24.820	100 %	21.695	100 %	18.884
	REEV	84 %	24.820	88 %	27.394	77 %	26.825
	Gross	72 %	17.048	72 %	17.048	72 %	17.048
	PHEV	58 %	13.748	-	17.413	49 %	18.871
	BEV	100 %	20.437	-	-	-	-
	REEV	-	-	85 %	19.933	82 %	19.244
Flotten	Klein	65 %	27.280	65 %	27.280	65 %	27.280
		83 %	15.394	83 %	15.394	83 %	15.394
	PHEV	-	-	-	-	-	-
	BEV	-	-	100 %	28.662	100 %	19.750
	REEV	-	-	-	-	-	-
	Mittel	58 %	33.221	58 %	33.221	58 %	33.221
	PHEV	-	-	-	-	-	-
	BEV	100 %	26.665	100 %	21.543	100 %	19.673
	REEV	-	-	69 %	26.938	66 %	25.757
	Gross	58 %	39.053	58 %	39.053	58 %	39.053
	PHEV	-	-	-	-	-	-
	BEV	-	-	100 %	19.610	100 %	15.521
	REEV	71 %	24.976	69 %	26.026	70 %	24.038
	LNF	62 %	25.049	62 %	25.049	62 %	25.049
	PHEV	-	-	-	-	-	-
	BEV	100 %	14.162	100 %	10.243	100 %	8.038
	REEV	-	-	67 %	20.685	59 %	23.972

²²⁴ Ausgewertet sind die Fahrprofile der Erstnutzer, die sich unter Berücksichtigung der Infrastrukturkosten für ein Elektrofahrzeug entscheiden sollten. Die *kursiv* gesetzten Zeilen zeigen zum Vergleich die Ergebnisse für *alle* Fahrprofile nicht nur der von potenziellen Erstnutzern. Leere Felder bedeuten, dass in dieser Gruppe kein Fahrprofil eines potenziellen Erstnutzers vorhanden war. Dienstwagen sind aufgrund der geringen Zahl der Erstnutzer nicht gezeigt.

Wie aufgrund der TCO-Rechnungen erwartet, zeigt sich, dass (1) die mittleren Jahresfahrleistungen von potenziellen Elektrofahrzeugnutzern deutlich über den mittleren Jahresfahrleistungen aller Pkw-Nutzer liegen und (2) die potenziellen Erstnutzer hohe elektrische Fahranteile erreichen. Diese Ergebnisse zeigen wiederum den großen Vorteil der Verwendung von Fahrprofilen anstelle von Durchschnittskilometern. Zudem sind diese Ergebnisse energiewirtschaftlich interessant: Für eine Abschätzung des Ladestroms ist es nicht ausreichend, typische deutsche Jahresfahrleistungen zu betrachten, da die Energiemenge aufgrund der größeren Jahresfahrleistungen auch zunimmt.

5.6 Ergebnisse der Sensitivitätsrechnungen

Die vorhergehenden Abschnitte haben einige grundsätzliche Ergebnisse der Modellrechnungen vorgestellt. Im vorliegenden Abschnitt werden weitere Varianten der Rechnungen vorgestellt. Diese umfassen eine Änderung einzelner wichtiger Rahmenparameter, die bisher nur gemeinsam im Rahmen der Szenarien variiert wurden und es werden verschiedene Variationen einzelner Modellannahmen gerechnet, um die Belastbarkeit verschiedener Ergebnisse zu untersuchen. Die Wirkungen von einzelnen Politikmaßnahmen, soweit diese im Rahmen des Modells berechnet werden können, sind im nächsten Abschnitt (5.7) vorgestellt.

In Absprache mit den Mitgliedern der AG7 der NPE wurde die Variante mit Ladeinfrastrukturkosten, begrenzter Verfügbarkeit und Mehrpreisbereitschaft für das mittlere Szenario als Basisvariante gewählt. Die folgenden Sensitivitäten und die Wirkungen möglicher Politikmaßnahmen beziehen sich auf diese Basisvariante.

Sensitivitätsrechnungen

Die starke Sensitivität der Ergebnisse gegenüber Änderungen in den Rahmenbedingungen zeigt sich bereits im Vergleich der verschiedenen Szenarien. In diesem Abschnitt werden einzelne Sensitivitätsrechnungen für die Basisvariante (Einpreisung der Kosten für Ladeinfrastruktur, Berücksichtigung des begrenzten Fahrzeugangebots und bis 2020 sinkende Mehrpreisbereitschaft für Elektrofahrzeuge) des mittleren Szenarios durchgeführt. Betrachtet wird die Sensitivität des Bestandes an Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 bei Änderung der Strompreise (privater und gewerblicher Strompreis), der Kraftstoffpreise (Benzin- und Dieselpreise), der Batteriepreise sowie des Zinssatzes für die TCO-Rechnung.

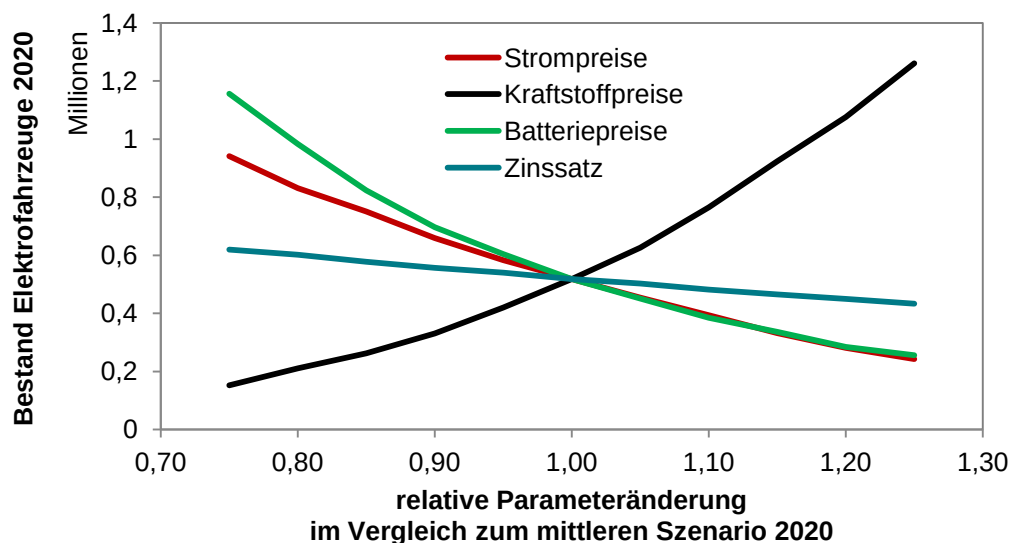


Abbildung 5-21: Sensitivität des Bestandes an Elektrofahrzeugen 2020

Wie zu erwarten, führen höhere Kraftstoffpreise sowie niedrigere Batterie- und Strompreise in der TCO-basierten Modellierung der Kaufentscheidung zu deutlich höheren Bestandszahlen von Elektrofahrzeugen bis 2020. Bei der Interpretation der Sensitivitäten ist darauf zu achten, dass die Veränderung von Strom- und Kraftstoffpreisen aus energiewirtschaftlicher Sicht nicht völlig unabhängig erfolgen kann, das heißt beispielsweise, dass höhere Kraftstoffpreise mit höheren Strompreisen korrelieren können. Die Änderung der Parameterwerte um +/- 25 % erscheint nicht in allen Fällen gleich wahrscheinlich. Zur Übersichtlichkeit sind die Parameterwerte der Sensitivitäten in Tabelle 5-4 noch einmal aufgeführt.

Tabelle 5-4: Parameterwerte für Sensitivitäten incl. MwSt.

Parameter	Jahr	75 %	Referenzwert	125 %
Dieselpreis [€/Liter]	2013		1,45	
	2020	1,19	1,58	1,98
Benzinpreis [€/Liter]	2013		1,57	
	2020	1,24	1,65	2,06
Strompreis Privat [€/kWh]	2013		0,265	
	2020	0,218	0,29	0,363
Strompreis gew. [€/kWh]	2013		0,20	
	2020	0,161	0,215	0,269
Batteriepreis [€/kWh]	2013		520	
	2020	251	335	419
Zinssatz	Alle	3,75 %	5 %	6,25 %

Die Wirkung der gleichen Sensitivitätsrechnungen auf die Bestandsentwicklung und die Zusammensetzung des Bestandes bis 2020 zeigt Abbildung 5-22.

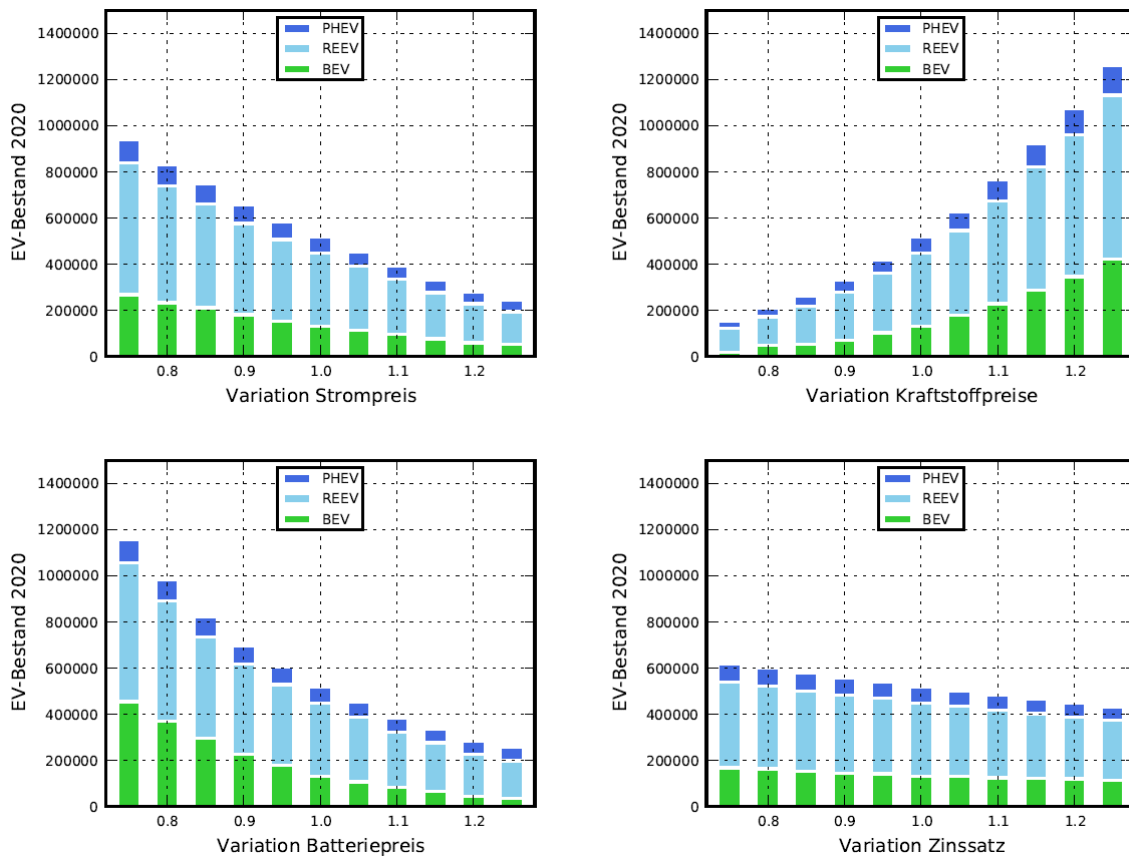


Abbildung 5-22: Sensitivitäten zum Bestand an Elektrofahrzeugen 2020 im mittleren Szenario (Basisvariante)

Es zeigt sich, dass eine Verringerung des Batteriepreises bis 2020 nicht nur zu einer größeren Zahl von Elektrofahrzeugen führt, sondern auch den Anteil reiner Batteriefahrzeuge erhöht. Eine Veränderung der Strom- oder Kraftstoffpreise bewirkt im Modell keine Verschiebung zwischen den verschiedenen Elektrofahrzeugen.

Ergebnisse der Varianten

Um die Robustheit der Modellergebnisse gegenüber Änderungen einiger techno-ökonomischer Modellannahmen durchzuführen, wurden zusätzliche Varianten mit Hilfe des Modells berechnet. Abbildung 4-23 zeigt die Ergebnisse von drei Variantenrechnungen.

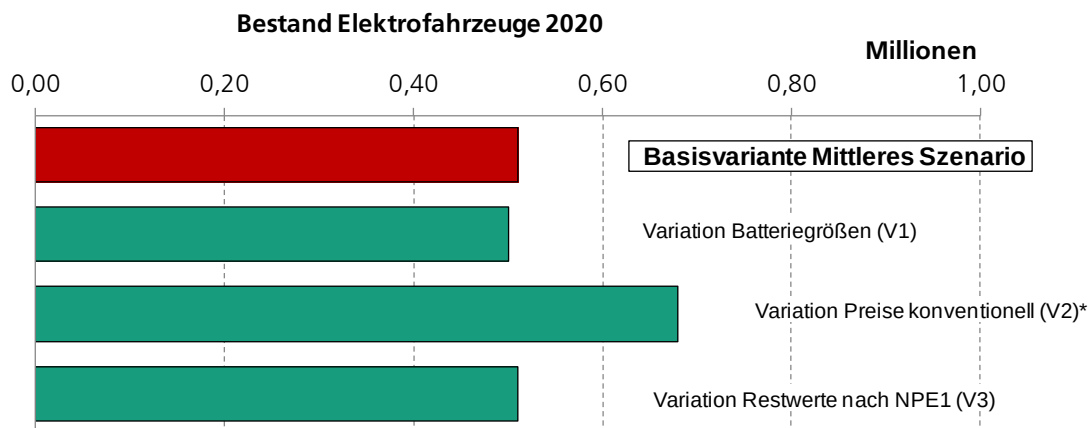


Abbildung 5-23: Ergebnisse der Variantenrechnungen auf den Bestand 2020 im mittleren Szenario

Für die Variation der Batteriegrößen wurden leicht größere Batterien für Elektrofahrzeuge,²²⁵ für die Variation der Fahrzeugpreise leicht erhöhte Nettolistenpreise für konventionelle Fahrzeuge angenommen.²²⁶ Die dritte Variante betrifft die Restwerte von Elektrofahrzeugen, hier wurde eine Restwertentwicklung gemäß der Annahmen von Pfahl (2013) verwendet (siehe Abschnitt 4.2.3). Es zeigt sich, dass eine Veränderung der Restwertberechnung und der Batteriegrößen keinen wesentlichen Einfluss haben. Eine Erhöhung der Preise konventioneller Fahrzeuge führt zu einer größeren Anzahl von Elektrofahrzeugen im Bestand bis 2020.

5.7 Auswirkungen von Politikmaßnahmen

Im Folgenden werden die Wirkungen unterschiedlicher Politikmaßnahmen auf den Markthochlauf der Elektrofahrzeuge untersucht. Dieser Abschnitt soll neben Kosten und Nutzen einzelner Maßnahmen auch die Mitnahmeeffekte ausweisen. Diese entstehen immer dann, wenn ein Käufer bereits ohne Subventionen ein Elektrofahrzeug gekauft hätte und somit zusätzlich in den Genuss monetärer Vorteile kommt. Psychologische Aspekte, welche die Wirkung von Maßnahmen verstärken oder abschwächen

²²⁵ Geändert wurden: PHEV Klein 7 → 8 kWh, REEV Klein 13 → 14 kWh, REEV Mittel 16 → 17 kWh, REEV Groß 19 → 22 kWh, BEV Groß 28 → 32 kWh, DoD PHEV 75 → 80 %.

²²⁶ Die Nettolistenpreise der konventionellen Fahrzeuge steigen in der Basisvariante zwischen 2011 und 2020 um 700 € (Klein), 400 € (Mittel) bzw. 1.000 € (Groß). Diese wurden leicht erhöht auf 1.000 € (Klein), 1.000 € (Mittel) bzw. 1.500 € (Groß).

können, wurden nicht in die Betrachtung mit einbezogen. Die dargestellten Ergebnisse beruhen demnach auf rein TCO-basierten Entscheidungen der Käufer.

Um die grundsätzlichen Wirkungen unterschiedlicher Politikmaßnahmen beurteilen zu können wurden zunächst in enger Abstimmung mit der NPE eine Reihe von Maßnahmen diskutiert und ausgewählt. Eine Reduktion der Investition für private und gewerbliche Nutzer um einen festen Betrag wird ebenso betrachtet wie eine Sonder-AfA für rein gewerbliche Halter und eine Senkung des Investitionszinsses für private Käufer. Die Wirkung der Änderung der Dienstwagenbesteuerung – wie im Jahressteuergesetz (2013) enthalten – wird ebenfalls dargestellt. Abschließend werden die Auswirkungen einer vollständigen Befreiung der Kfz-Steuer von PHEV und REEV dargestellt.

Kaufpreisreduktion

Um die Anfangsinvestitionen (Fahrzeugpreis und Ladeinfrastruktur) für den Käufer zu senken ist eine Pauschalsubvention von 1.000 bis 2.000 € denkbar. Beträge in dieser Spannweite lassen sich durch das Entstehen der positiven externen Effekte, die mit der Nutzung von Elektrofahrzeuge verbunden sind, rechtfertigen.²²⁷ Analog zur Entwicklung der Batteriepreise muss dieser Betrag über die Jahre abnehmen. Entsprechend der vorgeschlagen Entwicklung für die Dienstwagenbesteuerung im JStG (2013) sinken die Beträge bis zum Jahr 2020 auf 300 bzw. 600 €, was einer jährlichen Abnahme um 100 bzw. 200 € entspricht. Durch den Pauschalbetrag profitieren besonders kleinere, gewerblich genutzte, Fahrzeuge mit niedrigeren Kaufpreisen.

Senkung des Investitionszinssatzes

Die Einrichtung eines KfW-finanzierten Kreditprogramms zur vergünstigten Finanzierung von Elektrofahrzeugen für private Halter und der damit einhergehenden Senkung des Investitionszinssatzes von 5 % auf 4 % führt in der Summe zu einem Bestand von etwa 1 Million Elektrofahrzeuge im Jahr 2020. Im Gegensatz zur pauschalen Kaufpreisreduktion, werden hierbei alle Segmente prozentual gleichermaßen begünstigt. In absoluten Werten profitieren dabei die größeren Segmente am stärksten.

Sonder-AfA

Durch die schnelle technologische Entwicklung der Batterietechnologie ist die Möglichkeit der Sonder-AfA für gewerblich genutzte Elektrofahrzeuge zu rechtfertigen. Dies würde dazu führen, dass 50 % der gesamten Abschreibungssumme im ersten Jahr abgeschrieben werden können. Finanziell bedeutet dies eine frühere Wirksamkeit der

²²⁷ Vgl. TAB (2013)

Abschreibung und kann folglich gleichgesetzt werden mit einer Senkung des Investitionszinssatzes über die gesamte Zeit von 5 % auf 3,955 %. Da der Förderbetrag proportional vom Kaufpreis abhängt, werden alle Segmente gleichermaßen bevorteilt. Insgesamt steigt der Bestand damit bis 2020 auf etwa 800.000 Elektrofahrzeuge.

Änderung Dienstwagenbesteuerung

Die Auswirkungen einer Senkung des maßgeblichen Bruttolistenpreises um zunächst 500 € pro kWh Batterieleistung (Rückgang bis 2020 auf 150 € pro kWh) führt auf Basis des entwickelten TCO-Modells zu keinen Änderungen. Der Grund ist in der Berechnung der TCO für Dienstwagen zu suchen. Diese setzen sich aus der Summe der Kosten des Nutzers und des Halters zusammen. Die Schwächen dieses Ansatzes werden an anderer Stelle ausführlich diskutiert (siehe Kapitel 3). Kombiniert man die Änderung der Dienstwagenbesteuerung, so wie sie aktuell bereits beschlossen wurde, mit der Sonder-AfA, so führt dies zu etwa 50.000 elektrischen Dienstwagen im Jahr 2020.

Kfz-Steuer-Befreiung für REEV und PHEV

Nach derzeitigem Steuerrecht sind BEV komplett steuerbefreit, für REEV und PHEV fallen nur hubraumbasierte Sockelbeträge an. Auch bei den leichten Nutzfahrzeugen sind BEV komplett steuerbefreit, allerdings wird in diesem Segment sonst die Höhe der Steuer rein gewichtsbasiert ermittelt. PHEV, REEV sowie konventionelle Antriebe werden demnach gleich besteuert. Aus diesem Grund wirkt eine Steuerbefreiung besonders bei den leichten Nutzfahrzeugen. Bei den Pkw entstehen lediglich leichte Verschiebung der Anteile von BEV zu PHEV und REEV. Insgesamt erhöht sich der Bestand 2020 um etwa 50.000 Elektrofahrzeuge.

Übersicht

Abbildung 5-24 zeigt zusammenfassend die Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen auf den Bestand von Elektrofahrzeugen 2020. Es zeigt sich an dieser Stelle, dass bereits geringe finanzielle Anreize im gewerblichen Bereich ausreichen können, um den Bestand deutlich zu steigern.

Den Änderungen im Bestand 2020 stehen unterschiedlich hohe Fördersummen gegenüber. Tabelle 5-5 zeigt die Profiteure der einzelnen Maßnahmen und die erforderlichen Fördersummen zusammen mit den Mitnahmeeffekten. Besonders hervorzuheben ist an dieser Stelle die Sonder-AfA, die bei ähnlicher Fördersumme wie die Pauschalsubvention mit 1.000 € deutlich geringere Mitnahmeeffekte aufweist.

Die verschiedenen Maßnahmen wurden in das TCO-basierte Markthochlaufmodell integriert. Über zusätzliche volkswirtschaftliche Effekte (bspw. Bruttowertschöpfung

oder Arbeitsplätze) oder psychologische Faktoren können hier keine Angaben gemacht werden.²²⁸ Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

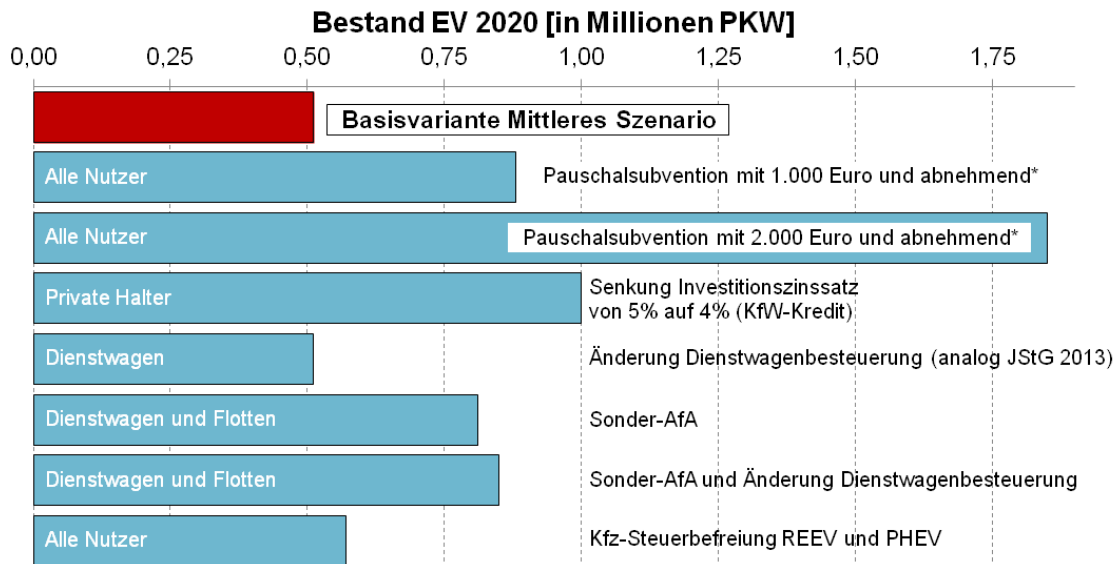


Abbildung 5-24: Wirkungen der Politikmaßnahmen im Vergleich zum mittleren Szenario mit Infrastrukturkosten, beschränkter Verfügbarkeit und Mehrpreisbereitschaft

Tabelle 5-5: Profiteure und Kosten der einzelnen Maßnahmen (Werte in €)

Maßnahme	Profiteure	Erforderliche Fördersumme	Mitnahmeeffekte
Pauschalsubvention 1.000 €	Gewerbliche Nutzer, kleine Segmente	480 Mio.	260 Mio.
Pauschalsubvention 2.000 €	Gewerbliche Nutzer, kleine und mittlere Segmente	2,2 Mrd.	520 Mio.
Senkung Investitionszinssatz	Private Nutzer, alle Segmente	2,5 Mrd.	710 Mio.
Änderung Dienstwagenbesteuerung	-	-	-
Sonder-AfA	Gewerbliche Nutzer, alle Segmente	540 Mio.	190 Mio.
Sonder-AfA & Änderung Dienstwagenbesteuerung	Gewerbliche Nutzer, Dienstwagen, alle Segmente	610 Mio.	190 Mio.
Steuerbefreiung PHEV, REEV	Gewerbliche Nutzer, LDV, PHEV, REEV	60 Mio.	45 Mio.

²²⁸ Vgl. jedoch TAB (2013), Kapitel III.2.4 für mögliche volkswirtschaftliche Effekte und de Haan, Mueller und Peters (2007) für psychologische Faktoren von Autokäufern.

6 Diskussion und Schlussfolgerungen

Markthochlauf

Ob das Ziel von einer Million Elektrofahrzeugen bis 2020 in Deutschland erreicht wird, ist eine heftig diskutierte Frage. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass es hierauf keine einfache Antwort gibt. Der Markthochlauf von Elektrofahrzeugen hängt unter anderem von der Entwicklung externer Einflussgrößen ab, beispielsweise vom Rohölpreis. Ebenso entscheidend sind die Erreichung von Kostensenkungszielen insbesondere bei Fahrzeugbatterien und die Akzeptanz der Kunden für diese neue Form der Mobilität. Die Prognosen hierüber sind mit hohen Unsicherheiten behaftet.

Unter optimistischen Annahmen bezüglich der Entwicklung der Rahmenbedingungen für die Elektromobilität kann das Ziel von einer Million bis 2020 erreicht werden. Unter diesen Annahmen gibt es keinen Bedarf an externen Anreizen für den Massenmarkt. Die Ergebnisse der Studie zeigen weiterhin, dass Elektromobilität auch unter für sie ungünstigen Annahmen in den Markt kommen kann: Auch unter schwierigen Rahmenbedingungen wird 2020 ein Sockel von etwa 150.000 bis 200.000 Elektrofahrzeugen in Deutschland ermittelt. Ob diese Zahl ausreichend hoch ist, damit die Automobilhersteller hier in dem notwendigen Maße einsteigen und damit die unterstellten Kostensenkungspotenziale bei den EV-Fahrzeugen und der Ladeinfrastruktur tatsächlich auch erreicht werden können, wurde in dieser Studie nicht betrachtet.

Aufgrund der Unsicherheiten im Markthochlauf sollten sich mögliche künftige Förderinstrumente durch eine hohe dynamische Anpassungsfähigkeit an Änderungen der technologischen und ökonomischen Bedingungen auszeichnen. Die Reversibilität eines Instrumenteneinsatzes ist hier wichtig.

Nutzergruppen

Damit Elektrofahrzeuge wirtschaftlich sind, müssen sie viel fahren, um die höheren Anschaffungsausgaben über die günstigeren Verbrauchs- und Wartungskosten zu amortisieren. Bei geringen jährlichen Fahrleistungen (bis etwa 15.000 Kilometer) dominiert künftig weiterhin der Benzinmotor, bei sehr hohen der Dieselmotor (ab etwa 30.000 bis 40.000 Kilometern Jahresfahrleistung). Dazwischen ist die Entscheidung stark davon abhängig, ob sich ausreichend elektrische Fahranteile innerhalb eines Fahrprofils realisieren lassen bzw. das Fahrprofil rein elektrisch zu bewältigen ist. Bei relativ gleichmäßigen täglichen Fahrzyklen und ausreichender jährlicher Fahrleistung sind EV wirtschaftlich am sinnvollsten einzusetzen. Diese Bedingungen erfüllt eine nicht unerhebliche Anzahl an Fahrzeugen, wie die detaillierte Auswertung von Fahrprofilen in dieser Studie zeigt. Die Auswertungen belegen, dass rund 12 Prozent aller

deutschen Pkw-Nutzer einen elektrischen Fahranteil von über 95 Prozent erreichen könnten, wenn man PHEV als generelle Fahrzeuge unterstellt. Mögliche künftige Fördersysteme für EV sollten deshalb möglichst an gefahrenen Kilometern ausgerichtet werden. Wie andere Studien²²⁹ gezeigt haben, sind recht hohe Fahrleistungen auch eine Voraussetzung dafür, dass sich eine positive Umweltbilanz bei EV einstellt.

Da die Verbrauchseinsparungen durch EV bei großen Fahrzeugen am höchsten sind und diese sich oft auch durch hohe jährliche Fahrleistungen auszeichnen, ist dieses Segment unter wirtschaftlichen Aspekten am attraktivsten. Das aktuelle Angebot an Elektrofahrzeugen beziehungsweise die angekündigten Modelle spiegeln dies derzeit nicht wieder. Hier wird sich bisher eher auf die Unter- und insbesondere Mittelklassefahrzeuge spezialisiert. Die Gründe für diese Diskrepanz sollten tiefergehend analysiert und diskutiert werden.

Die Analysen zeigen weiterhin eine recht hohe Wirtschaftlichkeit der REEV und PHEV, die zusammen einen höheren Marktanteil erreichen als die BEV. Für viele Nutzer scheint die etwas kleinere Batterie bei REEV beziehungsweise PHEV gegenüber BEV ausreichend zu sein, um genügend hohe elektrische Fahranteile zu erreichen. Und einige dieser Nutzer benötigen vereinzelt die längeren Reichweiten, die mit Verbrennungsmotoren möglich sind. Für ein genaueres Verständnis der Schwankungen in den Tagesfahrleistungen einzelner Nutzer sind aber noch längere Aufzeichnungszeiträume hilfreich, zu denen für Deutschland bisher kaum Daten vorliegen.²³⁰ Ergänzend wird darauf hingewiesen, dass die Reichweitenangst eine der wesentlichen Hürden für die Akzeptanz von BEV spielt, die auch durch positive Erfahrungen mit EV nur bedingt abgebaut werden kann.²³¹

Gerade der private Bereich bietet einige Potenziale für die EV. Dies hängt damit zusammen, dass hier viele „passende“ Fahrprofile identifiziert wurden und dass hier – abgeleitet aus empirischen Befragungen – eine höhere Mehrpreisbereitschaft bei einigen Kunden angenommen wird, die über der Mehrpreisbereitschaft gewerblicher Halter liegt. Weiterhin sind große Fahrzeuge in diesem Segment deutlich mehr vertreten als bei Flottenfahrzeugen. Es stellt sich allerdings auch die Frage nach der Einflusshöhe der Gesamtnutzungskosten auf die Kaufentscheidung privater Halter. Weiterhin könnte

²²⁹ Hacker et al. (2011), Helms et al. (2011) und Wietschel et al. (2011).

²³⁰ Siehe Greene 1985, Lin, et al. (2012), Pearre et al. (2011), Smith et al. (2011) sowie Smith et al. (2010) für längere Aufzeichnungszeiträume außerhalb Deutschlands.

²³¹ Siehe Dütschke et al. (2012) sowie Knie et al. (1999).

eine mangelnde halböffentliche und öffentliche Ladeinfrastrukturverfügbarkeit ein Hemmnis für die künftige Verbreitung sein.

Nutzer mit Garagen/Stellplätzen sind aufgrund der geringen Ladeinfrastrukturkosten fast immer unter ökonomischen Aspekten attraktiver als Laternenparker. Die Nutzer sind überwiegend Vollzeitbeschäftigte in Gemeinden bis mittelgroßen Städten, unter anderem weil hier der Garagenanteil höher ist und die Fahrleistungen oftmals besser zu EV passen als bei Nutzern in Großstädten.

Hohes Potenzial bieten die gewerblichen Flotten. Die TCO-Lücken sind gerade in diesem Segment für eine vergleichsweise große Bandbreite an Nutzern gering. Die Gründe liegen darin, dass hier tendenziell eher regelmäßiger und mit wenigen sehr langen Einzelstrecken gefahren wird. Weiterhin machen sich die bestehenden Abschreibungsmöglichkeiten und der Wegfall der Mehrwertsteuer in diesem Segment sehr bemerkbar. Auch spielen Wirtschaftlichkeitsrechnungen eine größere Rolle als bei Privatzehnutzern²³². Der öffentliche Infrastrukturaufbau dürfte für diese Nutzer eher nachrangig sein. Da in diesem Segment überwiegend Mittelklassefahrzeuge gefahren werden, stimmt das bestehende Fahrzeugangebot gut damit überein. Bei gewerblichen Flotten kann man somit mit wenig Aufwand nennenswerte Marktpotenziale heben. Wenn über Fördermöglichkeiten zur Markteinführung nachgedacht wird, sollte deshalb dieser Bereich im Fokus stehen, auch weil gewerbliche Fahrzeuge häufig in den privaten Gebrauchtwagenmarkt übergehen.

Eine recht geringe Attraktivität für den Einsatz von EV bietet derzeit das Segment der Dienstwagen. Ein wesentlicher Grund hierfür lag bei der geldwerten Versteuerung, die über den höheren Anschaffungspreis die EV für Dienstwagennutzer ökonomisch unattraktiv gemacht haben. Hier ist allerdings eine gesetzliche Neuregelung in Kraft getreten. Weiterhin zeichnen sich aber die Fahrprofile in diesem Sektor oftmals durch ungleichmäßige tägliche Fahrprofile aus, was zu geringen elektrischen Fahranteilen und damit ökonomisch weniger großen Potenzialen führt. Der hohe Anteil an Oberklassefahrzeugen macht dieses Segment wiederum wegen der oben bereits erwähnten hohen Verbrauchseinsparungen recht attraktiv – wie gesagt, werden in der Oberklasse jedoch bisher wenig EV angeboten. Weiterhin stellt sich die Frage, wie weit geringe Verbrauchs- und Wartungskosten für Dienstwagennutzer, die oftmals von den Firmen übernommen werden, überhaupt eine Rolle spielen. Evtl. bieten bei Unternehmen selbst gesetzte Flottengrenzwerte eine Chance für EV. Bei den Analysen zum Markthochlauf von EV bei Dienstwägen ist darauf hinzuweisen, dass in diesem Segment

²³² Siehe Dataforce (2011) und Öko-Institut 211a.

anders als bei den privaten Haltern und Flottenfahrzeugen keine Mehrpreisbereitschaft wegen fehlender Datenbasis unterstellt wurde.

Da die Entscheidung beim Kauf von Neuwagen sehr komplex ist – was bieten welche Unternehmen aus welchen Gründen ihren Angestellten an und nach welchen Kriterien entscheiden die Dienstwagennutzer –, öffentlich verfügbare empirische Erhebungen kaum vorhanden sind und auch die Datenbasis bei den Fahrprofilen nicht sehr breit ist, sollten hier weitere Analysen durchgeführt werden. Insbesondere ist dies vor dem Hintergrund zu nennen, dass der Dienstwagenanteil bei den Neuzulassungen sowie im Premium-Segment von PkWs eine wichtige Rolle spielt.

Ein Aspekt, der in der vorliegenden Studie nicht näher betrachtet wurde, sind Sharing-Konzepte. Der Markt für EV bei Car-Sharing könnte nach anderen Studien gerade in Großstädten durchaus interessant sein²³³, weil hier ein Bedarf nach neuen Mobilitätskonzepten besteht und möglicherweise hohe Auslastungen bei den Fahrzeugen erreicht werden können. Hier sind auch Mischkonzepte aus gewerblicher Nutzung und privatem Car-Sharing denkbar. Nach heutigem Erkenntnisstand kann die Diffusion der Elektrofahrzeuge durch derartige Angebote beschleunigt werden.

Ladeinfrastruktur

Die Kosten für Ladeinfrastruktur haben einen deutlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von EV. Sind teure Lademöglichkeiten notwendig, beispielsweise für Nutzer ohne eigene Garage oder Stellplatz, so rechnen sich EV gemeinsam mit ihrer Ladeoption nur für sehr wenige Nutzer. Auch eine hohe Ladeleistung bringt kaum zusätzlichen Nutzer, da die Ladezeit für die wenigsten Nutzer mit positiver TCO-Lücke ein Problem ist, aber sich die höheren Kosten für solche Systeme kaum amortisieren. Psychologische Aspekte, im „Notfall“ schneller laden zu können, wurden in der Studie aufgrund fehlender Datenbasis nicht einbezogen. Wenn öffentliche Ladeinfrastruktur, aber auch halböffentliche Ladung, beispielsweise in Parkhäusern von Einkaufszentren oder auf Firmenparkplätzen, kostenlos angeboten werden kann, hat dies eine deutlich positive Auswirkung auf den Markthochlauf. Hierdurch kann der Anteil an elektrischen Fahrzeugen deutlich gesteigert werden, auch bei kleiner dimensionierten Batterien.

Nicht in dieser Studie untersucht wurde der Einfluss öffentlicher Ladesäulen auf die generelle Akzeptanz von EV. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, weil andere Studien aussagen, dass sich die Nutzer zwar oft eine gut ausgebaute öffentliche Lade-

²³³ Siehe u.a. Wietschel (2012).

infrastruktur wünschen, wenn diese aber vorhanden ist, wird sie so nur selten genutzt.²³⁴

Ebenfalls nicht Gegenstand dieser Studie sind Analysen, in welchen Fahrten unterbrochen werden, um an sogenannten Schnellladestation zwischenzuladen. Hier gilt es, künftig die Akzeptanz von solchen Zwischenladungen zu analysieren, die sich bei den heute diskutierten 50-kW-Systemen immerhin auf etwa zwanzig Minuten belaufen. Für gewerbliche Anwendungen dürfte dies wohl ein Ausschlusskriterium sein, weil die Arbeitszeitkosten des Fahrers während der Beladung hier jede Wirtschaftlichkeit zunichtemachen. Es sei denn, sie lässt sich mit feststehenden Pausen oder Terminen präzise in Einklang bringen. Auch wird ein möglicher Bedarf an öffentlicher Ladeinfrastruktur durch Car-Sharing sowie der weiteren Nutzung dieser Infrastruktur durch andere nicht analysiert.

Weiterer Forschungsbedarf

An mehreren Stellen im Projekt und der Auswertung zeigte sich klarer Bedarf für weitere Forschung.

Das Kaufverhalten von Pkw-Käufern ist komplex und bei alternativen Antrieben noch nicht vollkommen erforscht. Zum einen liegt das an den verschiedenen Käufergruppen, aber auch an der Neuheit von Elektrofahrzeugen, so dass die Akzeptanz und der Kauf von solchen Fahrzeugen noch nicht ausreichend verstanden wird. Im Modell zeigt sich dies beispielsweise an den Unsicherheiten im Bereich der Mehrpreisbereitschaften aber auch beim Einfluss der begrenzten Reichweite von BEV auf das Kaufverhalten. Hier sind weitere Analysen notwendig.

Im Bezug auf das Fahrverhalten und die Fahrdaten ist die Basis an öffentlich zugänglichen Daten vor allem im Bereich Dienstwagen sehr begrenzt. Zudem ist deren Kaufentscheidung sehr komplex. Gerade hier könnten in Zukunft weitere Daten gesammelt werden, um dieser recht großen Gruppe an Pkw-Käufern besser gerecht zu werden.

Carsharing gilt als interessanter Markt für Elektrofahrzeuge.²³⁵ Allerdings wurden Carsharing-Fahrzeuge aufgrund ihrer noch geringen Anzahl aus der vorliegenden Studie ausgeschlossen. Zukünftige Untersuchungen, könnten die Rolle von Carsharing und den möglichen Einfluss sich wandelnder Mobilitätsstile auf den Markthochlauf von Elektrofahrzeugen mit untersuchen.

²³⁴ Siehe Gnann et al. (2013), Ecotality und Idaho National Lab (2012), Bruce et al. (2012).

²³⁵ Vgl. Doll, Gutmann und Wietschel (2011) sowie Knie et al. (2012).

Die zukünftige Verbreitung von halböffentlicher und öffentlicher Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge und ihr Einfluss auf den Markthochlauf konnten im Rahmen der Studie nur begrenzt abgebildet werden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, diesen Einfluss in ein verbessertes Modell zu integrieren.

Für langfristige Markthochlaufszszenarien (über 2020 hinaus) sollten weitere alternative Antriebssysteme, wie Brennstoffzellen- oder Gasfahrzeuge, berücksichtigt werden sollten. Sämtliche Unsicherheiten zur Entwicklung künftiger Fahrzeugkosten oder der Akzeptanz und Mehrpreisbereitschaft stellen sich hier jedoch ebenso, so dass weitere Daten und Belege für eine Erweiterung des Markthochlaufmodells in diese Richtung nötig wären.

7 Anhang

7.1 Übersicht Eingangsdaten und Parameter

Tabelle 7-1: Übersicht aller Eingangsparameter im zeitlichen Verlauf (alle Kosten ohne Mehrwertsteuer)

Parameter	Einheit	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Entladetiefe BEV	-	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Entladetiefe PHEV	-	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Entladetiefe REEV	-	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Batteriekapazität BEV Großklassewagen	kWh	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
Batteriekapazität PHEV Großklassewagen	kWh	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Batteriekapazität REEV Großklassewagen	kWh	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
konventioneller Verbrauch Diesel Großklassewagen	l/km	0,076	0,075	0,074	0,073	0,072	0,070	0,069	0,068	0,067	0,066
konventioneller Verbrauch Benzin Großklassewagen	l/km	0,102	0,100	0,098	0,096	0,094	0,093	0,091	0,089	0,087	0,085
rein konventioneller Verbrauch PHEV Großklassewagen	l/km	0,089	0,088	0,086	0,085	0,083	0,082	0,080	0,079	0,077	0,076
rein konventioneller Verbrauch REEV Großklassewagen	l/km	0,104	0,102	0,101	0,099	0,098	0,096	0,095	0,093	0,092	0,090
elektrischer Verbrauch BEV Großklassewagen	kWh/km	0,251	0,248	0,246	0,243	0,240	0,238	0,235	0,232	0,230	0,227
elektrischer Verbrauch PHEV Großklassewagen	kWh/km	0,238	0,236	0,233	0,230	0,228	0,225	0,222	0,220	0,217	0,214
elektrischer Verbrauch REEV Großklassewagen	kWh/km	0,251	0,248	0,246	0,243	0,240	0,238	0,235	0,232	0,230	0,227
Batteriekapazität BEV Mittelklassewagen	kWh	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Batteriekapazität PHEV Mittelklassewagen	kWh	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Batteriekapazität REEV Mittelklassewagen	kWh	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
konventioneller Verbrauch Diesel Mittelklassewagen	l/km	0,060	0,059	0,058	0,058	0,057	0,056	0,055	0,055	0,054	0,053
konventioneller Verbrauch Benzin Mittelklassewagen	l/km	0,076	0,075	0,074	0,072	0,071	0,070	0,069	0,067	0,066	0,065
rein konventioneller Verbrauch PHEV Mittelklassewagen	l/km	0,070	0,069	0,068	0,067	0,066	0,065	0,064	0,063	0,062	0,061
rein konventioneller Verbrauch REEV Mittelklassewagen	l/km	0,082	0,081	0,080	0,079	0,078	0,076	0,075	0,074	0,073	0,072
elektrischer Verbrauch BEV Mittelklassewagen	kWh/km	0,233	0,231	0,228	0,226	0,223	0,221	0,218	0,216	0,213	0,211
elektrischer Verbrauch PHEV Mittelklassewagen	kWh/km	0,220	0,218	0,216	0,213	0,211	0,208	0,206	0,203	0,201	0,198

Parameter	Einheit	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
elektrischer Verbrauch REEV Mittelklassewagen	kWh/km	0,233	0,231	0,228	0,226	0,223	0,221	0,218	0,216	0,213	0,211
Batteriekapazität BEV Kleinwagen	kWh	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Batteriekapazität PHEV Kleinwagen	kWh	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Batteriekapazität REEV Kleinwagen	kWh	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
konventioneller Verbrauch Diesel Kleinwagen	l/km	0,048	0,047	0,047	0,046	0,046	0,045	0,045	0,044	0,044	0,043
konventioneller Verbrauch Benziner Kleinwagen	l/km	0,061	0,060	0,059	0,059	0,058	0,057	0,056	0,056	0,055	0,054
rein konventioneller Verbrauch PHEV Kleinwagen	l/km	0,056	0,055	0,054	0,054	0,053	0,052	0,051	0,051	0,050	0,049
rein konventioneller Verbrauch REEV Kleinwagen	l/km	0,066	0,065	0,064	0,063	0,062	0,062	0,061	0,060	0,059	0,058
elektrischer Verbrauch BEV Kleinwagen	kWh/km	0,191	0,189	0,187	0,185	0,183	0,180	0,178	0,176	0,174	0,172
elektrischer Verbrauch PHEV Kleinwagen	kWh/km	0,178	0,176	0,174	0,172	0,170	0,168	0,166	0,164	0,162	0,159
elektrischer Verbrauch REEV Kleinwagen	kWh/km	0,191	0,189	0,187	0,185	0,183	0,180	0,178	0,176	0,174	0,172
Batteriekapazität BEV Nutzfahrzeug	kWh	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
Batteriekapazität PHEV Nutzfahrzeug	kWh	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
Batteriekapazität REEV Nutzfahrzeug	kWh	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
konventioneller Verbrauch Diesel Nutzfahrzeug	l/km	0,094	0,092	0,089	0,087	0,085	0,082	0,080	0,078	0,075	0,073
konventioneller Verbrauch Benziner Nutzfahrzeug	l/km	0,126	0,122	0,119	0,115	0,112	0,108	0,105	0,101	0,098	0,094
rein konventioneller Verbrauch PHEV Nutzfahrzeug	l/km	0,110	0,107	0,104	0,101	0,098	0,096	0,093	0,090	0,087	0,084
rein konventioneller Verbrauch REEV Nutzfahrzeug	l/km	0,128	0,125	0,122	0,118	0,115	0,112	0,109	0,105	0,102	0,099
elektrischer Verbrauch BEV Nutzfahrzeug	kWh/km	0,376	0,372	0,368	0,364	0,360	0,356	0,352	0,348	0,344	0,340
elektrischer Verbrauch PHEV Nutzfahrzeug	kWh/km	0,350	0,346	0,342	0,339	0,335	0,331	0,327	0,324	0,320	0,316
elektrischer Verbrauch REEV Nutzfahrzeug	kWh/km	0,376	0,372	0,369	0,365	0,361	0,358	0,354	0,350	0,347	0,343
Batteriepreis BEV	€/kWh	798	521	437	390	359	336	318	304	292	281
Batteriepreis PHEV	€/kWh	798	521	437	390	359	336	318	304	292	281
Batteriepreis REEV	€/kWh	798	521	437	390	359	336	318	304	292	281
Dieselpreis	€/l	1,19	1,21	1,22	1,24	1,25	1,27	1,28	1,3	1,31	1,33
Strompreis für Flottenfahrzeuge	€/kWh	0,164	0,166	0,168	0,169	0,171	0,173	0,175	0,177	0,179	0,181
Strompreis für Dienstwagen	€/kWh	0,164	0,166	0,168	0,169	0,171	0,173	0,175	0,177	0,179	0,181
Strompreis für Privatfahrzeuge	€/kWh	0,218	0,221	0,223	0,226	0,229	0,232	0,235	0,238	0,241	0,244

[illegible]

[illegible]

Parameter	Einheit	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Kraftfahrzeugsteuer REEV Kleinwagen	€/yr	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Wartung&Instandhaltung BEV Kleinwagen	€/km	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
Wartung&Instandhaltung Diesel Kleinwagen	€/km	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026
Wartung&Instandhaltung Benzinier Kleinwagen	€/km	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026
Wartung&Instandhaltung PHEV Kleinwagen	€/km	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024
Wartung&Instandhaltung REEV Kleinwagen	€/km	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
Nettolistenpreis ohne Batterie BEV Kleinwagen	€	11.280	11.280	11.280	11.280	11.280	11.280	11.280	11.280	11.280	11.280
Nettolistenpreis DIESEL Kleinwagen	€	12.592	12.678	12.764	12.850	12.936	13.021	13.107	13.193	13.279	13.365
Nettolistenpreis ICEV Kleinwagen	€	10.403	10.489	10.575	10.661	10.747	10.832	10.918	11.004	11.090	11.176
Nettolistenpreis ohne Batterie PHEV Kleinwagen	€	15.356	15.356	15.356	15.356	15.356	15.356	15.356	15.356	15.356	15.356
Nettolistenpreis ohne Batterie REEV Kleinwagen	€	14.223	14.223	14.223	14.223	14.223	14.223	14.223	14.223	14.223	14.223
Kraftfahrzeugsteuer BEV Nutzfahrzeug	€/yr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kraftfahrzeugsteuer Diesel Nutzfahrzeug	€/yr	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161
Kraftfahrzeugsteuer Benzinier Nutzfahrzeug	€/yr	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161
Kraftfahrzeugsteuer PHEV Nutzfahrzeug	€/yr	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161
Kraftfahrzeugsteuer REEV Nutzfahrzeug	€/yr	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161
Wartung&Instandhaltung BEV Nutzfahrzeug	€/km	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
Wartung&Instandhaltung Diesel Nutzfahrzeug	€/km	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059
Wartung&Instandhaltung Benzinier Nutzfahrzeug	€/km	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059
Wartung&Instandhaltung PHEV Nutzfahrzeug	€/km	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055
Wartung&Instandhaltung REEV Nutzfahrzeug	€/km	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041
Nettolistenpreis ohne Batterie BEV Nutzfahrzeug	€	38.677	38.677	38.677	38.677	38.677	38.677	38.677	38.677	38.677	38.677
Nettolistenpreis DIESEL Nutzfahrzeug	€	40.000	40.222	40.444	40.667	40.889	41.111	41.333	41.556	41.778	42.000
Nettolistenpreis ICEV Nutzfahrzeug	€	37.800	38.022	38.244	38.467	38.689	38.911	39.133	39.356	39.578	39.800
Nettolistenpreis ohne Batterie PHEV Nutzfahrzeug	€	43.371	43.371	43.371	43.371	43.371	43.371	43.371	43.371	43.371	43.371
Nettolistenpreis ohne Batterie REEV Nutzfahrzeug	€	41.631	41.631	41.631	41.631	41.631	41.631	41.631	41.631	41.631	41.631
Grenzsteuersatz für Unternehmen	-	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Grad der Berücksichtigung der Mehrpreisbereitschaft	-	1,000	0,956	0,911	0,867	0,822	0,778	0,733	0,689	0,644	0,600

[illegible]

7.2 Szenarien und Kosten zur Ladeinfrastruktur

Im Rahmen des Parameterworkshops am 26.02.2013 wurden mehrere Szenarien zur Ladeinfrastruktur festgelegt, welche für die einzelnen Nutzergruppen relevant sind. Für die gemeinsame Simulation wurden diese auf die Szenarien in Abschnitt 4.5 reduziert. Ebenso wurden in Kooperation mit der AG3 zahlreiche Infrastrukturkosten zusammengetragen, die aufgrund des bereits hohen Einflusses der Kosten der günstigsten Lademöglichkeit in IP1IG1 nicht weiter betrachtet wurden. Im Folgenden werden die Eingangsszenarien und die detaillierten Kostenanalysen für Ladeinfrastruktur kurz dargestellt.

Für Privatanutzer stehen Fahrprofilinformationen zu den privaten, halböffentlichen und öffentlichen Standorten über die Fahrtenbuchführung zur Verfügung, die Szenarien werden deshalb wie in Tabelle 7-2 gebildet. In Szenario IP1 bis IP3 wird die Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur bei geringen Ladeleistungen erhöht. Zudem wird das Szenario IP4 mit einer geringen öffentlichen Anschlussleistung geprüft. Die Erhöhung der Leistung erfolgt in den Szenarien IP5 bis IP7, in denen auch die Gleichspannung berücksichtigt wird.

Tabelle 7-2: Ladeinfrastrukturszenarien für Privatanutzer

Szenario	Privat (P)	Halböffentlich (H)	Öffentlich (Ö)
IP1	3,7 kW (AC)	-	-
IP2	3,7 kW (AC)	11,1 kW (AC)	-
IP3	3,7 kW (AC)	11,1 kW (AC)	22 kW (AC)
IP4	3,7 kW (AC)	-	3,7 kW (AC)-
IP5	11,1 kW (AC)	-	-
IP6	11,1 kW (AC)	22,2 kW (AC)	-
IP7	11,1 kW (AC)	22,2 kW (DC)	50 kW (DC)

Im gewerblichen Bereich fehlen die Informationen über die Wegzwecke, da diese Fahrprofile mittels GPS-Trackern erhoben wurden. Deshalb wird in Szenario IG1 (Tabelle 7-3) angenommen, dass jedes Fahrzeug über Nacht laden kann, in Szenario IG2, dass der erste Standort als Unternehmensstandort angenommen werden und im Umkreis von 100 Metern geladen werden kann.²³⁶ In Szenario IG3 kann überall geladen werden, womit die Verfügbarkeit erhöht wird. Auch hier sind die Szenarien IG1

²³⁶ In der Fahrprofilenerhebung stehen Geoinformationen zur Verfügung, die im öffentlichen Datensatz jedoch aus Datenschutzgründen nicht freigegeben werden können.

bis IG3 mit geringen, die Szenarien IG4 bis IG6 mit hohen Ladeleistungen und Gleichstromladung ausgestattet.

Tabelle 7-3: Ladeinfrastrukturszenarien für gewerbliche Nutzer

Szenario	Modus	Gewerblich (G)	Öffentlich (Ö)
IG1	Nachtladen	3,7 kW (AC)	-
IG2	Unternehmensstandort	3,7 kW (AC)	-
IG3	Immer/Überall	3,7 kW (AC)	22 kW (AC)
IG4	Nachtladen	11,1 kW (AC)	-
IG5	Unternehmensstandort	22,2 kW (AC)	-
IG6	Immer/Überall	22,2 kW (AC)	50 kW (DC)

Für diese Szenarien werden einmalige und laufende Kosten ermittelt, welche in Tabelle 7-4 und Tabelle 7-5 detailliert dargestellt sind.²³⁷ Hierbei stellen die Optionen P1/G1, P3/G3, H2, Ö1 und Ö3 die Ladeoptionen ohne einen sogenannten „smart meter“ dar, der die gesteuerte Ladung des Fahrzeugs an der Ladesäule ermöglicht. Sämtliche anderen Ladeinfrastrukturoptionen haben eine Kommunikationsmöglichkeit zur potenziellen Lastverlagerung. Die Optionen P1 bis P4, bzw. G1 bis G4 sind hierbei Lademöglichkeiten für private und gewerbliche Ladeinfrastruktur. Während die Optionen H1 und H2 an halböffentlichen Standorten zum Einsatz kommen, sind die Optionen Ö1, Ö2 und Ö3 im öffentlichen Bereich. Alle halböffentlichen und öffentlichen Ladesäulen verfügen über zwei Ladepunkte, außer die Option Ö1. Je nach Anschlussleistung, Spannungstyp und Standort fallen hierfür unterschiedliche Investitionen und laufende Kosten an, welche der Tabelle zu entnehmen sind. Hierbei wird generell von einer Kostendegression für die Komponenten Hardware Ladestation, Hardware Kommunikation und Abrechnungs- und Steuerungslogik von 5 % p.a. ausgegangen, bei den DC-Ladesäulen von einer Kostendegression von 9,5 % respektive 50 % in sieben Jahren, da hier bislang nur sehr geringe Stückzahlen produziert werden. Die laufenden Kosten für Wartung, Kommunikation, Messung/Abrechnung sowie das IT-System werden mit einer Senkung von 3 % pro Jahr angenommen.

²³⁷ Diese Daten entstammen den Unternehmensangaben von E.ON SE, RWE AG, Vattenfall, Smartlab GmbH, Hubject, sowie einer ausführlichen Recherche basierend auf Malorny und Krieger (2010); Mayor's Office of Long-Term Planning and Sustainability (2010); Morrow, Karner, und Francfort (2008); NPE (2011); Slater u. a. (2009), zusammengefasst in Kley (2011) und ergänzt um TU Dortmund (2011); Vidal u. a. (2011); Vidal, Scuro, und Brambilla (2011).

Tabelle 7-4: Kosten für Ladeinfrastruktur im Jahr 2013

Ladeinfrastrukturoption	P1	P2	P3	P4	G1	G2	G3	G4	H1	H2	Ö1	Ö2	Ö3
Ladeinfrastrukturtyp	Wallbox	Wallbox	Wallbox	Wallbox	Wallbox	Wallbox	Wallbox	Wallbox	Ladesäule	Ladesäule	Ladesäule	Ladesäule	Ladesäule
Spannungstyp	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	DC	AC	AC	DC
Smart Meter zur Lastverlagerung	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	ja	nein	nein	ja	nein
Ladepunkte	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	3
Anschlussleistung [kW]	3,7	3,7	11,1/22,2	11,1/22,2	3,7	3,7	11,1/22,2	11,1/22,2	11,1/22,2	20	3,7	11/22,2	50
Standort	privat				gewerbl.				halböfftl.		öfftl.		
Hardware Ladestation komplett *)	200	1.000	600	2.000	200	1.000	600	2.000	7.000	15.000	800	7.000	30.000
Hardware Kommunikation *)	./.	100			./.	100					100		
Abrechnungs- und Steuerungslogik *)	./.	./.			./.	500		500			500		
Montage/Baukosten/ggf. Anschlusskosten	300	300	500	500	300	1.200	500	2.000	4.500	5.000	300	4.500	10.000
Gesamte Investition	500	1.400	1.100	2.500	500	2.800	1.100	4.500	11.500	20.000	1.700	11.500	40.000
Genehmigung Sondernutzung	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	150	./.
Wartungskosten **)	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	500	2.000	350	500	2.000
Kommunikationskosten **)	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	200	200	./.	200	200
Messung/Abrechnung **)	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	375	375	375	375	375
IT-System **)	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	500	500	./.	500	500
Laufende Kosten [€/a]	0	0	0	0	0	0	0	0	1.575	3.075	725	1.725	3.075

*) Für diese Investitionen wird von einer Kostendegression von 5 % p.a. ausgegangen.

**) Für diese laufenden Kosten wird von einer Kostendegression von 3 % p.a. ausgegangen.

***) Für diese Investitionen wird von einer Kostendegression von 9,5 % p.a. ausgegangen.

Tabelle 7-5: Kosten für Ladeinfrastruktur im Jahr 2020

Ladeinfrastrukturoption	P1	P2	P3	P4	G1	G2	G3	G4	H1	H2	Ö1	Ö2	Ö3
Ladeinfrastrukturtyp	Wallbox	Wallbox	Wallbox	Wallbox	Wallbox	Wallbox	Wallbox	Wallbox	Ladesäule	Ladesäule	Ladesäule	Ladesäule	Ladesäule
Spannungstyp	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	DC	AC	AC	DC
Smart Meter zur Lastverlagerung	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	ja	nein	nein	ja	nein
Ladepunkte	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	3
Anschlussleistung [kW]	3,7	3,7	11,1/22,2	11,1/22,2	3,7	3,7	11,1/22,2	11,1/22,2	11,1/22,2	20	3,7	11/22,2	50
Standort	privat				gewerbl.				halböfftl.		öfftl.		
Hardware Ladestation komplett *)	140	698			140	698		1.397			559		
Hardware Kommunikation *)	./.	70	419	1.397	./.	70	419		4.888	7.458***	70	4.888	14.916***
Abrechnungs- und Steuerungslogik *)	./.	./.			./.	349		349			349		
Montage/Baukosten/ggf. Anschlusskosten	300	300	500	500	300	1.200	500	2.000	4.500	5.000	300	4.500	10.000
Gesamte Investition	440	1.068	919	1.897	440	2.317	919	3.746	9.388	12.458	1.278	9.388	24.916
Genehmigung Sondernutzung	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	150	./.
Wartungskosten **)	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	404	1.616	283	404	1.616
Kommunikationskosten **)	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	162	162	./.	162	162
Messung/Abrechnung **)	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	303	303	303	303	303
IT-System **)	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	./.	404	404	./.	404	404
Laufende Kosten [€/a]	0	0	0	0	0	0	0	0	1.273	2.485	586	1.423	2.485

*) Für diese Investitionen wird von einer Kostendegression von 5 % p.a. ausgegangen.

**) Für diese laufenden Kosten wird von einer Kostendegression von 3 % p.a. ausgegangen.

***) Für diese Investitionen wird von einer Kostendegression von 9,5 % p.a. ausgegangen.

7.3 Weitere TCO- und Markthochlauf-Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden kurz weitere Ergebnisse in den Pro-EV- und Contra-EV-Szenarien sowie dem mittleren Szenario dargestellt.

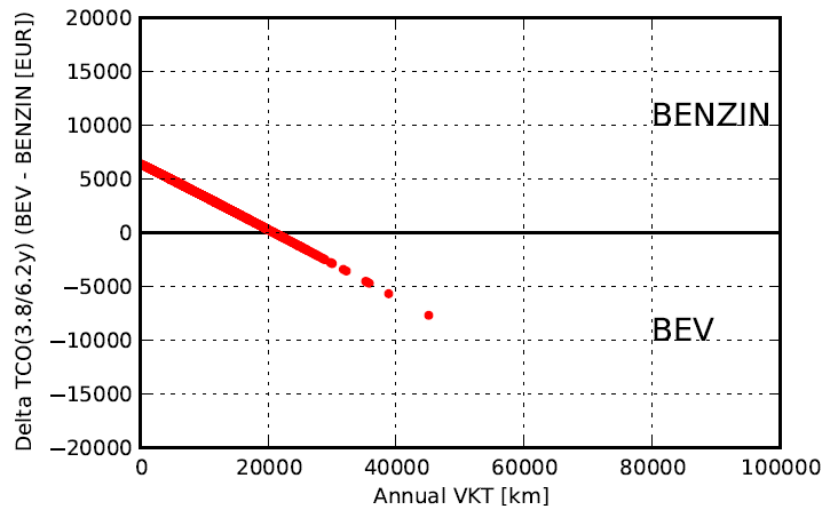


Abbildung 7-1: TCO-Differenzen zwischen Benzin & BEV (private Mittelklasse 2020)

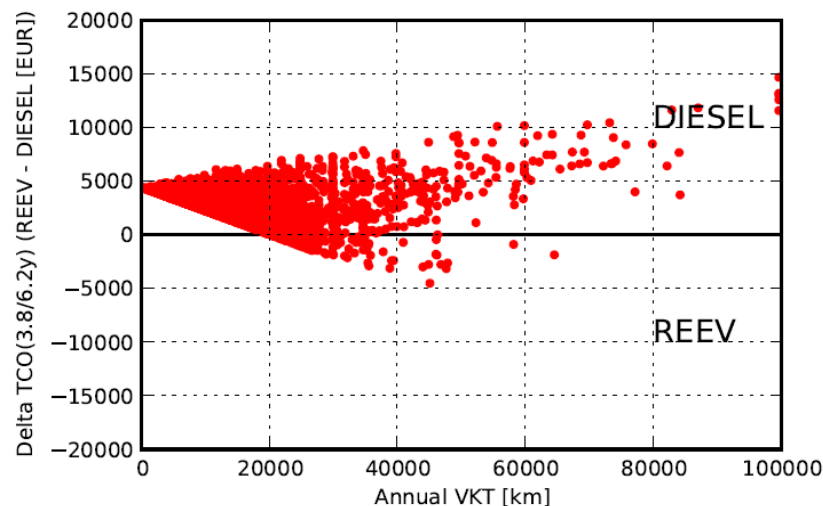


Abbildung 7-2: TCO-Differenzen zwischen Diesel & REEV (private Mittelklasse 2020)

Anschließend folgen die Bestände in den Szenarien als reine TCO-Rechnung (Opt000), sowie mit Infrastrukturkosten, beschränkter Verfügbarkeit und Mehrpreisbereitschaft (Opt111) in den drei Szenarien untergliedert nach EV-Typ, Nutzergruppe und Fahrzeuggröße, sowie jeweils die TCO-Deltas für private Mittelklassewagen.

Pro-EV-Szenario

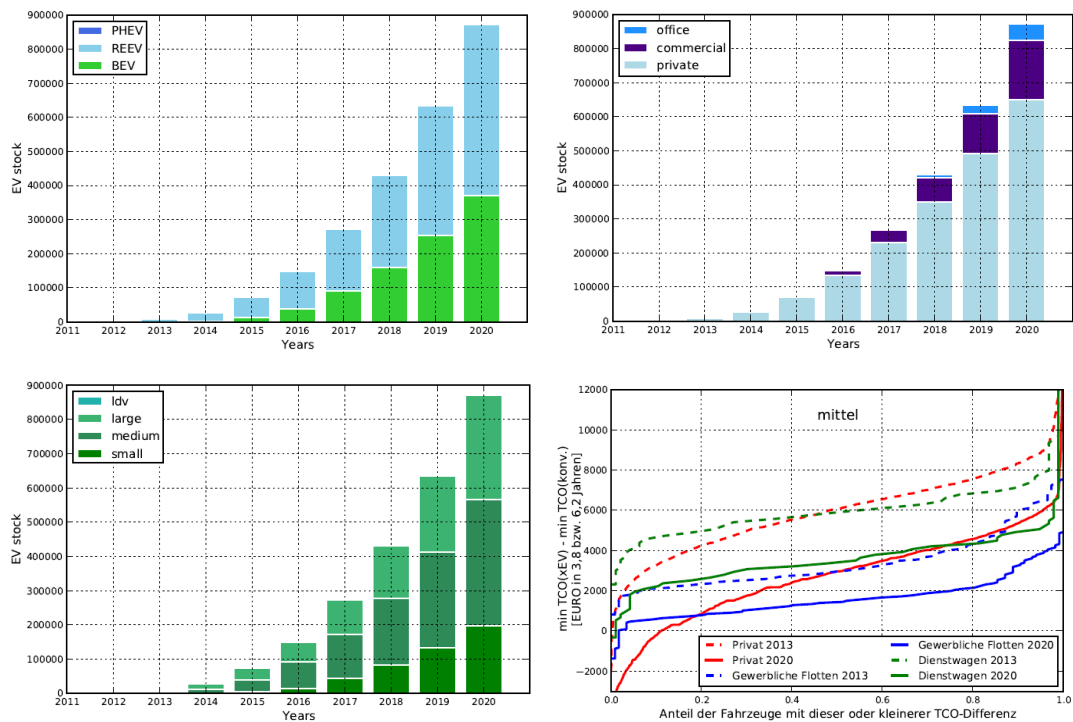


Abbildung 7-3: Markthochlauf & TCO Pro-EV-Szenario (Opt000)

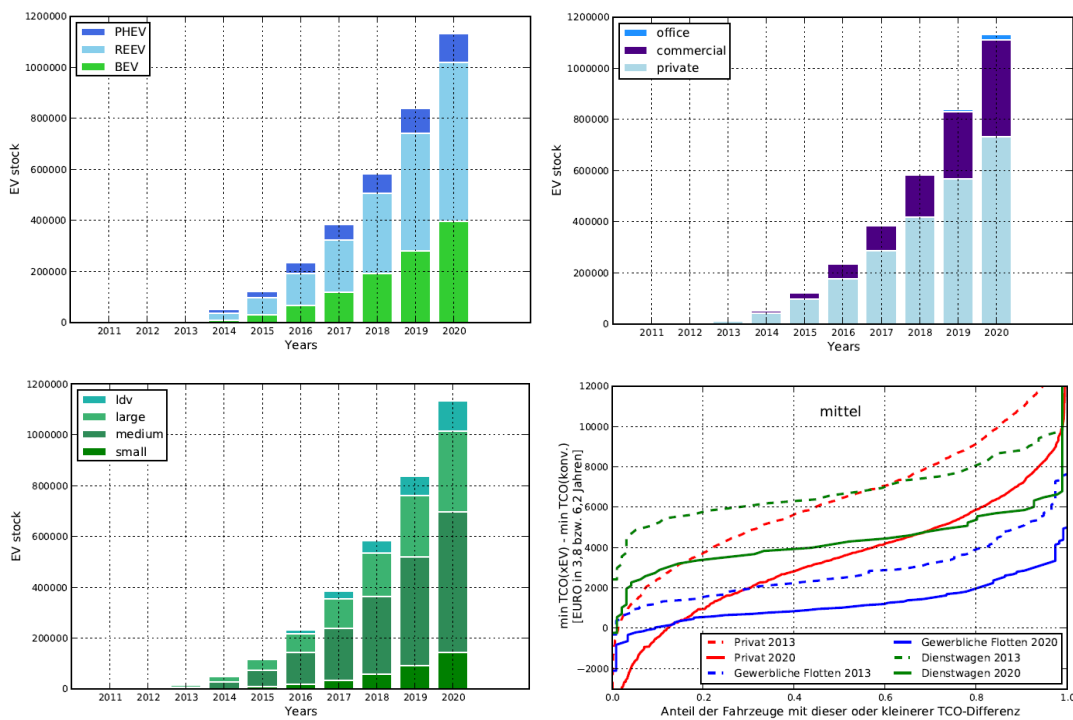


Abbildung 7-4: Markthochlauf & TCO Pro-EV-Szenario (Opt111)

Mittleres Szenario

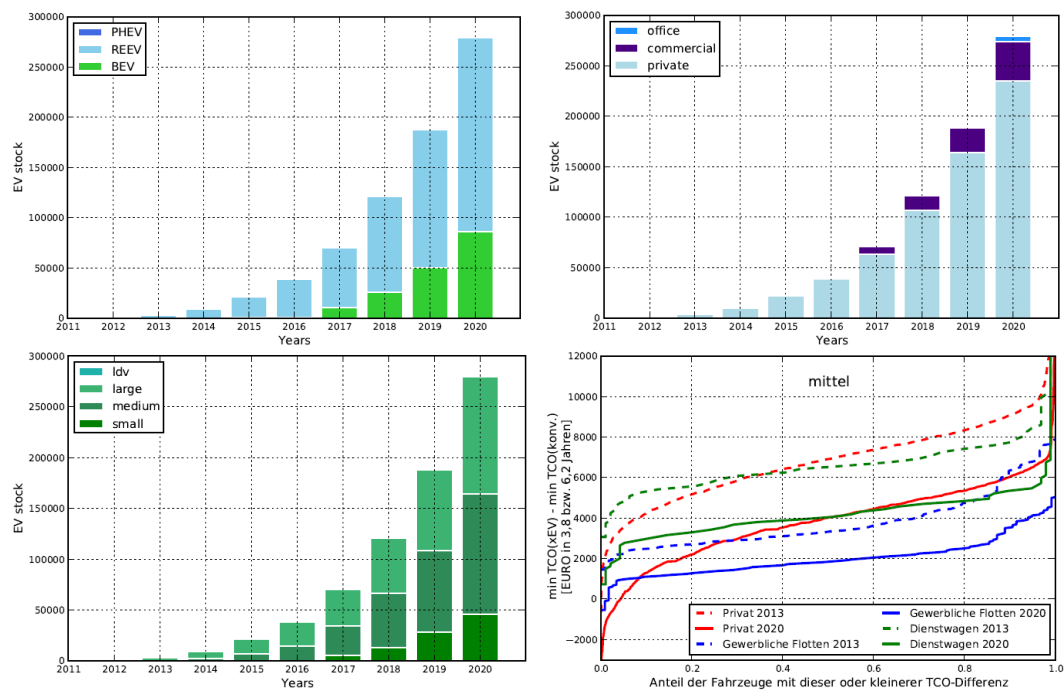


Abbildung 7-5: Markthochlauf & TCO mittleres Szenario (Opt000)

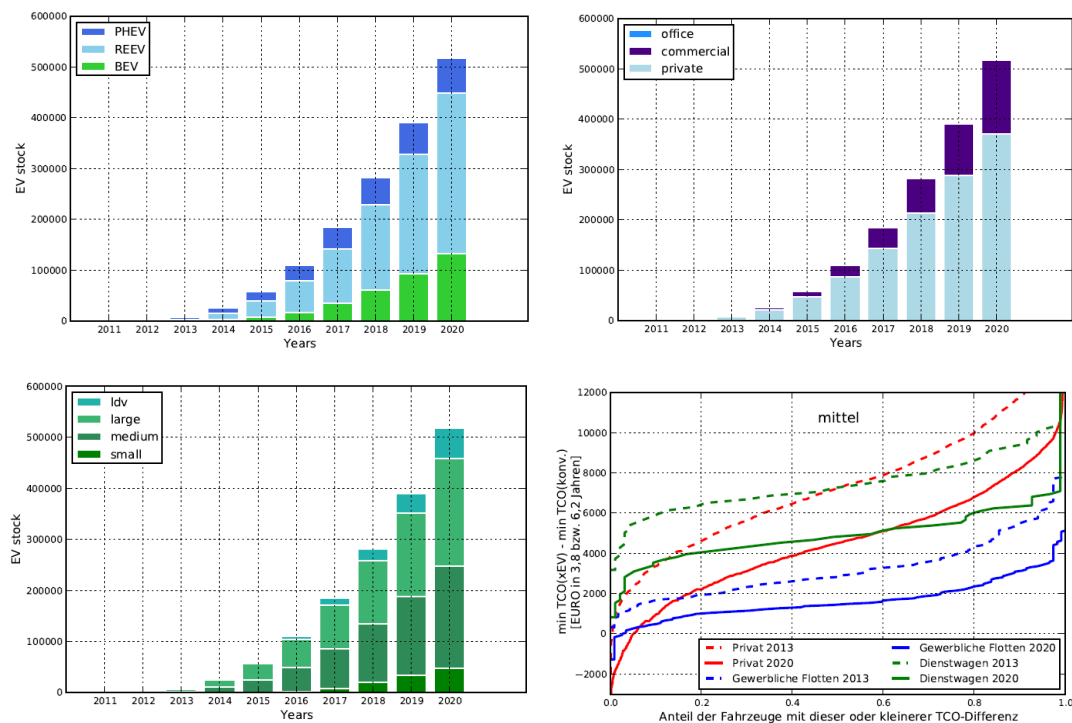


Abbildung 7-6: Markthochlauf & TCO mittleres Szenario (Opt111)

Contra-EV-Szenario

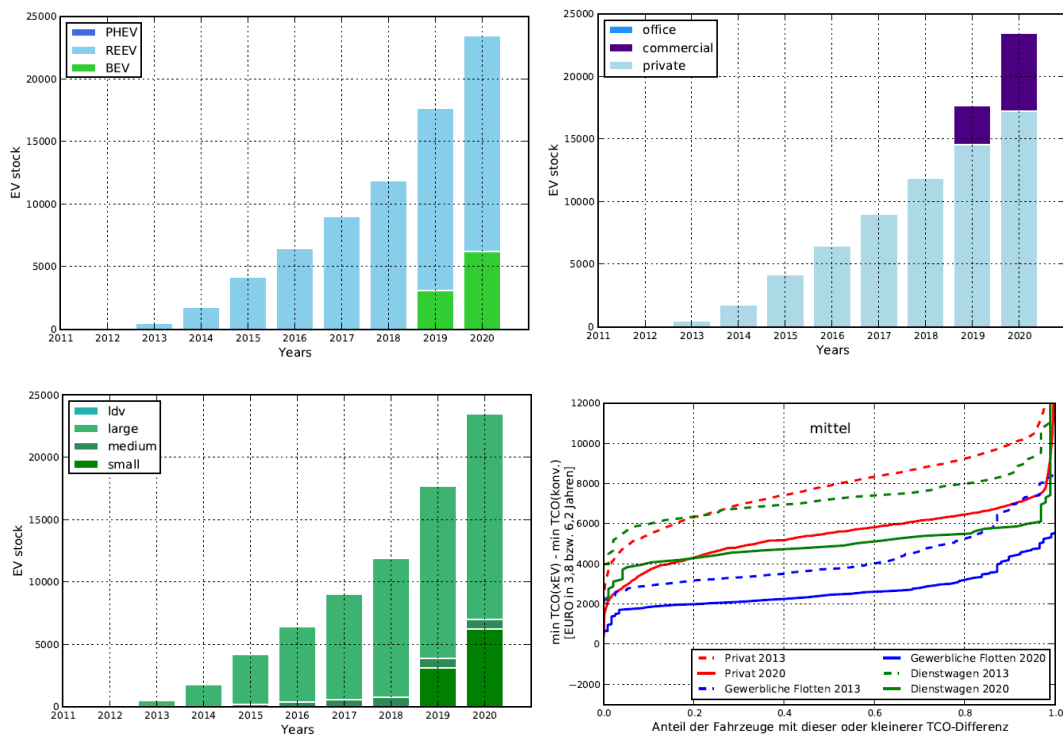


Abbildung 7-7: Markthochlauf & TCO Contra-EV-Szenario (Opt000)

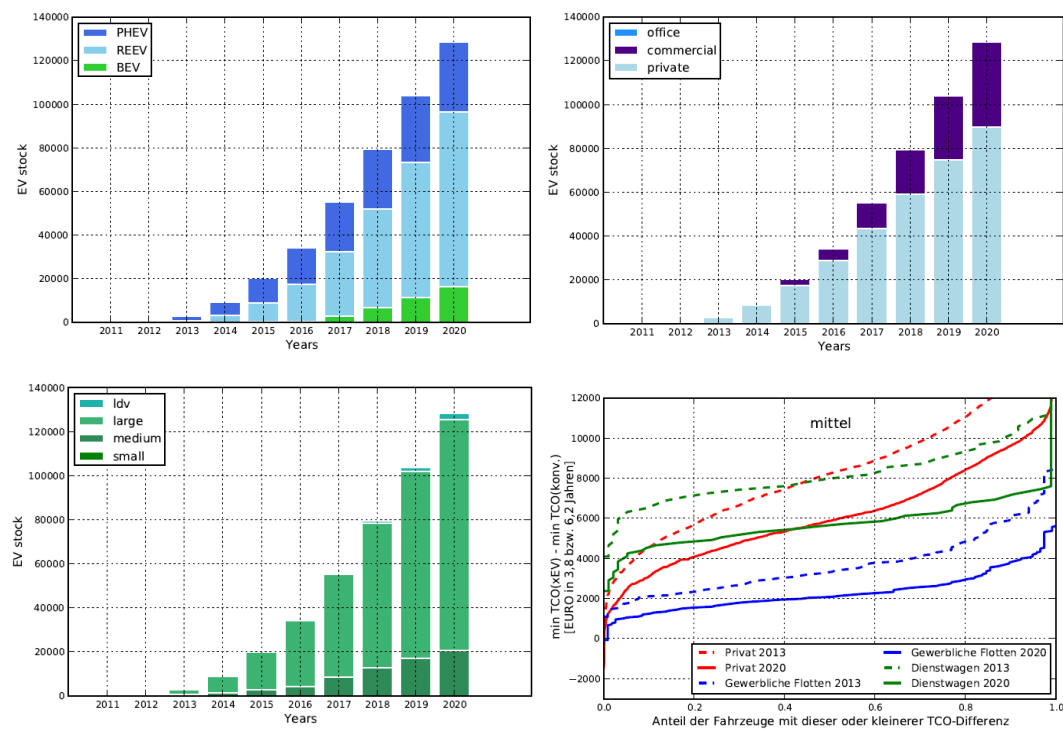


Abbildung 7-8: Markthochlauf & TCO Contra-EV-Szenario (Opt111)

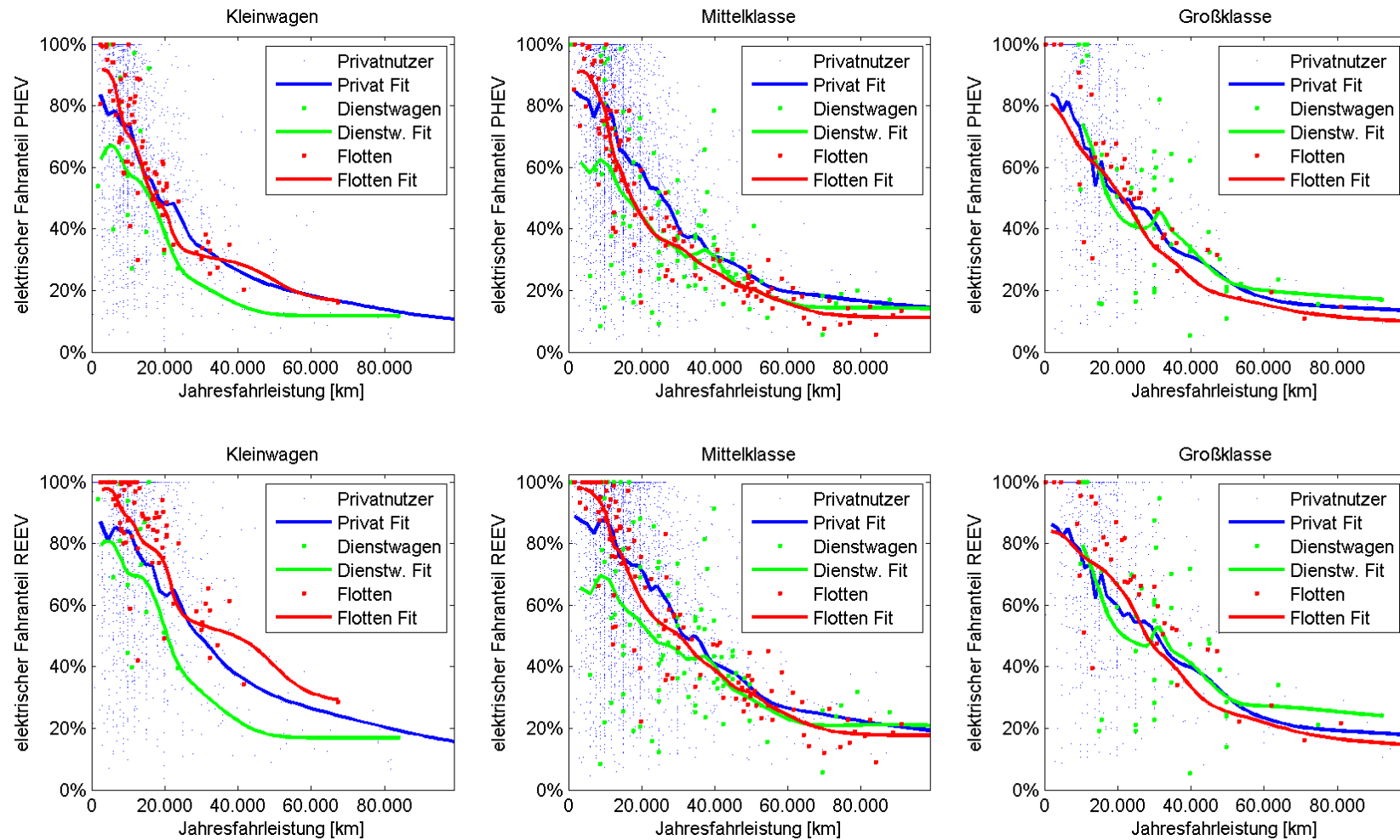


Abbildung 7-9: Simulierte elektrische Fahranteile und nichtparametrische Regression über $\sqrt{N}$ nächste Nachbarn

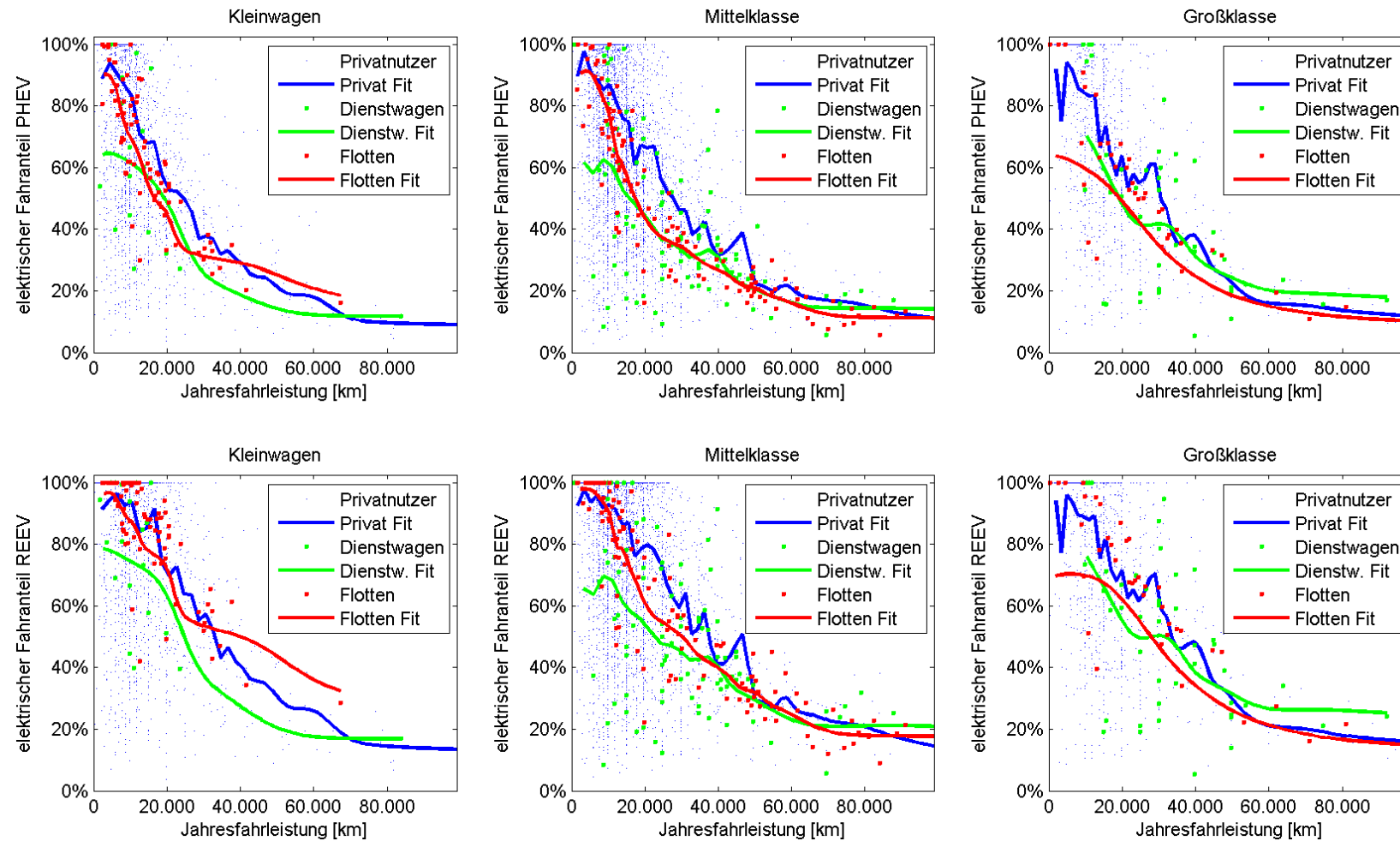


Abbildung 7-10: Simulierte elektrische Fahranteile und nichtparametrische Regression über die zehn nächsten Nachbarn

7.4 Eingangsdaten zur Markenverfügbarkeit

Die nachstehende Tabelle zeigt die Neuzulassungen 2012 laut KBA nach Marken und Fahrzeuggröße (gemäß Hubraum).

Tabelle 7-6: Fahrzeugmarken bei Neuzulassungen 2012 nach Fahrzeuggröße

Kleinwagen (<1400ccm)			Mittelklasse (1400 – 2000ccm)			Gross (>2000ccm)		
Marke	Absolut	Anteil	Marke	Absolut	Anteil	Marke	Absolut	Anteil
1 VW	287387	27,2 %	1 VW	385168	23,4 %	1 Mercedes	166734	35,4 %
2 Opel	149062	14,1 %	2 BMW	175503	10,7 %	2 BMW	81206	17,3 %
3 Skoda	75047	7,1 %	3 Ford	150330	9,1 %	3 Audi	68085	14,5 %
4 Ford	61011	5,8 %	4 Audi	140975	8,6 %	4 Ford	19578	4,2 %
5 Fiat	59770	5,7 %	5 Mercedes	118720	7,2 %	5 Porsche	18688	4,0 %
6 Renault	55161	5,2 %	6 Opel	101362	6,2 %	6 Fiat	15181	3,2 %
7 Hyundai	54932	5,2 %	7 Sonstiges	77811	4,7 %	7 VW	14147	3,0 %
8 Toyota	42104	4,0 %	8 Skoda	67168	4,1 %	8 Volvo	13722	2,9 %
9 Audi	41581	3,9 %	9 Renault	63351	3,9 %	9 Toyota	9546	2,0 %
10 Seat	36708	3,5 %	10 Peugeot	55367	3,4 %	10 Mazda	8339	1,8 %
11 Smart	29138	2,8 %	11 Nissan	49839	3,0 %	11 Sonstiges	7072	1,5 %
12 Peugeot	25073	2,4 %	12 Citroen	45593	2,8 %	12 Landrover	6549	1,4 %
13 Suzuki	21245	2,0 %	13 Toyota	28210	1,7 %	13 Mitsubishi	5470	1,2 %
14 Citroen	18603	1,8 %	14 Mazda	26086	1,6 %	14 Chrysler	5148	1,1 %
15 Nissan	17906	1,7 %	15 Hyundai	25315	1,5 %	15 Honda	4212	0,9 %
16 Chevrolet	17336	1,6 %	16 Kia	25221	1,5 %	16 Hyundai	4168	0,9 %
17 Honda	16607	1,6 %	17 Seat	22500	1,4 %	17 Opel	4036	0,9 %
18 Kia	15971	1,5 %	18 Volvo	20157	1,2 %	18 Kia	3313	0,7 %
19 Mitsubishi	9296	0,9 %	19 Mitsubishi	14572	0,9 %	19 Chevrolet	3106	0,7 %
20 Mazda	6905	0,7 %	20 Suzuki	11511	0,7 %	20 Nissan	3053	0,6 %
21 AlfaRomeo	6521	0,6 %	21 Chevrolet	9797	0,6 %	21 Citroen	2134	0,5 %
22 Sonstiges	4427	0,4 %	22 Honda	8663	0,5 %	22 Peugeot	2095	0,4 %
23 Daihatsu	3742	0,4 %	23 Fiat	4976	0,3 %	23 Suzuki	1634	0,3 %
24 Lancia	922	0,1 %	24 Subaru	4639	0,3 %	24 Lexus	1187	0,3 %
25 Subaru	821	0,1 %	25 AlfaRomeo	3958	0,2 %	25 Renault	1132	0,2 %
26 Lada	124	0,0 %	26 Lada	1907	0,1 %	26 Subaru	467	0,1 %
27 BMW	0	0,0 %	27 Lexus	1552	0,1 %	27 Skoda	395	0,1 %
28 Chrysler	0	0,0 %	28 Chrysler	1343	0,1 %	28 AlfaRomeo	54	0,0 %
29 Daewoo	0	0,0 %	29 Daihatsu	1031	0,1 %	29 Saab	27	0,0 %
30 Isuzu	0	0,0 %	30 Saab	469	0,0 %	30 Daewoo	0	0,0 %
31 k. A.	0	0,0 %	31 Lancia	193	0,0 %	31 Daihatsu	0	0,0 %
32 Landrover	0	0,0 %	32 Landrover	121	0,0 %	32 Isuzu	0	0,0 %

33 Lexus	0	0,0 %	33 Daewoo	0	0,0 %	33 keine Angabe	0	0,0 %
34 Mercedes	0	0,0 %	34 Isuzu	0	0,0 %	34 Lada	0	0,0 %
35 Porsche	0	0,0 %	35 k.A.	0	0,0 %	35 Lancia	0	0,0 %
36 Rover	0	0,0 %	36 Porsche	0	0,0 %	36 Rover	0	0,0 %
37 Saab	0	0,0 %	37 Rover	0	0,0 %	37 Seat	0	0,0 %
38 Trabant	0	0,0 %	38 Smart	0	0,0 %	38 Smart	0	0,0 %
39 Volvo	0	0,0 %	39 Trabant	0	0,0 %	39 Trabant	0	0,0 %
Anzahl >0:	26		Anzahl >0:	32		Anzahl >0:	29	

Dabei sind 26 Marken im Bereich Kleinwagen, 32 im Bereich Mittelklasse und 29 im Bereich Gross aufgetreten.

Die folgende Tabelle zeigt die gesammelten Daten zu den angekündigten Elektrofahrzeugen nach Marken.

Tabelle 7-7: Übersicht der angekündigten Elektrofahrzeuge nach Marken

	2006	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Gesamt
Audi							1	2	1	2	1	7
Kleinwagen							1					1
REEV							1					1
Kompaktklasse								1		1		2
BEV										1		1
PHEV								1				1
Mittelklasse									1			1
PHEV									1			1
Obere Mittelklasse										1	1	2
PHEV										1	1	2
SUV								1				1
PHEV								1				1
BMW							2		1			3
Kleinwagen									1			1
BEV									1			1
Kompaktklasse							1					1
BEV							1					1
Sportwagen							1					1
PHEV							1					1
Citroen				1								1
Kleinwagen				1								1
BEV				1								1
Daimler				1		1	2	1				5
Kleinwagen						1						1
BEV						1						1
Kompaktklasse								1				1
BEV				1								1
REEV								1				1
Oberklasse							1					1
PHEV							1					1
Sportwagen							1					1
BEV							1					1
Van				1								1

	2006	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Gesamt
BEV				1								1
Fiat							1					1
Kleinwagen							1					1
BEV							1					1
Ford							1					1
Kompaktklasse							1					1
BEV							1					1
Mittelklasse							1					1
PHEV							1					1
GM				1								1
Mittelklasse				1								1
REEV				1								1
Honda							1					1
Mittelklasse							1					1
PHEV							1					1
Hyundai							1					1
Kleinwagen							1					1
BEV							1					1
Kia						1						1
Kompaktklasse						1						1
BEV						1						1
Mitsubishi			1									1
Kleinwagen			1									1
BEV			1									1
Nissan			1									1
Kompaktklasse			1									1
BEV			1									1
Opel					1							1
Kompaktklasse					1							1
REEV					1							1
Peugeot						1	1					2
Kompaktklasse						1						1
BEV						1						1
Utility							1					1
BEV							1					1
Porsche								1				1
Sportwagen								1				1
PHEV								1				1
Renault					3		1					4
Kleinwagen							1					1
BEV							1					1
Kompaktklasse					1							1
BEV					1							1
Leichtfahrzeug					1							1
BEV					1							1
Utility					1							1
BEV					1							1
SEAT								1		1		2
Kompaktklasse								1		1		2
BEV										1		1
PHEV								1				1
Skoda								2				2
Kleinwagen								1				1
BEV								1				1
Mittelklasse								1				1

	2006	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Gesamt
BEV								1				1
Toyota			1			2						3
Kleinwagen						1						1
BEV						1						1
Kompaktklasse			1									1
PHEV			1									1
Mittelklasse						1						1
BEV						1						1
Volvo					1		1					2
Kompaktklasse					1							1
BEV					1							1
Mittelklasse							1					1
PHEV							1					1
VW							3	2				9
Kleinwagen							1					1
BEV							1					1
Kompaktklasse							1	1				2
BEV							1					1
PHEV								1				1
Mittelklasse								1				1
BEV								1				1
SUV												1
PHEV												1
Utility							1					1
BEV							1					1
Van												3
BEV												3
Gesamtergebnis	1	1	1	6	6	8	16	11	3	3	1	62

7.5 Genauigkeit der elektrischen Fahranteile

Einleitung

Für die ökonomische Bewertung von Elektrofahrzeugen ist die genaue Kenntnis über den Einsatz dieser Fahrzeuge von großer Bedeutung. Für die Berechnung der Gesamtnutzungskosten (TCO) bilden Fahrprofile deshalb eine wichtige Grundlage. Anhand der Fahrprofile werden Batterieladestände simuliert und der mögliche elektrische Fahranteil simuliert. Fahrprofile bestehen dabei aus einer Reihe aufeinanderfolgender Fahrten mit Start- und Endzeitpunkt sowie der zurückgelegten Entfernung. Des Weiteren sind Metainformationen, wie z. B. die Größe, über das Fahrzeug bekannt.

Aufgrund bisheriger Erfahrungen bei der Auswertung von Fahrprofilen ist bei einer kurzen Aufzeichnungsdauer mit einer sowohl technischen als auch einer ökonomischen Überschätzung der Potenziale von Elektrofahrzeugen zu rechnen²³⁸. Bei der Auswertung der Fahrten nur eines Tages kann es zu deutlichen Verschiebungen der technischen Ersetzbarkeit von herkömmlichen durch elektrisch betriebene Fahrzeuge kommen, da der Proband am Beobachtungstag wenig oder gar nicht gefahren ist. Mit steigender Dauer der Aufzeichnung sinkt hingegen die Wahrscheinlichkeit, das Fahrverhalten falsch einzuschätzen.

Ziel dieser Studie ist es zu bewerten, inwieweit sich die zeitliche Länge eines Fahrprofils auf den Fehler des geschätzten elektrischen Fahranteils eines Fahrzeugs auswirkt. Dazu werden zwei verschiedene Fahrprofilerhebungen untersucht. Für den Wirtschaftsverkehr (Flottenutzer) werden die REM2030-Fahrprofile verwendet und für Privatanutzer wird das Mobilitätspanel ausgewertet.

Zu Beginn werden für diese Arbeit relevante Begriffe eingeführt und voneinander abgegrenzt. Anschließend wird auf die Erhebungsmethodik der beiden Fahrprofildatenbanken eingegangen, deren Datenbestand charakterisiert und Unterschiede hervorgehoben. Im folgenden Abschnitt wird die Auswertungsmethodik erläutert. Dazu wird zunächst der elektrische Fahranteil eines Fahrzeugs über den Aufzeichnungszeitraum bestimmt. Dem folgt die Ermittlung des Konfidenzintervalls des kumulierten elektrischen Fahranteils, auf dessen Basis die weiteren Auswertungen stattfinden. Zusätzlich zur Methodik werden die verwendeten Fahrzeugparameter „Batteriekapazität“, „elektrischer Verbrauch“ sowie „Entladetiefe“ eingeführt. Schließlich werden die Ergebnisse dargestellt und bewertet. Dabei wird neben den beiden Fahrprofilerhebungen noch zwischen PHEV- und REEV-Fahrzeugen als Substitutionstechnologie für die konventi-

²³⁸ Vgl. Gnann, Plötz und Kley (2012) sowie Gnann et al. (2012).

onellen Antriebe unterschieden. Abschließend werden die wesentlichen Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst und in Bezug auf ihre Aussagekraft bewertet.

Definitionen

Ein *Fahrprofil* setzt sich aus den aufgezeichneten Fahrten eines Fahrzeugs zusammen und beinhaltet zusätzlich noch Metadaten, wie, z. B. die Fahrzeuggröße. In der Regel existiert dabei ein Anfangstag, an dem die Aufzeichnung oder die Berichterstattung begonnen hat, und einem Endtag, an dem die Aufzeichnung beendet wurde. Der dadurch vom Fahrprofil umfasste Aufzeichnungszeitraum kann auch Tage enthalten, an denen keine Fahrten stattfanden.

Berichtstage sind Tage eines Fahrprofils unabhängig davon, ob das Fahrzeug bewegt wurde, d. h. Fahrten existieren, oder nicht. Die *Fahrtage* eines Fahrprofils sind hingegen diejenigen Tage, an denen das Fahrzeug bewegt wurde. Stillstandstage werden hierbei nicht berücksichtigt.

Um die technische Ersetzbarkeit von konventionellen Fahrzeugen durch elektrisch angetriebene Fahrzeuge zu bewerten wird zunächst die maximale elektrische Reichweite nach Fahrzeuggröße und Antriebsart (REEV, PHEV) bestimmt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeuge zu jedem Tagwechsel vollständig aufgeladen werden. Des Weiteren wird, bevor der Verbrennungsmotor als Antrieb genutzt wird, die gesamte elektrische Reichweite ausgeschöpft. Diese bestimmt sich wie folgt:

$$s_{max} = \frac{c_{Batterie} \cdot \eta_{DoD}}{f}$$

s_{max}	Elektrische Reichweite
$c_{Batterie}$	Batteriekapazität [kWh]
η_{DoD}	Maximale Entladetiefe [%] (Depth of Discharge)
f	Spezifischer Energieverbrauch [kWh/100km]

Im Anschluss werden die Fahrprofile der Nutzer betrachtet. Dabei wird zunächst die tägliche Fahrleistung als Summe aller Einzelfahrten an einem Tag ermittelt. Der elektrische Fahranteil ϕ_{ij} für den Nutzer j am Tag i ergibt sich wie folgt:

$$\phi_{ji} = \min \left(\frac{s_{j,max}}{s_{ji,tot}}, 1 \right)$$

i	Beobachtungstag
j	Nutzer
$s_{ji,tot}$	Fahrleistung von Nutzer j an Tag i
$s_{j,max}$	Maximale elektrische Reichweite von Nutzer j
ϕ_{ji}	Elektrischer Fahranteil von Nutzer j an Tag i

An dieser Stelle ist anzumerken, dass der elektrische Fahranteil nur für die Berichtstage bestimmt werden kann, an denen das Fahrzeug bewegt wurde. Aufgrund dessen ist eine Auswertung des elektrischen Fahranteils auf Basis der Berichtstage aus mathematischer Sicht wenig aussagekräftig. Stattdessen werden Fahrtage berücksichtigt. Auf diesen Punkt wird auch zum Schluss nochmal eingegangen.

Als Maß für das ökonomische Potenzial der Elektrofahrzeuge wird der durchschnittliche elektrische Fahranteil herangezogen:

$$\bar{\phi}_{jn} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \phi_{ji}$$

i	Beobachtungstag
j	Nutzer
ϕ_{ji}	Elektrischer Fahranteil von Nutzer j an Tag i
n_j	Anzahl der Beobachtungstage für Nutzer j

Anschließend wird das 95 %-Konfidenzintervall des mittleren elektrischen Fahranteils um den Stichprobenmittelwert gebildet:

$$\text{Konfidenzintervall} = \bar{\phi}_{jn} \pm t_{(1-\frac{\alpha}{2}, n-1)} \frac{\hat{\sigma}_{jl}}{\sqrt{n}}, n \geq 2$$

Die Standardabweichung für Nutzer j bei l Aufzeichnungstagen $\hat{\sigma}_{jl}$ wird wie folgt bestimmt:

$$\hat{\sigma}_{jl} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{n=1}^l (\bar{\phi}_{jl} - \phi_{jn})^2}$$

$\hat{\sigma}_{jl}$	Standardabweichung von Tag 1 bis l für Nutzer j
l	Beobachtungstag
$\bar{\phi}_{jl}$	Mittlerer elektrischer Fahranteil bis Tag l für Nutzer j
ϕ_{jn}	Elektrischer Fahranteil an Tag n für Standardabweichung bis Tag j

Um das Konfidenzintervall bestimmen zu können, wird angenommen, dass das Merkmal *elektrische Fahranteil* an den Tagen i mit dem Erwartungswert μ und der Varianz σ^2 normalverteilt ist. Diese Annahme ist allerdings nur eingeschränkt gültig, da der elektrische Fahranteil lediglich auf dem Intervall $]0,1]$ definiert ist.

Ergebnisse REM2030-Daten

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen illustrativ den Verlauf zweier zufällig ausgewählter Fahrprofile aus der REM2030-Fahrprofilenerhebung. Die grüne Linie kenn-

zeichnet dabei den elektrischen Fahranteil an Tag i . Blau dargestellt ist der mittlere Fahranteil von Tag 1 bis i und die rot-gepunkteten Linien stellen das 95%-Konfidenzintervall um den mittleren elektrischen Fahranteil dar. Das Konfidenzintervall ist der Bereich, in dem (mindestens) 95 % der Stichprobenergebnisse liegen.

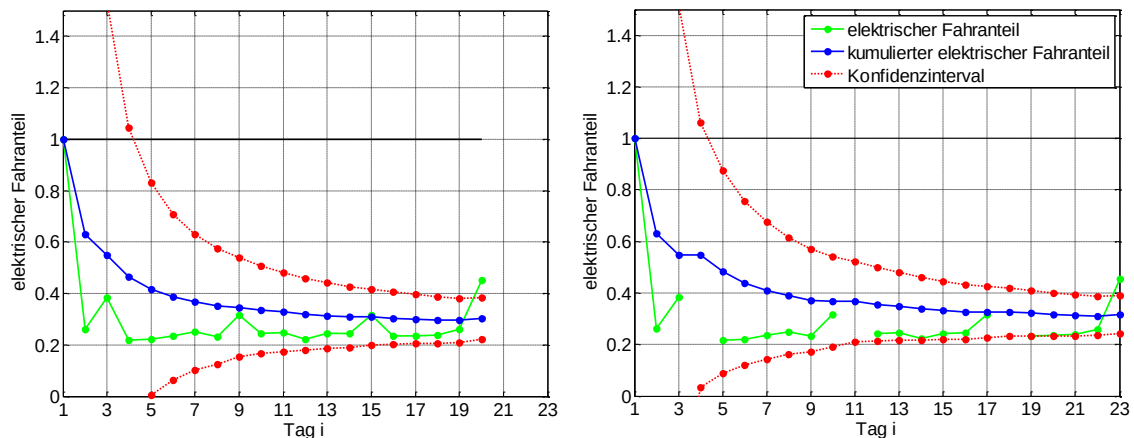


Abbildung 7-11: Auswertung des elektrischen Fahranteils für Fahrzeug 1202654863 (REM2030-Daten) für Fahrtage (links) und Berichtstage (rechts)

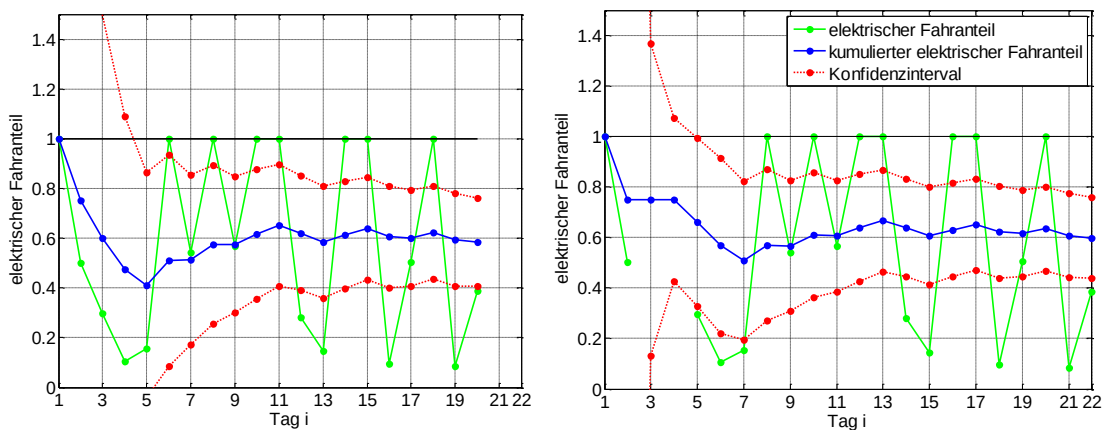


Abbildung 7-12: Auswertung des elektrischen Fahranteils für Fahrzeug 1208510685 (REM2030-Daten) für Fahrtage (links) und Berichtstage (rechts)

Für die Untersuchung des Fehlers des geschätzten elektrischen Fahranteils wird die Breite des Konfidenzintervalls betrachtet. Für jedes Fahrprofil und für jeden Aufzeichnungstag $i \geq 2$ wird die Breite des Konfidenzintervalls bestimmt, so dass sich für jeden Fahrtag i eine „Konfidenzintervallverteilung“ über alle Fahrprofile ergibt. Diese Verteilung wird genutzt, um die Fehlerbreite des geschätzten mittleren elektrischen Fahranteils zu charakterisieren. Betrachtet man die Entwicklung Konfidenzintervallverteilung,

lassen sich Aussagen über die Genauigkeit des mittleren elektrischen Fahranteils in Bezug auf die Fahrprofildauer treffen.

Abbildung 7-13 zeigt die Entwicklung der Konfidenzintervalle für die REM2030-Fahrprofilerhebung. Dabei wird zwischen PHEV- und REEV-Fahrzeugen als Substitutionstechnologie für konventionelle Antriebe unterschieden. Es zeigt sich deutlich, wie die Breite des Konfidenzintervalls bei der Betrachtung innerhalb der ersten 10 Fahrtage (ca. zwei Wochen) stark verringert. Während der Medianwert der Konfidenzintervalle bei PHEV-Fahrzeugen auf ca. 30 % sinkt liegt dieser bei REEV-Fahrzeugen mit etwa 25 % leicht darunter. Bei der Betrachtung weiterer 10 Fahrtage sinkt die zentrale Verteilungsbreite auf 20 % (REEV) bzw. 22 % (PHEV) nur geringfügig.

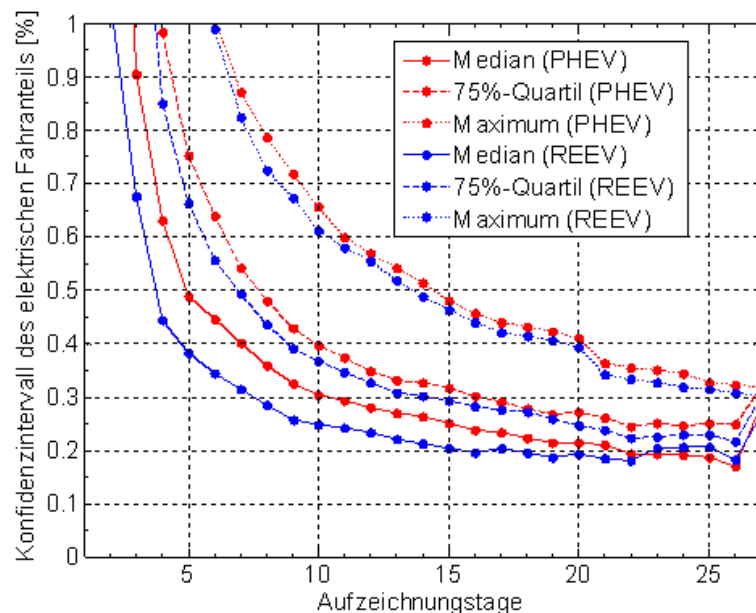


Abbildung 7-13: Quantile der Konfidenzintervallverteilung des mittleren elektrischen Fahranteils für die REM2030-Fahrprofilerhebung

Ein anderes Bild ergibt sich bei der Betrachtung der maximalen Konfidenzintervallbreite. Diese ist bei REEV- und PHEV-Fahrzeugen vergleichbar und liegt nach 10 Fahrtagen bei etwa 62 % und sinkt nach 20 Fahrtagen weiter stark auf circa 40 %. Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs bei mehr als 20 Fahrtagen nähern sich alle Kurven an, so dass nur noch wenig aussagekräftige Erkenntnisse gezogen werden können.

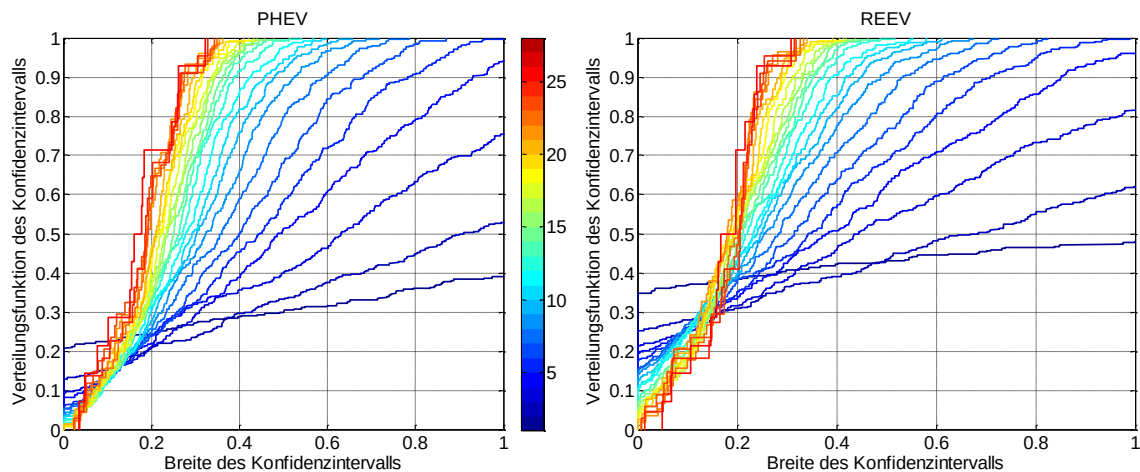


Abbildung 7-14: Verteilungsfunktionen der Konfidenzintervalle von Fahrtag 2 (blau) bis Fahrtag 27 (rot) für REEV- (rechts) und PHEV-Antriebe (links)

Abbildung 7-14 zeigt die empirische Verteilungsfunktion der Konfidenzintervalle und verdeutlicht den in Abbildung 7-13 ersichtlichen Zusammenhang.

Ergebnisse Privatanutzer

In Abbildung 7-15 ist die Entwicklung der Konfidenzintervallverteilung über die Aufzeichnungstage dargestellt. Da die Standardabweichung und somit auch das Konfidenzintervall erst ab zwei Datenpunkten ermittelt werden kann, beginnt die Verteilung erst am zweiten Aufzeichnungs- bzw. Fahrtag. In der Abbildung wird ersichtlich, dass der Median der einzelnen Vertrauensintervalle aller Fahrzeuge ab dem fünften Fahrtag sowohl für PHEV- als auch für REEV-Fahrzeuge konvergiert. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch für das 75%-Quartil. Des Weiteren nähern sich der Median und das 75%-Quartil stark an, was auf eine „schmale“ Verteilung deutet. Diese hat, ersichtlich durch die Maximum-Kurve jedoch immer noch Ausreißer nach oben.

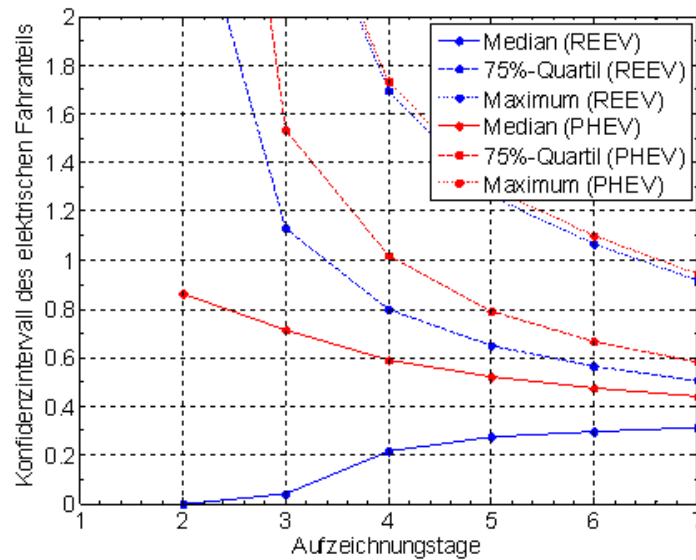


Abbildung 7-15: Quantile der Konfidenzintervallverteilung des mittleren elektrischen Fahranteils für die Fahrprofilenerhebung des Mobilitätspanels

Weiterhin ist auffällig, dass der Median für REEV-Fahrzeuge nach zwei Aufzeichnungstagen null ist und bis zum sechsten Tag stetig ansteigt, wohingegen der Median für PHEV-Fahrzeuge eine fallende Charakteristik hat. In Abbildung 7-16 wird dieser Effekt ersichtlich und lässt sich auf die geringere elektrische Reichweite von PHEV-Fahrzeugen zurückführen. Zum einen ergibt sich eine Konfidenzintervallbreite von null, wenn die Standardabweichung der Stichprobe $\hat{\sigma}_{ji}$ gleich null ist. Häufig ist dies der Fall, wenn die berücksichtigten Fahrtage vollständig elektrisch zurückgelegt wurde ($\phi_{j1} = \phi_{j2} = 1$). Ein Median von Null bei der Betrachtung von zwei Fahrtagen erklärt sich nur dadurch, dass mindestens die Hälfte der Fahrzeug am zweiten Aufzeichnungstag einen identischen Fahranteil wie am ersten gehabt haben. Zum anderen lässt sich dieser Effekt lediglich bei REEV-Fahrzeugen erkennen, da bei dieser Technologie durch die höhere elektrische Reichweite mehr Fahrzeuge alle Tagesfahrten vollständig elektrisch zurücklegen können.

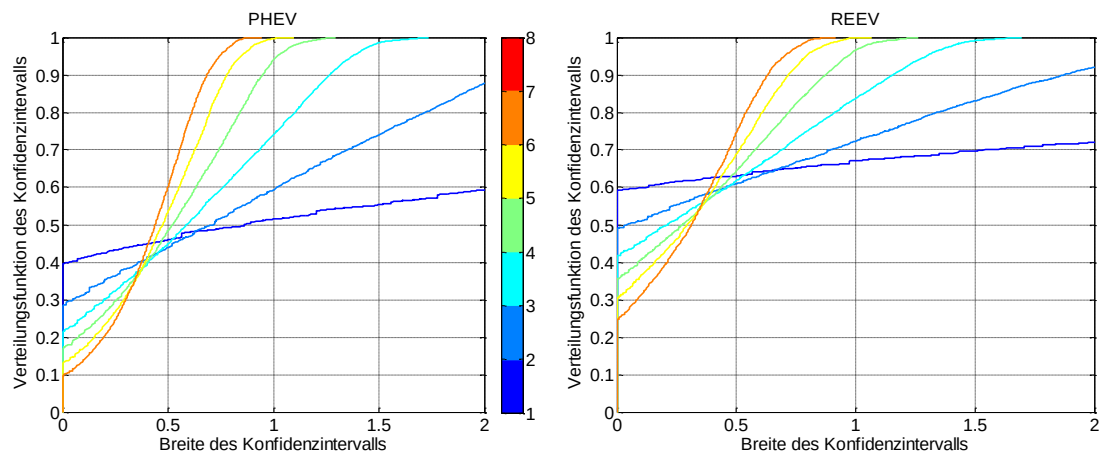


Abbildung 7-16: Verteilungsfunktionen der Konfidenzintervalle von Fahrtag 2 (blau) bis 7 (rot) für REEV (rechts) und PHEV (links)

An dieser Stelle, wird auch eine Schwäche des verwendeten Konfidenzintervalls deutlich, da bei dem elektrischen Fahranteil von einem normalverteilten Merkmal ausgegangen wird. Anders als die am Tag zurückgelegten Kilometer ist der elektrische Fahranteil nur auf einem halboffenen Intervall definiert und ist für alle Tagesstrecken unterhalb der elektrischen Reichweite auf maximal 1 beschränkt.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Wahrscheinlichkeit, den mittleren elektrischen Fahranteil korrekt einzuschätzen, sinkt bereits bei einer geringen Aufzeichnungsdauer sehr stark. Ab einer Fahrprofillänge von etwa 10 Tagen lässt der Effekt nach und die Breite des Konfidenzintervalls nimmt im Allgemeinen nicht mehr stark ab. Lediglich verhältnismäßig breite Intervalle (unregelmäßige Fahrprofile) können in Ihrer Wahrscheinlichkeit, den mittleren Fahranteil richtig einzuschätzen, noch signifikant verbessert werden.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass der mittlere Fehler nach 7 Berichtstagen (entspricht den Fahrprofilen der Privat- und Dienstwagennutzer) sowohl für PHEV als auch REEV bei $\pm 20\%$ liegt und bei 21 Tagen Beobachtungsdauer (entspricht den Flotten-Fahrprofilen) bei $\pm 10\%$. Der maximale Fehler liegt bei 7 Beobachtungstagen bei $\pm 40\%$ und bei 21 Beobachtungstagen bei $\pm 20\%$. Tabelle 7-8 fasst dies noch einmal zusammen.

Tabelle 7-8: Unsicherheiten der elektrischen Fahranteile für PHEV und REEV

	Fahrprofile Privatverkehr (7 Beobachtungstage)	Fahrprofile Wirtschaftsverkehr (21 Beobachtungstage)
Minimum	$\pm 0 \%$	$\pm 2 \%$
25 %-Quantil	$\pm 10 \%$	$\pm 5 \%$
Median	$\pm 20 \%$	$\pm 10 \%$
75 %-Quantil	$\pm 30 \%$	$\pm 15 \%$
Maximum	$\pm 40 \%$	$\pm 20 \%$

Bei der Anwendung des in dieser Arbeit vorgestellten Verfahrens sind jedoch mehrere Punkte zu berücksichtigen. Es wird bei der Berechnung der Varianz von einer metrischen Skala des elektrischen Fahranteils ausgegangen. Hier ist jedoch einzuwenden, dass der elektrische Fahranteil sich auf das Intervall $]0,1]$ beschränkt und die ermittelte Varianz bzw. Standardabweichung somit nicht korrekt ist.

7.6 Aufbereitung und Verteilung der Fahrprofilaten

In diesem Abschnitt wird weiter auf Verteilung der Fahrprofile und die Aufbereitung der MOP-Daten für die Analyse eingegangen.

Extraktion von Pkw-Fahrprofilen aus dem Mobilitätspanel

Für den Privatverkehr werden die Daten des Mobilitätspanels ausgewertet. Das Mobilitätspanel wird seit 1994 erhoben und umfasst fünf Tabellen pro Jahr (Jahr als XX gekennzeichnet):

- hhXX: Haushaltsdateien der teilnehmenden Panelhaushalte mit Informationen über Haushaltsgröße, Geoinformationen über den Haushalt, die Parksituation, etc.
- pXX: Personendatei der Personen in den Panelhaushalten mit Informationen beispielsweise über Alter, Geschlecht, Bildungsabschluss, etc.
- wXX: Wegedatei der einzelnen Personen im Aufzeichnungszeitraum mit Informationen über die zurückgelegten Wege, die verwendeten Verkehrsmittel u.v.m.
- tankXX: Tank-Datei, welche Informationen über die Fahrzeuge und ihr Tankverhalten enthält.

Während die Haushalts-, Personen- und Wegedatei immer dieselbe Jahreszahl verwenden, ist die der Tankdatei um Eins erhöht (tank95 gehört zu hh94). Die Dateien lassen sich über deren Primärschlüssel²³⁹ verknüpfen. Da in der vorliegenden Auswertung nur die Fahrten von Fahrzeugen verwendet werden, müssen die vorliegenden personenspezifischen Weginformationen auf Fahrzeuge übertragen werden. Hierfür wird dem Ansatz von Kley²⁴⁰ gefolgt, der mehrere Optionen unterscheidet:

1. $n_{Fzge} = 1$: Wenn nur ein Fahrzeug im Haushalt existiert, so werden alle Wege der Personen im Haushalt dem Fahrzeug zugewiesen.
2. $n_{Fzge} \geq n_{Fahrer}$: Wenn die Anzahl der Fahrzeuge im Haushalt die Anzahl der Personen übersteigt, so werden die Wege des ersten Fahrers dem ersten Fahrzeug zugewiesen, die des zweiten dem zweiten und so weiter. Die Fahrzeuge, die es mehr als Fahrer gibt, gehen dann nicht in die Analyse ein.
3. $n_{Fzge} < n_{Fahrer}$: Hier ist keine eindeutige Zuordnung von Fahrern zu Fahrzeugen möglich, so dass diese Fahrzeuge außer Acht gelassen werden.

²³⁹ hhid für hhXX, pid für pXX, wid für wXX und idhh, pkwnr für tankXX.

²⁴⁰ Vgl. Kley 2011, S. 87, hier vereinfacht dargestellt.

Dieser Logik tragen die SQL-Abfragen im Folgenden Rechnung. Es werden alle Fahrer aus der Personendatei ausgewählt, die einen Führerschein besitzen (fspkw=1) und diese mit den Haushalten verknüpft. Anschließend werden die Wege, welche als Fahrer mit einem Pkw durchgeführt wurden (vmdiw = 4) mit diesen verknüpft, bevor die Fahrzeuginformationen hinzugezogen werden. Der erste Fall, in dem nur ein Fahrzeug pro Haushalt existiert, ist in Abbildung 7-17 für das Jahr 2010 dargestellt, der mit mehreren Fahrzeugen in Abbildung 7-18. Die Unterschiede in der Abfrage sind dabei gelb unterlegt.

```

select
    pkw10.hhid, pkw10.persnr, w10.jahr as jahr, w10.wotag, w10.bertag, w10.datum, w10.abzeit,
    w10.zweck, w10.anzeit, w10.km,
    p10.sex, p10.gebjahr, p10.schulab, p10.beruf,
    hh10.raumtyp, hh10.kreis, hh10.ewzahl, hh10.hhtyp, hh10.einko,
    case tank11.pkwordnr
        when 1 then hh10.parkstr1
        when 2 then hh10.parkstr2
        when 3 then hh10.parkstr3
        else hh10.parkgar+1
    end as garage, tank11.privpkw, tank11.nutzung, tank11.marke, tank11.baujahr, tank11.hubraum,
    tank11.benzin, tank11.kmjahr, tank11.hub_klas, pkw10.persnr as pkwno, hh10.hhgro as hhgro
from
    (select
        wege.hhid, 1 as persnr
    from
        (select
            distinct hhid, persnr
        from
            (select
                id as hhid, persnr
            from
                w10
            where
                vmdiw = 4
            )
        ) wege,
        (select
            distinct pp.hhid, pp.persnr, pp.hh_pot_drivers, hh.pkwhh
        from
            (select
                distinct p1.hhid, p1.persnr, p2.hh_pot_drivers
            from
                (select
                    id as hhid, persnr
                from
                    p10
                where
                    fspkw = 1
                ) p1
            left outer join
            (select
                id as hhid, count(persnr) as hh_pot_drivers
            from
                p10
            where
                fspkw = 1
            group by id
            ) p2
            on (p1.hhid = p2.hhid)
        ) pp, hh
        where
            (hh_pot_drivers > pkwhh and pkwhh = 1)
        and
            pp.hhid = hh.id
    ) personen
    where
        wege.hhid = personen.hhid
    and
        wege.persnr = personen.persnr
    ) pkw10
, p10, hh10, w10, tank11
where
    pkw10.hhid = p10.id
and
    pkw10.persnr = p10.persnr
and
    pkw10.hhid = hh10.id
and
    pkw10.hhid = w10.id
and
    pkw10.hhid = tank11.idhh
and
    pkw10.persnr = tank11.pkwnr

```

Abbildung 7-17: SQL-Code zur Extraktion von Pkw-Profilen für das Jahr 2010 (Teil 1)

```

select
    pkw10.hhid, pkw10.persnr, w10.jahr as jahr, w10.wotag, w10.bertag, w10.datum, w10.abzeit,
    w10.zweck, w10.anzeit, w10.km,
    p10.sex, p10.gebjahr, p10.schulab, p10.beruf,
    hh10.raumtyp, hh10.kreis, hh10.ewzahl, hh10.hhtyp, hh10.einko,
    case tank11.pkwordnr
        when 1 then hh10.parkstr1
        when 2 then hh10.parkstr2
        when 3 then hh10.parkstr3
        else hh10.parkgar+1
    end as garage, tank11.privpkw, tank11.nutzung, tank11.marke, tank11.baujahr, tank11.hubraum,
    tank11.benzin, tank11.kmjahr, tank11.hub_klas, pkw10.persnr as pkwno, hh10.hhgro as hhgro
from
    (select
        (select
            wege.hhid, wege.persnr
        from
            (select
                distinct hhid, persnr
            from
                (select
                    id as hhid, persnr
                from
                    w10
                where
                    vmdiw = 4
                )
            ) wege,
        (select
            distinct pp.hhid, pp.persnr, pp.hh_pot_drivers, hh.pkwhh
        from
            (select
                distinct p1.hhid, p1.persnr, p2.hh_pot_drivers
            from
                (select
                    id as hhid, persnr
                from
                    p10
                where
                    fspkw = 1
                ) p1
            left outer join
            (select
                id as hhid, count(persnr) as hh_pot_drivers
            from
                p10
            where
                fspkw = 1
            group by id
            ) p2
            on (p1.hhid = p2.hhid)
        ) pp, hh
        where
            hh_pot_drivers <= pkwhh
        and
            pp.hhid = hh.id
    ) personen
    where
        wege.hhid = personen.hhid
    and
        wege.persnr = personen.persnr
    ) pkw10
, p10, hh10, w10, tank11
where
    pkw10.hhid = p10.id
and
    pkw10.persnr = p10.persnr
and
    pkw10.hhid = hh10.id
and
    pkw10.hhid = w10.id
and
    pkw10.persnr = w10.persnr
and
    pkw10.hhid = tank11.idhh
and
    pkw10.persnr = tank11.pkwnr

```

Abbildung 7-18: SQL-Code zur Extraktion von Pkw-Profilen für das Jahr 2010 (Teil 2)

Seit der ersten Erhebung im Jahr 1994 wurden zahlreiche Felder geändert oder anders kodiert, so dass für die Abfragen in den Jahren vor 2010 eine Reihe an Änderungen notwendig ist. In Tabelle 7-9 sind die Veränderungen der Tabellen in den Jahren vor 2010 im Vergleich zu 2010 dargestellt und eine Lösungsmöglichkeit dargestellt.

Tabelle 7-9: Veränderung in den Tabellen und Lösungen in den SQL-Abfragen zur Gleichbehandlung der Daten wie 2010

Feld	Problem	Betrifft Datensätze	Lösung
hhXX.Parkstr1	Nicht vorhanden	1994-2002	hhXX.parkgar+1 as garage
hhXX.Parkstr2	Nicht vorhanden	1994-2002	hhXX.parkgar+1 as garage
hhXX.Parkstr3	Nicht vorhanden	1994-2002	hhXX.parkgar+1 as garage
tankXX.privpkw	Nicht vorhanden	1995-1999	NULL as privpkw
tankXX.nutzung	Nicht vorhanden	1995-1999	NULL as nutzung
tankXX.typ_k_a	Andere Kodierung	1995,1996, 2000-2002	case tankXX.typ_k_a when 2 then 3 when 3 then 5 else tankXX.typ_k_a end as benzin
tankXX.typ_k_a	Andere Kodierung	1997-1999	case tankXX.typ_k_a when 2 then 5 when 3 then 4 when 4 then 2 else tankXX.typ_k_a end as benzin
tankXX.kmjahr	Nicht vorhanden	1995-2003	NULL as kmjahr
tankXX.hub_klas	Nicht vorhanden	1995,1996, 2002	NULL as hub_klas
tankXX.id	Zusammensetzung aus HHID und PersNr	1995-2001	hh94.id = tank95.id/10 (div) p94.pkwnr = tank95.id %10 (modulo)
tankXX.pkwnr	Nicht vorhanden	1995-2001	tankXX.pkwnr = tankXX.id %10 (modulo)
tankXX.pkwnr	Nicht vorhanden	2002	tankXX.pkwnr = tankXX.pkwnrhh
tankXX.marke	ASCII-Zeichen	1994	Kodiert wie 2010

Im Anschluss an die Extraktion der Daten werden noch einige Eingabefehler behoben. Fahrten mit Strecken von 0 Kilometern oder weniger werden ausgefiltert, ebenso wie Fahrten mit Ankunftszeiten, die vor den Abfahrtszeiten liegen.

Da die Informationen aus dem Feld hub_klas nur für etwa die Hälfte der 6.339 Fahrprofile vorhanden ist, wird die Fahrzeuggröße im Anschluss über die angegebenen Hubräume ermittelt. Fahrzeuge mit weniger als 1400 ccm Hubraum werden zu den kleinen Fahrzeugen, zwischen 1400 und 2000 ccm Hubraum zu den mittleren und mit mehr als 2000 ccm Hubraum zu den großen Fahrzeugen gezählt. Diese finalen Daten, welche in die weitere Analyse eingehen enthalten 6.339 Fahrzeuge mit 172.978 Wegen innerhalb einer Woche.

Verteilung der Fahrprofile

Folgende Tabelle fasst noch einmal die Verteilung verschiedener Fahrdaten auf die Fahrzeuggrößen zusammen.

Tabelle 7-10: Häufigkeit der Fahrzeuggrößen nach Studien

Fahrzeuggröße	MiD08		MOP94-10		REM2030		Gesamt	
Kleinwagen	7.885	24 %	965	26 %	75	21 %	8.925	24 %
Mittelklasse	16.860	51 %	2.165	58 %	117	33 %	19.142	52 %
Großklasse	4.511	14 %	597	16 %	43	12 %	5.151	14 %
Sonderfahrzeuge	3.531	11 %		0 %	6	2 %	3.537	10 %
Transporter		0 %		0 %	112	32 %	112	0 %
Gesamt	32.787	100 %	3.727	100 %	353	100 %	36.867	100 %

Abbildung 7-19 zeigt beispielhaft die Verteilung der Jahresfahrleistungen und die logarithmierte Verteilung der Jahresfahrleistungen für Kleinwagen.

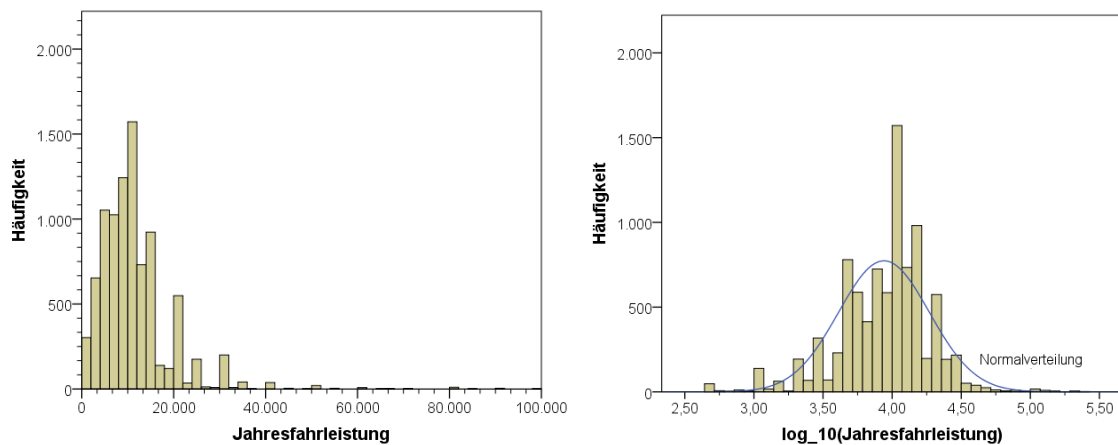


Abbildung 7-19: Häufigkeitsverteilung der Jahresfahrleistung (links) und logarithmierten Jahresfahrleistung und Normalverteilung (rechts)

Die Rechtsschiefe der Verteilung der Jahresfahrleistungen und die Symmetrie der Verteilung der logarithmierten Jahresfahrleistungen sind gut erkennbar.

Die verwendeten Fahrprofile für die vorliegende Studie sind in Tabelle 7-11 noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 7-11: Verwendete Fahrprofilenerhebungen

Merkmal	Wirtschaftsverkehr	Privatverkehr
	Fraunhofer ISI REM2030	MOP 1994-2010
Erhebungsdesign	Aufzeichnung	Befragung
Erhebungsdauer	3 Wochen	7 Tage
Umfang	350 Pkw, 66.899 Wege	6.629 Pkw, 12.812 Haushalte

Dabei ist, wie oben besprochen, die Aufzeichnungsdauer einer der zentralen Gründe für die Verwendung dieser Fahrprofile, denn diese hat entscheidenden Einfluss für die Genauigkeit der elektrischen Fahranteile bzw. Ersetzbarkeit durch BEV und ist somit entscheidend für die Betrachtung von Elektrofahrzeugen.

Die folgenden Abbildungen zeigen zudem einen Vergleich der verschiedenen Datensätze hinsichtlich der Verteilung auf Fahrzeuggrößen und Gemeindegrößen.

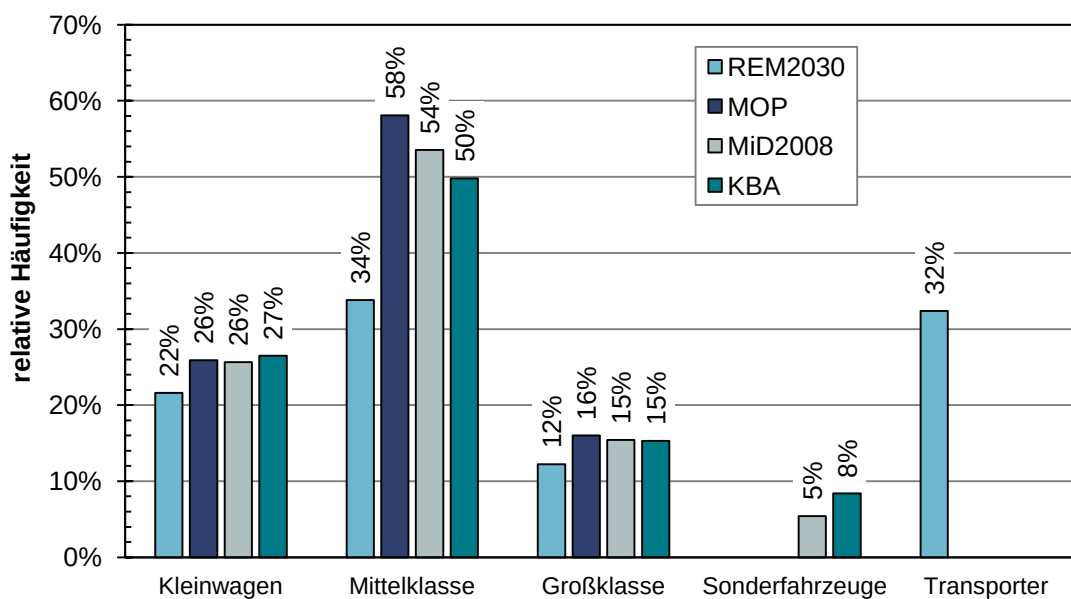


Abbildung 7-20: Relative Häufigkeitsverteilung der Fahrzeuggrößen in den betrachteten Quellen

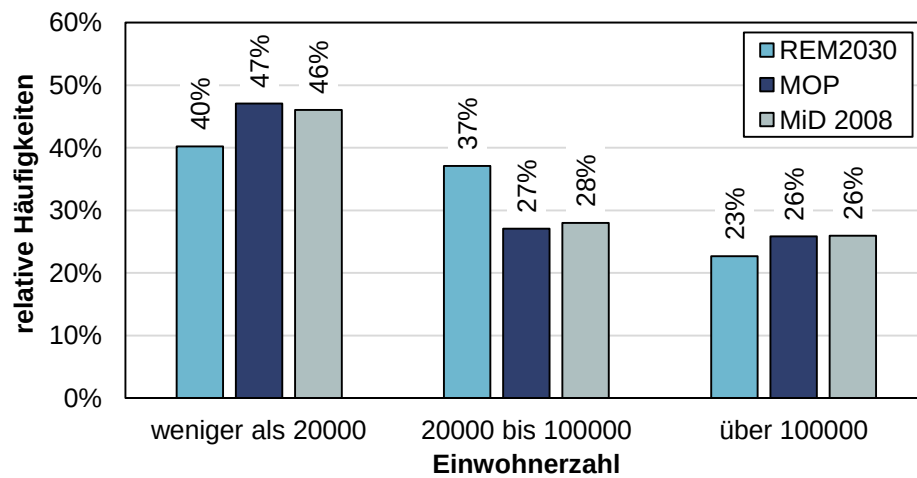


Abbildung 7-21: Relative Häufigkeitsverteilung der Gemeindegrößen am Halterstandort in den betrachteten Studien

Es zeigt sich, dass die Verteilungen im Privatverkehr ähnlich zu einander sind.

7.7 Kundengruppen und Mehrpreisbereitschaften

Das Vorgehen zur Definition von Kundengruppen und ihrer Mehrpreisbereitschaft wurde in Abschnitt 3.2.5 und 4.7.1 vorgestellt. In diesem Abschnitt nun werden die Genauigkeit der Zuordnung und die Zusammensetzung der Kundengruppen erläutert.

Verteilung der Mehrpreisbereitschaften

Im Modell werden die Mediane der Mehrpreisbereitschaften pro Nutzergruppe verwendet. Folgende Abbildung zeigt die kumulativen Dichteverteilungen der Mehrpreisbereitschaften innerhalb der Nutzergruppen.

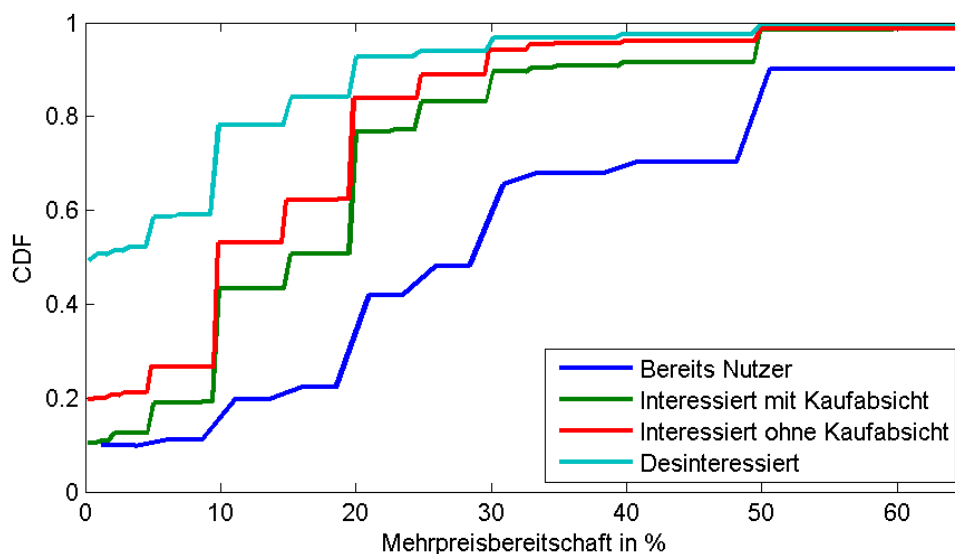


Abbildung 7-22: Kumulative Dichteverteilungen der Mehrpreisbereitschaften innerhalb der Nutzergruppen

Die Median der Mehrpreisbereitschaften sind dann wie im Haupttext genannt: 30 % für Innovatoren (Nutzer in den FSEM-Daten), 15 % für Early Adopter (Interessierte mit Kaufabsicht), 10 % für Early Majority (Interessierte ohne Kaufabsicht) und 1 % für Laggards (Desinteressierte).

Zuordnung der Mehrpreisbereitschaften

Um die Qualität der Zuordnung zu einer Kundengruppe zu verstehen, bietet sich eine Überprüfung der korrigierten Zuordnung anhand der FSEM-Daten selber an, denn bei diesen ist die Zugehörigkeit zu einer Gruppe bereits bekannt. Die Zuordnung und Überprüfung erfolgte mit Matlab. Folgender Code wurde dafür verwendet.

```
% Test der Clusterzuordnung innerhalb der FSEM Daten
fsemdata = xlsread('EA_umkodiert.xls');
```

```

N = size(fsemdata,1);

% Clustervariablen
col_sex = 7; col_alter = 45; col_besch = 51; col_schule = 49; col_hhgro = 11;
col_einko = 18; col_ewzahl = 50; col_adopterg = 48;

% Weitere Variablen
col_mehrpriisbereitschaft = 25;

% ersetze "keine Angabe bzw. Sonstige" durch NaN
[r,c] = find(fsemdata(:,col_schule)==6); fsemdata(r,col_schule) = 0/0;
[r,c] = find(fsemdata(:,col_besch)==9); fsemdata(r,col_besch) = 0/0;
[r,c] = find(fsemdata(:,col_hhgro)==-99); fsemdata(r,col_hhgro) = 0/0;
[r,c] = find(fsemdata(:,col_hhgro)>20); fsemdata(r,col_hhgro) = 0/0;
[r,c] = find(fsemdata(:,col_einko)==0); fsemdata(r,col_einko) = 0/0;
[r,c] = find(fsemdata(:,col_einko)==8); fsemdata(r,col_einko) = 0/0;

% Auswahl der Nutzergruppen
% Nutzer:
[r,c] = find(fsemdata(:,col_adopterg)==1); adopter1 = fsemdata(r,:);
% Interessiert mit Kaufabsicht:
[r,c] = find(fsemdata(:,col_adopterg)==2); adopter2 = fsemdata(r,:);
% Interessiert ohne Kaufabsicht:
[r,c] = find(fsemdata(:,col_adopterg)==3); adopter3 = fsemdata(r,:);
% Desinteressierte:
[r,c] = find(fsemdata(:,col_adopterg)==4); adopter4 = fsemdata(r,:);

N1 = length(adopter1); N2 = length(adopter2);
N3 = length(adopter3); N4 = length(adopter4);

% Clusterprüfung
clustervar = [col_sex col_alter col_besch col_schule col_hhgro col_einko col_ewzahl];
Ntot = N1+N2+N3+N4;
match = zeros(4,N);
% loop über alle befragten
for ll = 1:N
    currentuser = fsemdata(ll,:);
    % loop über Nutzer
    foo = 0;
    for jj = 1:N1
        foo = foo + sum(currentuser(clustervar) == adopter1(jj,clustervar));
    end
    if currentuser(col_adopterg)==1, foo = foo-8; end;
    match(1,ll) = foo/(length(clustervar)*N1); % Gesamtübereinstimmung mit Nutzern

% loop über Early Adopter
    foo = 0;
    for jj = 1:length(adopter2)
        foo = foo + sum(currentuser(clustervar) == adopter2(jj,clustervar));
    end
    if currentuser(col_adopterg)==2, foo = foo-8; end;
    match(2,ll) = foo/(length(clustervar)*N2); % Gesamtübereinst. mit Early Adoptern

% loop über Early Majority
    foo = 0;
    for jj = 1:length(adopter3)
        foo = foo + sum(currentuser(clustervar) == adopter3(jj,clustervar));
    end
    if currentuser(col_adopterg)==3, foo = foo-8; end;
    match(3,ll) = foo/(length(clustervar)*N3); % Gesamtübereinst. mit Early Majority

% loop über Laggards
    foo = 0;
    for jj = 1:length(adopter4)
        foo = foo + sum(currentuser(clustervar) == adopter4(jj,clustervar));
    end
    if currentuser(col_adopterg)==4, foo = foo-8; end;
    match(4,ll) = foo/(length(clustervar)*N4); % Gesamtübereinstimmung mit Laggards
end

```

```

% % Finde maximale Übereinstimmung und wähle diese Gruppe
% Ab hier wird die Gruppenzugehörigkeit beschränkt

% Nur die vier mit der besten Übereinstimmung zu Nutzern werden Innovatoren
n1 = 4; n2 = 8; n3 = 400; n4 = 420;
ntot = n1+n2+n3+n4; nn = [n1 n2 n3 n4]/ntot; groupsizes = round(N.*nn)

% ursprüngliche Zuordnung:
usergroup = zeros(1,N);

% finde die besten "Nutzer"
[doo, ind] = sort(match,2,'descend'); % nach Zeilen sortieren
% Die besten Nutzer kriegen die 1:
usergroup(ind(1,1:groupsizes(1))) = 1;
% Diese besten dürfen in keine andere Gruppe mehr:
match([2 3 4],ind(1,1:groupsizes(1))) = 0.001;
% die anderen werden keine 1er
match(1,ind(1,(groupsizes(1)+1):N)) = 0.002;

% neu Sortieren da Übereinstimmung geändert wurde
[doo, ind] = sort(match,2,'descend'); % nach zeilen sortieren
% Die besten Early Adopter kriegen die 2:
usergroup(ind(2,1:groupsizes(2))) = 2;
% Diese besten dürfen in keine andere Gruppe mehr:
match([1 3 4],ind(2,1:groupsizes(2))) = 0.003;
% die anderen werden keine 1er
match(2,ind(2,(groupsizes(2)+1):N)) = 0.004;

% neu Sortieren da Übereinstimmung geändert wurde
[doo, ind] = sort(match,2,'descend'); % nach zeilen sortieren
% Die besten Early Majority kriegen die 3:
usergroup(ind(3,1:groupsizes(3))) = 3;
% Diese besten dürfen in keine andere Gruppe mehr:
match([1 2 4],ind(3,1:groupsizes(3))) = 0.005;
% die anderen werden keine 1er
match(3,ind(3,(groupsizes(3)+1):N)) = 0.006;

% Letzte Gruppe hat bisher 0. Dieser Rest wird jetzt Gruppe 4.
[r,col] = find(usergroup==0);
usergroup(col) = 4;

```

Dabei wird deutlich, dass die Zuordnung gemäß der höchsten Übereinstimmung erfolgt. Die Fahrprofile, die die höchste Übereinstimmung mit den Elektrofahrzeug-Nutzern haben werden der Gruppe der Innovatoren zugeordnet. Die Gruppengröße wird dabei gemäß den Anteilen der iZeus-Befragung begrenzt. Tabelle 7-12 zeigt das Ergebnis zur Überprüfung und Einordnung des Verfahrens.

Tabelle 7-12: Überprüfung der statistischen Zuordnung zu Nutzengruppen.

	Neue Zuordnung				
FSEM Gruppe	<i>Innovatoren</i>	<i>Early Adopter</i>	<i>Early Majority</i>	<i>Laggards</i>	Summe
<i>Innovatoren</i>	0	1	47	33	81
<i>Early Adopter</i>	3	3	118	125	249
<i>Early Majority</i>	2	3	193	162	360
<i>Laggards</i>	0	2	97	152	251
Summe	5	9	455	472	941

Es sind also in der korrigierten Zuordnung 0 von 5 Innovatoren, 3 von 9 Early Adopter, 193 von 455 Early Majority und 152 von 472 Laggards richtig. Insgesamt werden ca. 37 % der Fahrprofile richtig zugeordnet. Dies liegt vor allem an den beiden großen Gruppen, von denen über die Hälfte richtig ist. Der Erfolg der Zuordnung ist besser als bei einer rein zufälligen Zuordnung (dann wären 25 % richtig). Allerdings könnte man argumentieren, dass es de facto nur noch zwei Gruppen sind (aufgrund der geringen Zahl der Innovatoren und Early Adopter), dann entsprächen 50 % einer zufälligen Zuordnung. Die Basis wären dann $360+251 = 611$ Fahrprofile und von diesen sind $193+152 = 345$, also 56 % richtig, demnach auch etwas besser als Zufall.²⁴¹

Insgesamt ist die Zuordnung der Fahrprofile zu einer Nutzergruppe besser als eine rein zufällige Zuordnung, aber nicht sehr genau. Für die vorliegenden Zwecke scheint es aber ausreichend, da das Fahrverhalten entscheidend für die TCO ist und eine starke Korrelation zwischen Fahrverhalten (im Sinne der Regelmäßigkeit und der Jahresfahrleistung) scheinen eher unwahrscheinlich. Eine Möglichkeit zur Verbesserung bestünde in einer feineren Unterscheidung innerhalb der Merkmale. Aufgrund der unterschiedlichen Skalen in der FSEM-Befragung und der MOP-Daten mussten diese teilweise aggregiert werden.

Wie repräsentativ sind die Datensätze?

Für die Antwort auf die Frage, ob wir wirklich Aussagen über die Erstnutzer machen können, ist es wichtig zu klären, ob die Datensätze vergleichbar sind und wie repräsentativ für die Bevölkerung und Pkw-Besitzer sie sind. Unten ist ein Vergleich der Datensätze hinsichtlich der Daten für die Clusterung gezeigt. Man erkennt, dass die MOP-Datensätze eher für die Bevölkerung repräsentativ sind, jedoch nicht so ganz für die Gruppe der Pkw-Besitzer.

Ebenso gezeigt ist die Verteilung der Nutzergruppen (Innovatoren, Early Adopter, etc) für die MOP- und FSEM-Daten (gemäß Wietschel et al. (2012) sowie der beschriebenen Zuordnung). In einigen Variablen stimmt die Beschreibung der Gruppen zwischen FSEM und MOP gut überein (Bildung, Berufstätigkeit, Alter, Einkommen, Haushaltsgröße) in anderen weniger (Geschlecht).

²⁴¹ Konzentriert man sich auf die beiden großen Gruppen (Early Majority und Laggards), so kann man diesen Teil von Tabelle 7-12 als Kontingenztafel (193, 162; 97, 152) auffassen. Dann sind hochsignifikant ($p < 0,1 \%$) über die Hälfte der Nutzer richtig zugeordnet, nämlich $(57 \pm 5,2) \%$ bei 99 % Konfidenzniveau. Die neue und alte Zuordnung ist sowohl in der kleinen als auch in der gesamten Tabelle signifikant abhängig ($p < 1 \%$). Umgekehrt sind Zuordnungen, die nicht abhängig von einander sein sollten (bspw. Innovatoren/Early Adopter und Early Majority/Laggards: Kontingenztafel (47, 33; 118, 125)), nicht signifikant abhängig ($p > 10 \%$).

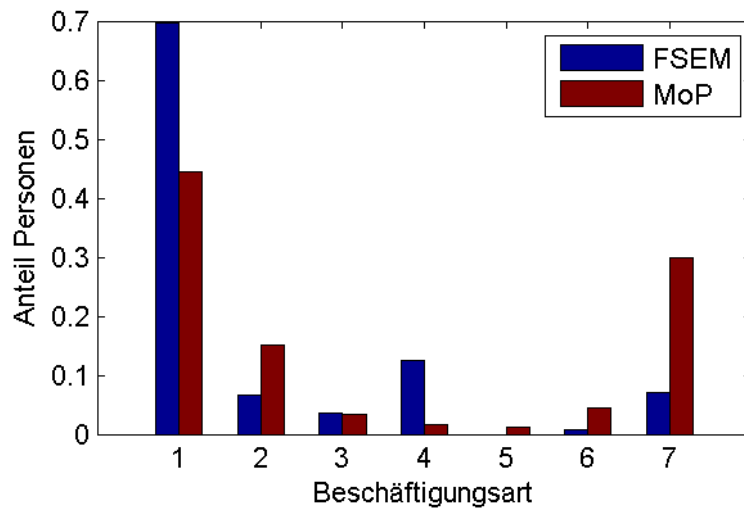
Beschäftigungsart

Abbildung 7-23: Verteilung der FSEM- und MOP-Daten nach Beschäftigungsart

Dabei bezeichnen: 1 – Vollzeit, 2 – Teilzeit, 3 – arbeitslos, 4 – in Studium oder Schule, 5 – in Lehre, 6 – Hausmann oder Hausfrau, 7 – Rentner. Insgesamt sind in den MOP-Daten deutlich mehr Rentner als in der FSEM-Befragung.

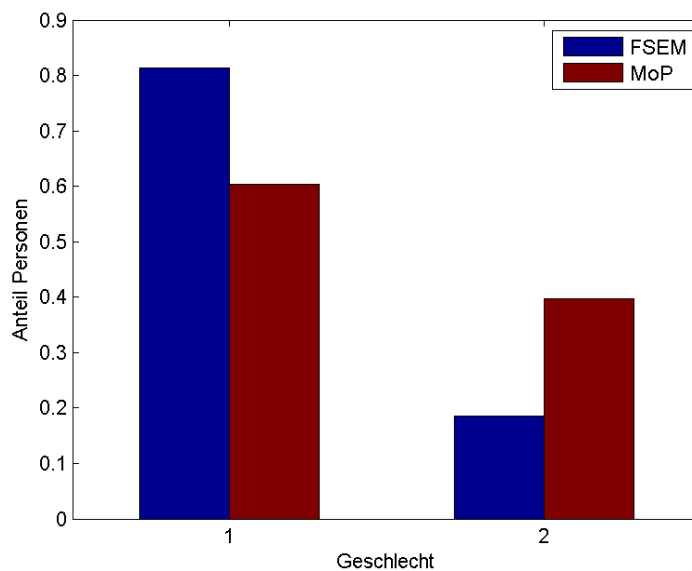
Geschlecht

Abbildung 7-24: Verteilung der FSEM- und MOP-Daten nach Geschlecht

Es sind: 1 – Männlich, 2 – Weiblich. Die MOP-Daten enthalten deutlich mehr Frauen als die FSEM-Daten.

Bildung

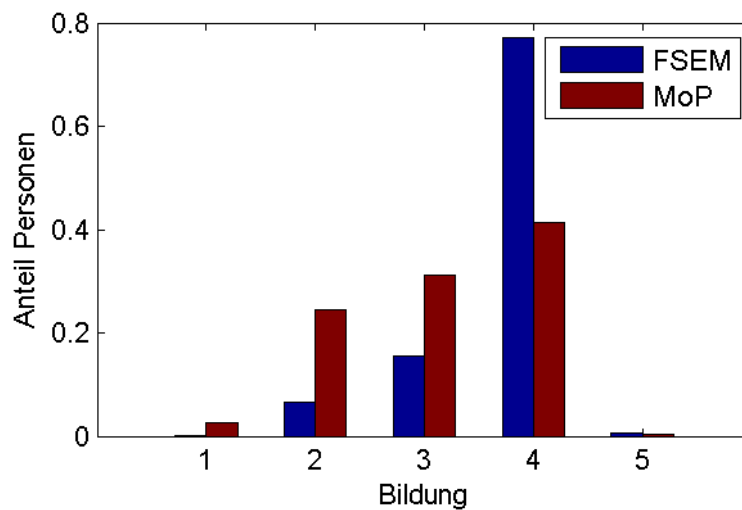


Abbildung 7-25: Verteilung der FSEM- und MOP-Daten nach Bildungsstand

Es sind: 2 – Hauptschule, 3 – Realschule, 4 – Abitur oder Höher.

Alter

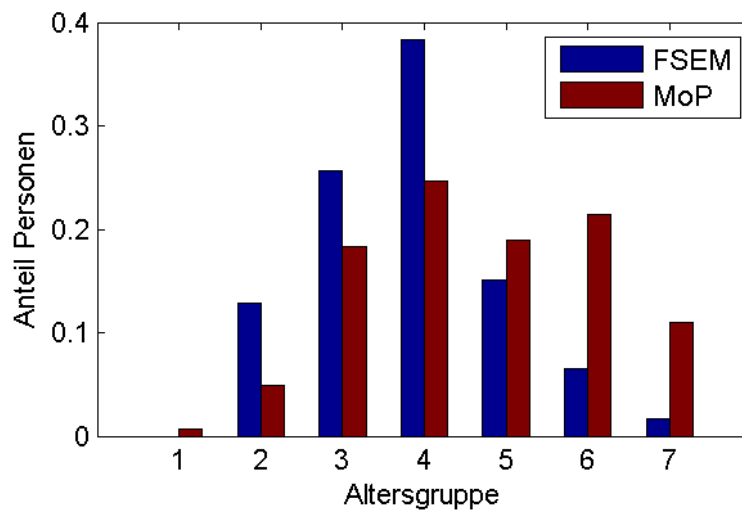


Abbildung 7-26: Verteilung der FSEM- und MOP-Daten nach Altersgruppe

Die Altersgruppen sind 1 – unter 20, 2 – 21-30, usw. Die FSEM-Befragten sind eher jünger als die MOP-Befragten. Dies deckt sich mit dem höheren Anteil an Rentnern in den FSEM-Daten.

Haushaltseinkommen

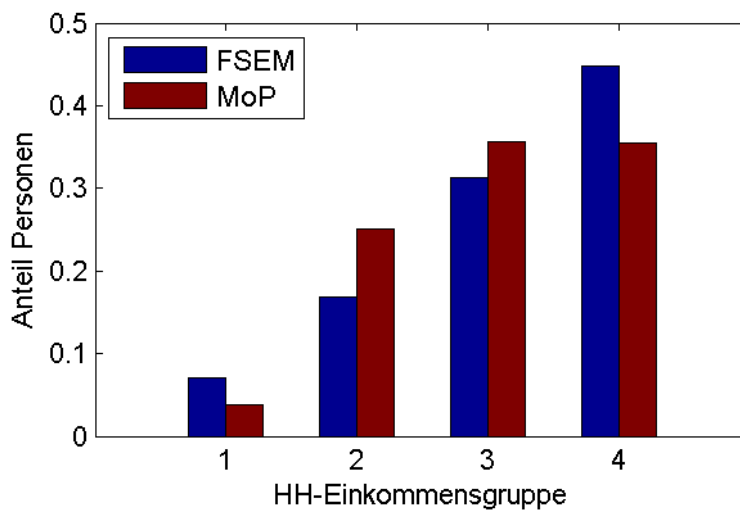


Abbildung 7-27: Verteilung der FSEM- und MOP-Daten nach Haushaltseinkommen

Es sind: 1 – unter 1.000 €, 2 – 1-2.000 €, 3 – 2-3.000 €, 4 – über 3.000 € Nettohaushaltseinkommen. Beide Verteilungen sind recht ähnlich.

Haushaltsgröße

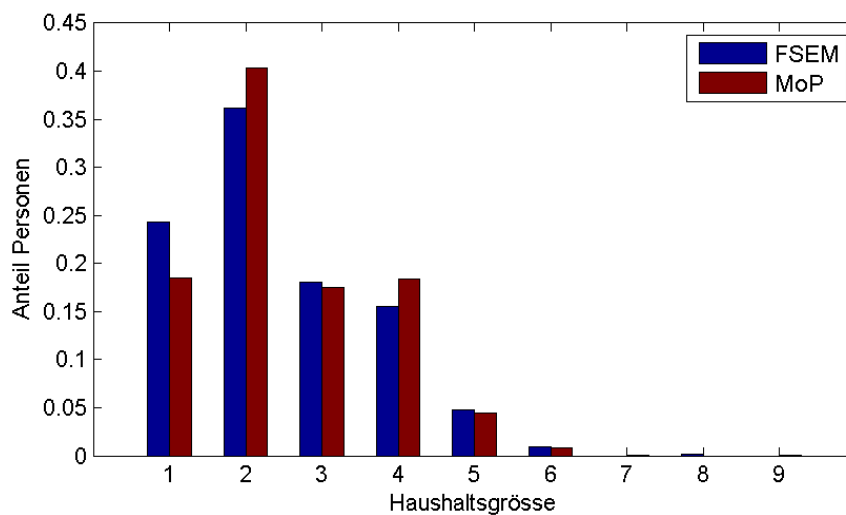


Abbildung 7-28: Verteilung der FSEM- und MOP-Daten nach Haushaltsgröße

Haushaltsgröße nach der Anzahl der im Haushalt lebenden Personen. Die FSEM- und MOP-Daten weisen hier eine sehr ähnliche Verteilung auf.

Kriterien im Entscheidungsprozess

Im Folgenden sind die weiteren Kriterien der Pkw-Kauf-Entscheidung dargestellt.

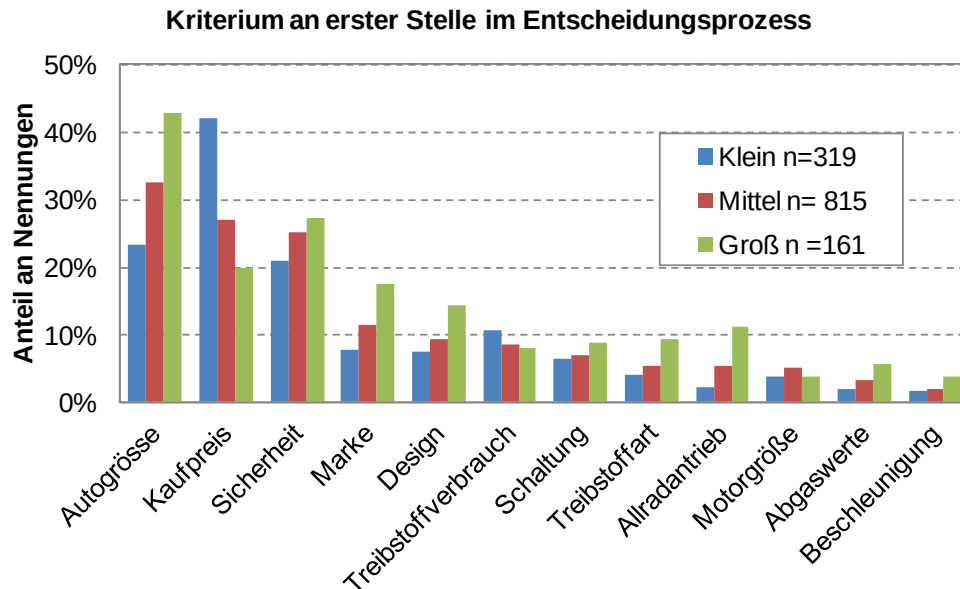


Abbildung 7-29: Kriterien an erster Stelle im Pkw-Kauf-Entscheidungsprozess²⁴²

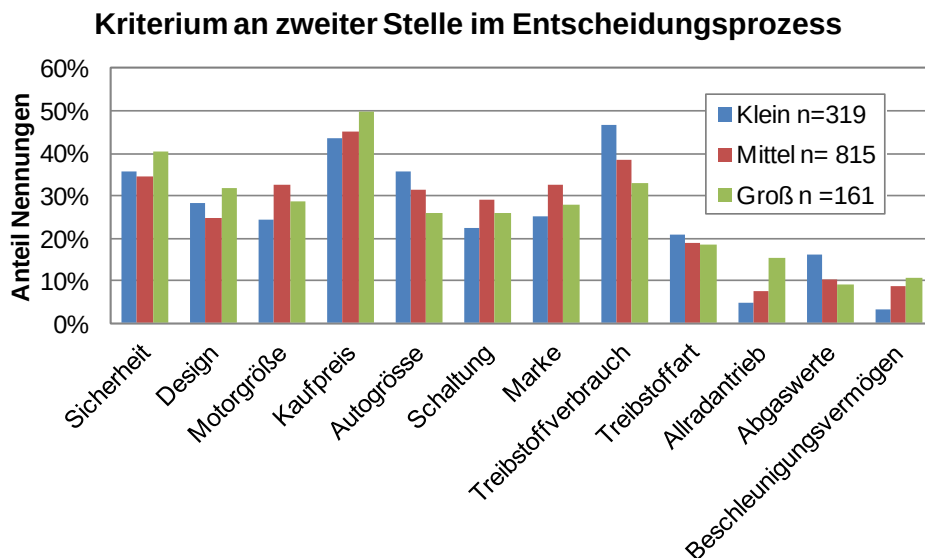


Abbildung 7-30: Kriterien an zweiter Stelle im Pkw-Kauf-Entscheidungsprozess

²⁴² Abbildung 7-29 bis Abbildung 7-32: eigene Auswertung von Peters und de Haan (2006).

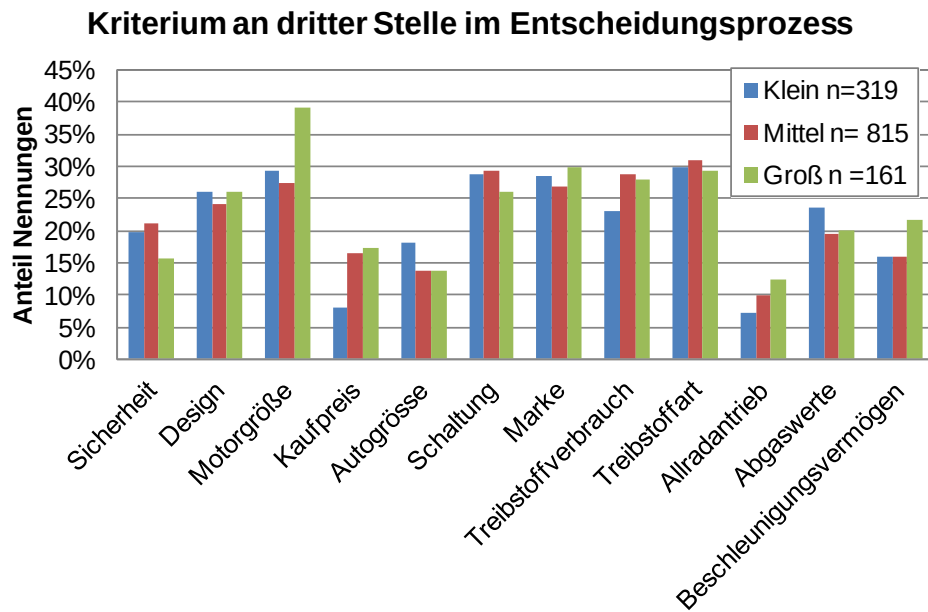


Abbildung 7-31: Kriterien an dritter Stelle im Pkw-Kauf-Entscheidungsprozess

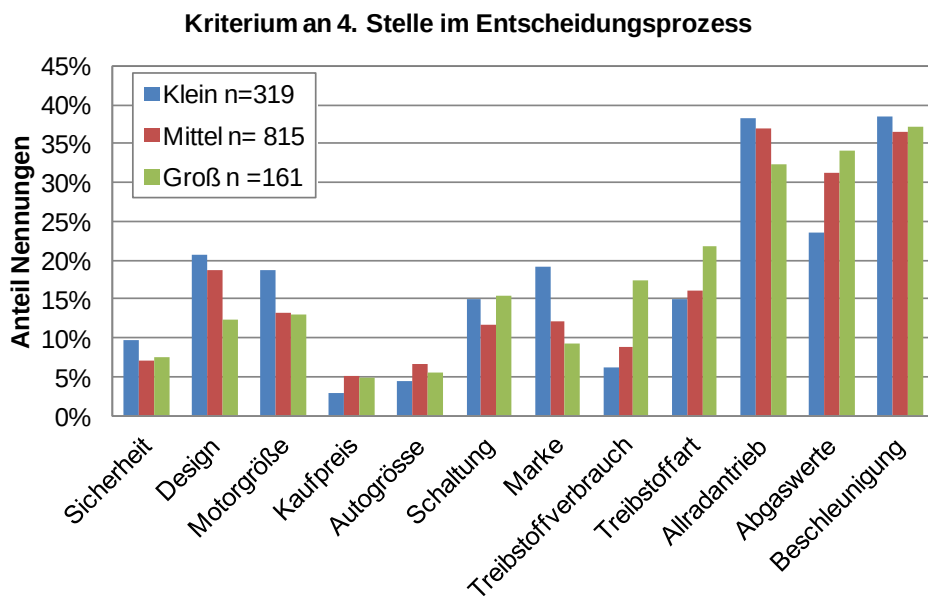


Abbildung 7-32: Kriterien an vierter Stelle im Pkw-Kauf-Entscheidungsprozess

Die folgenden Abbildungen stellen die Verteilung der Kundengruppen gemäß der beschriebenen Zuordnung dar.

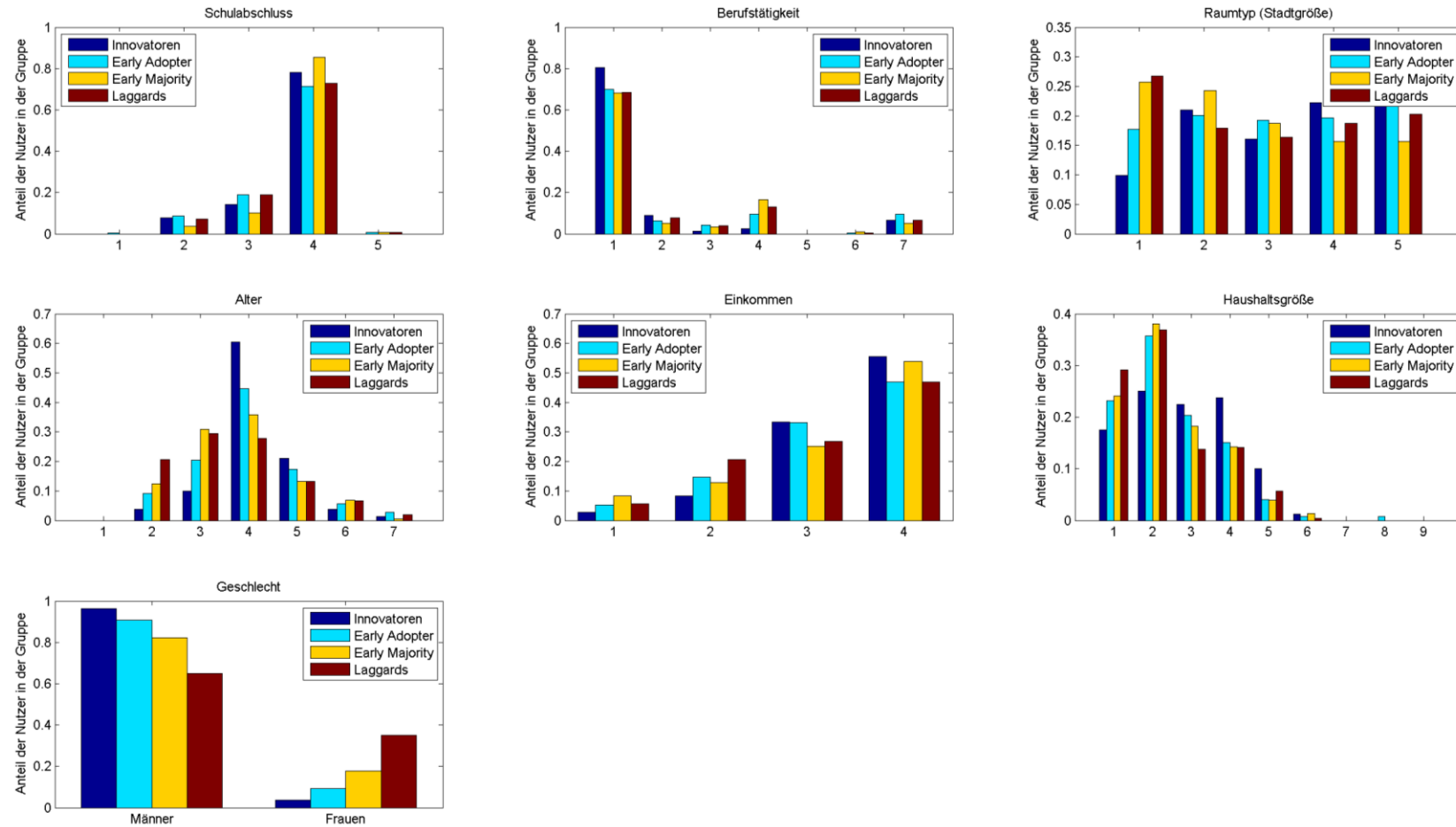


Abbildung 7-33: Verteilung der Kundengruppen im FSEM-Datensatz

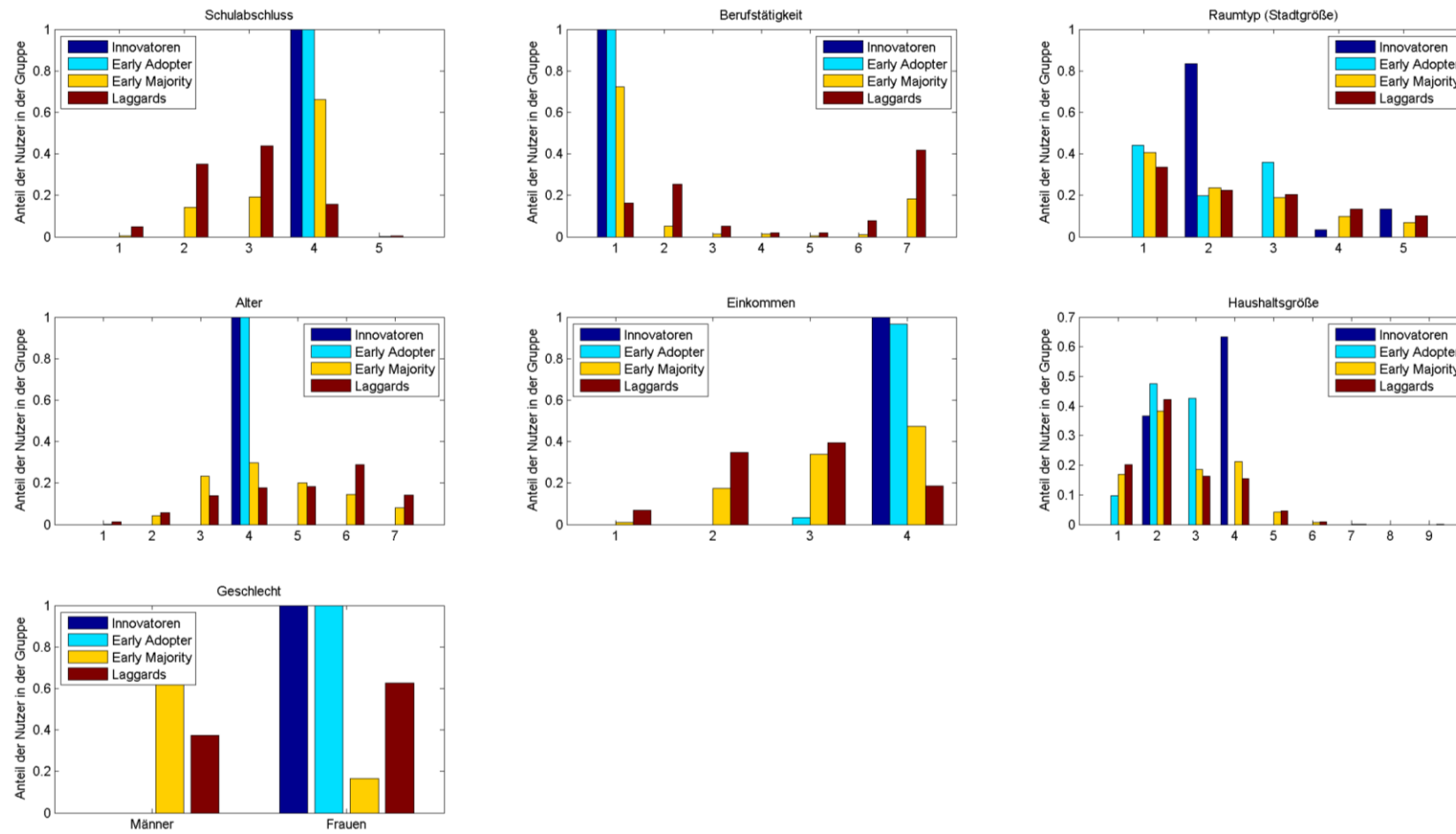


Abbildung 7-34: Verteilung der Kundengruppen im MOP-Datensatz nach Zuordnung mit begrenzter Gruppengröße

7.8 Batteriealterung

Für die TCO-Rechnungen wurde angenommen, dass die Fahrzeugbatterie während der Haltedauer nicht ausgetauscht werden muss. Gerade für Fahrzeuge mit sehr hoher Jahresfahrleistung und insbesondere für solche, die wirtschaftlich sein können, ist diese Annahme weiter zu begründen. In diesem Abschnitt werden daher Batteriealterungsmodelle verwendet, um die Zahl der nach heutigem Kenntnisstand möglichen Ladezyklen einer Lithium-Ionen-Batterie in Jahresfahrleistungen umzurechnen.

Für die Alterung von Fahrzeugbatterien sind verschiedene Faktoren verantwortlich. Ein sehr entscheidender Einfluss auf die Alterung ist die Anzahl der Ladezyklen, also wie oft die Batterie be- und entladen wird. Mit der Zyklenalterung wird der Zusammenhang von Batterienutzung und Alterung beschrieben. Hierbei wird die Anzahl von Vollzyklen bis zum Gebrauchsende (EOL = end of usefull life) angegeben. Das EOL wird meist definiert mit einem irreversiblen Kapazitätsverlust von 20 % und tritt ein wenn die Batterie eine Restkapazität von 80 % des Neuzustandes besitzt.²⁴³ Für die Zyklenalterung ist die Batterienutzung, hier das Fahrverhalten mit dem Fahrzeug, ausschlaggebend. Somit steht die zyklische Lebenszeit der Batterie in unmittelbarem Zusammenhang mit der elektrischen Kilometerleistung des Fahrzeuges.

Die Zyklenbeständigkeit einer Batterie hängt mit der Entladetiefe (DoD = delth of discharge) zusammen. Hierbei errechnet sich die Anzahl der Ladezyklen n bis zum EOL wie folgt

$$n = \alpha \cdot \text{DoD}^\beta$$

Für BEV und REEV gilt $\alpha = 1331$ sowie $\beta = -1,8248$ und für PHEV gilt für t $\alpha = 998$ sowie $\beta = -1,8248$.²⁴⁴ Dies ist in Abbildung 7-35 dargestellt.

Die Zahl der möglichen Ladezyklen steigt dabei mit abnehmender Entladetiefe. Dies führt zu einer höheren entnehmbaren Gesamtenergiemenge bei geringeren Entladetiefen. Aus dem Wöhlerdiagramm (Abbildung 7-35) und der Fahrzeuggröße mit der dazugehörenden Batteriekapazität sowie der höchstmöglichen Entladetiefe lässt sich das EOL in Abhängigkeit zur Jahresfahrleistung errechnen. Für die Berechnungen des EOL mit gegebenen Jahresfahrleistungen gilt:

$$\text{EOL} = \frac{\text{DoD} \cdot \text{Batteriekapazität} \cdot \text{Zyklen}_{\text{DoD}}}{\text{JFL}_{\text{el}} \cdot \text{el. Verbrauch}}$$

²⁴³ Wenzel (2010); Magnor et al. (2009), S. 3128.

²⁴⁴ Naunin, D. (2006); Kley (2011, S. 71); Biere (2009, S. 28).

Dies ist im Folgenden für die einzelnen Fahrzeugtypen und -größen dargestellt.

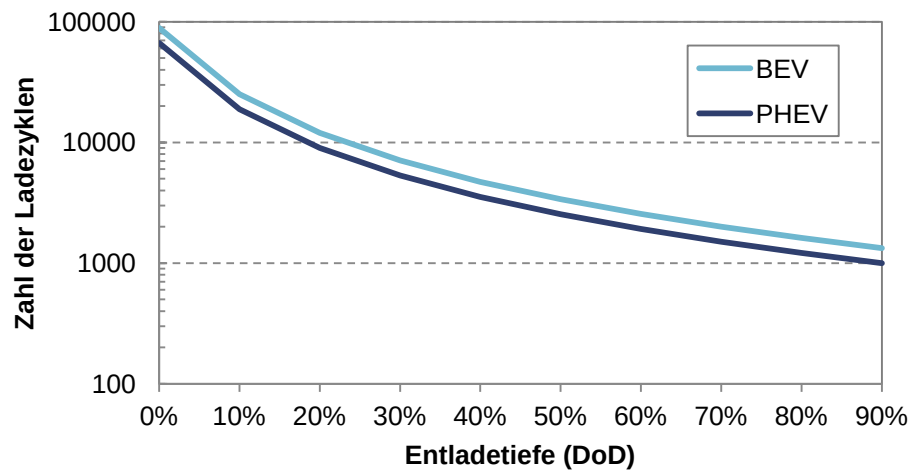


Abbildung 7-35: Zahl der Ladezyklen in Abhängigkeit der Entladetiefe²⁴⁵

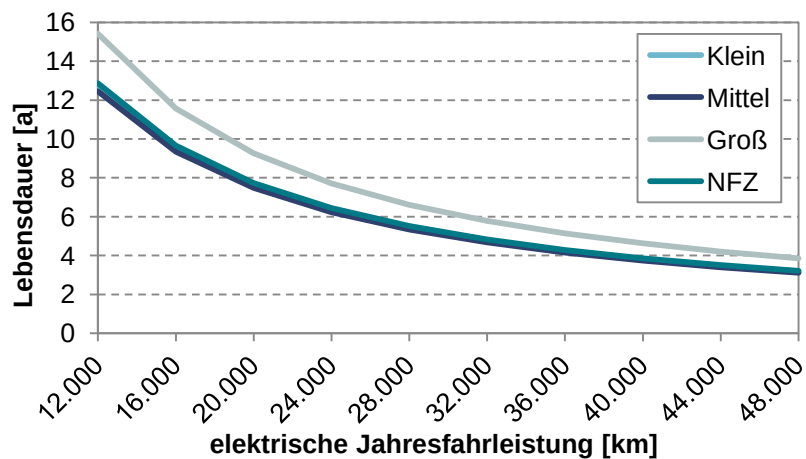


Abbildung 7-36: Lebensdauer der BEV-Batterie in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung

²⁴⁵ Eigene Darstellung auf Basis von Kley (2011) und Biere (2009).

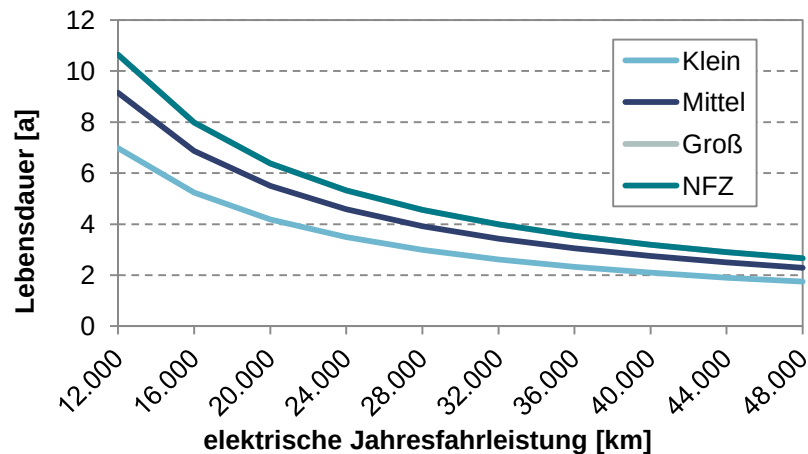


Abbildung 7-37: Lebensdauer REEV-Batterie in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung

Bei allen Fahrzeugtypen und Batteriegrößen ergeben sich relativ geringe Batterie-Lebensdauern, vor allem im Hinblick auf hohe Kilometerleistungen. Dies hat den Hintergrund, dass der Berechnung immer eine vollständige Entladung von SoC 100 % bis hin zu $1-\text{DoD}_{\max}$ zu Grunde gelegt wurde. Bei geringeren Entladungen werden wie oben beschrieben die Zyklenbeständigkeit erhöht und gleichzeitig mehr Gesamtenergie über den Lebenszyklus der Batterie bereitgestellt. Dies führt unweigerlich zu höheren Kilometerleistungen.

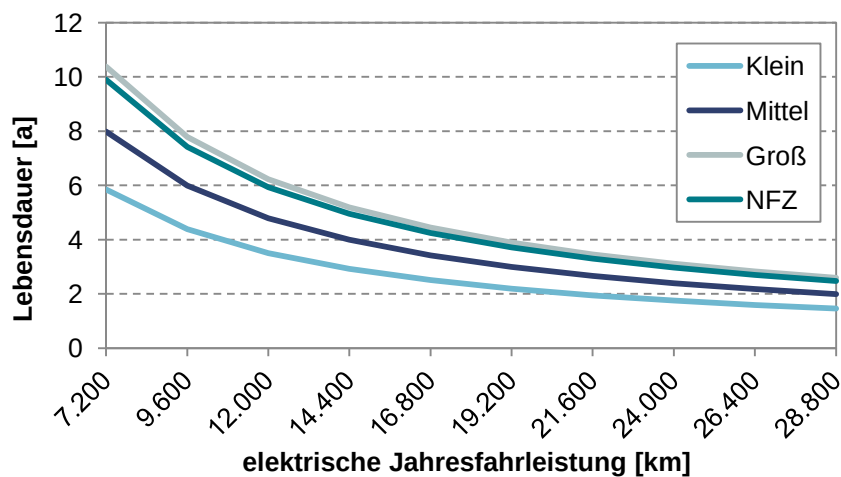


Abbildung 7-38: Lebensdauer PHEV-Batterie in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung²⁴⁶

²⁴⁶ Beim der PHEV wurde leicht abweichend vom Rest der Studie eine Entladetiefe von 70 % angenommen (im Vergleich zu 75 % im Rest der Studie).

Abbildung 7-39 zeigt eine Übersicht der elektrischen Gesamtfahrleistung. Dargestellt sind die verschiedenen Fahrzeugtypen und -größen mit den elektrischen Fahrleistungen bis zum Erreichen des EOL.

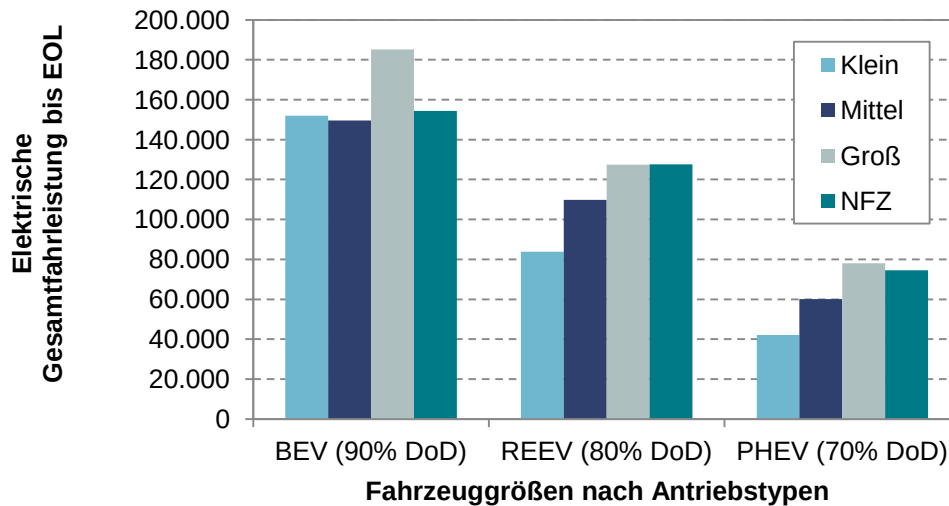


Abbildung 7-39: Elektrische Gesamtfahrleistung bis zum EOL

Im Vergleich zu den mittleren Jahresfahrleistungen der ökonomisch sinnvoll ersetzbaren Fahrzeuge zeigt sich, dass die Zyklenlebensdauer der Batterien ausreichend sein sollte für die Haltedauer des Erstnutzers. Auch danach ist die Batterie jedoch nicht wertlos, sondern verfügt über einen großen Teil ihrer ursprünglichen Kapazität (über 50 %). Weitere technische Entwicklungen (wie bspw. besseres Batteriemanagement) und die Wirkung von Umwelteinflüssen wie der Umgebungstemperatur sind hierbei allerdings nicht berücksichtigt und bleiben abzuwarten. Entscheidend für das Markthochlaufmodell ist, dass kein eklatanter Widerspruch zwischen der angenommenen Batterienutzung und der Batteriehaltbarkeit gibt.

8 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	Wichtige Faktoren im Kaufentscheidungsprozess bei Privatkäufern und deren Berücksichtigung im Modell	5
Abbildung 3-2:	Überblick über die Vorgehensweise im Modell ALADIN	8
Abbildung 3-3:	Technisches Potenzial mit Hilfe von Batteriesimulation dargestellt an einem beispielhaften Fahrprofil	9
Abbildung 3-4:	Anteil der Dieselfahrzeuge im Bestand gewerblicher Halter	10
Abbildung 3-5:	Höhe und Verteilung der Mehrpreisbereitschaft der privater Nutzer	18
Abbildung 3-6:	Schematische Darstellung der Kfz-Steuer	35
Abbildung 3-7:	Übersicht verschiedener Unsicherheiten in den Rechnungen	36
Abbildung 4-1:	Anzahl Neuzulassungen 2001 bis 2012	39
Abbildung 4-2:	Anzahl Neuzulassungen leichter Nutzfahrzeuge 2002 bis 2011	40
Abbildung 4-3:	Aggregationschema der KBA-Segmente	41
Abbildung 4-4:	Anteile der Segmente 2007 bis 2012	42
Abbildung 4-5:	Anteile der aggregierten Segmente 2001 bis 2012	42
Abbildung 4-6:	Anteil der Nutzergruppen in den einzelnen Segmenten	44
Abbildung 4-7:	Restwert eines Pkw in Abhängigkeit des Alters für festen Neupreis und verschiedene Jahresfahrleistungen	45
Abbildung 4-8:	Fahrzeugalter privater und gewerblicher Halter im Bestand	47
Abbildung 4-9:	Löschungs- und Überlebenswahrscheinlichkeit für Pkw in Deutschland	49
Abbildung 4-10:	Spezifische Batteriepreise in €/kWh ohne MwSt.	53
Abbildung 4-11:	Geglättete spezifische Batteriepreise in €/kWh ohne MwSt.	55
Abbildung 4-12:	Verbrauchsreduktion konventioneller Antriebe von 2011 bis 2020	61
Abbildung 4-13:	Verbräuche konventionell 2012	63
Abbildung 4-14:	Verbräuche konventionell 2020	63
Abbildung 4-15:	Verbräuche elektrisch 2012	64
Abbildung 4-16:	Verbräuche elektrisch 2020	65
Abbildung 4-17:	Vergleich der Wartungskosten der Mittelklasse	66
Abbildung 4-18:	Berechnungsschema Kfz-Steuer	67
Abbildung 4-19:	Berechnungsschema Kfz-Steuer für leichte Nutzfahrzeuge	68
Abbildung 4-20:	Stichprobengröße MoP in Abhängigkeit der Berichts- bzw. Fahrtage	73
Abbildung 4-21:	Mittlere Jahresfahrleistung in Abhängigkeit der Fahrzeuggröße	75
Abbildung 4-22:	Mittlere Jahresfahrleistung in Abhängigkeit der Gemeindegroße am Halterstandort und Datenquelle	76
Abbildung 4-23:	Stichprobengröße in Abhängigkeit der Berichts- bzw. Fahrtage	78
Abbildung 4-24:	Aufteilung der REM2030-Fahrprofile und Vergleich mit KiD und Bestand gewerblicher Fahrzeuge	79
Abbildung 4-25:	Boxplot der Tagesfahrleistungen in den KiD2002- und REM2030-Daten	80

Abbildung 4-26:	Zusammensetzung des Benzin-/Dieselpreises zum 31. Dezember 2012 in Cent/Liter	86
Abbildung 4-27:	Entwicklung des Weltrohölpreises	87
Abbildung 4-28:	Historische Entwicklung der Strompreise	89
Abbildung 4-29:	Definition der Kundengruppen	94
Abbildung 4-30:	Markenwechsel am Beispiel VW für die Schweiz	98
Abbildung 4-31:	Segment-Wechselmatrix für private Neuwagen in der Schweiz	100
Abbildung 4-32:	Daten und Regression zur Verfügbarkeit von Elektrofahrzeugen.....	103
Abbildung 4-33:	Übersicht der angenommenen Verfügbarkeit von Elektrofahrzeugen	104
Abbildung 4-34:	Flussdiagramm zur Umsetzung der Markentreue in ALADIN	105
Abbildung 4-35:	Anteil verschiedener Marken an den MOP-Fahrprofilen und den Neuzulassungen in Deutschland (private Halter, Fahrzeuggröße Mittel).....	106
Abbildung 5-1:	Beispielhafte TCO-Lücken für ausgewählte Antriebsarten im Vergleich (Mittleres Szenario, Mittelklasse-Pkw, Private Nutzer, 2020) (jeder rote Punkt stellt ein Fahrprofil dar)	108
Abbildung 5-2:	TCO-Differenzen für private Nutzer in den Jahren 2013 und 2020 im mittleren Szenario mit Infrastrukturkosten und Mehrpreisbereitschaft	110
Abbildung 5-3:	TCO-Differenzen für Flottenfahrzeuge in den Jahren 2013 und 2020 im mittleren Szenario mit Infrastrukturkosten und Mehrpreisbereitschaft.....	111
Abbildung 5-4:	TCO-Differenzen für Dienstwagen in den Jahren 2013 und 2020 im mittleren Szenario mit Infrastrukturkosten und Mehrpreisbereitschaft	112
Abbildung 5-5:	Übersicht der simulierten elektrischen Fahranteile für einzelne Fahrprofile (private Mittelklasse-Pkw 2020)	113
Abbildung 5-6:	Simulierte elektrische Fahranteile REEV für verschiedenen Nutzergruppen (links: Mittelklasse 2020, rechts: Großklasse 2020)	114
Abbildung 5-7:	Berechnete elektrische Fahranteile realer Prius PHEV	115
Abbildung 5-8:	Verteilung der effektiven konventionellen Kraftstoffverbräuche für die Mittelklasse-Pkw in der Simulation	116
Abbildung 5-9:	Anteil der Neuzulassungen, die als PHEV einen gewissen elektrischen Fahranteil bei ihrem Fahrprofil hätten.....	117
Abbildung 5-10:	Markthochlauf nach TCO-Entscheidung inkl. günstigster Infrastrukturkosten, begrenzter Verfügbarkeit und Mehrpreisbereitschaft in den drei Szenarien (Bestand jeweils zum Ende des Jahres)	119
Abbildung 5-11:	Bestand an EV in 2020 unter Einbezug unterschiedlicher Aspekte für das mittlere Szenario ohne Unsicherheitsband	120
Abbildung 5-12:	Neuzulassungen pro Jahr nach TCO- Entscheidung inkl. günstigster Infrastrukturkosten, begrenzter Verfügbarkeit und Mehrpreisbereitschaft in den drei Szenarien	121
Abbildung 5-13:	Anteil von Elektrofahrzeugen an den jährlichen Neuzulassungen im mittleren Szenario	122
Abbildung 5-14:	Aufteilung des Markthochlaufs auf private Halter, Flotten- und Dienstwagen im mittleren Szenario mit Infrastrukturkosten, beschränkter Verfügbarkeit und Mehrpreisbereitschaft	123

Abbildung 5-15:	Aufteilung des Markthochlaufs auf Kleinwagen, Mittelklasse, Großklasse und leichte Nutzfahrzeuge im mittleren Szenario mit Infrastrukturkosten, beschränkter Verfügbarkeit und Mehrpreisbereitschaft.....	124
Abbildung 5-16:	Aufteilung der Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen auf die Antriebsarten (mittleres Szenario mit Infrastrukturkosten, begrenzter Verfügbarkeit und Mehrpreisbereitschaft)	125
Abbildung 5-17:	Verteilung typischer Stellplätze deutscher Pkw über Nacht	126
Abbildung 5-18:	Markthochlauf für die Ladeinfrastruktur (nur Primärladepunkte enthalten) im mittleren Szenario mit Infrastrukturkosten, beschränkter Verfügbarkeit und Mehrpreisbereitschaft und der Ladeinfrastrukturenoption IP1IG1 (siehe Tabelle 4-31).....	127
Abbildung 5-19:	Markthochlauf von Elektrofahrzeugen im mittleren Szenario nur mit Infrastrukturkosten bei zwei unterschiedlichen Ladeinfrastrukturenoptionen (siehe Tabelle 4-31)	128
Abbildung 5-20:	Verteilung aller Fahrprofile (ALL) und der für EV TCO-optimalen (EV) nach Beschäftigung und Gemeindegröße	129
Abbildung 5-21:	Sensitivität des Bestandes an Elektrofahrzeugen 2020	132
Abbildung 5-22:	Sensitivitäten zum Bestand an Elektrofahrzeugen 2020 im mittleren Szenario (Basisvariante)	133
Abbildung 5-23:	Ergebnisse der Variantenrechnungen auf den Bestand 2020 im mittleren Szenario	134
Abbildung 5-24:	Wirkungen der Politikmaßnahmen im Vergleich zum mittleren Szenario mit Infrastrukturkosten, beschränkter Verfügbarkeit und Mehrpreisbereitschaft.....	137
Abbildung 7-1:	TCO-Differenzen zwischen Benzin und BEV (private Mittelklasse 2020)	154
Abbildung 7-2:	TCO-Differenzen zwischen Diesel und REEV (private Mittelklasse 2020)	154
Abbildung 7-3:	Markthochlauf & TCO Pro-EV-Szenario (Opt000)	155
Abbildung 7-4:	Markthochlauf & TCO Pro-EV-Szenario (Opt111)	155
Abbildung 7-5:	Markthochlauf & TCO mittleres Szenario (Opt000)	156
Abbildung 7-6:	Markthochlauf & TCO mittleres Szenario (Opt111)	156
Abbildung 7-7:	Markthochlauf & TCO Contra-EV-Szenario (Opt000)	157
Abbildung 7-8:	Markthochlauf & TCO Contra-EV-Szenario (Opt111)	157
Abbildung 7-9:	Simulierte elektrische Fahranteile und nichtparametrische Regression über N nächste Nachbarn.....	158
Abbildung 7-10:	Simulierte elektrische Fahranteile und nichtparametrische Regression über die zehn nächsten Nachbarn.....	159
Abbildung 7-11:	Auswertung des elektrischen Fahranteils für Fahrzeug 1202654863 (REM2030-Daten) für Fahrtage (links) und Berichtstage (rechts)	167
Abbildung 7-12:	Auswertung des elektrischen Fahranteils für Fahrzeug 1208510685 (REM2030-Daten) für Fahrtage (links) und Berichtstage (rechts)	167
Abbildung 7-13:	Quantile der Konfidenzintervallverteilung des mittleren elektrischen Fahranteils für die REM2030-Fahrprofilhebung.....	168
Abbildung 7-14:	Verteilungsfunktionen der Konfidenzintervalle von Fahrtag 2 (blau) bis Fahrtag 27 (rot) für REEV- (rechts) und PHEV-Antriebe (links).....	169

Abbildung 7-15:	Quantile der Konfidenzintervallverteilung des mittleren elektrischen Fahranteils für die Fahrprofilerhebung des Mobilitätspanels	170
Abbildung 7-16:	Verteilungsfunktionen der Konfidenzintervalle von Fahrtag 2 (blau) bis 7 (rot) für REEV (rechts) und PHEV (links)	171
Abbildung 7-17:	SQL-Code zur Extraktion von Pkw-Profilen für das Jahr 2010 (Teil 1)	175
Abbildung 7-18:	SQL-Code zur Extraktion von Pkw-Profilen für das Jahr 2010 (Teil 2)	176
Abbildung 7-19:	Häufigkeitsverteilung der Jahresfahrleistung (links) und logarithmierten Jahresfahrleistung und Normalverteilung (rechts)	178
Abbildung 7-20:	Relative Häufigkeitsverteilung der Fahrzeuggrößen in den betrachteten Quellen	179
Abbildung 7-21:	Relative Häufigkeitsverteilung der Gemeindegößen am Halterstandort in den betrachteten Studien	180
Abbildung 7-22:	Kumulative Dichteverteilungen der Mehrpreisbereitschaften innerhalb der Nutzergruppen	181
Abbildung 7-23:	Verteilung der FSEM- und MOP-Daten nach Beschäftigungsart.....	185
Abbildung 7-24:	Verteilung der FSEM- und MOP-Daten nach Geschlecht	185
Abbildung 7-25:	Verteilung der FSEM- und MOP-Daten nach Bildungsstand.....	186
Abbildung 7-26:	Verteilung der FSEM- und MOP-Daten nach Altersgruppe	186
Abbildung 7-27:	Verteilung der FSEM- und MOP-Daten nach Haushaltseinkommen.....	187
Abbildung 7-28:	Kriterien an erster Stelle im Pkw-Kauf-Entscheidungsprozess.....	188
Abbildung 7-29:	Kriterien an erster Stelle im Pkw-Kauf-Entscheidungsprozess.....	188
Abbildung 7-30:	Kriterien an erster Stelle im Pkw-Kauf-Entscheidungsprozess.....	189
Abbildung 7-31:	Kriterien an erster Stelle im Pkw-Kauf-Entscheidungsprozess.....	189
Abbildung 7-32:	Verteilung der Kundengruppen im FSEM-Datensatz.....	190
Abbildung 7-33:	Verteilung der Kundengruppen im MOP-Datensatz nach Zuordnung mit begrenzter Gruppengröße.....	191
Abbildung 7-34:	Zahl der Ladezyklen in Abhängigkeit der Entladetiefe.....	193
Abbildung 7-35:	Lebensdauer der BEV-Batterie in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung	193
Abbildung 7-36:	Lebensdauer REEV-Batterie in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung	194
Abbildung 7-37:	Lebensdauer PHEV-Batterie in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung	194
Abbildung 7-38:	Elektrische Gesamtfahrleistung bis zum EOL.....	195

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Im Modell ALADIN betrachtete ökonomische Größen	12
Tabelle 3-2:	Betrachtete Kombinationen von Nutzergruppe und Fahrzeugsegment	13
Tabelle 3-3:	Parameterwerte für die drei Szenarien	22
Tabelle 4-1:	Anteil der aggregierten Segmente an den Neuzulassungen	43
Tabelle 4-2:	Gesamte Neuzulassungen nach Haltergruppen	44
Tabelle 4-3:	Parameter für Restwertberechnung	46
Tabelle 4-4:	Haltezeit und Fahrzeugalter nach verschiedenen Quellen	48
Tabelle 4-5:	Verwendete Haltezeit nach Haltergruppe	48
Tabelle 4-6:	Parameterwerte für Bestandsmodellierung	49
Tabelle 4-7:	Antriebsarten pro Segment im Zweiten Zwischenbericht der NPE.....	50
Tabelle 4-8:	Antriebsarten pro Segment für die diese Studie	50
Tabelle 4-9:	Batteriegrößen und Entladetiefen Markthochlaufmodell 2011.....	51
Tabelle 4-10:	Vergleich von Batteriegrößen und Entladetiefen verschiedener Studien	52
Tabelle 4-11:	Antriebsarten pro Segment für diese Studie	52
Tabelle 4-12:	Spezifische Batteriepreise in €/kWh ohne MwSt.	53
Tabelle 4-13:	Parameter für Batteriepreis-Lernkurven.....	54
Tabelle 4-14:	Geglättete spezifische Batteriepreise in €/kWh ohne MwSt.	54
Tabelle 4-15:	Nettolistenpreise laut NPE für 2011 und 2020	55
Tabelle 4-16:	Vergleich der Fahrzeugsegmente der Markthochlaufmodelle	56
Tabelle 4-17:	Dieselaufpreis-Statistik für die wichtigsten Modelle 2012	57
Tabelle 4-18:	Statistiken für Dieselaufpreise gegenüber Benzinfahrzeugen nach Fahrzeuggröße	59
Tabelle 4-19:	Aufpreis der elektrischen Antriebe	59
Tabelle 4-20:	Ergebnis Nettolistenpreise 2011 und 2020	60
Tabelle 4-21:	Wartungskosten	67
Tabelle 4-22:	Durchschnittliche Hubraumgröße je Segment	68
Tabelle 4-23:	Fahrprofilerhebungen für den Privat- und Wirtschaftsverkehr in Deutschland	70
Tabelle 4-24:	MOP-Fahrprofile nach Beschäftigung und Gemeindegröße.....	74
Tabelle 4-25:	MiD2002-Fahrprofile nach Beschäftigung und Gemeindegröße	74
Tabelle 4-26:	Stichprobengröße, mittlere Jahresfahrleistung und Standardabweichung private Nutzer nach Fahrzeuggröße	76
Tabelle 4-27:	Stichprobengröße, mittlere Jahresfahrleistung und Standardabweichung private Nutzer nach Gemeindegröße	77
Tabelle 4-28:	Verteilung der REM2030-Fahrprofile nach Unternehmens- und Fahrzeuggröße.....	78
Tabelle 4-29:	Verteilung der Fahrprofile auf die Neuzulassungen.....	81
Tabelle 4-30:	Ladeleistungen und Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur	84
Tabelle 4-31:	Kosten für Ladeinfrastruktur im ersten Infrastrukturszenario (IP1IG1)	85

Tabelle 4-32:	Benzin- und Dieselpreisentwicklung in den Szenarien in €-Cent ₂₀₁₂ /l	88
Tabelle 4-33:	Strompreisentwicklung in den drei Szenarien in ct ₂₀₁₁ /kWh.....	90
Tabelle 4-34:	Parameterwerte für Pro-EV-Szenario	92
Tabelle 4-35:	Parameterwerte für das mittlere Szenario	92
Tabelle 4-36:	Parameterwerte für Szenario Contra-EV	92
Tabelle 4-37:	Kurzbeschreibung der FSEM- und iZeus-Daten.....	93
Tabelle 4-38:	Höhe der Mehrpreisbereitschaften in €.....	95
Tabelle 4-39:	Regressionsparameter für Markenverfügbarkeit.	102
Tabelle 5-1:	Übersicht der ökonomisch interessanten Jahresfahrleistungen (TCO mit Infrastrukturkosten)	109
Tabelle 5-2:	Statistiken der 95 %-Konfidenzintervalle der elektrischen Fahranteile für PHEV und REEV	118
Tabelle 5-3:	Durchschnittliche Fahrzeug-Nutzung von Elektrofahrzeugen.....	130
Tabelle 5-4:	Parameterwerte für Sensitivitäten incl. MwSt.	132
Tabelle 5-5:	Profiteure und Kosten der einzelnen Maßnahmen (Werte in €)	137
Tabelle 7-1:	Übersicht aller Eingangsparameter im zeitlichen Verlauf (Alle Kosten ohne Mehrwertsteuer)	144
Tabelle 7-2:	Ladeinfrastrukturszenarien für Privatanutzer	150
Tabelle 7-3:	Ladeinfrastrukturszenarien für gewerbliche Nutzer	151
Tabelle 7-4:	Kosten für Ladeinfrastruktur im Jahr 2013.....	152
Tabelle 7-5:	Kosten für Ladeinfrastruktur im Jahr 2020.....	153
Tabelle 7-6:	Fahrzeugmarken bei Neuzulassungen 2012 nach Fahrzeuggröße.....	160
Tabelle 7-7:	Übersicht der angekündigten Elektrofahrzeuge nach Marken.....	161
Tabelle 7-8:	Unsicherheiten der elektrischen Fahranteile für PHEV und REEV.....	172
Tabelle 7-9:	Veränderung in den Tabellen und Lösungen in den SQL-Abfragen zur Gleichbehandlung der Daten wie 2010.....	177
Tabelle 7-10:	Häufigkeit der Fahrzeuggrößen nach Studien	178
Tabelle 7-11:	Verwendete Fahrprofilerhebungen	179
Tabelle 7-12:	Überprüfung der statistischen Zuordnung zu Nutzengruppen.	183

9 Quellen

- ADAC (2009): ADAC-Umfrage: Kaufbereitschaft Elektroautos. Landsberg a. Lech: ADAC.
- ADAC (2013). „Diesel gegen Benzin im Kostenvergleich“. Stand 01/2013.
http://www.adac.de/_mmm/pdf/b-d-vgl_47090.pdf
- Axsen, J., Burke, A., und Kurani, K. 2008. „Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs): Goals and the State of Technology circa 2008“.
- BCG (2013): Trendstudie 2030+ Kompetenzinitiative Energie des BDI. Studie der Boston Consulting Group im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Industrie (BDI) BCG: München
- Becker, T. A. 2009. „Electric Vehicles in the United States – A New Model with Forecasts to 2030“.
- Biere (2009): Identifizierung von potenziellen Erstnutzern der Elektromobilität und Analyse der Stromlastkurve bei verschiedenen Ladestrategien. Diplomarbeit. Karlsruhe, Fraunhofer ISI.
- Biere, D.; Dallinger, D.; Wietschel, M. (2009). Ökonomische Analyse der Erstnutzer von Elektrofahrzeugen. Zeitschrift für Energiewirtschaft 33 (Nr.2): 173-181.
- Blum, A. (2013): Electro-mobility: statistical analysis of human mobility patterns. Masterarbeit, Interdisziplinäres Fernstudium Umweltwissenschaften, FernUni in Hagen und Fraunhofer UMSICHT.
- Bradley, M. A.; Daly, A. J. (1991): Estimation of logit choice models using mixed stated preference and revealed preference information. In: Les methodes d'analyse des comportements de déplacements pour les annees 1990. 6^e Conference internationale sur les comportements de déplacements, Chateau Bonne Entente, Quebec, 22.-24.05.1991, Vol. 1., S. 116-133
- Brown, L. D., Cai, T. T. und DasGupta, A.: Interval Estimation for a Binomial Proportion, Statistical Science 16 (2), 101–133 (2001).
- Brownstone, D und T. F. Golob (2009): The impact of residential density on vehicle usage and energy consumption. Journal of Urban Economics, 65, S. 91-98.
- Bruce, I.; Butcher, N.; Fell, C. (2012): Lessons and Insights from Experience of Electric Vehicles in the Community. In: Electric Vehicle Symposium EVS 26, Los Angeles.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2011a): Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität. Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Studie des Öko-Institut e.V. und ISOE – Institut für sozial-ökologische Forschung Freiburg, Berlin.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2011b): Attraktivität und Akzeptanz von Elektroautos – Arbeitspaket 1 des Projekts OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen ISOE – Institut für sozial-ökologische Forschung, Berlin.
- Bundesregierung (2009): Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. Berlin.
- Bundesregierung (2011): Regierungsprogramm Elektromobilität, Rostock: Publikationsversand der Bundesregierung. Berlin: Bundesregierung.
- Bünger, U., Weindorf, W. (2011): Well-to-Wheel-Analyse von Elektrofahrzeugen. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn.

- Burke, A.F. 2007. „Comparisons of Lithium-ion Batteries and Ultracapacitors in Hybrid-electric Vehicle Applications“. EET-2007 European Ele-Drive Conference.
- CAMA (2011): Outlook auf den deutschen Automobilmarkt im Jahr 2011, CAMA Center für Automobilmanagement, Universität Duisburg-Essen, CAMA
- Dallinger, D. (2012): Plug-in electric vehicles integrating fluctuating renewable electricity, Dissertation an der Universität Kassel.
- DAT (2011): DAT Report (2011). Ostfildern: Deutsche Automobil Treuhand (DAT).
- Dataforce (2011): Elektrofahrzeuge in deutschen Fuhrparks – Zur künftigen Bedeutung von Elektrofahrzeugen in deutschen Flotten, Dataforce-Studie, Dataforce Verlagsgesellschaft für Business Informationen: Frankfurt a.M.
- de Haan, P.; Peters, A., (2005): Charakteristika und Beweggründe von Käufern des Toyota Prius 2. Forschungsbericht zum Projekt Hybridfahrzeuge. Berichte zum Schweizer Autokaufverhalten Nr. 1. ETH Zürich, IED-NSSI, Report EMDM1151 (<http://www.nssi.ethz.ch/res/emdm/>)
- Dexheimer, V. (2003). „Hedonic Methods of Price Measurement for Used Cars“. https://www.destatis.de/EN/FactsFigures/NationalEconomyEnvironment/Prices/HedonicUsedCars.pdf?__blob=publicationFile.
- Dieckhoff, C., Fichtner, W., Grunwald, A., Meyer, S., Nast, M., Nierling, L., Renn, O., Voß, A., Wietschel, M., [Hrsg.] (2011): Energieszenarien. Konstruktion, Bewertung und Wirkung – "Anbieter" und "Nachfrager" im Dialog. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe. 2011. <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000021684>
- DIN, Hrsg. (2010). „DIN EN 62196: Stecker, Steckdosen, Fahrzeugsteckvorrichtungen und Fahrzeugstecker – Ladung von Elektrofahrzeugen – Teil 1: Leitungsgebundenes Laden von Elektrofahrzeugen bis 250 A Wechselstrom und 400 A Gleichstrom (Entwurf)“.
- DNR (2012): Überarbeitung der EU-Steuerrichtlinie, DNR Deutscher Naturschutzring EU-Koordination, download (08.03.2013): <http://www.eu-koordination.de/umweltnews/news/politik-recht/1652-steckbrief-ueberarbeitung-der-eu-energiesteuerrichtlinie>
- Doll, C., Gutmann, M. und Wietschel, M. (2011): Integration von Elektrofahrzeugen in Carsharing-Flotten. Simulation anhand realer Fahrprofile. Karlsruhe: Fraunhofer ISI. http://www.elektromobilitaet.fraunhofer.de/Images/FSEM_Elektromobilitaet_und_Carsharing_fin-2011-05-06_tcm243-90486.pdf
- Dütschke, E.; Schneider, U.; Sauer, A.; Wietschel, M.; Hoffmann, J., Domke, S. (2012): Roadmap zur Kundenakzeptanz. Zentrale Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung in den Modellregionen. Karlsruhe: Fraunhofer ISI
- Ecotality and Idaho National Lab (2012): The EV Project Q1 (2012) Report.
- ESMT (European School of Management and Technology) (2011): Marktmodell Elektromobilität. Teil 1: Ansatz und Ergebnisse. ESMT Berlin
- EU-Kom (2011): Vorschlag für eine RICHTLINIE DES RATES zur Änderung der Richtlinie 2003/96/EG zur Restrukturierung der gemeinschaftlichen Rahmenvorschriften zur Besteuerung von Energieerzeugnissen und elektrischem Strom, Brüssel, den KOM(2011) 169/3, 2011
- Fahrmeir, L.; Künstler, R.; Peugeot, I.; Tutz, G. (2011). Statistik – Der Weg zur Datenanalyse. Siebte Auflage, Springer. 2011.
- Fahrmeir, L., Kneib, T. und Lang, S. (2009). Regression. Springer. 2009

- Fifo (2011): Steuerliche Behandlung von Firmenwagen in Deutschland. Laura Diekmann, Eva Gerhards, Stefan Klinski, Bettina Meyer, Sebastian Schmidt, Michael Thöne.. FiFo-Berichte Nr. 13. Köln 2011. Heruntergeladen von http://www.foes.de/pdf/2011_Firmenwagenbesteuerung_lang.pdf (letzter Zugang 12.02.2013).
- FOM (2010): FOM-Umfrage: Elektromobilität Kauf- und Mobilitätsverhalten in Bezug auf Elektroautomobile. Hochschule für Ökonomie und Management.
- Fraunhofer ISI (2012): REM2030 Driving Profiles Database V2012. Karlsruhe.
- Frigg, R. und Hartmann, S. (2012): Models in Science. The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2012 Edition), Edward N. Zalta (Hrsg.), <http://plato.stanford.edu/archives/fall2012/entries/models-science/>.
- Geroski, P.A. (2000). „Models of technology diffusion“. *Research Policy* 29 (4–5) (April): 603–625. doi:10.1016/S0048-7333(99)00092-X.
- GfK (2010): Hohe Kaufbereitschaft für Elektroautos. Studie der GfK Panel Services Deutschland zu Einstellungen und Akzeptanz von Elektrofahrzeugen. (http://www.gfk.com/imperia/md/content/presse/pressemeldungen2010/20100921_pm_elektroautos_dfin.pdf, Mai 2012.
- Globisch, J. und Dütschke, E. (2013): Anwendersicht auf Elektromobilität in gewerblichen Flotten. Ergebnisse aus den Projekten mit gewerblichen Nutzern von Elektrofahrzeugen im Rahmen des BMVBS-Vorhabens „Modellregionen für Elektromobilität 2009—2011“. Fraunhofer ISI, Karlsruhe.
- Gnann, T.; Plötz, P.; Haag, M. (2013): What is the future of public charging infrastructure for electric vehicles? – A techno-economical assessment of public charging points for Germany. In: Proceedings of the 2013 ECEEE summer study, Hyeres
- Gnann, T., Plötz, P.; Kley, F. (2012): Vehicle charging infrastructure demand for the introduction of plug-in electric vehicles in Germany and the US. In: Electric Vehicle Symposium 26 (EVS26). Los Angeles.
- Gnann, T.; Plötz, P.; Zischler, F.; Wietschel, M. (2012): Elektromobilität im Personenwirtschaftsverkehr – eine Potenzialanalyse. Working Paper. Sustainability and Innovation. Karlsruhe: Fraunhofer ISI
- Golze, A. (2011). „Elektrofahrzeuge in deutschen Fuhrparks“. Dataforce.
- Götz, K.; Sunderer, G.; Birzle-Harder, B.; Deffner, J. (2011): Attraktivität und Akzeptanz von Elektroautos. Arbeitspaket 1 des Projekts OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Anhang zum Schlussbericht im Rahmen der Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Frankfurt/Main
- Greene, D. L. (1985): Estimating daily vehicle usage distributions and the implications for limitedrange vehicles. *Transportation Research Part B*, vol. 19B, no. 4, pp. 347–358
- Greiner, O. und Deeg, M. (2013). „Mobilitäts-Studie 2012/13 – Mobilität 3.0“. Stuttgart: Horvath & Partners.
- Hacker, F., Harthan R., Kasten, P., Loreck, C., und Zimmer, W. (2011). Marktpotenziale und CO₂-Bilanz von Elektromobilität – Arbeitspakete 2 bis 5 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Anhang zum Schlussbericht im Rahmen der Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Freiburg, Berlin: Öko-Institut.

- Helms, H., Jöhrens, J., Hanusch, J., Höpfner, U., Lambrecht, U. und Pehnt, M. (2011). „UMBRéLA Umweltbilanzen Elektromobilität“. Grundlagenbericht. Heidelberg: ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH.
- Höpfner, U., Hanusch, J. und Lambrecht, U. (2009): Abwrackprämie und Umwelt – eine erste Bilanz. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg 2009. http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ifeu_abwrackpraemie_bf.pdf
- Huang J.; Haab, T. C.; Whitehead J. C. (1997): Willingness to Pay for Quality Improvements: Should Revealed and Stated Preference Data Be Combined? Journal of Environmental Economics and Management, Volume 34, Issue 3, November 1997, S. 240-255
- Hubject (2013). „HUBJECT – CONNECTING EMOBILITY NETWORKS.“ <http://www.hubject.com/pages/de/index.html#1-1-home.html>.
- infas und DLR (2002). „Mobilität in Deutschland (MiD) 2002“. Bonn, Berlin: infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR).
- IVS und TU Braunschweig (2002). „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2002 (KiD2002)“. Braunschweig: IVS Institut für Verkehr und Stadtbauwesen, Technische Universität Braunschweig.
- Kahouli-Brahmi, S. (2008): Technological learning in energy–environment–economy modelling: A survey, Energy Policy, Volume 36, 138-162, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2007.09.001>
- KBA (2012b): Neuzulassungen von Personenkraftwagen im Januar 2001 – 2012 nach Segmenten und Modellreihen (FZ 11).
- KBA (2012b): Neuzulassungen von Lkw in den Jahren 2002 bis 2011 nach zulässiger Gesamtmasse. http://www.kba.de/cln_033/nn_124394/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Groesse_nklassen/n_grossenklassen__lkw__zeitreihe.html?__nnn=true, zuletzt abgerufen am: 22.03.2013.
- KBA (2013a). „Top3 Neuzulassungen pro Segment 2012“. http://www.kba.de/cln_030/nn_1296562/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/2012/201212GV1monatlich/201212__n_top3__teil1__tabelle.html
- KBA (2013b). Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern in den Jahren 2003 bis 2012 nach Fahrzeugklassen mit dem Durchschnittsalter der Fahrzeuge in Jahren. http://www.kba.de/cln_032/nn_191188/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Fahrzeugalter/b__alter__kfz__z.html
- Kim, J. und Brownstone, D. (2013): The Impact of Residential Density on Vehicle Usage and Fuel Consumption: Evidence from National Samples. Energy Economics (2013), doi: 10.1016/j.eneco.2013.06.012
- Kellner, C. (2008). *Diffusion innovativer Technologien am Beispiel brennstoffzellengetriebener Pkws*. Logos Berlin.
- Kley, F. (2011): Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge – Entwicklung und Bewertung einer Ausbaustrategie auf Basis des Fahrverhaltens. ISI-Schriftenreihe Innovationspotenziale, Fraunhofer-Verlag.
- Knie, A., Berthold, O., Harms, S., Truffer, B. (1999): Die Neuerfindung urbaner Automobilität. Elektroautos und ihr Gebrauch in den USA und Europa. Berlin.
- Knie, A., Kramer, S., Scherf, C., Wolter, F. (2012): E-Carsharing als Bestandteil multimodaler Angebote. In: Internationales Verkehrswesen 64(1), S. 42–45.

- Knörr, W., C. Heidt und A. Schacht (2012). Aktualisierung "Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960 – 2030" (TREMODO, Version 5.3) für die Emissionsberichtserstattung 2013 (Berichtsperiode 1990 – 2011). Heidelberg: ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH.
- Knörr, W., Kutzner, F., Lambrecht, U. und Schacht, A. (2010). „Fortschreibung und Erweiterung "Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030 (TREMODO, Version 5)“. Heidelberg: ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH.
- Leipziger Institut für Energie GmbH (2012): Entwicklung der Preise für Strom und Erdgas in Baden-Württemberg bis 2020, Endbericht, Leipzig
- Lin, Z.; Dong, J.; Liu, C.; Greene, D. L. (2012): PHEV Energy Use Estimation: Validating the Gamma Distribution for Representing the Random Daily Driving Distance, in TRB 91st annual meeting. Transportation Research Board, 2012, pp. 1–14.
- Linssen, J., Schulz, A., Mischinger, S., Maas, H., Günther, C., Weinmann, O., Abbasi, E., Bickert, S., Danzer, M., Hennings, W., Lindwedel, E., Marker, S., Schindler, V., Schmidt, A., Schmitz, P., Schott, B., Strunz, K. und Waldowski, P. (2012): Netzintegration von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebssystemen in bestehende und zukünftige Energieversorgungsstrukturen, Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment Band / Volume 150, Forschungszentrum Jülich: Jülich
- Linz, S., Dexheimer, V. und Kathe, A. (2003). „Hedonische Preismessung bei Gebrauchtwagen“. *Wirtschaft und Statistik* (Juni): 538.
- Magnor, D., Gerschler, J. B., Ecker, M., und Sauer, D.-U. (2009): Concept of a Battery Aging Model for Lithium-Ion Batteries Considering the Lifetime Dependency on the Operation Strategy in Hamburg, 3128–3134.
- Malorny, A., und A Krieger (2010). „Electric vehicles in megacities“.
- Massiani, J. (2010). „Modelling and Evaluation of the diffusion of electric vehicles: existing models, results and proposal for a new model for policy in european countries“. Berlin: ESMT – European School of Management and Technology.
- Mayer, T., Kreyenberg, D., Wind, J., Braun, F. (2012): Feasibility study of 2020 target costs for PEM fuel cells and lithium-ion batteries: A two-factor experience curve approach, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 37, 14463-14474, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.07.022>.
- Mayor's Office of Long-Term Planning and Sustainability (2010). „Exploring electric vehicle adoption in New York City“. http://www.nyc.gov/html/om/pdf/2010/pr10_nyc_electric_vehicle_adoption_study.pdf.
- McKinsey (2012): Die Energiewende in Deutschland – Anspruch, Wirklichkeit und Perspektiven. Studie von McKinsey & Company
- Meade, N., und Towhidul I. 2006. „Modelling and forecasting the diffusion of innovation – A 25-year review“. *International Journal of Forecasting* 22 (3): 519–545. doi:16/j.ijforecast.2006.01.005.
- MiD (2008): Mobilität in Deutschland 2008 – Ergebnisbericht: Follmer, R.; Gruschwitz, D.; Jesske, B. et al. (2010): Techn. Ber.. infas – Institut für angewandte Sozialwissenschaft, Institut für Verkehrsforschung des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt e.V., Berlin
- Mock, P. (2010): Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21). Universität Stuttgart.

- Mock, P., German, J., Bandivadekar, A., Riemersma, I., Ligterink, N. and Lambrecht, U. (2013): From laboratory to road – A comparison of official and ‘real-world’ fuel consumption and CO₂ values for cars in Europe and the United States. ICCT white paper.
<http://www.theicct.org/laboratory-road>
- MOP (2010). „Mobilitätspanel Deutschland‘ 1994-2010“. Projektbearbeitung durch das Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe (TH). Verteilt durch die Clearingstelle Verkehr des DLR-Instituts für Verkehrsforschung: www.clearingstelle-verkehr.de.
- Morrow, K., D. Karner, und J. Francfort (2008). „Plug-in hybrid electric vehicle charging infrastructure review“. Idaho National Laboratory.
- Mueller, M. G.; de Haan, P. (2006): Autokaufentscheid: Treue zur Marke, zum Fahrzeugsegment, zur Treibstoffart und zum Getriebetyp. Deskriptive Auswertung von Transaktionsdaten. Bericht zum Schweizer Autokaufverhalten 10. Zürich: ETH Zürich
- Mueller, M.; de Haan, P. (2009): How much do incentives affect car purchase? Agent-based micro simulation of consumer choice of new cars. In: Energy Policy 37 (2009), 1072–1082.
- MWV (2013): Statistiken-Preise, Verband der Mineralölwirtschaft, download (13.03.2013): <http://mwv.de/index.php/daten/statistikenpreise/?loc=8>, , zuletzt abgerufen: 22.03.2013
- Naunin, D. (2006): Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge: Technik, Strukturen und Entwicklungen, Expert-Verlag.
- Nitsch, J., Peggler, T., Naegler, T., Heide, D., De Tena, D. L., Trieb, F., et al. (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global Schlussbericht, Stuttgart, Kassel, Teltow, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE).
- NPE (2010). „Nationale Plattform Elektromobilität (NPE): Zwischenbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität“, Berlin: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung.
- NPE (2011a): Nationale Plattform Elektromobilität (NPE): Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Berlin: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung
- NPE (2011b): Nationale Plattform Elektromobilität (NPE): Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität – Anhang. Berlin: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung
- NPE (2012): Nationale Plattform Elektromobilität (NPE): Fortschrittsbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität (Dritter Bericht). Berlin: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung
- Öko-Institut e.V. (2011a): Betrachtung der Umweltentlastungspotenziale durch den verstärkten Einsatz von kleinen, batterieelektrischen Fahrzeugen im Rahmen des Projekts „E-Mobility Berlin“, Status-Seminar Elektromobilität Berlin-Brandenburg | Florian Hacker, Öko-Institut: Berlin
- Öko-Institut e.V. (2011b): CO₂-Minderungspotenziale durch den Einsatz von elektrischen Fahrzeugen in Dienstwagenflotten. Ergebnisbericht im Rahmen des Projektes „Future Fleet“. Kasten, P.; Zimmer, W., Öko-Institut: Berlin
- Pearre, N. S.; Kempton, W. G. R. L.; Elango, V. V. (2011): Electric vehicles: How much range is required for a day’s driving? Transportation Research Part C, vol. 19, no. 6, pp. 1171–1184

- Peters, A.; Agosti, R.; Popp, M.; Ryf, B. (2011a): Electric mobility – a survey of different consumer groups in Germany with regard to adoption. Proceedings to ECEEE Summer Study, June (2011), Belambra Presqu'île de Giens, France
- Peters, A.; Agosti, R.; Popp, M.; Ryf, B. (2011b): Elektroautos in der Wahrnehmung der Konsumenten: Zusammenfassung der Ergebnisse einer Befragung zu akzeptanzrelevanten Faktoren. Karlsruhe: Fraunhofer ISI
- Peters, A.; de Haan, P. (2006): Der Autokäufer – seine Charakteristika und Präferenzen, Ergebnisbericht im Rahmen des Projekts „Entscheidungsfaktoren beim Kauf treibstoffeffizienter Neuwagen“, Berichte zum Schweizer Autokaufverhalten Nr. 11. ETH Zürich (<http://www.nssi.ethz.ch/res/emdm/>)
- Peters, A.; Hoffmann, J. (2011): Nutzerakzeptanz von Elektromobilität: Eine empirische Studie zu attraktiven Nutzungsvarianten, Fahrzeugkonzepten und Geschäftsmodellen aus Sicht potenzieller Nutzer. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Pfahl, S. (2013): Alternative Antriebskonzepte: Stand der Technik und Perspektiven – Die Sicht der Automobilindustrie. In: Jochem, P.; Poganietz, W.-R.; Grunwald, A.; Fichtner, W. (Hrsg.): Alternative Antriebskonzepte bei sich wandelnden Mobilitätskonzepten, Tagungsband vom 8. und 9. März, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing
- Plötz, P.; Gnann, T.; Wietschel, M. (2012): Total Ownership Cost Projection for the German Electric Vehicle Market with Implications for its Future Power and Electricity Demand. Energyday, 7th Conference on Energy Economics and Technology Infrastructure for the Energy Transformation, 27.04.2012, Dresden
- Plötz, P.; Gnann T. (2013a): Who should buy electric vehicles? – The potential early adopter from an economical perspective. In: Proceedings of the (2013) ECEEE summer study, Hyeres 2013.
- Plötz, P.; Gnann T. (2013b): How well can early adopters of electric vehicles be identified. In: EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Barcelona 2013.
- Plötz, P.; Kley, F.; Wietschel, M. (2012): Marktanalyse Fahrzeugtypen für Elektromobilität bis 2030. Unveröffentlichtes Arbeitspapier, Karlsruhe
- Plötz, P.; Schneider, U.; Globisch, J.; Dütschke, E. (2013): Who will buy electric vehicles? – Identifying the German early adopter. In Vorbereitung.
- REM 2030: Innovationscluster Regional Eco Mobility (REM 2030) regional eco mobility 2030 (REM 2030) – Systemkonzepte für die urbane Mobilität von morgen: Internetseite: <http://www.rem2030.de/rem2030-de/index.php>
- Propfe, B., Martin Redelbach, Danilo J. Santini, Horst Friedrich (2012): Cost analysis of Plug-in Hybrid Electric Vehicles including Maintenance & Repair Costs and Resale Values. EVS26 Los Angeles, California, May 6-9, 2012
- Rogers, E. M. (1962). Diffusion of innovations. Free Press of Glencoe.
- Schlesinger, M., Lindenberger, D., und Lutz, C. (2011): Energieszenarien 2011, Basel/Köln/Osnabrück, Prognos AG, Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI), Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung (GWS)
- Schmid, S. (2012): Marktperspektiven zukünftiger Fahrzeugkonzepte – Wettbewerb technischer Lösungen, der Kunde und die Rahmenbedingungen. Vortrag 7. März (2012), DLR Energiespeichersymposium Stuttgart
- Slater, S, M Dolman, P Taylor, Pavlos Trichakis, und Jonathan Shine. 2009. „Strategies for uptake of electric vehicles and associated and infrastructure implications“. Final Report. Element Energy Limited. Cambridge: The Committee on Climate Change. http://downloads.theccc.org.uk/Element_Energy_-_EV_infrastructure_report_for_CCC_2009_final.pdf.

- Smith R.; Blair, D. (2010): Notes on GPS Data Quality, (2010). Download: <http://auto21.uwinnipeg.ca/data.html> (Mai 2012)
- Smith, R.; Shahidinejad, S.; Blair, D.; Bibeau, E. (2011): Characterization of urban commuter driving profiles to optimize battery size in light-duty plug-in Electric Vehicles. Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 16, no. 3, pp. 218–224
- Statista (2013a): Zusammensetzung des Verbraucherpreises von Superbenzin im Januar 2013 (Komponenten in Cent je Liter), download (07.03.2013): <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/222650/umfrage/zusammensetzung-verbraucherpreis-fuer-superbenzin/>
- Statista (2013b): Zusammensetzung des Verbraucherpreises für Dieselmotorkraftstoff im Januar 2013, download (7.03.2013): <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/222658/umfrage/prozentuale-zusammensetzung-verbraucherpreis-fuer-diesel/>
- Statista (2013c): Preisentwicklung der Rohölsorte UK Brent in den Jahren 1976 bis 2013, download (14.02.2013): <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/1123/umfrage/rohloelpreisentwicklung-uk-brent-seit-1976/>
- Statista (2013d): Inflationsrate in Deutschland von 1992 bis 2012, download (14.02.2013): <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/1046/umfrage/inflationsrate-veraenderung-des-verbraucherpreisindexes-zum-vorjahr/>
- TAB (Büro für Technologiefolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2013): Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt (Autoren: Peters, A., Doll, C., Kley, F., Plötz, P., Sauer, A., Schade, W., Thielmann A., Wietzel, M., Zanker, C.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 153, Berlin
- TU Dortmund (2011). „D2.3: Cost-benefit-analysis and recommendations for Business Models-Report“. http://www.g4v.eu/datas/reports/G4V_WP2_D2_3_cost_benefit_and_business_models.pdf.
- Turrentine, T. S.; Kurani, K. S. (2007): Car buyers and fuel economy? In: Energy Policy 35, S.1213-1223
- US Inflation Calculator (2013): Inflation Rates Graph (2003-2013), download (14.02.2013): <http://www.usinflationcalculator.com/inflation/current-inflation-rates/>
- van der Vooren, A. und Alkemade, F. (2010). „The diffusion of infrastructure dependent technologies. A simple model“: 1–14.
- VCD (2008). CO₂-basierte Dienstwagenbesteuerung. Berlin: Verkehrsclub Deutschland (VCD).
- VDE (2010). „VDE-AR-E 2623-2-2 „Stecker, Steckdosen, Fahrzeugsteckvorrichtungen und Fahrzeugstecker – Ladung von Elektrofahrzeugen – Teil 2-2: Anforderungen an Hauptmaße für die Austauschbarkeit von Stift- und Buchsensteckvorrichtungen“.
- Vidal, N., Laarakkers, J., Kamphuis, R., Scuro, P., Matrose, C. und Liden, J. (2011). „WP4 – Report on ICT requirements and recommendations“. http://www.g4v.eu/datas/reports/G4V_WP4_D4_3_ict_requirements_and_recommendations_new.pdf.
- Vidal, N., Scuro, P. und Brambilla, S. (2011). „WP5 – Requirements for the infrastructure based on the defined model“. http://www.g4v.eu/datas/reports/G4V_WP5_D5_2_requirements_for_infrastructure.pdf.
- Wenzel, H. (2010): Lifetime in Encyclopedia of Electrochemical Power Source. Elsevier Science.

- WEO (2010): International Energy agency (IEA) (2010): World Energy Outlook 2010, OECD/IEA, Paris
- WEO (2012): International Energy agency (IEA) (2012): World Energy Outlook 2012, OECD/IEA, Paris
- Wesche, J. (2013): Nutzerakzeptanz von Ladetarifen in der Elektromobilität – Eine repräsentative Szenarien-Analyse. Masterarbeit. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Wietschel, M.; Bünger, U., Weindorf, W.: (2009): Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO₂-freie Endenergieträger. Studie im Auftrag der RWE AG, Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Wietschel, M., Dallinger, D., Doll, C., Gnann, T., Held, A., Kley, F., Lerch, C., Marscheider-Weidemann, F., Mattes, K., Peters, A., Plötz, P. und Schröter, M. "Gesellschaftspolitische Fragestellungen der Elektromobilität," Fraunhofer ISI, Karlsruhe, Okt. 2011.
- Wietschel, M.; Dütschke, E.; Funke, S.; Peters, A.; Plötz, P.; Schneider, U., Roser, A.; Globisch, J. (2012): Kaufpotenzial für Elektrofahrzeuge bei sogenannten 'Early Adoptern'. Bericht für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Karlsruhe: Fraunhofer ISI, IREES GmbH.
- Wietschel, M.; Kley, F.; Dallinger, D. (2009): Eine Bewertung der Ladeinfrastruktur. ZfAW Zeitschrift für die Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft 3: S. 33–41.
- Wietschel, M.; Plötz, P.; Gnann, T.; Kühne, A. (2013): Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge – Kurzfassung. Studie im Auftrag der Acatech und der Nationalen Plattform Elektromobilität (AG7). Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Wöhe, G. und Döring, U. (2002): Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 21. Auflage, Vahlen Franz GmbH. 2002.
- WVI, IVT, DLR, und KBA. 2010. „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 (KiD2010)“. WVI Prof. Dr. Wermuth Verkehrsforschung und Infrastrukturplanung GmbH, Braunschweig, IVT Institut für angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung e. V., Heilbronn, DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – Institut für Verkehrsforschung, Berlin, KBA Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg. <http://www.kid2010.de/de/page&id=5&navid=305>.
- Zischler, F. (2011): Potenzialanalyse Elektromobilität für Gemeinden in Baden-Württemberg. Diplomarbeit. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Zittel, W., Zerhusen, J., Zerta, M., Arnold, N. (2013): Fossile und Nukleare Brennstoffe – die künftige Versorgungssituation. Energy Watch Group. Berlin 2013.

10 Glossar

BEV	Reine Elektrofahrzeuge (BEV) sind ausschließlich mit einem Elektromotor ausgestattet und erhalten ihre Energie aus einer Batterie im Fahrzeug, die ihrerseits über das Stromnetz aufgeladen werden kann.
EV	Elektrofahrzeuge (Electric Vehicle/EV): Überbegriff für BEV, PHEV und REEV-Fahrzeuge.
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt. Das KBA ist die für den Straßenverkehr in Deutschland zuständige Bundesbehörde und veröffentlicht Daten zum Kraftverkehr in Deutschland, hauptsächlich zum Bestand und zu Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen.
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge.
MiD	Mobilität in Deutschland. Bezeichnet eine umfangreiche Erhebung zum Mobilitätsverhalten der Deutschen. Die Datensätze wurden 2002 und 2008 erhoben und betrachten hauptsächlich den Verkehr (nicht nur Pkw) von Privatpersonen.
MoP	Mobilitätspanel. Bezeichnet eine jährliche Erhebung der Mobilität von Deutschen und umfasst hauptsächlich Wege und Soziodemographie privater Personen.
PHEV	Wird bei hybriden Fahrzeugkonzepten die Option realisiert, auch direkt mit dem Verbrennungsmotor zu fahren, spricht man von Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV).
REEV	Range-Extender-Fahrzeuge (REEV) haben zusätzlich zur Batterie einen Verbrennungsmotor mit Generator zur Reichweitenverlängerung. Dieser liefert zusätzlichen Strom für die Batterie, treibt das Fahrzeug jedoch nicht direkt an.
TCO	Total Cost of Ownership. Bezeichnet die Gesamtnutzungskosten eines Gutes. Im vorliegenden Bericht sind die Gesamtnutzungskosten eines Pkw und setzen sich zusammen aus den Ausgaben für die Anschaffung und Nutzung eines Pkw (Versicherung, Reparatur, Kraftstoffkosten) abzüglich des Restwertes beim Wiederverkauf.
SOC	State of Charge = Batterieladestand.