ECONSTOR
Make Your Publications Visible.

A Service of

ZBW Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft
Leibniz Information Centre for Economics

Wietschel, Martin; Kühnbach, Matthias; Rüdiger, David

Working Paper

Die aktuelle Treibhausgasemissionsbilanz von Elektrofahrzeugen in Deutschland

Working Paper Sustainability and Innovation, No. S02/2019

Provided in Cooperation with:
Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI

Suggested Citation: Wietschel, Martin; Kühnbach, Matthias; Rüdiger, David (2019) : Die aktuelle Treibhausgasemissionsbilanz von Elektrofahrzeugen in Deutschland, Working Paper Sustainability and Innovation, No. S02/2019, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe,
https://doi.org/10.24406/publica-fhg-299531

This Version is available at:
https://hdl.handle.net/10419/194563

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

WWW.ECONSTOR.EU

Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

Working Paper Sustainability and Innovation
No. S 02/2019

Martin Wietschel
Matthias Kühnbach
David Rüdiger

Die aktuelle Treibhausgas-emissionsbilanz von Elektrofahrzeugen in Deutschland

Fraunhofer ISI

Fördervermerk

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

Inhaltsverzeichnis

Seite

1 Einführung 1

2 Ökologische Bewertungsverfahren in der Praxis und neuer Ansatz der Studie 3

3 Zugrunde gelegte Fahrzeuge und Fahrzeugparameter 5

4 Treibhausgasemissionen aus der Stromerzeugung und bei konventionellen Kraftstoffen 9

4.1 Einleitung in die Problematik der Bestimmung von THG-Emissionen aus dem Kraftwerkspark 9

4.2 Entwicklung eines Strommix-Szenarios auf der Basis jährlicher Treibhausgasemissionen (BEV-Strommix) 10

4.3 Entwicklung eines 100%-Erneuerbaren-Energie-Szenarios (BEV 100% EE-Strom) 12

4.4 Entwicklung eines 100%-Erneuerbaren-EnergieFahrstroms plus 100%-Erneuerbaren-Energie-Batterie-Szenarios (BEV 100% EE-Strom & 100% EE-Strom-Batterie) 13

4.5 Entwicklung eines 30%-PV-Eigenstrom-Szenarios (BEV 30% PV-Strom) 13

4.6 Entwicklung von Szenarien auf Basis stündlicher Treibhausgasemissionen mit und ohne Lademanagement (BEV ohne LM sowie BEV mit LM) 16

4.7 Diskussion zu stündlichen Treibhausgasemissionen auf der Basis der Grenzkraftwerke 24

4.8 Diskussion zu Treibhausgasemissionen aus Braunkohlekraftwerken 24

4.9 Treibhausgasemissionen bei konventionellen Kraftstoffen 27

5 Ergebnisse: Die Treibhausgasemissionsbilanz von Batteriefahrzeugen gegenüber konventionellen Fahrzeugen 28

6 Diskussion ausgewählter Aspekte 34

7 Zusammenfassung und Fazit 36

8 Quellen 39

1 Einführung

Der Beitrag von Elektrofahrzeugen zum Klimawandel wird in Studien stark unterschiedlich dargestellt – von "Klimakillern" (Stahl 2019) und "Das Elektroauto ist nicht immer besonders klimafreundlich!" (ADAC 2018a) bis "Elektrofahrzeuge haben bereits heute eine positive Klimabilanz" (Öko-Institut 2018) reicht die Beurteilung.

Die vorliegende Studie soll dazu dienen, die Gründe für eine unterschiedliche Bewertung aufzuzeigen und eine Bewertung von heute angeschafften batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV[1]) über ihre Nutzungsdauer in Deutschland vorzunehmen. Als Vergleich werden konventionelle Benzin- und Diesel-Pkw herangezogen. Ein besonderer Fokus wird dabei auf die Herkunft des Ladestroms gelegt, der den größten Einfluss auf die Treibhausgas(THG)-Bilanz der BEV hat. Dieser wird in den verschiedenen Studien deutlich unterschiedlich angesetzt. Ein weiterer wichtiger Aspekt dieser Studie ist die Fokussierung auf die Evidenz. Hierzu werden u. a. der tatsächliche Strombezug und das Ladeverhalten von BEV-Nutzern auf Basis von aktuellen empirischen Erhebungen den Analysen zugrunde gelegt und eine Datenbank zu heutigen BEV-Modellen sowie Modellsimulationen über die THG-Emissionen des Strombezuges einbezogen. Diese Aspekte werden in fast allen anderen Studien gar nicht oder nur rudimentär behandelt. Das hängt auch mit methodischen und statistischen Konventionen zusammen.

Wie bei jeder ökologischen Bewertung steht zu Beginn die Frage nach dem Untersuchungszweck. Diese Studie strebt, wie bereits geschildert, eine möglichst große Genauigkeit im Hinblick auf die tatsächlichen THG-Emissionen des für Elektrofahrzeuge verwendeten Stromes an und grenzt sich damit von anderen Studien ab. Diese verfolgen z. B. das Ziel, einfache und allgemeingültige Aussagen zu treffen. Dazu werden häufig arithmetische Mittel für Stromemissionen herangezogen. Dies scheint aber gerade bei der Bewertung von strombedingten Emissionen wenig sinnvoll, da große Unterschiede hinsichtlich der Herkunft des Stromes im Tagesverlauf (z. B. Laden am Tag oder Laden in der Nacht) vorherrschen, die Einfluss auf die spezifischen THG-Emissionen nehmen.

1 Battery electric vehicle. (dt. Batterie-elektrisches Fahrzeug).

Neben der THG-Bilanz des Stroms wird auch der Bereich der Batterieproduktion detaillierter betrachtet, da er nach den THG-Emissionen des Stroms die wichtigste Größe bei einer THG-Bilanz für ein BEV darstellt. Gemäß dem üblichen Vorgehen bei einer Product-Carbon-Footprint-Analyse[2] bzw. einer Life-Cycle-Analyse[3], werden die THG-Emissionen während der Produktion sowie der Nutzungsphase betrachtet[4].

Um einen detaillierten Vergleich zu ermöglichen, werden drei verschiedene Pkw-Klassen differenziert. Es wird angenommen, dass die Pkw in 2018 gekauft werden. Ihre gesamte THG-Bilanz wird bis zum Ende ihrer Nutzungsdauer (ca. 13 Jahre) berechnet. Hierzu werden repräsentative Annahmen, beispielsweise zu Fahrleistung, Nutzungsdauer oder Realverbräuchen, unterstellt.

Die Studie gliedert sich wie folgt. Im folgenden Kapitel 2 wird ein Überblick zu Bewertungsverfahren in der Praxis geben. In Kapitel 3 werden die Daten zu den Fahrzeugen dargelegt und einige ausgewählte Daten ausführlicher diskutiert, u. a. die Batterieherstellung. In Kapitel 4 werden dann verschiedene Szenarien für den Ladestrom herausgearbeitet und diskutiert sowie die sich daraus ergebenden THG-Emissionen des Strombezugs berechnet, was zum Teil modellgestützt erfolgt. Im anschließenden Kapitel 5 werden dann die Ergebnisse der Berechnungen gezeigt. Daran schließt sich eine kritische Diskussion ausgewählter Aspekte an (Kapitel 6). Die Studie endet mit einer Zusammenfassung und einem Fazit (Kapitel 7).

---

2 Auch bekannt als CO_2-Fußabdruck (vgl. DIN ISO/TS 14067). Sie basiert auf dem Standard ISO 14040/44 und sieht ein vergleichsweise weniger komplexes Vorgehen vor.

3 Auch bekannt als Umweltbilanz, Ökobilanz oder Lebenszyklusanalyse (vgl. DIN ISO 14040/44). Sie stellt eine systematische Analyse der Umweltwirkungen von Produkten während des gesamten Lebensweges („von der Wiege bis zur Bahre“) dar.

4 Die Recycling- und Beseitigungsphase wird in dieser Studie nicht betrachtet. Nach Helms et al. (2016) spielen sie in der Gesamtbilanz nur eine stark untergeordnete Rolle und sind zudem für die betrachteten Antriebsvarianten annähernd gleich.

2 Ökologische Bewertungsverfahren in der Praxis und neuer Ansatz der Studie

In der Praxis kommen unterschiedliche Bewertungsverfahren zum Einsatz. Es besteht eine wesentliche Abhängigkeit zur Untersuchungsfrage, welcher Standard geeignet und anzuwenden ist. Typischerweise wird das konkrete Vorgehen bei ökologischen Bewertungen jeweils fallspezifisch an den Qualitätskriterien Relevanz, Vollständigkeit, Konsistenz, Transparenz, Genauigkeit und Angemessenheit ausgerichtet (vgl. Rüdiger (2019)). Übergeordnet sind internationale Bewertungsstandard zu beachten, die im Folgenden im Zusammenhang zu strombedingten Emissionen kurz erläutert werden.

In nationalen Emissionsinventaren, die gemäß dem Standard IPCC (2006) erstellt werden, werden direkte Fahrzeugemissionen (auch TTW, Tank-to-Wheel) getrennt von sogenannten Vorkettenemissionen (auch WTT, Well-to-Tank) erfasst. Ziel ist die sektorspezifische Zuordnung. Dem Verkehrssektor werden nur die TTW-Emissionen zugeordnet. Die Emissionen, die mit der Erzeugung von Strom einhergehen, werden getrennt erfasst und dem Sektor Energiewirtschaft zugeordnet (vgl. Rüdiger (2019)). Ein ähnliches Vorgehen kennzeichnet die kommunale CO_2-Bilanzierung. Hier werden i. Allg. bei den Verkehrsemissionen nur die TTW-Emissionen bilanziert. Strombedingte CO_2-Emissionen werden häufig nicht oder nur unzureichend berücksichtigt (z. B. über Kraftwerke im Stadtgebiet). Die TTW-Emissionen von Elektrofahrzeugen sind grundsätzlich null.

Emissions- und Nachhaltigkeitsbilanzen für Unternehmen werden im Zusammenhang zur Wirkungskategorie Treibhausgaseffekt i. Allg. an dem internationalen Greenhouse-Gas-Protocol-Standard ausgerichtet (WRI; WBCSD (2004)). Aufgrund praktischer Schwierigkeiten wurde 2015 durch WRI und WBCSD eine weitere Ergänzung zum THG-Protokoll Standard veröffentlicht. Die „GHG Protocol Scope 2 Guidance“ hat die Formulierung von Regeln zur korrekten Einbindung energiebedingter Emissionen zum Ziel. Der Standard fordert, dass Unternehmen für ihre Aktivitäten in Märkten mit einem liberalisierten Strommarkt (z. B. Europa) zwei Emissionswerte ermitteln: einmal mit Bezugnahme auf den Strommix des relevanten Energieversorgers bzw. -erzeugers und einmal mit Bezugnahme auf landes- bzw. netzbezogene Statistiken. Bei landesbezogenen Statistiken kann entweder das Standortprinzip (gemäß Kraftwerkspark Deutschland) oder das Marktprinzip (gemäß internationaler Stromhandelsbilanz) angewendet werden (vgl. Rüdiger (2019)). Bei Bezugnahme auf den Energieversorger darf Ökostrom

positiv angerechnet werden, wenn Exklusivitätsnachweise über Herkunft und Zuteilung vorliegen. Allerdings ist der Begriff Ökostrom rechtlich nicht definiert, was in der Bewertungspraxis große Probleme verursacht. Genau genommen müssten anspruchsvolle und weniger anspruchsvolle Ökostromprodukte differenziert werden, je nachdem ob der Energieversorger tatsächlich u. a. über die EEG-Umlage hinausgehend zur realen Verbesserung der Erzeugungs- und Speicherungssituation im betreffenden Land beiträgt oder nicht.

Bei der ökologischen Bewertung von Produkten gemäß DIN ISO/TS 14067 oder DIN ISO 14040/44 findet ein ähnlicher Ansatz Anwendung. Die Berechnungsvorschriften sind mit denen zur Bilanzierung von Unternehmen prinzipiell vergleichbar. Allerdings ist u. a. eine Doppelberichterstattung bei liberalisierten Märkten nicht erforderlich. Gefordert wird grundsätzlich die Betrachtung der Lebenswegdaten einzelner Stromprodukte von Anbietern. Bei Unsicherheiten und fehlenden Daten zu einzelnen Produkten können auch landesbezogene Daten verwendet werden.

Wie nachfolgend noch verdeutlicht wird, grenzt sich das Vorgehen dieser Studie von bestehenden Bewertungsstandards deutlich ab. Die Kriterien der Genauigkeit und der Evidenz werden im Vergleich stärker betont. Mit der nachfolgenden Abbildung 1 wird abschließend eine Gegenüberstellung der beschriebenen Bewertungsstandards zum Vorgehen dieser Studie aufgezeigt.

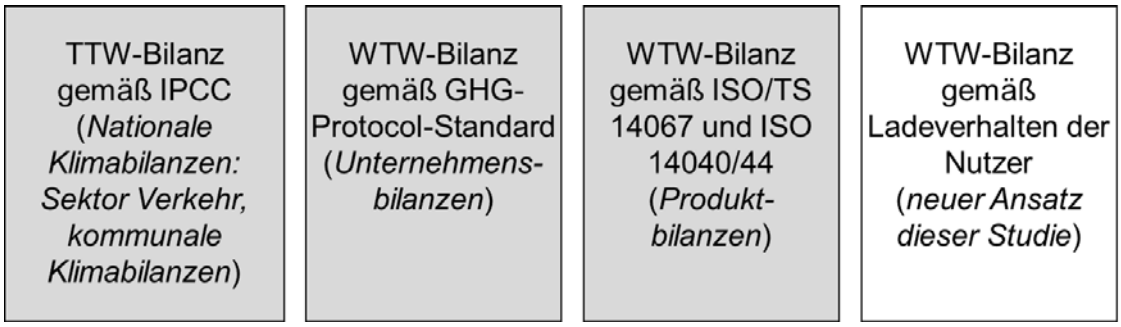

Abbildung 1: Einordnung des Bilanzierungsansatzes dieser Studie

3 Zugrunde gelegte Fahrzeuge und Fahrzeugparameter

Verschiedene Parameter beeinflussen die THG-Bilanz von BEV. In Ludwig et al. (2018) oder Egedea et al. (2015) werden die verschiedenen Parameter, wie Stromerzeugung, Fahrzeugbatterie, Laufleistung, Klimatisierung, jährliche Fahrleistung oder Fahrstil, aufgezeigt und der Einfluss der einzelnen Parameter berechnet. Es zeigt sich, dass die individuelle THG-Bilanz eines Elektrofahrzeugs von den verschiedenen Parametern beeinflusst wird und generalisierende Aussagen deshalb mit Vorsicht betrachtet werden müssen.

In diesem Kapitel werden die wichtigsten festgelegten Fahrzeugparameter dokumentiert. Dafür werden drei Fahrzeugklassen bestimmt (Kleinwagen Tabelle 1, Mittelklassewagen Tabelle 2 und Oberklassewagen Tabelle 3) und mit repräsentativen Werten belegt. Erwähnt werden sollte, dass möglichst immer mit realen Daten, z. B. zu realen Fahrzeugverbräuchen, realen Ladeverlusten oder erhobenen durchschnittlichen Batteriegrößen von verkauften BEV, gearbeitet wird.

Tabelle 1: Fahrzeugparameter Kleinwagen

Fahrzeugklasse	**Kleinwagen**	**Quelle**
Fahrleistung [km]	10492	Bundesanstalt für Straßenwesen 2014
Realer Kraftstoffverbrauch BEV (Hyundai Ioniq Elektro Style) inkl. Ladeverluste [kWh/100km]	14,7	ADAC 2018b
Realer Kraftstoffverbrauch Diesel [l/100km]	5,2	ADAC 2019b
Realer Kraftstoffverbrauch Benzin [l/100km]	7	Helms et al. 2016
THG-Emissionen Produktion BEV [tCO2]	8,4	Siehe Herleitung im Kapiteltext
THG-Emissionen Produktion Diesel [tCO2]	5	ADAC 2018a
THG Emissionen Produktion Benzin [tCO2]	5	ADAC 2018a
Durchschnittskapazität Fahrzeugbatterie BEV [kWh]	30	Durchschnittliche Batteriegröße (kWh) von BEV-Neufahrzeugen in Deutschland 2018 gewichtet nach Verkaufszahlen[5]

5 Quelle: Eigene Auswertung aktueller Marktstudien sowie In-House-Datenbank BEV des Fraunhofer ISI.

Tabelle 2: Fahrzeugparameter Mittelklassewagen

Fahrzeugklasse	Mittelklassewagen	Quelle
Fahrleistung [km]	13365	Bundesanstalt für Straßenwesen 2014
Realer Kraftstoffverbrauch BEV inkl. Ladeverluste (VW e-Golf) [kWh/100km]	17,3	ADAC 2018b
Realer Kraftstoffverbrauch Diesel [l/100km]	5,7	Helms et al. 2016
Realer Kraftstoffverbrauch Benzin [l/100km]	7,6	Helms et al. 2016
THG-Emissionen Produktion BEV [tCO2]	9	Siehe Herleitung im Kapiteltext
THG -Produktion Diesel [tCO2]	6,5	ADAC 2018a
THG-Emissionen Produktion Benzin [tCO2]	6,5	ADAC 2018a
Durchschnittskapazität Fahrzeugbatterie BEV [kWh]	30	Durchschnittliche Batteriegröße (kWh) von BEV-Neufahrzeugen in Deutschland 2018 gewichtet nach Verkaufszahlen[6]

Tabelle 3: Fahrzeugparameter Oberklassewagen

Fahrzeugklasse	Oberklassewagen	Quelle
Fahrleistung [km]	19888	Bundesanstalt für Straßenwesen 2014
Realer Kraftstoffverbrauch BEV inkl. Ladeverluste (Tesla X 100D) [kWh/100km]	24	ADAC 2018b
Realer Kraftstoffverbrauch Diesel [l/100km]	8,2	ADAC 2019a
Realer Kraftstoffverbrauch Benzin [l/100km]	9,1	ADAC 2019a
THG-Emissionen Produktion BEV [tCO2]	19,8	Siehe Herleitung im Kapiteltext
THG -Produktion Diesel [tCO2]	8,5	ADAC 2018a
THG-Emissionen Produktion Benzin [tCO2]	8,5	ADAC 2018a
Durchschnittskapazität Fahrzeugbatterie BEV [kWh]	81,84	Durchschnittliche Batteriegröße (kWh) von BEV-Neufahrzeugen in Deutschland 2018 gewichtet nach Verkaufszahlen[7]

Im Folgenden wird auf einige der in den Tabellen angegebenen Werte noch einmal detailliert eingegangen. Gerade die Ladeverluste bei BEV werden oftmals diskutiert. In dieser Studie werden gemessene Werte des ADAC (2018b) unterstellt. Auf der Basis von Messungen zum Ladewirkungsgrad von Genovese et al. (2015) und Landau et al. (2016) lässt sich für eine Ladeleistung mit 3,7 KW ein

6 Quelle: Eigene Auswertung aktueller Marktstudien sowie In-House-Datenbank BEV des Fraunhofer ISI.

7 Quelle: Eigene Auswertung aktueller Marktstudien sowie In-House-Datenbank BEV des Fraunhofer ISI.

Ladewirkungsgrad von ca. 86 % abschätzen, für Ladeleistungen zwischen 11 KW und 60 KW ein Ladewirkungsgrad von ca. 91 %. Für Ladeleistungen darüber hinaus geht der Ladewirkungsgrad wieder deutlich nach unten, allerdings konnten hierzu keine verlässlichen, repräsentativen Zahlen gefunden werden. Da aber der Anteil öffentlichen Schnellladens heute recht gering ist[8], spielt dies nur eine untergeordnete Rolle.

Neben der Stromproduktion hat die Fahrzeugherstellung und hier besonders die Batterieproduktion eine große Auswirkung auf die THG-Bilanz von BEV. Sie ist auch bezüglich anderer Umweltauswirkungen wie kumulierter Rohstoffbedarf, Versauerung und Wasserbedarf als kritisch zu bewerten (Helms et. al 2016) und sollte deshalb auch aus diesen Gründen im Fokus weiterer Anstrengungen zur Verbesserung der gesamten Umweltbilanz von BEV stehen. In Helmers et al. (2017) wird ebenfalls die hohe Relevanz der Batterieproduktion bei BEV an einer Life-Cycle-Analyse (LCA) herausgearbeitet. Dort wird aber auch aufgezeigt, dass hier noch ein hohes Verbesserungspotenzial besteht.

In Schrader (2017) werden die Angaben aus verschiedenen Quellen bezüglich der CO_2-Äquivalente pro Kilowattstunde Speicherkapazität der Batterie mit 110 bis 200 Kg angegeben. Dies deckt sich auch mit anderen Studien (siehe die Angabe von 150 bis 200 kg CO_2-eq/kWh in der Metastudie von Romare et al. (2017)). In einer aktuellen Studie (Regett et al. 2019), die sich sehr ausführlich mit der THG-Bilanzierung von Fahrzeugbatterien auseinandersetzt, werden Werte von 62 bis 212 kg CO_2-eq/kWh angegeben. Beim ICCT (2018) variieren die Werte auf Basis einer aktuellen Literaturauswertung von 30 bis 494 kg CO_2-eq/kWh, wobei die meisten Studien Werte von 100 bis 200 kg CO_2-eq/kWh ausweisen.

Den Studien nach hat die eigentliche Batterieproduktion (einschließlich der Zellproduktion) einen Anteil von 30 bis 50 % an den THG-Emissionen (Romare et al. 2017; Pettinger et al. 2017; Regett et al. 2019). Die in Romare et al. (2017) sowie Regett et al. (2019) durchgeführten Analysen zeigen, dass der Strommix des Produktionsstandortes unter der Annahme der aktuellen Emissionen aus der Produktion das Gesamtergebnis stark beeinflusst. Dies liegt daran, dass die eigentliche Batterieherstellung einen hohen Anteil an den THG-Emissionen bei der Fahrzeugproduktion ausmacht und dass der größte Teil der in der Produktion eingesetzten Energie Strom ist. Romare et al. (2017) gelangen zu dem Schluss,

8 Siehe Hardmann et al. (2018), dort werden Ergebnisse von verschiedenen Erhebungen zusammengefasst, sowie eine aktuelle Erhebung in Scherrer et al. (2019), nach der nur 6,3 % aller Ladevorgänge in Deutschland an öffentlichen Schnellladesäulen stattfindet.

dass die THG-Emissionen sich relativ linear zur Batteriegröße verhalten. Die wichtigste kurzfristige Verbesserung wird wahrscheinlich durch eine effizientere Produktion und die Nutzung von Strom mit niedrigen CO_2-Emissionen erreicht. Andere Maßnahmen zur Verbesserung der THG-Bilanz sind in Romare et al. (2017) aufgeführt. Generell schwanken die Angaben zum notwendigen Energieeinsatz für die Herstellung der Batterien deutlich (siehe Regett et al. 2019) und bieten ein relevantes Verbesserungspotenzial für Energieeffizienz.

Neben den THG-Emissionen pro Batteriekapazität hat deshalb die Batteriegröße einen relevanten Einflussfaktor auf die THG-Bilanz von Elektrofahrzeugen. Sie sollte deshalb adäquat zu den Fahrprofilen der Nutzer gewählt werden. Um hier realistische Annahmen zu treffen, wird eine Auswertung einer Datenbank des Fraunhofer ISI zugrunde gelegt. Gerade große Batteriekapazitäten werden häufig verwendet, um eine positive THG-Bilanz von BEV in Zweifel zu ziehen; sie stellen aber derzeit eher eine Ausnahme dar.

Hinsichtlich der Bilanz ist weiterhin zu untersuchen, ob Recycling von Fahrzeugbatterien die THG-Bilanz von BEV verbessern kann. In Troy et al. (2012) werden hierzu Ergebnisse aus verschiedenen Studien mit unterschiedlichen Ergebnissen präsentiert. Ein Recycling kann wohl einen positiven Beitrag leisten, der Einfluss auf die Gesamtbilanz ist aber nach Troy et al. (2012) sowie ICCT (2018) nicht sehr groß. Ein größerer Effekt kann die Zweitnutnutzung von Fahrzeugbatterien haben, der nach ICCT (2018) die THG-Bilanz deutlich verbessern kann. Die Treibhausgasemissionen werden generell nicht für die Entsorgung der Fahrzeuge betrachtet. Nach Helms et al. (2016) spielen sie in der Gesamtbilanz nur eine stark untergeordnete Rolle und sind zudem für die betrachteten Antriebsvarianten annähernd gleich.

Da die Reichweite von Elektrofahrzeugen beschränkt ist, ist zu hinterfragen, ob bei diesen dieselben jährlichen Fahrleistungen wie bei konventionellen Pkw hinterlegt werden dürfen. Empirische Erhebungen zur tatsächlichen Fahrleistung von Elektrofahrzeugen lassen dies zu (siehe Erhebung in Plötz et al. (2017a) und Frenzel et al. (2015)). Nutzer von Elektrofahrzeugen kommen eher aus ländlichen und suburbanen Gebieten und nutzen das Fahrzeug überwiegend sehr regelmäßig (siehe Frenzel et al. (2015), Plötz et al. (2017b) und Scherrer et al. (2019)).

4 Treibhausgasemissionen aus der Stromerzeugung und bei konventionellen Kraftstoffen

4.1 Einleitung in die Problematik der Bestimmung von THG-Emissionen aus dem Kraftwerkspark

Bei der Ermittlung der CO_2-Emissionen des Kraftwerksparks tritt stromseitig ein Zuordnungsproblem zur nachgefragten kWh Strom auf. Wenn ein Barrel Erdöl eingekauft wird, kann die Emissionswirkung von Experten anhand seiner chemischen Eigenschaften eindeutig bestimmt werden. Bei einer Kilowattstunde Elektrizität gibt es jedoch keine physikalische oder chemische Analyse, die auf die Quelle schließen lässt. Das Stromnetz ist vergleichbar mit einem See, auf dem auf der einen Seite eine Reihe an Stromproduzenten Strom einleiten und auf der anderen Seite Strom entnommen wird. Wenn man nicht über eine detaillierte zeitliche Auflösung verfügt und somit nicht ermittelbar ist, welche Kraftwerke zum jeweiligen Zeitpunkt Strom produzieren, kann man entweder die jährlichen Durchschnittsemissionen ansetzen (dies wird in Kapitel 4.2 gemacht) oder man kann das Kraftwerk mit den höchsten THG-Emissionen ansetzen (siehe dazu die Diskussion in Kapitel 4.7).

Wenn man eine weitere jahreszeitliche oder tageszeitliche Differenzierung (hier wird oftmals eine stündliche Auflösung gewählt) annimmt, existieren zur Lösung dieses Problems zwei Ansätze – über Marktmechanismen oder statistische Definitionen. Dazu wird zunächst aufgeschlüsselt, welche Kraftwerkstypen in der jeweiligen Stunde zu welchen Kosten Strom produzieren. Anhand des eingesetzten Primärenergieträgers und des Wirkungsgrades (bei konventionellen Kraftwerken v. a. Gas oder Kohle) können die CO_2-Emissionen für die Kraftwerke berechnet werden. Anhand dieser Werte können mit zwei üblichen Ansätzen die CO_2-Emissionen berechnet werden: Es werden entweder Durchschnittswerte über den gesamten Strommix der jeweiligen Stunde übernommen (statistische Definition) oder Werte, die von dem Grenzkraftwerk abgeleitet werden, welches unter den aktivierten Kraftwerken die höchsten variablen Kosten aufweist (Marktmechanismus)[9]. Dies sind üblicherweise konventionelle Gas- oder Steinkohlekraftwerke, die i.d.R. deutlich höhere spezifische CO_2-Emissionen aufweisen als der Durchschnittskraftwerkspark.

9 Siehe zur generellen Diskussion beider Methoden auch Regett et al. (2018).

Eine weitere Option ist der Einsatz von Energiesystemmodellen. Energiesystemmodelle bilden das gesamt Energie- und Verkehrssystem ab und stellen i.d.R. die Frage, welche Maßnahmen müssen ergriffen werden, um bestimmte THG-Ziel zu erreichen, wobei die Wirtschaftlichkeit zwischen den Maßnahmen entscheidet. Hier spielt die Diskussion um eine externe Setzung von Grenzkraftwerke oder Durchschnittskraftwerke keine Rolle, weil diese sich aus den Modellergebnissen ergeben. Energiesystemmodelle werden in einer Reihe an Studien angewendet, siehe z. B. BDI (2018), Pfluger et al. (2018) oder dena (2018). Die Studien kommen zu dem Fazit, dass aus Sicht der Minderung der THG-Emissionen die Elektromobilität eine zentrale Rolle spielen muss. Eine Modellierung mit einem Energiesystemmodell ist aber im Rahmen dieser Studie aufgrund des Aufwands nicht möglich. Auch ist es mit einem solchen Ansatz nicht möglich, einen direkten Vergleich einzelner Technologien untereinander durchzuführen.

4.2 Entwicklung eines Strommix-Szenarios auf der Basis jährlicher Treibhausgasemissionen (BEV-Strommix)

Eine oftmals für die Berechnung von Treibhausgasemissionen von BEV angesetzte Methodik ist die Zugrundelegung des durchschnittlichen Jahresemissionswertes aus dem Strommix des Kraftwerkparks (siehe z. B. Helms et al. 2016; Moro et al. 2018; Jochem et al. 2015; ADAC 2018a). Häufiger wird allerdings der aktuelle Wert hierfür verwendet und für die Zukunft konstant gehalten (siehe beispielsweise Helms et al. 2016; ADAC 2018a). Allerdings haben sich die Treibhausgasemissionen aus der Stromerzeugung in den letzten Jahren kontinuierlich gesenkt (siehe UBA 2018b und Abbildung 2).

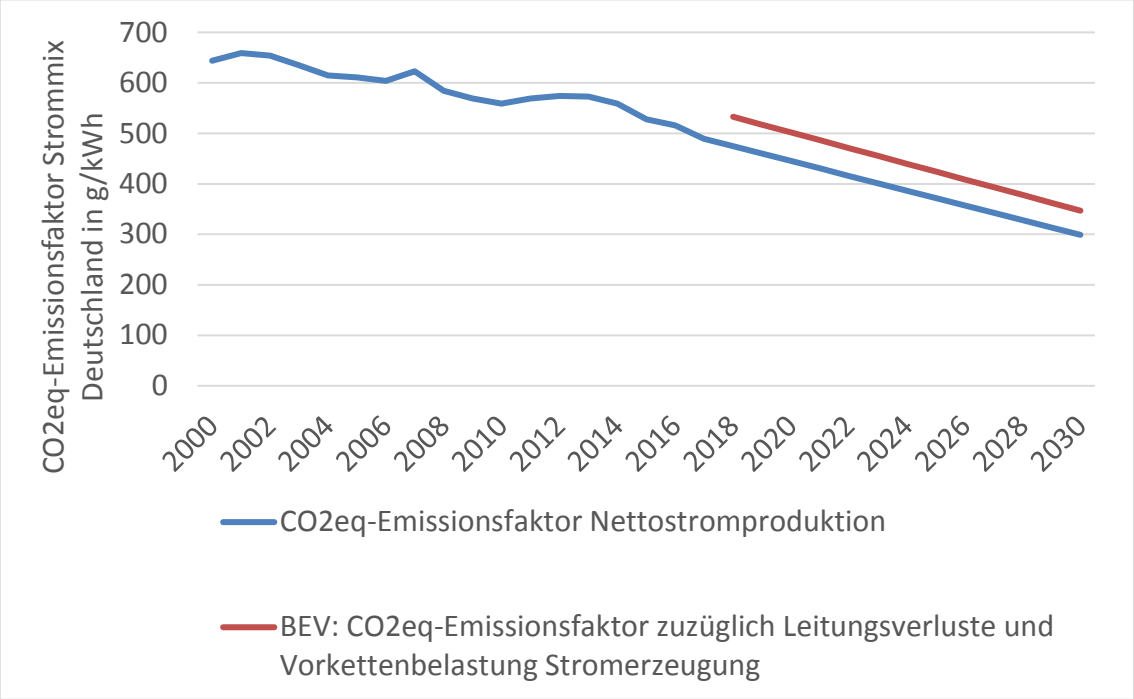

Abbildung 2: Entwicklung der spezifischen THG-Emissionen des Kraftwerksmix in Deutschland und daraus berechnet die spezifischen THG-Emissionen für die Ladung eines BEV

Anmerkung: Bis 2017 historische Emissionen nach UBA (2018b), danach dann eigene Berechnungen auf der Basis des 80 %-THG-Emissionsminderungsszenarios nach Pfluger et al. (2017); für THG-Emissionsfaktor EV die Annahme von 6 % Leitungsverluste (UBA 2018a), und 30 g/kWh Vorkettenbelastung auf der Basis einer eigenen groben Abschätzung nach Zahlen aus Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) (2017).

Nach zahlreichen Prognosen und Szenarien kann davon ausgegangen werden, dass sich die THG-Emissionen der Stromerzeugung künftig weiter senken. In Greiner et al. (2016) werden verschiedene Studien und Szenarien diesbezüglich ausgewertet, siehe aber auch andere Studien wie BDI (2018). Wenn nur die bestehenden gesetzlichen Maßnahmen umgesetzt werden, gelangen die Studien und Szenarien, die in Greiner et al. (2016) ausgewertet wurden, zu einer CO_2-Intensität der Stromerzeugung in Deutschland in 2030 von 421 bis 456 g/kWh$_{el}$. Bei Erreichung der Szenarien mit THG-Minderungsvorgaben liegen die Werte zwischen 244 und 376 g/kWh$_{el}$. Eine derartige Minderung ist auch notwendig, um die politischen Zielsetzungen für die Klimaziele in Deutschland zu erreichen (siehe zu den Klimazielen BMUB 2016). Wichtig dabei ist zu erwähnen, dass in den Studien selbst bereits eine Marktdurchdringung von BEV bis 2030 angenommen wird, die sich in einer höheren Stromnachfrage widerspiegelt. Somit sind die Auswirkungen auf die THG-Bilanz der Stromerzeugung durch BEV inkludiert.

Setzt man nun die heutigen Treibhausgasemissionen als konstant für die künftigen Jahre an oder nimmt man sogar veraltete Werte an, wie in ADAC (2018a), dann liegen BEV in ihre THG-Bilanz gegenüber konventionellen Fahrzeugen etwas unter oder in einer ähnlichen Größenordnung bzw. schneiden je nach Annahmen sogar schlechter ab.

In dieser Studie wird deshalb ein weiteres Absinken der THG-Emission aus der Stromerzeugung als plausibel eingestuft. Es wird ein Absinken der THG-Emission der Nettostromerzeugung in Deutschland bis 2030 (der unterstellten Lebenszeit der bilanzierten Pkw) auf 300 g/kWh$_{el}$ unterstellt, der linear absinkend vom aktuellen Wert in 2018 an erreicht wird. 300 g/kWh$_{el}$ deckt sich mit den Zielen der Bundesregierung aus dem Klimaschutzplan für die Energiewirtschaft (49% bis 51% Minderung der THG-Emission von 2014 für das Jahr 2030 (siehe BMUB (2016)).

Um die THG-Emissionen für ein BEV zu berechnen, werden Leitungsverluste des Stromtransports sowie die Vorkettenemissionen der Stromerzeugung einbezogen (siehe Abbildung 3 und die dort angegebenen Quellen). Für 2030 wird auf diese Weise ein Wert von 347 g/kWh$_{el}$ berechnet (sogenannter Well-to-Tank (WTT)-Wert für die Elektromobilität).

4.3 Entwicklung eines 100%-Erneuerbaren-Energie-Szenarios (BEV 100% EE-Strom)

Bei der Erstellung von Studien wird oftmals auch ein Szenario mit einer 100%igen Erneuerbaren Stromproduktion zur Deckung der Stromnachfrage von BEV unterstellt (Helms et al. 2016; Ludwig et al. 2018).

Derzeit gibt es viele Angebote für die Deckung der gesamten Stromnachfrage oder nur für den Fahrstrom auf der Basis von Erneuerbarem Strom (EE). Allerdings gibt es nur wenige hochwertige Produkte, die tatsächlich sicherstellen, dass der Strom aus zusätzlichen EE kommt, die auch regional oder in Deutschland errichtet werden (siehe hierzu die ausführlichen Analysen in Timpe et al. (2017)). Nach Timpe et al. (2017) zeichnen sich BEV-Besitzer durch eine überdurchschnittliche Nutzung von Öko-Stromprodukten aus. Nach Frenzel et al. (2015) gaben bei einer empirischen Erhebung bei der Frage nach einem Ökostrom-Vertrag (ausschließlicher Bezug von Strom aus erneuerbaren Energiequellen) 58 % an, über einen Ökostrom-Vertrag zu verfügen, und weitere 9 % planen „innerhalb der nächsten 12 Monate“ den Abschluss eines solchen Vertrages. Dies liegt deutlich über dem bundesdeutschen Durchschnitt, was deutlich

über dem Durchschnitt der Haushalte mit Ökostrom liegt, der derzeit einen Anteil von 22 % aufweist.

Die Realitätsnähe bei einem 100%-EE-Szenario sollte durchaus hinterfragt werden, denn wenn es sich nicht um zusätzlichen EE-Strom handelt, ist es für die gesamte THG-Bilanz eines BEV ein Nullsummenspiel. Aber aufgrund des tatsächlichen Verhaltens von heutigen BEV-Nutzern sowie den vergleichsweise einfach realisierbaren Möglichkeiten, eine 100%-EE-Stromproduktion sicherzustellen (siehe dazu auch die aufgezeigten Möglichkeiten in Timpe et al. (2017)), erscheint auch ein derartiges Szenario plausibel zu sein.

Auf der Basis von Angaben in FhG-ISE (2018), Gerbinet et al. (2014), Goe et al. (2014), IPCC (2014) und Sonnenenergie (2016) lassen sich THG-Emissionen für den Bau von EE-Anlagen auf ca. 40 g/kWh für Photovoltaik (PV) und für Windstrom nach Angaben von Smoucha et al. (2016), IPCC (2014) und Bonou et al. (2016) auf ca. 10 g/kWh als durchschnittliche Größen festlegen. Festzuhalten ist, dass die Werte in der Literatur stark schwanken.

Für die hier durchgeführten Berechnungen wird ein Wert von 25 g/kWh CO_2eq für das 100%-Erneuerbaren-Szenario angenommen.

4.4 Entwicklung eines 100%-Erneuerbaren-EnergieFahrstroms plus 100%-Erneuerbaren-Energie-Batterie-Szenarios (BEV 100% EE-Strom & 100% EE-Strom-Batterie)

Wie in Kapitel 3 ausgeführt hat die Verwendung des Stroms bei der Herstellung der Batterie einen großen Einfluss auf die THG-Bilanz eines BEV. Die Firma Tesla betreibt nach eigenen Angaben ihre Gigafabrik zur Batterieherstellung in den USA mit 100% regenerativem Strom (Tesla 2019). Auch andere Firmen wie z. B. das Technologiekonsortium aus der BMW Group, Northvolt und Umicore wollen einen ähnlichen Weg beschreiten (Henßler 2018). Deshalb wird ein weiteres Szenario entwickelt, welches neben der Verwendung von 100% EE-Strom für das Laden auch die Verwendung von 100% EE-Strom bei der Batterieherstellung unterstellt.

4.5 Entwicklung eines 30%-PV-Eigenstrom-Szenarios (BEV 30% PV-Strom)

Um hier ein entsprechendes Szenario zu entwickeln, wird auf eine aktuelle Umfrage des Fraunhofer ISI aus dem Jahre 2018 zurückgegriffen (siehe Scherrer et

al. 2019). Die Befragung erfolgte in einem beschränkten Zeitraum mittels eines Online-Fragebogens mit überwiegend geschlossenen und einzelnen offenen Fragen. Insgesamt wurden 630 Teilnehmer erreicht, wovon 432 nach der Reduktion auf Nutzer vierrädriger BEV verblieben und den Fragebogen vollständig einreichten.

Die Befragung ergab, dass fast die Hälfte (47 %)[10] der Befragten BEV-Nutzer eine PV-Anlage besitzt, während es deutschlandweit 2017 nur rund 4 % aller Haushalte (und ca. 9 % der Wohngebäude) sind (siehe Abbildung 3). Das Verhältnis von stationären Batteriespeichern zur Anzahl dieser Anlagen liegt mit 28 % in der Umfrage etwa sechsmal so hoch wie im gesamtdeutschen Vergleich. Eigene erneuerbare Stromproduktion mit stationären Speichern zur Erhöhung des Eigenverbrauchs und BEV scheinen ein sehr attraktives Paket zu bilden.

In Frenzel et al. (2015) gaben 81 % der Besitzer von Photovoltaikanlagen an, dass die Nutzung des Stroms aus eigener Erzeugung wichtig für die Anschaffung eines Elektrofahrzeugs ist.

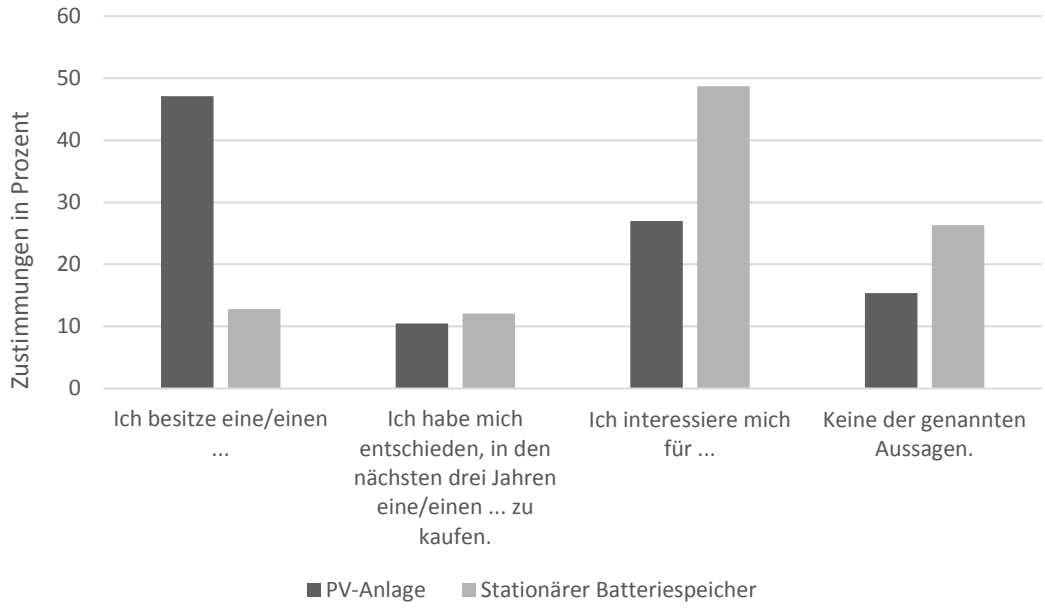

Abbildung 3: Besitz, Kaufintention und Interesse an PV-Anlagen und stationären Speichern von Elektrofahrzeugnutzern in Deutschland (Ergebnisse aus Scherrer et al. 2019)

Zwischen PV-Anlagenbesitz und BEV-Besitz besteht somit eine sehr hohe Korrelation. Eine Kausalität, dass viele BEV-Nutzer sich eine PV-Anlage kaufen, um

10 In der etwas älteren Erhebung von Frenzel et al. (2015) lag der Wert bei 45 %.

möglichst einen hohen Anteil an regenerativem Strom zu laden, lässt sich vielleicht vermuten und wird gestützt durch das überdurchschnittliche Umweltbewusstsein von BEV-Besitzern[11], aber nicht mit der Statistik nachweisen. Verschiedene Ansätze zur Berechnung des PV-Anteils am Ladestrom für BEV lassen sich hier argumentieren.

Fall 1: Die PV-Anlage wird extra zum Laden von BEV angeschafft. Die PV-Anlage wird dabei so ausgelegt, dass sie bilanziell den Stromverbrauch des BEV deckt. Der gesamte Erneuerbare Strom wird dann bilanziell dem BEV zugerechnet. In diesem Fall lässt sich ein 100% EE-Strom für das Laden des BEV ansetzen.

Fall 2: Wie Fall 1, nur, dass nicht der bilanzielle Stromanteil unterstellt wird, sondern nur der tatsächlich von der PV-Anlage ins BEV eingespeiste Strom. Um den Effekt auf die Treibhausgasemissionen zu berechnen, kann man den BEV den üblichen Eigenverbrauchsanteil von PV von 25 bis 30 % zugrunde legen (Klingler 2018).

Fall 3: Wie Fall 1, nur das die PV-Anlage größer ausgelegt wird. Hierdurch entsteht ein zusätzlicher positiver Effekt auf die Treibhausgasemissionen. Heute übliche Anlagengrößen übersteigen in ihrer Stromproduktion die Stromnachfrage eines BEV, siehe Klingler (2018).

Fall 4: Wie Fall 1, allerdings mit dem zusätzlichen Kauf eines stationären Speichers (der Trend geht heute generell zum Kauf einer PV-Anlage zusammen mit einem stationären Speicher und wie oben gezeigt besteht auch hier eine hohe Korrelation zu BEV-Käufern). Dies erhöht je nach Speichergröße den realen Eigenverbrauch des von der PV-Anlage erzeugten Stroms durch die BEV deutlich.

Fall 5.: Wie Fall 1, allerdings mit einem intelligenten Lademanagement für das BEV, welches die Erzeugung der PV mit dem Laden hinsichtlich eines möglichst großen Eigenverbrauchs optimiert (solche intelligenten Steuerungssysteme sind heute bereits im Markt vorhanden).

Fall 6: Die PV-Anlage wurde bereits früher angeschafft (ohne eine Auslegung auf die spätere Anschaffung eines BEV). In Klingler (2018) wird in einem solchen Fall gezeigt, dass der Eigenverbrauchsanteil bei einer PV-Anlage mit 5 kWp von 28 % auf 33 % steigt, wenn ein BEV unterstellt wird. Dies sind 333 kWh/Jahr mehr an Eigenverbrauch. Umgelegt auf dem durchschnittlichen Jahresverbrauch eines BEV sind dies 15 %.

---

11 Zum vergleichsweise hohen, überdurchschnittlichen Umweltbewusstsein von Elektrofahrzeug-Besitzern siehe Frenzel et al. (2015) und auch Plötz et al. (2014).

Kalkuliert man den Effekt auf die Treibhausgasemissionen, so lässt sich die Annahme von 15 % PV-Strom für BEV (Fall 6) bis 100 % für Fall 1 bzw. Fall 4 mit großen Speichern gut begründen. Im Rahmen dieser Studie wird bei der Berechnung Fall 2 angesetzt, weil der Fall mit 100% PV-Strom durch das Szenario 100%-EE bereits abgedeckt ist. Somit wird mit einem 30%-PV-Anteil am Fahrstrom gerechnet und für die verbliebenen 70 % die THG-Emissionen des Strommix-Szenarios angesetzt.

4.6 Entwicklung von Szenarien auf Basis stündlicher Treibhausgasemissionen mit und ohne Lademanagement (BEV ohne LM sowie BEV mit LM)

Um etwas näher an der tatsächlichen zeitlichen Nachfrage nach Strom durch BEV zu sein, kann man anstelle der jährlichen Durchschnittsemission auch die stündlichen Durchschnittsemissionen betrachten. Derartige Ansätze werden beispielsweise in Ensslen et al. (2017) oder Dallinger (2012) verfolgt.

Hierfür ist es wichtig, sowohl den Ladezeitpunkt von BEV-Nutzern als auch die spezifischen stündlichen THG-Emissionen der Stromerzeugung zu kennen. Im Folgenden wird die Vorgehenseise zu Berechnung der stündlichen Durchschnittsemissionen beschrieben, wobei dann zwei Fälle unterschieden werden. Einmal ohne ein Lastmanagement von BEV und einmal mit einem Lastmanagement von BEV[12].

In Abbildung 4 ist der Lastverlauf mehrerer Fahrzeuge auf der Basis empirischer Erhebungen[13] über den Wochenverlauf dargestellt, der aber auch für ein typisches Fahrzeug angenommen werden kann. Die blauen Flächen zeigen das Laden am heimischen Standort, die grünen das Laden am Arbeitsplatz. An Wochentagen ist beim Laden zu Hause eine Lastspitze in den frühen Abendstunden zu erkennen, wenn viele Fahrzeuge nach der Arbeit geladen werden. Mit dem Laden am Arbeitsplatz wird an Wochentagen die Abendspitze reduziert, aber eine zusätzliche Spitze in den Morgenstunden nach Erreichen des Arbeitsplatzes erzeugt. Am Wochenende ist der Lastverlauf flacher und über den Tag verteilt. Dieses Ladeverhalten (privat plus am Arbeitsplatz) wird den folgenden Analysen zugrunde gelegt.

12 In Falter et al. (2017) wird eine vergleichsweise Vorgehensweise gewählt.

13 MOB (2010) und Fraunhofer ISI (2015).

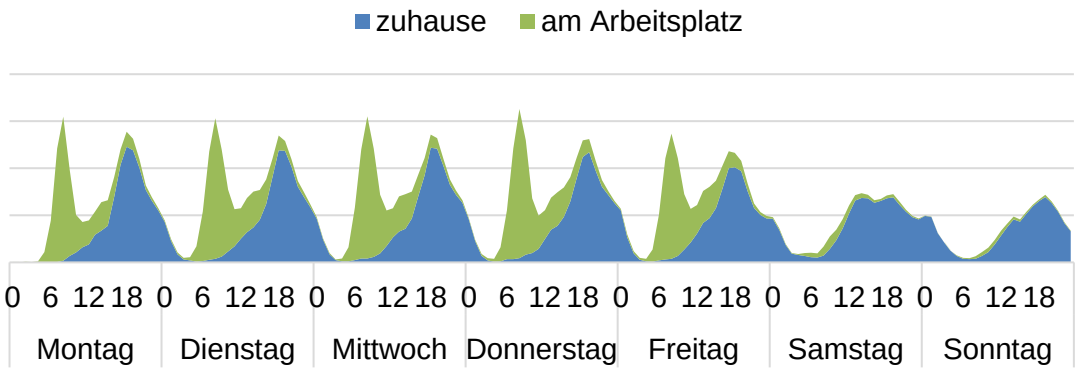

Abbildung 4: Lastverlauf von privaten BEV, wenn Lademöglichkeiten zu Hause und am Arbeitsplatz bestehen (hier 3,7 kW)

Quelle: Eigene Berechnung

Die THG-Emissionen der Stromerzeugung sind abhängig von der Verfügbarkeit der Stromerzeugung aus EE in der jeweiligen Stunde sowie von der stündlichen Stromnachfrage.

Die stündliche Stromnachfrage wird modellbasiert ermittelt, um Änderungen der Nachfragestruktur durch technologischen und strukturellen Wandel Rechnung zu tragen. Dabei wird die Last der Elektromobilität zunächst als ungesteuert angenommen. Dies bedeutet, dass keine zentrale Instanz implementiert ist, durch die der Ladevorgang einzelner Elektrofahrzeuge kontrolliert und abgestimmt wird. Im zweiten Schritt wird das Ladeverhalten von BEV gesteuert (Lastmanagement). Auf diese Weise können Effekte auf die Systemlast, also die stündlich aufgelöste Stromnachfrage aller Verbraucher, identifiziert und analysiert werden. Parallel werden Auswirkungen auf der Stromangebotsseite quantifiziert, indem die zur Deckung der Last notwendige Stromerzeugung ohne Elektromobilität und unter deren Berücksichtigung (jeweils im ungesteuerten als auch im gesteuerten Fall) modelliert wird.

In der oben angesprochenen Erhebung zum Ladeverhalten von BEV-Nutzern (siehe Scherrer et al. 2019) wurde zur Ermittlung der Akzeptanz von Ladesteuerungsverfahren den Befragten ein Szenario vorgelegt, in dem eine Ladestation mit integrierter Steuerung, welche eine Ladesteuerung möglich macht, zu Hause

vorhanden ist. Eine deutliche Mehrheit der Befragten (rund 80 %) zeigt grundsätzliches Interesse am Konzept des Lademanagements. Rund 12 % zeigten sich nicht interessiert und gaben dafür vielfältige Gründe an[14].

Für die aufgezeigten Prozessschritte der Berechnung eines gesteuerten und eines ungesteuerten Ladens wird das Simulationsmodell eLOAD verwendet und mit dem Fundamentalmodell MiPU gekoppelt.

Das Modell eLOAD („energy load curve adjustment tool“) ist gegliedert in ein Projektions- sowie ein Lastmanagement-Modul. In ersterem wird die historische Systemlast auf Basis von mehr als 1.000 technologiespezifischen Prozesslastprofilen (stündliche Auflösung) zerlegt und die Prozesslastkurven individuell mithilfe von jährlichen, prozessspezifischen Nachfrageprojektionen für das Jahr 2030 skaliert. Die Prozesslastkurven für 2030 werden anschließend zur Systemlast aggregiert. Auf diese Weise wird beispielsweise technologischer Wandel mit strukturellen Auswirkungen auf die Systemlast implizit berücksichtigt. Im Lastmanagement-Modul des Modells eLOAD ist die Möglichkeit gegeben, die Last geeigneter Prozesse, in diesem Fall privat genutzter BEV, als flexibel anzunehmen und deren Einsatz für Lastmanagement zu optimieren. Dafür wird die Gesamtlast der BEV durch eine gemischt-ganzzahlige Kostenminimierung allokiert. Ziel des Vorganges ist die bessere Auslastung des Kraftwerkssystems und die Vermeidung der Abregelung von überschüssiger Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien (EE). Aus diesem Grund wird die Residuallast (Systemlast minus Erzeugung aus EE) als Preissignal für den Optimierungsvorgang herangezogen und auf diese Weise geglättet. Eine detaillierte Modellbeschreibung befindet sich in Boßmann (2015) bzw. Gnann et al. (2018).

Das Fundamentalmodell MiPU („Minimal Cost Allocation of Power Units“) bildet den deutschen Kraftwerkspark detailliert ab und berechnet innerhalb der Systemgrenzen Deutschlands eine Merit-Order mit stündlicher Auflösung. Dabei wird die mit dem Modell eLOAD modellierte stündliche Stromnachfrage als Input verwendet. Diese wird durch die zur Verfügung stehenden Erzeugungstechnologien gedeckt, wobei die kraftwerksspezifischen Grenzkosten unter Beachtung von Brennstoff- und CO_2-Zertifikationskosten, dem Kraftwerkstyp und Alter sowie von Anfahrzeiten, Anfahrkosten und Stillstandszeiten berechnet werden. Für weitere

14 Der häufigste Grund war das schon realisierte eigene Management u. a. durch Zeitschaltuhren (z. B. in Verbindung mit PV-Anlagen). Außerdem wurde das Wohnen in Miete, die fehlende Selbstbestimmung und die fehlende Sicherheit eines jederzeit geladenen Fahrzeugs als Gründe für mangelndes Interesse angegeben.

Informationen zum Fundamentalmodell MiPU wird auf Michaelis (2018) verwiesen.

Zur Bewertung der Entwicklung der Systemlast wird zunächst eine Analyse einzelner Prozesse durchgeführt. Abbildung 5 stellt die Änderung der Stromnachfrage ausgewählter Prozesse und Anwendungen dar. Hierbei wird die mittlere Änderung zwischen den Jahren 2015 und 2030 über den Tagesverlauf gezeigt. Im negativen Bereich des Diagramms sind diejenigen Anwendungen aufgetragen, deren Stromnachfrage bis zum Jahr 2030 sinkt. Dies betrifft insbesondere Anwendungen aus dem Haushalts- und GHD-Sektor, beispielsweise Beleuchtung oder Weiße Ware, sowie Querschnittstechnologien im Industriesektor, bei denen Effizienzgewinne zu einer Reduktion der Nachfrage führen. Nachfragezuwächse sind insbesondere bei privaten und gewerblichen Elektrofahrzeugen sowie bei strombasierten Wärme- und Kältegeräten zu verzeichnen. Es zeigt sich, dass insbesondere die Reduktion des Strombedarfs von Beleuchtungsmitteln und die Steigerung des Bezugs durch den aggregierten Ladevorgang von Elektrofahrzeugen keineswegs regelmäßig über den Tag verteilt sind.

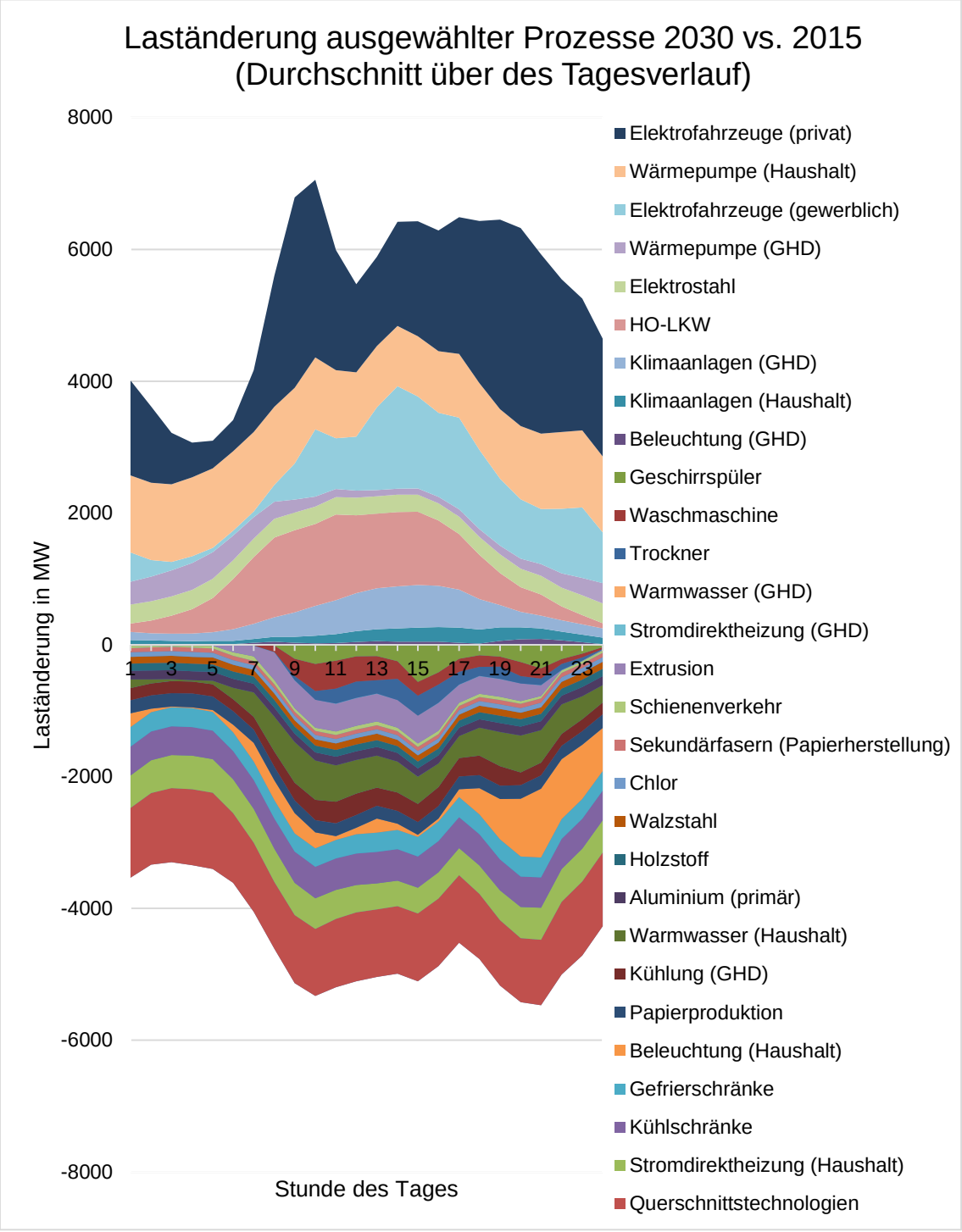

Abbildung 5: Laständerung ausgewählter Prozesse und Anwendungen zwischen 2015 und 2030. Negativer Bereich: Nachfragerückgang

Quelle: Eigene Berechnungen.

Die genannten Entwicklungen der Nachfrage einzelner Prozesse und Anwendungen schlagen sich auch in der Veränderung der Systemlast (Abbildung 6) bis zum Jahr 2030 nieder. Es ergibt sich, bedingt durch Effizienzgewinne, ein leichter Rückgang der Gesamtstromnachfrage. Dadurch sinkt die stündliche Last insbesondere zwischen 8 und 20 Uhr leicht ab. Der Strombezug für den Ladevorgang von Elektrofahrzeugen verteilt sich vor allem in die Zeit von 6 Uhr morgens bis 22 Uhr.

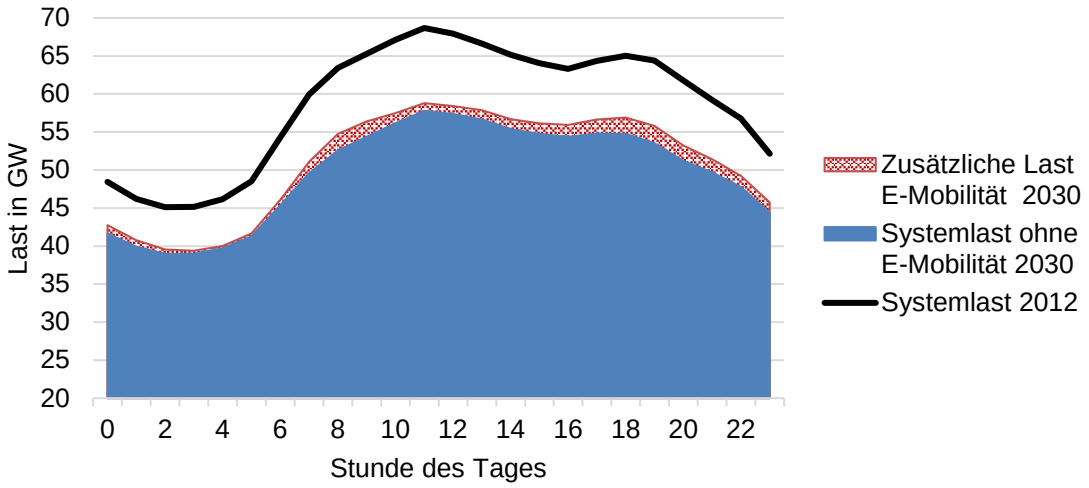

Abbildung 6: Mittlere Systemlast Deutschlands für die Jahre 2012 (Linie) und 2030 (Fläche). Für das Jahr 2030 zeigt die rote Fläche die Last privater Elektrofahrzeuge (3,7 kW-Szenario)

Durch den hohen Anteil von Fahrzeugen, die unmittelbar nach dem letzten Weg des Tages laden, steigt die Lastspitze auch unter Berücksichtigung von Ladevorgängen am Arbeitsplatz abends zusätzlich an und unterscheidet sich in seiner Höhe nur noch geringfügig von der Mittagslastspitze. Insgesamt verändert die Elektromobilität somit – auch in den 2030 nachfolgenden Jahren – die Struktur der Systemlast und verschiebt diese in die Mittags- und Abendstunden. Im Mittel erhöht sich die Systemlast im Jahr 2030 (im ungesteuerten Fall) bedingt durch private Elektrofahrzeuge um bis zu 1,3 GW.

Zur Ermittlung des stündlichen Kraftwerkseinsatzes wird die berechnete Systemlast im nächsten Schritt dem Modell MiPU übergeben. Die Stromerzeugung aus EE-Anlagen ist Pfluger et al. (2017) entnommen.

Folgende Tabelle 4 zeigt die spezifischen Emissionen für die gesamte Stromerzeugung und für die BEV in Abhängigkeit des spezifischen Lastgangs. Da BEV mehr in Abend- bzw. Nachtstunden laden, liegen ihre THG-Emissionen etwas über den durchschnittlichen (8 %), da in dieser Zeit der EE-Anteil geringer ist,

wenn kein Lademanagement (LM) unterstellt wird. Diese Werte werden für die Berechnungen der beiden Szenarien (mit und ohne Lastmanagement) verwendet.

Tabelle 4: Spezifische Emissionen für die gesamte Stromerzeugung mit und ohne Anwendung von Lastmanagement

	spez. Emissionen Stromerzeugung [g_co2/kWh]	**spez. Emissionen Stromerzeugung für BEV [g_co2/kWh]**
3.7 kW nach LM	291	194
3.7 kW vor LM	299	324

Wenn eine Lastverlagerung unterstellt wird, tragen BEV zu einer besseren Integration der fluktuierenden EE und der Vermeidung der Abregelung von Strom bei (siehe z. B. Dallinger 2012; Helms et al. 2017; Gnann et al. 2018; Wietschel et al. 2018). Eine Lastverlagerung nach preislichen Anreizen des Strommarktes, wie sie auch in anderen Studien untersucht wird, führt dazu, den Ladevorgang von Zeiten mit hohen Strompreisen in Zeiten mit niedrigen Strompreisen zu verschieben. Der Strompreis unterliegt einer Korrelation mit der Einspeisung aus EE. Dadurch sind Zeiten mit niedrigen Strompreisen häufig dadurch gekennzeichnet, dass ein hoher Anteil an EE ins Stromnetz einspeist[15]. EE haben Grenzkosten von nahe null und senken den Strompreis an der Strombörse signifikant. Wie in Tabelle 4 erkennbar ist, sinken durch Lastmanagement die THG-Emissionen für das Laden von BEV deutlich ab (35 %)[16].

In der Abbildung 7 ist der Einfluss von BEV ohne und mit Lastmanagement auf die durchschnittlichen THG-Emissionen des deutschen Kraftwerksparks abgebildet. Da besonders in den Abendstunden eine hohe Gesamtstromnachfrage mit geringer Verfügbarkeit von Einspeisung aus PV zusammenfällt, ist hier die Einspeisung aus konventionellen Kraftwerken hoch. Durch die Verschiebung von Ladevorgängen in Zeiten geringerer Gesamtstromnachfrage (siehe Abbildung 8) können in den Abendstunden konventionelle Kraftwerke (insbesondere Gaskraftwerke) zurückgefahren werden. Dies erhöht die THG-Emissionen in den Nacht- und Morgenstunden leicht. Dieser Effekt wird jedoch durch die Reduktion der Emissionen über den Tagesverlauf überkompensiert.

15 Siehe auch Falter et al. (2017).

16 In Falter et al. (2017) kommen die Autoren mit ihrer Berechnungsweise und Annahmen auf mögliche THG-Einsparungen von Elektrofahrzeugen durch Lastmanagement im Jahre 2030 auf 26%.

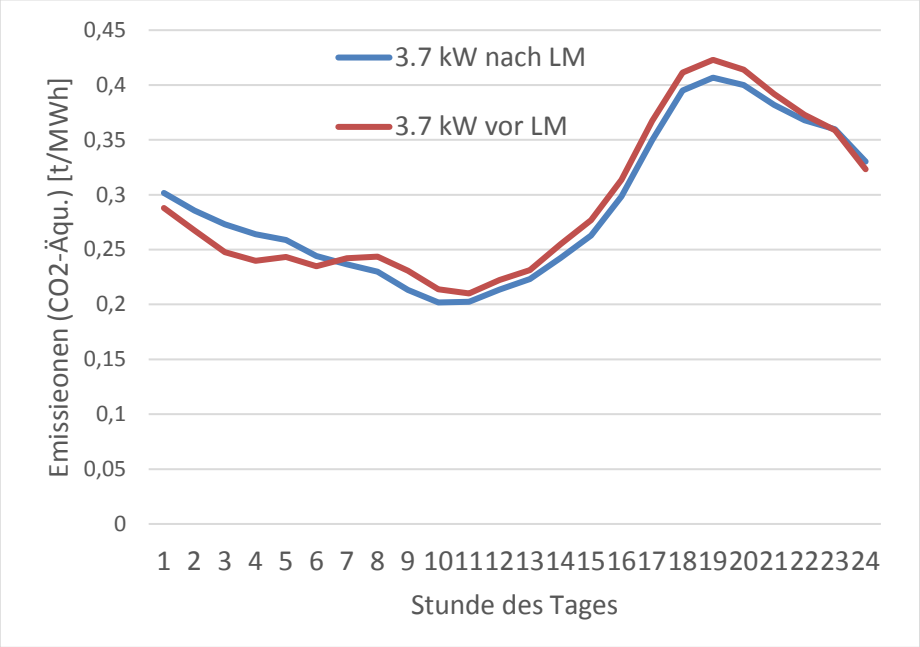

Abbildung 7: Ergebnisse der Simulation zu den durchschnittlichen stündlichen THG-Emissionen der Stromerzeugung in Deutschland im Jahre 2030 vor Lastmanagement und nach Lastmanagement (hier 3,7 kW Ladeleistung unterstellt)

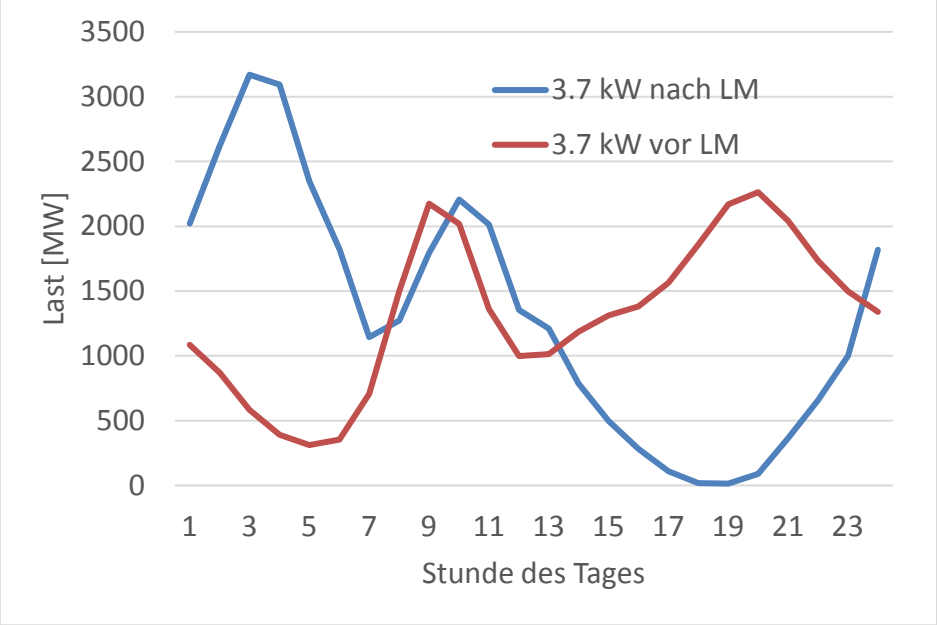

Abbildung 8: Ergebnisse der Simulation zur mittleren Last privater BEV über den Tagesverlauf in Deutschland im Jahre 2030 vor Lastmanagement und nach Lastmanagement (hier 3,7 kW Ladeleistung unterstellt)

4.7 Diskussion zu stündlichen Treibhausgasemissionen auf der Basis der Grenzkraftwerke

Teilweise werden in Studien auch die stündlichen THG-Emissionen des Grenzkraftwerks zur Bewertung der THG-Emissionen für BEV angesetzt (siehe beispielsweise Dallinger 2012; Jochem et al. 2015). Kritisch hieran ist, dass die Wahl der Anwendung, die die letzte nachgefragte stündliche Kilowattstunde Strom nachfragt, stark Annahmen getrieben ist. Jede der Anwendungen, die dann diese letzte Kilowattstunde nachfragt, schneidet schlecht ab, weil, wie in Abschnitt 4.1 dargestellt, das Grenzkraftwerk i.d.R. ein fossiles Kraftwerk ist und damit höhere THG-Emissionen aufweist als der durchschnittliche Strommix der jeweiligen Stunde.

Ein Illustrationsbeispiel: Sagt man, dass die Wärmepumpen bis 2030 einen hohen Anteil an der Stromnachfrage haben und untersucht dann die THG-Emissionen für BEV, dann schneiden diese als "Grenznachfrager" schlecht ab, die Wärmpumpen hingegen gut. Dreht man es um und lastet zuerst die BEV in das Stromsystem ein und untersucht anschließend die Effekte der Wärmepumpe, dreht sich das Ergebnisse gerade andersherum. Zur Illustration siehe Abbildung 5. Diese zeigt, dass Veränderungen der Gesamtstromnachfrage sowie der Systemlast bis zum Jahr 2030 durch eine Reihe an neuen Nachfragern verursacht ist. Deshalb wird dieser Ansatz verworfen.

4.8 Diskussion zu Treibhausgasemissionen aus Braunkohlekraftwerken

Stellenweise wird argumentiert, dass, solange Braunkohlekraftwerke (oder andere Kohlekraftwerke) noch in Betrieb sind, die zusätzliche Stromnachfrage aus BEV gegen diese zu bilanzieren sind. Auch hier kommt die Frage auf, welche neue Stromanwendung, z. B. BEV, neue IKT-Anwendungen, Wärmepumpen, Bahnstrom, Klimaanlagen etc. die letzte neue Nachfrage bilden (siehe auch die Diskussion in Kapitel 4.6 und die dort aufgezeigten Änderungen in den Anwendungen, die künftig Strom nachfragen). Dies kann wissenschaftlich nicht beantwortet werden. Weiterhin geht die Nachfrage nach Strom aus klassischer Weißer Ware (Kühlschränke, Waschmaschinen...) eher zurück (siehe Abbildung 5) und man müsste die Frage beantworten, welche neue Anwendung die entstehende Lücke füllt. Zusätzlich ist zu bedenken, dass die Ausbauziele in Deutschland –

und auch der EU[17] – für EE-Strom keine absoluten, sondern relative Ziele darstellen (BMUB 2016); d. h. eine erhöhte Stromnachfrage durch Elektromobilität führt zu einem entsprechenden höheren Ausbau an EE-Strom, wenn man ein Erreichen der politischen Ziele unterstellt.

Dass nur der Strom aus Braunkohlekraftwerken für die Herstellung von Strom für BEV unterstellt wird, ist auch aus einer anderen Perspektive kaum begründbar. Braunkohlekraftwerke sind typische Grundlastkraftwerke, die fast das ganze Jahr über konstant laufen. BEV haben hingegen eine sehr volatile Nachfrage mit Nachfragespitzen in den Abendstunden, sofern ungesteuert beladen wird.

Eine andere Frage, die in Stahl (2019) aufgeworfen wird, ist, ob man nicht lieber eine Kilowattstunde EE dazu verwenden sollte, eine Kilowattstunde Braunkohlestrom zu substituieren oder ein BEV zu betreiben. In dem Beitrag von Stahl (2019) wird berechnet, dass die Braunkohlestromsubstitution zu einer höheren CO_2-Einsparung führt und deshalb BEV heute als Klimakiller zu bezeichnen seien (Stahl 2019).

Der Beitrag lässt drei wesentliche Aspekte außer Betracht. Zum einen geht es nicht um ein entweder oder. Zur Erreichung ambitionierter Klimaschutzziele muss aus der Braunkohleerzeugung ausgestiegen werden (oder zumindest eine CO_2-Abscheidung und Speicherung bei Kohlekraftwerken vorgesehen werden) und es müssen BEV (oder andere auf emissionsfreien Quellen basierende Antriebssysteme für Pkw) eingeführt werden. In diesem Punkt sind sich alle relevanten nationalen und internationalen Studien zu Klimaschutzzielen einig (siehe z. B. BDI 2018). Eine sukzessive Vorgehensweise – erst das Abschalten von Braunkohlekraftwerken und dann die Einführung von BEV – ist wegen den Zeitkonstanten und der Marktdiffusionsgeschwindigkeit notwendiger Technologien nicht zielführend. Aus der Braunkohle wird man aus Gründen der Versorgungssicherheit, des Strukturwandels und der sozialen Gerechtigkeit schrittweise aussteigen. Neue Technologien wie die Elektromobilität hingegen brauchen Jahrzehnte, bis relevante Marktanteile erreicht werden. Vergleichbar lässt sich auch gegen andere Substitutionsansätze argumentieren, beispielsweise ob nicht lieber erst Öl bei der Hauswärmerzeugung durch EE, z. B. eine Wärmepumpe, substituiert werden sollte.

Die zweite Argumentation betrifft die Frage, ob erneuerbar erzeugter Strom tatsächlich Braunkohlestrom substituiert. Da EE-Strom in Deutschland überwiegend aus Wind- und Sonnenenergie und damit fluktuierenden Quellen bereitgestellt

17 Siehe https://ec.europa.eu/germany/news/energien20180614_de.

wird, stellt sich die Frage, ob sich damit tatsächlich Braunkohlestrom substituieren lässt. Aus einer rein technischen Sichtweise wird man Braunkohlekraftwerke nur in seltenen Fällen schnell herunterfahren, wenn mehr EE-Strom aus fluktuierenden Quellen eingespeist wird. Bestehende Braunkohlekraftwerke müssen mit einer bestimmten Minimallast gefahren werden (ca. 60 %), weisen relativ hohe Wirkungsgradverluste bei Teillast auf, haben einen vergleichsweise schlechten Lastgradienten (dieser gibt die Geschwindigkeit der Leistungsab- oder -zunahme über die Zeit an) und haben lange Anfahrzeiten, bei einem Heißstart ca. sechs Stunden und bei einem Kaltstart ca. zehn Stunden (siehe zu diesen Angaben Wietschel et al. 2015).

Es gibt eine Reihe an wissenschaftlichen Studien, die sich mit den Effekten der Einsparung von Treibhausgasemissionen durch die Erzeugung von EE-Strom detailliert auseinandergesetzt haben (siehe z. B. Klobasa et al. 2016; Memmler et al. 2018). Im Wesentlichen werden durch die erneuerbare Stromerzeugung Emissionen aus Steinkohle- und Gaskraftwerken substituiert, die von ihren technischen Eigenschaften gesehen besser regelbar sind und einen signifikant niedrigeren Beitrag an den THG-Emissionen haben – im Vergleich zu Braunkohlekraftwerken.

Die dritte Argumentation betrifft die Frage, wenn man bei der Stromerzeugung die aus Emissionssicht schlechteste Kraftwerkstechnologie wählt, müsste man dann nicht auch die schlechteste Option bei der Herstellung von Benzin und Diesel wählen? Öl ist ein Weltmarktprodukt und die relevanten Ölquellen mit der schlechtesten Treibhausgasbilanz sind die sogenannten Ölsande oder die Ölproduktion aus Fracking. Heute schon haben diese sogenannten unkonventionellen Quellen einen Anteil an der Weltmarktproduktion, der aufgrund der hohen Vorkommen bei gleichzeitiger Abnahme der konventionellen Ölproduktion künftig den relevanten Prognosen nach weiter steigen wird.

Bei den Ölsanden ist der Energieverbrauch ca. achtfach höher als bei der konventionellen Öl-/Gasförderung. Hierbei gehen etwa 15 % der Energie aufgrund der aufwendigeren Produktionsverfahren verloren. Pro Barrel Öl werden zwischen 80,8 und 122 Kilogramm CO_2 freigesetzt. Dieser Wert ist drei- bis fünfmal so hoch wie bei der konventionellen Ölförderung (Greenpeace 2015). Damit umfassen die CO_2-Emissionen pro Liter an der Tankstelle nicht 10 bis 20 Gramm, sondern 60 bis 100 Gramm, was die Treibhausgasbilanz der konventionellen Pkw deutlich verschlechtert. Bei der Schieferölproduktion in den USA werden zusätzlich große Mengen an Erdgas in die Atmosphäre ausgestoßen**.** Methan (CH_4)

als Hauptbestandteil des Erdgases hat pro Menge einen deutlich höheren Treibhauseffekt als CO_2 (Deutscher Bundestag 2007).

4.9 Treibhausgasemissionen bei konventionellen Kraftstoffen

Nach UBA (2017) betragen bei Diesel die THG-Emissionen unter Berücksichtigung der Vorketten 3,08 kgCO2eq/l und bei Benzin 2,73 kgCO2/l. Diese Werte werden für die Berechnungen verwendet.

Eine Option, die THG-Bilanz im Fahrzeugbestand bei konventionellen Pkw zu verbessern, besteht in der Beimischung oder im vollständigen Ersatz durch Biokraftstoffe oder der Herstellung synthetischer, erneuerbarer Kraftstoffe. Die THG-Bilanz bei Biokraftoffen ist von einer Vielzahl an Einflussfaktoren abhängig (Ausgangsprodukt, Herstellungsverfahren, Anbaufläche...) und kann von einer großen THG-Einsparung bis hin zu einer THG-Erhöhung gegenüber Pkw mit konventionellen Kraftstoffen führen (JRC 2014). Der Anteil von Biokraftstoffen in Deutschland ist in den letzten Jahren annähernd konstant zwischen 5 bis 6 % geblieben. Bioethanol und Biodiesel dominieren dabei (siehe FNR 2019). Auf Basis der Angaben in Öko-Institut (2010), JRC (2014) und Euractiv (2019) wird davon ausgegangen, dass die CO_2-eq der Biokraftstoffe, die in Deutschland zum Einsatz kommen, halb so groß sind wie die bei den konventionellen Kraftstoffen. Es wird in dieser Arbeit unterstellt, dass der Biokraftstoffanteil von heute 5 auf 11 % bis 2030 steigt (siehe eine vergleichbare Annahme in Helms et al. (2016)).

5 Ergebnisse: Die Treibhausgasemissionsbilanz von Batteriefahrzeugen gegenüber konventionellen Fahrzeugen

Auf Basis der vorgestellten Ansätze zur Quantifizierung der THG-Emissionen von Elektrofahrzeugen werden innerhalb dieses Kapitels die Ergebnisse für die Ökobilanz verschiedener Antriebstechnologien vorgestellt. Für Elektrofahrzeuge wird dabei nach den beschriebenen Szenarien in Bezug auf die Stromherkunft und die Ladestrategie differenziert.

In den folgenden drei Abbildungen 9 bis 11 ist die THG-Bilanz für die drei Fahrzeugklassen über die Nutzungsdauer aufsummiert dargestellt.

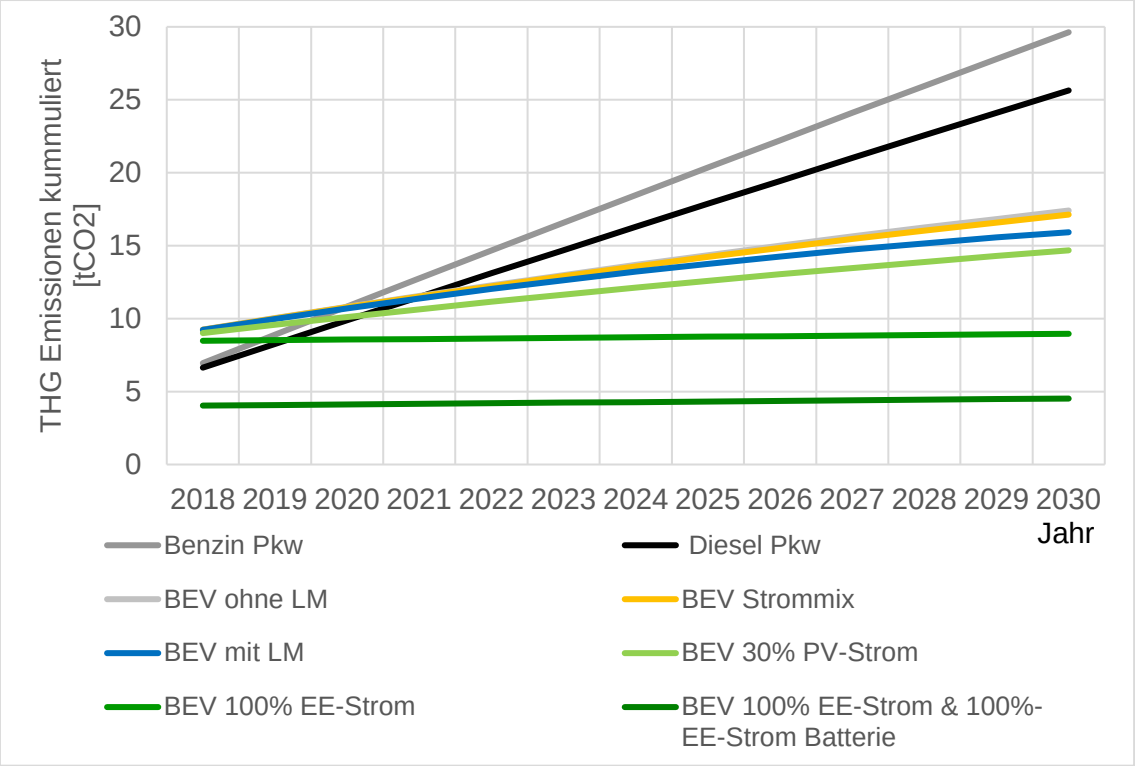

Abbildung 9: Kumulierte THG-Emissionen pro Kleinwagen über die Nutzungsdauer aufsummiert (LM: Lastmanagement und stündliche THG-Werte, BEV: Batterie-Pkw, EE: Erneuerbare Energien, Strommix: jährlicher THG-Durchschnittswert)

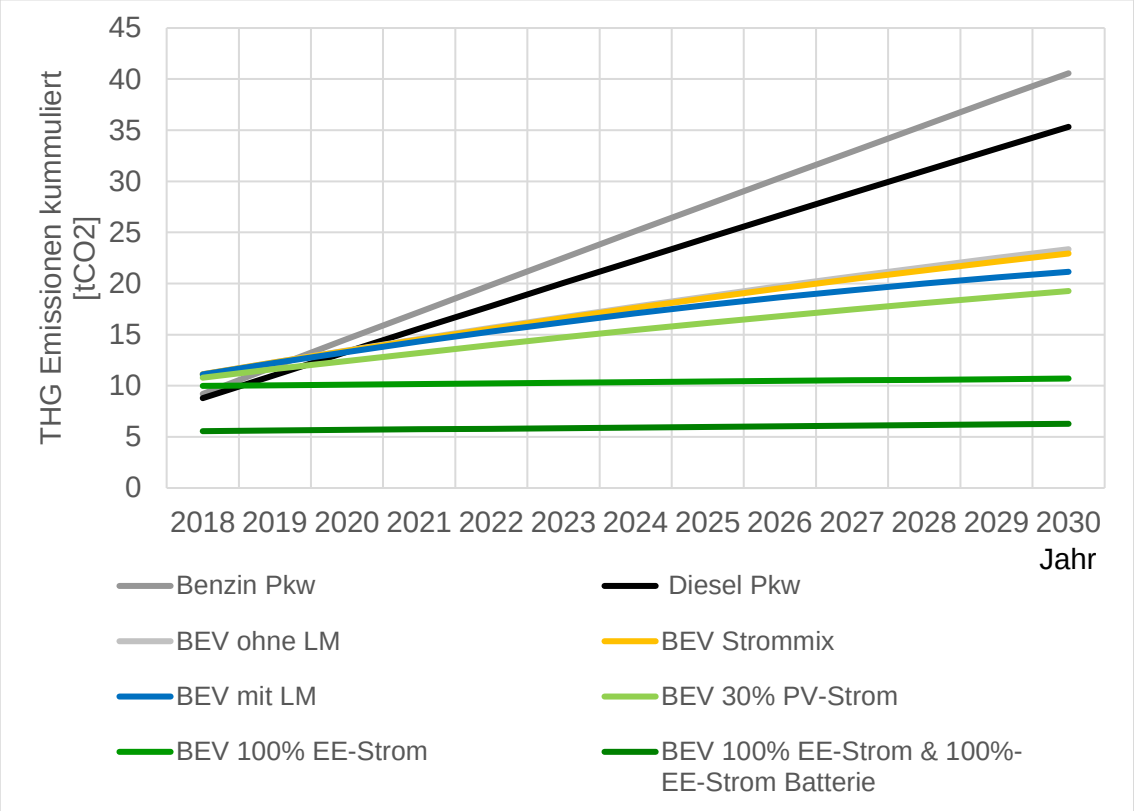

Abbildung 10: Kumulierte THG-Emissionen pro Mittelklassewagen über die Nutzungsdauer aufsummiert (LM: Lastmanagement und stündliche THG-Werte, BEV: Batterie-Pkw, EE: Erneuerbare Energien, Strommix: jährlicher THG-Durchschnittswert)

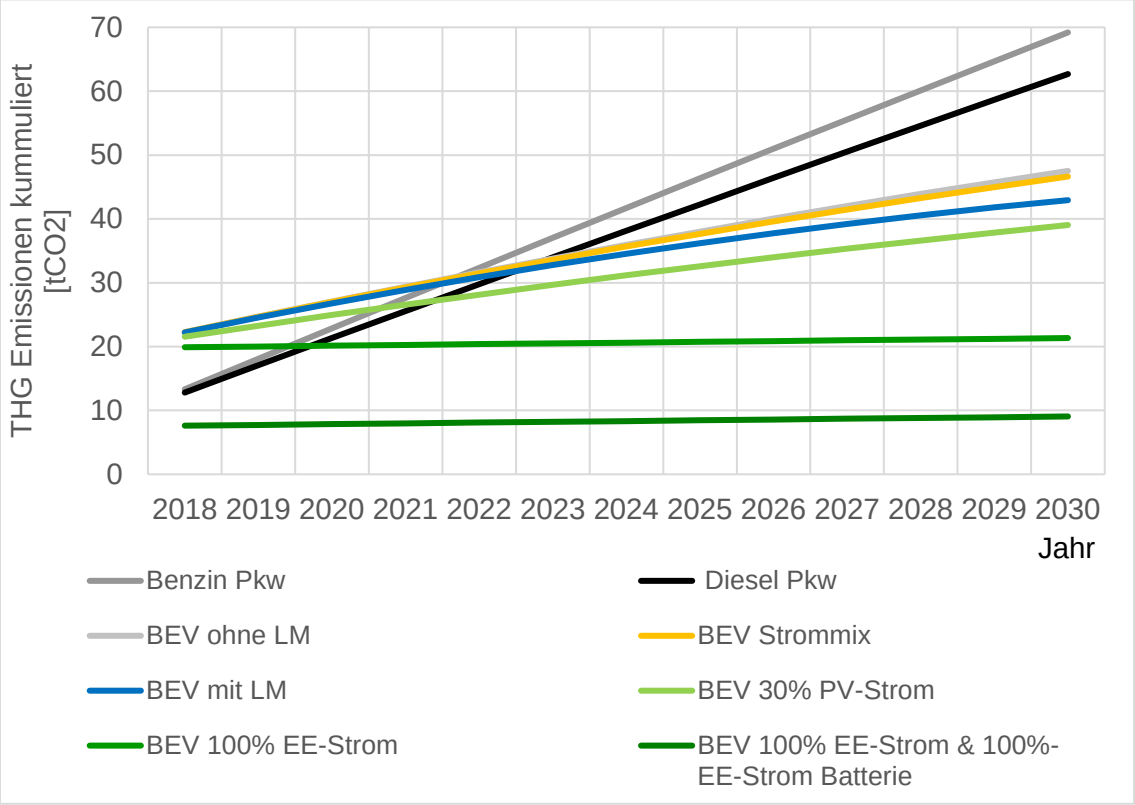

Abbildung 11: Kumulierte THG-Emissionen pro Oberklassewagen über die Nutzungsdauer aufsummiert (LM: Lastmanagement und stündliche THG-Werte, BEV: Batterie-Pkw, EE: Erneuerbare Energien, Strommix: jährlicher THG-Durchschnittswert)

Die Ergebnisse zeigen für alle drei Fahrzeugklassen und alle unterstellten Szenarien eine sehr deutlich positive THG-Gesamtbilanz von Elektrofahrzeugen. Wenn man als Worst-Case die Nutzung des deutschen Strommixes unterstellt, betragen die THG-Einsparungen im ungünstigsten Fall beim Vergleich mit einem Kleinwagen-Diesel 5 t COeq, im günstigsten Fall gegenüber einem Oberklassen-Benziner 23 t. Die Spannweite der prozentualen Einsparungen reichen von 28 % gegenüber einem Oberklassewagen Diesel bis zu 42 % gegenüber einem Kleinwagen Benziner, wenn man den Strommix in Deutschland zugrunde legt.

Bei Klein- und Mittelkassenfahrzeugen sind die THG-Bilanzen spätestens nach zwei bis drei Jahren positiv, d. h. die höheren THG-Emissionen aus der Fahrzeugproduktion werden kompensiert. Bei Oberklassen-Fahrzeugen liegt dieser Wert zwischen drei und sechs Jahren. Aus den Ergebnissen erkennt man den hohen Einfluss der Verwendung von Strom aus erneuerbaren Quellen. Damit lassen sich die THG-Emissionen um ca. 70 % in allen berechneten Fällen reduzieren. Aber auch die Verwendung von PV-Strom (zu 30 % angesetzt) verbessert

die THG-Bilanz von BEV um 8%- bis 11%-Punkte im Vergleich zum Strommix-Szenario. Beim Lastmanagement liegen die Werte zwischen 4 bis 6%-Punkte. Man sieht in den Ergebnissen aber auch den relevanten Einfluss der THG-Emissionen durch die Batterieproduktion. Wenn es gelingt, diese deutlich zu senken, so hat dies ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse.

Die Ergebnisse sind sehr robust. Nur wenn man extremere Annahmen trifft, z. B. sehr hohe Batteriekapazitäten mit geringer jährlicher Laufleistung und lediglich eine geringe Verbesserung des deutschen Strommixes zugrunde legt, kippt die Bilanz[18]. Um die Frage der unterschiedlichen Reichweiten der konventionellen Pkw und BEV abzubilden, wird eine Sensitivität der Ergebnisse berechnet, die die THG-Bilanz in Abhängigkeit der Reichweite aufzeigt (siehe folgende Abbildungen 12 und 13)[19]. Dabei werden nur die Batteriegrößen erhöht, ohne andere Aspekte wie einen höheren Verbrauch aufgrund des gestiegenen Fahrzeuggewichtes und eine technische Realisierbarkeit zu beachten.

18 Sensitivitätsrechnung: Oberklassewagen mit 100 kWh Batteriekapazität, jährlicher Laufleistung von 10.000 km und einer CO2-Intensität des deutschen Strommixes von 500 CO_{2eq}/kWh (heute und in 2030) im Vergleich zu einem Dieselfahrzeug.

19 Siehe auch ein vergleichbares Vorgehen in Ludwig et al. 2018.

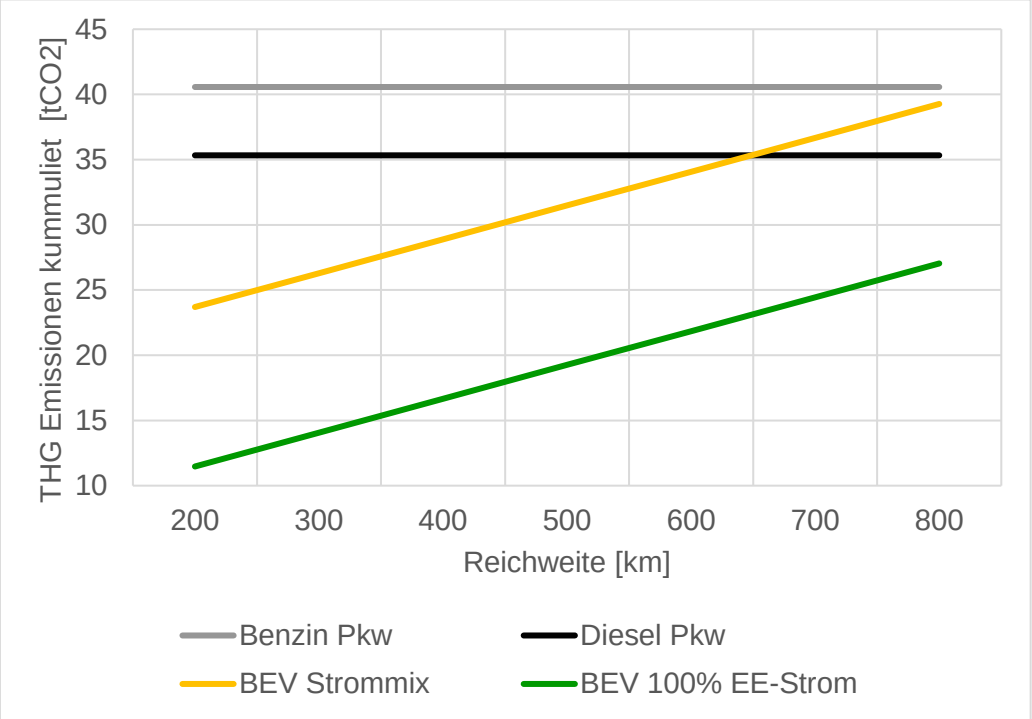

Abbildung 12: Kumulierte THG-Emissionen pro Mittelklassewagen über die Nutzungsdauer und variierender Reichweite aufsummiert

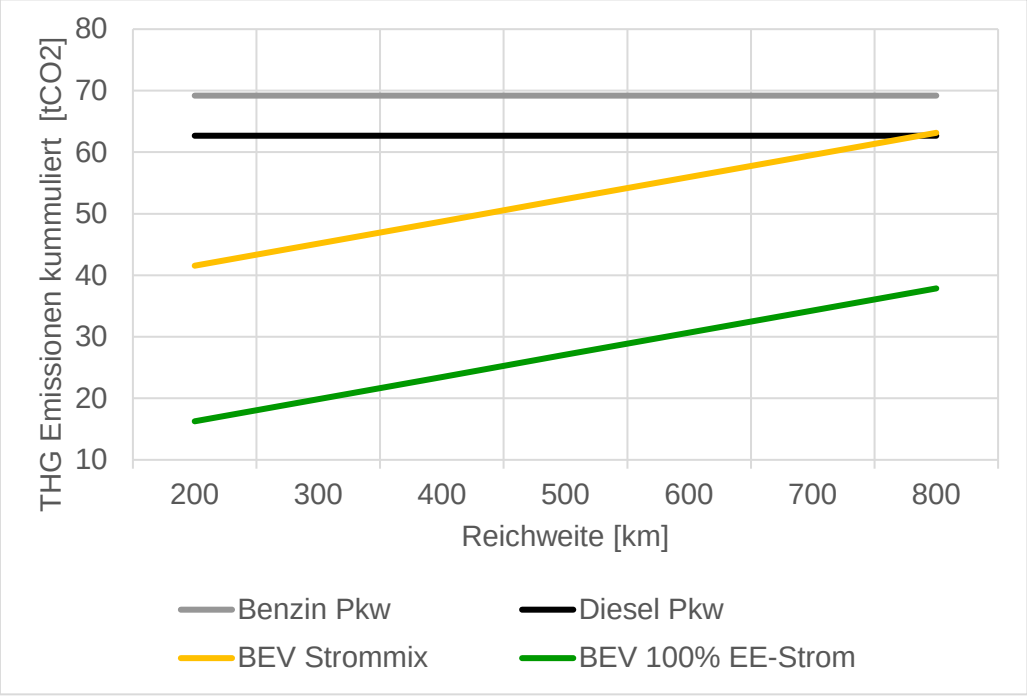

Abbildung 13: Kumulierte THG-Emissionen pro Oberklassewagen über die Nutzungsdauer und variierender Reichweite aufsummiert

Ab einer Reichweite von 650 km (Mittelklasse) bzw. 800 km (Oberklasse) sind die THG-Emissionen der Batterieproduktion aufgrund der hohen Batteriekapazität so groß, dass der Dieselwagen gegenüber dem Elektrofahrzeug eine positive THG-Gesamtbilanz aufweist. Wenn anstelle des deutschen Strommixes der Strom zu 100 % aus erneuerbaren Energien bereitgestellt wird, weist in beiden Fahrzeugklassen das Elektrofahrzeug eine sehr deutlich positivere THG-Gesamtbilanz, auch bei sehr großen Reichweiten, auf.

6 Diskussion ausgewählter Aspekte

Der vorliegende Beitrag bezieht sich ausschließlich auf die Klimabilanz verschiedener Fahrzeuge. Allerdings muss erwähnt werden, dass sich die Antriebssysteme auch bei anderen Umweltauswirkungen wie Versauerung, Feinstaub, Sommersmog oder Wasserentnahme unterscheiden (Helms et al. 2016; Helmers et al. 2017; UBA 2018a; Manzetti et al. 2015; Frischknecht et al. 2018). Bei manchen schneiden BEV besser ab, z. B. bei lokalen NO_x-Emissionen, bei anderen wiederum, wie dem Rohstoffaufwand, schlechter. Eine ganzheitliche Umweltbewertung bietet sich deshalb ebenfalls an.

Bei der vorliegenden Betrachtung bleiben Rebound-Effekte durch BEV unberücksichtigt. Mit Rebound-Effekt wird der Effekt bezeichnet, der dazu führt, dass das Einsparpotenzial von Effizienzsteigerungen nicht oder nur teilweise verwirklicht wird. Bei BEV könnte ein tatsächlicher oder vermeidlicher positiverer Umwelteffekt zur höheren Nutzung der Fahrzeuge führen. Hier liegen allerdings derzeit nach dem Wissensstand der Autoren noch keine wissenschaftlichen Erkenntnisse und empirischen Erhebungen vor.

Für die Analysen wurde der Fall untersucht, wie ein in 2018 angeschafftes BEV zu bewerten ist. Dazu wurde soweit möglich auf empirische Daten zurückgegriffen. Künftig können sich die Rahmenbedingungen und dadurch die zugrunde gelegten Parameter ändern. Zum Beispiel könnten die Fahrzeugbatterien aus Gründen der Reichweite immer größer werden oder der Anteil der BEV-Nutzer mit PV-Anlagen kann sich ändern. Die Übertragung der Ergebnisse auf die Zukunft ist deshalb mit aller Vorsicht vorzunehmen.

Die in dieser Studie unterstellte Beimischung von Biokraftstoffen kann sich künftig noch deutlich mehr erhöhen oder synthetische Kraftstoffe aus erneuerbarer Stromproduktion können vermehrt eingesetzt werden, was die THG-Bilanz der konventionellen Pkw verbessen kann. Bei Biokraftstoffen ist allerdings das Potenzial beschränkt, es herrscht eine starke Nutzungskonkurrenz vor und die THG-Bilanz kann sehr unterschiedlich ausfallen. Aus THG-Sicht sind zukünftig insbesondere die Biomassepfade der zweiten Generation von Interesse.

Aufgrund des durchschnittlichen Gesamtwirkungsgrades bei synthetischen strombasierten Kraftstoffen (von Herstellung über Nutzung) benötigen sie das Vierfache an Erneuerbaren Energien gegenüber BEV. Derzeit ist die Verwendung von ausschließlich erneuerbarem Strom bei der Herstellung von syntheti-

schen Kraftstoffen noch weit von einer wirtschaftlichen Anwendung entfernt. Deshalb werden diese wohl erst nach 2030 eine relevante Rolle spielen können[20]. Wenn man ein PtL-Szenario[21] auf Basis 100 % EE unterstellt, dann schneiden diese Fahrzeuge aufgrund der geringen THG-Emissionen in der Herstellung besser ab als BEV (siehe auch Ludwig et al. 2018)

Unterstellt man die Herstellung synthetischer Kraftstoffe auf der Basis des deutschen Strommixes so schneiden sie deutlich schlechter ab als die BEV und auch als die konventionellen Pkw.

Weiterhin ist zu beachten, dass sich konventionelle Pkw und BEV in vielen Aspekten aus Kundensicht unterscheiden und deshalb nur bedingt vergleichbar sind. U.a. die höhere Reichweite, das größere Platzangebot und die schnellere Betankungszeit sprechen für den konventionellen Pkw. Die bessere Beschleunigung, die geringeren Lärmemissionen, die geringeren NO_x-und Feinstaubemissionen, die drohende und zunehmend steigende Anzahl an Fahrverboten für konventionelle Fahrzeuge in Städten und ganzen Ländern sowie das Image eines innovativen, umweltfreundlichen Fahrzeuges sprechen hingegen für den BEV.

20 Siehe hierzu den Kraftstoffeinsatz im Verkehr in BDI (2018) und Pfluger et al. (2017); in dena 2018 wird hingegen bereits im Jahre 2030 ein Einsatz von PtL bei Pkw im geringeren Umfang gesehen.

21 Power-to-Liquid (PtL) bezeichnet die strombasierte Herstellung von flüssigen Kraftstoffen.

7 Zusammenfassung und Fazit

Die vorliegende Studie geht der Frage nach, ob ein heute angeschafftes batterieelektrisches Fahrzeug (BEV) in Deutschland gegenüber konventionellen Pkw einen Vorteil oder Nachteil bezüglich seiner Klimabilanz hat. Die Analysen werden ganzheitlich durchgeführt, d. h. neben der Nutzungsphase wird auch die Fahrzeugproduktion eingeschlossen. Es werden drei Fahrzeugklassen mit repräsentativen Annahmen für Deutschland bewertet.

Ein heute in Deutschland gekauftes elektrisches Batteriefahrzeug (BEV) weist über seine durchschnittliche Nutzungsdauer von 13 Jahren eine deutliche Treibhausgas(THG)-Einsparung auf. Die Spannweite der Einsparung liegt von 28 % gegenüber einem Oberklassewagen Diesel bis zu 42 % gegenüber einem Kleinwagen Benziner, wenn man den Strommix in Deutschland zugrunde legt. Wesentlich hierfür ist die Annahme, dass die in der Vergangenheit bereits erreichte deutliche Senkung der Treibhausgasemissionen bei der Stromerzeugung auch künftig weiter fortgesetzt wird, gemäß den politisch gesetzten Zielen der Bundesregierung sowie von verschiedenen wissenschaftlichen Studien prognostiziert. Der wesentliche Umweltvorteil der BEV gegenüber konventionellen Fahrzeugen liegt darin begründet, dass jedes Bestandsfahrzeug von der Verbesserung bei der Stromerzeugung profitiert. Ein konventionelles mit Benzin oder Diesel betriebenes Fahrzeug hat hingegen über seine gesamte Nutzungsdauer die Emissionen wie zu seinem Anschaffungszeitpunkt. Durch die auch in dieser Studie unterstellte höhere Beimischung von Biokraftstoffen über die Zeit verbessert sich zwar die THG-Bilanz der konventionellen Pkw auch, aber nur geringfügig. Eine mögliche künftige Verschlechterung der THG-Bilanz von konventionellen Fahrzeugen liegt in der aktuell steigenden Nutzung von unkonventionellen Ölvorkommen (Ölsande, Fracking). Dieser Effekt wurde hier allerdings nicht betrachtet.

Viele der vorliegenden Studien ignorieren den Effekt der sinkenden THG-Emissionen der Stromerzeugung über die Nutzungsdauer eines Pkw. Sie treffen die wenig plausible Annahme, dass künftig keine weitere Senkung der THG-Emissionen im Stromsektor erreicht wird. Wenn dies unterstellt wird, dann sind die Einsparungen durch BEV deutlich geringer.

Es existieren vier große Hebel für eine weitere deutliche Verbesserung der Klimabilanz von BEV, die heute schon in Teilen umgesetzt werden:

- **Durch die Nutzung von eigenen PV-Anlagen, evtl. noch verbunden mit stationären Speichern**. Knapp 50 % der BEV-Nutzer haben heute bereits eine eigene PV-Anlage und diese besitzen auch überdurchschnittlich häufig

bereits einen stationären Batteriespeicher. Hierdurch werden die THG-Emissionen von heutigen BEV-Nutzern in Deutschland gesenkt. Im Vergleich zum Ansatz des Strommixes und bei Anrechnung von 30 % PV-Strom beim Laden werden die THG-Emissionen der BEV noch einmal um 8 bis 11 Prozentpunkte gesenkt.

- **Durch die Nutzung von Ökostrom, der aus zusätzlichen Erneuerbaren Quellen stammt**. BEV-Nutzer nutzen überdurchschnittlich häufig heute schon solche Angebote, wobei die Anzahl derartiger Angebote allerdings noch gering ist und künftig deutlich ausgebaut werden sollte.

  Unterstellt man eine 100%ige Versorgung mit regenerativem Strom durch eigene PV-Anlage mit Speicher bzw. die Nutzung eines ambitionierten Ökostromangebots, dann liegen die THG-Emissionen eines BEV gegenüber einem konventionellen Pkw um 65 bis 75 % niedriger.

- **Durch die Verringerung der Vorkettenemissionen bei der eigentlichen Batterieherstellung** durch die Nutzung von regenerativen Energien, so wie es von wenigen großen Batterieherstelllern heute schon angestrebt wird. Die Vorkettenemissionen der Fahrzeugproduktion, die bei BEV durch die Batterieherstellung deutlich über den von konventionellen Fahrzeugen liegen, können so um 30 bis 50 % gesenkt werden.

- **Durch intelligentes Lademanagement**, bei dem die Beladung von BEV in Zeiten mit günstigen Strompreisen verschoben wird, die i.d.R. mit einem hohen Anteil an Erneuerbaren Energien korrelieren. Die Simulationsrechnungen haben gezeigt, dass hierdurch die THG der BEV noch einmal um 4 bis 6%-Punkte gesenkt werden können, wenn der Strommix unterstellt wird. Derartige Angebote existieren heute, sind aber noch nicht sehr verbreitet. BEV-Nutzer äußerten in einer Befragung eine recht hohe Bereitschaft zur Teilnahme an solchen Angeboten.

Es ist wichtig zu erwähnen, dass die Klimabilanz eines BEV von einer Reihe an Einflussfaktoren abhängt. Die wichtigsten sind die Emissionen der Stromerzeugung, die Emissionen bei der Fahrzeugproduktion, die wesentlich durch die Batteriegröße und dem Energieeinsatz bei der Produktion bestimmt werden, die gesamte Laufleistung des Fahrzeuges, die Lebensdauer der Batterie sowie der Energieverbrauch des Fahrzeuges, der u. a. vom Fahrzeuggewicht, der individuellen Fahrweise und den klimatischen Bedingungen bestimmt wird. Das heißt, die individuelle Treibhausgasbilanz eines BEV kann sehr unterschiedlich ausfallen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein heute angeschafftes Elektroauto in Deutschland einen relevanten Beitrag zur Senkung der Treibhausgase über seine Nutzungszeit liefert. Nutzer sowie Industrie haben zudem eine Reihe

an schnell zu realisierenden Optionen, die Treibhausgasbilanz eines Elektrofahrzeuges noch deutlich zu steigern.

8 Quellen

ADAC (2018a): Elektro, Gas, Benzin, Diesel & Hybrid: Die Ökobilanz unserer Autos. Online verfügbar unter https://www.adac.de/der-adac/motorwelt/reportagen-berichte/auto-innovation/studie-oekobilanz-pkw-antriebe-2018/, zuletzt geprüft am 05.02.2019.

ADAC (2018b): Elektroautos im Test: So hoch ist der Stromverbrauch. Online verfügbar unter https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/stromverbrauch-elektroautos-adac-test/, zuletzt geprüft am 13.02.2019.

ADAC (2019a): Die TOP 10 der Oberklasse. Online verfügbar unter https://www.adac.de/_mmm/pdf/TOP10-Autokosten-Oberklasse_48952.pdf, zuletzt geprüft am 13.02.2019.

ADAC (2019b): Die TOP 10 der verbrauchsgünstigsten Diesel Kleinst-/Kleinwagen - Klasse. Online verfügbar unter https://www.adac.de/_mmm/pdf/top10-spritsparmodelle-kleinwagenklassen-d_48944.pdf, zuletzt geprüft am 13.02.2019.

BDI (2018): Klimapfade für Deutschland. Studie im Auftrag des BDI durchgeführt von BCG und Prognos. BCG: Berlin

BMUB (2016): Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Bonou, A.; Alexis Laurent, A.; Olsen, S. I. (2016): Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy-from theory to application. In Applied Energy Volume 180, 15 October 2016, Pages 327-33.

Boßmann, Tobias (2015): The contribution of electricity consumers to peak shaving and the integration of renewable energy sources by means of demand response. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.

Bundesanstalt für Straßenwesen (2014): Fahrleistungserhebung 2014. Online verfügbar unter https://www.bast.de/DE/Verkehrssicherheit/Fachthemen/u2-fahrleistung-2014/u2-Fahrleistung-2014-ergebnisse, zuletzt geprüft am 15.02.2019.

Dallinger, D.; Schmid, J. (Hrsg.) (2012): Plug-in electric vehicles integrating fluctuating renewable electricity. Disseration. Veröffentlicht in der Buchserie Erneuerbare Energien und Energieeffizienz, Band 20. Universität Kassel.

dena (2018): dena Leitstudie - Integrierte Energiewende. Deutsche Energie-Agentur (dena): Berlin.

Deutscher Bundestag (2007): CO_2-Bilanzen verschiedener Energieträger im Vergleich. Zur Klimafreundlichkeit von fossilen Energien, Kernenergie und erneuerbaren Energien. Online verfügbar unter https://www.bundestag.de/blob/406432/c4cbd6c8c74ec40df8d9cda8fe2f7dbb/wd-8-056-07-pdf-data.pdf zuletzt geprüft am 21.01.2019.

DIN ISO 14040 (2009): Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN ISO 14044 (2006): Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN ISO/TS 14067 (2013): Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification and communication. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Egedea, P.; Dettmera, T., Herrmanna, C.; Karab, S. (2015): Life Cycle Assessment of Electric Vehicles – A Framework to Consider. ScienceDirect - The 22nd CIRP conference on Life Cycle Engineering.

Ensslen, A.; Schücking, M.; Jochem, P.; Steffens, H.; Fichtner, W.; Wollersheim, O; KevStella, K. (2017): Empirical carbon dioxide emissions of electric vehicles in a French-German commuter fleet test. In Journal of Cleaner Production, 142 (2017), pp. 263-278.

EURACTIV (2019): Studie: Die EU unterschätzt Treibhausgas-Einsparungen durch Bioraftstoffe. EURATCIV. Internet Download vom 11.02.2019: https://www.euractiv.de/section/energie-und-umwelt/news/studie-die-eu-unterschatzt-treibhausgas-einsparungen-durch-biokraftstoffe/.

Fattler, S.; Böing, F.; Pellinger, Ch. (2017): Ladesteuerung von Elektrofahrzeugen und deren Einfluss. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien IEWT 2017

FhG-ISE (2018): Photovoltaics Report. Fraunhofer ISE Freiburg. Online verfügbar unter https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf zuletzt geprüft am 05.02.2019.

FNR (2019): Aktuelle Marktsituation - Kraftstoffabsatz in Deutschland 2016. Internetdownload vom 11.02.2019: https://biokraftstoffe.fnr.de/kraftstoffe/aktuelle-marktsituation/.

Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) (2017): Basisdaten zur Bereitstellung elektrischer Energie. Online verfügbar unter https://www.ffe.de/themen-und-methoden/erzeugung-und-markt/186-basisdaten-energietraeger, zuletzt geprüft am 05.02.2019.

Fraunhofer ISI (2015). REM2030 Driving Profiles Database V2015. Fraunhofer Institute of Systems and Innovation Research ISI, Karlsruhe, Germany.

Frenzel, I., et al. (2015). Erstnutzer von Elektrofahrzeugen in Deutschland. Nutzerprofile, Anschaffung, Fahrzeugnutzung, DLR-Forschungsbericht, Ergebnisbericht der Nutzerbefragung von Elektrofahrzeugen in Deutschland. Köln: DLR.

Frischknecht, R.; Messmer, A.; Stolz, P. (2018): Aktualisierte Umweltaspekte von Elektrofahrzeugen - Eine Argumentarium. Eine Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt. Durchgeführt von treeze. treeze: Uster.

Genovese, A.; Ortenzi, F.; Villante, C. (2015): On the energy efficiency of quick DC vehicle battery charging. Konferenzbeitrag auf der EVS28, 03.-06. Mai, 2015, KINTEX, Korea.

Gerbinet, S.; Belboom, S.; Angélique Léonard, A. (2014): Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. In Renewable and Sustainable Energy Reviews 38:747 - 753.

Gnann, T.; Klingler, A.; Kühnbach, M. (2018): The load shift potential of plug-in electric vehicles with different amounts of charging infrastructure, Journal of Power Sources, Vol 390, p. 20-29.

Goe, M.; Gaustad, G. (2014): Strengthening the case for recycling photovoltaics: An energy payback analysis. In Applied Energy. 120: 41–48.

Greenpeace (2015): Öl. Report 2016. Online verfügbar unter https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/oel-report-2016-greenpeace-20160108_0.pdf, zuletzt geprüft am 17.01.2019.

Greiner, B.; Hermann, H. (2016): Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 – Stromerzeugung. Arbeitspaket 1.2 im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Wissenschaftliche Unterstützung „Erstellung und Begleitung des Klimaschutzplans2050“ (FKZ UM 15 41 1860). Berlin: Öko-Institut.

Handelsblatt (2018): Diese Emissionen haben Batterien von Elektroautos. Online verfügbar unter https://edison.handelsblatt.com/erklaeren/diese-emissionen-haben-batterien-von-elektroautos/22654274.html, zuletzt geprüft am 13.02.2019.

Hardmann, S. et al. (2018): A review of consumer preferences of and interactions with electric vehicle charging infrastructure. In Transport Reserach Part D. (2018), 508 -523.

Hawkins, T. et al. (2013): Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles - supporting information. In: Journal of Industrial Ecology 17(1), 53-64.

Helmers, E.; Weiss, M. (2017): Advances and critical aspects in the Life-Cycle-Assessment of Battery Electric Vehicles. In Energy and Emission Control Technology. 01. February 2017.

Helms, H.; Jöhrens, J.; Kämper, C.; Giegrich, J.; Liebich, A.; Vogt, R.; Lamprecht, U. (2016): Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeuge. Studie im Auftrag des Umweltbundesamts (UBA). Durchführung der Studie: ifeu. UBA: Dessau.

Henßler, S. (2018): BMW, Northvolt und Umicore gründen Technologiekonsortium zur Weiterentwicklung einer vollständigen, nachhaltigen Wertschöpfungskette für Batteriezellen. Online verfügbar unter https://www.elektroauto-news.net/2018/bmw-northvolt-umicore-technologiekonsortium-wertschoepfungskette-batteriezellen, zuletzt geprüft am 05.02.2019.

ICCT (2018): Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions. Briefing. ICCT

IPCC (2006): Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 1. General Guidance and Reporting. Hg. v. Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC (2014): IPCC Working Group III – Mitigation of Climate Change, Annex II Metrics and Methodology - Table A.III.2 (Emissions of selected electricity supply technologies (gCO_2eq/kWh)). pp. 14–31.

Jochem, P.; Babrowski, S.; Fichtner, W. (2015): Assessing CO_2 emissions of electric vehicles in Germany in 2030. In Transport Research Part A, 78 (2015), pp. 68-83.

JRC (2014): Well-To-Wheels Report Version 4.1 - Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive. Joint Research Centre: Ispra.

Klingler, A.L. (2018): The effect of electric vehicles and heat pumps on the market potential of PV þ battery systems. In Energy 161 (2018) 1064-1073.

Klobasa, M.; Sensfuss, F. (2016): CO_2-Minderung im Stromsektor durch den Einsatz erneuerbarer Energien in den Jahren 2012 und 2013 - Europaweite Modellierung der Substitutionsbeziehungen unter Berücksichtigung des deutschen Stromaußenhandels. Sachverständigengutachten für das Umweltbundesamt (UBA). Durchgeführt vom Fraunhofer ISI. UBA: Dessau.

Landau, M.; Prior, J.; Roland Gaber, R.; Scheibe, M.; Marklein, R.; Kirchhof, J. (2016): Technische Begleitforschung Allianz Elektromobilität - Terable. Abschlussbericht. Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, IWES Institutsteil Kassel.

Ludwig, O.; Muth, J.; Gernuks, M.; Schröder, H.; Lösche-ter Horst, T. (2018): Anwendungsfallabhängige CO_2-Bilanzen elektrifizierter Fahrzeugantriebe. Volkswagen AG, Wolfsburg.

Manzetti, S.; Mariasiu, F. (2015): Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems. In Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 51, November 2015, Pages 1004-1012.

Memmler, M.; Lauf, Th.; Schneider, S. (2018): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger - Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2017. Umweltbundesamt (UBA): Dessau.

Michaelis, Julia (2018): Modellgestützte Wirtschaftlichkeitsbewertung von Betriebskonzepten für Elektrolyseure in einem Energiesystem mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien. Stuttgart: Fraunhofer Verlag (ISI-Schriftenreihe Innovationspotenziale).

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, Karlsruhe, Germany.

Moro, A.; Lonza, L. (2018): Electricity carbon intensity in European Member States: Impacts on GHG emissions of electric vehicles. In Transportation Research Part D: Transport and Environment. Volume 64, October 2018, Pages 5-14.

Öko-Institut (2018). Elektromobilität - Faktencheck - Fragen und Antworten. Öko-Institut: Berlin

Öko-Institut, Fraunhofer ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU). Online verfügbar unter https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf, zuletzt geprüft am 01.09.2017.

Pettinger, K. H.; Dong, W. (2017): When Does the Operation of a Battery Become Environmentally Positive? In Journal of the Electrochemical Society, 164 (1).

Pfluger, B.; Tersteegen, B.; Franke, B.; Bernath, C.; Boßmann, T.; Deac, G. et al. (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.

Plötz, P., Funke, S. Á., Jochem, P. (2017a): Empirical Fuel Consumption and CO2 Emissions of Plug-In Hybrid Electric Vehicles. Journal of Industrial Ecology, Online First. http://dx.doi.org/10.1111/jiec.12623.

Plötz, P., Gnann, T., Kagerbauer, M., Heilig, M. (2017b): Can Models Predict Electric Vehicle Users? EVS30 (Ed.), International Electric Vehicle Symposium & Exhibition.

Plötz, P.; Schneider, U.; Globisch, J.; Dütschke, E.: (2014): Who will buy electric vehicles? Identifying early adopters in Germany. In Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 67, September 2014, Pages 96-109.

Regett, A.; Baing, F.; Conrad, J. (2018): Emission Assessment of Electricity: Mix vs. Marginal Power Plant. 2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM). Lodz, Poland

Regett, A.; Mauch, W.; Wagner, U. (2019): Klimabilanz von Elektrofahrzeugen – Ein Plädoyer für mehr Sachlichkeit. Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) e.V.: München.

Romare, M.; Dahllöf, L. (2017): The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries - A Study with Focus on Current Technology and Batteries for light-duty vehicles. Studie im Auftrag der Swedish Energy Agency, Durchgeführt von IVL Swedish Environmental Research Institute. IVL: Stockholm.

Rüdiger, D. (2019): Entwicklung einer Methode zur Bewertung der Treibhausgas-Emissionen des Betriebs von Logistikimmobilien, Dissertation TU Dortmund 2018, veröffentlicht in 2019, Stuttgart: Fraunhofer Verlag (IML-Schriftenreihe Logistik, Verkehr und Umwelt).

Scherrer, A.; Burghard, U.; Wiestchel, M.; Dütschke, E. (2019): Jenseits von Ort und Häufigkeit: Ladeleistungen, Eigenerzeugung und Einstellungen zum Lagemanagement der Early Adopter von Elektrofahrzeugen. Fraunhofer ISI. Veröffentlichung in Vorbereitung.

Schrader, C (2017): Ökobilanz - Ein kritischer Blick – Sind E-Autos ein großer ökologischer Fortschritt? Oder verschärfen sie das Klimaproblem nur? In Spektrum, 04.11.2017. Online verfügbar unter https://www.spektrum.de/news/wie-ist-die-umweltbilanz-von-elektroautos/1514423, zuletzt geprüft am 05.02.2019.

Smoucha, E. A.; Fitzpatrick, K.; Buckingham, S.; Knox; O. G. G. (2016): Life Cycle Analysis of the Embodied Carbon Emissions from 14 Wind Turbines with Rated Powers between 50 Kw and 3.4 Mw. In Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications.

Sonnenergie (2016): Der CO_2-Fußabdruck von Solarstrom - Wie klimafreundlich ist der Solarstrom tatsächlich? Online verfügbar unter http://www.sonnenenergie.de/sonnenenergie-redaktion/SE-2016-01/Layout-fertig/PDF/Einzelartikel/SE-2016-01-s030-Photovoltaik-CO2_Fussabdruck_von_Solarstrom.pdf, zuletzt überprüft am 05.02.2019.

Stahl, M. (2019): Warum das Elektroauto ein Feind der Energiewende ist. In Manager Magazin vom 18.01.2019. Online verfügbar unter http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/elektroauto-co2-bilanz-insgesamt-verschlechtert-sich-a-1246276.html, zuletzt geprüft am 05.02.2019.

Tesla (2019): Tesla Gigafactory. Online verfügbar unter https://www.tesla.com/de_DE/gigafactory, zuletzt geprüft am 05.02.2019.

Timpe, C.; Bracker, J.; Hacker, F.; Haller, M.; Kasten, P.; Schierhorn, P. P.; Martensen, N. (2017): Handlungsbedarf- und Optionen zu Sicherstellung des Klimavorteils der Elektromobilität. Studie im Auftrag des BMU. Durchgeführt vom Öko-Institut und Energynautics. Öko-Institut: Freiburg.

Troy R.; Hawkins. T. R.; Gausen, O. M.; Hammer Strømman, A. (2012): Environmental impacts of hybrid and electric vehicles—a review. In The International Journal of Life Cycle Assessment. September 2012, Volume 17, Issue 8, pp 997–1014.

UBA (2017): Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger. Online verfügbar unter http://www5.umweltbundesamt.at/emas/co2mon/co2mon.html, zuletzt geprüft am 13.02.2019.

UBA (2018a): Wie umweltfreundlich sind Elektroautos? Eine ganzheitliche Bilanz. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). BMU: Berlin.

UBA (2018b): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2017. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). BMU: Berlin.

Umweltbundesamt (2017): Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger. Online verfügbar unter http://www5.umweltbundesamt.at/emas/co2mon/co2mon.html, zuletzt geprüft am 13.02.2019.

Wietschel, M.; Kühnbach, M.; Stute, J.; Gnann, T.; Marwitz, S.; Klobasa, M. (2018). Auswirkung der Elektromobilität auf die Haushaltsstrompreise in Deutschland. Working Paper Sustainability and Innovation, No. S 21/2018. Fraunhofer ISI: Karlsruhe.

Wietschel, M.; Ullrich, S.; Markewitz, P.; Schulte, F. (Hrsg.) (2015): Energietechnologien der Zukunft - Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze. Wiesbaden: Springer Fachmedien GmbH.

WRI; WBCSD (2004): The Greenhouse Gas Protocol. A Corporate Accouting and Reporting Standard. (revised edition). Hg. v. World Resources Institute.

WRI; WBCSD (2015): GHG Protocol Scope 2 Guidance. An amendment to the GHG Protocol Corporate Standard. Hg. v. World Resources Institute.

Autoren

Martin Wietschel, Matthias Kühnbach
Fraunhofer ISI, Karlsruhe

David Rüdiger
Fraunhofer IML, Dortmund

Kontakt

Martin Wietschel
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Karlsruhe
E-Mail: martin.wietschel@isi.fraunhofer.de
www.isi.fraunhofer.de

Karlsruhe, März 2019