



# Klimabilanz von Elektroautos

Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial



# Impressum

## Klimabilanz von Elektroautos

Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial

### ERSTELLT IM AUFTRAG VON

#### Agora Verkehrswende

Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 | 10178 Berlin

T +49 (0)30 700 14 35-000

F +49 (0)30 700 14 35-129

[www.agora-verkehrswende.de](http://www.agora-verkehrswende.de)

[info@agora-verkehrswende.de](mailto:info@agora-verkehrswende.de)

### PROJEKTLEITUNG

Kerstin Meyer

[kerstin.meyer@agora-verkehrswende.de](mailto:kerstin.meyer@agora-verkehrswende.de)

### DURCHFÜHRUNG

#### ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH

[www.ifeu.de](http://www.ifeu.de)

#### Autoren:

Für ifeu: Hinrich Helms, Claudia Kämper,

Dr.-Ing. Kirsten Biemann, Udo Lambrecht, Julius Jöhrens

Für Agora Verkehrswende: Kerstin Meyer

**Lektorat:** Anne Vonderstein

**Satz/Grafik:** Juliane Franz, Agora Verkehrswende/  
UKEX GRAPHIC

**Titelbild:** [.stock.adobe.com/Patrick Daxenbichler](https://stock.adobe.com/Patrick Daxenbichler)

### DANKSAGUNG

Im Rahmen des Projekts wurden zwischen Juni und September 2018 zwei Workshops mit Beteiligten aus Wirtschaft, Wissenschaft, Zivilgesellschaft, Ministerien und nachgeordneten Behörden durchgeführt. Diese Workshops dienten als Informations- und Diskussionsplattform für die Klimabilanz von Elektroautos und deren Einflussparameter. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen des Workshops sind in den vorliegenden Endbericht eingeflossen. Wir bedanken uns bei den Teilnehmerinnen und Teilnehmern für Ihre fachliche Expertise und die konstruktive Diskussion. Außerdem danken wir Matthias Deutsch, Philipp Litz und Andreas Jahn für hilfreiche Kommentare. Die Schlussfolgerungen und Ergebnisse dieser Veröffentlichung spiegeln jedoch nicht notwendigerweise die Meinungen der zuvor genannten Personen wider. Die Verantwortung für die Ergebnisse liegt ausschließlich bei Agora Verkehrswende und beim ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH.



**Unter diesem QR-Code steht diese  
Publikation als PDF zum Download  
zur Verfügung.**

Veröffentlichung: April 2019

**22-2019-DE**

#### Bitte zitieren als:

Agora Verkehrswende (2019): *Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial.*

# Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

zum Allgemeinwissen gehört die Erkenntnis, dass Deutschland ein Autoland ist. Angesichts des Klimawandels müssen Autos jedoch klimaverträglicher werden. Doch wann ist ein Auto klimaverträglich? Wenn es elektrisch fährt? De jure ist das so, laut Zulassungsstatistik emittieren Elektrofahrzeuge kein einziges Gramm Kohlendioxid. Tatsächlich entsteht das klimaschädliche Gas jedoch sowohl bei der Produktion des Fahrstroms als auch bei der Herstellung von Elektrofahrzeugen. Deshalb ist die Frage berechtigt, ob sie tatsächlich klimaschonender sind als Benziner oder Diesel. Es gibt bereits eine ganze Reihe solcher Klimabilanzen, doch deren Ergebnisse unterscheiden sich zum Teil deutlich.

Mit der vorliegenden Studie schaffen wir hoffentlich ein wenig mehr Klarheit. Das Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) hat sich in unserem Auftrag umfangreich und sehr differenziert mit der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen auseinandergesetzt.

Fest steht: Noch fahren E-Autos in Deutschland mit Strom, der zur Hälfte aus Kohle und Erdgas erzeugt wird. Hinzu kommt, dass die Herstellung von Batteriezellen viel Energie benötigt und darüber in den Herkunfts-

ländern der Zellen (China, Japan, Korea) Kohlendioxid-Emissionen erzeugt. Unterm Strich hat deshalb ein E-Auto in der Produktion einen größeren ökologischen Rucksack als ein vergleichbarer Verbrenner; um diesen Nachteil wettzumachen muss es einige Tausend Kilometer mit möglichst CO<sub>2</sub>-armem Strom zurücklegen.

Dennoch sind Elektrofahrzeuge gegenüber Verbrennern schon heute im Vorteil, mal mehr, mal weniger. Und der Vorsprung wird wachsen, je schneller die Potenziale ausgeschöpft werden, die es im Hinblick auf CO<sub>2</sub>-Minderung gibt sowohl über den Fahrstrom als auch bei der Batterieherstellung.

In der Konsequenz dieser Studie sehen wir uns darin bestätigt, dass die Elektromobilität der Schlüssel der Energiewende im Verkehr ist. Gerade deswegen werden wir uns in unserer zukünftigen Arbeit darum bemühen, die Klimabilanz des Elektroautos weiter zu verbessern auf dem Weg zur emissionsfreien Mobilität. Auch dafür liefert uns die Studie hilfreiche Grundlagen.

Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre.

**Christian Hochfeld**

Für das Team von Agora Verkehrswende  
Berlin, 20. März 2019

## Zentrale Ergebnisse

- 1 In allen untersuchten Fällen hat das Elektroauto über den gesamten Lebensweg einen Klimavorteil gegenüber dem Verbrenner.
- 2 Mit den Fortschritten bei der Batterieentwicklung insbesondere durch effizientere Fertigungsprozesse, höhere Energiedichte, verbesserte Zellchemie und CO<sub>2</sub>-ärmeren Strom bei der Herstellung kann die Klimabilanz der Batterie in den kommenden Jahren mindestens halbiert werden.
- 3 Der Klimavorteil des Elektroautos wächst, wenn der Ausbau der Erneuerbaren im Rahmen der Energiewende forciert wird; denn die Antriebsenergie ist die wichtigste Einflussgröße auf die Klimabilanz.
- 4 Die Batteriezell-Fertigung auf Basis eines möglichst hohen Anteils Erneuerbarer Energien, kann europäischen Ländern einen Standortvorteil verschaffen.
- 5 Mehr Transparenz zur Klimabilanz der Batterien ist Voraussetzung, um weitere Verbesserungspotenziale über den gesamten Lebensweg erschließen zu können.

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>3</b>
<b>01   Schlussfolgerungen aus Sicht von Agora Verkehrswende</b>	<b>9</b>
1.1 Schon heute: In allen untersuchten Fällen hat das Elektroauto über den gesamten Lebensweg einen Klimavorteil gegenüber dem Verbrenner	9
1.2 In Zukunft: Mit den Fortschritten bei der Batterieentwicklung kann die Klimabilanz der Batterie in den kommenden Jahren mindestens halbiert werden	10
1.3 Der Klimavorteil des Elektroautos wächst, wenn der Ausbau der Erneuerbaren im Rahmen der Energiewende forciert wird	11
1.4 Die Batteriezell-Fertigung auf Basis eines möglichst hohen Anteils Erneuerbarer Energien, kann europäischen Ländern einen Standortvorteil verschaffen	11
1.5 Mehr Transparenz zur Klimabilanz der Batterien ist Voraussetzung, um weitere Verbesserungspotenziale über den gesamten Lebensweg erschließen zu können	12
<b>02   Hintergrund und Ziel der Studie</b>	<b>13</b>
<b>03   Ergebnisse der Literaturlauswertung</b>	<b>15</b>
3.1 Rahmen der Metastudie	15
3.2 Bandbreite und Parameter der Gesamtbilanz	17
3.3 Bandbreite und Parameter der Nutzungsphase	19
3.4 Bandbreite und Parameter der Batteriebilanz	20
<b>04   Einfluss zentraler Parameter auf die heutige Klimabilanz</b>	<b>25</b>
4.1 Sensitivitätsanalysen gegenüber einem Basisfall	25
4.2 Parameter der Fahrzeugnutzung	26
4.3 Parameter der Fahrzeugherstellung	38
4.4 Vergleich der Sensitivitäten	44
<b>05   Verbesserungspotenzial der Klimabilanz bis 2030</b>	<b>47</b>
5.1 Ausblick auf die Batterieherstellung	47
5.2 Ausblick auf die Fahrzeugeigenschaften	48
5.3 Szenario der Klimabilanz für 2030	49
<b>06   Fazit zur Klimabilanz von Elektroautos</b>	<b>53</b>
<b>07   Literaturverzeichnis</b>	<b>57</b>
<b>08   Anhang</b>	<b>63</b>
8.1 Literaturlauswertung	63
8.2 Annahmen und wichtige Ergebnisse der eigenen Modellierung	64
8.3 Modellierung der Herstellung, Entsorgung und Wartung der betrachteten Fahrzeuge	65

# Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b>	Herkunft der Sachbilanzdaten für die Batterie der untersuchten Studien	15
<b>Abbildung 2:</b>	Vergleich der Treibhausgasemissionen eines Elektroautos pro Fahrzeugkilometer bezogen auf den gesamten Lebenszyklus	17
<b>Abbildung 3:</b>	Vergleich des Beitrags einzelner Lebensabschnitte zu den Treibhausgasemissionen	19
<b>Abbildung 4:</b>	Vergleich der Treibhausgasemissionen aus der Batterieherstellung bezogen auf eine Kilowattstunde Batteriekapazität	22
<b>Abbildung 5:</b>	Energieverbrauch und THG-Emissionen der Batterieherstellung nach unterschiedlichen Ansätzen	23
<b>Abbildung 6:</b>	Schematische Darstellung Konzept Klimabilanz	25
<b>Abbildung 7:</b>	Schematische Darstellung der Treibhausgasemissionen eines Verbrenner- und Elektro-Pkw in Abhängigkeit von der Lebensfahrleistung	27
<b>Abbildung 8:</b>	Stromverbrauch von Elektroautos der Kompaktklasse	28
<b>Abbildung 9:</b>	Bruttostromerzeugung in Deutschland 2017 nach Energieträgern (AGEB, 2018)	30
<b>Abbildung 10:</b>	Klimawirkung der Strombereitstellung für verschiedene Bezugsräume, Szenarien und Anlagen	31
<b>Abbildung 11:</b>	Treibhausgasemissionen der heutigen Beispielfahrzeuge der Kompaktklasse über den Lebensweg in Abhängigkeit von der Lebensfahrleistung	32
<b>Abbildung 12:</b>	Treibhausgasemissionen von heutigen reinen Stadt- (oben) und Autobahnfahrzeugen (unten) der Kompaktklasse unter Berücksichtigung der Energiewende in Abhängigkeit von der Lebensfahrleistung	36
<b>Abbildung 13:</b>	Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung und Entsorgung im Vergleich	38
<b>Abbildung 14:</b>	Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung ohne Entsorgung von BEV und Benzin im Vergleich	39
<b>Abbildung 15:</b>	Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung und ihre Zusammensetzung (in kg CO <sub>2</sub> -Äquivalenten pro kWh Batterie)	41
<b>Abbildung 16:</b>	Beiträge der unterschiedlichen Materialien zu den Treibhausgasemissionen der Batterie	41
<b>Abbildung 17:</b>	Treibhausgasemissionen der Strombereitstellung und Anteile an der Zellfertigung.	42
<b>Abbildung 18:</b>	Treibhausgasemissionen von heutigen Elektroautos der Kompaktklasse unter Berücksichtigung der Energiewende und unter unterschiedlichen Fertigungsbedingungen in Abhängigkeit von der Lebensfahrleistung	43
<b>Abbildung 19:</b>	Einfluss der [auf der x-Achse] genannten Parametervariation auf die Klimabilanz des Basisfalls für eine Lebensfahrleistung von 150.000 km	44

<b>Abbildung 20:</b>	Treibhausgasemissionen der Batterie bezogen auf eine Kilowattstunde Batteriekapazität heute und im Jahr 2030 (mit EU Fertigungsmix von 335 g CO <sub>2</sub> -Äquivalenten pro kWh)	47
<b>Abbildung 21:</b>	Entwicklung der Batteriekapazität aktueller Elektroautos	48
<b>Abbildung 22:</b>	Treibhausgasemissionen von Beispielfahrzeugen der Kompaktklasse in einem Szenario für Neuzulassungen in 2030 in Abhängigkeit der Lebensfahrleistung	50
<b>Abbildung 23:</b>	Treibhausgasemissionen von Pkw der Kompaktklasse pro gefahrenen Kilometer bei 150.000 km Lebensfahrleistung für Neuzulassungen in 2030	51
<b>Tabelle 1:</b>	Auswahl einflussnehmender Randbedingungen in der Klimabilanz	18
<b>Tabelle 2:</b>	Heute gängige Kathodenmaterialien für Li-Ionen-Batterien im Automobilbereich	21
<b>Tabelle 3:</b>	Verbrauchswerte nach ifeu-Modellierung eines generischen Kompaktklassenfahrzeugs	29
<b>Tabelle 4:</b>	Im Rahmen der Literaturlauswertung betrachtete Studien	63
<b>Tabelle 5:</b>	Zentrale Annahmen und Ergebnisse der betrachteten Szenarien	64

# Abkürzungsverzeichnis

<b>ADAC</b>	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
<b>AGEB</b>	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
<b>BEV</b>	Battery Electric Vehicle
<b>DE</b>	Deutschland
<b>Diesel</b>	Fahrzeuge mit Dieselmotor
<b>EC</b>	European Commission
<b>EEG</b>	Erneuerbare-Energien-Gesetz
<b>EU</b>	European Union
<b>REET</b>	Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation (Model)
<b>ICCT</b>	International Council on Clean Transportation
<b>kg</b>	Kilogramm
<b>km</b>	Kilometer
<b>kW</b>	Kilowatt
<b>kWh</b>	Kilowattstunde
<b>LCA</b>	Life Cycle Assessment
<b>LCI</b>	Life Cycle Inventory
<b>LFP</b>	Lithium-Eisenphosphat (Zellchemie)
<b>LMO</b>	Lithium-Mangan-Oxid (Zellchemie)
<b>MJ</b>	Megajoule
<b>NCA</b>	Nickel-Cobalt-Aluminium (Zellchemie)
<b>NEFZ</b>	Neuer Europäischer Fahrzyklus
<b>NMC</b>	Nickel-Mangan-Cobalt (Zellchemie)
<b>Otto</b>	Fahrzeug mit Ottomotor (Benziner)
<b>PV</b>	Photovoltaik
<b>RoW</b>	Rest of the World
<b>TREMOD</b>	Transport Emission Model (des ifeu)
<b>US EPA</b>	United States Environmental Protection Agency
<b>WLTP</b>	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure





# 01 | Schlussfolgerungen aus Sicht von Agora Verkehrswende

Elektroautos sind lokal emissionsfrei und gelten als alternativer Antrieb, der für die Energiewende und den Klimaschutz im Verkehr von zentraler Bedeutung ist. Soll der Verkehr in Deutschland die Klimaschutzziele für den Sektor 2030 einhalten und bis zum Jahr 2050 weitestgehend klimaneutral sein, dann müssen Elektrofahrzeuge bereits im Jahr 2030 mehr als die Hälfte der Neuzulassungen ausmachen.<sup>1</sup>

Es ist jedoch eine kontrovers diskutierte Frage, wie klimafreundlich Elektrofahrzeuge tatsächlich sind, wenn man sie – über ihren gesamten Lebensweg betrachtet – mit konventionellen Benzinern oder Dieseln vergleicht. Weil die Sachverhalte komplex sind, herrscht in der Öffentlichkeit Unsicherheit über die gesamte Klimawirkung von Elektroautos. Die vorliegende Studie hat zum Ziel, die zentralen Einflussparameter auf die Klimabilanz von Elektroautos herauszuarbeiten und zu zeigen, welche Verbesserungspotenziale es gibt.<sup>2</sup> Darauf aufbauend werden robuste Aussagen zur Klimabilanz von Elektroautos abgeleitet.

Es ist offensichtlich: Themen rund um Elektrofahrzeuge und speziell Batterieforschung sind ein sich schnell entwickelndes Feld. Die Herausforderung für eine Arbeit wie diese besteht darin, einerseits wissenschaftlich so aktuell und detailliert wie möglich zu sein, andererseits möglichst klare Aussagen zu treffen. Bei allen verbleibenden Unsicherheiten halten wir die hier getroffenen Aussagen dennoch für richtungssicher.

Im ersten Teil der Studie wurden 23 aktuelle Veröffentlichungen zur Klimabilanz von Elektroautos ausgewertet. Diese Metaanalyse zeigt, dass Klimabilanzen stark von den zugrundeliegenden Annahmen abhängig sind und divergierende Ergebnisse zum großen Teil auf unterschiedliche Rahmenbedingungen zurückzuführen sind. Für eine öffentliche und politische Auseinandersetzung mit den Ergebnissen von Klimabilanzen für Elektroautos ist es daher wichtig, die zentralen Grundannahmen zu kennen und transparent zu machen.

## 1.1 Schon heute: In allen untersuchten Fällen hat das Elektroauto über den gesamten Lebensweg einen Klimavorteil gegenüber dem Verbrenner.

Um einzelne Aspekte der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen genauer zu beleuchten, wurden in einem zweiten Teil der Studie eigene Modellierungen vorgenommen. Hierfür wurde ein Basisfall definiert: ein Fahrzeug der Kompaktklasse in Elektro-, Benzin- und Dieselform mit einer Gesamtfahrleistung von 150.000 km. Das bilanzierte Elektrofahrzeug hat im Basisfall eine 35-kWh-Batterie und verbraucht 16 kWh pro 100 km. Die Batterie wird während der Lebensdauer des Fahrzeugs nicht ausgetauscht. Der vergleichbare Benzinerverbraucht 5,9 Liter und der ebenfalls vergleichbare Diesel kommt auf einen Verbrauch von 4,7 Liter pro 100 km. Für den Basisfall wurde ein gemischtes Fahrprofil gewählt, welches an den ADAC Ecotest angelehnt ist.<sup>3</sup> Insgesamt wurden fünf Fälle genauer betrachtet: der Basisfall (Energiewende geht weiter) sowie zwei alternative Annahmen zum Strommix: In „Sensitivität Strom 2016“ bleibt der deutsche Strommix in Zukunft auf dem Niveau von 2016 und in „Sensitivität Photovoltaik“ wird beim Strom reiner Solarstrom verwendet. Zwei weitere Variationen beziehen sich auf Anwendungsfälle des Fahrzeugs im Stadtverkehr und auf Autobahnen.

In allen untersuchten Fällen hat das Elektroauto einen Klimavorteil gegenüber dem Verbrenner. Dieser Vorteil ist unterschiedlich stark ausgeprägt. Im Basisfall ist der Vorteil nach 150.000 km deutlich, mit einer Emissionsverminderung über die Lebensdauer von 24 Prozent (verglichen mit dem Benzinern) bzw. 16 Prozent (verglichen mit dem Diesel). Selbst für die „Sensitivität Strom 2016“ hätte das Elektroauto weiterhin einen Klimavorteil gegenüber dem Verbrenner, und zwar etwa 12 Prozent gegenüber dem Benzinern und 3 Prozent gegenüber dem Diesel. Käme nur noch reiner Solarstrom zur Anwendung, läge der Vorteil des Elektrofahrzeugs bei etwa 50 Prozent.

1 Agora Verkehrswende (2018); Agora Energiewende (2017).

2 Die vorliegende Studie ist auf die Untersuchung rein batterieelektrisch angetriebener Fahrzeuge im Vergleich zu Benzinern und Dieselfahrzeugen beschränkt.

3 Weitere zentrale Annahmen der eigenen Modellierung siehe Tabelle 5.

Im Basisfall liegt die Fahrleistung, ab der das untersuchte Elektrofahrzeug insgesamt besser wird als der Benziner, bei gut 60.000 km; der Punkt, an dem es besser ist als der vergleichbare Diesel, liegt bei zirka 80.000 km.

Elektrische Stadtfahrzeuge mit entsprechend kleinerem Akku erreichen diesen sogenannten *break even point* bereits ab 40.000 km, und nach 100.000 km liegt ihr Vorteil gegenüber einem Benziner bei 29 Prozent. In der Stadt sind Elektrofahrzeuge besonders effizient und können dadurch auch bei deutlich niedrigeren Lebensfahrleistungen einen Klimavorteil erreichen. Ein Spezialfall sind elektrische Carsharing- und Ridesharing- bzw. Ridepoolingfahrzeuge, die gemeinschaftlich genutzt werden. Sie werden im Vergleich zu einem durchschnittlichen Privatfahrzeug wesentlich intensiver genutzt. Bei einer Batterieauslegung wie in „Sensitivität Stadt“ angenommen, würde ein elektrisches Carsharingfahrzeug ab etwa zwei Jahren im Einsatz einen Netto-Klimavorteil haben. Für ein Ridesharing- bzw. Ridepoolingfahrzeug dürfte der *break even point* noch deutlich früher eintreten.

Im Extremfall, dass Fahrzeuge mit größerem Akku ausschließlich auf der Autobahn für Langstrecken genutzt werden, zahlt nach 150.000 km jeder weitere Kilometer auf den Klimaschutz ein. Es müssen also hohe verbrennungsmotorische Fahrleistungen ersetzt werden, um im reinen Autobahnbetrieb einen Vorteil zu erreichen. Nach 200.000 km zeichnet sich hier ein Vorteil von 7 Prozent ab – verglichen mit einem Diesel, der nur auf der Autobahn fährt.

## 1.2 In Zukunft: Mit den Fortschritten bei der Batterieentwicklung kann die Klimabilanz der Batterie in den kommenden Jahren mindestens halbiert werden.

Ein Ausblick auf die Verbesserungspotenziale der Batterieherstellung ergibt, dass die Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung sich bis 2030 halbieren könnten. Wichtige Einflussfaktoren sind hier eine höhere Energiedichte bedingt durch effizientere Fertigungspro-

zesse, höhere Energiedichte, verbesserte Zellchemie und CO<sub>2</sub>-ärmeren Strom bei der Herstellung.

Für die Darstellung des Basisfalls wurde der durchschnittliche Strommix in den heutigen Herstellungsländern (vorwiegend sind das China, Japan, Korea und die USA) entsprechend ihrem jeweiligen Anteil an der Batteriefertigung hinterlegt. Betrachtet man stattdessen den durchschnittlichen europäischen Strommix für die Zellfertigung, führt das in Kombination mit den oben genannten anderen Faktoren zu einer deutlichen Verbesserung der Werte. Für ein Elektrofahrzeug, das im Jahr 2030 zugelassen wird, ergäben sich nach 150.000 km im Zusammenspiel mit der erwarteten Energiewende in Deutschland deutliche Klimavorteile von 41 bzw. 35 Prozent gegenüber einem vergleichbaren Benziner respektive Dieselauto. Der Klimavorteil würde sich hier schon nach etwa 30.000 km einstellen. Dies liegt zum einen am Verbesserungspotenzial der Zellfertigung und zum anderen am weiteren Fortschreiten der Energiewende. In Deutschland sorgt die Energiewende für die deutlichste Verbesserung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen.

Auch bei höherer Batteriekapazität (60 kWh) wären unter diesen Annahmen nach 150.000 km deutliche Vorteile sichtbar: von 33 bzw. 27 Prozent gegenüber dem Benziner bzw. dem Diesel, der Schnittpunkt zum Nettovorteil entstünde hier ab 50.000 km. Gleichwohl wird hier ersichtlich, dass steigende Batteriekapazitäten durch weitere Verbesserungen bei der Batterieherstellung auszugleichen sind.

### Schlussfolgerungen

Auch wenn in allen untersuchten Fällen Elektrofahrzeuge schon heute klimafreundlicher als vergleichbare Verbrenner fahren; ist ihre Klimabilanz in den kommenden Jahren weiter zu verbessern. Dafür gilt es, mit den folgenden Handlungsempfehlungen den politischen Rahmen zu schaffen.

### 1.3 Der Klimavorteil des Elektroautos wächst, wenn der Ausbau der Erneuerbaren im Rahmen der Energiewende forciert wird.

Elektrofahrzeuge emittieren beim Fahren weder Luftschadstoffe noch Kohlendioxid. Emissionen entstehen allerdings bei der Herstellung des Fahrstroms. Damit ist der Strommix eine entscheidende Einflussgröße für die Klimabilanz von Elektrofahrzeugen. Aktuell stammt in Deutschland noch mehr als jede dritte Kilowattstunde aus Kohlekraftwerken. Damit Elektrofahrzeuge ihr volles Potenzial beim Klimaschutz ausschöpfen können, ist der Strommix weiter zu dekarbonisieren.

Will Deutschland sein Klimaziel für 2030 im Verkehrssektor erreichen, müssen bis dahin etwa 10 bis 12 Millionen Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen unterwegs sein – mit deutlich sauberem Strom als heute.<sup>4</sup> Zwar sorgen die CO<sub>2</sub>-Bepreisung im Rahmen des europäischen Emissionshandels und der geplante Ausbau der Erneuerbaren Energien (EE) dafür, dass Strom in den nächsten Jahren schrittweise klimafreundlicher wird. Doch werden diese Maßnahmen nicht ausreichen, damit Deutschland seine Klimaziele zuverlässig erreichen wird.

Es ist deshalb notwendig, dass die Bundesregierung die Dekarbonisierung des Stromsektors weiter vorantreibt: Erstens soll der Stromverbrauch bis 2030 mithilfe von Effizienzmaßnahmen deutlich reduziert werden, um den erwarteten Mehrverbrauch aus dem Wärme- und dem Verkehrssektor im Zuge der Sektorenkopplung abzufedern.<sup>5</sup>

Zweitens bestehen beim Stromverbrauch von Elektroautos große Bandbreiten – selbst bei vergleichbaren Fahrzeugen der Kompaktklasse. Mittelfristig ist es bedeutsam, auch ihren Stromverbrauch zu verringern und die Effizienz der Fahrzeuge über entsprechende politische Rahmenbedingungen zu fördern. Zwar sind Elektrofahr-

zeuge tatsächlich deutlich effizienter als vergleichbare Verbrenner, doch auch aus Wind und Sonne erzeugter Strom muss sparsam verwendet werden.

Drittens wurde im Koalitionsvertrag vereinbart, den Anteil der Erneuerbaren Energien am Stromverbrauch laut Koalitionsvertrag bis 2030 auf 65 Prozent zu erhöhen.<sup>6</sup> Allerdings lag im Jahr 2018 der Zuwachs bei der Stromproduktion aus Erneuerbaren Energien mit 12,4 Terawattstunden unter dem Durchschnitt der letzten fünf Jahre. Ein Wachstum auf diesem Niveau reicht nicht aus, um das von der Regierung vereinbarte Ziel von 65 Prozent zu erreichen.<sup>7</sup> Deswegen sollte die Bundesregierung den Ausbau der Erneuerbaren Energien beschleunigen.

### 1.4 Die Batteriezell-Fertigung auf Basis eines möglichst hohen Anteils Erneuerbarer Energien, kann europäischen Ländern einen Standortvorteil verschaffen.

Bestrebungen, eine europäische Zellfertigung zu etablieren, sind vor dem Hintergrund der Studie zu begrüßen. Weil der Strommix in vielen EU-Staaten CO<sub>2</sub>-ärmer ist als der Strommix in den bisherigen Zellfertigungsländern, wäre die Ansiedlung der Zellfertigung in EU-Staaten ein Beitrag zur Dekarbonisierung. Zusätzlich wird sich die CO<sub>2</sub>-Intensität des Stroms in Europa durch die Umsetzung der bereits beschlossenen Gesetze bis 2030 weiter verbessern. Zudem können dann auch weitere Anreize für eine effiziente Zellfertigung im Rahmen der europäischen Gesetzgebung gesetzt werden. Die EU-Kommission hat für Europa das Ziel gesetzt, bei der Produktion nachhaltiger Batterien eine weltweit füh-

4 Vgl. Agora Energiewende (2017), Agora Verkehrswende (2018)

5 Momentan verbrauchen Elektrofahrzeuge nur einen Bruchteil des Stroms in Deutschland. Gleichwohl ist eine kontinuierliche Evaluation der Stromnachfrage durch den Verkehrssektor ratsam.

6 Es gibt den Einwand, nationale Klimaschutzmaßnahmen im Stromsektor würden zu mehr Emissionen in anderen EU-Ländern führen, weil dann in Deutschland weniger Emissionszertifikate gebraucht würden. Doch dieser sogenannte Wasserbetteffekt des EU-Emissionshandels besteht seit der letzten Reform nicht mehr, da neue Regelungen im europäischen Emissionshandelssystem dafür sorgen, dass nationale Klimaschutzinstrumente auch zur Löschung von Zertifikaten führen (vgl. Agora Energiewende; Öko-Institut 2018).

7 Vgl. Agora Energiewende (2019), S. 5.

rende Rolle zu spielen.<sup>8</sup> Dafür ist allerdings ein gesetzgeberischer Rahmen notwendig.

Ein Instrument könnte eine europäische Kennzeichnung für Traktionsbatterien sein. Kennzeichnungsvorschriften gibt es in der Europäischen Union bereits für viele Haushaltsgeräte sowie für Autoreifen.<sup>9</sup> Aufbauend darauf könnten auch ordnungsrechtliche Instrumente eingesetzt werden. So könnte die EU-Kommission prüfen, den Geltungsbereich der Ökodesign-Richtlinie auf Traktionsbatterien zu erweitern.<sup>10</sup> So könnte beispielsweise diskutiert werden, dass in Elektrofahrzeugen nur Zellen verwendet werden, bei deren Herstellung ein bestimmter CO<sub>2</sub>-Wert pro Kilowattstunde Speicherkapazität eingehalten wird. Dies hätte einen zweifachen Nutzen: die Klimabilanz von Elektrofahrzeugen würde sich verbessern und es entstünde ein Anreiz, Strom für die Zellfertigung sowohl in der EU als auch weltweit weiter zu dekarbonisieren.

## 1.5 Mehr Transparenz zur Klimabilanz der Batterien ist Voraussetzung, um weitere Verbesserungspotenziale über den gesamten Lebensweg erschließen zu können.

Bisher liegen nur wenige öffentliche Primärdaten über Batteriematerialien und Herstellung vor. Es ist abzusehen, dass im Bereich der Zellfertigung in kurzen Zeiträumen weiterhin große Fortschritte stattfinden, sowohl in Hinblick auf die Zellchemie als auch auf den Energieeinsatz im Fertigungsprozess. Dadurch kann das Problem entstehen, dass die veröffentlichten Klimabilanzen nicht mit den realen Entwicklungen der Batterietechnologie Schritt halten und einen bereits veralteten Stand der Technik reflektieren.

Wissenschaftliche Erkenntnisse bilden eine Grundlage für politische Entscheidungen. Damit diese Erkenntnisse möglichst präzise gewonnen werden können, ist die Datenbasis zu verbessern. In einem ersten Schritt sollte die EU-Kommission eine Studie beauftragen, die anonymisiert aktuelle Daten zur Klimabilanz von Batterien erhebt und öffentlich bereitstellt. Einen ersten Anhaltspunkt könnten Benchmarks bestimmter Industriebereiche bieten, die in anderen Bereichen bereits existieren. So erhebt die *Clean Cargo Working Group* jährlich CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für die weltweiten Handelsrouten von Frachtschiffen, der vorerst letzte Bericht basiert auf den Daten von mehr als 3.000 Schiffen.<sup>11</sup>

Darüber hinaus könnte man anstreben eine Art *Clearing House* für Batteriedaten zu schaffen, in dem Daten zu Batterie-Produktionsprozessen und den dabei verwendeten Rohmaterialien anonym gesammelt und teilweise aggregiert aufbereitet werden. Dadurch würde Transparenz bezüglich des Energieeinsatzes und der Emissionen geschaffen werden, ohne wettbewerbsrelevante Daten preiszugeben. Ansätze hierfür finden sich möglicherweise bei der *European Platform on Life Cycle Assessment*, die vom Gemeinsamen Forschungszentrum der Europäischen Kommission betrieben wird und die Datenbereitstellung für Öko- und Klimabilanzen zum Ziel hat.<sup>12</sup>

8 European Commission (2018).

9 Verordnung (EG) Nr. 1222/2009.

10 Die Ökodesign-Richtlinie hat das Ziel, die Umweltverträglichkeit energieverbrauchsrelevanter Produkte von der Wiege bis zur Bahre zu verbessern, insbesondere dann, wenn angemessene Anforderungen an die umweltrelevanten Eigenschaften von Produkten auf Ebene der EU-Mitgliedstaaten nicht ausreichend verwirklicht werden können vgl. UBA (2016), RL 2009/125/EG, Erwägungsgrund 41.

11 BSR (2017).

12 European Commission (2016).

## 02 | Hintergrund und Ziel der Studie

Elektroautos gelten als ein wichtiger Baustein für die Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Allerdings stehen Elektrofahrzeuge immer wieder in der Kritik – ausgerechnet auch, weil sie tatsächlich oder vermeintlich nichts zum Klimaschutz beitragen. In der Berichterstattung der Massenmedien lassen sich regelmäßig zwei wiederkehrende Aspekte identifizieren:

- Elektroautos sind klimaschädlicher als Verbrenner, weil es in Deutschland so viel Kohlestrom gibt.
- Elektroautos sind klimaschädlich, weil bei der Produktion des Elektroautos (insbesondere bei der Produktion der Batterie<sup>13</sup>) mehr Emissionen entstehen als bei der Produktion eines Verbrenners.

Hinzu kommt, dass in der öffentlichen Debatte nicht sauber unterschieden wird zwischen verschiedenen Effekten, die mit der Elektromobilität in Zusammenhang stehen. Neben der Klimawirkung werden auch Effekte auf die Luftqualität, auf die Rohstoffverfügbarkeit und auf soziale Rahmenbedingungen, beispielsweise beim Abbau von Rohstoffen, diskutiert. Zur Klimabilanz von Elektroautos liegen mittlerweile zwar einige Studien vor; diese sind aber häufig nicht direkt miteinander vergleichbar. Mitunter werden die Studienergebnisse darüber hinaus auch unterschiedlich interpretiert. Am Ende weiß der interessierte Laie nicht, woran er sich orientieren kann.

Weil die Zusammenhänge tatsächlich komplex sind, dominiert nach wie vor Unsicherheit über die Klimawirkung von Elektroautos. Das Projekt „Klimabilanz von Elektroautos – Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial“ der Agora Verkehrswende dient dazu, unterschiedliche Ergebnisse verschiedener Klimabilanzierungen zu erklären, die Diskussion für Politik und Verbraucher zu systematisieren und die Ergebnisse transparent darzustellen.

Das bedeutet, dass die zentralen Einflussparameter auf die Klimabilanz von Elektroautos herauszuarbeiten sind und aufzuzeigen ist, mit welchen Verbesserungspotenzialen bei der Herstellung von Elektroautos (insbesondere bei der Batterieherstellung) und bei deren Nutzung unter

plausiblen Annahmen zu rechnen ist. Als Klimabilanz gelten dabei die Treibhausgasemissionen während des gesamten Lebenszyklus (Herstellung, Betrieb, Produktion des Stroms bzw. des Kraftstoffs) eines batterieelektrischen Autos im Sinne eines ökobilanziellen Ansatzes. Im Vordergrund steht dabei der Vergleich des Elektroautos mit einem vergleichbaren Verbrennerfahrzeug (Benzin oder Diesel). Während eine echte Ökobilanz noch weitere Umweltwirkungskategorien berücksichtigt, wie zum Beispiel Versauerung oder Eutrophierung, wird im Rahmen dieses Projekts nur die Klimawirkung betrachtet.

Vorweg sei angemerkt, dass allein der Wechsel des Antriebskonzeptes und damit des Energieträgers zu kurz greift, um die national und international beschlossenen Klimaschutzziele zu erreichen. Darüber hinaus ist eine umfassende Mobilitätswende erforderlich, mit dem Ziel, den Endenergieverbrauch im Verkehr zu senken, ohne die Mobilität einzuschränken. Die Diskussion einer solchen Mobilitätswende ist allerdings nicht Gegenstand dieser Studie.

Im Rahmen dieser Studie werden zunächst aktuelle Klimabilanzen von Elektrofahrzeugen im Rahmen einer Metastudie analysiert. Dabei werden Bandbreiten der Klimagasemissionen und ihre zentrale Einflussparameter identifiziert. Anschließend werden diese Einflussfaktoren sowohl im Bereich der Fahrzeugnutzung als auch im Bereich der Fahrzeugherstellung anhand der Bilanzierung eines eigenen Beispielfahrzeugs näher analysiert. Ziel dieser eigenen Bilanzierung ist es, die einzelnen Einflussfaktoren isoliert und prägnant darzustellen.

Die dargestellten Einflussparameter zeigen in mehrfacher Hinsicht Verbesserungspotenziale auf, die abschließend analysiert werden. Auf diese Weise entsteht ein Mehrwert für die politische Debatte.

13 Der Begriff „Batterie“ wird in dieser Studie synonym mit dem Begriff „Akku“ verwendet, gemeint ist immer eine wiederaufladbare Batterie.



# 03 | Ergebnisse der Literaturlauswertung

## 3.1 Rahmen der Metastudie

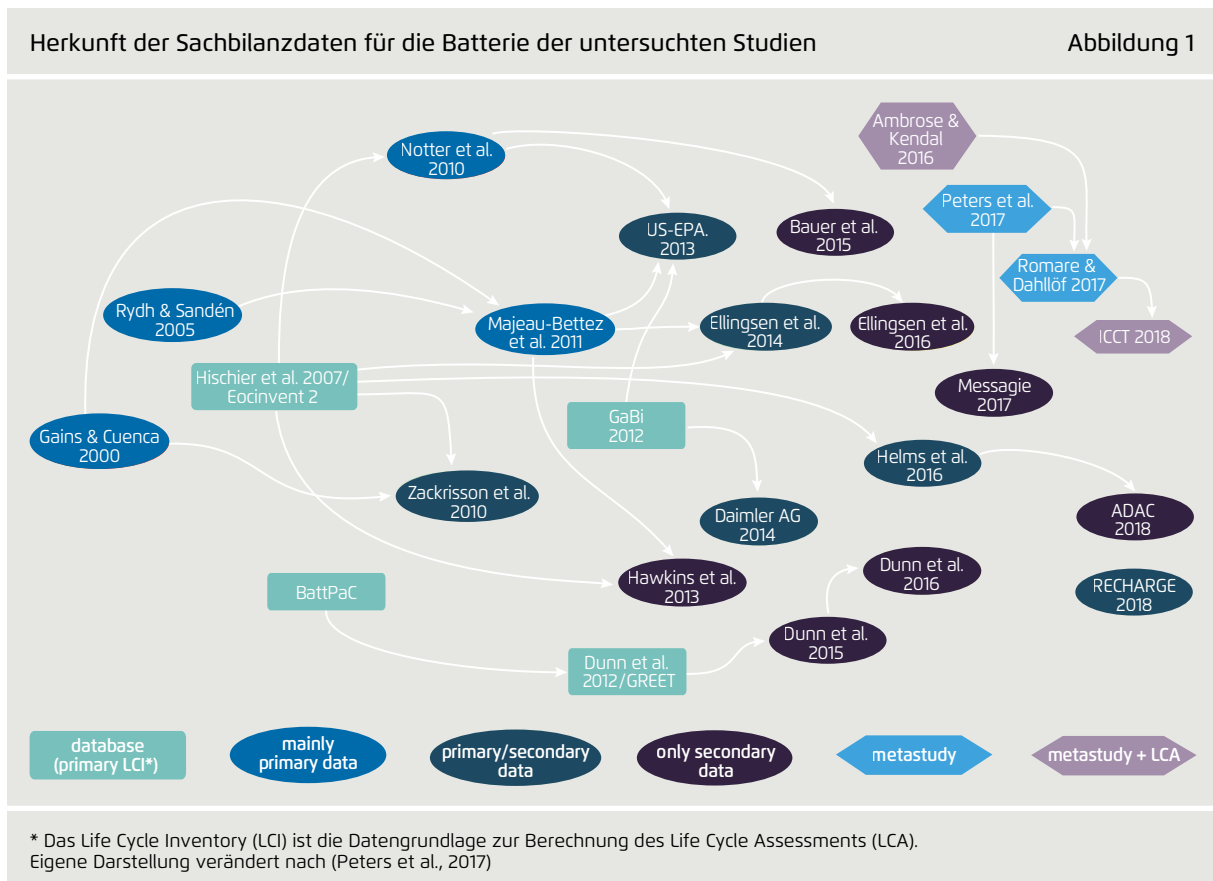
Die vorliegende Metastudie zur Klimabilanzierung von Elektroautos liefert einen Überblick über die Bandbreite an Ergebnissen aus 23 bereits vorhandenen Studien und identifiziert zahlreiche Einflussfaktoren auf die Klimabilanz. Die Titel der ausgewählten Studien sind Tabelle 4 im Anhang zu entnehmen. Ausgewertet wurden dabei überwiegend Ökobilanzen (LCA = *Life Cycle Assessment*) einzelner Fahrzeuge und Batterien, aber auch die Ergebnisse einiger bereits vorhandener Metastudien.

Bei der Analyse der Datengrundlagen verschiedener Studien wird offenbar, dass es zwar auf internationaler Ebene eine große Anzahl von Klimabilanzen zu Elektroautos und Lithium-Ionen-Batterien gibt, die meisten davon aber bei genauerer Betrachtung der Sachbilanzdaten auf andere Studien zurückgreifen<sup>14</sup>. Das gilt insbe-

sondere für die Daten zur Batterieherstellung; dazu liegen nur wenig primäre Industriedaten vor. Damit greift eine große Zahl aktueller Ökobilanzen auf wenige zentrale Studien zur Batterieherstellung zurück, die in Abbildung 1 in ihrer Vernetzung vereinfacht dargestellt sind.

Im Rahmen der vorliegenden Metastudie wird zunächst ein Grob-screening von Studien auf Fahrzeugebene durchgeführt. Anschließend erfolgt eine Detailanalyse von Klimabilanzen zur Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien, die ein wichtiger Baustein der Gesamtbilanz sind.

14 Vgl. auch Peters et al. (2017).



## Exkurs: Interpretationshilfe für Klima- oder Ökobilanzen von Elektroautos

Die Ergebnisse einer Ökobilanz sind ohne die Kenntnis von Annahmen und methodischen Rahmenbedingungen nur schwer zu interpretieren und miteinander zu vergleichen. Die Beantwortung der folgenden Leitfragen hilft bei der Einordnung der Ergebnisse:

**1. Wer hat die Bilanz für welches Fahrzeug erstellt oder beauftragt?**

Bilanzen von Fahrzeugherstellern können häufig auf detaillierte Primärdaten zurückgreifen, bilden aber oft nur ein bestimmtes Fahrzeugmodell und bestimmte Produktionsbedingungen ab. Wissenschaftliche Bilanzen versuchen dagegen in der Regel, bestimmte Fahrzeugtypen repräsentativ abzubilden.

**2. Welche Wirkungskategorien werden in der Ökobilanz betrachtet?**

(z. B. Klimawirkung, Eutrophierung, Versauerung)

Erst wenn mehrere Wirkungskategorien betrachtet werden, können Aussagen über die Umweltwirkungen insgesamt getroffen werden. Eine reine Klimabilanz deckt nur einen Teil der Umweltwirkungen ab.

**3. Werden alle Lebensphasen eines Fahrzeugs betrachtet?**

(dazu zählen u. a. Herstellung, Nutzung, Entsorgung)

Manche Studien vernachlässigen bestimmte Lebensphasen (z. B. Entsorgung) oder nehmen nur einzelne Phasen in den Fokus.

**4. Welcher Strommix wurde berücksichtigt?**

(z. B. nationaler Mix, EU-Mix, Ökostrom oder auch marginaler Strommix)

Hier geht es insbesondere um den Fahrstrom, aber auch um den Energiemix, der für die Fahrzeug- bzw. Batterieherstellung genutzt wird. Die meisten Bilanzen rechnen mit einem durchschnittlichen nationalen Strommix, Marginalbetrachtungen können davon deutlich abweichen (siehe Kapitel 4.2.2).

**5. Ist die Fahrzeugauslegung vergleichbar?**

(z. B. Größenklasse, Batteriegröße)

Es können erhebliche Unterschiede zwischen einem Kleinwagen und einem Mittelklasse-Pkw bestehen, auch die Batteriegröße hat einen relevanten Einfluss.

**6. Woher stammen die Batteriedaten und wie aktuell sind sie?**

(Verwendung von Sekundärdaten oder Primärdaten?)

Die Verwendung von Sekundärdaten spiegelt mit hoher Wahrscheinlichkeit einen veralteten technologischen Stand wider. Es ist sinnvoll, die Energiedichte, die Zellchemie und den Energieeinsatz in der Fertigung zu kennen, da Batteriedaten häufig wenig transparent dargestellt sind.



### 3.2 Bandbreite und Parameter der Gesamtbilanz

Obwohl die Methode der Ökobilanzierung eine standardisierte Vorgehensweise ist<sup>15</sup>, lassen sich die Ergebnisse unterschiedlicher Ökobilanzen teilweise trotz gleicher funktionaler Einheit (z. B. kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Fahrzeugkilometer) nur schwer direkt miteinander vergleichen. Die Unterschiede der Ergebnisse sind auf unterschiedliche Annahmen hinsichtlich der Nutzung, auf unterschiedliche Systemgrenzen und auf unterschiedliche Randbedingungen der Bilanzierung zurückzuführen. Ohne genaue Kenntnis der Annahmen können verschiedene Studien kaum miteinander verglichen werden.

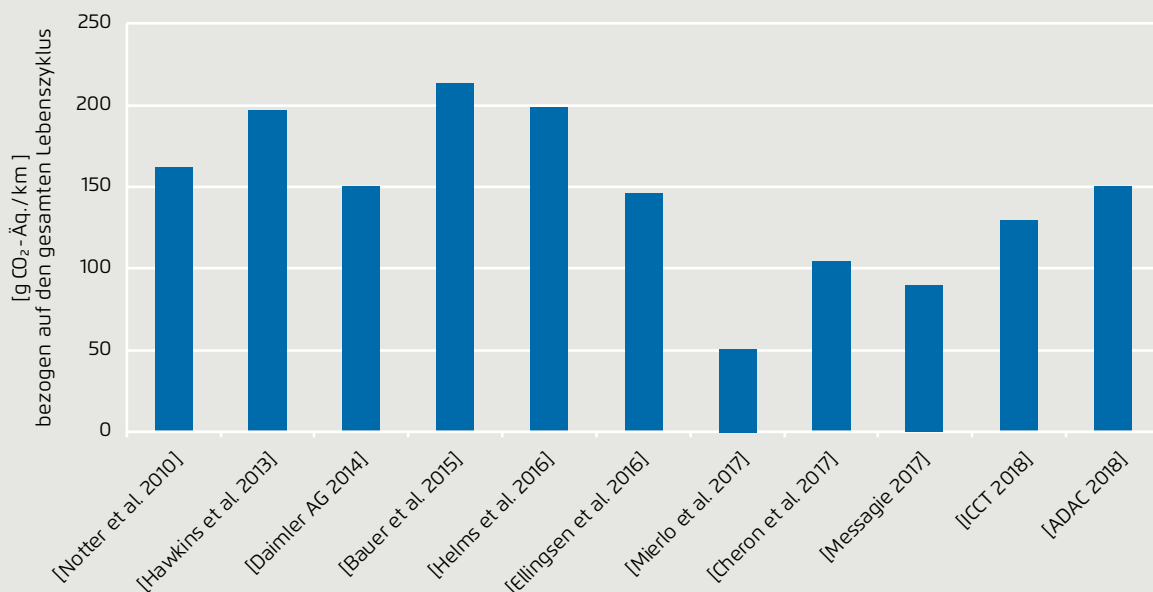
- 15 Mit der Methode der Ökobilanz nach ISO 14040/44 liegt ein wissenschaftlich fundiertes und standardisiertes Verfahren vor, um die Umwelteffekte eines Produktsystems zu berechnen.

Abbildung 2 vergleicht die Ergebnisse der Klimabilanz ausgewählter Studien für Elektroautos (Treibhausgasemissionen in g CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro km). Die Bandbreite der Ergebnisse ist groß, die Unterschiede sind jedoch auch auf unterschiedliche Annahmen zurückzuführen und beruhen nicht zwingend auf technologisch bedingten Unterschieden zwischen verschiedenen Fahrzeugen.

Die genauere Betrachtung des Bilanzgegenstands und der angenommenen Randbedingungen der Studien zeigt zentrale Einflussfaktoren auf die Bilanz. Diese lassen sich der Nutzungs- und Herstellungsphase zuordnen und sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Türkis markiert sind besondere Treiber für die gesamte Bilanz, die sich von anderen Studien unterscheiden. Hier sind in der Nutzungsphase neben großen Unterschieden zwischen Verbrauchswerten und Lebensfahrleistungen vor allem die unterschiedlichen Strommixe von Bedeutung. Die Klimabilanz der Batterieherstellung weist besonders große Unterschiede auf.

Vergleich der Treibhausgasemissionen eines Elektroautos pro Fahrzeugkilometer bezogen auf den gesamten Lebenszyklus

Abbildung 2



Anmerkung: Zum Teil wurden in den Studien mehrere unterschiedliche Fahrzeuge bilanziert. Zwecks bestmöglicher Vergleichbarkeit wurde für diese Darstellung, falls möglich, eine ähnliche Fahrzeugklasse gewählt.  
Eigene Darstellung durch ifeu

Auswahl einflussnehmender Randbedingungen in der Klimabilanz											Tabelle 1
	[Notter et al. 2010]	[Hawkins et al. 2010]	[Daimler 2014]	[Bauer et al. 2015]	[Helms et al. 2016]	[Ellingsen et al. 2016]	[Mierlo et al. 2017]	[Cheron et al. 2017]	[Messaggio 2017]	[ICCT 2018]	[ADAC 2018]
Treibhausgasemissionen (g CO <sub>2</sub> e/km)	162	197	150	210	199	146	51	105	90	130	150
Fahrzeugklasse	Kompaktkl.	–	Kompaktkl.	Ob. Mittelkl.	Kompaktkl.	Kleinwagen	–	Ob. Mittelkl.	–	Kompaktkl.	Kompaktkl.
<b>Nutzungsphase</b>											
Lebensfahr. (km)	150.000	150.000	160.000	240.000	168.000	180.000	209.596	250.000	–	150.000	150.000
Verbrauch (kWh/100 km)	17	17,3	16,6–17,9	21,4	21,9	17	–	21,1	20	20,5	14,7
Fahrzyklus	NEFZ	NEFZ	NEFZ	Real*	Real*	NEFZ	–	Real*	Real*	Real*	EcoTest
Strommix	CH	EU	EU	CH/EU	DE-2013	EU	BE	FR-2015	EU-2015	EU	DE-2013
<b>Herstellung (Batterie)</b>											
Zellchemie	LMO	NMC	NCA	LMO	Mix: LFP, NCA, NMC	NMC	LMO, LFP	NMC	LMO	Li-Ion	Mix: LFP, NCA, NMC
Kapazität (kWh)	34	24	–	25	27,3	26,6	–	–	45	30	28
Energiedichte (Wh/kg)	113	112	115	105	81,6	105	–	–	118	100	–
Treibhausgasemissionen Batterie (kg CO <sub>2</sub> e/kWh)	52,6	187,5	–	84 (2mal)	124	120	–	–	55	175	129

Anmerkung: Türkis markiert sind besondere Treiber für die gesamte Bilanz.  
 \* Es werden Fahrzyklen angesetzt, die weitgehend realistisches Fahrverhalten abbilden.

### 3.3 Bandbreite und Parameter der Nutzungsphase

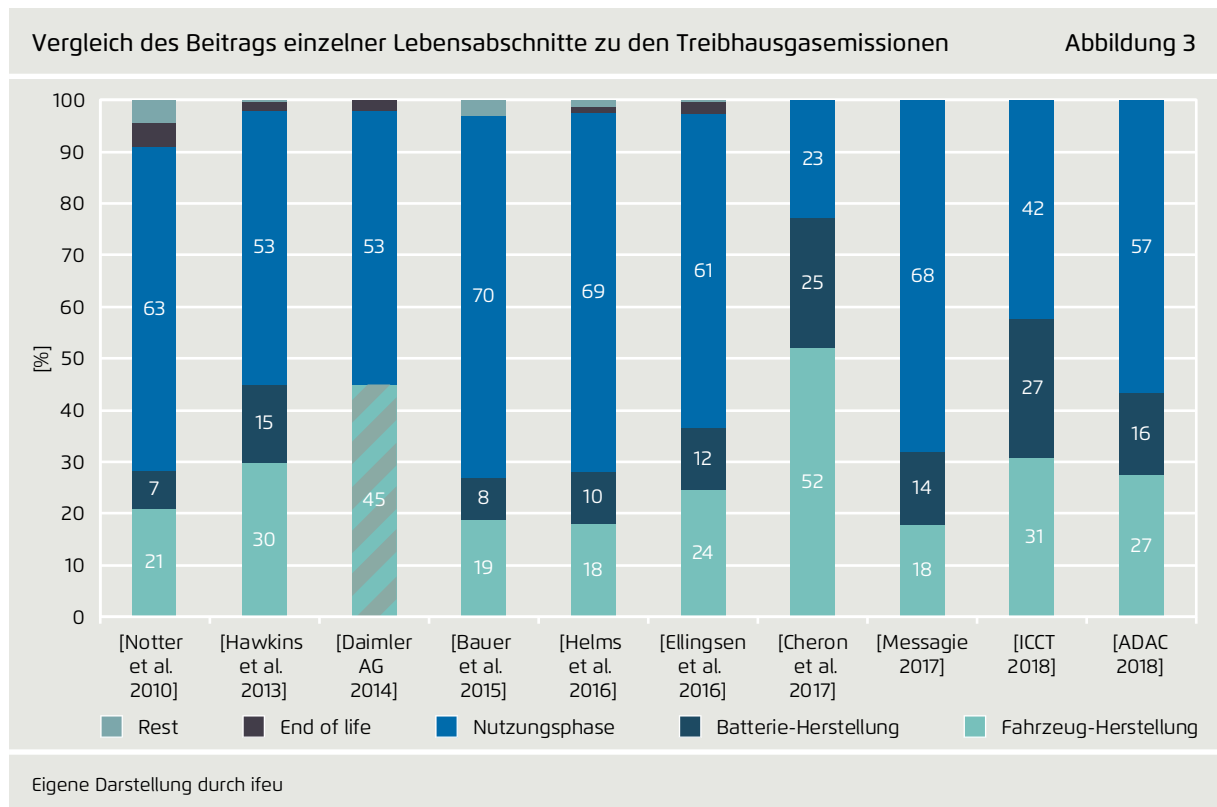
Aus den ausgewerteten Bilanzen geht hervor, dass die Nutzungsphase mit einem Anteil von in der Regel deutlich über 50 Prozent an den Gesamtemissionen den größten Einfluss auf die Klimabilanz eines Elektroautos hat (siehe Abbildung 3). Die entscheidende Rolle spielt dabei die CO<sub>2</sub>-Intensität der **Stromerzeugung**, bei der Deutschland mit seinem hohen Anteil an kohleerzeugtem Strom deutlich schlechter abschneidet als Länder mit höheren Anteilen an Erneuerbaren Energien oder an Kernenergie<sup>16</sup> im Strommix. Deshalb ist die Klimabilanz eines Elektroautos in Frankreich oder Belgien<sup>17</sup> deutlich besser als in Deutschland<sup>18</sup>. Andererseits erfolgt in Deutschland ein laufender Zubau erneuerbarer Erzeugungskapazität,

wodurch die Klimabilanz von Elektroautos kontinuierlich verbessert wird. Viele der ausgewerteten Studien legen ihren Berechnungen einen mittleren EU-Strommix zugrunde; der damit verbundene Ausstoß an Treibhausgasemissionen pro Kilowattstunde ist geringer als der des deutschen Strommixes.

Große Unterschiede zeigen sich auch beim angenommenen Energieverbrauch der Fahrzeuge. Die Studien zeigen beim Verbrauch eine Bandbreite von 15 bis 22 kWh pro 100 km. Dabei ist die Fahrzeuggröße weitgehend vergleichbar, da viele Studien ein Fahrzeug der Kompakt- oder Mittelklasse bilanzieren. Die Unterschiede im Verbrauch sind jedoch nicht nur auf die Fahrzeugeigenschaften, sondern auch auf den zugrunde gelegten Fahrzyklus zurückzuführen. Einige Studien verwenden hier Herstellerangaben im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ), die jedoch als wenig realistisch kritisiert werden.<sup>19</sup> Andere Studien versuchen den realistischen Energieverbrauch auf der Straße abzubilden und hinterlegen dafür eigene Annahmen in der Fahrzeugnutzung.

16 Ungeachtet der negativen Implikationen und ungelösten Probleme der Kernenergie (z. B. Endlagerung) schneidet sie bei einer rein klimabilanziellen Betrachtung vorteilhaft gegenüber fossilen Energieträgern ab.  
 17 Siehe Cheron et al. (2017); Van Mierlo et al. (2017).  
 18 Siehe Helms et al. (2016).

19 Siehe hierzu Tietge et al. (2017).



Ein weiterer wichtiger Einflussparameter der Nutzungsphase ist die **Lebensfahrleistung**. Da die in Abbildung 2 dargestellte funktionale Einheit der Fahrzeugkilometer ist, hat die angenommene Lebensfahrleistung einen erheblichen Einfluss auf die Abschreibung der durch die Batterieherstellung verursachten Treibhausgasemissionen eines Elektroautos. Die meisten Studien gehen von einer Lebensfahrleistung zwischen 150.000 km und 200.000 km aus.

### 3.4 Bandbreite und Parameter der Batteriebilanz

Die bei der Batterieherstellung verursachten Emissionen sind in der Phase der Fahrzeugherstellung für den größten Unterschied zwischen Verbrenner- und Elektroauto verantwortlich. Nach Helms et al. (2016) liegt der Beitrag der Batterie an der Klimawirkung der Fahrzeugherstellung für ein Kompaktklassefahrzeug bei 36 Prozent. Bezogen auf den kompletten Lebensweg des Fahrzeugs (inklusive Nutzungsphase) sind dies jedoch nur noch 10 Prozent. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen auch Ellingsen et al. (2016) mit 33 Prozent und 11 Prozent. Mit zunehmendem Ausbau der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien wächst allerdings die Bedeutung der Herstellungsphase für die Klimawirkung, da der Beitrag der Nutzungsphase entsprechend sinkt.

Tatsächlich liegen zu den durch die Batterieherstellung verursachten Treibhausgasemissionen nur wenige belastbare und aktuelle Daten vor. Der Mangel an gesicherten Primärdaten führt dazu, dass sich viele Studien auf wenige Batterieherstellungsdaten berufen. Trotzdem werden sehr unterschiedliche Treibhausgasemissionen für die Batterieherstellung genannt (siehe Tabelle 1). Eine vergleichende Bilanzierung wird auch dadurch erschwert, dass den Untersuchungen Batterien mit verschiedenen Zellchemien zugrunde liegen (siehe Exkurs Lithium-Ionen-Batterie). Den größten Einfluss auf die Bilanz hat zunächst die **Batteriegröße** (Auslegung der Kapazität). In der Praxis können sich unterschiedliche Reichweiten deutlich auf das Nutzerverhalten und die Lebensfahrleistung auswirken. Diese Effekte werden in Kapitel 4.2.4 an Fallbeispielen illustriert. Festzuhalten bleibt für die Interpretation von Klimabilanzen, dass eine größere Batterie sich zunächst negativ auf die Gesamtbilanz des Fahrzeugs auswirkt, wenn für verschiedene Batteriegrößen der

gleiche Nutzen unterstellt wird (z. B. gleiche Lebensfahrleistung). Die durchschnittliche Kapazität der untersuchten Studien liegt bei 25 kWh, repräsentiert jedoch bereits ältere Fahrzeugmodelle. Die neuesten Elektroautos am Markt haben bereits eine Kapazität von deutlich über 30 kWh (z. B. e-Golf und Opel Ampera-e). Der Nachfrage nach höherer Reichweite wird derzeit überwiegend durch steigende Kapazitäten begegnet, weshalb die Lasten aus der Batterieherstellung weniger stark zurückgehen, als es der technologische Fortschritt erlauben würde.

Neben der Batteriegröße hat die **Energiedichte** (Energieinhalt bezogen auf das Gewicht) einen großen Einfluss auf die Klimabilanz. Eine höhere Energiedichte ermöglicht es, eine bestimmte Reichweite mit geringerem Batteriegewicht und damit auch mit geringerem Materialeinsatz zu erzielen. Die Energiedichte in den betrachteten Studien variiert für das Gesamtsystem (Systemebene), bestehend aus Zellen, Gehäuse und Batteriemangement, zwischen 80 Wh/kg und 118 Wh/kg. Eine Speicherkapazität von einer Kilowattstunde wiegt also rund 10 kg. Mithilfe eigener Recherchen zu aktuellen Elektroautos und durch die Analyse weiterer Quellen<sup>20</sup> wurden Energiedichten für unterschiedliche Fahrzeugkonzepte und Batterietypen verglichen. NCA- und NMC-Zellen korrelieren dabei im Durchschnitt mit der höchsten Energiedichte. Dieser Vorteil kann mögliche Nachteile in der Umweltlast der Materialvorketten<sup>21</sup> teilweise kompensieren. In den vergangenen Jahren hat sich die Energiedichte für Elektroautobatterien deutlich verbessert, ältere Daten bilden deshalb tendenziell eine niedrigere Energiedichte ab. Das Publikationsjahr der Studie ist hier jedoch nicht immer aussagekräftig, da auch neuere Studien häufig auf ältere Daten zurückgreifen.

Die **Zellchemie** ist für die gesamte Fahrzeugbilanz zwar von nachgelagerter Relevanz. Fokussiert man jedoch auf die spezifische Klimawirkung der Fahrzeugbatterien, ist dies eine ausschlaggebende Größe. Heute werden in Elektroautos hauptsächlich vier Lithium-Ionen-Zellchemien in der Kathode eingesetzt: LMO, LFP, NMC und NCA (siehe Tabelle 2). Die Materialzusammensetzung ist unterschiedlich und entsprechend mit unterschiedli-

20 Vgl. etwa Batt-DB von Stenzel et al. (2014); Safari (2018).

21 In NMC- und NCA-Zellen kommen Nickel und Kobalt zum Einsatz, die gegenüber anderen Zellchemien (z. B. LMO und LFP) eine deutlich klimaintensivere Materialvorkette haben.

## Exkurs Lithium-Ionen-Batterie

Eine Lithium-Ionen-Batterie besteht im Wesentlichen aus einer Kathode, einer Anode, einem Elektrolyten, einem Separator und einem umgebenden Zellgehäuse. In großen Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge werden mehrere Zellen in Module zusammengeschaltet und in einem Batteriepack verbunden. Das erfordert zusätzlich ein Batteriemangement, ein Kühlsystem und ein stabiles Batteriegehäuse.

Die Kathode bildet in der Lithium-Ionen-Technologie eine zentrale Komponente. Im Automobilbereich kommen heute in der Kathode mehrere Lithiumverbindungen mit verschiedenen Eigenschaften zum Einsatz (vgl. Tabelle 2).

Heute gängige Kathodenmaterialien für Li-Ionen-Batterien im Automobilbereich

Tabelle 2

Verbindung	Abkürzung	Strukturformel
Nickel-Mangan-Kobaltoxid	NMC	$\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$
Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid	NCA	$\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$
Eisenphosphat	LFP	$\text{LiFePO}_4$
Manganoxid	LMO	$\text{LiMn}_2\text{O}_4$

Köhler (2013)

chen Umweltlasten verbunden. Dabei zeigen NMC- und NCA-Zellen etwas höhere Klimalasten in den Vorketten der eingesetzten Materialien, haben jedoch in der Regel eine höhere Energiedichte. Die materialseitige Klimabilanz muss daher nicht zwingend schlechter sein, da weniger Material pro Kilowattstunde eingesetzt wird.

Eine Analyse der eingesetzten Zellchemie in aktuellen Elektroautos zeigt, dass derzeit überwiegend auf NMC- und NCA-Zellen zurückgegriffen wird.<sup>22</sup> Die größten Zellhersteller am Markt sind unter anderem LG Chem (NMC), Samsung SDI (NMC) und Panasonic (NCA). LFP-Zellen werden schon seit vielen Jahren genutzt und sind auf dem chinesischen Markt (insbesondere bei BYD) sehr weit verbreitet<sup>23</sup>; im europäischen Markt spielen sie kaum noch eine Rolle. LMO-Zellen kommen heute noch häufig zum Einsatz, allerdings überwiegend in Kombination mit NMC- und NCA-Zellen. Da die Kathodenmaterialien jedoch nur einen kleinen Teil der Gesamtmaterial-

menge ausmachen, ist der materialseitige Einfluss der Zellchemie auf die Gesamtbilanz begrenzt.

Für die Batteriebilanz wichtiger als die eingesetzte Zellchemie ist jedoch der **Energieeinsatz in der Zellfertigung**. Hierzu liegen nur wenige primäre Industriedaten vor, entsprechend groß sind die Unsicherheiten. Die Bandbreite der Klimawirkung der Batterieherstellung ist in den untersuchten Studien besonders groß: Sie reicht von 39 bis 275 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Kilowattstunde (kWh). In der Mehrzahl der Studien werden allerdings Angaben zwischen 100 bis 200 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro kWh gemacht; das grenzt den typischen Bereich stärker ein (siehe Abbildung 4). In einem ersten Differenzierungsschritt lässt sich der Energieverbrauch nach Zellherstellung und Batteriemontage untergliedern. Die Zellherstellung ist deutlich energieintensiver als der letzte Prozessschritt der Batteriemontage<sup>24</sup> und erfolgt heute überwiegend in Ostasien durch die großen Zellhersteller wie LG

22 Vgl. Schmuch et al. (2018).

23 Vgl. Einhorn; Kim (2018).

24 Siehe Romare; Dahllöf (2017).

Chem, Panasonic, BYD, Samsung.<sup>25</sup> Die Batteriemontage wird häufig direkt von den Automobilherstellern übernommen.

Die große Bandbreite der Ergebnisse wird auch durch zwei grundsätzliche Modellierungsansätze erzeugt (vgl. Abbildung 5):

1. **Top-down-Zuweisung** unter Verwendung von (meist sekundären) Industriedaten<sup>26</sup>: Hierbei wird der gesamte Energieverbrauch einer Fabrik auf das einzelne Produkt heruntergebrochen (z.B. pro Kilowattstunde Batteriekapazität). Das führt insgesamt zu relativ hohen Verbräuchen: 326–1060 MJ/kWh pro Zelle<sup>27</sup>.

2. **Bottom-up-Modellierung**: Bei diesem Ansatz wird für jeden Prozessschritt der Energieeinsatz abgeleitet oder berechnet. Das führt zwar zu einem höheren Detaillierungsgrad, aber unter Umständen auch zur Unterschätzung des gesamten Energieverbrauches. Das Ergebnis sind überwiegend niedrige Verbräuche: 0–10 MJ/kWh pro Zelle<sup>28</sup>.

Neuere LCAs basierend auf studienorientierten Primärdaten<sup>29</sup> deuten auf einen sehr hohen Energieverbrauch im Bereich von 530 bis 1670 MJ/kWh pro Zelle hin<sup>30</sup>, was insgesamt die Wahl einer Top-down-Allokation stützt.

25 Siehe McKerracher (2017).

26 Zum Beispiel veröffentlichungspflichtige Daten aus Geschäftsberichten.

27 Bauer (2010); Majeau-Bettez et al. (2011);

Zackrisson et al. (2010).

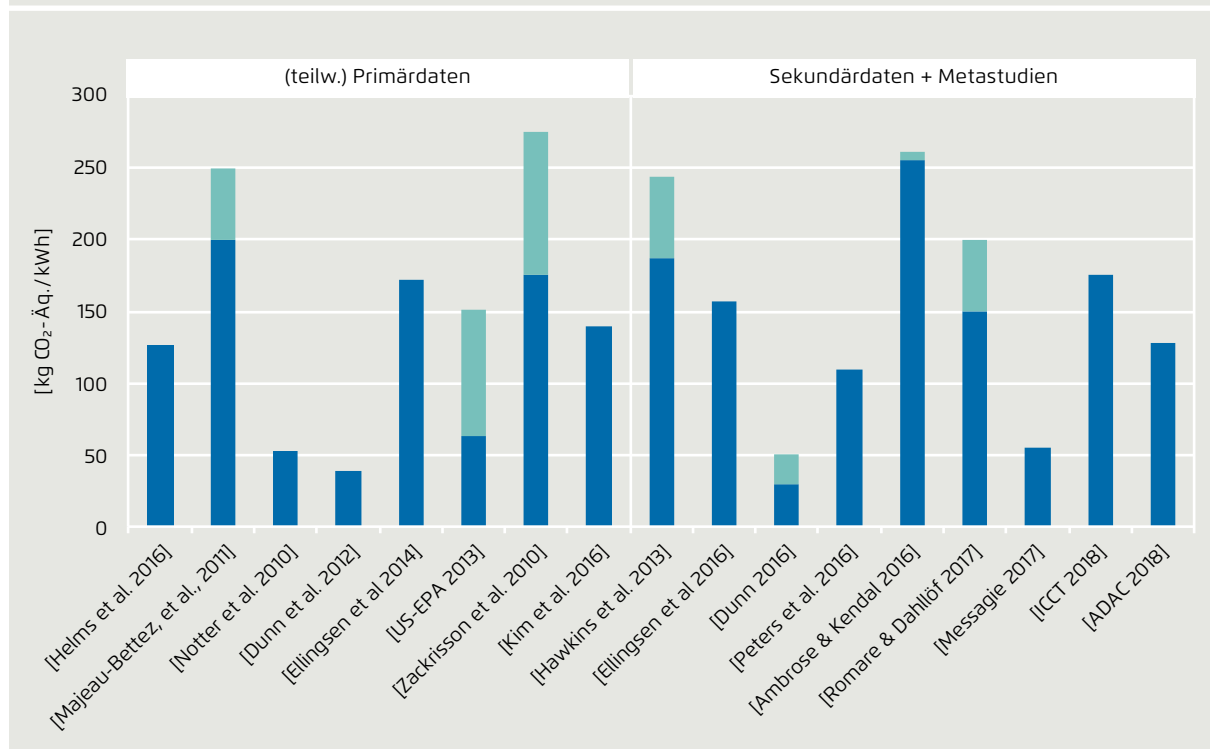
28 Dunn et al. (2012); Notter et al. (2010); US-EPA (2013).

29 Gemeint sind Industriedaten, die gezielt für entsprechende Studien erhoben wurden.

30 Thomas et al. (2018).

Vergleich der Treibhausgasemissionen aus der Batteriefertigung bezogen auf eine Kilowattstunde Batteriekapazität

Abbildung 4



Anmerkung: Der türkise Balken zeigt die Bandbreite der Ergebnisse innerhalb der Studie auf. Eigene Darstellung durch ifeu

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für die Klimabilanz von Elektroautos

- in der Nutzungsphase die Lebensfahrleistung, der Energieverbrauch und insbesondere die Strombereitstellung
- und in der Herstellungsphase die Batteriekapazität, die Energiedichte, die Zellchemie und der Energieeinsatz für die Fertigung

ausschlaggebend sind. Der Einfluss dieser zentralen Parameter auf die gesamte Klimabilanz wird in Kapitel 4 an Fallbeispielen illustriert. Damit sollen auch Verbesserungspotenziale der Klimabilanz von Elektroautos aufgezeigt werden.

Energieverbrauch und THG-Emissionen der Batterieherstellung nach unterschiedlichen Ansätzen

Abbildung 5



\* RECHARGE – The European Association of Advanced Rechargeable and Lithium Batteries – macht nur eine Verbrauchsangabe pro kg Batterie. Zur Darstellung des Ergebnisses wurde eine Energiedichte auf Systemebene von 107 Wh/kg angenommen. Anmerkung: Der türkise Balken zeigt die Bandbreite der Ergebnisse innerhalb der Studie auf. Eigene Darstellung durch ifeu





# 04 | Einfluss zentraler Parameter auf die heutige Klimabilanz

## 4.1 Sensitivitätsanalysen gegenüber einem Basisfall

Ziel dieser Studie ist es, die zentralen Einflussparameter auf die Klimabilanz von Elektroautos herauszuarbeiten und aufzuzeigen, welche Verbesserungspotenziale es bei den einzelnen Schritten (insbesondere der Batterieherstellung) gibt. Dies lässt sich aufgrund der schlechten Vergleichbarkeit verschiedener Studien nur begrenzt auf Basis einer Literaturlauswertung erreichen. Um die Sensitivitäten der Klimabilanz von Elektroautos isoliert betrachten zu können, wurde deshalb eine eigene Modellierung eines Fahrzeugs als Basisfall vorgenommen, gegenüber dem sich die wichtigsten Fahrzeugparameter und Rahmenbedingungen als Sensitivitäten einzeln variieren lassen. Die genauen Annahmen für den Basisfall und die Sensitivitäten sowie wichtige Ergebnisse sind überblicksartig in Tabelle 5 im Anhang dargestellt.

Die eigene Bilanzierung des Basisfalls erhebt keinen Anspruch darauf, die beste oder einzig richtige Klimabilanz von Elektroautos zu sein. Die Modellierung erlaubt

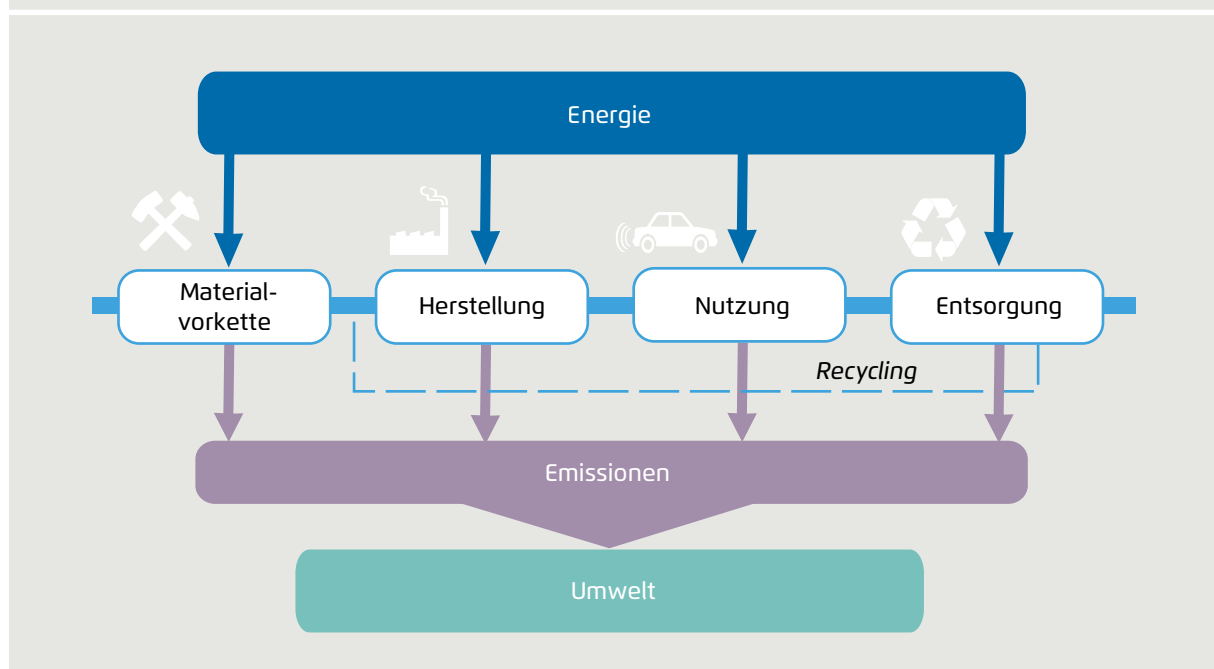
es aber, zentrale Parameter unter sonst gleichen Randbedingungen zu variieren und damit deren Einfluss konsistent aufzuzeigen. Berücksichtigt werden dabei:

- Fahrzeug- und Batterieherstellung (inkl. Rohstoffgewinnung)
- Auspuffemissionen bei Verbrennungsfahrzeugen
- Stromverbrauch der Elektroautos inkl. Ladeverlusten
- Energiebereitstellung (Kraftstoffe und Strom)
- Wartung der Fahrzeuge
- Entsorgung und Recycling der Fahrzeuge

Für die Sensitivitätsanalyse wurde ein Fahrzeug der Kompaktklasse gewählt, für das eine weitgehend vergleichbare Benzin-, Diesel- und Elektrovariante modelliert wurde (siehe Tabelle 5 im Anhang). Materialeitig wird ein für alle Antriebe gleicher Fahrzeugrumpf definiert. Zusätzlich werden antriebspezifische Komponenten wie Motor (jeweils etwa 100 kW Motorleistung), Getriebe und Batterie sowie konzeptspezifische Zusatzbauteile berücksichtigt. Dabei steht nicht die exakte Abbildung spezieller Fahrzeugmodelle im Vordergrund, sondern die Bilanzierung eines typischen Fahrzeugs der Kompaktklasse, mit

Schematische Darstellung Konzept Klimabilanz

Abbildung 6



Eigene Darstellung durch ifeu

Fokus auf die jeweils besonders relevanten Prozesse und Materialien. Die mit der Bereitstellung der Rohmaterialien verbundenen Umweltwirkungen sowie die Fahrzeugwartung werden vor allem mit Daten der Datenbank ecoinvent 3.4<sup>31</sup> bilanziert.

Auf eine Variation des Fahrzeugrumpfs wird verzichtet, da dieser beiden Technologien zugrunde liegt und die Variation damit nur begrenzte Auswirkungen auf die Unterschiede in der Klimabilanz hätte. Stattdessen werden andere zentrale Parameter variiert, die häufig auch mit der Fahrzeuggröße korrelieren: zum Beispiel die Batteriegröße (Reichweite), die aufgrund von Gewichtsunterschieden Einfluss auf den Verbrauch hat.<sup>32</sup> Variiert wird auch das vorherrschende Einsatzgebiet des Fahrzeugs, wobei zwischen Stadtverkehr und Autobahnbetrieb unterschieden wird.

Die Batterie steht als zentrale, die Antriebskonzepte unterscheidende Komponente im Fokus der Bilanzierung und Sensitivitätsanalyse. Betrachtet werden Nickel-Mangan-Kobalt-Zellen (NMC) sowie das Batteriemangement, das Gehäuse und die Kühlung. Dabei wird die heute gängige, vorwiegend in Asien erfolgende Fertigungspraxis möglichst belastbar abgebildet. Die Energiedichte beträgt in der untersuchten Literatur durchschnittlich etwa 100 Wh pro kg auf Systemebene, allerdings entsprechen die betrachteten Fahrzeuge nicht mehr dem Stand der Technik. In aktuellen Fahrzeug- und Batteriedatenblättern<sup>33</sup> liegt der Wert bei durchschnittlich 110 Wh pro kg. Aufgrund von Expertenschätzung und Rückmeldungen aus dem Begleitkreis wird die Energiedichte für die NMC-Batterie mit 115 Wh pro kg angesetzt. Da neuere Fahrzeuge auch in der Kompaktklasse teilweise bereits hohe Batteriekapazitäten aufweisen (z. B. e-Golf und Opel Ampera-e), wurde für das Beispielfahrzeug eine Batteriekapazität von 35 kWh angenommen, was etwa dem aktuellen e-Golf als klassischem Fahrzeug der Kompaktklasse entspricht. Damit sind nach Typprüfzyklus in der Kompaktklasse Reichweiten bis zu 300 km möglich. Das Leergewicht des Elektroautos beträgt knapp 1.500 kg und liegt damit deutlich über der

Benzin- und Dieselvariante mit etwa 1.300 kg. Entsprechend den Rückmeldungen aus dem Begleitkreis zu dem Projekt wurde unterstellt, dass die Batterie während des betrachteten Fahrzeuglebens nutzbar bleibt.<sup>34</sup>

Weitere detaillierte Informationen zu Datengrundlagen und Annahmen der Modellierung sind im Anhang dokumentiert (siehe Kapitel 8.2).

## 4.2 Parameter der Fahrzeugnutzung

### 4.2.1 Bandbreite der Lebensfahrleistung und des Energieverbrauchs

Die Herstellung von batterieelektrischen Fahrzeugen ist fast immer mit höheren Klimagasemissionen verbunden als die Herstellung vergleichbarer Verbrennungsfahrzeuge. Wie groß diese Startlast des Elektroautos ist, welche Einflussfaktoren und Verbesserungspotenziale es hier gibt, wird in Kapitel 4.3 analysiert. In der Phase der Fahrzeugnutzung ist die Klimawirkung der Elektroautos in der Regel allerdings geringer als die von Verbrennern. Mit jedem gefahrenen Kilometer kompensiert das Elektroauto also seine Startlast, von einer bestimmten Lebensfahrleistung an ist die Klimabilanz eines Elektroautos gegenüber einem Verbrenner wieder positiv. In günstigen Fällen entsteht am Ende des Lebenszyklus ein deutlicher Klimavorteil für das Elektroauto.

Der Lebensfahrleistung kommt für die Gesamtbilanz daher zentrale Bedeutung zu. Sofern Elektroautos Verbrenner mit nur geringer Fahrleistung ersetzen, schneiden sie in der Klimabilanz eher schlecht ab. Erst wenn sie Verbrennungs-Pkw mit hoher Fahrleistung ersetzen, wird die Klimabelastung aus der Fahrzeugherstellung kompensiert. Im Detail hängt dies aber auch vom Energieverbrauch des Fahrzeugs ab, von der Fahrzeugnutzung (siehe Kapitel 4.2.4) und vor allem vom Strommix (siehe Kapitel 4.2.2).

In Umweltbilanzen werden typischerweise Lebensfahrleistungen zwischen 150.000 und 200.000 km angenommen (siehe Tabelle 1). Nach der Fahrleistungserhebung von IVT und DLR (2014) fahren Benzin-Pkw über alle Altersklassen jährlich im Schnitt etwa 10.400 km und Diesel-Pkw etwa 17.400 km. Für eine Lebensfahrleistung von 150.000 km würde ein durchschnittlicher

31 Siehe Wernet et al. (2016).

32 Siehe Helms; Kräck (2016).

33 Laufende Datenerhebung aus unterschiedlichen Quellen. Basierend hauptsächlich auf INL (2018); Safari (2018); Stenzel et al. (2014).

34 Agora Verkehrswende (2018).

Benzin-Pkw daher über 14 Jahre brauchen, während diese bei einem durchschnittlichen Diesel-Pkw in unter 9 Jahren erreicht wäre. Für eine Lebensfahrleistung von 200.000 km würde ein Benzin-Pkw dann bereits 19 Jahre benötigen, während diese bei einem Diesel-Pkw in weniger als zwölf Jahren erreicht wäre.

Die heute zugelassenen Elektroautos sind im Durchschnitt noch recht jung. Statistisch auswertbar sind Fahrzeuge bis zu einem Alter von 4 Jahren; bei privaten Haltern kommen sie auf eine Jahresfahrleistung von 11.500 km. Dies entspricht recht genau der Jahresfahrleistung jüngerer Benziner bis 4 Jahre. Lebensfahrleistungen deutlich über 200.000 km würden unter diesen Randbedingungen die Ausnahme bleiben, während 150.000 km gut erreichbar sind. Für bestimmte Anwendungen wie den Stadtverkehr oder als Zweitwagen sind jedoch auch deutlich niedrigere Lebensfahrleistungen denkbar. Für die Sensitivitätsbetrachtungen werden daher neben dem Amortisationspunkt, ab dem ein Klimavorteil für das Elektroauto entsteht, auch die möglichen Einsparungen nach 150.000 und 200.000 km quantifiziert.

Jeder gefahrene Kilometer eines Fahrzeugs verursacht einen bestimmten Strom- bzw. Kraftstoffverbrauch, der eine entsprechende Energiebereitstellung notwendig macht. Beim spezifischen Stromverbrauch gibt es einerseits deutliche, von der Fahrsituation abhängige Schwankungen, andererseits unterscheiden sich aber auch Fahrzeugmodelle hinsichtlich ihres Energieverbrauchs. Abbildung 8 zeigt den Stromverbrauch ausgewählter Elektroautomodelle der Kompaktklasse sowohl im Typprüfzyklus des *Neuen Europäischen Fahrzyklus* (NEFZ) als auch im ADAC Ecotest. Die Verbrauchswerte im NEFZ liegen dabei durchweg niedriger, sind aber aufgrund des wenig dynamischen Fahrprofils und der fehlenden Berücksichtigung von Nebenverbrauchern wie Klimaanlage wenig realitätsnah.<sup>35</sup> Die Verbrauchswerte im dynamischeren Ecotest, der Ladeverluste und Nebenverbraucher zumindest teilweise einbezieht, liegen dabei zwischen 26 Prozent und 37 Prozent über den Werten des NEFZ und werden als deutlich realitätsnäher eingestuft.

35 Vgl. Tietge et al. (2017).

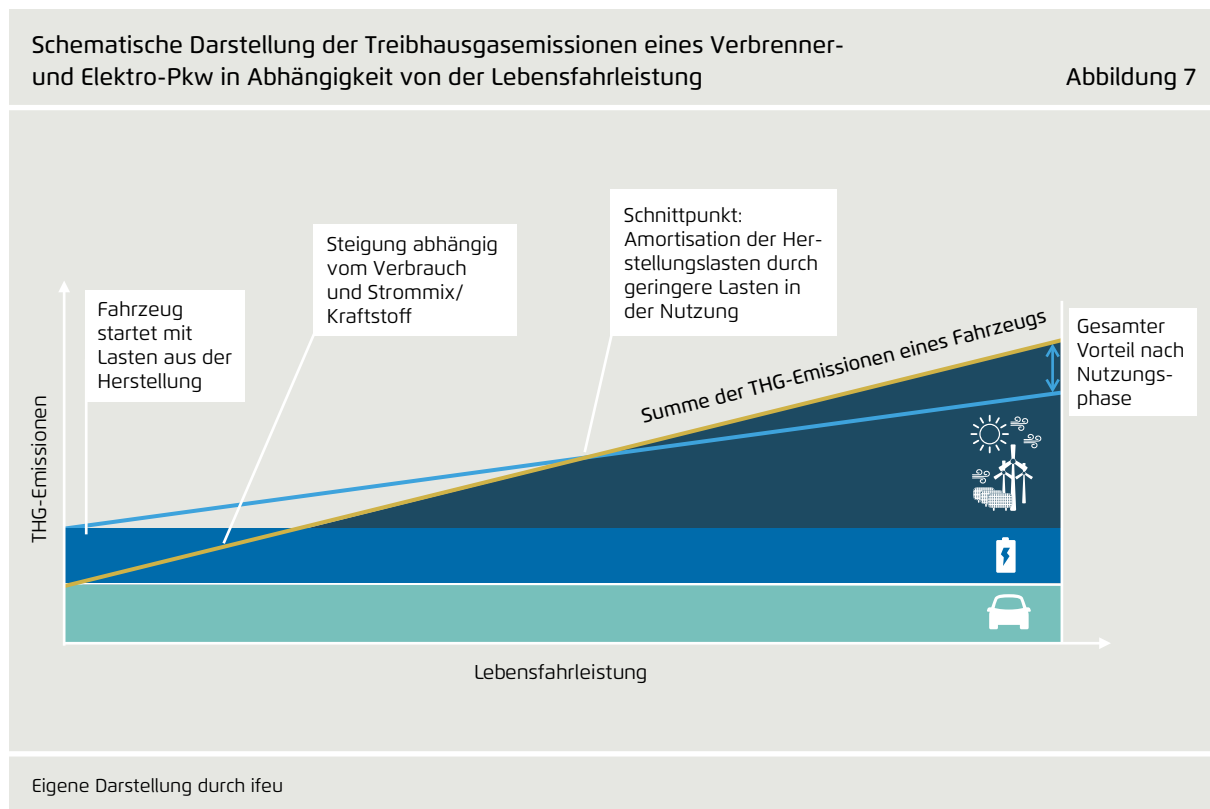


Abbildung 8 zeigt, dass es auch zwischen Fahrzeugen der Kompaktklasse eine erhebliche Bandbreite der Verbrauchswerte gibt, die unter anderem mit der Batteriekapazität und damit unterschiedlichen Leergewichten zusammenhängt. So wurde unter den Beispielfahrzeugen in Abbildung 8 im Ecotest ein Verbrauch von unter 15 kWh pro 100 km bei einem Fahrzeug mit nur 28 kWh Batteriekapazität gemessen, während der Verbrauch bei dem Fahrzeug mit 60 kWh Batteriekapazität bei fast 20 kWh liegt. Aber auch andere technische Parameter des Fahrzeugs spielen eine Rolle. Die Wahl des betrachteten Fahrzeugs und die betrieblichen Rahmenbedingungen haben also einen entscheidenden Einfluss auf die Klimabilanz. Um eine gute Vergleichbarkeit zwischen den betrachteten Antriebskonzepten zu erreichen, wurde seitens ifeu der Verbrauch des Beispielfahrzeugs der Kompaktklasse mit weitgehend vergleichbaren Fahrzeugparametern für das Innerorts-, Landstraßen- und Stadtprofil des ADAC Ecotest modelliert<sup>36</sup>. Dabei wurden auch typische Neben-

verbraucher (wie Licht und Grundlast der Klimaanlage<sup>37</sup>) berücksichtigt. Bei einer für Kompaktklassenfahrzeuge in Deutschland typischen Verteilung der Fahrsituationen nach dem ifeu *Transport Emission Model* (TREMOM) resultiert für das Elektroauto ein mittlerer Verbrauch ohne Ladeverluste von etwa 16 kWh pro 100 km.<sup>38</sup> Ein solcher Verbrauch liegt auch im Rahmen dessen, was Verbraucher aus der Praxis berichten.<sup>39</sup> Für Autobahnfahrten zeigen sich dann deutlich höhere und im Stadtverkehr niedrigere Energieverbräuche (siehe Tabelle 3).

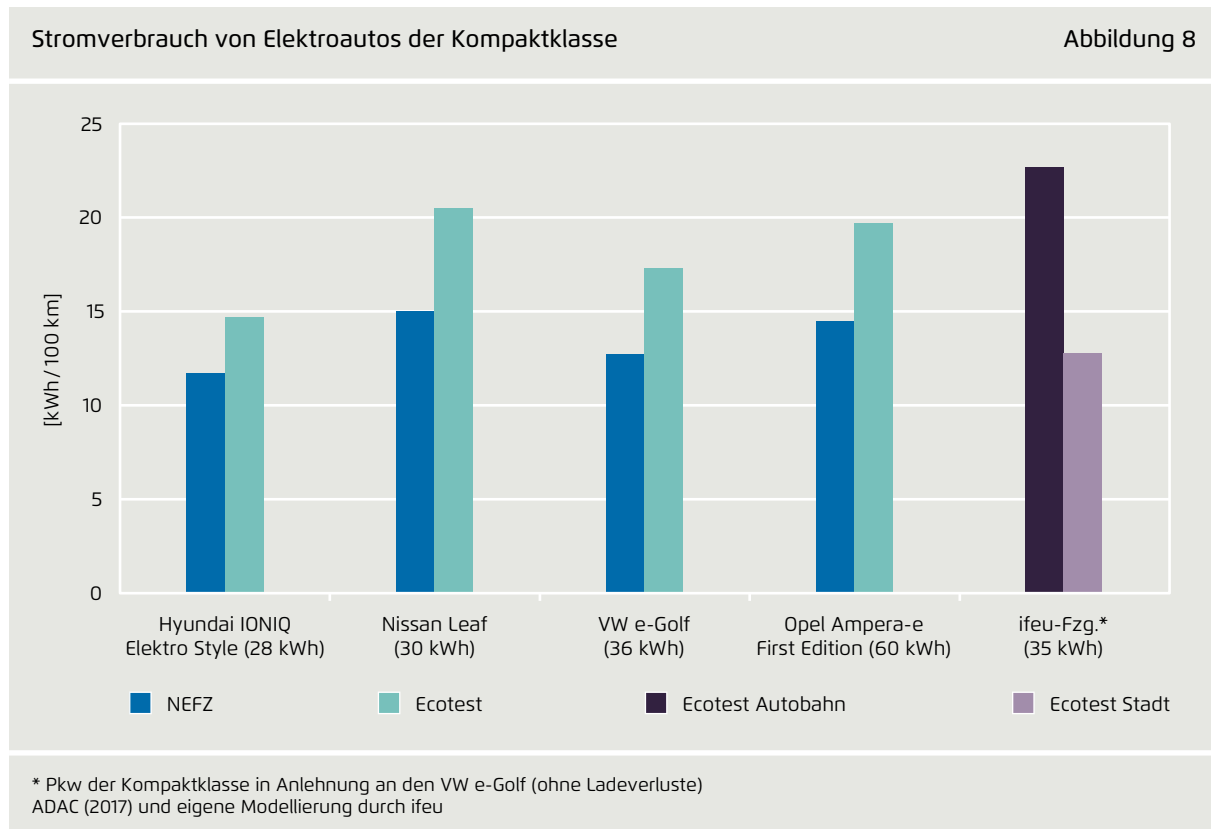
in Anlehnung an den VW e-Golf, dessen technische Parameter dem hier angesetzten Basisfall entsprechen.

37 Der Zusatzverbrauch durch Klimatisierung kann abhängig von der Witterung, der individuellen Nutzung (jahres- und tageszeitlich sowie nach Straßenkategorie) und der Klimatisierungsstrategie des Fahrzeugs stark variieren. Temporär sowie fahrzeug- und nutzerspezifisch sind daher deutliche Abweichungen möglich.

38 Vgl. ifeu (2016).

39 Verbrauchsangaben zur Kompaktklasse (z. B. e-Golf) auf dem Onlineportal [www.spritmonitor.de](http://www.spritmonitor.de).

36 Das eingesetzte Fahrzeugmodell ist dokumentiert in Kräck et al. (2015). Modelliert wurde ein Pkw der Kompaktklasse



Ladeverluste können bei Elektroautos eine relevante Größe sein. Eine Auswertung aktueller Messdaten des ADAC (2018a) zeigt für Kleinwagen und Mittelklasse-Fahrzeuge einen mittleren Ladeverlust von 15 Prozent. Das bedeutet, dass pro Kilowattstunde Batterieladung dem Stromnetz tatsächlich 1,15 Kilowattstunden Strom entnommen werden und entsprechend zusätzlich erzeugt werden müssen.

Parallel zur Modellierung des Elektroautos wurden auch Verbrauchswerte für ein möglichst vergleichbares Kompaktklassefahrzeug<sup>40</sup> als Benzin- und als Diesel ermittelt (siehe Tabelle 3). Die ermittelten Werte werden auch für die Sensitivitätsbetrachtung in den folgenden Kapiteln verwendet. Der Kraftstoffverbrauch des Dieselfahrzeugs liegt dabei durchgängig etwas niedriger als beim Benzin-er, zusätzlich ergibt sich bei Verbrennern kein relevanter Vorteil im Innerortsbereich. Die für Verbrenner abgeleiteten Verbrauchswerte weisen die Modellfahrzeuge als effizient aus.

#### 4.2.2 Strombereitstellung und Energiewende in Deutschland

Beim Verbrennungsfahrzeug dominieren die CO<sub>2</sub>-Aus-puffemissionen die nutzungsabhängige Klimabilanz. Die zusätzliche Klimawirkung der Kraftstoffbereitstellung von der Quelle zum Rad (*Well-to-Wheel*) trägt nur etwa 20 Prozent zu den Gesamtemissionen der Nutzung

bei.<sup>41</sup> Beim Elektroauto ist dagegen die Klimawirkung der Strombereitstellung der zentrale Einflussfaktor der Nutzungsphase. Auspuffemissionen gibt es nicht, deshalb entstehen beim Fahrzeugbetrieb weder direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen noch werden Schadstoffe in die Luft emittiert (abgesehen vom Reifenabrieb, der allerdings auch beim Verbrenner entsteht). Die Klimawirkung des Betriebs von Elektroautos kann dennoch erheblich sein, je nachdem, wie CO<sub>2</sub>-intensiv der Fahrstrom erzeugt wird.

In Deutschland ist der Anteil Erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung in den vergangenen Jahren deutlich gestiegen. 2017 trugen die Erneuerbaren bereits ein Drittel zur Bruttostromerzeugung bei (siehe Abbildung 9). Trotzdem sorgen weiterhin hohe Anteile fossiler Energieträger im Strommix, vor allem Braun- und Steinkohle mit einem gemeinsamen Anteil von 37 Prozent an der Bruttostromerzeugung, für eine erhebliche Klimawirkung der Stromerzeugung in Deutschland. Sie liegt über dem europäischen Durchschnitt.

2016 war die Bereitstellung von einer Kilowattstunde Strom nach Pehnt et al. (2018) noch mit einer Klimawirkung von fast 570 g CO<sub>2</sub>-Äquivalenten verbunden, der europäische Durchschnitt liegt nach ecoinvent 3.4<sup>42</sup> etwa 100 g niedriger. In Deutschland sorgen die Ausbauziele des „Erneuerbare-Energien-Gesetzes“ (EEG), die durch entsprechende Mengenausschreibungen weitgehend operationalisiert sind, jedoch für einen kontinuierlichen Ausbau der Erneuerbaren Energien. Nach Vorlage des Berichts der *Kommission für Wachstum, Struktur-*

40 Dies bedeutet, die übergeordneten Fahrzeugparameter wie z. B. Fahrzeuggröße, Luftwiderstand, Rollwiderstand und Motorleistung wurden gleich angesetzt. Nichtsdestotrotz bestehen zwischen den Antrieben Unterschiede etwa in Bezug auf Reichweite und Fahrdynamik.

41 Helms et al. (2016)

42 Vgl. Wernet et al. (2016).

Verbrauchswerte nach ifeu-Modellierung eines generischen Kompaktklassefahrzeugs			Tabelle 3
	Elektro	Benzin	Diesel
Innerorts	12,8 kWh/100 km	6,1 l/100 km	4,6 l/100 km
Außerorts	13,4 kWh/100 km	5,1 l/100 km	4,1 l/100 km
Autobahn	22,7 kWh/100 km	6,7 l/100 km	5,7 l/100 km
Gemischt*	16,0 kWh/100 km	5,9 l/100 km	4,7 l/100 km

\* Die einzelnen Straßenkategorien wurden nach der mittleren Fahrleistung von Pkw der Kompaktklasse in Deutschland nach TREMOD (ifeu (2016)) im Verhältnis von 30% innerorts, 40% außerorts und 30% Autobahn gewichtet.

wandel und Beschäftigung (kurz „Kohlekommission“) arbeitet die Bundesregierung an einem Plan zum Kohleausstieg. Auch der reformierte europäische Emissionshandel wird vermutlich positive Auswirkungen haben.

Die Klimabilanz verbessert sich damit für alle Nutzer fortlaufend, die Zeit spielt also für das Elektroauto, sofern die Energiewende konsequent umgesetzt wird. Ein solches Szenario zur Umsetzung der energie- und klimapolitischen Ziele des Energiekonzeptes der Bundesregierung<sup>43</sup> wird in den Langfrist- und Klimaszenarien des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie<sup>44</sup> (BMWi) beschrieben. Pehnt et al. (2018) quantifizieren für das Basisszenario einen Rückgang auf gut 380 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente bis 2030. In diesem Basisszenario werden die energie- und klimapolitischen Ziele zu möglichst geringen Systemkosten erreicht. Die Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2050 entspricht gegenüber

1990 jedoch nur 80 Prozent und liegt damit am unteren Ende des Zielkorridors von 80 bis 95 Prozent.

Der weitere Ausbau Erneuerbarer Energien wird auch die Klimabilanz der heute (2018) neu zugelassenen Elektroautos bis 2030 verbessern. Um die voraussichtliche Entwicklung des Strommixes bis dahin für jedes Jahr abzubilden, werden die spezifischen Treibhausgasfaktoren für die Strombereitstellung nach Pehnt et al. (2018) zwischen den Stützjahren 2016, 2020, 2025 und 2030 linear interpoliert. Zusätzlich erfolgt eine Berücksichtigung der mit dem Fahrzeugalter tendenziell abnehmenden Jahresfahrleistung nach ifeu (2016). Für die heute zugelassenen Fahrzeuge ergibt sich damit nach dem Basisszenario der Langfrist- und Klimaszenarien eine mittlere Klimawirkung der Strombereitstellung von nur noch etwa 421 g CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro kWh („Basisfall“).

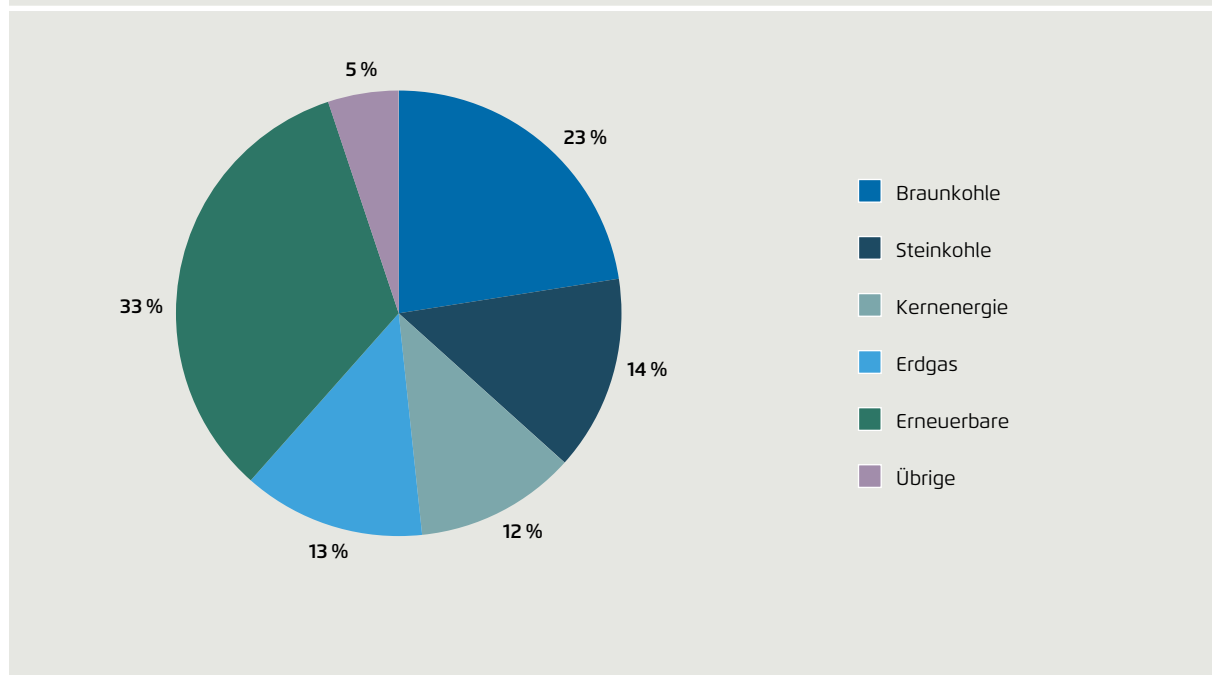
Da in den ersten Jahren des betrachteten Zeitraums von Pehnt et al. (2018) ein deutlich stärkerer Rückgang der Treibhausgasintensität der Strombereitstellung quantifiziert wurde als in den späteren Jahren, liegt

43 Bundesregierung (2010).

44 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2018).

Bruttostromerzeugung in Deutschland 2017 nach Energieträgern

Abbildung 9



Eigene Darstellung durch ifeu nach AGE (2018)

der gewichtete Mittelwert näher am Zielwert für 2030. Unsicherheiten lassen sich allerdings nicht ausräumen, da die weitere Entwicklung auch von politischen Einzelentscheidungen abhängt. Die heutige Strombereitstellung ist jedoch als ein eher pessimistischer Fall („Sensitivität Strom 2016“) zu betrachten.

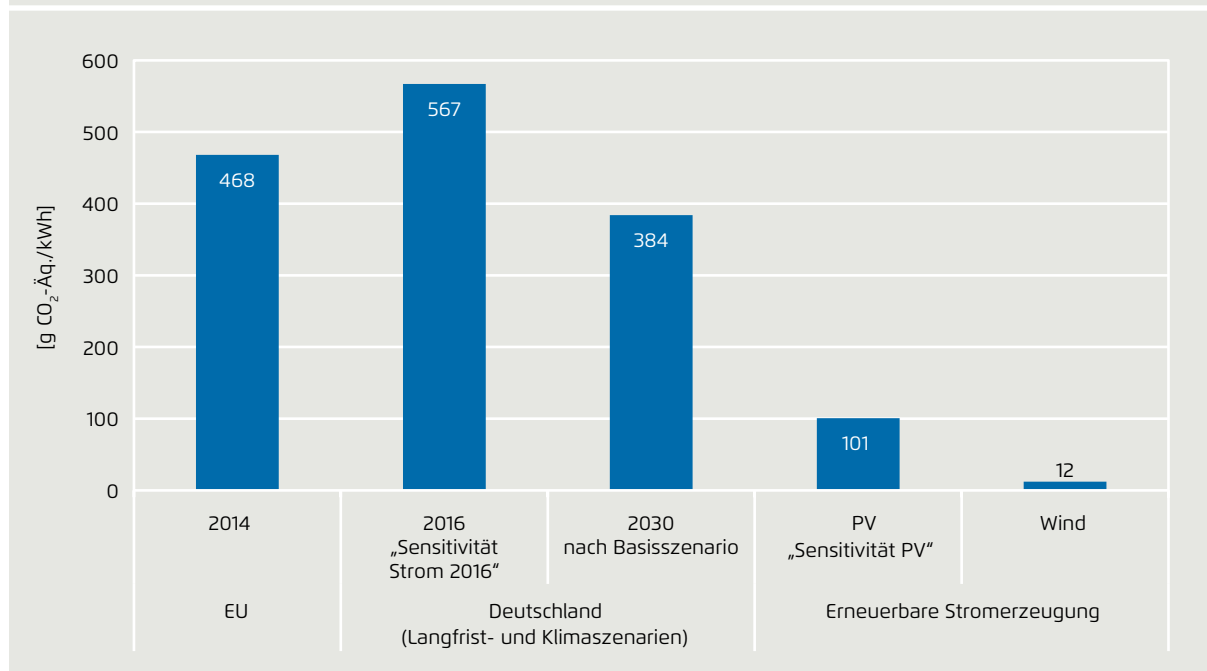
Die reine Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen ist für Elektroautos natürlich am günstigsten (siehe Photovoltaik (PV) und Windstromerzeugung in Abbildung 10), dann spielen nur noch Anlagenbau und -wartung eine klimawirksame Rolle, während die Stromerzeugung selbst emissionsfrei ist. Rechnerisch kann der Nutzer eines Elektroautos seine Klimabilanz über den Bezug von Ökostrom schon heute verbessern. Allerdings verteilen die meisten Ökostromanbieter die erneuerbare Erzeugung nur um. Der Strom stammt in der Regel aus schon lange bestehenden Anlagen, zum Beispiel alten Wasserkraftwerken, die nicht unbedingt in Deutschland stehen müssen. Die „Erneuerbare-Eigenschaft“ wird über Herkunftszertifikate speziell den Ökostrombeziehern zugerechnet, während den anderen Strombeziehern

entsprechend geringere Anteile erneuerbaren Stroms zugerechnet werden. In der Summe ändert sich dadurch jedoch nichts. Anspruchsvollere Ökostromangebote mit entsprechenden Gütesiegeln setzen sich zum Ziel, den Neubau von Erneuerbaren-Energien-Anlagen zu unterstützen. Auch hier stehen aber der bewusste Umgang mit Strom und die mit dem Bezug von Ökostrom signalisierte Unterstützung des Ausbaus Erneuerbarer Energien im Vordergrund. Deutlich klimaverträglich ist Elektromobilität vor allem dann, wenn der Fahrstrom durch Eigenerzeugung (ohne Förderung durch das EEG) von Strom aus Erneuerbaren Energien gewonnen wird, zum Beispiel durch Installation einer eigenen Photovoltaikanlage auf dem Haus- oder Garagendach.

Eine kontinuierliche Dekarbonisierung wie beim Strom ist bei konventionellen Kraftstoffen nicht erkennbar. Der Einsatz von Biokraftstoffen stagniert und ist aufgrund möglicher direkter und indirekter Landnutzungsänderungen problematisch. Die Beimischung strombasierter Kraftstoffe kann die Klimabilanz von Verbrennern zwar deutlich verbessern, sofern die E-Fuels aus erneuerbarem

Klimawirkung der Strombereitstellung für verschiedene Bezugsräume, Szenarien und Anlagen

Abbildung 10



EU, Sensitivität PV und Wind nach ecoinvent 3.4 (Wernet et al., 2016); Deutschland (Langfrist- und Klimaszenarien) nach (Pehnt et al., 2018)

Strom hergestellt werden. Der erforderliche Strombedarf liegt aufgrund der großen Wandlungsverluste jedoch um ein Vielfaches über dem erneuerbaren Strombedarf für den Betrieb von batterieelektrischen Fahrzeugen.

Die zukünftige Klimabilanz von Verbrennern könnte sich allerdings auch verschlechtern, zum Beispiel durch den vermehrten Einsatz von Kraftstoff, der aus unkonventionellen fossilen Vorkommen gewonnen wird (etwa Teersanden). Weil das nicht präzise zu prognostizieren ist, wird bis 2030 von einer gleichbleibenden Erzeugungskette für Benzin und Diesel ausgegangen. Die für diese Studie verwendeten Diesel- und Benzinorketten stammen aus Berechnungen des ifeu und wurden um Ver-

brennungsemissionen aus der DIN EN 16258:2013-03<sup>45</sup> ergänzt. Dabei werden die aktuellen Biokraftstoffanteile von 4 Prozent bzw. 5 Prozent verwendet.

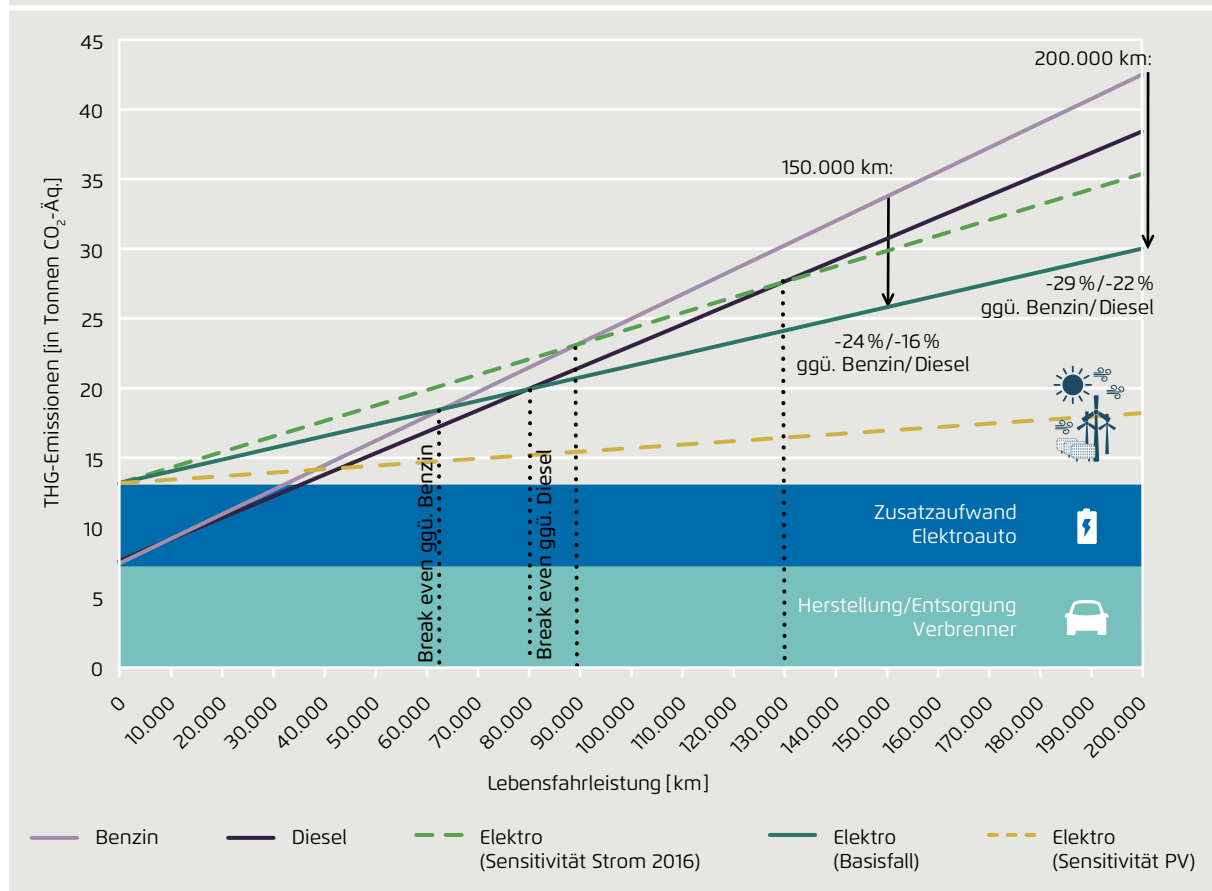
#### 4.2.3 Einfluss der Strombereitstellung auf die Klimabilanz

Abbildung 11 veranschaulicht den Einfluss des Strommixes auf die Klimabilanz von Elektrofahrzeugen. Daraus geht hervor, dass das gewählte Beispielfahrzeug im Basisfall seine Klimalast aus der Herstellung im Vergleich

45 DIN EN 16258:2013-03, Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr); Deutsche Fassung EN 16258:2012.

Treibhausgasemissionen der heutigen Beispielfahrzeuge der Kompaktklasse über den Lebensweg in Abhängigkeit von der Lebensfahrleistung

Abbildung 11



Anmerkungen: Strommix auf Basis von (Pehnt et al., 2018); Verbrauch Elektroauto 16 kWh/100 km (ohne Ladeverluste), Benziner 5,9 l/100 km und Diesel-Pkw 4,7 l/100 km  
Eigene Berechnungen ifeu



## Exkurs zur Strombilanzierung – Marginalbetrachtung

Im Strombereich existiert keine direkte physische Kopplung zwischen erzeugtem und verwendetem Strom, wie etwa bei Kraftstoffen. Die Frage nach dem Ladestrom für Elektroautos ist daher eigentlich eine Frage der Anrechnung im Sinne von Ursache und Wirkung. Ist die Änderung in einem Gesamtsystem klein, kann dies vernachlässigt werden. Eine durchschnittliche Betrachtung bildet die Situation dann ausreichend ab.

Kommt es jedoch zu größeren Änderungen im Gesamtsystem, werden Rückwirkungen auf dieses System relevant. In der Ökobilanz wird dies auch als konsequenzieller Ansatz oder Marginalbetrachtung bezeichnet. Für die zusätzliche Stromnachfrage durch Elektroautos müssen dann entweder neue Kraftwerke gebaut werden oder es gelangen Kraftwerke zum Einsatz, die sonst nicht zur Stromerzeugung herangezogen worden wären. Diese sogenannten marginalen Kraftwerke (oder Grenzkraftwerke) könnten dann beispielsweise ältere Steinkohlekraftwerke oder auch neue effiziente Gaskraftwerke sein. Zusätzlich können sich auch Rückwirkungen auf den Ausbau und die Nutzung erneuerbarer Stromerzeugung ergeben. Gegenüber dem durchschnittlichen Strommix kann sich die Klimabilanz dadurch verschlechtern (Kohlekraftwerke), aber auch verbessern (Gaskraftwerke, Erneuerbare). Hier spielt dann auch die Tageszeit der Nachfrage eine Rolle.\*

Gängige Praxis der im Rahmen der Literaturlauswertung untersuchten Studien bleiben jedoch durchschnittliche Ländermische. Dies hat mit den komplexen Wechselwirkungen zwischen Marktdurchdringung von Elektroautos, Entwicklungen in anderen Sektoren und Politikinstrumenten zu tun. Diese erschweren die exakte und belastbare Quantifizierung eines Marginalmixes auf nationaler Ebene für eine vergleichende Klimabilanz. Analog gestaltet sich die Anrechnung von individuellem Ökostrombezug in diesem Kontext als problematisch.

Zielrichtung vieler Ökobilanzen ist es eher, eine hohe Vergleichbarkeit der Ergebnisse auf Systemebene herzustellen und das technische Potenzial aufzuzeigen. Hierzu eignet sich die Quantifizierung unter Berücksichtigung der durchschnittlichen nationalen Situation, die dann auch konsistent mit einer Durchschnittsbetrachtung in anderen Phasen des Lebenswegs ist (z. B. Fahrzeugherstellung). Auch das Bundes-Immissionsschutzgesetz fordert, bei der Anrechnung von im Fahrzeug verwendeten Strom immer den aktuellen deutschen Strommix zu verwenden (§ 5 Abs. 2 S. 2, 38. BImSchV\*\*). Nichtsdestotrotz können Marginalbetrachtungen für die Bewertung spezieller Fragestellungen, Maßnahmen oder Situationen jedoch sehr wertvoll sein und auch über den Bereich der Strombereitstellung hinausgehen. Marginale Effekte können sich etwa auch im Bereich der Batterieproduktion und der dafür erforderlichen Rohstoffe ergeben. Eine Diskussion dieser Effekte übersteigt jedoch den Rahmen der vorliegenden Studie.

Das hier verwendete Basisszenario aus den Langfrist- und Klimaszenarien des BMWi geht bereits davon aus, dass die Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen in Deutschland ansteigt. Dabei werden die deutschen Ziele zum Ausbau-Anteil von Strom aus Erneuerbaren Energie bzw. die vorgeschriebenen Ausbaupfade für Windkraft und Photovoltaik weiterhin eingehalten.

\* Helms et al. (2013a).

\*\* Achtunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Festlegung weiterer Bestimmungen zur Treibhausgasreduzierung bei Kraftstoffen vom 8. Dezember 2017 (BGBl. I S. 3892).

zu einem Benzinfahrzeug nach gut 60.000 Kilometern kompensiert hat und im Vergleich zu einem Diesel nach etwa 80.000 Kilometern – sofern die Energiewende im Stromsektor wie geplant fortgeführt wird. Nach 150.000 Kilometern hat das Elektroauto einen deutlichen Klimavorteil herausgefahren (24 % ggü. dem Benzin und 16 % ggü. dem Diesel), der nach 200.000 Kilometern noch größer wird. Verändert sich der Strommix nicht („Sensitivität Strom 2016“), dann wird der Klimavorteil des E-Fahrzeugs kleiner – während er deutlich anwächst, wenn das Fahrzeug mit Solarstrom (ohne EEG-Anrechnung) betrieben wird („Sensitivität PV“). Bei dieser Modellierung wird die in Kapitel 4.1 beschriebene belastbare und konservative Abschätzung der mit der Fahrzeugherstellung verbundenen Klimawirkung angesetzt. Weiteres Optimierungspotenzial, vor allem hinsichtlich der Batterieherstellung, wird im Kapitel 4.3 dargestellt. Dadurch könnte die Bilanz des Elektroautos weiter verbessert werden.

Festzuhalten bleibt, dass selbst unter der konservativen Annahme des heutigen fossil geprägten Strommix nach einer typischen Lebensfahrleistung von 150.000 Kilometern ein Klimavorteil erreicht werden kann. Dieser ist dann jedoch noch gering und beträgt nur 3 Prozent gegenüber dem Diesel und 12 Prozent gegenüber dem Benzin. Nach 200.000 Kilometern, die immer noch im Bereich des Möglichen liegen, wächst er aber auf 8 Prozent gegenüber dem Diesel und 17 Prozent gegenüber dem Benzin.

#### 4.2.4 Einfluss der Fahrzeugeigenschaften und -nutzung auf die Klimabilanz

Wie klimaverträglich Elektrofahrzeuge unterwegs sind, hängt auch davon ab, wie sie eingesetzt werden. Im Stadtverkehr und als Zweitwagen legen sie eventuell nur kurze Entfernungen zurück, wofür eine kleine Batterie ausreicht. Es sind aber auch große Distanzen und längere Autobahnfahrten denkbar. Wenn dadurch entsprechende verbrennungsmotorische Fahrleistungen ersetzt werden, ist eine bessere Abschreibung der Klimawirkung des zusätzlichen Herstellungsaufwands für die Batterie möglich. Für die Klimabilanz sind hier drei Aspekte von Bedeutung:

**1. Batteriekapazität:** Diese kann abhängig vom Einsatzzweck vom Basisfall mit 35 kWh abweichen. Für den Fernverkehr gibt es auch heute schon Fahrzeuge mit einer deutlich größeren Batterie. Die größere Batteriekapazität wirkt sich negativ auf die Klima-

bilanz aus, wenn die gleiche Nutzung hinsichtlich Lebensfahrleistung und Fahrmuster unterstellt wird wie im Basisfall. Im Stadtbereich könnte dagegen auch ein Fahrzeug mit einer geringeren Reichweite zum Einsatz kommen. Hier gibt es heute auch Fahrzeuge mit kleineren Batterien. Damit ist bei gleicher Nutzung eine Verbesserung der Klimabilanz verbunden. Zusätzlich hat die Batteriekapazität bei gleicher Energiedichte auch Einfluss auf das Fahrzeuggewicht und damit den Energieverbrauch des Fahrzeugs.

- 2. Lebensfahrleistung:** Der Einfluss auf die Gesamtbilanz wurde bereits dargestellt. Neben der in Kapitel 4.2.3 für den Basisfall näher quantifizierten Lebensfahrleistung von 150.000 km und 200.000 km sind für Zweit- oder reine Stadtfahrzeuge jedoch auch geringere Lebensfahrleistungen von 100.000 km oder noch niedriger denkbar.
- 3. Fahrmuster:** Elektroautos haben einen besonderen Effizienzvorteil im Stadtbereich. Hier ist der Verbrauch von Verbrennern durch den Teillastbetrieb üblicherweise besonders hoch, während der Elektromotor über weite Teile des Lastspektrums hohe Wirkungsgrade aufweist. Beim Elektroauto wirkt sich der zusätzliche Energieverbrauch durch den hohen Luftwiderstand auf Autobahnen daher nahezu unmittelbar auf den Verbrauch aus. Beim Verbrenner wird der mit dem höheren Luftwiderstand auf Autobahnen verbundene Energieverbrauch dagegen teilweise durch einen besseren Motorwirkungsgrad im Volllastbereich kompensiert.

Der Einfluss der Fahrzeugnutzung mit angepassten Fahrzeugeigenschaften soll hier im Rahmen von zwei Sensitivitäten illustriert werden. Grundlage dafür ist das gleiche Basisfahrzeug. Es wird der Einfluss der Parameter Lebensfahrleistung, Batteriekapazität und Fahrmuster dargestellt.

- **Sensitivität Stadt:** Als Vergleichsfahrzeug wird hier aufgrund der geringen Jahresfahrleistung ein Benzin im ausschließlichen Stadteinsatz angenommen. Wegen der geringen Entfernungen wird die Batteriekapazität beim Elektroauto mit nur 25 kWh angenommen. Zusätzlich liegt der Verbrauch des Elektroautos aufgrund der kleineren Batterie und des somit niedrigeren Fahrzeuggewichts mit gut 12 kWh/100 km etwas niedriger.<sup>46</sup> Der Verbrauch des Benziners liegt im Stadtbereich dagegen etwas höher als bei gemisch-

ter Fahrweise. Der Verbrauchsvorteil des effizienten Elektromotors kommt also besonders gut zum Tragen.

- **Sensitivität Autobahn:** Als Vergleichsfahrzeug wird hier aufgrund der höheren Jahresfahrleistung ein Diesel im ausschließlichen Autobahneinsatz angenommen. Aufgrund der großen Entfernungen wird die Batteriekapazität beim Elektroauto mit 60 kWh modelliert. Der Verbrauch des Elektroautos wird aufgrund der Fahrweise und des deutlich höheren Gewichts jedoch mit mehr als 23 kWh pro 100 km deutlich höher erwartet.<sup>46</sup> Auch beim Diesel liegt der Verbrauch auf der Autobahn höher als bei gemischter Fahrweise.

Bereits bei den Herstellungsemissionen zeigen sich deutliche Unterschiede. Für das Stadtfahrzeug mit einer Batteriekapazität von nur 25 kWh liegen die herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen des Beispielfahrzeugs etwa 1,6 t Treibhausgasemissionen niedriger als für die als Durchschnitt angenommene Batteriekapazität von 35 kWh (siehe Abbildung 12). Die reale Reichweite läge dann bei gemischter Nutzung eher bei 150 km (etwa 200 km im NEFZ), im Stadtbereich jedoch auch im Realbetrieb bei 200 km. Für das Autobahnfahrzeug mit 60 kWh Batteriekapazität schlagen dagegen zusätzlich 3,7 t Treibhausgasemissionen für die Herstellung der Batterie zu Buche, die über eine effizientere Nutzungsphase ausgeglichen werden müssen (siehe Abbildung 12). Die reale Reichweite steigt damit bei gemischter Nutzung auf 350 km (im NEFZ auf fast 500 km), würde im reinen Autobahnbetrieb jedoch auf der Straße für höchstens 250 km reichen.

Im Gesamtergebnis zeigt sich bei nach Basisszenario fortschreitender Energiewende (siehe Kapitel 4.2.2) für ein städtisch genutztes Elektroauto mit kleiner Batterie gegenüber einem Benziner bereits ab knapp 40.000 km ein Klimavorteil (siehe „Sensitivität Stadt“ in Abbildung 12 oben). Selbst bei einer gegenüber dem Basisfall deutlich niedrigeren Lebenslaufleistung von 100.000 km entsteht ein Klimavorteil von insgesamt 29 Prozent. Im Autobahnbetrieb benötigt ein Elektroauto mit großer Batterie im Beispiel auch mit der Energiewende dagegen etwa 150.000 km Fahrleistung, um gegenüber einem Diesel-Pkw im Autobahnbetrieb einen Klimavorteil zu erzielen (siehe „Sensitivität Autobahn“ in Abbildung 12).

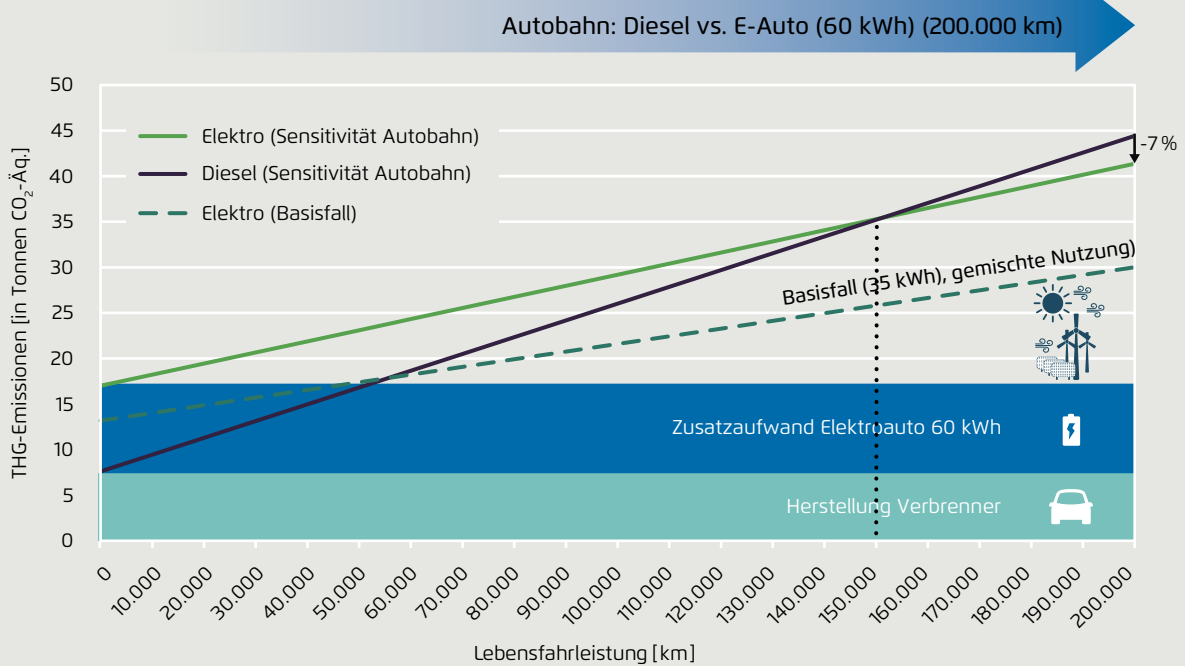
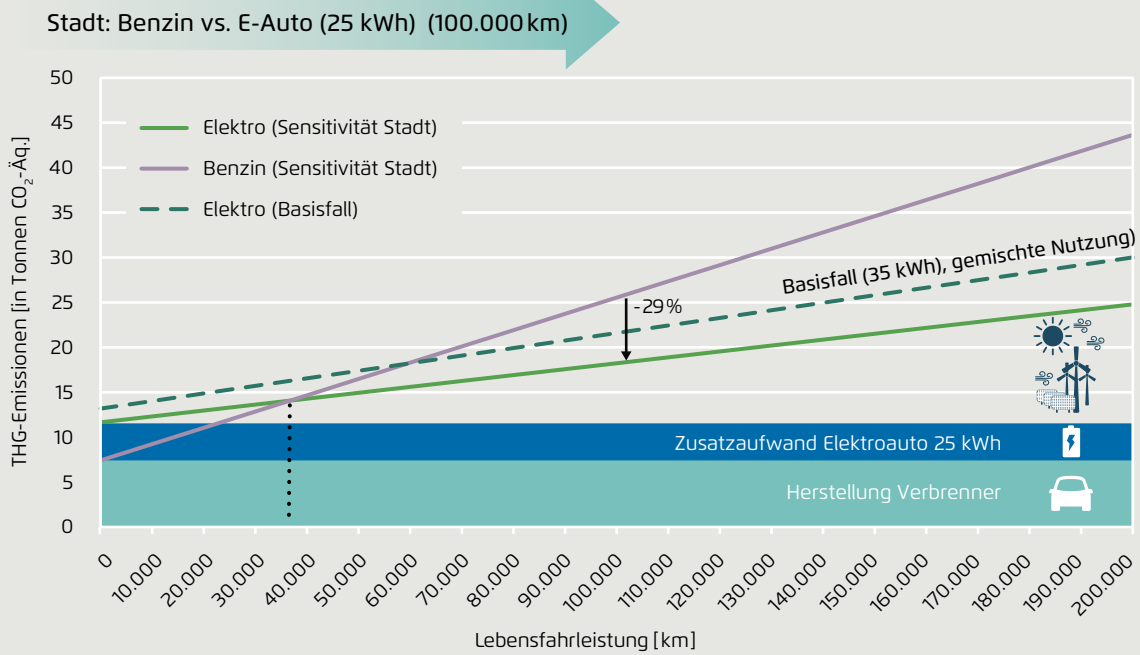
Im Fernverkehr sind dagegen jedoch auch deutlich höhere Lebensfahrleistungen wahrscheinlich. Durch die Substitution von hier realistischen 200.000 km Diesel-Fahrleistung liegt der Klimavorteil des Elektrofahrzeugs bei immerhin noch 7 Prozent, ist aber niedriger als bei dem betrachteten Stadtfahrzeug.

Wie sich die Batteriekapazität eines Elektrofahrzeugs auf dessen Klimabilanz auswirkt, lässt sich nur beurteilen, wenn die Fahrzeugnutzung mit in Rechnung gestellt wird. Ermöglicht eine große Batteriekapazität die Substitution einer hohen Lebensfahrleistung, die mit einer geringeren Reichweite nicht möglich gewesen wäre, dann kann die Klimalast der großen Batterie durchaus kompensiert werden. Eine positive Bilanz kann aber auch dann entstehen, wenn E-Fahrzeuge mit kleiner Batterie Verbrenner mit niedrigerer Lebensfahrleistungen ersetzen. Unabhängig davon ist jedoch anzustreben, im Rahmen der Mobilitätswende die Gesamtzahl der Fahrzeuge zu verringern. Werden die verbleibenden Fahrzeuge dann intensiver genutzt, kommt die Mobilitätswende tendenziell auch der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen zugute.

46 Vgl. Helms; Kräck (2016).

Treibhausgasemissionen von heutigen reinen Stadt- (oben) und Autobahnfahrzeugen (unten) der Kompaktklasse unter Berücksichtigung der Energiewende in Abhängigkeit von der Lebensfahrleistung

Abbildung 12



Anmerkungen: Strombereitstellung Basisszenario nach (Pehnt et al., 2018); Verbrauch Elektro 12 kWh / 100 km (25 kWh Batterie, Stadt) und 24 kWh (60 kWh Batterie, Autobahn), Benzin 6,1 l / 100 km (Stadt) und Diesel 5,7 l / 100 km (Autobahn)  
Eigene Berechnungen ifeu

## Exkurs Agora Verkehrswende zum Einfluss der Mobilitätswende auf die Fahrzeugnutzung

Damit die Verkehrswende gelingen kann, bedarf es nach Agora Verkehrswende mehr als nur eines Wechsels der Antriebstechnologie. Insbesondere aufgrund der technischen Potenzialgrenzen erneuerbarer Energiequellen, aber auch weil deren gesellschaftliche Akzeptanz auf Grenzen stößt, gilt es den Energieverbrauch im Verkehrssektor zu senken, um den verbleibenden Energiebedarf mit klimaneutraler Energie decken zu können. Damit ruht die Verkehrswende auf zwei Säulen: auf der Mobilitätswende – und auf der Energiewende im Verkehr.

Die Mobilitätswende sorgt dafür, dass der Endenergieverbrauch des Verkehrssektors sinkt, ohne die Mobilität einzuschränken. Gestützt auf technologische Entwicklungen, erweitert sich mit ihr das Verkehrsangebot und multimodales Verkehrsverhalten wird erleichtert. Flankiert durch politische Rahmensetzung und befördert durch generelle gesellschaftliche Trends, wird es auf diese Weise möglich, bislang nicht gehobene Potenziale der Vermeidung, der Verlagerung und der Verbesserung des Verkehrs zu erschließen.\*

Neben dem bestehenden städtischen Verkehrsangebot, dessen Rückgrat nach wie vor der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) bildet, etablieren sich im Zuge der Mobilitätswende neue Formen individueller Mobilität. Hierzu zählen insbesondere kollaborative Mobilitätsangebote, wie zum Beispiel Carsharing, Ridesharing und Ridepooling. Der dadurch zunehmend „öffentliche“ Individualverkehr wird im Einklang mit dem Umweltverbund eine attraktive Alternative zum privaten Pkw darstellen. Auf diese Weise können insgesamt weniger Fahrzeuge effizienter genutzt und daher deutlich höhere Fahrleistungen innerhalb kürzerer Zeiträume erreicht werden.

Bereits heute zeigt sich, dass gemeinschaftlich genutzte Fahrzeuge im Vergleich zu einem durchschnittlichen Privatfahrzeug wesentlich intensiver genutzt werden. Die Jahresfahrleistung eines Carsharing-Fahrzeugs in Berlin beträgt durchschnittlich rund 18.500 km. In München sind es sogar 26.500 km, die ein Carsharing-Fahrzeug durchschnittlich pro Jahr zurücklegt.\*\* Bei einer Batterieauslegung wie in „Sensitivität Stadt“ angenommen, würde ein elektrisches Carsharing-Fahrzeug ab etwa zwei Jahren im Einsatz einen Netto-Klimavorteil haben. Der Ridesharing- und Ridepooling-Markt steckt hingegen noch in den Kinderschuhen. Vergleichbare Daten wurden in Deutschland bislang noch nicht erfasst. Allerdings ist von deutlich höheren Jahresfahrleistungen auszugehen, sobald sich diese Mobilitätsangebote etabliert haben.\*\*\* Deswegen dürfte hier der *break even point* noch deutlich früher eintreten. Grundsätzlich brauchen neue Mobilitätsanwendungen aufgrund ihres Nutzungsprofils nur eine vergleichsweise kleine Batterie.

\* Agora Verkehrswende (2017).

\*\* Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2016).

\*\*\* Es ist anzunehmen, dass sich die Jahresfahrleistung eines Ridesharing- bzw. Ridepooling-Fahrzeugs dem Niveau eines als Taxi genutzten Fahrzeugs annähert. In den Großstädten sind hier Jahresfahrleistungen von etwa durchschnittlich 57.632 km (2014, Berlin), 62.368 km (2014, München) und 67.671 km (2014, Hamburg) pro Taxi möglich. Vgl. Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (2014), S. 10; Linne+Krause (2016).

### 4.3 Parameter der Fahrzeugherstellung

#### 4.3.1 Die Fahrzeugherstellung im Überblick

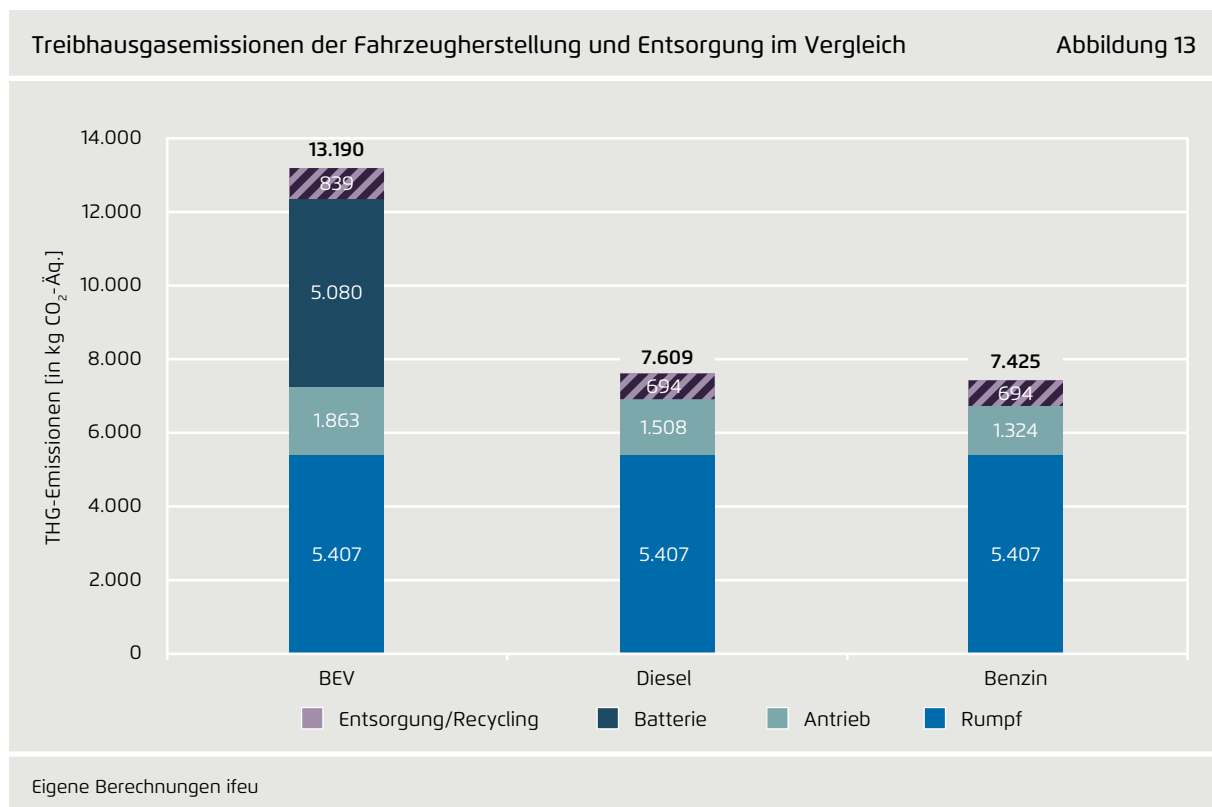
Die Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung eines Pkw hängen von verschiedenen Faktoren ab: von der Fahrzeuggröße, von der Materialzusammensetzung und – wegen des von Land zu Land unterschiedlichen Strommixes – vom Herstellungsort. Aus Gründen der Vergleichbarkeit werden Kompaktklassfahrzeuge mit ähnlichen Eigenschaften, aber unterschiedlichen Antrieben untersucht. Alle Fahrzeuge bauen dabei auf demselben Fahrzeugrumpf auf, der zugleich auch den größten Anteil an den gesamten Treibhausgasemissionen der Herstellung hat. Unterschiede bestehen jedoch bei den Antrieben der zu vergleichenden Fahrzeuge.

Bei konventionellen Fahrzeugen werden für den Antrieb Verbrennungsmotor, Getriebe, Zusatzbauteile (z. B. Tank), Abgasanlage und die Starterbatterie berücksichtigt. Das Elektroauto hingegen hat ein kleineres Getriebe, einen Elektromotor anstelle des Verbrenners und verschiedene Zusatzbauteile für den elektrischen

Antriebsstrang (z. B. Hochvoltkabel, Ladeelektronik, Inverter/Konverter).

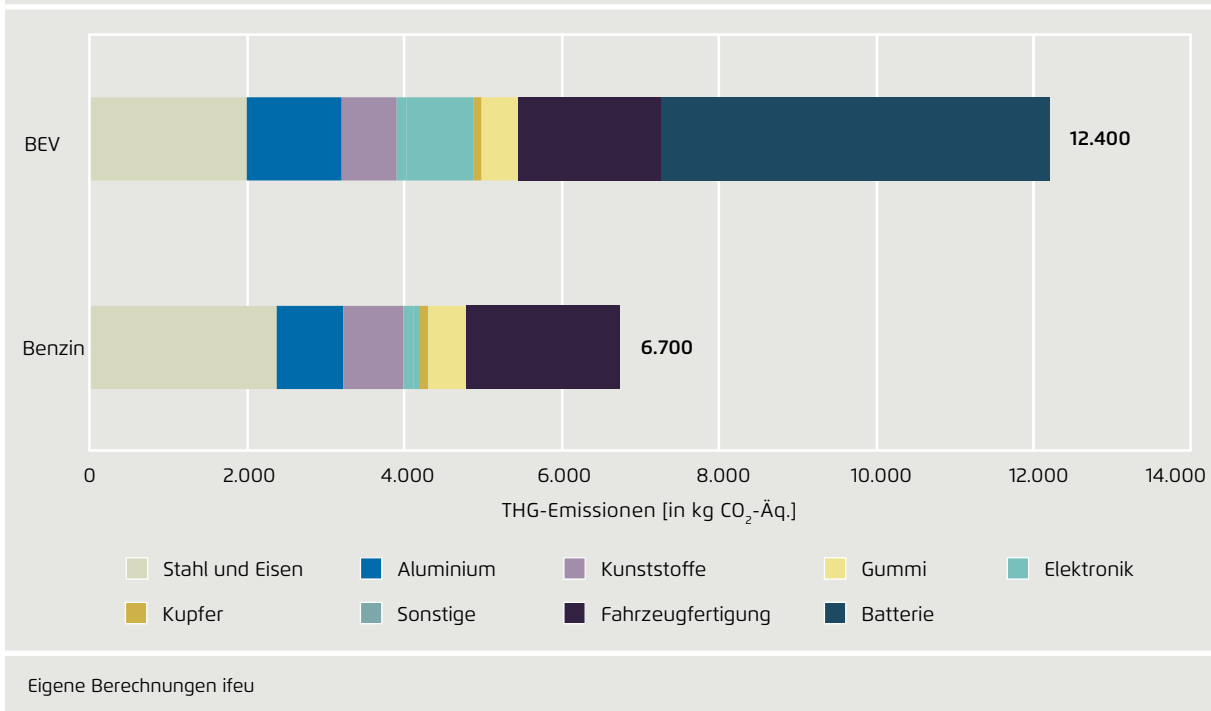
Deutlich höhere Treibhausgasemissionen entstehen für das Elektroauto durch die Lithium-Ionen-Batterie. Diese verursacht nach Modellierung in dieser Studie (siehe Kapitel 8.2 im Anhang) in der Herstellung heute etwa 145 kg Treibhausgasemissionen pro kWh Batteriekapazität, was in der Mitte der im Rahmen der Meta-studie untersuchten Bilanzen liegt (siehe Kapitel 3.4). Der zusätzliche Klimarucksack des Elektroautos hängt mithin stark von der Batteriekapazität ab. Das Beispielfahrzeug der Kompaktklasse wird mit einer Batteriekapazität von 35 kWh angenommen. Dafür entstehen in der Herstellung gut 5 Tonnen zusätzliche Treibhausgasemissionen. Die Herstellung des Beispielfahrzeugs führt damit insgesamt zu Treibhausgasemissionen in Höhe von 12,4 t, während die Verbrennungsfahrzeuge mit nur etwa 6,7–6,9 t Treibhausgasemissionen zu Buche schlagen (siehe Abbildung 13).

Beim Verbrennungs-Pkw gehen die materialbedingten Treibhausgasemissionen etwa zur Hälfte auf den Einsatz



Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung ohne Entsorgung von BEV und Benzin im Vergleich

Abbildung 14



von Stahl und Eisen zurück, die auch mengenmäßig am meisten eingesetzt werden. Beim Elektroauto ist der Stahleinsatz dagegen geringer. Zusätzlich ist Aluminium, trotz geringerer Einsatzmengen, aufgrund der hohen spezifischen Klimalasten relevant (siehe Abbildung 14). Hier ist der Anteil im Elektroauto höher als im Verbrenner. Weitere Umweltwirkungen entfallen auf die verschiedensten Kunststoffe, während Materialien wie Gummi, Glas oder Kupfer in der Gesamtbilanz nur wenig ins Gewicht fallen. Obwohl die Katalysatormaterialien Platin und Palladium im Benzin-Pkw nur in winzigen Mengen bei der Abgasnachbehandlung eingesetzt werden, zeigen diese sich dennoch bei den Treibhausgasemissionen, da sie sehr hohe spezifische Lasten mitbringen. Beim Elektroauto fallen zusätzlich noch verschiedenste Elektronikbauteile ins Gewicht, die beim Verbrenner nur einen geringen Teil der Umweltlasten ausmachen.

Insgesamt trägt beim Benzin-Pkw die Materialbereitstellung (inklusive der hierin enthaltenen Schnittverluste) etwa 70 Prozent zu den gesamten Treibhausgasemissionen bei. Der Rest wird vom in Deutschland angenommenen Herstellungsprozess verursacht,

insbesondere dem zur Fahrzeugfertigung notwendigen Energieeinsatz. Die Unterschiede der Herstellungsemissionen zwischen Benzin- und Diesel-Pkw sind gering, sodass der Diesel hier nicht zusätzlich dargestellt wird. Das Gesamtgewicht des betrachteten Elektroautos ist mit knapp 1.500 kg vor allem wegen des hohen Batteriegewichts deutlich höher als beim Verbrenner (1.300 kg).

#### 4.3.2 Klimawirksame Parameter der Batterieherstellung

Für das Beispielfahrzeug wurde eine Batterie mit Nickel-Mangan-Kobalt-Zellen (im Verhältnis: NMC 1:1:1<sup>47</sup>) und einer Kapazität von 35 kWh betrachtet. Neben Nickel-Kobalt-Aluminium-Zellen (NCA) stellen diese im

47 Innerhalb der Summenformel  $\text{Li}(\text{NixCoyMnz})\text{O}_2$  für NMC gelten verschiedene Zusammensetzungen von Nickel, Mangan und Kobalt als besonders vielversprechend für den Einsatz in Lithium-Ionen-Batterien. Derzeit werden noch häufig NMC 1:1:1 (mit jeweils gleichen Anteilen Nickel, Mangan und Kobalt) eingesetzt. Die Entwicklung geht aber in Richtung Hochenergie-NMC-Zellen mit einem Mengenverhältnis, das Kobalt deutlich reduziert: NMC 6:2:2 bis hin zu NMC 8:1:1. Vgl. Thielmann et al. (2015), S. 44.



Automobilbereich die heute vorherrschende Zellchemie dar (siehe Kapitel 3.4). Die Kapazität repräsentiert den Stand bei heutigen Elektroautos (siehe Abbildung 21 in Kapitel 5.2). Die Energiedichte auf Systemebene wurde mit 115 Wh/kg am oberen Ende der im Rahmen der Meta-studie identifizierten Werte angesetzt, da viele dieser Daten nicht mehr den aktuellen Fahrzeugmarkt abbilden.

Die Treibhausgasbilanz der Batterieherstellung geht unter diesen Randbedingungen zu mehr als 75 Prozent auf die Zellherstellung zurück. Der größte Beitrag von über 50 Prozent kommt durch den Strombedarf der Zellfertigung zustande. Relevante Beiträge entstehen weiterhin durch die Kathoden- und Anodenmaterialien sowie das Gehäuse und das Batteriemanagementsystem (BMS) (siehe Abbildung 15).

Mengenmäßig dominieren bei den **Batteriematerialien** die Metalle Aluminium (verwendet für das Kühlsystem, Gehäuse und Kathodenstromabnehmer), Kupfer (verwendet im Anodenstromabnehmer) und Stahl (verwendet im Gehäuse). Diese variieren nur wenig zwischen den Batterietypen. Interessanter sind die Beiträge der Aktivmaterialien der Kathode,  $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$  und der Anode (Graphit) zur Klimabilanz. Das Aktivmaterial bei einer NMC 1:1:1 Zellchemie besteht nach Bilanz für diese Studie etwa zu 7 Prozent aus Lithium und zu etwa gleichen Teilen (je 20 %) aus Kobalt, Nickel und Mangan. Für die Herstellung des Aktivmaterials werden Lithiumhydroxid, Kobalt-, Nickel- und Mangansulfat eingesetzt. Eine Auswertung der Materialien hinsichtlich ihres Beitrags zu den Treibhausgasemissionen (siehe Abbildung 16) zeigt, dass diese stark von Aluminium, Kobalt- und Nickelsulfat, Lithiumverbindungen (Lithiumhydroxid und Lithiumhexafluorophosphat für den Elektrolyten) geprägt wird.

Für die Kobaltsulfatherstellung wurde in ecoinvent 3.4 nur eine grobe Abschätzung der Treibhausgasemissionen vorgenommen. Zusätzlich wird daher eine Sensitivitätsbetrachtung auf Basis einer aktuellen Studie des Cobalt Institutes durchgeführt, die Treibhausgasemissionen in Höhe von 38 kg  $\text{CO}_2$ -Äquivalenten pro kg Kobalt angibt.<sup>48</sup> Anhand der Stöchiometrie kann ein Wert für Kobaltsulfat abgeleitet werden, der etwa doppelt so hoch wie im aktuell verwendeten Datensatz liegt. Damit verdoppeln sich die Treibhausgasemissionen für ein Kilogramm

Kobaltsulfat nahezu von 7,6 kg auf etwa 14 kg  $\text{CO}_2$ -Äquivalente. Die Klimawirkung der gesamten Batterieherstellung würde sich damit von 145 kg auf 152 kg  $\text{CO}_2$ -Äquivalente pro kWh Batterie erhöhen.

Über die Herstellung hinaus sind auch die **Prozesse am Lebensende** der Batterie relevant (sogenannte *End-of-Life*-Prozesse), also die Entsorgung und das Recycling der Batteriematerialien. Wird eine pyrometallurgische Entsorgung im Schachtofen durchgeführt, verbrennen die kohlenstoffhaltigen Bestandteile der Zelle (z. B. das Graphit aus der Anode) und setzen Kohlendioxid frei. Aus der bei diesem Prozess entstehenden Legierung kann jedoch ein Teil der eingesetzten Metalle (insbesondere Kobalt und Nickel) zurückgewonnen werden. Durch die Einsparung von Primärrohstoffen kann es *per saldo* zu geringeren Treibhausgasemissionen kommen.

Eine detaillierte Analyse der Prozesse nach dem Schachtofen übersteigt den Rahmen dieser Studie. Diese Prozesse liegen damit außerhalb des betrachteten Systems, sodass das Lebensende der Batterie eher konservativ abgebildet ist: Die Aufwendungen zur Metallrückgewinnung tragen zwar einerseits nicht negativ zur Klimabilanz bei, es werden jedoch auch keine Vorteile (Gutschriften) durch Sekundärmaterialien berücksichtigt. Damit liegen die Treibhausgasemissionen der Batterieentsorgung aktuell bei etwa 7,6 kg  $\text{CO}_2$ -Äquivalenten pro kWh Batterie und führen damit zu einem Aufschlag von gut 5 Prozent auf die bilanzierten Herstellungsemissionen in Höhe von 145 kg  $\text{CO}_2$ -Äquivalenten pro kWh Batterie.

#### 4.3.3 Einfluss der Batterieherstellung auf die Klimabilanz

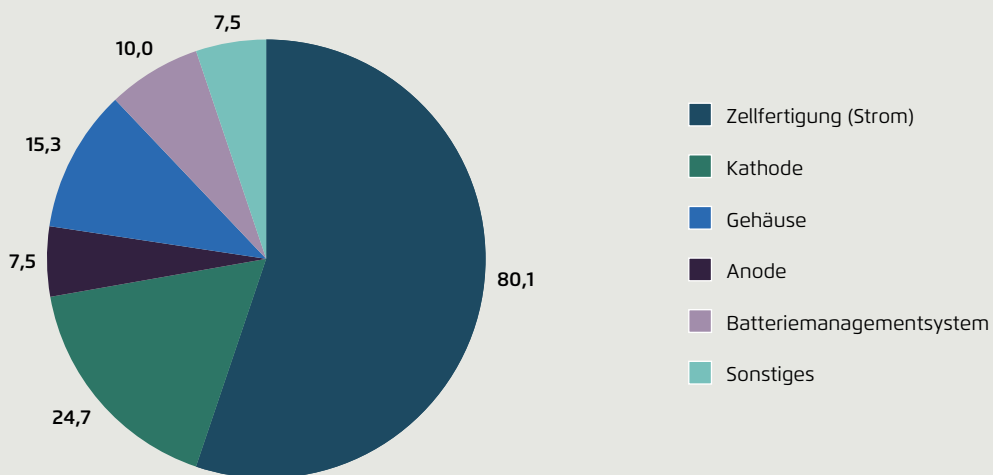
Der mit dem **Fertigungsprozess** verbundene Energieaufwand variiert heute noch stark je nach Hersteller und Anlage. Für das Fallbeispiel in der Sensitivitätsanalyse in Kapitel 4.2 wurde zunächst nach RECHARGE (2018) von einem konservativem Strombedarf von 11 kWh<sub>el</sub> pro kg Batterie ausgegangen. Dies entspricht bei einer Energiedichte von 115 Wh pro kg etwa 100 kWh<sub>el</sub> pro kWh Batterie. Der Vergleich mit anderen Quellen zeigt, dass auch eine effizientere Fertigung möglich sein könnte (siehe Kapitel 3.4). Bereits heute ist nach Angaben von VW bei hoher Produktionsauslastung und in einem eingeschwungenen Serienprozess ein Stromverbrauch von 50 kWh<sub>el</sub> pro kWh Batterie (bei einer Energiedichte von

48 CDI; ERM (2016).



Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung und ihre Zusammensetzung (in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro kWh Batterie)

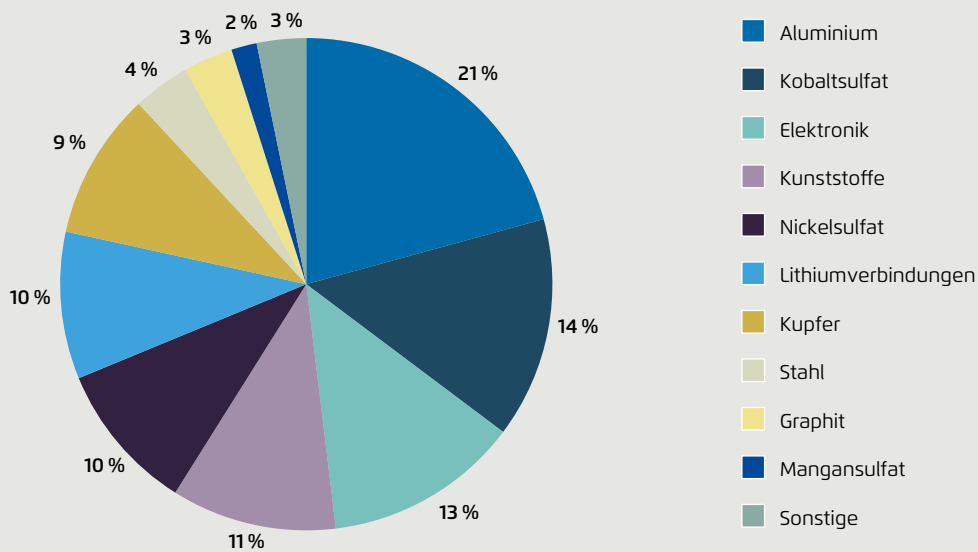
Abbildung 15



Eigene Berechnungen ifeu

Beiträge der unterschiedlichen Materialien zu den Treibhausgasemissionen der Batterie

Abbildung 16



Eigene Berechnungen ifeu

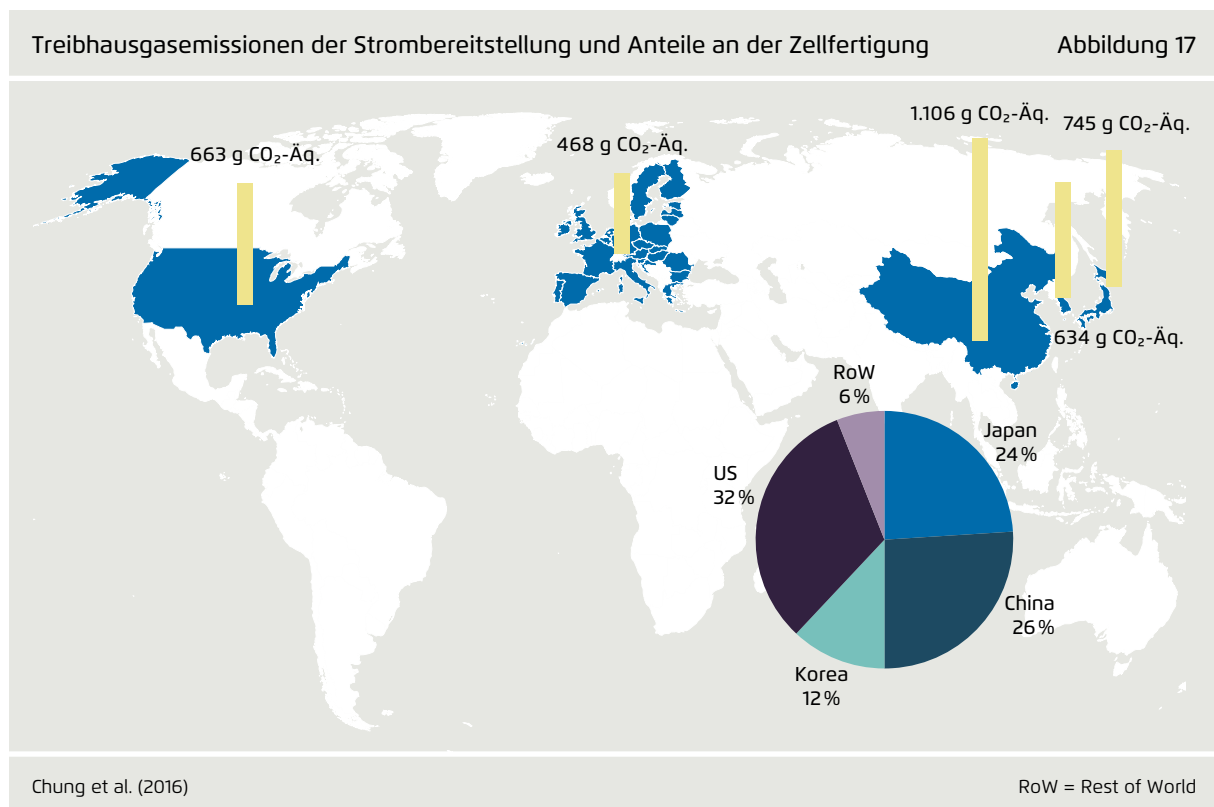
115 Wh/kg) erreichbar<sup>49</sup>. Dies würde eine Halbierung des für heute als typisch angenommenen Wertes bedeuten. Für diese besonders günstigen Produktionsbedingungen liegen die Treibhausgasemissionen pro kWh Batteriekapazität dann nur noch bei 105 kg CO<sub>2eq</sub>.

Neben der Höhe des Strombedarfes ist auch der **Ort der Zellfertigung** entscheidend, da die Treibhausgasemissionen der Strombereitstellung weltweit sehr unterschiedlich sind. Heute erfolgt ein großer Teil der Zellfertigung in Ostasien (China, Japan und Korea) sowie in den USA. Für die Fertigung der Batterie im Beispielfahrzeug wurde eine Strombereitstellung im Durchschnitt der heutigen Produktionsländer entsprechend ihrem Anteil an der Fertigung (siehe Abbildung 18) angesetzt, die Treibhausgasemissionen in Höhe von 805 g CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro kWh entspricht.

Bei einer Zellfertigung allein in China erhöht sich die energieabhängige Klimawirkung der Batterieherstellung demgegenüber jedoch deutlich, da hier pro Kilo-

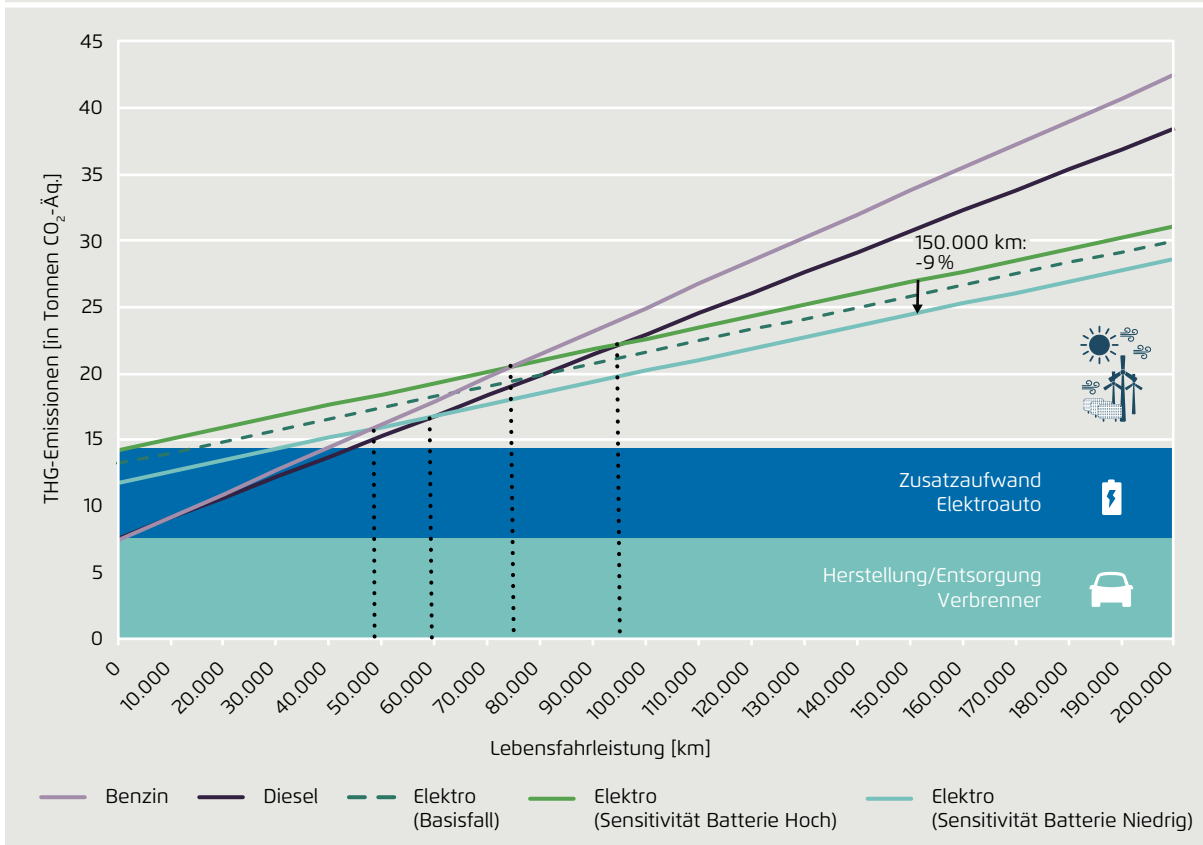
wattstunde Strom Treibhausgase in Höhe von etwa 1.100 g CO<sub>2</sub>-Äquivalenten emittiert werden (ecoinvent 3.4). Pro Kilowattstunde Batteriekapazität entstehen dann 175 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente anstelle von 145 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Umgekehrt ist zukünftig durch Batteriefertigung mit einem dekarbonisierten Strommix (z. B. in der EU) auch eine deutliche Verbesserung der Klimabilanz möglich (siehe Zukunftsbetrachtung in Kapitel 5). Die Fertigungsbedingungen haben dann auch Auswirkungen auf die gesamte Klimabilanz des Elektroautos. Werden die Zellen in China gefertigt (siehe „Sensitivität Batterie Hoch“ in Abbildung 18), verschiebt sich die Fahrleistungsschwelle für einen Klimavorteil (*Break-even*) zwischen Verbrennern und Elektroauto bei Energiewende nach Basisszenario der Langfristszenarien (siehe Kapitel 4.2.2) auf 75.000 km beim Benziner und gut 95.000 km beim Diesel. Findet die Zellherstellung wie bisher in Ostasien und den USA jedoch bei hoher Auslastung und in optimierter Serienfertigung statt, kann das Elektroauto gegenüber dem Benziner bereits ab knapp 50.000 km vorteilhaft sein und ab 60.000 km gegenüber dem Diesel (siehe „Sensitivität Batterie Niedrig“ in Abbildung 18). In der Gesamtbilanz liegt der Unterschied zwi-

49 VW (2018).



Treibhausgasemissionen von heutigen Elektroautos der Kompaktklasse unter Berücksichtigung der Energiewende und unter unterschiedlichen Fertigungsbedingungen in Abhängigkeit von der Lebensfahrleistung

Abbildung 18



Anmerkungen: „Sensitivität Batterie Hoch“ als Fertigung mit 100 kWh<sub>el</sub> pro kWh Batterie in China; „Sensitivität Batterie Niedrig“ als Fertigung mit 50 kWh<sub>el</sub> pro kWh Batterie im Mix der heutigen Fertigungsländer. Eigene Darstellung durch ifeu

schen den beiden Sensitivitäten aufgrund des begrenzten Beitrags der Batterie bei unter 10 Prozent.

Die materialseitigen Unterschiede zwischen NMC- und NCA-Zellen sind hinsichtlich ihrer Klimawirksamkeit eher gering. Interessanter ist eine mögliche Verschiebung in der Zellchemie von NMC 1:1:1 zu NMC 6:2:2; dadurch kann die Energiedichte deutlich verbessert werden. Der materialseitige Einfluss auf die Treibhausgasemissionen ist dabei allerdings begrenzt, da es lediglich Verschiebungen im Aktivmaterial von Kobalt zu Nickel gibt. Wichtiger erscheint daher die mit der Zellchemie 6:2:2 verbundene Erhöhung der Energiedichte um etwa 25 Prozent<sup>50</sup>

und damit die Verringerung des Materialeinsatzes und der daraus resultierenden Klimawirkung insgesamt. Die Auswirkungen auf die Klimabilanz werden im Szenario der Klimabilanz für 2030 (Kapitel 5.3) dargestellt.

50 VW (2018).

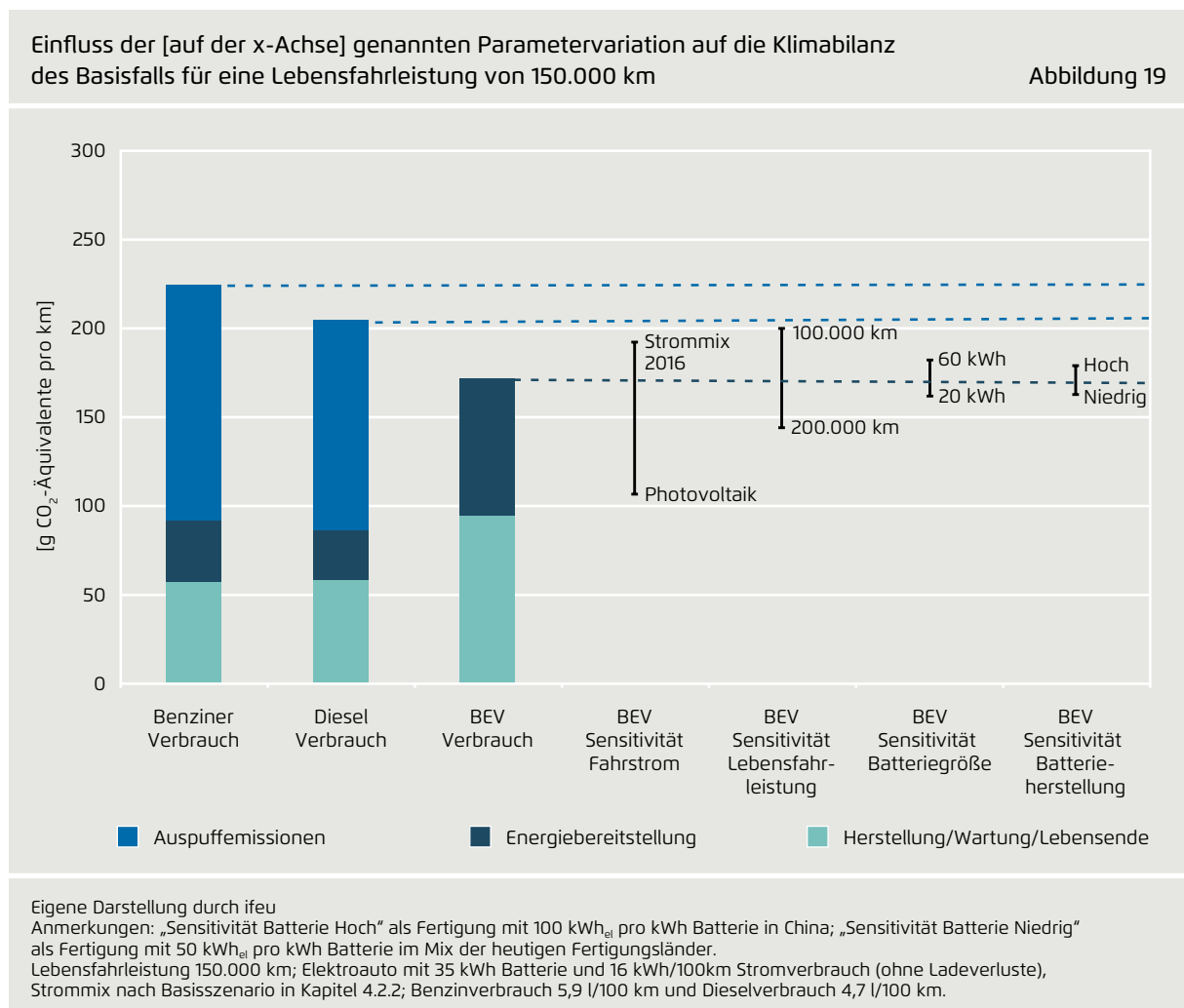
#### 4.4 Vergleich der Sensitivitäten

Abbildung 19 zeigt die hier diskutierten Sensitivitäten noch einmal für eine Lebensfahrleistung von 150.000 km auf den gefahrenen Kilometer bezogen. Für die Fallbeispiele der Verbrennungsfahrzeuge entstehen dann gut 200 g Treibhausgasemissionen, für das Elektroauto dagegen nur gut 170 g, wenn die Energiewende bis 2030 nach dem Basisszenario der Langfrist- und Klimaszenarien (siehe Kapitel 4.2.2) verläuft. Beim Elektroauto geht dann unter heute typischen Herstellungsbedingungen für das Fahrzeug und die Batterie etwa die Hälfte der Klimawirkung auf die Fahrzeugherstellung zurück. Zusätzlich bleibt die Strombereitstellung wichtig. Wartung und Entsorgung des Fahrzeugs haben dagegen eher geringe Beiträge zur gesamten Klimabilanz.

Bei den Verbrennungsfahrzeugen ist die Klimabilanz vor allem durch die Auspuffemissionen bestimmt. Fahrzeugherstellung und Kraftstoffbereitstellung sind jedoch auch hier nicht zu vernachlässigen.

Es zeigt sich, dass in der Gesamtbilanz des Elektroautos heute vor allem die nutzungsabhängigen Parameter wie Strommix und Lebensfahrleistung in der hier identifizierten Bandbreite großen Einfluss auf die Treibhausgasbilanz pro gefahrenen Kilometer haben.

Die Batterieherstellung hat zwar nur einen begrenzten Anteil an der Gesamtbilanz, dennoch ist der Einfluss der Sensitivitäten nicht zu vernachlässigen. Abbildung 19 zeigt, dass Unterschiede in der Batteriekapazität oder -fertigung einen relevanten Einfluss auf die



Gesamtbilanz haben. Da nur bei der Herstellung Klimanachteile für das Elektroauto entstehen, ist eine Verbesserung der Batteriebilanz besonders wichtig. Die Verbesserungspotenziale sowohl bei der Batteriebilanz als auch insgesamt werden in Kapitel 5 näher betrachtet.



# 05 | Verbesserungspotenzial der Klimabilanz bis 2030

Die zentralen Parameter der Klimabilanz von Elektroautos wurden im Kapitel 4 diskutiert und es wurde ihr jeweiliger Einfluss auf die Gesamtbilanz dargestellt. Dabei hat sich gezeigt, dass die Parameter nicht statisch sind, sondern Verbesserungspotenziale aufweisen. Vor diesem Hintergrund soll nun ein Blick in eine mögliche Zukunft gewagt werden; er soll zeigen, wie sich die Klimabilanz von Elektroautos bis 2030 entwickeln könnte. Es handelt sich dabei ausdrücklich um ein Szenario für definierte Randbedingungen, nicht um eine Prognose der tatsächlichen Entwicklung. Grundlagen bilden die vorher betrachteten Einflussparameter und ihre Bandbreiten.

## 5.1 Ausblick auf die Batterieherstellung

Für das Elektroauto bleibt die Batterie die wichtigste Komponente auf der Herstellungsseite. Die Analysen in Kapitel 4 haben gezeigt, dass die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Klimabilanz der Lithium-Ionen-Batterien der durch Energiedichte und Zellchemie beeinflusste

Materialeinsatz einerseits und andererseits der Energieeinsatz bei der Zellfertigung und dessen CO<sub>2</sub>-Intensität sind. Hier zeigt sich bereits heute eine große Bandbreite der Herstellungsbedingungen, die bis 2030 im Mittel zu deutlichen Verbesserungen führen sollte.

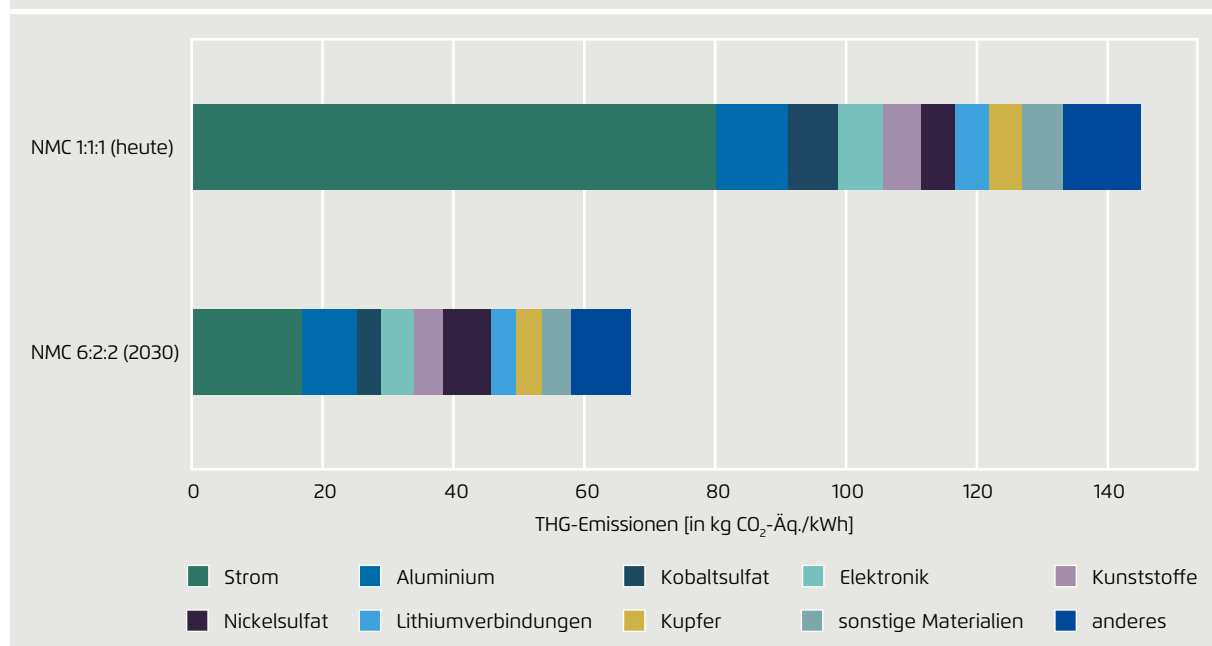
Bezüglich der Energiedichte werden bis 2030 Verbesserungen auf 130 bis 155 Wh/kg<sup>51</sup> erwartet. Hersteller<sup>52</sup> rechnen zum Beispiel damit, dass bereits ab 2020 verstärkt NMC-Zellen in der Zusammensetzung 6:2:2 (d. h. 60 % Nickel, 20 % Kobalt und 20 % Mangan) anstelle des heute vorherrschenden Drittmixes (1:1:1) zum Einsatz kommen. Dadurch werden 25 Prozent höhere Energiedichten erwartet. Für das Szenario der Batterie in 2030 wird daher eine 6:2:2 NMC-Zelle mit einer Energiedichte von 150 Wh/kg angenommen. Darüber hinaus sind noch weitere Entwicklungen in der Zellchemie möglich, die auch zu einer stärkeren Verbesserung der Klimabilanz führen können, aber nicht Gegenstand der vorliegenden Studie waren.

51 Zimmer et al. (2016), S. 294.

52 VW (2018).

Treibhausgasemissionen der Batterie bezogen auf eine Kilowattstunde Batteriekapazität heute und im Jahr 2030 (mit EU Fertigungsmix von 335 g CO<sub>2</sub>-Äq./kWh)

Abbildung 20



Eigene Darstellung durch ifeu

Bei der Zellfertigung wurde für die heutige Situation noch ein relativ hoher Energieverbrauch angesetzt, während einzelne Fertigungslinien bereits heute deutlich geringere Stromverbräuche haben können. VW geht bei hoher Produktionsauslastung, die einem eingeschwungenen Serienprozess entsprechen sollte, von einem halbierten Strombedarf für die Zellfertigung aus. Zudem zeichnet sich ab, dass neben Deutschland auch andere Länder weltweit ihre Energieversorgung in Zukunft dekarbonisieren und damit der Strommix in der Zellfertigung CO<sub>2</sub>-ärmer wird. Weiterhin gibt es Pläne, in Europa eine Zellfertigung aufzubauen, die dann – je nach konkretem Standort der Zellfabrik – einen deutlich besseren Strommix in der Zellfertigung haben könnte, als es heute in Ostasien der Fall ist. Für das Szenario einer zukünftigen Batterie wurde daher eine Batteriefertigung mit heutigem europäischem Strommix angenommen.

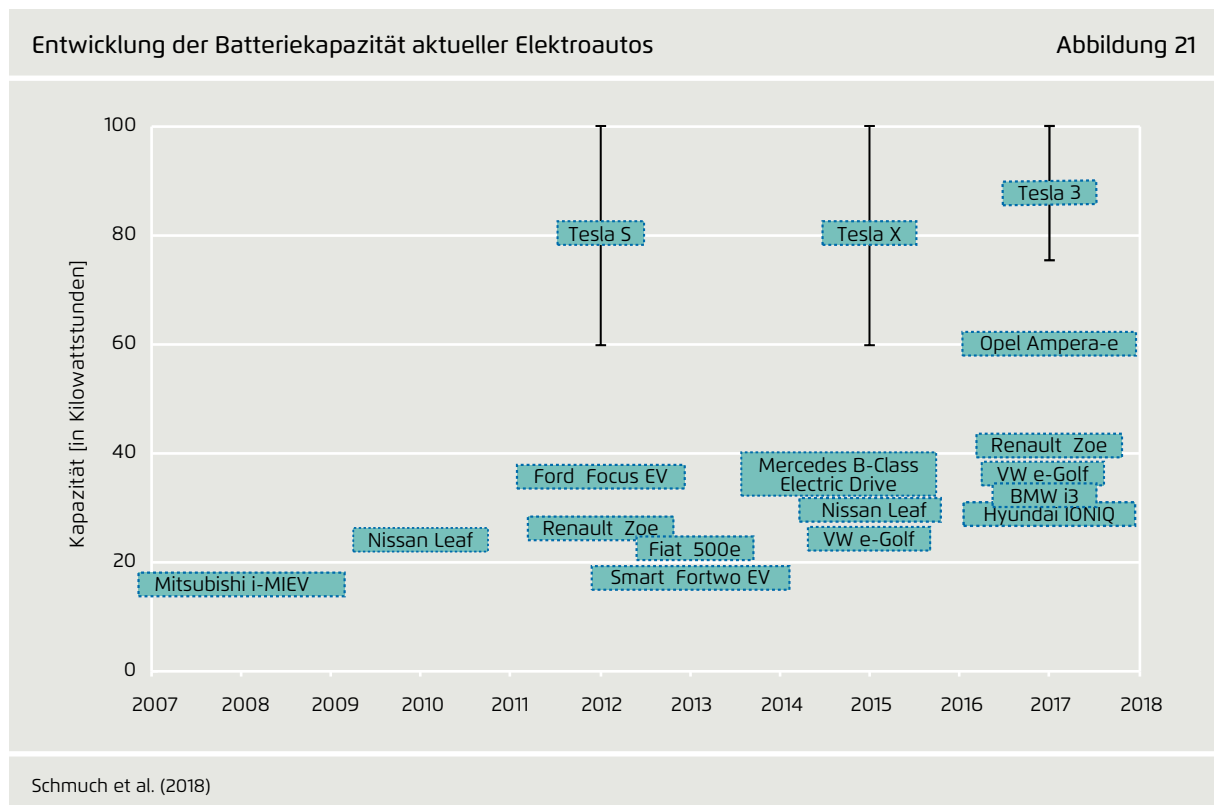
Damit lassen sich die Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung gegenüber heute in etwa halbieren (siehe Abbildung 20); sie würden dann nur noch 67 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro kWh (ohne Entsorgung) betragen. Bei ansonsten gleichbleibenden Fahrzeugparametern

(Batteriegröße und Fahrzeugrumpf) könnten die Treibhausgasemissionen der Herstellung eines Elektroautos von heute 12,5 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente im Jahr 2030 auf 9,7 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente sinken.

## 5.2 Ausblick auf die Fahrzeugeigenschaften

Der Ausblick auf die Batterieherstellung zeigt, dass bis 2030 bei gleicher Kapazität etwa eine Halbierung der mit der Herstellung verbundenen Klimawirkung möglich ist. Einen großen Einfluss auf die Fahrzeugbilanz hat jedoch auch die **Batteriegröße** (Auslegung der Kapazität). Die Reichweiten heutiger Elektroautos werden häufig als ungenügend empfunden. Eine größere Reichweite erfordert jedoch eine größere Batterie, deren Herstellung höhere Emissionen verursacht. Außerdem erhöht eine größere Batterie das Fahrzeuggewicht, was wiederum zu einem höheren Verbrauch von Fahrstrom führt.<sup>53</sup> Ein Teil des Reichweitengewinns geht auf diese Weise wieder verloren.

53 Siehe Helms; Kräck (2016).





Eine Auswertung der Batteriekapazität von Elektroautomodellen der vergangenen Jahre zeigt einen Trend hin zu größeren Reichweiten bzw. Batteriekapazitäten. Für die heutige Situation wurde ein Beispielfahrzeug mit 35 kWh Batteriekapazität gewählt. Einzelne Tesla-Modelle haben jedoch bereits jetzt Batteriekapazitäten von bis 100 Kilowattstunden und setzen damit für die Oberklasse einen Maßstab. Aus aktuellen Marktankündigungen geht hervor, dass auch für Modelle der unteren Mittelklasse Batteriekapazitäten von mehr als 50 Kilowattstunden realistisch sind (z. B. Opel Ampera-e). Im Begleitkreis dieses Projekts wurde ebenfalls von einer weiteren Steigerung der mittleren Batteriekapazität ausgegangen, die sich allerdings einer Sättigungsgrenze nähert.<sup>54</sup> Für das Szenario für 2030 wird eine Batteriekapazität von 35 kWh daher als untere Grenze betrachtet. Zusätzlich wird eine Batteriekapazität von 60 kWh betrachtet, die nach Typprüfzyklus Reichweiten von bis zu 500 km ermöglicht und für viele Anwendungen als ausreichend angesehen wird.

Bis 2030 ist außerdem mit einer Verbesserung der Energieeffizienz zu rechnen. Sie betrifft sowohl Verbrennungs- als auch Elektroautos. Bei Verbrennungsfahrzeugen wird die Effizienzentwicklung durch die CO<sub>2</sub>-Flottenzielwerte angereizt, die bis 2021 für die in Europa verkauften Neufahrzeuge im Typprüfzyklus einen mittleren CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 95 g vorsehen. Bis 2030 soll der Ausstoß gegenüber 2021 um 37,5 Prozent sinken. Elektroautos sollen dabei jedoch weiterhin als emissionsfrei angerechnet werden, sodass bei steigenden Zulassungszahlen von E-Fahrzeugen noch offen ist, wie viel Minderung tatsächlich von den Verbrennungs-Pkw erreicht werden muss. Zusätzlich bleibt die weitere Entwicklung hinsichtlich der realen Emissionen auf der Straße abzuwarten. Zwar wird durch Einführung der *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure* (WLTP) mit einer realistischeren Abbildung der Emissionen auch im Typprüfverfahren gerechnet, dennoch wird es wohl weiterhin Abweichungen zur Realität geben.

Auch bei den Elektroautos ist die Entwicklung noch unklar. Eine vollständige vergleichende Betrachtung der weiteren Effizienzsteigerung von Verbrennungs- und Elektroautos übersteigt den Rahmen der vorliegenden Studie. Daher werden für die Effizienzentwicklung bis 2030 Annahmen des ifeu *Transport Emission Model*

(TREMODO) verwendet, die für beide Technologien in der Kompaktklasse zwischen 2018 und 2030 eine Verbesserung von knapp 12 Prozent vorsehen. Bei den Ladeverlusten wird angenommen, dass diese von 15 Prozent auf 10 Prozent sinken, was bereits heute schon bei einigen Modellen erreicht wird (siehe Kapitel 4.2.1).

### 5.3 Szenario der Klimabilanz für 2030

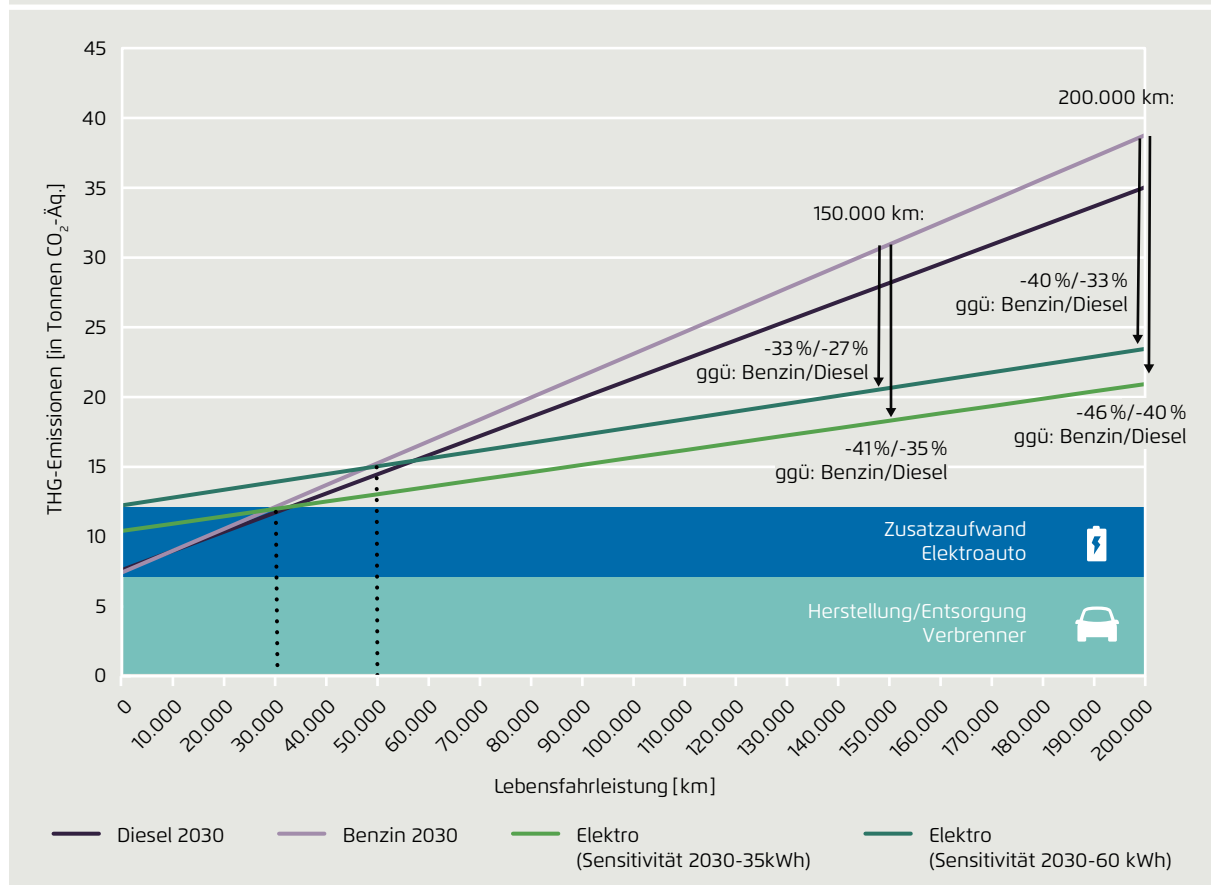
Jenseits der beschriebenen Optimierungspotenziale bei der Batterieherstellung und bei der Entwicklung der Fahrzeugenschaft wird für das Elektroauto vor allem eine Verbesserung der Energiebereitstellung erwartet. Im Zeitraum bis 2030 wurde für das Basisszenario der Langfrist- und Klimaszenarien von Pehnt et al. (2018) bereits ein Rückgang der Treibhausgasintensität des deutschen Strommixes von heute fast 570 auf 384 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh unterstellt. Darüber hinaus kann für Fahrzeuge, die 2030 zugelassen werden, mit einem weiteren Rückgang der mit der Strombereitstellung verbundenen Klimawirkung gerechnet werden. Das wäre im Übrigen zwingend erforderlich, um die aktuellen Klimaschutzziele bis 2050 zu erfüllen. Bis 2040 gehen die Treibhausgasemissionen im Basisszenario der Langfrist- und Klimaszenarien nach Pehnt et al. (2018) auf 238 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro kWh Strom zurück. Für ein 2030 zugelassenes Fahrzeug ergibt sich dann über das Fahrzeugleben bereits ein mittlerer Treibhausgasfaktor von 296 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro kWh.

Unter den angenommenen Rahmenbedingungen verbessert sich die Klimabilanz des Elektroautos bis 2030 deutlich (siehe Abbildung 23). Bei einer Batteriekapazität von 35 kWh („Sensitivität 2030 – 35 kWh“) wird bereits ab etwa 30.000 km ein Klimavorteil für das Elektroauto erreicht. Er steigt nach 150.000 km bereits auf 40 Prozent im Vergleich zu einem vergleichbaren Verbrenner. Erhöht sich die Batteriekapazität wie erwartet auf 60 kWh („Sensitivität 2030 – 60 kWh“), werden Klimavorteile erst ab über 50.000 km erreicht. Der Klimavorteil gegenüber dem Verbrenner beträgt dann nach 150.000 km immer noch um die 30 Prozent, nach 200.000 km bis zu 40 Prozent. Der Klimavorteil liegt damit allerdings durchgängig fast 10 Prozentpunkte unter der Variante mit weiterhin begrenzter Reichweite.

54 Agora Verkehrswende (2018).

Treibhausgasemissionen von Beispielfahrzeugen der Kompaktklasse in einem Szenario für Neuzulassungen in 2030 in Abhängigkeit der Lebensfahrleistung

Abbildung 22



Eigene Darstellung durch ifeu

Anmerkungen: Strommix Deutschland ab 2030 nach Basisszenario der Langfrist- und Klimaszenarien in (Pehnt et al., 2018); Szenarioannahmen zur Batterieherstellung siehe Kapitel 5.1 und Effizienzentwicklung siehe Kapitel 5.2

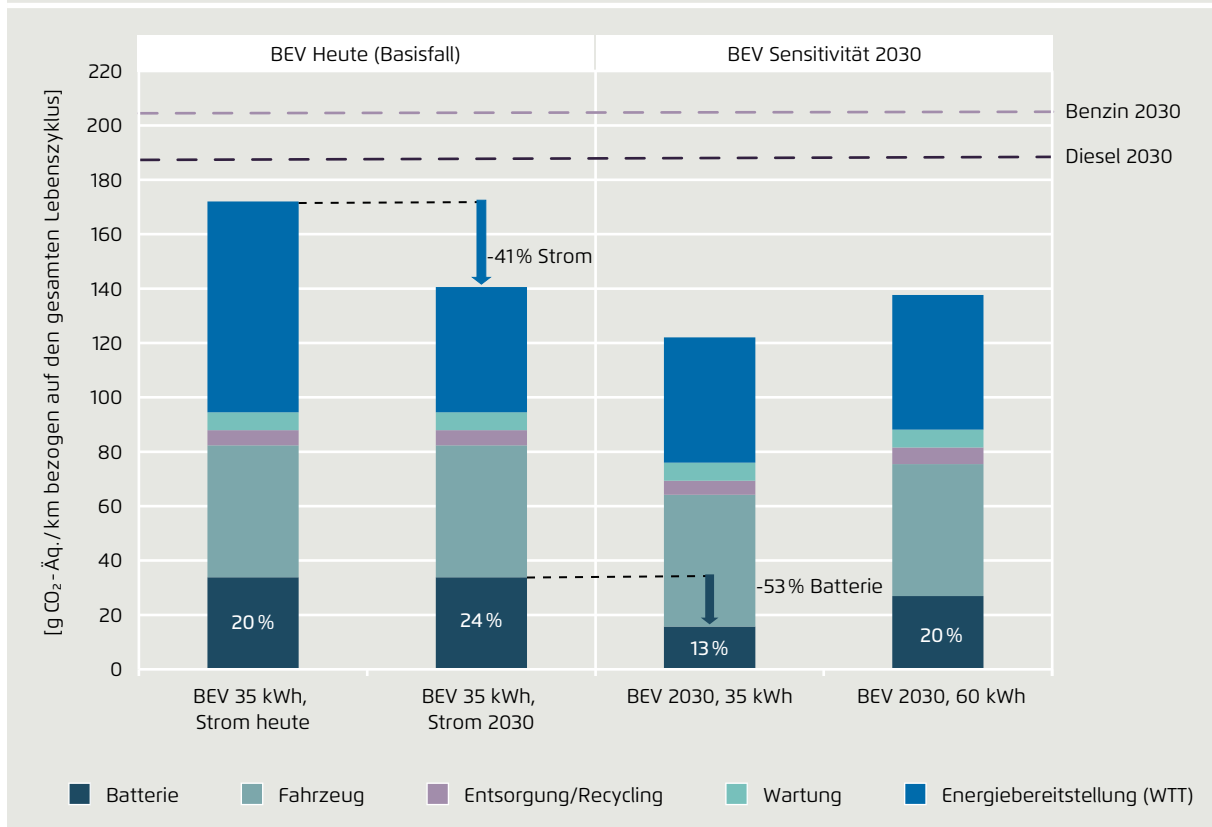
Damit zeigt sich, dass zukünftig mit einer deutlichen Verbesserung der Klimabilanz von Elektroautos zu rechnen ist. Der größte Beitrag ist durch die Dekarbonisierung der Stromerzeugung zu erwarten. Die damit verbundene Klimawirkung könnte hier für Neuzulassungen 2030 gegenüber heute um gut 40 Prozent zurückgehen (siehe Abbildung 24). Zusätzlich könnte sich auch der Beitrag der Batterieherstellung zur Klimabilanz gegenüber heute etwa halbieren.

Der Beitrag der Fahrzeugherstellung zur gesamten Klimabilanz 2030 wäre dann mindestens so hoch wie der Beitrag der Fahrzeugnutzung und würde damit stärker in den Blickpunkt einer weiteren Verbesserung der Klimabilanz des Elektroautos rücken. Dies gilt umso mehr,

als der aktuelle Trend zu steigenden Batteriekapazitäten anhält. So sinken die Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung bei zukünftigen Fahrzeugen mit angenommenen 60 kWh Batteriekapazität kaum gegenüber heutigen Fahrzeugen mit 35 kWh Batteriekapazität. Es kommt lediglich zu einer Verbesserung der Klimabilanz in der Nutzungsphase. Das Klimaentlastungspotenzial ist trotzdem deutlich höher als heute (Abbildung 24 ganz links), die erwarteten Verbesserungen bei der Batterieherstellung können sogar den erwarteten Zuwachs an Batteriekapazität überkompensieren. Die unterstellten Verbesserungen hinsichtlich Energieeffizienz und Ladewirkungsgrad haben nur geringe Auswirkungen auf die Gesamtbilanz. Zudem sind hier auch auf Seiten der Verbrenner vergleichbare Entwicklungen zu erwarten.

Treibhausgasemissionen von Pkw der Kompaktklasse pro gefahrenen Kilometer bei 150.000 km Lebensfahrleistung für Neuzulassungen in 2030

Abbildung 23



Anmerkungen: Strommix Deutschland ab 2030 nach Basisszenario der Langfrist- und Klimaszenarien in (Pehnt et al., 2018); Szenarioannahmen zur Batterieherstellung siehe Kapitel 5.1 und Effizienzentwicklung siehe Kapitel 5.2. Eigene Darstellung durch ifeu



# 06 | Fazit zur Klimabilanz von Elektroautos

Elektroautos gelten als wichtiger Baustein für die Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Trotzdem stehen Elektroautos immer wieder in der Kritik, auch wegen ihrer Klimawirkung. Zwar gibt es mittlerweile eine Reihe von Studien zur Klimabilanz von Elektroautos, diese sind aber häufig nicht direkt miteinander vergleichbar. Weil die Sachverhalte tatsächlich komplex sind, herrscht in der Öffentlichkeit Unsicherheit über die Klimawirkung von Elektroautos.

Ziel dieser Studie ist es daher, die zentralen Einflussparameter auf die Klimabilanz von Elektroautos herauszuarbeiten und aufzuzeigen, welche Verbesserungspotenziale es bei den einzelnen Schritten (insbesondere der Batterieherstellung) gibt. Trotz verbleibender Unsicherheiten und Datenlücken lassen sich aus der Literaturlauswertung und der eigenen Modellierung richtungssichere Aussagen ableiten.

## Literaturlauswertung

Mittlerweile gibt es eine Reihe von Studien zur Klimabilanz von Elektroautos, die aber häufig nicht direkt miteinander vergleichbar sind. Hinzu kommt, dass die Studienergebnisse auch unterschiedlich interpretiert werden. Dabei spielt auch die öffentliche Erwartungshaltung an Elektroautos eine wichtige Rolle. **Die Literaturlauswertung hat gezeigt, dass Rahmenbedingungen und Bilanzgegenstände sich von Studie zu Studie deutlich unterscheiden und einen großen Teil divergierender Ergebnisse erklären können.** Die kritische Prüfung und Berücksichtigung dieser Grundlagen ist daher insbesondere für eine vergleichende Einordnung von Ergebnissen wichtig. Daten zur Batterieherstellung werden unter anderem aus Wettbewerbsgründen von nur wenigen Herstellern detailliert veröffentlicht. Die wenigen verfügbaren Daten werden daher häufig in mehreren Studien genutzt und reflektieren teilweise nicht den aktuellen Stand der Technik oder nur einen Ausschnitt der weltweiten Batterieproduktion.

**Aufgrund der heute insbesondere in Deutschland noch stark fossil geprägten Stromerzeugung hat die Nutzungsphase an der Klimabilanz über den gesamten Lebensweg von Elektroautos den größten Anteil.** Zugleich liegt auch der zentrale Klimavorteil von Elektroautos im Betrieb und muss hier den Klimanachteil der

Herstellung kompensieren. Die Gesamtbilanz hängt deshalb stark von der verbrennungsmotorischen Fahrleistung ab, die durch ein Elektroauto substituiert wird. Wie schnell der Klimavorteil erreicht werden kann, hängt vor allem von der CO<sub>2</sub>-Intensität des Strommixes ab. Hier sind zukünftig deutliche Verbesserungen zu erwarten, die auch den heute zugelassenen Elektroautos zugutekommen werden. Darüber hinaus zeigt der Energieverbrauch von Elektroautos auf der Straße auch innerhalb des gleichen Segments große Unterschiede, sodass auch die Energieeffizienz ein wichtiger Einflussparameter ist.

Da zur Nutzungsphase vergleichsweise gesicherte Daten vorliegen, lassen sich trotz vieler Unsicherheiten im Detail richtungssichere Aussagen zur Klimabilanz von Elektroautos treffen. **Studienergebnisse zur Klimawirkung der Batterieherstellung weichen dagegen teilweise um ein Mehrfaches voneinander ab.** Diese Unterschiede beeinflussen das Gesamtergebnis über den Lebensweg, selbst wenn dieser durch die Dominanz der Nutzungsphase begrenzt ist. Der Energieeinsatz ist dabei ein wichtiger Parameter der Batterieherstellung. Die wenigen vorliegenden Daten weisen hier eine besonders große Bandbreite auf. Diese ist aber wahrscheinlich nicht allein durch Unsicherheiten bedingt, sondern spiegelt auch unterschiedliche Produktionsbedingungen wider und zeigt damit ein Verbesserungspotenzial auf.

## Schlussfolgerungen der Sensitivitätsanalysen zur Nutzungsphase

**Der bilanzierte Basisfall eines Elektroautos und die Sensitivitäten zeigen selbst unter konservativen Annahmen für die Batterieherstellung nach 150.000 km durchgehend eine bessere Klimabilanz für das Elektroauto gegenüber dem Verbrenner.** Auch wenn in den nächsten Jahren keine weitere Verbesserung der Stromerzeugung realisiert wird, ist kaum mit einer schlechteren Klimabilanz des Elektroautos gegenüber dem Verbrenner zu rechnen.

**Dies gilt in vielen Fällen auch für City- und/oder Zweitwagen mit niedrigerer Lebensfahrleistung.** Im Stadtbereich sind Elektroautos besonders effizient und können daher auch bei deutlich niedrigeren Lebensfahrleistungen einen Klimavorteil erreichen. Dies liegt daran, dass Elektromotoren in einem breiten Lastbereich hohe Wirkungsgrade haben, während bei Verbrennern der

Wirkungsgrad im städtischen Teillastbereich deutlich sinkt. Zusätzlich werden bei einem Einsatz im Stadtbereich und/oder als Zweitwagen geringere Reichweiten benötigt. Die Batterien könnten dadurch entsprechend kleiner ausgelegt werden, was die Klimabilanz ebenfalls entlastet.

Umgekehrt werden im Autobahnbetrieb tendenziell hohe Reichweiten benötigt. Auch der Verbrauch des Elektroautos ist vergleichsweise hoch, da sich der höhere Luftwiderstand nahezu unmittelbar auf den Verbrauch auswirkt, während er bei Verbrennern teilweise durch einen besseren Motorwirkungsgrad im Volllastbereich kompensiert wird. **Entsprechend müssen im Autobahnbetrieb hohe verbrennungsmotorische Fahrleistungen substituiert werden, um eine positive Klimabilanz für das Elektroauto zu erreichen.**

## Schlussfolgerungen der Sensitivitätsanalysen zur Fahrzeugherstellung

**Klimanachteile gegenüber einem Verbrenner entstehen für ein Elektroauto in der Regel allein durch die Fahrzeugherstellung, vor allem durch die Batterie.** Der Klimanachteil hängt daher auch von der Batteriekapazität ab. Die im Rahmen der Studie durchgeführte Bilanzierung eines Elektroautos mit einer Batteriekapazität von 35 kWh zeigt für die Herstellung des gesamten Fahrzeugs eine fast doppelt so hohe Klimawirkung wie bei vergleichbaren Verbrennungsfahrzeugen. Fast 40 Prozent der Klimawirkung durch Herstellung von Elektroautos gehen auf die Herstellung der Batterie zurück.

**Der Energieeinsatz der Batteriefertigung ist für den größten Teil der mit der Batterie verbundenen Klimawirkung verantwortlich, gefolgt von den Kathodenmaterialien.** Auch wenn andere Studienergebnisse hier im Detail abweichen, bleiben diese Faktoren in vielen Analysen Haupttreiber der Klimabilanz von Batterien. Aufgrund des hohen Anteils des Energieeinsatzes bei der Batteriefertigung kann die Gesamtklimabilanz der Batterieherstellung auch durch den Einsatz von Erneuerbaren Energien deutlich verbessert werden.

## Verbesserungspotenziale der Klimabilanz bis 2030

Verbesserungspotenziale können entsprechend den Sensitivitätsanalysen vor allem im Bereich der Strombereitstellung und bei der Batterieherstellung erwartet werden. Bei hoher Produktionsauslastung in einem eingeschwungenen Serienprozess können deutlich geringere Stromverbräuche im Fertigungsprozess der Batteriezellen erreicht werden. Durch neue Zellchemien (z. B. 6:2:2-NMC-Zellen) sind zudem deutlich höhere Energiedichten zu erwarten. Auch wird eine Fertigung mit einem stärker erneuerbar geprägten Strommix (wie in einigen europäischen Staaten) die Batteriebilanz verbessern. **Die Sensitivitätsbetrachtungen zu diesen Aspekten zeigen, dass die Klimawirkung der Batterieherstellung bei gleicher Kapazität mittelfristig etwa halbiert werden kann.**

**Der mögliche Klimavorteil dieser Entwicklung könnte jedoch durch steigende Reichweiten kompensiert werden.** Steigt die mittlere Reichweite von Elektroautos von heute gut 30 kWh auf von Experten erwartete 60 kWh, würden die Fortschritte bei den Herstellungsprozessen dadurch weitgehend kompensiert.

Die deutlichsten Verbesserungen der Klimabilanz von Elektroautos sind in Deutschland jedoch durch die Energiewende zu erwarten. Werden die Ausbauziele des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) realisiert, wird der Strommix deutlich CO<sub>2</sub>-ärmer. **Schließlich könnte dadurch der Beitrag der Fahrzeugherstellung zur Klimabilanz den Beitrag der Fahrzeugnutzung sogar übersteigen. Als Konsequenz davon könnte die Dekarbonisierung des Herstellungsprozess stärker in den Blickpunkt rücken.** Bei fortgesetztem Trend zu steigenden Batteriekapazitäten wäre das wünschenswert.

## Ausblick

Ungeachtet vieler Unsicherheiten im Detail zeigen sowohl die Literaturlauswertung als auch die eigene Modellierung und die Sensitivitätsanalysen, dass künftig eine deutliche Verbesserung der Klimabilanz von Elektroautos möglich ist. Um dieses technische Verbesserungspotenzial zu heben, müssen die Rahmenbedingungen sowohl hinsichtlich der Energiebereitstellung

und Effizienz als auch hinsichtlich der Batterieherstellung aktiv gestaltet werden.

Der reine Wechsel des Antriebskonzeptes und damit des Energieträgers greift für eine vollständige Verkehrswende jedoch zu kurz. Darüber hinaus ist eine umfassende Mobilitätswende erforderlich, um den Endenergieverbrauch im Verkehr zu senken, ohne Mobilität an sich einzuschränken.





## 07 | Literaturverzeichnis

### Literaturangaben Schlussfolgerungen aus Sicht von Agora Verkehrswende

**Agora Energiewende (2017):** *Energiewende 2030: The Big Picture. Megatrends, Ziele, Strategien und eine 10-Punkte-Agenda für die zweite Phase der Energiewende.* Berlin.

**Agora Energiewende; Öko-Institut (2018):** *Vom Wasserbett zur Badewanne. Die Auswirkungen der EU-Emissionshandelsreform 2018 auf CO<sub>2</sub>-Preis, Kohleausstieg und den Ausbau der Erneuerbaren.* Berlin.

**Agora Verkehrswende (2018):** *Klimaschutz im Verkehr. Maßnahmen zur Erreichung des Sektorziels 2030.* Berlin.

**Agora Energiewende (2019):** *Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2018. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2019.* Berlin.

**BSR (2017):** *CCWG 2016 Global Maritime Trade Lane Emissions Factors*, August 2017. URL: [www.bsr.org/reports/BSR\\_CCWG\\_2016\\_Global\\_Maritime\\_Trade\\_Lane\\_Emissions\\_Factors.pdf](http://www.bsr.org/reports/BSR_CCWG_2016_Global_Maritime_Trade_Lane_Emissions_Factors.pdf). Letzter Zugriff am: 10.12.2018.

**European Commission (2018):** ANNEX to the COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS EUROPE ON THE MOVE, *Sustainable Mobility for Europe: safe, connected and clean*, COM(2018) 293 final, Annex 2, Brussels.

**European Commission (2016):** *European Platform on Life Cycle Assessment (LCA)*, Last updated: 08/06/2016. URL: <http://ec.europa.eu/environment/ipp/lca.htm>. Letzter Zugriff am: 10.12.2018.

**UBA (2016):** *Ökodesign-Richtlinie*, 19.08.2016. URL: [www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/oekodesign/oekodesign-richtlinie#textpart-1](http://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/oekodesign/oekodesign-richtlinie#textpart-1). Letzter Zugriff am: 6.12.2018.

**UBA (2015):** *Energieverbrauchskennzeichnung*. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energiesparen/energieverbrauchskennzeichnung>. Letzter Zugriff am: 6.12.2018.

**Verordnung (EG) Nr. 1222/2009** des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2009 über die Kennzeichnung von Reifen in Bezug auf die Kraftstoffeffizienz.

### Literaturangaben

**ADAC (2017):** *Test- und Bewertungskriterien (ab 09/2016)*. 19.6.1110-IN 28843 – STAND 09/2017 Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e. V. (ADAC), München.

**ADAC (2018a):** *Elektroautos im Test: So hoch ist der Stromverbrauch* (12.10.2018). Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e. V. (ADAC), München.

**ADAC (2018b):** *Ökobilanz gängiger Antriebstechniken – Konventionelle Antriebe sind lange nicht am Ende*. URL: <https://www.adac.de/infotestrat/umwelt-und-innovation/abgas/oekobilanz/default.aspx?ComponentId=317354&SourcePageId=47733>. Letzter Zugriff am: 12.5.2018.

**AGEB (2018):** *Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2017*. Stand Juli 2018. AG Energiebilanzen e. V. (AGEB).

**Agora Verkehrswende (2017):** *Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern. 12 Thesen zur Verkehrswende*. URL: [www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/12\\_Thesen/Agora-Verkehrswende-12-Thesen\\_WEB.pdf](http://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/12_Thesen/Agora-Verkehrswende-12-Thesen_WEB.pdf). Letzter Zugriff am 12.02.2018.

**Agora Verkehrswende (2018):** *Protokoll 1. Begleitkreis zu dem Projekt: Klimabilanz von Elektroautos – Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial. Agora Verkehrswende*. Nicht veröffentlicht, Berlin.

**Ambrose, H.; Kendall, A. (2016):** *Effects of battery chemistry and performance on the life cycle greenhouse gas intensity of electric mobility*. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 47, S. 182–194.

**Audi (2018):** *Neue Kraft aus alten Zellen: Audi und Umicore entwickeln Kreislauf für Batterie-Recycling*. In: *MediaInfo* 26.10.18, Ingolstadt.

- Bauer, C. (2010):** *Ökobilanz von Lithium-Ionen-Batterien: Analyse der Herstellung von Energiespeichern für den Einsatz in Batteriefahrzeugen.* Eine Studie im Auftrag der Volkswagen AG. Paul Scherrer Institut, Labor für Energiesystem-Analysen (LEA).
- Bauer, C.; Hofer, J.; Althaus, H. J.; Del Duce, A.; Simons, A. (2015):** *The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life Cycle Assessment based on a novel scenario analysis framework.* In: Applied Energy 157, S. 871–883.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.) (2016):** *Begleitforschung zu den Modellregionen Elektromobilität des BMVI – Ergebnisse des Themenfeldes Flottenmanagement. Elektromobilität im Carsharing: Status quo, Potenziale und Erfolgsfaktoren.* Berlin, S. 30.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2018):** *Langfrist- und Klimaszenarien.* URL: [www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/langfrist-und-klimaszenarien.html](http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/langfrist-und-klimaszenarien.html). Letzter Zugriff am: 5.12.2018.
- Bundesregierung (2010):** *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung.* Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin.
- CDI; ERM (2016):** *The Environmental Performance of Refined Cobalt: Life Cycle Inventory and Life Cycle Assessment of Refined Cobalt.* Conducted by Environmental Resources Management Limited (ERM) for the Cobalt Development Institute (CDI), Guildford, Surrey.
- Cheron, M.; Gilbert-D' Halluin, A.; Schuller, A. (2017):** *Quelle contribution du véhicule électrique à la transition écologique en France?* Fondation pour la Nature et l'Homme et European Climate Foundation, Boulogne-Billancourt.
- Chung, D.; Elgqvist, E.; Santhanagopalan, S. (2016):** *Automotive Lithium-ion Cell Manufacturing: Regional Cost Structures and Supply Chain Considerations.* Technical Report NREL/TP-6A20-66086, Clean Energy Manufacturing Analysis Center (CEMAC).
- Council of the EU (2018):** *CO<sub>2</sub>-Emissionsnormen für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge: Einigung im Rat.* Pressemitteilung 548/18 10.10.2018, Brüssel.
- Dai, Q.; Dunn, J.; Kelly, J. C.; Elgowainy, A. (2017):** *Update of Life Cycle Analysis of Lithium-ion Batteries in the GREET Model.* Systems Assessment Group. Energy Systems Division. Argonne National Laboratory (ANL).
- Daimler AG (2014):** *Life Cycle. Umweltzertifikat Mercedes-Benz B-Klasse Electric Drive.* Stuttgart.
- Dunn, J. B.; Gaines, L.; Kelly, J. C.; Gallagher, K. G. (2016):** *Life cycle analysis summary for automotive lithium-ion battery production and recycling.* Conference Paper. 145th TMS Annual Meeting and Exhibition.
- Dunn, J. B.; Gaines, L.; Sullivan, J.; Wang, M. Q. (2012):** *Impact of recycling on cradle-to-gate energy consumption and greenhouse gas emissions of automotive lithium-ion batteries.* In: Environmental Science & Technology 46 (22), S. 12704–12710.
- Dunn, J.; James, C.; Gaines, L.; Gallagher, K.; Dai, Q.; Kelly, J. (2015):** *Material and energy flows in the production of cathode and anode materials for lithium ion batteries.* In: Journal of Chemical Information and Modeling 53 (9), S. 1689–1699.
- Einhorn, B.; Kim, H. (2018):** *Samsung and LG Have a Battery Problem.* In: Bloomberg Businessweek. URL: [www.bloomberg.com/news/articles/2016-03-31/samsung-and-lg-have-a-battery-problem](http://www.bloomberg.com/news/articles/2016-03-31/samsung-and-lg-have-a-battery-problem). Letzter Zugriff am: 19.11.2018.
- Ellingsen, L. A.; Majeau-Bettez, G.; Singh, B.; Srivastava, A. K.; Valøen, L. O.; Strømman, A. H. (2014):** *Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack.* In: Journal of Industrial Ecology 18 (1), S. 113–124.
- Ellingsen, L. A.-W.; Singh, B.; Strømman, A. H. (2016):** *The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles.* In: Environmental Research Letters 11 (5).

- Frischknecht, R.; Jungbluth, N.; Althaus, H.-J.; Doka, G.; Dones, R.; Heck, T.; Hellweg, S.; Hirschier, R.; Nemecek, T.; Rebitzer, G.; Spielmann, M. (2005):** *The ecoinvent database: Overview and methodological framework*. In: International Journal of Life Cycle Assessment 10, S. 3–9. Ecoinvent Database Version 2.2 (2008). Ecoinvent Centre, Zürich.
- Hall, D.; Lutsey, N. (2018):** *Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions*. February. URL: [www.theicct.org/publications/EV-battery-manufacturing-emissions](http://www.theicct.org/publications/EV-battery-manufacturing-emissions). Letzter Zugriff am: 7.2.2019.
- Hawkins, T. R.; Singh, B.; Majeau-Bettez, G.; Strømman, A. H. (2013):** *Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles: LCA of Conventional and Electric Vehicles*. In: Journal of Industrial Ecology 17 (1), S. 53–64.
- Helms, H.; Jöhrens, J.; Hanusch, J.; Höpfner, U.; Lambrecht, U.; Pehnt, M. (2011):** *Umbrella: Umweltbilanzen Elektromobilität – Grundlagenbericht*. Wissenschaftlicher Grundlagenbericht, gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg.
- Helms, H.; Jöhrens, J.; Kämper, C.; Giegrich, J.; Liebich, A.; Vogt, R.; Lambrecht, U. (2016):** *Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen*. UBA Texte 27/2016 ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- Kräck, J.; Jöhrens, J.; Helms, H. (2015):** *Ermittlung des realitätsnahen und nutzerspezifischen Energieverbrauchs aktueller Elektrofahrzeuge auf Basis individueller Fahrprofile und standardisierter Messdaten*. In: *Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement VI*. Haus der Technik Fachbuch (138). expert-Verlag, Renningen. S. 177–190.
- Helms, H.; Kräck, J. (2016):** *Energy savings by light-weighting: 2016 Update*. Im Auftrag von International Aluminium Institute supported by European Aluminium. ifeu – Institut für Energie und Umweltforschung, Heidelberg.
- Helms, H.; Lambrecht, U.; Jöhrens, J.; Pehnt, M.; Liebich, A.; Weiß, U.; Kämper, C. (2013a):** *Ökologische Begleitforschung zum Flottenversuch Elektromobilität – Endbericht*. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg.
- Helms, H.; Lambrecht, U.; Jöhrens, J.; Pehnt, M.; Liebich, A.; Weiß, U.; Kämper, C. (2013b):** *Ökologische Begleitforschung zum Flottenversuch Elektromobilität – Endbericht*. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg.
- ifeu (2016):** *Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960–2030“ (TREMOD) für die Emissionsberichterstattung 2016 (Berichtsperiode 1990–2014)*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. In Zusammenarbeit mit dem Öko-Institut, Heidelberg, S. 1–97.
- INL (2018):** *Vehicle Testing | Advanced Vehicle Testing Activity*. URL: <https://avt.inl.gov/content/vehicle-testing>. Letzter Zugriff am: 29.11.2018.
- IVT; DLR (2014):** *Fahrleistungserhebung 2014: Begleitung und Auswertung – Schlussbericht zur Inländerfahrleistung*. Im Auftrag der BAST, Bergisch Gladbach.
- Köhler, U. (2013):** *Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen*. In: Korthauer, R. (Hrsg.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Berlin, Heidelberg, S. 95–106.
- Linne+Krause (2016):** *Untersuchung zur Wirtschaftlichkeit des Taxigewerbes in der Bundeshauptstadt Berlin*. Im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Berlin. S. 57.
- Majeau-Bettez, G.; Hawkins, T. R.; Strømman, A. H. (2011):** *Life cycle environmental assessment of lithium-ion and nickel metal hydride batteries for plug-in hybrid and battery electric vehicles*. In: Environmental Science & Technology 45, S. 4548–4554.
- McKerracher, C. (2017):** *EV market trends and outlook*. Bloomberg New Energy Finance.

- Messagie, M. (2017):** *Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles*. Brussels VUB university MOBI research center. Study for Transport and Environment (T&E), Brussels.
- Notter, D. A.; Gauch, M.; Widmer, R.; Wäger, P.; Stamp, A.; Zah, R.; Althaus, H.-J. (2010):** *Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles*. In: Environmental Science & Technology 44 (17), S. 6550–6556.
- Pehnt, D. M.; Mellwig, P.; Blömer, S.; Hertle, H.; Nast, M.; Oehsen, A. von; Lempik, J.; Langreder, N.; Thamling, N.; Hermelink, D. A.; Offermann, M.; Pannier, P.; Müller, M. (2018):** *Untersuchung zu Primärenergiefaktoren*. Endbericht im Auftrag des BMWi. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu); Prognos AG; Ecofys; dena – Deutsche Energie-Agentur GmbH, Heidelberg, Berlin.
- Peters, J. F.; Baumann, M.; Zimmermann, B.; Braun, J.; Weil, M. (2017):** *The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review*. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 7, S. 491–506.
- RECHARGE (2018):** *PEFCR – Product Environmental Footprint Category Rules for High Specific Energy Rechargeable Batteries for Mobile Applications*. The Advanced and Rechargeable & Lithium Batteries Association.
- 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*. IVL Swedish Environmental Research Institute, Stockholm.
- Safari, M. (2018):** *Battery electric vehicles: Looking behind to move forward*. In: Energy Policy 115 (1), S. 54–65.
- Schmuck, R.; Wagner, R.; Hörpel, G.; Placke, T.; Winter, M. (2018):** *Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries*. In: Nature Energy 3 (4), S. 267–278.
- Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (2014):** *Die wirtschaftliche Lage des Hamburger Taxengewerbes 2014*. Im Auftrag der Freien und Hansestadt Hamburg, Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Innovation.
- Stenzel, P.; Baumann, M.; Fleer, J.; Zimmermann, B.; Weil, M. (2014):** *Database development and evaluation for tech-no-economic assessments of electrochemical energy storage systems*. In: Energy Conference (ENER-GYCON), IEEE International, S. 1334–1342.
- Thielmann, A.; Sauer, A.; Wietschel, M. (2015):** *Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030*. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe.
- Thomas, M.; Ager-Wick Ellingsen, L.; Hung, C. R.; Strømman, A. H. (2018):** *Research for TRAN Committee – Battery-powered electric vehicles: market development and lifecycle emissions*. [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/617457/IPOL\\_STU\(2018\)617457\\_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/617457/IPOL_STU(2018)617457_EN.pdf). Letzter Zugriff am: 7.2.2019.
- Tietge, U.; Mock, P.; German, J.; Bandivadekar, A. (2017):** *From laboratory to road: A 2017 update of official and "real-world" fuel consumption and CO<sub>2</sub> values for passenger cars in Europe*. White Paper International Council on Clean Transportation (ICCT). TNO, Berlin.
- US-EPA (2013):** *Application of Life-Cycle Assessment to Nanoscale Technology: Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles*. No. EPA 744-R-12-001. 2013.
- Van Mierlo, J.; Messagie, M.; Rangaraju, S. (2017):** *Comparative environmental assessment of alternative fueled vehicles using a life cycle assessment*. In: Transportation Research Procedia 25, S. 3439–3449.
- VW (2018):** E-Mail Austausch mit Fachabteilung von VW im November 2018.
- Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E.; Weidema, B. (2016):** *The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology*. In: The International Journal of Life Cycle Assessment 21 (9), S. 1218–1230.

Zackrisson, M.; Avellán, L.; Orlenius, J. (2010): *Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles – Critical issues*. In: Journal of Cleaner Production 18 (15), S. 1519–1529.

Zimmer, W.; Blanck, R.; Bergmann, T.; Mottschall, M.; von Waldenfels, R.; Förster, H.; Schumacher, K.; Cyganski, R.; Wolfermann, A.; Winkler, C.; Heinrichs, M.; Dünnebeil, F.; Fehrenbach, H.; Kämper, C.; Biemann, K.; Peter, M.; Zandonella, R.; Bertschmann, D. (2016): *Renewbility III: Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors – Endbericht*. Öko-Institut, DLR, Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu), INFRAS, Berlin.



# 08 | Anhang

## 8.1 Literaturlauswertung

Im Rahmen der Literaturlauswertung betrachtete Studien				Tabelle 4
Autor	Titel	Jahr	Studienart	Bezugsgröße
<b>ADAC</b>	Konventionelle Antriebe sind lange nicht am Ende	(2018b)	LCA	Elektrofahrzeug
<b>Ambrose; Kendall</b>	Effects of battery chemistry and performance on the life cycle greenhouse gas intensity of electric mobility	(2016)	Meta	Li-Ion-Batterie
<b>Bauer et al.</b>	The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life Cycle Assessment based on a novel scenario analysis framework	(2015)	LCA	Elektrofahrzeug
<b>Cheron et al.</b>	Quelle contribution du véhicule électrique à la transition écologique en France?	(2017)	LCA	Elektrofahrzeug
<b>Daimler AG</b>	Life Cycle. Umweltzertifikat Mercedes-Benz B-Klasse Electric Drive	(2014)	LCA	Elektrofahrzeug
<b>Dunn et al.</b>	Life Cycle Analysis for Lithium-Ion Battery Production and Recycling	(2010)	LCA	Recycling
<b>Dunn et al.</b>	Impact of Recycling on Cradle-to-Gate Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Automotive Lithium-Ion Batteries	(2012)	LCA	Recycling
<b>Dunn et al.</b>	Material and Energy Flows in the Production of Cathode and Anode Materials for Lithium Ion Batteries	(2015)	LCA	Li-Ion-Batterie
<b>Dunn et al.</b>	Life Cycle Analysis Summary for Automotive Lithium-Ion Battery Production and Recycling	(2016)	LCA Batterie Recycling	Li-Ion-Batterie
<b>Ellingsen et al.</b>	The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles	(2016)	LCA	Elektrofahrzeug
<b>Ellingsen et al.</b>	Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack	(2014)	LCA	Li-Ion-Batterie
<b>Hall; Lutsey</b>	Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions	(2018)	Meta	Elektrofahrzeug
<b>Hawkins et al.</b>	Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles	(2013)	LCA	Elektrofahrzeug
<b>Helms et al.</b>	Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen	(2016)	LCA	Elektrofahrzeug
<b>Majeau-Bettez et al.</b>	Life cycle environmental assessment of lithium-ion and nickel metal hydride batteries for plug-in hybrid and battery electric vehicles	(2011)	LCA	Li-Ion-Batterie
<b>Messagie</b>	Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles	(2017)	LCA	Elektrofahrzeug
<b>Notter et al.</b>	Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles	(2010)	LCA	Elektrofahrzeug
<b>Peters et al.</b>	The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review	(2017)	Meta	Li-Ion- Batterie
<b>RECHARGE</b>	PEFCR – Product Environmental Footprint Category Rules for High Specific Energy Rechargeable Batteries for Mobile Applications	(2018)	LCA	Li-Ion-Batterie
<b>Romare; Dahllöf</b>	The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries	(2017)	Meta	Li-Ion-Batterie
<b>US-EPA</b>	Application of Life- Cycle Assessment to Nanoscale Technology: Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles	(2013)	LCA	Li-Ion-Batterie
<b>Van Mierlo et al.</b>	Comparative environmental assessment of alternative fueled vehicles using a life cycle assessment	(2017)	LCA	Elektrofahrzeug
<b>Zackrisson et al.</b>	Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles – Critical issues	(2010)	LCA	Li-Ion-Batterie

## 8.2 Annahmen und wichtige Ergebnisse der eigenen Modellierung

Zentrale Annahmen und Ergebnisse der betrachteten Szenarien							Tabelle 5
	Basisszenario Energie-wende	Sensitivität Strom 2016	Sensitivität Photovoltaik	Sensitivität Stadt	Sensitivität Autobahn	Sensitivität 2030 (35 kWh)	Sensitivität 2030 (60 kWh)
<b>Fahrzeugklasse</b>	Kompaktklasse						
<b>Fahrzyklus</b>	Eigene Modellierung der ADAC Ecotest Teilzyklen, Gewichtung der Straßenkategorien nach TREMOD (ifeu)						
<b>Verbrauch (kWh/100 km) ohne Ladeverluste</b>	16,0	16,0	16,0	12,2	23,8	14,1	15,2
<b>Lebensfahrleistung (km)*</b>	150.000	150.000	150.000	100.000	200.000	150.000	150.000
<b>Strommix (g CO<sub>2e</sub>/kWh)</b>	421 Energiewende geht weiter (basierend auf Pehnt et al. 2018)	567 Strommix aus dem Jahr 2016 (nach Pehnt et al. 2018)	101 Reiner PV-Strom nach ecoinvent 3.4	421 Energiewende geht weiter (basierend auf Pehnt et al. 2018)	421 Energiewende geht weiter (nach Pehnt et al. 2018)	296 Energiewende geht nach 2030 weiter (basierend auf Pehnt et al. 2018)	296 Energiewende geht nach 2030 weiter (basierend auf Pehnt et al. 2018)
<b>Zellchemie</b>	NCM (1:1:1)				NMC (6:2:2)		
<b>Energiedichte (Wh/kg)</b>	115				150		
<b>Treibhausgasemissionen Batterie (kg CO<sub>2e</sub>/kWh)</b>	145				67,5		
<b>Kapazität (kWh)</b>	35	35	35	25	60	35	60
<b>Verbrauch Benzin (l/100 km)</b>	5,9	5,9	5,9	6,1	–	5,2	5,2
<b>Klimavorteil ggü. Benzin</b>	24 %	12 %	50 %	29 %	–	41 %	33 %
<b>Verbrauch Diesel (l/100 km)</b>	4,7	4,7	4,7	–	5,7	4,1	4,1
<b>Klimavorteil ggü. Diesel</b>	16 %	3 %	45 %	–	7 %	35 %	27 %

\* Realistische Lebensfahrleistung, die für die Diskussion verwendet wurde. Dargestellt werden die Ergebnisse in den Abbildungen jedoch für eine Vielzahl von Fahrleistungen (vgl. Abbildungen 11, 12 und 22)



### 8.3 Modellierung der Herstellung, Entsorgung und Wartung der betrachteten Fahrzeuge

#### Fahrzeugherstellung und -entsorgung

Die Modellierung baut auf dem am ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte entwickelten und kontinuierlich aktualisierten Ökobilanzmodell eLCAr auf.<sup>55</sup> Das Modell bildet die Umweltwirkungen von generischen Fahrzeugen mit konventionellen und alternativen Antrieben über deren gesamten Lebensweg ab. Zu diesem Zweck werden bei den Fahrzeugen verschiedene Komponenten-Kategorien wie Rumpf, Motor, Batterie und konzeptspezifische Zusatzbauteile unterschieden und weiter ausdifferenziert. Dabei steht nicht die exakte Abbildung spezieller Fahrzeugmodelle im Vordergrund, sondern die Bilanzierung von mittleren Fahrzeugtypen, mit Fokus auf die jeweils besonders relevanten Materialien. Die mit der Bereitstellung der Rohmaterialien verbundenen Umweltwirkungen sowie die Fahrzeugwartung wurden bisher primär unter Einsatz der Datenbank ecoinvent 2.2<sup>56</sup> bilanziert.

Für diese Studie wurde die Fahrzeugherstellung<sup>57</sup> aktualisiert und das Stoffstrommodell in umberto LCA+ mit der Hintergrunddatenbank ecoinvent 3.4<sup>58</sup> neu aufgesetzt. Gegenüber den vorigen Analysen wurde dabei das Leergewicht auf 1.300 kg in der Benzinvariante erhöht, um den im Mittel gestiegenen Leergewichten der heutigen Kompaktklassefahrzeuge Rechnung zu tragen. Zudem wurde der Einsatz von Aluminium im Fahrzeuggumpf angepasst, um die heutige Situation abzubilden. Für den elektrischen Antriebsstrang wurde abweichend zu früheren Studien der ecoinvent-Datensatz (*powertrain, for electric passenger car*) genutzt, der einen 100-kW-Antriebsstrang, bestehend aus Elektromotor, Konverter/ Inverter, Ladegerät, Elektronik und Kabeln, abbildet. Aufgrund der großen Bedeutung des Automobilstandortes Deutschland wird die Fahrzeugfertigung in Deutschland angenommen.

Die Fahrzeugentsorgung wurde methodisch mit einem *Cut-off*-Ansatz (100:0) abgebildet. Der *Cut-off*-Ansatz berücksichtigt für Primärmaterialien die vollen Umweltlasten der Materialvorkette, für Sekundärmaterialien dagegen gar keine Umweltlasten. Stattdessen trägt der Nutzer die vollen Umweltlasten der Abfallbehandlung, nicht jedoch für das Recycling, da er auch keine Gutschrift für die wiedergewonnenen Materialien erhält. Ein solcher *Cut-off*-Ansatz ist auch in der ecoinvent-Datenbank implementiert

Die Entsorgung erfolgt üblicherweise in mehreren Schritten: Zunächst wird das Fahrzeug manuell in verschiedene Teile zerlegt, dann werden die Reifen, die Starterbatterien, das verbleibende Mineralöl und das Glas abgetrennt und entsorgt. Im Anschluss wird das restliche Fahrzeug üblicherweise in einem Shredder zerlegt. Aus dieser Shredderfraktion können dann verschiedene Materialien für ein Recycling abgetrennt werden. Dies betrifft vor allem Stahl und Eisen, Aluminium und Kupfer. Zudem wird die Plastikfraktion abgetrennt und entsorgt. Zurück bleiben die Shredderreste, die in der Regel verbrannt werden. Zur Abbildung der Entsorgung der verschiedenen Abfallfraktionen wurden Datensätze aus ecoinvent 3.4 genutzt, wobei die Abfallmenge sich aus der Materialzusammensetzung des Fahrzeugs ergibt.

#### Batterieherstellung und -entsorgung

Die Batterie war als zentrale differierende Komponente zwischen den Antriebskonzepten ein Fokus der Bilanzierung und wurde für die Studie neu modelliert. Betrachtet wurden Nickel-Mangan-Kobalt-Zellen (NMC mit 1:1:1-Zellchemie) sowie das Batteriemangement, das Gehäuse und die Kühlung. Dabei sind die zentralen Aspekte der Energieaufwand zur Zellfertigung und die verwendeten Batteriematerialien.

Für die heute gängige Zellfertigung wurde ein Energiebedarf von 11 kWh/kg Batteriekapazität nach RECHARGE (2018) angenommen und anhand einer Energiedichte von 115 Wh/kg auf einen Wert pro Kilogramm Batterie umgerechnet. Dabei wird für den Strommix eine Zellfertigung in den heutigen Produktionsländern in Asien und den USA angenommen (siehe Abbildung 18).

55 Helms et al. (2011, 2013b, 2016)

56 Frischknecht et al. (2005).

57 Wie auch in Helms et al. (2016) verwendet.

58 Wernet et al. (2016).

Daten zum Einsatz von Materialien und Hilfsmitteln in Zelle, Batteriemangement, Gehäuse und Kühlung sowie zu den weiteren Herstellungsprozessen und Hilfsmitteln wurden auf Basis von Ellingsen et al. (2014) abgeleitet. Die Herstellung des Aktivmaterials sowie die Herstellung von Kobaltsulfat basiert auf Majeau-Bettez et al. (2011).

Gegenüber den Daten in Ellingsen et al. (2014) wurden einige wichtige Anpassungen vorgenommen:

- Die Menge des in der Zellherstellung verwendeten N-Methyl-pyrrolidone (NMP) wurde reduziert. NMP wird eingesetzt, um eine Paste (*slurry*) herzustellen, die auf Kathoden- bzw. Anodenstromabnehmer aufgetragen wird. Bei der Trocknung entweicht das NMP. Da dieses Hilfsmittel jedoch sowohl toxisch als auch leicht entflammbar ist, muss es innerhalb der Anlage zurückgewonnen werden und darf nicht einfach an die Luft abgegeben werden. Nach Angaben aus RECHARGE (2018) und Dai et al. (2017) wird das in der Zellfertigung verwendete NMP zu 99,5 Prozent intern zurückgewonnen und wiederverwendet. Daher wird hier nur 0,5 Prozent des NMP-Bedarfes angesetzt.
- Weiterhin mussten Annahmen zum verwendeten Aluminium getroffen werden. In ecoinvent 3.4 variieren die Sekundäranteile (und damit auch die Umweltwirkungen) von Aluminium stark zwischen Walz aluminium (fast ausschließlich aus Primärmaterial) und Gussaluminium (zu etwa 80 Prozent aus recyceltem Aluminium). Während an die Zellbestandteile aus Aluminium hohe Qualitätsanforderungen gestellt werden (dies betrifft Kathodenstromabnehmer, Batteriemangementsystem und Zellgehäuse) und diese damit aus Walz aluminium bestehen, können andere Batteriebestandteile auch aus Gussaluminium gefertigt werden (dies betrifft das Batteriegehäuse und das Kühlsystem).

Für die Entsorgung der Batterien und das Recycling von Materialien wird heute üblicherweise entweder ein hydrometallurgisches oder ein pyrometallurgisches Verfahren angewendet. Für die Bilanzierung in dieser Studie wurde davon ausgegangen, dass eine pyrometallurgische Entsorgung der Zellen im Schachtofen erfolgt. Die Zellen werden zunächst in einem Schachtofen zusammen mit einem schlackeformenden Zusatzstoff (z. B. Kalkstein) erhitzt. Dabei verdampft der Elektrolyt, die kohlenstoff-

haltigen Zellkomponenten (Graphitanode und die Kunststoffe) werden verbrannt und setzen dabei Kohlendioxid frei. Neben der Schlacke entsteht dabei eine Legierung, die die Metalle Kupfer, Nickel und Kobalt enthält.<sup>59</sup> Bei einer hydrometallurgischen Entsorgung werden die Zellen dagegen nicht verbrannt, sondern zerkleinert und mit verschiedenen Chemikalien aufgelöst. Auch hierbei entsteht eine Legierung.

In einem weitergehenden Raffinationsschritt können aus dieser Legierung Kupfer, Nickel und Kobalt zurückgewonnen werden. Dabei können bis zu 99,5 Prozent der enthaltenen Metalle wiedergewonnen werden.<sup>60</sup>

Für die hier vorliegenden Ergebnisse wurde der Datensatz aus Helms et al. (2016) genutzt, aber bereits nach dem Schachtofen abgeschnitten, das heißt, Raffination und Rückgewinnung der Metalle liegen außerhalb der Systemgrenze; es wurden jedoch auch keine Gutschriften für die Materialien vergeben. In einer Sensitivität wurde geprüft, ob ein Recycling von Nickel und Kobalt im Sinne eines *Closed-Loop*-Verfahrens sinnvoll ist. Dabei wird methodisch eine hypothetische Nutzung der erhaltenen Sekundärmaterialien in der baugleichen Batteriezelle unterstellt. Eine grobe Abschätzung zeigt, dass die Treibhausgasemissionen der Raffination durch Einsparungen an Treibhausgasemissionen für Primärmaterialien unter heutigen Bedingungen mehr als kompensiert würden.

Methodisch bleibt eine Anrechnung von Gutschriften jedoch komplex, da ein mögliches Recycling und eine in Zukunft vermiedene Belastung schon heute der Batterie positiv angerechnet werden. Beide können jedoch nicht als selbstverständlich angesehen werden. Im Hinblick auf den geschlossenen Kreislauf sind zum Beispiel Veränderungen in den Materialketten und die Recyclingquoten (auch in anderen Staaten) zu berücksichtigen. Der Ansatz leiht sich also einen Umweltkredit aus der Zukunft und geht damit bewusst das Risiko ein, dass dieser Kredit möglicherweise nicht zurückgezahlt wird, insbesondere dann, wenn es sich um längere Zeitspannen und Zweitmärkte mit unterschiedlichen Recyclingquoten handelt.

59 Dai et al. (2017).

60 Audi (2018).

# Publikationen von Agora Verkehrswende

## Neue Wege in die Verkehrswende

Impulse für Kommunikationskampagnen zum Behaviour Change

## Railmap 2030

Bahnpolitische Weichenstellungen für die Verkehrswende

## Bikesharing im Blickpunkt

Eine datengestützte Analyse von Fahrradverleihsystemen in Berlin

## Parkraummanagement lohnt sich!

Leitfaden für Kommunikation und Verwaltungspraxis

## CO<sub>2</sub>-Minderung bei Pkw – die Rolle der Steuerpolitik

Ein europäischer Vergleich

## Die Kosten von unterlassenem Klimaschutz für den Bundeshaushalt

Die Klimaschutzverpflichtungen Deutschlands bei Verkehr, Gebäuden und Landwirtschaft nach der EU-Effort-Sharing-Entscheidung und der EU-Climate-Action-Verordnung

## Umparken – Den öffentlichen Raum gerechter verteilen

Zahlen und Fakten zum Parkraummanagement

## Öffentlicher Raum ist mehr wert

Ein Rechtsgutachten zu den Handlungsspielräumen in Kommunen

## Klimaschutz im Verkehr: Maßnahmen zur Erreichung des Sektorziels 2030

## Bikesharing im Wandel

Handlungsempfehlungen für deutsche Städte und Gemeinden zum Umgang mit stationslosen Systemen

## Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe

## Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität

Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen

## Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern

12 Thesen zur Verkehrswende

Alle Publikationen finden Sie auf unserer Internetseite: [www.agora-verkehrswende.de](http://www.agora-verkehrswende.de)

**Agora Verkehrswende hat zum Ziel, gemeinsam mit Akteuren aus Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft die Grundlagen dafür zu schaffen, dass der Verkehrssektor in Deutschland bis 2050 dekarbonisiert werden kann. Hierfür erarbeiten wir Klimaschutzstrategien und unterstützen deren Umsetzung.**

**Agora Verkehrswende**

Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 | 10178 Berlin  
T +49 (0)30 700 14 35-000  
F +49 (0)30 700 14 35-129  
[www.agora-verkehrswende.de](http://www.agora-verkehrswende.de)  
[info@agora-verkehrswende.de](mailto:info@agora-verkehrswende.de)

