

# VDI-Analyse der CO<sub>2</sub>äq-Emissionen von Pkw mit verschiedenen Antriebssystemen

A photograph of a woman in a light-colored top and jeans standing at an electric vehicle charging station. She is looking down at her smartphone. The charging station is white and green, with a charging cable plugged into the car. The background is a blurred outdoor setting with green trees and a clear sky.

**Wann wird  
Autofahren  
grün?**

**VDI-Studie**

Bild: © SimonSkafar/gettyimages.com



# Zusammenfassung

Eine Analyse und Bewertung der Eigenschaften mitsamt Verbesserungspotenzialen zur Optimierung der Nachhaltigkeit des Verkehrssektors ist aus ökologischen und politischen Gründen zielführend.

Im Rahmen dieser VDI-Ökobilanzanalyse sind ausgewählte aktuelle Kompaktklassefahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebstechnologien für deren Betrieb in Deutschland untersucht worden. Diese umfassen batterieelektrische Fahrzeuge sowie diesel- und ottomotorische Fahrzeuge in konventioneller Ausführung – als Mild-, Voll- und Plug-in-Hybrid.

Der Treibhausgas(THG)-Emissionsvergleich erfolgte unter Berücksichtigung einer aktuellen Fahrzeugproduktion im Jahr 2021 und Nutzung bis zum Jahr 2035 mit einer Referenzlaufzeit von 200.000 km. Da Rohstoffe und Energieträger sowohl für die Produktionsphase inklusive der Recyclingprozesse als auch für die Nutzungsphase die entscheidenden Einflussfaktoren darstellen, werden unterschiedliche Annahmen verglichen und deren Sensitivitäten evaluiert.

Die Bilanzanalyse betrachtet dabei ausgehend vom Istzustand die resultierenden Effekte. Zum Istzustand gehören die Rahmenbedingungen der Produktion sowie die beschlossenen Entwicklungen des Ausbaus des Energiesystems. Neben einzelnen Szenarien sind Auswirkungen potenzieller technischer Fahrzeugentwicklungen der Zukunft nicht Bestandteil der Analyse.

In Abhängigkeit der unterschiedlichen Annahmen, z. B. dem bei der Bilanzierung herangezogenen Ansatz der Stromversorgung zum Laden der Batterien (mittlerer Strommix bzw. Marginalansatz) oder den unterschiedlichen Fahrprofilen (Kurzstrecke, WLTP usw.) ergibt sich eine

Auf der Basis eines mittleren, sogenannten WLTP-Energiebedarfs der Fahrzeuge ergeben sich bei der Verwendung des mittleren Strommix bei einem batterieelektrischen Fahrzeug mit einer Akkukapazität von 62 kWh THG-Emissionen in Höhe von 24,2 t CO<sub>2äq</sub> über die Lebensdauer. Bei Berücksichtigung des kurzfristigen Marginalstromansatzes resultiert je nach Methodik zur Bewertung der Energieversorgung ein Wert von ca. 33,8 t CO<sub>2äq</sub>. Wird das Fahrzeug mit Solarstrom geladen, ergeben sich 19,1 t CO<sub>2äq</sub>. Beim Fahrprofil „Autobahn“ liegen die Werte bei batteriegrößenabhängigen 27,5 t CO<sub>2äq</sub> bis 29,6 t CO<sub>2äq</sub> beim mittleren Strommix und 40,8 t CO<sub>2äq</sub> bis 42,9 t CO<sub>2äq</sub> bei Analyse mithilfe des Marginalstromansatzes.

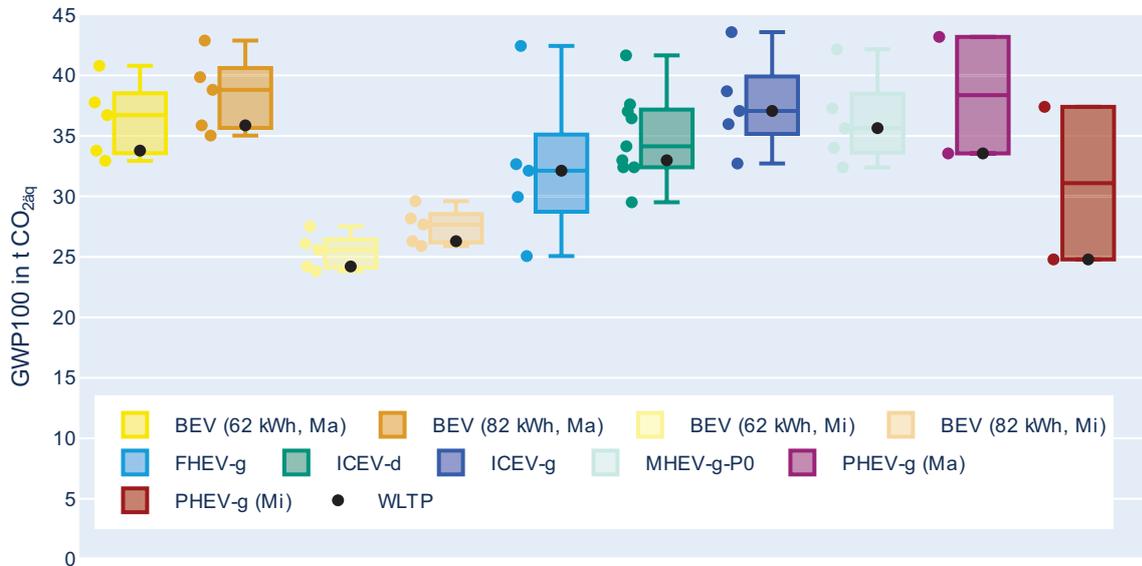
Bei Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen ergeben sich THG-Emissionen zwischen 20,1 t CO<sub>2äq</sub> (WLTP, Solarstrom), 24,8 t CO<sub>2äq</sub> (WLTP, Mittelwertansatz), 33,6 t CO<sub>2äq</sub> (WLTP, Marginalansatz) und 46,0 t CO<sub>2äq</sub> (EcoTest, Hybridmodus) je nach Anwendungsprofil und Analyseansatz.

Bei Diesel- und Benzin- sowie Hybridfahrzeugen ergeben sich THG-Emissionen zwischen 25,1 t CO<sub>2äq</sub> (FHEV-g, Stadtrand) und 43,6 t CO<sub>2äq</sub> (ICEV-g, Kurzstrecke) je nach Technologieausführungen und Fahrprofilen. In Bild 1 ist ein Überblick über die Ergebnisse nach 200.000 km bei unterschiedlichen Energiebedarfen sowie Annahmen bezüglich der elektrischen Energie zu sehen.

Die Produktion eines Hybridantriebs im Vergleich mit einem konventionellen Antrieb ausschließlich mit Verbrennungsmotor bedingt zunächst Zusatzemissionen mit späteren THG-Vorteilen in der Nutzungsphase.

Die THG-Emissionen von batterieelektrischen Komponenten werden entscheidend durch die Produktion von Batterien und den Eigenschaften der Energieträger in der Produktion bestimmt.

Ergebnisstreuband durch unterschiedliche Energiebedarfswerte  
bei Kraftstoffen E10 und B7 sowie elektrischer Energie gemäß KNDE45



**Bild 1.** Zusammenfassung der THG-Emission in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (CO<sub>2</sub>Äq) unterschiedlich angetriebener Fahrzeuge nach 200.000 km inklusive Herstellung unter Variation des Energiebedarfs, der Bereitstellung elektrischer Energie gemäß Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2045“ (KNDE45) unter Verwendung des kurzfristigen Marginalansatzes (Ma) sowie des Mittelwertansatzes (Mi) sowie der aktuellen Standardkraftstoffe E10 und B7.

Mit Blick auf Materialbedarf und Materialverfügbarkeit wird dem Thema Recycling zukünftig eine immer wichtigere Rolle zukommen, die sich auch auf die THG-Emissionen auswirken wird.

Kleine und schnellladefähige Batterien verbessern die THG-Emissionen batterieelektrischer

Es ist im Rahmen der Bilanzanalyse aufgezeigt worden, dass Fahrprofil und Energieträger je nach Antriebskonzept einen entscheidenden Einfluss auf die THG-Emissionen ausüben. Eine weitere technische Verbesserung aller Fahrzeugantriebe kann die THG-Emissionen auch in Zukunft reduzieren. Dies gilt insbesondere für ein konsequent eingesetztes Recycling bei der Batterieherstellung.

# Transparenz als Basis der Diskussion

Es ist eine enorme Herausforderung, die Treibhausgasemissionen im Straßenverkehr zu senken, um das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen. Was ist aber bei der Bewältigung dieser Aufgabe die richtige Strategie bei der Wahl der Antriebsart und dem zugehörigen Energieträger? Sind es rein elektrifizierte Antriebe, sind es hybride Antriebe (Elektro- und Verbrennungsmotor in unterschiedlichen Ausprägungen) oder ist es der Verbrennungsmotor, wenn er mit alternativen Kraftstoffen betrieben wird?

Um diesen komplexen Sachverhalt und die Wirkungen der unterschiedlichen Antriebssysteme auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen entsprechend bewerten zu können, hat der VDI eine neue und erweiterte Ökobilanzanalyse durchgeführt.

Wir haben nach Veröffentlichung der letzten Studie im Jahr 2020 angekündigt, das Thema weiter zu verfolgen, haben uns die Anregungen und auch die Kritik zu Herzen genommen und

bei dieser Studiererstellung berücksichtigt. Inhaltlich ergänzt haben wir in der vorliegenden Studie den Bereich der Hybridfahrzeuge, nicht weiter berücksichtigt wurden hingegen Pkw mit Brennstoffzelle.

Über das in der Expertise erweiterte interdisziplinäre VDI-Expertengremium Antriebe wurde mit Unterstützung des KIT diese Studie erarbeitet und danach einem internen Review im zuständigen VDI-Fachbeirat Kraftfahrzeugtechnik unterzogen. Zusätzlich wurde die Studie aber auch extern durch das Paul Scherrer Institut (PSI) einem zweistufigen Reviewverfahren unterzogen. So möchten wir eine größtmögliche Transparenz bei den Ergebnissen und den gewählten Methoden sowie Rahmenbedingungen gewährleisten.

Ich bedanke mich an dieser Stelle bei allen Fachleuten, die über die letzten 2,5 Jahre diese Studie erarbeitet haben.

Düsseldorf im Dezember 2023



Dr.-Ing. Ralf Marquard  
Sprecher des Expertengremiums Antriebe im  
Fachbereich Kraftfahrzeugtechnik der VDI-  
Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik

# Inhalt

<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>Transparenz als Basis der Diskussion</b>	<b>3</b>
<b>1 Motivation der Bilanzanalyse</b>	<b>7</b>
<b>2 Randbedingungen der Bilanzanalyse</b>	<b>9</b>
<b>3 Methodik der Ökobilanz</b>	<b>12</b>
<b>4 Ziel und Untersuchungsrahmen</b>	<b>13</b>
<b>4.1 Ziel</b>	<b>13</b>
<b>4.1.1 Beabsichtigte Anwendung und Gründe für die Durchführung der Bilanzanalyse</b>	<b>13</b>
<b>4.1.2 Angesprochene Zielgruppe</b>	<b>13</b>
<b>4.1.3 Vergleichende Aussagen in Veröffentlichung</b>	<b>13</b>
<b>4.2 Untersuchungsrahmen</b>	<b>13</b>
<b>4.2.1 Zu untersuchende Produktsysteme</b>	<b>13</b>
<b>4.2.2 Allokationsverfahren</b>	<b>16</b>
<b>4.2.3 Methode für die Wirkungsabschätzung und Wirkungskategorien</b>	<b>16</b>
<b>4.2.4 Methoden der Auswertung</b>	<b>16</b>
<b>4.2.5 Anforderungen an die Daten und Datenqualität</b>	<b>16</b>
<b>4.2.6 Annahmen</b>	<b>16</b>
<b>4.2.7 Werthaltungen und optionale Bestandteile</b>	<b>17</b>
<b>4.2.8 Art und Aufbau des Berichts</b>	<b>17</b>
<b>5 Sachbilanz</b>	<b>18</b>
<b>5.1 Energieträger</b>	<b>18</b>
<b>5.1.1 Elektrische Energie</b>	<b>18</b>
<b>5.1.2 Kraftstoffe</b>	<b>20</b>
<b>5.2 Infrastruktur</b>	<b>20</b>
<b>5.3 Produktion</b>	<b>22</b>
<b>5.3.1 Batterie</b>	<b>23</b>
<b>5.3.2 Leistungselektronik und E-Motor</b>	<b>24</b>
<b>5.3.3 Glider</b>	<b>25</b>
<b>5.3.4 Kühlsystem</b>	<b>25</b>
<b>5.3.5 Weitere Komponenten</b>	<b>25</b>
<b>5.4 Nutzung</b>	<b>25</b>
<b>5.4.1 Allgemeine Angaben zum Energiebedarf und -einsparpotenzial von Fahrzeugen</b>	<b>25</b>
<b>5.4.2 Resultierende Kraftstoff- und Elektrizitätsenergiebedarfe</b>	<b>28</b>
<b>5.4.3 Modellierung der Schadgasemissionen</b>	<b>29</b>

5.5	Lebensende	29
5.5.1	Fahrzeugrecycling	29
5.5.2	Batterierecycling	30
6	Wirkungsabschätzung	33
6.1	Glider vs. Antrieb bzw. Antriebselemente	33
6.2	Produktion von Komponenten	34
6.2.1	Batterie	34
6.2.2	Elektrische Maschine	36
6.3	Produktion und Nutzung von BEV	36
6.3.1	Sensitivität Stromszenario und betroffene Parameter	38
6.3.2	Sensitivität Entwicklung der Stromversorgung	40
6.3.3	Sensitivität der Netzverluste und des Entwicklungsszenarios des deutschen Elektrizitätsnetzes	40
6.3.4	Sensitivität der Klimatisierung	41
6.4	Produktion und Nutzung von ICEV + MHEV + FHEV	43
6.4.1	Sensitivität Verbrauch	43
6.4.2	Sensitivität Kraftstoffe	46
6.5	Produktion und Nutzung von PHEV	47
6.6	Vergleich aller Antriebssysteme nach WLTP und EcoTest	48
6.7	Szenarien	51
6.7.1	Szenario „Fahrt zum Bäcker“	51
6.7.2	Szenario „Langstreckenfahrer“	52
6.7.3	Szenario „P2 Diesel FHEV“	53
6.7.4	Szenario „Kraftstoffentwicklung“	54
7	Interpretation	56
8	Grenzen der Bilanzanalyse	57
9	Zusammenfassung	58
10	Anhang	61
10.1	Überblick aktueller Fahrzeuge und deren Energiebedarf	61
10.2	Weitergehende Informationen zu den betrachteten Energieträgern	63
10.2.1	Aktualisierung der Elektrizitätsprozesse in der ecoinvent-Datenbank	63
10.2.2	Technologische und politische Randbedingungen der Kraftstoffproduktion	70
10.2.3	Kraftstoffszenarien für Deutschland und Schweden	70
10.3	Fahrzeugproduktion	72
10.4	Modellierung der Batterieproduktion	73
10.5	Modellierung des Batterierecyclings	73
10.5.1	Einordnung des Batterierecyclings	73

10.5.2 Hochlaufszzenarien für das Batterierecycling	75
10.6 Modellierung von Leistungselektronik und E-Maschine	77
10.7 Zertifizierung von Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen	78
10.8 Energiebedarfsabschätzung für die Fahrzeugklimatisierung	79
10.9 CO <sub>2äq</sub> -Emissionen durch elektrischen Energiebedarf	80
10.9.1 Vorbemerkungen	80
10.9.2 Generelle Vorgehensweise	82
10.9.3 Emissionsfaktoren	83
10.9.4 Referenzjahr	85
10.9.5 Zieljahr	90
10.9.6 Ergebnisse	93
10.10 Wirkungsabschätzung der E-Maschine	98
Reviewbericht zur „VDI-Analyse der CO <sub>2äq</sub> -Emissionen von Pkw mit verschiedenen Antriebssystemen“	99
Abkürzungsverzeichnis	102
Abbildungsverzeichnis	104
Tabellenverzeichnis	109
Referenzen	110

# 1 Motivation der Bilanzanalyse

Die ökologischen und politischen Anforderungen erfordern eine Überprüfung aller verfügbaren Möglichkeiten, um den Verkehrssektor nachhaltiger zu gestalten. Hierbei werden elektrifizierte Antriebe durch ihren optimierten Energiebedarf in der Nutzungsphase eine wichtige Rolle spielen, wobei produktions- und recyclingbedingte Aufwände berücksichtigt werden müssen. Die Komplexität erhöht sich durch die Vielzahl an Primärenergieträgern. Verschiedene Energiewandlungssysteme neben rein elektrischen Antrieben vergrößern weiter die Komplexität der Analyse.

Diese zunehmende Technologievielfalt war wesentliche Motivation für die Durchführung dieser Arbeit des VDI-Expertengremiums mit dem Ziel, eine möglichst transparente und gleichzeitig technikbasierte Bilanzanalyse verschiedener Antriebskonzepte durchzuführen. Die Analyse berücksichtigt nicht nur technische Ausgestaltungen, sondern zudem verschiedene Fahrprofile, um eine anwendungsspezifische Bewertung vornehmen zu können.

Die gesamtheitliche Wirkung technologischer Maßnahmen muss über den gesamten Lebenszyklus beurteilt werden, um Verbesserungen zu erzielen. Ein derartiger Methodik-Baukasten wird durch die Ökobilanz gegeben, (engl. Life Cycle Assessment, LCA). In Anlehnung an ISO 14040/44 [20; 21] sowie daraus abgeleitete Richtlinien [19; 31] wird auch die LCA elektrifizierter Fahrzeugantriebe in vier Phasen untergliedert.

In der ersten Phase, **Ziele und Untersuchungen** (engl. Goal and Scope, Abschnitt 4), werden die betrachteten Fahrzeuge definiert, aber auch die grundsätzlichen Systemgrenzen abgesteckt sowie die zu beantwortende Fragestellung definiert.

In der folgenden **Sachbilanzphase** (Abschnitt 5) werden die Detaillierungen und Modellierungen der Systeme, Subsysteme und der Energieversorgung dokumentiert. Als Zwischenergebnis ergibt sich eine Liste aller Material-, Emissions-, Energie- und sonstiger Flüsse, die in einem Fahrzeugleben auftreten.

Diese Methodik der Ökobilanz ist aber nicht nur retrospektiv, das heißt für bestehende Produktlösungen einsetzbar, sondern auch als Werkzeug für Ingenieure und Ingenieurinnen während der Entwicklung und Optimierung eines Produkts dienlich. Hierzu ist es zwingend erforderlich, dass eine direkte Verknüpfung zwischen den möglichen Effizienzverbesserungen einerseits und einer ökologischen Bewertung andererseits vorliegt. Eine entsprechende technische Modellierung wird in dieser Bilanzanalyse umgesetzt. Die vorgestellte Betrachtung eignet sich als Methodikergänzung, um komplexe Systeme wie Fahrzeuge mit hybridisierten Antriebssträngen unter dem Blickwinkel einer Ökobilanz zu analysieren und als technische Ausgangsbasis einer Fahrzeug- und Streckensimulation einsetzen zu können.

Die Randbedingungen und Annahmen einer Ökobilanz sind entscheidend für das Ergebnis. In dieser Ausarbeitung werden diese Randbedingungen und Annahmen zu den gewählten Energiequellen, ihrer Lokalisierung und der technischen Abbildung besonders relevanter Baugruppen ausführlich beschrieben. Die in der Sachbilanz erhaltenen Stoff- oder Energieflüsse mitsamt Umweltwirkungen werden als sogenannte **Wirkungsabschätzung** (Abschnitt 6) bezeichnet. Bei der Analyse von THG-Emissionen erfolgt beispielsweise die Umrechnung relevanter Beiträge wie Methan oder Lachgas in CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen CO<sub>2äq</sub>.

In der abschließenden Phase, der **Interpretation** (Abschnitt 7), werden die Ergebnisse ausgewertet und hinsichtlich vorliegender Sensitivitäten untersucht sowie diskutiert. Aufgrund der Vielschichtigkeit der Thematik kann in dieser Bilanzanalyse nicht jeder einzelne Aspekt berücksichtigt werden. Diesem Umstand ist der Abschnitt **Grenzen der Bilanzanalyse** (Abschnitt 8) gewidmet.

Eine entscheidende Motivation der Bilanzanalyse ist das verbleibende „THG-Restbudget“, also die verbleibende Emissionsmenge, bis zu der das gesteckte 1,5°-Ziel noch erreicht werden kann. Dieses THG-Restbudget wird durch Fahrzeugproduktion, Nutzung, Recyclingaufwendungen, aber auch durch den Aufbau der

benötigten Infrastruktur stückweise aufgebaut [37].

Nachfolgend sind die wesentlichen für die Analyse wichtigen Randbedingungen sowie die Kernaussagen der Bilanzanalyse zusammengefasst.

## 2 Randbedingungen der Bilanzanalyse

- Im Rahmen dieser Bilanzanalyse wurden Kompaktklassefahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebstechnologien bei deren Betrieb in Deutschland untersucht. Diese umfassen batterieelektrische Fahrzeuge, sowie diesel- und ottomotorische Fahrzeuge in konventioneller Ausführung, sowie als Mild-, Voll- und Plug-in-Hybrid.
- Der THG-Emissionsvergleich erfolgte unter Berücksichtigung einer aktuellen Fahrzeugproduktion im Jahr 2021 und Nutzung bis zum Jahr 2035 mit einer Referenzlaufzeit von 200.000 km. Da Rohstoffe und Energieträger sowohl für die Produktionsphase inklusive der Recyclingprozesse als auch für die Nutzungsphase die entscheidenden Einflussfaktoren darstellen, werden unterschiedliche Annahmen verglichen und deren Sensitivitäten evaluiert.
- Die Bilanzanalyse betrachtet nicht die Fahrzeugproduktion in der Zukunft, beispielsweise im Jahr 2030 und die resultierende Nutzung bis ins Jahr 2045, da sowohl die benötigten Szenarien nicht ausreichend vorliegen, sowie die Unschärfe der vorhandenen Informationen eine noch weiter in die Zukunft gerichtete Analyse nicht zulassen.
- Die Bilanzanalyse betrachtet dabei ausgehend vom Istzustand der Rahmenbedingungen der Produktion sowie zudem den beschlossenen Entwicklungen des Ausbaus des Energiesystems die resultierenden Effekte. Neben einzelnen Szenarien sind Auswirkungen potenzieller technischer Fahrzeugentwicklungen der Zukunft aber nicht Bestandteil der Analyse.
- Vertieft analysiert wurden im Rahmen dieser Ausarbeitung verschiedene Hebel auf die THG-Emissionen der Fahrzeuge durch folgende Sensitivitäten, Annahmen und Szenarien:
  - elektrische Bordnetzspannungsebenen, Speichergrößen der Batterie und Variationen verschiedener Antriebskomponenten
  - Produktionsort/Energiebereitstellung für Produktion und Recycling, exemplarische Betrachtung für China, Frankreich und Polen<sup>1</sup>
  - Fahrenergiebedarf nach dem gesetzlichen Zertifizierungsprüfverfahren (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure, WLTP) gemäß Einsatzprofil (Kurzstrecke-, Stadt-, Land- und Autobahnbetrieb). Darüber hinaus wurde der Energiebedarf für die Fahrzeugklimatisierung batterieelektrischer Fahrzeuge betrachtet.
  - Neben fossilen Kraftstoffen wurden auch Biodiesel(Fettsäuremethylester, FAME)-Kraftstoffe, Hydrierte-Pflanzenöl(HVO)-Kraftstoffe, FT-Diesel- und synthetische Benzinkraftstoffe (Methanol-to-Gasoline, MtG) als Beimischung untersucht.
  - Mögliche Rohstoffverfügbarkeits- (z. B. Kupfer) oder Supply-Chain-Fragestellungen sowie Fragestellungen zur Resilienz der Lieferketten wurden bei der Analyse des Hochlaufs des Batterierecyclings berücksichtigt. Verschiedene Aspekte des Batterierecyclings werden betrachtet, eine finale Aussage zu den Auswirkungen auf die THG-Emissionen ist aber wegen der noch unsicheren Datenlage nicht möglich. Sowohl Chancen als auch Risiken wurden identifiziert. Recycling wird in dieser Analyse als potenzielle

---

<sup>1</sup> Es werden Länder betrachtet, in denen bereits Batterien hergestellt werden (China und Polen), davon eines in

Europa sowie ein europäisches Land mit niedrigem Treibhausgas-Footprint im Elektrizitätssektor (Frankreich).

- Rohstoffersatzquelle innerhalb der Produktion modelliert. Die alternative Betrachtung als zusätzlicher Effekt am Ende des Produktlebenszyklus wurde wegen der Komplexität der Zuordnung nicht angewandt.
- Der Wechsel des Energieträgers bei verbrennungsmotorischen Antriebselementen muss über die zusammenhängende Modellierung von Synthese und Einsatz regenerativ synthetisierte Kraftstoffe (reFuels) erfolgen:
    - Norm-Ottokraftstoff- und Norm-Ottokraftstoff-kompatible Kraftstoffe (EN 228 bzw. EN 590) bilden die Basis der vergleichenden Analyse.
    - Das Potenzial der reFuels ist in Form von Szenarien in unterschiedlichen Beimischungsquoten in die Analyse mit eingeflossen<sup>2</sup>
  - Vorgaben und Potenziale der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie II (RED II) zur Reduzierung des CO<sub>2</sub><sub>äq</sub>-Fußabdrucks von Kraftstoffen wurden nicht berücksichtigt. Die rechtliche Umsetzung ist zum Zeitpunkt der Studienerstellung in Deutschland noch nicht abgeschlossen.
  - Die Randbedingungen zur elektrischen Energieversorgung sind nachfolgend aufgeführt:
    - Als Referenzleitszenario für den Ausbau des Energiesystems wird die Analyse „Klimaneutrales Deutschland 2045“ [74] verwendet.
    - Vereinfachend wird eine orts- und zeitunabhängige Weiterleitung der elektrischen Energie innerhalb der Bilanzgrenzen angenommen. Dies entspricht einem Szenario ohne Begrenzung der Übertragungsleistung des Elektrizitätsnetzes. Verluste werden gemäß Angaben der
  - Netzbetreiber berücksichtigt. Power Purchase Agreements (PPA) werden nicht berücksichtigt. Die den PPA-Verträgen zugrunde liegenden Zertifikate lassen sich nicht im Sinne der LCA allokieren. Viele dieser den Zertifikaten zugrunde liegenden Versorgungen liegen außerhalb des betrachteten Systemrahmens.
  - Die Bilanzierung der THG-Emissionen des Strombezugs zur Nutzung der Fahrzeuge wird sowohl im kurzfristigen Marginalansatz als auch im Mittelwertansatz durchgeführt und nebeneinander dargestellt.
  - Die Bilanzierung der THG-Emissionen des Strombezugs der Produktion des Gesamtfahrzeugs erfolgt wegen begrenzter Datenverfügbarkeit und der Komplexität der Modellierung internationaler Produktionsschritte ausschließlich im Mittelwertszenario.
  - Der Infrastrukturaufbau für das Stromnetzsystem inklusive indirekter THG-Effekte wurde aufgrund der Komplexität nicht berücksichtigt. Eine Ausnahme stellen die Ladestationen dar, die in der Ökobilanz ohne Berücksichtigung der Realisierung ihres Netzanschlusses abgebildet wurden. Die Infrastruktur zur Herstellung und Verteilung der Kraftstoffe wird entsprechend der genutzten Datenbanken inklusive der Logistik bis zur Tankstelle berücksichtigt, exklusive Instandhaltungsaufwendungen für die Infrastruktur.
  - Bei der Analyse der Produktion und Nutzung von batterieelektrischen Antrieben wurden ebenfalls Sensitivitäten auf der Basis einer Batterie mit einer NMC-721-Zellchemie betrachtet. Verschiedene Herstellungsorte wurden zudem analysiert. Nachgelagert

<sup>2</sup> Detaillierte Informationen s. a. [www.refuels.de](http://www.refuels.de)

wurden weitere Rahmenbedingungen des Fahrzeugbetriebs (bspw. Fahrzeugklimatisierung) bewertet. Es wurden keine finanziellen Aspekte, Steuern, CO<sub>2</sub>-Zertifikate, Emis-

sionshandels-Effekte (European Union Emissions Trading System ETS), Subventionen, oder Strafzahlungen berücksichtigt.

### 3 Methodik der Ökobilanz

Der methodische Ansatz der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040/14044 umfasst die ganzheitliche Betrachtung von Umweltauswirkungen der gesamten Prozesskette der Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produkts [61; 62]. In Bild 2 sind die vier Phasen einer Ökobilanz nach [61] zu erkennen.

Dabei werden zunächst Ziel sowie Untersuchungsrahmen definiert (1). Danach werden in der Sachbilanz (Life Cycle Inventory, LCI) Input- und Output-Flüsse gemäß Massen- und Energieerhaltungsgesetz für das betrachtete System analysiert (2). Auf Basis der Sachbilanz findet die Abschätzung der potenziellen Wirkungen auf die Umwelt statt (3). Die abschließende Auswertung (4) reflektiert die Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment, LCIA).

Bei vergleichenden Ökobilanzen ist zudem ein Review vorgesehen, was im Zuge dieser Publikation erfolgt ist.

Die Konsistenz der Methodik wird überprüft. Relevante Prozessparameter können somit durch Schlussfolgerungen identifiziert werden. Hieraus können wiederum entscheidende Empfehlungen abgeleitet werden. Die Pfeile in Bild 2 zwischen und innerhalb der vier Phasen weisen auf den iterativen Charakter der Methodik hin. Neben der Prüfung auf Vollständigkeit und diverser Sensitivitätsanalysen beinhaltet die LCA-Methodik daher auch eine möglichst transparente Auflistung der Annahmen und Randbedingungen.

Das Ergebnis einer LCA-Studie kann zum Vergleich unterschiedlicher Produkte herangezogen werden. Ebenso sind die Erkenntnisse zur ökologischen Verbesserung von Produkten wertvoll, sodass die Analysemethode als Entwicklungswerkzeug eingesetzt werden kann.

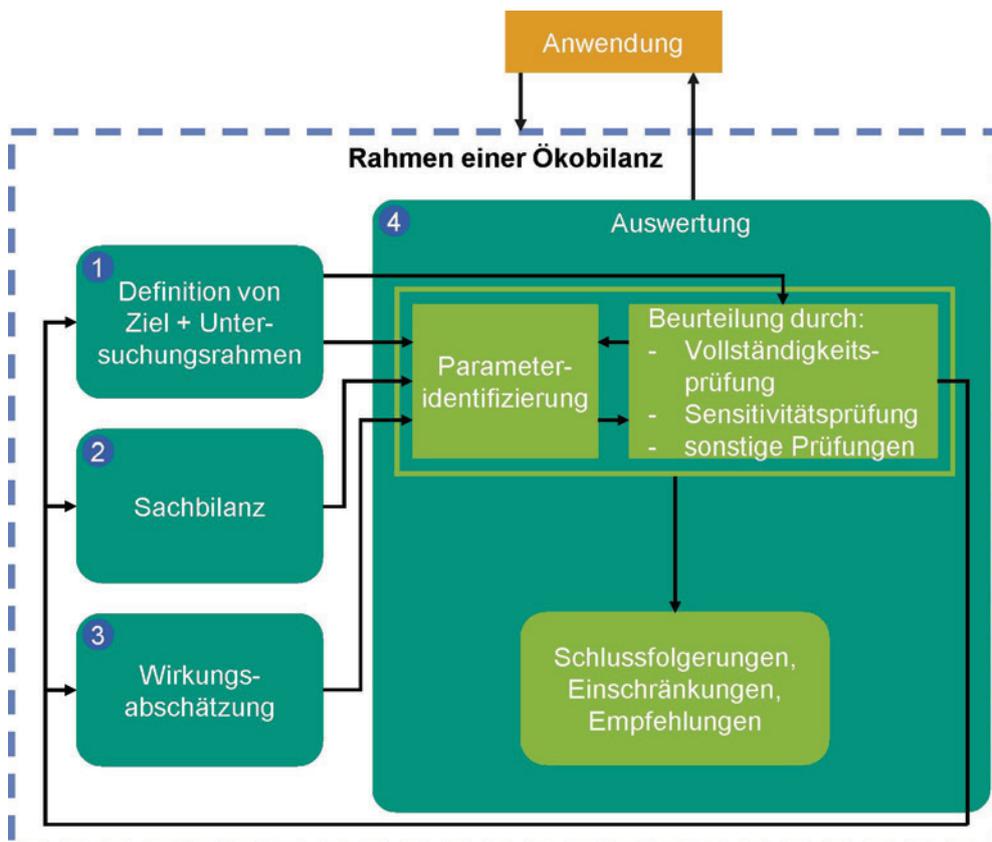


Bild 2. Die vier Phasen einer Ökobilanz nach [83] aus [21]

# 4 Ziel und Untersuchungsrahmen

In den folgenden Abschnitten werden zunächst das Analyseziel sowie der Untersuchungsrahmen vorgestellt und diskutiert. Darauf aufbauend werden die Systemgrenzen (s. a. Bild 3) detailliert. Die Vielzahl der vorgestellten Eingangsgrößen macht deutlich, wie stark die in einer Studie hinterlegten Annahmen und auch die Qualität der Eingangsgrößen das Ergebnis entscheiden. Die Analysemethodik von verschiedenen Studien mit deutlich abweichenden Aussagen ist oftmals sehr ähnlich. Jedoch wirkt bereits die Definition des Untersuchungsrahmens und der Randbedingungen sowie weiterer Basisdaten entscheidend und beeinflusst das Bilanzergebnis.

Eine Analyse ist generell nicht als finales Ergebnis zu betrachten, sondern wie oben dargestellt, Teil eines iterativen Prozesses.

## 4.1 Ziel

### 4.1.1 Beabsichtigte Anwendung und Gründe für die Durchführung der Bilanzanalyse

Ziel der Bilanzanalyse ist neben der Vorstellung und Weiterentwicklung der Methodik der Ökobilanzierung eine Versachlichung der Diskussion über die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Antriebsstrangkonzeppte für bestimmte Anforderungen und Einsatzzwecke hinsichtlich ihrer THG-Emissionen. Hiermit sollen Schwachstellen aufgedeckt und Entwicklungen zielgerichtet vorangetrieben werden.

### 4.1.2 Angesprochene Zielgruppe

Die Bilanzanalyse richtet sich insbesondere an Ingenieure und Ingenieurinnen sowie technisch interessierte Bürger, Bürgerinnen, Politiker und Politikerinnen.

### 4.1.3 Vergleichende Aussagen in Veröffentlichung

Die Veröffentlichung erfolgt dabei in Form einer VDI-Studie, in dessen Rahmen Antriebstechnologien unter gegebenen Annahmen verglichen werden.

## 4.2 Untersuchungsrahmen

### 4.2.1 Zu untersuchende Produktsysteme

Als Produktsysteme werden Kompaktklassefahrzeuge unterschiedlicher Hybridisierungsgrade mit rein verbrennungsmotorischen und batterieelektrischen Fahrzeugen verglichen. Die betrachteten Produktsysteme sind verbrennungsmotorische Diesel- und Benzinfahrzeuge (ICEV-d und ICEV-g), mild hybridisierte Diesel- und Benzinfahrzeuge (MHEV-d und MHEV-g), Vollhybride (FHEV-d und FHEV-g), Plug-in-Hybride (PHEV-g) und batterieelektrische Fahrzeuge mit unterschiedlichen Batteriekapazitäten (BEV 62 kWh und BEV 82 kWh).

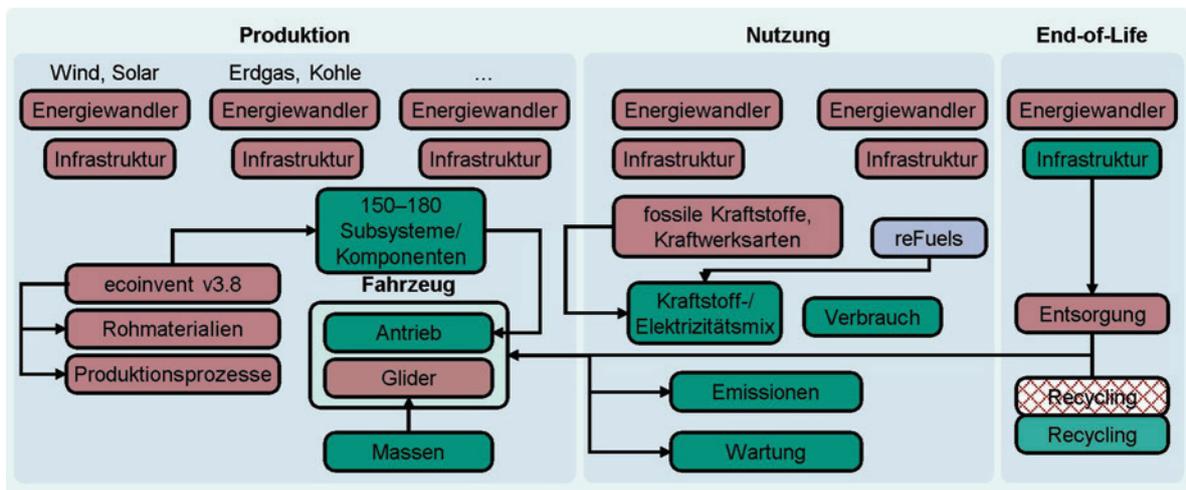
Wesentliche Parameter der Bilanzanalyse sind dabei die Betriebsspannungsebene der Hybride (48 V und 400 V) und die Energieträger (Elektrizität und Kraftstoffe wie E10, B7, HVO, MtG-Benzin, e-Diesel).

Die weiteren fahrzeugspezifischen Parameter werden an aktuelle Fahrzeuge angelehnt und in Tabelle 1 zusammengefasst. Neben der Einordnung in unterschiedliche übergeordnete Antriebsarten wird bei parallelen Hybridantrieben zudem, wo verfügbar, die Antriebsarchitektur angegeben. Gemäß der Position der elektrischen Maschine in Parallelhybriden werden hierbei Bezeichnungen wie „P0“ (E-Maschine anstelle des Anlassers) oder „P2“ (E-Maschine am Getriebeeingang) verwendet. Weitere Informationen hierzu inklusive Angaben zu möglichem Potenzial für Verbrauchseinsparungen durch Hybridisierung können unter anderem [75] entnommen werden.

Neben öffentlich verfügbaren Daten, wie beispielsweise Leergewicht und WLTP-Verbrauch, müssen auch Annahmen bzgl. der Masse von Subsystemen und Komponenten getroffen werden. Weitere Informationen hierzu sind im Abschnitt 5 zu finden. Zur Abbildung zusätzlicher Nutzungsprofile werden in dieser Analyse auch weitere Verbrauchswerte, beispielsweise für den Stadt-, Land- oder Autobahnbetrieb oder gemäß ADAC EcoTest verwendet, sofern verfügbar. Eine Visualisierung dieser Verbrauchs-

Tabelle 1: Übersicht der Parameter der exemplarisch ausgewählten Fahrzeuge

Antriebsart	BEV 62 kWh	BEV 82 kWh	ICEV-g	ICEV-d	MHEV-g-P0	MHEV-d-P2	FHEV-g	FHEV-d-P2	PHEV-g
Hersteller	VW	VW	Ford	VW	Ford	-	Toyota	-	VW
Modell	ID.3	ID.3	Focus	Golf	Focus	-	Corolla	-	Golf
Variante	Pro Performance	Pro S (5-Sitzer)	1.0 EcoBoost Cool & Connect Design	2.0 TDI SCR Life	1.0 Eco-Boost Hybrid Cool & Connect Design	2.0 MHEV-d-P2	1.8 Hybrid Comfort	2.0 FHEV-d-P2	1.4 e-Hybrid Style DSG
Segment	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Modelljahr	2021-	2021-	2022	2020	2022-	2024-	2019-	2024-	2020-2022
Hubraum in ℓ	-	-	1,0	2,0	1,0	2,0	1,8	2,0	1,4
Kraftstofftank in ℓ	-	-	52	45	52	40	43	40	39,5
AdBlue-Tank in ℓ	-	-	-	12	-	12	-	12	-
Batteriekapazität nettolbrutto in kWh	58162	77182	-	-	10,48	1,5	0,75 1,3	3	10,4 13
Batterieenergie-dichte in Wh/kg	173	173	-	-	100	100	100	100	100
EG-Leergewicht in kg	1812	1928	1330	1380	1349	1494	1285	1546	1590
Antriebsmasse in kg	504	627	198	332	210	364	265	416	426
Glider-Masse in kg	1233	1226	1022	939	1025	1025	916	1025	1062
Kraftstoffbedarf in ℓ/100 km nach WLTP	-	-	5,4	4,2	5,1	3,7	4,5	3,5	0,9
Bedarf elektrischer Energie in kWh/100 km nach WLTP	15,75		-	-	-	-	-	-	13,7
Reichweite im WLTP in km	426	549	963	1071	1020	1111	956		76 (el.)
EM-Leistung in kW	150	150	-	-	11,5	20	53	53	85
EM-Drehmoment in N·m	310	310	-	-	24	150	163	163	330
VM-Leistung in kW	-	-	92	85	92	85	72	85	110
VM-Drehmoment in N·m	-	-	170	300	170	300	142	300	250
Getriebe	1-Gang-Getriebe	1-Gang-Getriebe	6-Gang-MT	6-Gang-MT	6-Gang-MT	7-Gang DSG	CVT	7-Gang DSG	6-Gang-DSG



**Bild 3. Systemgrenzen der Umweltbilanzierung eines Fahrzeugs.** Die Bereiche der Hintergrund-Datenbank sind dabei rot hinterlegt, die in dieser Bilanzanalyse durchgeführte Modellierung der Vordergrund-Datenbank in grün. Die Modellierung der Kraftstoffsynthese (hellblau hinterlegt) wurde aus dem Projekt „reFuels - Kraftstoffe neu denken“ [7] übernommen. Die benötigte Straßeninfrastruktur wird nicht berücksichtigt.

werte kann dem Abschnitt 5.4.2 entnommen werden.

Um in einem Szenario Potenziale einer stärkeren Hybridisierung aufzuzeigen, werden theoretische Vergleichsfahrzeuge (ohne Angabe von Hersteller und Modell) herangezogen, deren Verbrauchswerte von Untersuchungen von Zuliefererunternehmen stammen. Es sei angemerkt, dass auch die realen Fahrzeugmodelle lediglich als Referenz bezüglich ihrer technischen Spezifikation dienen, aber mangels Datenverfügbarkeit nicht vollständig abgebildet werden können. Die Vergleichsmodelle wurden zwischen den Jahren 2020 und 2024 produziert, während in der LCA-Betrachtung das Jahr 2021 als Beginn der Nutzungsphase definiert wird.

Zeitlich beginnt der Lebensweg mit der Produktion im Jahr 2021 und dauert bis zum Jahr 2035, wofür für die Stromversorgung publizierte Szenariowerte herangezogen werden.

Wechselwirkende Effekte wie elektrische Eigenversorgung der Kraftwerke und Pumpspeicherkraftwerke werden berücksichtigt. Bei Stromimport und -export wird die Annahme getroffen, dass die Anteile der Energieträger sich nicht ändern<sup>3</sup>. Auf Basis von Elektrizitätsdaten in 15-minütiger Auflösung wird die zeitliche Abhängigkeit der Nutzung und Bereitstellung der Elektrizität abgebildet, siehe Anhang (Abschnitt 10.9.)

Die Herstellung der relevanten Fahrzeugkomponenten erfolgt entsprechend der globalisierten Automobilherstellung durch globale Datensätze der ecoinvent-Datenbank.

Diese bilden die geografische Verteilung der Förderung und Verarbeitung verschiedener Materialien und Halbzeuge ab.

Für die besonders energieintensive Herstellung der Batterie sowie ihrer Komponenten wird die Herstellung in China, Polen und Frankreich im Rahmen dieser Bilanzanalyse betrachtet, um die

<sup>3</sup> Hierbei ist anzumerken, dass in der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ angenommen wird, dass der importierte Strom langfristig erneuerbar erzeugt wird. Zumindest mittelfristig wird die Bedeutung der Herkunft des

Importstroms aber als gering eingeschätzt, da das Importsaldo im Jahr 2035 mit 0 TWh angenommen wird [66].

Streuung zwischen „günstigen“ und „ungünstigen“ Standorten aufzuzeigen.

Neben dem Energiebedarf nach WLTP werden je nach Datenverfügbarkeit weitere Zyklen und Szenarien betrachtet, womit der Einfluss unterschiedlicher Fahrmuster auf das Ergebnis betrachtet werden kann. Weitere Informationen sind dem Abschnitt 5.4.2 zu entnehmen.

Im nachfolgenden Abschnitt sowie im Abschnitt 5 werden weitere Details zur Systemgrenze erläutert.

#### 4.2.2 Allokationsverfahren

Bei der Allokation der Umweltwirkungen orientiert sich die Bilanzanalyse an der in der ecoinvent-Datenbank hinterlegten ökonomischen Vorgehensweise. In der selbst modellierten Vordergrund-Datenbank sind keine Prozesse mit Co-Produkten enthalten, weshalb keine Allokation durchgeführt wird. Diese ist lediglich für die im Kraftstoffszenario betrachteten Diesel-Kraftstoffe aus erneuerbaren Quellen relevant, wobei hier die THG-Werte aus der entsprechenden Publikation verwendet werden [7].

In diesem Zusammenhang wird auf die Modellierungsoption zum Lebensende verwiesen, die in dieser Bilanzanalyse nach dem sogenannten Cut-off-Prinzip durchgeführt wird. Gemäß diesem Prinzip werden Aufwendungen zur Durchführung des Recyclings (Energie, verwendete Chemikalien und deren Umweltwirkungen) wie eine alternative Rohstoffgewinnung betrachtet und der Produktion des Produkts angelastet. Die durch das Recycling gewonnenen Materialien werden von der Menge der notwendigen Rohstoffe abgezogen und reduzieren deren Umweltwirkungen. Die Nutzung des Sekundärrohstoffs entlastet damit die Primärproduktion hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen, berücksichtigt zugleich die hierzu notwendigen Aufwendungen. Bei Fahrzeugen ist das Recycling der Metalle ein etablierter Prozess, der auch Logistikkümpfungen berücksichtigt. Das Recycling von Verbundwerkstoffen ist hingegen gemäß der Materialverfügbarkeit als auch hinsichtlich der Serienreife der zu industrialisierenden Recyclingtechnologien begrenzt. Die betrifft insbesondere Kunststoffe oder elektrochemische Energiespeicher.

#### 4.2.3 Methode für die Wirkungsabschätzung und Wirkungskategorien

Die Auswertung der Wirkungen erfolgt anhand der Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe 2016. Hierbei werden die Midpoint-Kategorien nach dem Hierarchist-Verhalten verwendet [36]. Diese Unterart der LCIA-Methode wird in openLCA auch als „ReCiPe Midpoint (H)“ bezeichnet.

#### 4.2.4 Methoden der Auswertung

In dieser Bilanzanalyse wird die THG-Wirkung bewertet, die in sogenannten CO<sub>2aq</sub>-Äquivalenzen angegeben wird. Hierbei werden in Anlehnung an die im IPCC-Report angegebene Methodik sowohl direkt emittiertes CO<sub>2</sub> als auch andere Treibhausgase berücksichtigt. Diese Gase werden multipliziert mit einem Charakterisierungsfaktor, der ihrer THG-Wirkung im Vergleich zu CO<sub>2</sub> (z. B. Faktor 34 für Methan) entspricht.

#### 4.2.5 Anforderungen an die Daten und Datenqualität

Die in der Bilanzanalyse herangezogenen Daten müssen transparent dargestellt oder öffentlich sein. Bevorzugt kommen Daten aus wissenschaftlichen Publikationen zum Einsatz.

Zeitaufgelöste Elektrizitätsdaten werden öffentlichen Quellen entnommen, als Zukunftsszenario wird die Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ herangezogen [66].

#### 4.2.6 Annahmen

Die Bilanzanalyse betrachtet den gesamten Lebenszyklus der betrachteten Fahrzeuge. Eingeschlossen sind dabei deren Produktion und deren Nutzung. Das Recycling wird nur eingeschränkt berücksichtigt, weitere Informationen sind dem Abschnitt 5.5 zu entnehmen. Gleiches gilt für die notwendige Infrastruktur (Abschnitt 5.2).

Ungeachtet der Betriebsarten, bspw. Stadt- oder Autobahnfahrt, wird eine jährliche Fahrleistung von 13.333 km über eine 15-jährige Laufzeit bis 2035 angenommen, was einer Gesamtfahrleistung von 200.000 km entspricht.

#### **4.2.7 Werhaltungen und optionale Bestandteile**

Im Kontext von Ökobilanzen repräsentieren Werhaltungen die Gewichtung oder Normierung einer Umweltwirkung, was auch indirekt durch getroffene einschränkende Annahmen erfolgen kann. Da im Zuge dieser Publikation lediglich die Umweltwirkung des Klimawandels

betrachtet wird, wird keine Gewichtung, Normierung oder Ordnung angewendet.

#### **4.2.8 Art und Aufbau des Berichts**

Der Bericht zu dieser Bilanzanalyse erfolgt in Form einer VDI-Studie, der gemäß den Anforderungen der Ökobilanz-Normen einem kritischen Review unterzogen wurde.

# 5 Sachbilanz

Dieses Kapitel gibt einen Einblick in die Sachbilanzphase der vorliegenden Bilanzanalyse. Dabei werden auch zentrale methodische Schritte erläutert. Zunächst werden die Annahmen bezüglich der Energieversorgung dargelegt, da sich diese auf alle weiteren Prozesse auswirken. In der Folge werden Infrastruktur (Abschnitt 5.2), Produktion (Abschnitt 5.3), Nutzung (Abschnitt 5.4) und Lebensende (Abschnitt 5.5) beschrieben. Einzelne Sachbilanzinhalte, die nicht der Geheimhaltung unterliegen, werden als Datei auf der VDI-Homepage bereitgestellt.

## 5.1 Energieträger

Bei der Modellierung der Nutzungsphase, also des Betriebs der Fahrzeuge über mehrere Jahre, müssen Annahmen bezüglich der benötigten Energieträger getroffen werden. Ausgehend vom Istzustand des Energiesystems wirkt sich dabei insbesondere aus, welche Veränderungen während des Fahrzeuglebens eintreten werden. Hierbei spielen technische sowie politische Randbedingungen eine Rolle.

Neben netzgebundenen Versorgungen sowie etablierten Kraftstoffen auf fossiler Basis werden auch zwei Insellösungen betrachtet, die heimische PV-Anlage und synthetische Kraftstoffe aus regenerativen Energiequellen.

### 5.1.1 Elektrische Energie

Ein Energiesystem wie beispielsweise das deutsche Stromnetz ist ein komplexes System aus schwankender Last und resultierender Energieversorgung. Die Beschreibung dieses Gesamtsystems für die vorliegende Bilanzanalyse wäre aufgrund vieler zeit- und ortsabhängiger Parameter unverhältnismäßig aufwendig. Zwei Ansätze der Bilanzanalyse kommen zur Beschreibung derartiger Systeme häufig zum Einsatz, der sogenannte Mittelwertansatz und der sogenannte kurzfristige Marginalansatz.

Welche physikalischen Größen nun Mittelwert- und Marginalansatz für ein beschriebenes Stromsystem mit definierten Systemgrenzen und unterschiedlichen Energieeinspeisungen repräsentieren, wird im Anhang (Abschnitt 10.9) detailliert beschrieben.

Der Mittelwertansatz liefert die mittlere CO<sub>2</sub>-Emission von allen vorhandenen elektrischen Verbrauchern im Sinne eines arithmetischen Mittelwerts über feste Zeiträume. Der Marginalansatz repräsentiert die Grenzkosten, also das CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial bei Abschaltung eines elektrischen Verbrauchers beziehungsweise die CO<sub>2</sub>-Zusatzemissionen bei Hinzufügen eines weiteren elektrischen Verbrauchers.

Zudem wurde im Rahmen dieser Bilanzanalyse im Sinne einer Grenzwertabschätzung der Betrieb mit spezifischen Energiequellen des elektrischen Energiesystems, beispielsweise mit Strom aus der heimischen PV-Anlage oder Erdgas, abgebildet.

Bei der ökobilanziellen Modellierung technischer Prozesse wird auf höherer Systemebene insbesondere Wärme und elektrische Energie benötigt. In der verwendeten ecoinvent-Datenbank stehen für beide Energieformen je nach Land und Technologien unterschiedliche Datensätze zur Verfügung, die durch einen zeitlichen Versatz (zwischen Datenerhebung und Berücksichtigung in der Hintergrunddatenbank) gekennzeichnet sind und keine Prognosewerte enthalten. Für diese Bilanzanalyse wurden die vorhandenen Prozesse der Hintergrunddatenbank zur Beschreibung der Wärmeversorgung verwendet. Für eine Abbildung in jedem Zeitintervall (15 Minuten) des Jahres ist jedoch eine genaue Kenntnis des Angebots und der Nachfrage von elektrischer Energie vonnöten, weshalb die Verfügbarkeit von zeitlich aufgelösten Elektrizitätsdaten für eine Bilanzanalyse unabdingbar ist [40]. Aufgrund ihrer hohen Relevanz wurden die Datensätze zur Beschreibung der elektrischen Energieversorgung aktualisiert und durch zusätzliche Modelle erweitert. Hierbei wurden der Wert für die Netzverluste von ca. 6 % beibehalten. Die Vorgehensweise wird im Anhang (Abschnitt 10.2.1) erläutert.

Der elektrische Energiemix für die Produktion (sogenannter „Strommix“) berechnet sich aus dem über die Liefermengen gewichteten Kraftwerksmix. Die elektrische Versorgung der modellierten Produktions- und Nutzungsprozesse und ihrer Umweltwirkungen wird anhand der jeweiligen Lokalisierung zeitaufgelöst abgebil-

det. Basierend auf den jeweiligen Bruttowerten (das heißt unter Berücksichtigung von Import, Energiebedarf der Energieversorgung und ohne Sondereffekte von Pumpspeicherkraftwerken) [45] entspricht dies damit auch den EU-Vorgaben (EU-Richtlinie 2009/28/EC, Ziffer 9). Bild 4 zeigt exemplarisch die Stützstellen zur Modellierung der Quellen der deutschen Stromversorgung. Elektrizität aus Wasserstoff wird dabei in der aktuellen Modellierung noch nicht berücksichtigt, siehe auch Anhang (Abschnitt 10.9).

Folgende Potenziale und Herausforderungen des elektrischen Energiesystems sind nicht dezidiert abgebildet.

Potenziale hinsichtlich einer Verbesserung der THG-Emissionen:

- Bidirektionales Laden als Teil des Energienetzes verbessert die Nutzung von Strom in Überschussstunden.

- Internationaler Netzaufbau verbesserte die Verfügbarkeit von CO<sub>2äq</sub>-armer elektrischer Energie.
- Grüner Wasserstoff als Energieträger in der Vorkette auch bei Blends mit fossilen Kraftstoffen oder in Produktionsprozessen kann die CO<sub>2äq</sub>-Bilanz weiter verbessern.

Herausforderungen hinsichtlich einer Verbesserung der THG-Emissionen:

- Verzögerungen beim Infrastrukturaufbau verschleppen den Nutzen der Maßnahme.
- Signifikante Zunahme der elektrischen Energiebedarfe (Wärmepumpen, weitere Elektrifizierung im Industriesektor) als Ausgangspunkt für eine Verschlechterung der elektrischen Versorgung in der Nutzungsphase bedingt eine deutliche Zunahme von sogenannter „erneuerbarer Energien“.

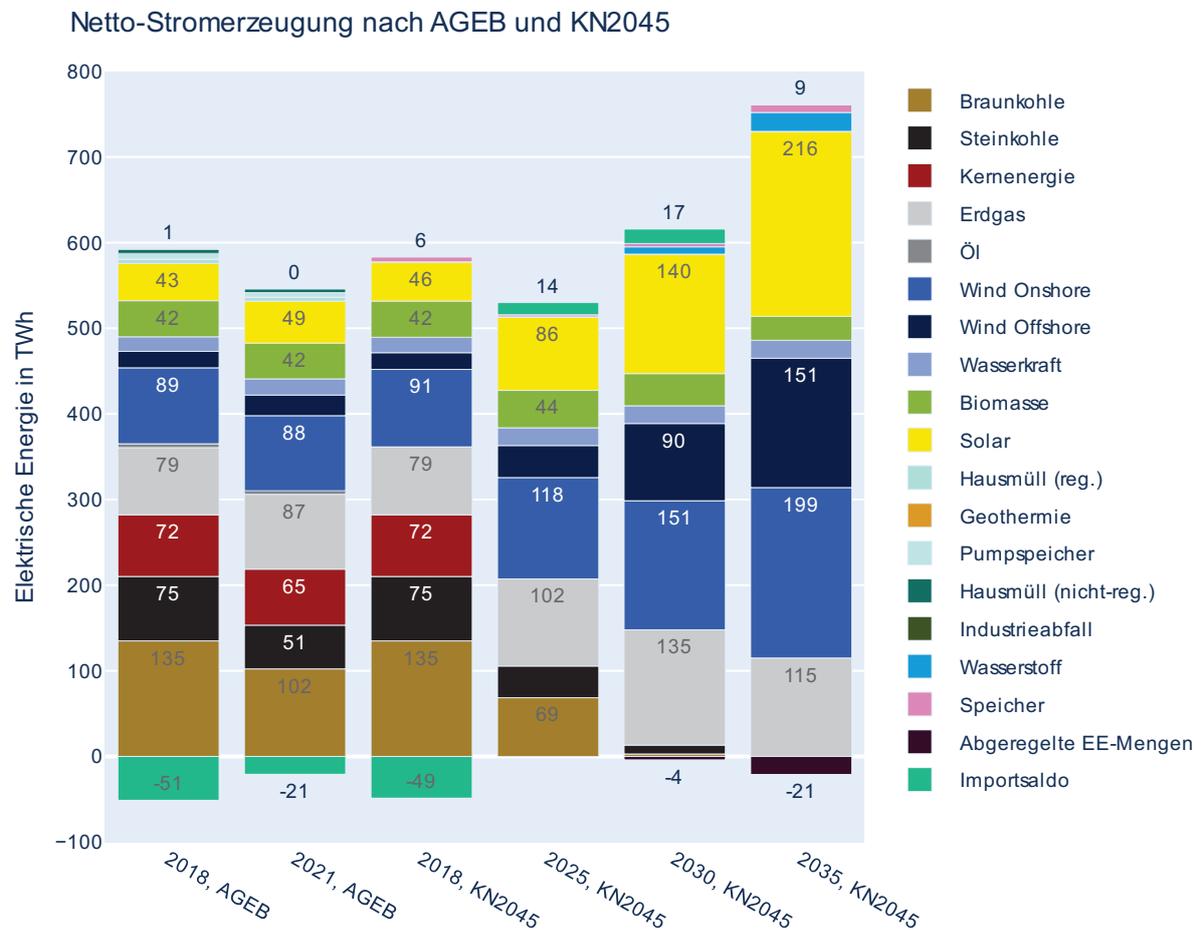


Bild 4. Entwicklung der Netto-Stromerzeugung in Deutschland nach AGEB [9] sowie Prognosen nach [74]

- THG-Emissionen durch Infrastrukturaufbau (Leitungen, Transformation, Speicher) sind schwer bezifferbar und werden im Rahmen dieser Bilanzanalyse weitestgehend nicht abgebildet.
- Wegfall der heute über Grundlastkraftwerke realisierten Sekundenreserve zur Sicherstellung der Netzstabilität führt zu Sekundäreffekten, die nicht abgebildet werden.

## 5.1.2 Kraftstoffe

Die im Verhältnis zum Gesamtenergiebedarf begrenzten Möglichkeiten, in Deutschland Energie aus regenerativen Quellen zu nutzen, erfordern einen Wechsel beim Import der Energieträger. Während heute der Import von fossilem Gas und Öl dominiert, müssen die Energieträger der Zukunft defossilisiert sein, in Form von elektrischer Energie, Wasserstoff oder in ihrer Herstellung CO<sub>2äq</sub>-negativer<sup>4</sup> Kraftstoffkomponenten.

Fossile Kraftstoffe sind in der Bilanzanalyse inklusive der entsprechende Vorkette unter Nutzung der Hintergrunddatenbank ecoinvent v3.8 abgebildet. Entsprechende Transportprozesse können auch für synthetische Kraftstoffe herangezogen werden, wenn diese die heute für Benzin- und Dieselmotoren üblichen Kraftstoffnormen EN 228 und EN 590 erfüllen.

In einer im Vorfeld durchgeführten ökobilanziellen Modellierung unterschiedlicher Kraftstoffsynthesen wurden die Produktion der jeweiligen Syntheseanlagen (analog der Produktion der Fahrzeugkomponenten) mit einer mittleren elektrischen Energieabbildung gemäß den ENTSO-E-Daten ausgewählter Länder versorgt. Die Synthese, also die eigentliche Herstellung der Kohlenwasserstoffe mithilfe elektrischer Energie wurde über eine Darstellung von

Insellösungen abgebildet, die damit auch der Anforderung des aktuell von der Europäischen Kommission vorgeschlagenen Rechtsakts zur RED II entspricht [25]. Die Abbildung der Synthese der Kraftstoffe ist inklusive der in der Hintergrunddatenbank hinterlegten Vorketten für die Energieversorgung und unter detaillierter Modellierung der Syntheseprozesse bilanziell umgesetzt worden und wird detailliert in der Literatur beschrieben [7]. Die betrachteten Installationen sind mit separater Versorgung über Fotovoltaik und/oder Windenergie ausgestattet und versorgt.

Die Referenzbezüge bei allen verbrennungsmotorischen Antriebselementen werden für konventionelle Kraftstoffe mit Benzin (E10) und Dieselmotoren (B7) definiert. Die Potenziale und Grenzen regenerativer Kraftstoffe wiederum werden stark von den Ausgangsstoffen (Feedstock) und der jeweiligen Energieversorgung der Prozesse bestimmt. Je nach Synthesepfad wurden die entsprechenden Parameter berücksichtigt.

Die Abbildung regenerativ synthetisierter Kraftstoffe erfolgt gemäß der im Projekt „reFuels – Kraftstoffe neu denken“ erarbeiteten und wissenschaftlich bestätigten Ökobilanzierung. Bezüglich der detaillierten Beschreibung wird auf die entsprechende Dokumentation verwiesen [7].

Im Anhang (Abschnitt 10.2.2) werden technologische und politische Randbedingungen der Kraftstoffproduktion erläutert.

## 5.2 Infrastruktur

THG-Emissionen, die zum Aufbau einer Infrastruktur emittiert werden, liefern einen relevanten Beitrag mit Blick auf das verbleibende THG-Restbudget (die Menge an CO<sub>2</sub>-Emissionen, die

<sup>4</sup> Der Begriff „CO<sub>2</sub>-negativ“ ergibt sich, da bei der Herstellung von „erneuerbaren“ Kohlenwasserstoffen zunächst CO<sub>2</sub> aufgenommen wird (aus Biomasse oder aus der Luft) und prozessbedingt, bspw. durch die benötigte Energie,

möglichst wenig CO<sub>2</sub> ausgestoßen wird. Somit kann der Kraftstoff als CO<sub>2</sub>-negativ bezeichnet werden, bis im Betrieb der im Kraftstoff enthaltene Kohlenstoff möglichst vollständig in CO<sub>2</sub> umgewandelt wird.

seit 2018 noch anthropogen freigesetzt werden, um die für das 1,5°-Ziel definierte kumulierte CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre nicht zu überschreiten). Die Betrachtung der Sachbilanz der Infrastrukturen lässt sich in zwei Bereiche gliedern:

- **Wartung und Instandsetzung bestehender Infrastruktur**  
→ Dieser Bereich ist eher der Lebenszyklusphase der Nutzung zuzuordnen.
- **Aufbau neuer Infrastruktur:**  
→ Dieser Bereich ist eher der Lebenszyklusphase der Produktion zuzuordnen.

Die Beschreibung der für bestimmte Szenarien notwendigen, noch aufzubauenden Infrastruktur der Hochspannungs-Energieübertragung ist schwer abzugrenzen von den Maßnahmen, die im Rahmen des Ausbaus der elektrischen Energiesystems ohnehin geplant sind, bspw. dem Aufbau der Nord-Süd-HGÜ-Verbindungen. Gegenstand der Diskussion ist beispielsweise auch die Zuordnung einzelner Infrastrukturmaßnahmen zu einzelnen Sektoren oder Zielgruppen. So sind die entsprechend anfallenden Aufwendungen bei den Mittel- und Niederspannungsnetzen komplex hinsichtlich der Zuordnung zu einem Sektor oder einer Zielgruppe. In einem „all-electric“-Szenario würde bei der Betrachtung auch die teilweise vorzunehmende Allokation der Aufwendungen auf den Heizbedarf mittels Wärmepumpen berücksichtigt werden müssen. Aus diesem Grund werden gegebenenfalls notwendige Infrastrukturmaßnahmen zur Verbesserung der Energiedistribution in dieser Bilanzanalyse nicht berücksichtigt.

Im Rahmen dieser Bilanzanalyse wird zur Berücksichtigung der Infrastruktur der Stromnetze jeweils auf die schon bestehenden ecoinvent-Vorketten zurückgegriffen, die auf jeder

Spannungsebene die bekannten entsprechenden Übertragungsnetzwerke enthalten. Die Effekte eines verstärkten Netzausbaus werden damit nicht berücksichtigt.

Basierend auf der Ladeinfrastrukturverteilung wurde das Verhältnis zwischen Wallbox-Ladestationen und Schnellladestationen ermittelt und gewichtet auf die Flotte angewandt [88]. Chinesische Quervergleiche der Ladeinfrastrukturverteilung wurden hierbei herangezogen. Insbesondere in Regionen mit dort staatlich geförderter Elektromobilität stellte sich eine bekannte und repräsentative Infrastrukturverteilung ein [87].

Diese Verteilung deckt sich mit europäischen Betrachtungen [49]. Das Ladesäulenregister der Bundesnetzagentur enthält 67.288 Normalladepunkte und 13.253 Schnellladepunkte, die am 01. Januar 2023 in Betrieb waren [12].

Laut Förderrichtlinie der Bundesregierung wurden Mittel für die Installation von ca. 900.000 privaten Wallbox-Ladestationen investiert [32; 53]. Nicht berücksichtigt werden bei dieser Betrachtung die nicht öffentlichen Ladepunkte insbesondere von Firmen, Gesellschaften etc. Basierend auf Gesprächen mit Herstellern von Ladeinfrastruktur sind die produktionsbedingten THG-Emissionen verschiedener Ladetechnologien und -geräte aufgeführt [87; 88]. Demnach ergeben sich 0,1 t CO<sub>2äq</sub> für eine Wallbox, 0,08 t CO<sub>2äq</sub> für ein AC-Ladegerät und 0,71 t CO<sub>2äq</sub> für ein öffentliches DC-Ladegerät (andere Schnellladegeräte liegen in der gleichen Größenordnung)<sup>5</sup> [87]. Wird die oben beschriebene Verteilung der Ladestationstypen zugrunde gelegt und auf die am 31.01.2023 zugelassene Zahl batterieelektrischer Fahrzeuge und Plug-In-Hybride bezogen, errechnet sich eine Infrastrukturemission von 0,078 t CO<sub>2äq</sub>/Fahrzeug.

---

<sup>5</sup> In der [88] zugrunde liegenden Masterarbeit werden Ladeverluste von 9 % bis 13 % ausgewiesen [87], im zugehörigen Paper allerdings Fixwerte von 4.000 kWh

(Wallbox), 6.000 kWh (AC-Laden), 330.000 kWh (DC-Laden), und 390.000 kWh (AC- und DC-Ladestationen gemischt) angegeben [89].

Die Auswirkungen einer Wallbox können damit als eher gering eingestuft werden. In Summe entspricht die bis Ende 2022 aufgebaute Ladefrastruktur ohne Energiebereitstellungseffekte einer THG-Emission von ca. 147.000 t CO<sub>2äq</sub> und würde hochskaliert auf 15 Mio. batterieelektrische Fahrzeuge bei gleichem Proporz der Ladestationstypen und unter Annahme der o. g. Werte in 1,24 Mio. t CO<sub>2äq</sub> produktionsbedingten THG-Emissionen münden (0,3 ‰ des deutschen THG-Restbudgets von 2000) [1; 73]. Montageaufwendungen sind hierbei ebenso wenig berücksichtigt, wie Anschluss-Verkabelungen. Nicht berücksichtigt wurden ferner weiterführende und eventuell benötigte Umfänge wie der Ausbau von verbesserten Niederspannungsnetzen, die hierfür benötigten Rohstoffe, Tiefbau- oder eventuelle Hochbaumaßnahmen.

### Kernaussage

Während 11-kW-Wallboxen bezüglich ihrer Herstellung eine untergeordnete Rolle spielen, hat ein höherer Anteil von Schnellladestationen einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die infrastrukturbedingten THG-Emissionen.

## 5.3 Produktion

Die Realisierung einer parametrisierbaren und skalierbaren Bilanzanalyse war eine wichtige Unteraufgabe dieser Arbeit. Hierbei wird vorausgesetzt, dass die funktionellen und produktionsrelevanten Unterschiede zwischen Subsystemen, die in Fahrzeugen mit unterschiedlichen Antriebskonzepten vorliegen, durch eine Parametrisierbarkeit modelliert werden können. Dies bedeutet, dass basierend auf einer gewählten Batteriekapazität und einer gewählten Leistung der elektrischen Maschine die notwendige Dimensionierung der Teilelemente und Berechnung von deren Massen durchgeführt wird. Spezielle Lösungen für einzelne Konzepte können so nicht abgebildet werden, aber die wesentlichen Auswirkungen können anhand von Sensitivitätsbetrachtungen bestätigt werden.

Wesentliche Elemente eines Fahrzeugs mit elektrifiziertem Antriebsstrang sind neben dem Verbrennungsmotor mit seiner Abgasnachbehandlung

- die Batterie (funktionelle Variablen: maximale Speicherenergiegröße in kWh und die verwendete Zusammensetzung der Batterie),
- die E-Maschine (funktionelle Variablen sind die Leistung und das Drehmoment) inklusive der Ansteuerelektronik, gegebenenfalls dem Wechselrichter, und
- die Leistungselektronik (funktionelle Variablen sind die Leistung und das Spannungsniveau mit Leistungsverteilung, Inverter).

Neben diesen Hauptelementen sind ferner abgebildet

- das Kühlsystem,
- Kabelbaum mit einer Anpassung an die jeweilige Antriebstopologie (Hochspannungskabelbaum und Leistungskabelbaum),
- das Gehäuse der Leistungselektronik,
- die elektronische Bremseinrichtung,
- das Bordladegerät,
- das Fahrzeugsteuergerät.

Die wesentlichen Materialmengen ergeben sich insbesondere aus der Modellierung der Antriebs- und Glider-Masse. Unter dem Glider versteht man das Restfahrzeug nach Abzug der Antriebsstrangkomponenten, des Tankinhalts und des Fahrers. Üblicherweise wird die Masse von verschiedenen Antriebskomponenten nicht publiziert. Angaben zu verbrennungsmotorischen Antriebsmodulen stammen aus den Stücklisten moderner Benzin- (1 Liter Hubraum) und Dieselmotoren (2 Liter Hubraum). In hybridisierten Antriebskonzepten werden ähnliche funktionale Elemente in unterschiedlichen Konfigurationen eingesetzt und auch in batterieelektrischen Fahrzeugen verwendet. Um den Aspekt der technischen Beschreibung und der Skalierung einzelner Systeme und Subsysteme abzubilden, werden die einzelnen Komponenten und Subsysteme jeweils parametrisierbar und mit Bezug auf die technischen Zusammenhänge skalierbar modelliert. Dies bedeutet konkret, dass die Systeme und Subsysteme gemäß ihrer Funktion technisch strukturiert werden und

jedes System bezüglich seiner Funktionalität parametrisierbar modelliert wird.

Die entsprechende Strukturierung insbesondere des hybridisierten Antriebsstrangs erfolgt deshalb nach einem Schema, bei dem sich hierarchische und funktionelle Stufen abwechseln, siehe auch Bild 53 im Anhang (Abschnitt 10.3).

Die Glider-Masse wurde gemäß der ausgewählten Fahrzeugbeispiele aus den Herstellerdaten bestimmt. Da teilweise hybridisierte Anwendungen noch nicht für jede Antriebskonfiguration der Kompaktklasse vorliegen, mussten stellenweise die Daten skaliert werden.

Unterschiedliche Antriebsstrangkonzeppte bedingen unterschiedliche Antriebsstranggewichte. Als Ergebnis zeigen die ausgewählten Fahrzeuge zudem voneinander abweichende Glider-Massen. Die Auswirkungen auf die THG-Emissionen des Gliders werden im Vergleich zum Antrieb bzw. den Antriebselementen im Abschnitt Wirkungsabschätzung im Abschnitt 6.1 dargestellt.

Diese wesentlichen Systemelemente werden im Folgenden detaillierter beschrieben. So findet sich beispielsweise das Ladegerät nur beim PHEV und BEV und nicht bei den übrigen Hybridisierungsformen.

### 5.3.1 Batterie

Die Produktion der Antriebsbatterien wird wesentlich von dem Materialeinsatz und dem in der Zellproduktion notwendigen Energieeinsatz dominiert. Die Modellierung erfolgt aus diesem Grund mit der Möglichkeit, die Zellproduktion als auch die Batterieproduktion einer spezifischen Lokalisierung zuzuordnen, wobei die spezifische Energieversorgung berücksichtigt wird. Ausnahme ist hierbei die Vorverarbeitung der Rohstoffe. So erfolgen z. B. die Gewinnung und Vorverarbeitung des Graphits in den Ländern, in denen der Rohstoff „gewonnen“ wird. Bei Rohstoffen mit mehreren Herkunftsländern werden die Rohstoffe als sogenannter Markt gemäß der publizierten Länderverteilung abgebildet. Firmen, die spezifische Materialketten und Verarbeitungen aufgebaut haben, können daher zu abweichenden Ergebnissen gelangen.

Wie in Bild 5 für eine Batterie dargestellt, beeinflussen die Zellenmaterialien und die Masse das Analyseergebnis entscheidend. Dementsprechend bedingen die verwendeten Materialien und Prozesse auch einen großen Einfluss auf die mit der Produktion verbundene THG-Emission.

Massen-Anteile der Batterie mit 82 kWh

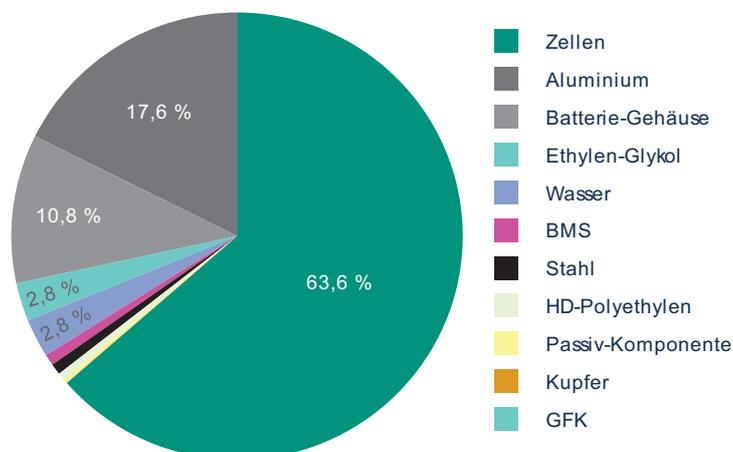


Bild 5. Massen-Zusammensetzung der selbstmodellierten Batterie mit NMC 721-Chemie und einer Bruttokapazität von 82 kWh. Die Modellierung basiert auf dem ecoinvent-Datensatz einer NMC 811-Batterie sowie einer publizierten Strip-down-Analyse des VW ID.3 inklusive des Batteriesystems [82].

BMS - Batterie-Management-System; GFK - glasfaserverstärkter Kunststoff

Der zweite große Einflussfaktor auf die mit der Produktion verbundenen Umweltwirkungen sind die Vorketten der zur Herstellung verwendeten Prozesse und Energiequellen. Dieser Effekt ist im Abschnitt Wirkungsabschätzung im Abschnitt 6.2.1 dargestellt.

Grundsätzlich werden bei der Produktion die Vorketten zu allen Komponenten berücksichtigt, indem die technische Struktur jeweils inklusive aller Produktions- und Transportprozesse mit Nutzung der Hintergrunddatenbank ecoinvent v3.8 bis hin zu den Rohstoffen abgebildet ist.

Die Weiterentwicklung von Batterien zeigt sich deutlich in Kobalt-ärmeren Batterietypen mit höherer gravimetrischer Energiedichte. Dies bedeutet wiederum einen reduzierten Materialbedarf. Der reduzierte Kobaltbedarf geht mit entsprechend erhöhten Nickelanteilen einher [38]. Der aktuell am häufigsten eingesetzte Batterietyp arbeitet mit Kathodenmaterialien aus Nickel, Kobalt und Mangan und wird in Beschreibung des Gewichtsverhältnis dieser drei Anteile als NMC abgekürzt, beispielsweise als NMC 433, NMC622, NMC721 oder NMC811 bezeichnet. Die beiden letztgenannten Batterietypen zeichnen sich durch reduzierten Bedarf an Kobalt und Mangan sowie höhere gravimetrische Energiedichten aus. Diese veränderte Zusammensetzung der Batterie zeigt jedoch eine andere Sensitivität hinsichtlich des Sauerstoffaustritts aus der Kathode. Diesem Verhalten wird mit produktionstechnischen Maßnahmen der Aufbereitung der Kathodenmaterialien, Kathodenpaste und Fertigung der Kathode begegnet [15; 38; 52]. In dieser Bilanzanalyse wird der Fokus auf den, in den hier betrachteten Kompaktklassefahrzeugen weit verbreiteten, Batterietypen NMC721 gelegt. Die Modellierung weiterer Batterietypen wie NCA und NMCA wird im Rahmen dieser Analyse nicht umgesetzt. Hierzu werden die bekannten Modelle [18] mit Daten aus einer Analyse des ID.3 [35] und den konkreten chemischen Zusammensetzungen abgeglichen und das Modell diesbezüglich optimiert. Das in der Datenbank ecoinvent v3.8 hinterlegte Modell nach Dai wurde hinsichtlich der vorgegebenen Materialzusammensetzung ergänzt [18].

Bei der Berechnung batteriebezogener Kenngrößen ist die gewählte Bezugsbasis Zelle oder

Batterie entscheidend. Zellenbezogene Größen, wie die gravimetrische Energiedichte allein, sind allein für die Bestimmung der Umweltwirkungen noch nicht ausreichend. Erst das Batteriegesamtsystem, bestehend aus mehreren Zellen in Modulen, unter Berücksichtigung der gesamten Montage mehrerer Module inklusive weiterer notwendiger Systeme wie dem Kühlsystem definieren erst den gesamten Energiespeicher. Die technische Umsetzung in der LCA-Datenbank ist im Anhang (Abschnitt 10.4) beschrieben.

Da durch technische Randbedingungen und Lebensdauereffekte der Batteriespeicher nicht zu 100 % genutzt werden kann, wird zwischen der Bruttokapazität und der Nettokapazität des elektrischen Energiespeichers unterschieden. Zur korrekten Berücksichtigung aller Umweltwirkungen wurden in dieser Bilanzanalyse ausschließlich Brutto-Batteriekapazitäten betrachtet.

### 5.3.2 Leistungselektronik und E-Motor

Sowohl Leistungselektronik als auch E-Maschine müssen an die jeweilige Leistung angepasst werden. Diese Bilanzanalyse baut in weiten Bereichen auf den Vorarbeiten von *Nordelöf et.al.* [57; 60] auf und setzt diese in die oben beschreibende Datenbankstruktur um. Die entsprechenden Auslegungskriterien sind die Nennleistung des Wechselrichters oder die Nennspannung des Bordnetzes. Ein entsprechend den Quellen programmiertes Softwarewerkzeug berechnet Materialzusammensetzungen und Materialmassen.

Diese werden mit Realdaten aus Ersatzteildatenbanken abgeglichen, sofern verfügbar. Die wiederum derart validierten Daten werden in ein Modell gemäß *Nordelöf et.al.* [57] implementiert (s. a. Bild 58 im Anhang, Abschnitt 10.6).

Die dort präsentierte skalierbare Struktur ist nur bei 250-V- bis 700-V-Architekturen und im Leistungsbereich zwischen 20 kW bis 200 kW valide.

Der entsprechende 48-V-Wechselrichter wurde deswegen auf Basis des in der Hintergrunddatenbank ecoinvent v3.8 hinterlegten Prozesses „converter“ abgebildet.

Bei der 48-V-Struktur wurde das E-Maschinen-Modell auf Basis der Daten eines Riemenstartergenerators erstellt, die ein Expertenkreismitglied zur Verfügung gestellt hat. Der Aufbau des Riemenstartergenerators ist in Bild 59 im Anhang (Abschnitt 10.6) zu sehen. Auch hier wurde die vorgestellte grundlegende skalierbare Struktur beibehalten, um mit der Datenbank einen parametrisierbaren Wechsel zwischen den Antriebsstrangtopologien zu ermöglichen.

### 5.3.3 Glider

Der Glider berechnet sich gemäß der üblichen Vorgehensweise aus dem EG-Leergewicht des Fahrzeugs abzüglich des Antriebsstrangs, dem Tankgewicht und der Beladung (69 kg Person + 6 kg Zuladung). Aus Vergleichbarkeitsgründen wurden Fahrzeuge mit ähnlichen Glider-Massen ausgewählt. Sekundäreffekte wie beispielsweise stärkere und somit schwerere Bremsen oder Achskomponenten bei einer erhöhten Fahrzeugmasse sind nicht berücksichtigt worden.

### 5.3.4 Kühlsystem

Das Kühlsystem einer Verbrennungskraftmaschine ist als Subkomponente des Motors modelliert. Die Kühlsysteme des E-Motors und der Batterie und die resultierenden jeweiligen Komponenten wurden abgebildet. Dementsprechend gibt es bei der Modellierung kein Kühlsystem auf der übergeordneten Ebene. Diese Kühlsysteme werden nur als Subsystem abgebildet. Hierzu notwendige Materialien wurden den Komponenten (Verbrennungsmotor, elektrische Maschine und Batterie) zugeordnet.

### 5.3.5 Weitere Komponenten

Beim Kabelbaum muss insbesondere bei einer Anpassung an die jeweilige Hybridtopologie (Hochspannungskabelbaum und Leistungskabelbaum) vor allem der Kupferbedarf abgebildet werden.

Das Getriebe wurde aus der Literatur [80] übernommen und bezüglich der bereitgestellten Stoffflüsse der Hintergrunddatenbank ecoinvent 3.8 überarbeitet.

### 5.3.5.1 Das Bordladegerät

Um einen einfachen Ladevorgang mit einer Wallbox oder einem Niederspannungsanschluss zu ermöglichen, verfügen BEV und PHEV über ein in das Fahrzeug integriertes Ladegerät. Die Modellierung dieses Ladegeräts lag in einem separaten Prozess in der ecoinvent v3.8-Datenbank bereits vor und wurde in den Fahrzeugprozess eingebunden.

### 5.3.5.2 Das Fahrzeugsteuergerät

Das Fahrzeugsteuergerät stellt einen Sonderfall dar und wird trotz seines engen Bezugs zum Antriebsstrang üblicherweise als Teil des Gliders betrachtet und wird deshalb auch bei dieser Bilanzanalyse dem Glider und nicht dem Antriebsstrang zugeordnet.

## 5.4 Nutzung

### 5.4.1 Allgemeine Angaben zum Energiebedarf und -einsparpotenzial von Fahrzeugen

Für die zugrunde gelegten Energiebedarfe werden Werte herangezogen, die aus Fahrzeugmessungen resultieren. Zudem kommen publizierte Werte zum Einsatz [5; 48]. Hieraus ergibt sich ein Streuband, wie in den Bildern im Anhang (Abschnitt 10.1) dargestellt ist. Aus diesem Streuband wird ein repräsentativer Wert für die betroffene Fahrzeugklasse und Spannungslage abgeleitet. Die gleiche Vorgehensweise wird auch für die Festlegung der elektrischen Reichweiten und Energiedichten genutzt.

### 5.4.1.1 Mild-Hybrid-Fahrzeug (MHEV) und Voll-Hybrid-Fahrzeug (FHEV)

Hybridantriebe zeichnet eine besonders große Bandbreite verschiedener technischer Lösungen aus. Neben dem Hybridisierungsgrad wird die Nutzungsphase wesentlich durch die Antriebsarchitektur beeinflusst.

Neben leistungsverzweigten Hybriden insbesondere aus dem asiatischen Raum (Beispielfahrzeug Toyota Corolla) haben sich dabei Parallelhybride mit unterschiedlichen Positionierungen der E-Maschine etabliert.

In [75] werden die Effekte unterschiedlicher Varianten von Mildhybriden mit paralleler Hybrid-Architektur beschrieben. Neben der elektrischen Leistung wirkt sich dabei insbesondere die Lage der E-Maschine aus. Bei den meisten aktuellen Mildhybriden ersetzt ein Riemenstartergenerator den Anlasser, was auch als P0-Konfiguration bezeichnet wird. Bei Verwendung einer E-Maschine mit 16 kW Leistung wird ein Potenzial zur  $\text{CO}_{2\text{aq}}$ -Reduktion um 6,6 % erwartet. Wird eine E-Maschine ähnlicher Leistung in einem P2-Hybrid vor dem Getriebeeingang positioniert, ergeben sich eine Reduktion von bis zu 15,8 % [75]. Dies verdeutlicht, dass aktuell im Feld befindliche MHEV noch nicht das gesamte Potenzial der 48-V-Technologie ausschöpfen. Die Technologie hält sowohl bei benzinmotorischen als auch bei dieselmotorischen hybridisierten Fahrzeugen erst schrittweise Einzug. Dies gilt umso mehr für Voll-Hybride (FHEV), die aktuell überwiegend mit Benzinmotor verfügbar sind. Im Zuge eines Szenarios wird im Rahmen dieser Bilanzanalyse zudem untersucht, welches Potenzial dieselmotorische P2-Hybridfahrzeuge als MHEV (20 kW EM-Leistung) bzw. FHEV (60 kW EM-Leistung) bieten.

Eine Meta-Analyse aktueller Tests des ADAC [5; 48] und auch weitere Simulationsrechnungen haben gezeigt, dass eine P2-Hybridisierung ca. 13 % im WLTC, ca. 11 % Verbrauchsreduktion im Autobahnverkehr und bis zu 23 % Verbrauchsreduktion im Stadtverkehr ermöglicht. [68]

#### 5.4.1.2 Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge (PHEV)

Bei Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen gestaltet sich die Bestimmung eines „repräsentativen“ Energie- und Kraftstoffbedarfs besonders komplex. Dies ist auf die Vielzahl der verschiedenen Betriebsmodi zurückzuführen, die vom rein verbrennungsmotorischen hin zum rein elektrischen Fahren reichen. Im Zuge der Zertifizierung wird das Fahrzeug in den Modi „Ladungserhaltung“ (engl. charge-sustaining mode, CS) und „Entladung“ (engl. charge-depleting mode, CD) getestet. Das entspricht den Start-Bedingungen mit „leerem“ bzw. „vollem“ Batterieladestatus. Häufig ist dabei auch die Rede von „elektrischem Fahren“ (CD-Modus) und dem „Hybridmodus“. Gemäß EU-Verordnung 2017/1151 [23] wird ein gewichteter Kraftstoffverbrauch

ermittelt, in den die jeweiligen CS- und CD-Verbräuche sowie die Nutzungsfaktoren einfließen. Vereinfacht lässt sich dieser Zusammenhang mit einem einzigen Nutzungsfaktor (Utility Factor,  $UF_{el}$ ) darstellen. Bei der Bestimmung des Nutzungsfaktors fließt die elektrische Reichweite ein. Die aktuell starke Gewichtung des elektrischen Fahranteils wird in der Zukunft vom Gesetzgeber abgeschwächt. Weitere Informationen hierzu sind dem Anhang (Abschnitt 10.7) zu entnehmen.

#### 5.4.1.3 Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)

Als Ausgangspunkt für den elektrischen Energiebedarf der batterieelektrischen Fahrzeuge werden die WLTP-Werte aus Tabelle 1 herangezogen.

Bei den WLTP-Messungen sind bereits Ladeverluste enthalten. Da diese von verschiedenen Randbedingungen abhängen, liefert der Abschnitt 5.4.1.3.1 zusätzliche Informationen zu diesem Aspekt.

Die Klimatisierung des Fahrzeugs stellt einen weiteren Einflussparameter auf den Energiebedarf dar, der in Abschnitt 5.4.1.3.2 betrachtet wird.

Aus den beschriebenen Annahmen ergeben sich Energiebedarfs-Werte, die im Abschnitt 5.4.2 zusammengefasst werden.

##### 5.4.1.3.1 Ladeverhalten

Weitere in die Berechnung eingehende Modelle beschreiben das Ladeverhalten und Effizienzauswirkungen durch unterschiedlicher Ladekonzepte. Das Verhältnis zwischen Wallbox- und Schnellladestationen basiert auf [87] und deutschen Daten [12] über die Anzahl und Qualität der Ladestationen [13]. Grundsätzlich werden private Ladestationen nur als Wallbox angenommen und die öffentlichen Ladestationen als AC-Ladestationen und DC-Ladestationen modelliert [42].

Zur Abbildung der Ladeverluste wurde das Gesamtsystem in eine Infrastruktur-Komponente und eine Onboard-Komponente aufgeteilt. Für die Infrastruktur-Komponente wurden die von dem Netzbetreiber übermittelten

Leitungsverluste von ca. 6 % [55] genutzt und bezüglich der Onboard-Ladeelektronik wurde angenommen, dass die WLTC-Werte schon Ladeverluste beinhalten. Den höheren ohmschen Verlusten von Schnellladestationen wirkt die kürzere Ladezeit entgegen, beide Einflüsse kompensieren sich in erster Näherung. In der Literatur [67] werden aber je nach Typus des Ladevorgangs und je nach klimatischen Randbedingungen weitere Ladeverluste ausgewiesen, die in dieser Bilanzanalyse nicht abgebildet wurden. Hierzu gehören beispielsweise die je Typ unterschiedlichen energetischen Verluste zum Start der Bordelektronik („wake-up“). Wesentliche Verlustelemente der Onboard-Ladeelektronik sind hierbei Transformatoren, Unterbrecher und Schalter sowie Verkabelung. Die Verluste addieren sich zu 9,4 % [4; 8]. Im Zuge dieser Bilanzanalyse werden nur die implizit in den WLTP- und EcoTest-Werten enthaltenen Ladeverluste berücksichtigt. Auf diese verlustbehafteten Energiebedarfswerte werden Netzverluste von ca. 6% addiert.

Die Leitungsverluste sind bei der Modellierung der Stromversorgung eingeflossen, unabhängig davon, welche Methodik zur Abbildung des Quellen-Stromsystems verwendet wird. In dieser Bilanzanalyse wird wegen der zusätzlichen Komplexität keine Wechselwirkung zwischen genutztem Ladestrom und Ladeinfrastruktur (Wallbox oder Schnelllader) abgebildet.

Wenn die Berechnung der THG-Bilanz des Ladestroms unter der Berücksichtigung als zusätzliche elektrische Last erfolgt, (s. a. Anhang, Abschnitt 10.9.2), kann die Tageszeit einen Einfluss auf die damit verbundenen THG-Emissionen haben.

#### 5.4.1.3.2 Fahrzeugklimatisierung

Neben dem Fahrzeugvortrieb ergibt sich je nach Antriebsart ein zusätzlicher Energiebedarf für die Klimatisierung (HVAC<sup>6</sup>) des Fahrzeugs, der

bei der Zertifizierung bisher nicht berücksichtigt wird [86]. Dies gilt insbesondere für batterieelektrische Fahrzeuge, bei denen wegen der höheren Antriebseffizienz weniger Abwärme zur Innenraumklimatisierung bereitsteht. Im Rahmen dieser Bilanzanalyse werden Daten und Ansätze aus unterschiedlichen Quellen verwendet, um den HVAC-Energiebedarf zu ermitteln.

Für BEV werden Berechnungen auf Basis der Publikation von König et al. [44] durchgeführt. Neben einer Literaturübersicht zur Simulation von HVAC-Systemen beschreiben die Autoren einen eigenen Ansatz, der das HVAC-System bereits bei der Konzeptionierung automatisierter, elektrischer Fahrzeuge berücksichtigt. Im Ergebnisteil zeigt diese Analyse, welche Batteriekapazität in Abhängigkeit von Fahrzeugkonzept, Zyklus und Umgebungstemperatur für eine gewisse Reichweite erforderlich ist. Dabei wird unter anderem ein sogenannter „HVAC-Consumption-Calculator“ verwendet, den die Autoren öffentlich auf GitHub bereitstellen [43]. Für die Validierung ziehen König et al. unter anderem Daten des VW ID.3 heran, also das in dieser Bilanzanalyse betrachtete Vergleichsfahrzeug als Repräsentant für BEV.

Mittels des Calculators wird der HVAC-Leistungsbedarf in Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen, Fahrzeugdimensionen und der HVAC-System-Spezifikation berechnet [43]. In der Folge wird der Leistungsbedarf umgerechnet in einen zusätzlichen Energiebedarf pro 100 km. Für die Fahrzeugparameter des VW ID.3 ergibt sich je nach Jahreszeit und Temperatur ein Zusatzverbrauch einer initialen Fahrzeugtemperierung zwischen 1,57 kWh/100 km (Sommer, 25 °C) und 6,25 kWh/100 km (Winter, -5 °C) bzw. zwischen 9,8 % und 38,8 % in Bezug auf den WLTP-Energiebedarf. Eine Übersicht über die Eingangsdaten sowie die resultierenden Leistungs- und Energiebedarfe ist in

---

<sup>6</sup> Heating, Ventilation and Air Conditioning

Tabelle A5 und Tabelle A6 in Abschnitt 10.7 im Anhang zu finden.

Es sei angemerkt, dass das verwendete Tool lediglich HVAC-Leistungsbedarfe für BEV bereitstellt, nicht aber für verbrennungsmotorische Antriebe. Die BEV-Ergebnisse mit HVAC-Berücksichtigung werden daher als eigene Sensitivität dargestellt und nicht als Hauptszenario.

### 5.4.2 Resultierende Kraftstoff- und Elektrizitätsenergiebedarfe

Aus der Übersicht verschiedener verbrennungsmotorisch angetriebener Fahrzeuge wurde eine Auswahl getroffen, die entsprechende WLTP- und ADAC-EcoTest-Verbrauchsangaben aufweist, siehe Bild 42 und Bild 43 im Anhang (Abschnitt 10.1) sind für die ausgewählten Fahrzeuge in Bild 6 dargestellt.

Dabei sind für konventionelle Fahrzeuge sowie MHEV und FHEV Unterschiede zwischen Minimal- und Maximalwert von bis zu 3,2 l/100 km zu erkennen, für Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge sogar bis zu 6,7 l/100 km. Je nach Motorart und Hybridisierungsgrad sind auch Verbrauchswerte unterhalb des WLTP-Werts möglich, bspw. beim FHEV-g, das im Stadtverkehr nach

EcoTest 3,2 l/100 km benötigt (WLTP: 4,5 l/100 km). Für die LCA-Berechnungen werden neben dem WLTP-Wert auch die Minimal- und Maximalwerte verwendet, um eine Bandbreite unterschiedlicher Nutzungsarten abzudecken. Insbesondere stark hybridisierte Fahrzeuge sind dabei teilweise auf gewisse Anwendungsfälle ausgelegt.

Bild 7 stellt den Bedarf elektrischer Energie für beide batterieelektrische Fahrzeuge sowie den PHEV dar. Berücksichtigt ist bei den BEV neben Land- und Autobahnfahrt auch der zuvor beschriebene Effekt der Klimatisierung. Auf der linken bzw. rechten Seite des Diagramms wird der Energiebedarf exklusiv bzw. inklusiv der Netzverluste von ca. 6 % ausgewiesen. Insbesondere durch die Klimatisierung, aber auch bei Autobahnfahrten, kann sich ein hoher Mehrbedarf elektrischer Energie ergeben, während bei der Stadtfahrt (BEV mit 62 kWh) weniger Energie benötigt wird. In der Folge wird für das BEV mit einem Mittelwert der beiden WLTP-Werte (ein Wert je Batterieausführung) gerechnet, der sich auf 15,75 kWh/100 km beläuft bzw. unter Berücksichtigung der Netzverluste auf 16,8 kWh/100 km. Der Einfluss davon abweichender Werte wird in der Sensitivitätsanalyse betrachtet.

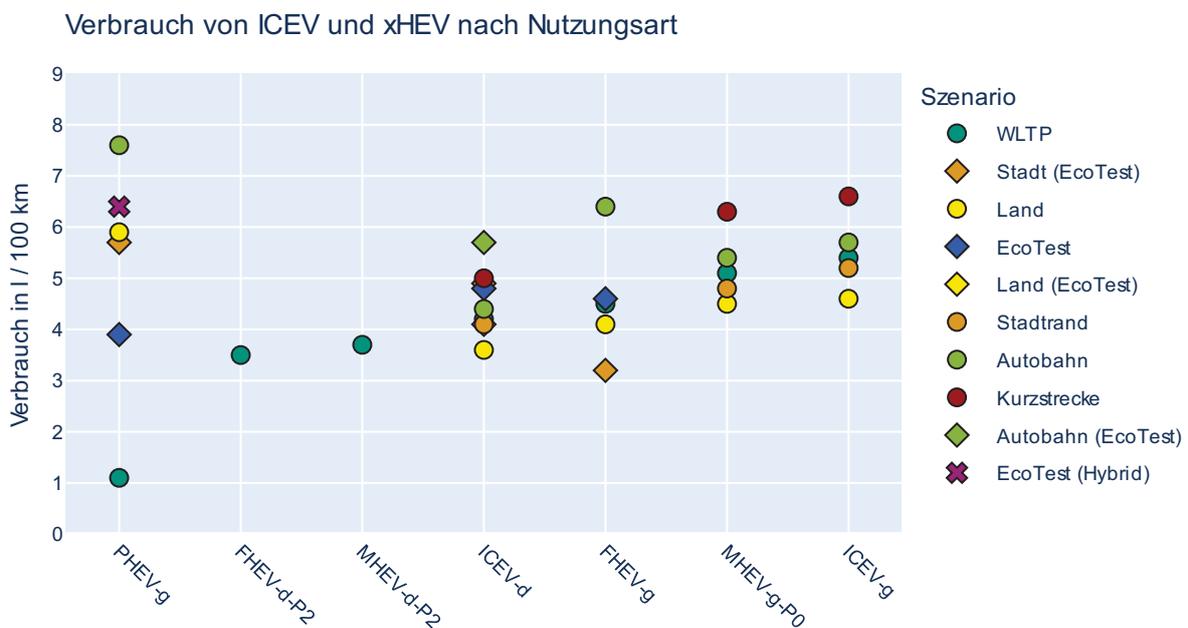
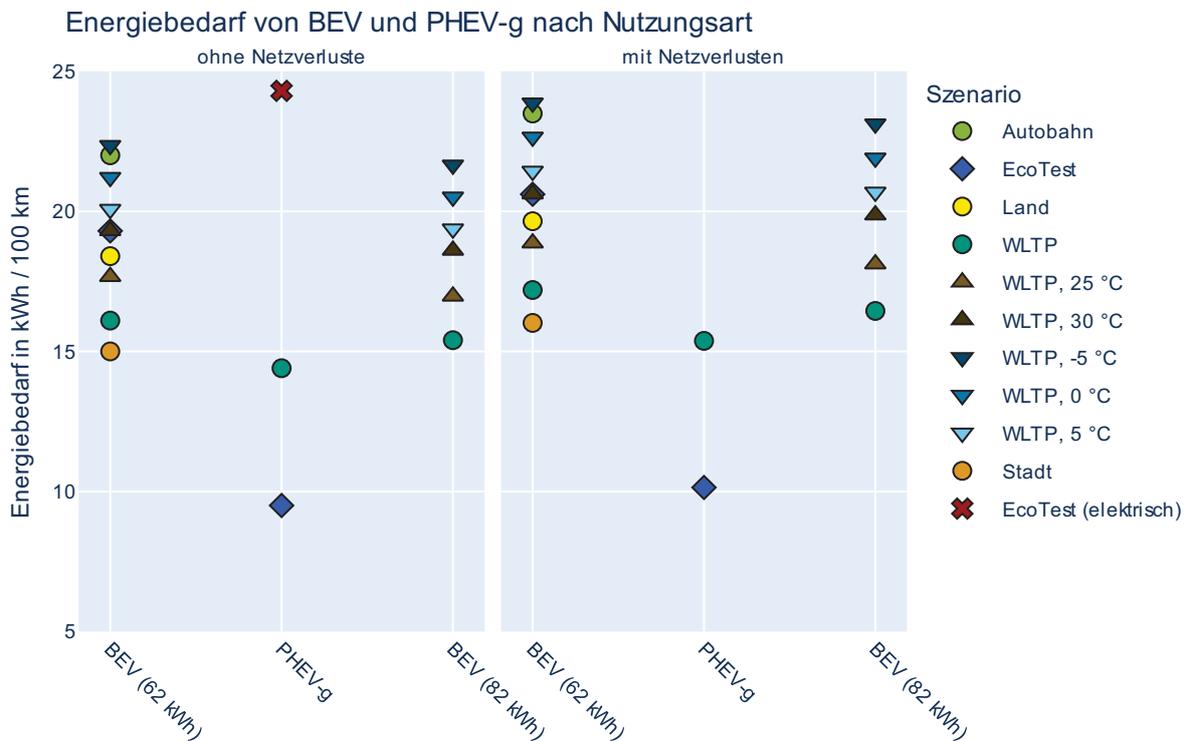


Bild 6. Bandbreite des Kraftstoffverbrauchs der betrachteten verbrennungsmotorischen Fahrzeuge nach Nutzungsart basierend auf Testergebnissen [5]



**Bild 7. Elektrischer Energiebedarf für BEV und PHEV-g nach Nutzungsart mit und ohne Netzverluste. BEV EcoTest-Werte mit Netzverlusten sind nicht dargestellt, um eine vergleichbare Skalierung der Achsen zu ermöglichen. Die angegebenen Starttemperaturen berücksichtigen den Klimatisierungsaufwand beim Start bei den genannten Temperaturen.**

### 5.4.3 Modellierung der Schadgasemissionen

Ein weiterer Faktor mit Auswirkungen auf Partikelemission und Treibhausgase ist die Straßeninfrastruktur anhand hinterlegter Daten aus der Hintergrunddatenbank und den Daten aus den wissenschaftlichen Publikationen [69]. Der entsprechende Datensatz ist stützstellenbasiert. Er wird mit Berücksichtigung der physikalischen Zusammenhänge erweitert und in die Modellierung integriert.

Ein Bestandteil des gewählten Systemrahmens ist der Verschleiß der verwendeten Straßen. Die Modellierung der Hintergrunddatenbank hat hierzu Gewichtsstützstellen hinterlegt, die einer Emission pro gefahrenen Kilometer und pro Jahr zugeordnet ist. Eine entsprechende Modellierung einer zugeordneten Fahrweise wäre relevant, würde aber den Umfang dieser Bilanzanalyse deutlich erhöhen, ohne wesentliche Zusatzinformationen für das eigentliche Betrachtungsziel dieser Bilanzanalyse zu liefern.

Bei der Fahrzeugwartung werden grundsätzliche Verschleißteile auf Kilometer-Basis berücksichtigt. Die Datenlage zur Batterielebensdauer nach publizierter Situation (hoher Einfluss des Fahrstils und von Schnellladungen) ist noch Teil der wissenschaftlichen Konsensfindung [14; 39; 81; 82]. Ein Batteriewechsel wird in dieser Bilanzanalyse ausgeklammert.

## 5.5 Lebensende

### 5.5.1 Fahrzeugrecycling

Zum Recycling der Fahrzeuge gibt es in den betrachteten Nutzungsländern ein etabliertes Logistiksystem über lokale Demontagebetriebe (Schrotthändler) und die etablierte Recyclingindustrie. Laut dem 12. Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2020 [41] werden 85 % aller Restkarosserien recycelt. In der vorliegenden Bilanzanalyse werden die Recyclingquoten und die damit verbundenen Transport- und Recyclingaufwendungen berücksichtigt, die in der Hintergrunddatenbank ecoinvent v3.8 hinterlegt sind.

## 5.5.2 Batterierecycling

Batterietechnologien sind in den letzten Jahren Teil einer sehr dynamischen Entwicklung. Parallel zu der Serienumsetzung bekannter Technologien sind Forschungsaktivitäten für alternative Technologien im Gange. Diese Bilanzanalyse beschränkt sich auf Serientechnologien und in der Serienentwicklung befindliche Technologien wie Lithium-Ionen-Batterien mit Kathoden auf Nickel-Mangan-Kobalt-Basis.

Der Rohstoff- und Energiebedarf der Herstellung der Lithium-Ionen-Batterien hat in Kombination mit drohenden Rohstoffengpässen [71] frühzeitig Aktivitäten im Bereich Batterierecycling initiiert. Erste Ansätze fokussierten aber auf die Akkumulatoren [11], die beispielsweise in den Bereichen IT-Kommunikationstechnik oder Werkzeugmaschinen eingesetzt werden. Diese Verfahren wurden auch in die Hintergrunddatenbanken integriert. Auch aktuellere Analysen zu industrialisierten Prozessen [51] weisen Unklarheiten bezüglich des recycelten Batterietyps (Zellform und chemische Zusammensetzung) auf, die im Folgenden erläutert werden.

Während in der Industrie noch Unklarheit über die wirtschaftlich sinnvolle Umsetzbarkeit der Verfahren herrscht (siehe z. B. „ist das Recycling von Traktionsbatterien“ gemäß Publikation von Fachleuten „verfahrenstechnisch noch nicht endgültig geklärt“ [78]), gibt es bereits Vorgaben durch die Europäische Regulatorik.

Der Notwendigkeit des Recyclings wird auch in der Gesetzgebung Rechnung getragen. Ziel ist auf EU-Seite unter anderem eine Aktualisierung der Batterieverordnung. Dabei sind Optionen im Gespräch, die Recyclingeffizienzen von 65 % bis 2025 bzw. 70 % bis 2030 vorsehen. Damit verbunden sind Verwertungsquoten der Materialien Kupfer, Nickel und Kobalt von bis zu 95 % bzw. 70 % für Lithium bis 2030 [24]. In der vom Europäischen Rat angenommenen Fassung der Verordnung wurden die Zielwerte nochmals angepasst. Für Altbatterien gelten Verwertungsquoten des enthaltenen Lithiums von 50 % bis Ende 2027 beziehungsweise 80 % bis Ende 2031 [28]. Unter Vorbehalt von Aktualisierungen durch delegierte Rechtsakte wurden Mindestrecyclatanteile von 16 % für Kobalt, 6 % für Lithium und 6 % für Nickel fixiert, ab „96

Monate nach dem Tag des Inkrafttretens dieser Verordnung“ [30, S. 120]. Darüber hinaus arbeiten verschiedene Unternehmen an einem sogenannten „digital battery passport“ [29]. Eine Recyclingquote von 90 % hält auch Prof. *Kampker*, Professor für Produktionstechnik von E-Mobilitäts-Komponenten, für möglich [56]. Dennoch verweist er auf noch ungeklärte Fragen im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit von Recyclingverfahren und hinsichtlich des Einflusses auf die THG-Bilanz [56].

Der Recyclingprozess beginnt mit der Rückführung der gebrauchten Batterien und wird gefolgt von einem Demontageprozess. Diese Demontage ist abhängig vom Aufbau der Batterie, der Module und der Zellen. Das anschließende Recycling der eigentlichen Zellen ist stark abhängig von der gewählten chemischen Zusammensetzung der Batterie.

Das Problem der aktuell noch geringen Anzahl an Rückläuferbatterien wird durch die Vielfalt an Batterietypen verstärkt. Da die Technologie noch nicht großindustriell etabliert ist, ist auch noch die Frage unbeantwortet, an welcher Stelle einer Recycling- oder Produktionskette das Batterierecycling am effizientesten erfolgt.

In der Regulatorik und der Literatur wird das Recycling in mehrere Schritte unterteilt, um die jeweiligen Materialeffizienzen beschreiben zu können. Bild 8 zeigt einen derartigen Stoffkreislauf.

Im Anhang (Abschnitt 10.5.1) sind weitere Informationen bzgl. der einzelnen Schritte aufgeführt, inklusive einer Erläuterung der Abkürzungen in Bild 8, siehe Tabelle A4.

Da das Wissen über industrielle Umsetzungen zum Batterierecycling einen Wettbewerbsvorteil darstellt, konnte nachvollziehbarerweise kein Industriepartner dazu bewogen werden, Daten für diese Bilanzanalyse bereitzustellen. Es wurde mit einem brasilianischen Unternehmen gesprochen, das im Batterierecycling aktiv ist [76]. Zusammenfassend sind folgende Punkte relevant:

- Ausschließlich in Europa existieren Ansätze für eine rückführende Logistik von gebrauchten Batterien.



**Bild 8. Beispielhafter Stoffkreislauf zum Batterierecycling für Nickel (Größen nach Tabelle A4)**

- Ausschließlich in Europa existieren Ansätze für eine rückführende Logistik von gebrauchten Batterien.
- Vielversprechend werden hinsichtlich einer industriellen Umsetzung pyrometallurgisches und hydrometallurgisches Recyclingmethoden eingestuft.
- Pyrometallurgisches Recycling bedingt hohe energetische Aufwendungen und bei Temperaturen zwischen 1500 °C und 1600 °C sind aktuell keine hohen Recyclingquoten von z. B. Lithium zu erreichen.
- Die Batterieproduktion hat Qualitätsanforderungen an das recycelte Material (z. B. beim Lithium), die sehr anspruchsvoll sind.
- Hydrometallurgische Recyclingprozesse müssen für jede chemische Zusammensetzung der Batterien separat angepasst werden, was die Kosten nachteilig beeinflusst.
- Recyclingverfahren mit weiterführendem Potenzial befinden sich in der Entwicklung, sind jedoch noch entfernt von einer Serienreife.

Um einen Eindruck über Möglichkeiten und Grenzen des Recyclings gewinnen zu können, wurde auf Basis von den o. g. Literaturdaten eine Analyse durchgeführt.

Die erste Fragestellung zielt auf die Ermittlung, welche Rückführraten erreicht werden müssen, um die Quoten der EU-Regulatorik zu erfüllen.

Eine wesentliche Eingangsgröße ist hierbei die Nutzungsdauer der Batterien, bevor sie dem Recycling zugeführt werden, da von steigenden Zahlen in der Batterieproduktion ausgegangen wird [6]. Im Anhang (Abschnitt 10.5.2) ist dargestellt, dass unter den gewählten Annahmen eine Rückführrate von ca. 40 % vonnöten ist, um die Recyclingvorgaben für Lithium und Nickel zu erreichen.

In einer Literaturrecherche wurden drei weit verbreitete Recyclingbeschreibungen untersucht [17; 50]. Basierend auf den dort hinterlegten Informationen, wurde ein Recyclingmodell unter der Annahme einer Batterieproduktnutzungsdauer von acht Jahren erstellt. Die mit dem Recycling verbundenen CO<sub>2aq</sub>-Emissionen werden dabei den Emissionen gegenübergestellt, die bei einer Exploration und Aufbereitung von Primärrohstoffen erforderlich wären. Als Bezugsgröße ist jeweils 1 kg Batteriezelle veranschlagt, wobei alle mit den Materialien verbundenen THG-Emissionen addiert werden. Um die Vielzahl der verfügbaren Zellzusammensetzungen abzubilden, wurde als Mittelwert eine NMC532-Zelle bzgl. ihrer Rohstoffbedarfe zugrunde gelegt. Die Darstellung der Sensitivität der THG-Belastung der zum Recycling notwendigen Energie erfolgt durch einen Vergleich mit dem französischen Stromsystem- mit dem momentan niedrigsten THG-Fußabdruck. Ebenso wurde ein virtuelles, global gemittelttes elektrisches Energiesystem als Vergleichsgröße analysiert.

Die Ergebnisse des in ecoinvent v3.8 enthaltenen Batterierecycling-Datensatzes waren ob der unsicheren Datenlage nicht zu validieren. Der Vergleich von drei in der Literatur beschriebenen Recyclingprozessen zeigt beim pyrometallurgischen und fortschrittlichen hydrometallurgischen Recycling (beide nach *Mohr et al.* [50]) keine erreichbaren THG-Reduktionspotenziale. Lediglich der Prozess des direkten Recyclings aus der Literatur von *Dai et al.* [17] zeigt ein Potenzial des Recyclings, wenn es mit Energie durchgeführt wird, die eine minimale THG-Belastung hat. Es muss aber erwähnt werden, dass dieser Prozess nach *Dai et al.* [17] von einem 100 % Recycling der NMC-Beschichtung ausgeht, für das heute noch keine industrielle Umsetzung bekannt ist [85].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Recycling in der im kurz- bis mittelfristigen Zeithorizont der Analyse der Recyclingfaktoren und in den betrachteten Jahren zur Verfügung

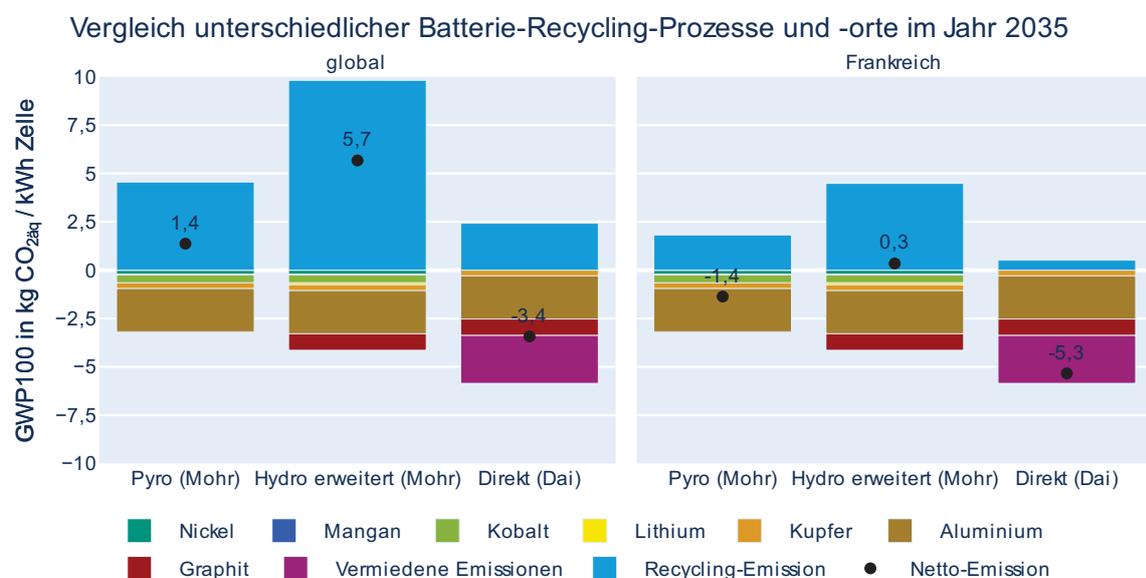
stehenden Materialien keinen signifikanten Effekt gezeigt hat.

### Kernaussage

Das Recycling der Lithium-Ionen-Batterien ist eine wichtige Technologie zur Verbesserung der Materialverfügbarkeit. Der Einfluss auf die THG-Bilanz ist abhängig vom gewählten Prozess und dem Zustand des elektrischen Energiesystems.

Es sind neben Grundlagenentwicklungen auch noch viele Industrialisierungsaufwendungen vonnöten, für deren Zielerreichung neben erfolgten regulatorischen Vorgaben weiterführende Maßnahmen notwendig sind.

Die Versorgung mit regenerativen Energien spielt wie bei der Produktion auch beim Recycling eine wichtige Rolle, um eine möglichst positive THG-Bilanz zu erreichen.



**Bild 9.** THG-Emissionen der Materialien von 1 kg NMC532-Lithium-Ionen-Zelle und deren Recycling für unterschiedliche in der Literatur beschriebene Verfahren. Linke Seite ein globaler Mittelwert für 2035 laut ecoinvent v3.8, rechte Seite Energieversorgung Frankreich 2035

MS = Massenanteil, RC = Recyclat-Produktionsanteil

## 6 Wirkungsabschätzung

Die ausgewählte Wirkungsabschätzungs- methode ist ReCiPe 2016 Midpoint (H). Diese bewertet die Effekte des Klimawandels anhand der Erkenntnisse des 5. IPPC-Reports aus 2013 [36]. Über einen Zeitraum von 100 Jahren weist die Wirkungskategorie GWP100 (Global Warming Potenzial over 100 years) für die Stoffe Methan und N<sub>2</sub>O 34 kg CO<sub>2äq</sub> bzw. 298 kg CO<sub>2äq</sub> aus [36]. Die Einbindung des Lebens- endes und des damit verbundenen Recyclings erfolgt nach der Cut-off-Methodik (s. a. Ab- schnitt 4.2.4).

Die Sensitivitätsanalyse erfolgt in Form von ge- stapelten Balkendiagrammen zur Visualisie- rung, welche Elemente in der Produktion und in der Nutzung besonders signifikant wirken. Da- mit werden Bereiche aufgezeigt, auf die sich zu- künftige und laufende Entwicklungsaktivitäten fokussieren sollten, um die THG-Reduktion wei- ter zu beschleunigen (s. a. Bild 14).

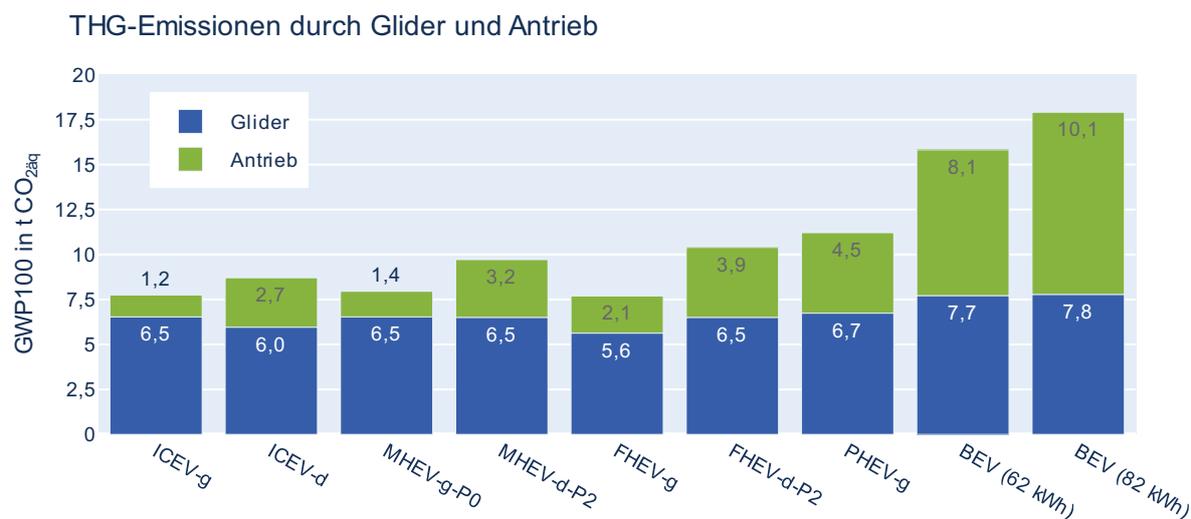
Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt, soweit es möglich ist, wegen der Vergleichbarkeit mit anderen Publikationen und des Bezugs zur

Gesetzgebung in g CO<sub>2äq</sub>/km als funktionale Einheit. Werden nur einzelne Komponenten be- trachtet, wie im Falle der Batterie, wird die Ein- heit g CO<sub>2äq</sub>/kWh verwendet.

### 6.1 Glider vs. Antrieb bzw. Antriebsele- mente

In diesem Abschnitt soll zunächst ins Verhältnis gesetzt werden, wie sich die produktionsbe- dingten Emissionen von Glider und Antrieb bzw. Antriebselementen darstellen. Bild 10 zeigt die THG-Emissionen der Produktion exemplarischer Fahrzeuge, die sich auf Glider und Antriebs- strang aufteilen.

Bild 11 bildet die resultierenden CO<sub>2äq</sub>-Emissio- nen der Produktion der einzelnen Subsysteme des Antriebsstrangs ab. Die detailliert model- lierten Komponenten werden in den Subsystem- en Verbrennungsmotor, Getriebe, Kupplung, elektrische Maschine, Batterie, Leistungselek- tronik und Ladegerät zusammengefasst.



**Bild 10.** Beispielhafte Aufteilung der mit der Produktion verbundenen THG-Emissionen in Antriebsstrang und Glider für unterschiedliche Hybrisisierungsformen. Die jeweiligen Massen können Tabelle 1 entnommen werden.

## THG-Emissionen durch die Antriebskomponenten

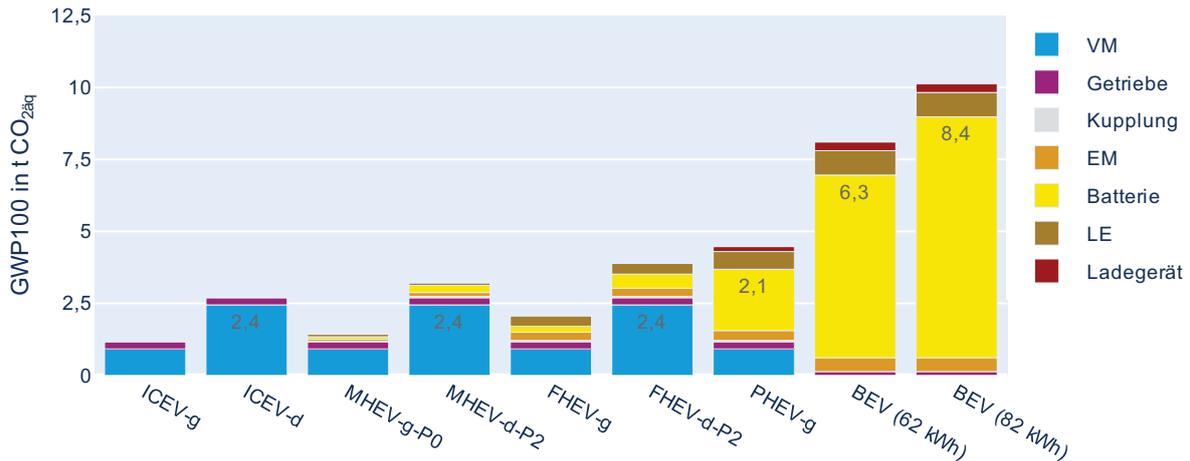


Bild 11. Produktionsbedingte THG-Emissionen wesentlicher Blöcke hybridisierter Antriebstränge

VM - Verbrennungsmotor, EM - Elektromotor und LE - Leistungselektronik

## 6.2 Produktion von Komponenten

### 6.2.1 Batterie

Die Analyse der relevanten Produktionsprozesse der Batterien zeigt, dass neben dem Einfluss der Batteriekapazität vor allem material- und energieintensive Prozesse das THG-Potenzial des Energiespeichers einen wichtigen Einfluss haben.

Die Sensitivität einzelner Subkomponenten der Batterie hinsichtlich der resultierenden  $\text{CO}_{2\text{äq}}$ -Emissionen kann anhand einer Stapelgrafik der jeweiligen Subsysteme und Subkomponenten dargestellt werden, Bild 12. So werden ca. 50 % der durch die Produktion emittierten Treibhausgase durch die Zellherstellung verursacht, wovon wiederum ca. 2/3 auf die Produktion der Kathode zurückgeführt werden können. Die signifikanten Anteile des NMC-Hydroxids, des Graphits und des Lithium-Hydroxids zeigen die Handlungsfelder auf, bei denen das größte THG-Reduktionspotenzial sichtbar ist.

Die Sensitivität der Emissionen hinsichtlich des Produktionsorts ist in Bild 13 dargestellt. Die Auswahl der Grenzbeispiele Frankreich (sehr geringer THG-„Fußabdruck“) und Polen (sehr hoher THG-„Fußabdruck“), vermittelt ein Ergebnistreuband, innerhalb dessen sich auch die Auswirkungen der Produktion in China befinden.

Um das Verhältnis zwischen den verwendeten Massen und den damit verbundenen Umweltwirkungen zu verdeutlichen, sind in Bild 14 auf der linken Seite die relativen Massenanteile und auf der rechten Seite die relativen THG-Potenzialanteile dargestellt, jeweils für die sogenannte oberste Ebene der Modellierung des Batteriesystems als Ergebnis des finalen Zusammenbaus. Die oberste Ebene beinhaltet alle Einzelschritte, die jedoch nur als Ergebnissumme und als Resultat detaillierter Einzelschritte abgebildet werden.

### Kernaussage

Ein geringerer Materialeinsatz z. B. durch eine angepasste chemische Zusammensetzung der Batterie oder ein THG-reduzierendes Recycling können die THG-Emission der Batterieproduktion am effektivsten senken. Durch die Überarbeitung der EU-Batterieverordnung werden zusätzliche Entwicklungsaktivitäten forciert, um den THG-Fußabdruck weiter zu reduzieren. Entscheidenden Einfluss hat dabei die Zusammensetzung des Kraftwerksparks des Produktionsorts.

### THG durch Batterie-Herstellung in China, aufgeteilt in (Sub-)Systeme

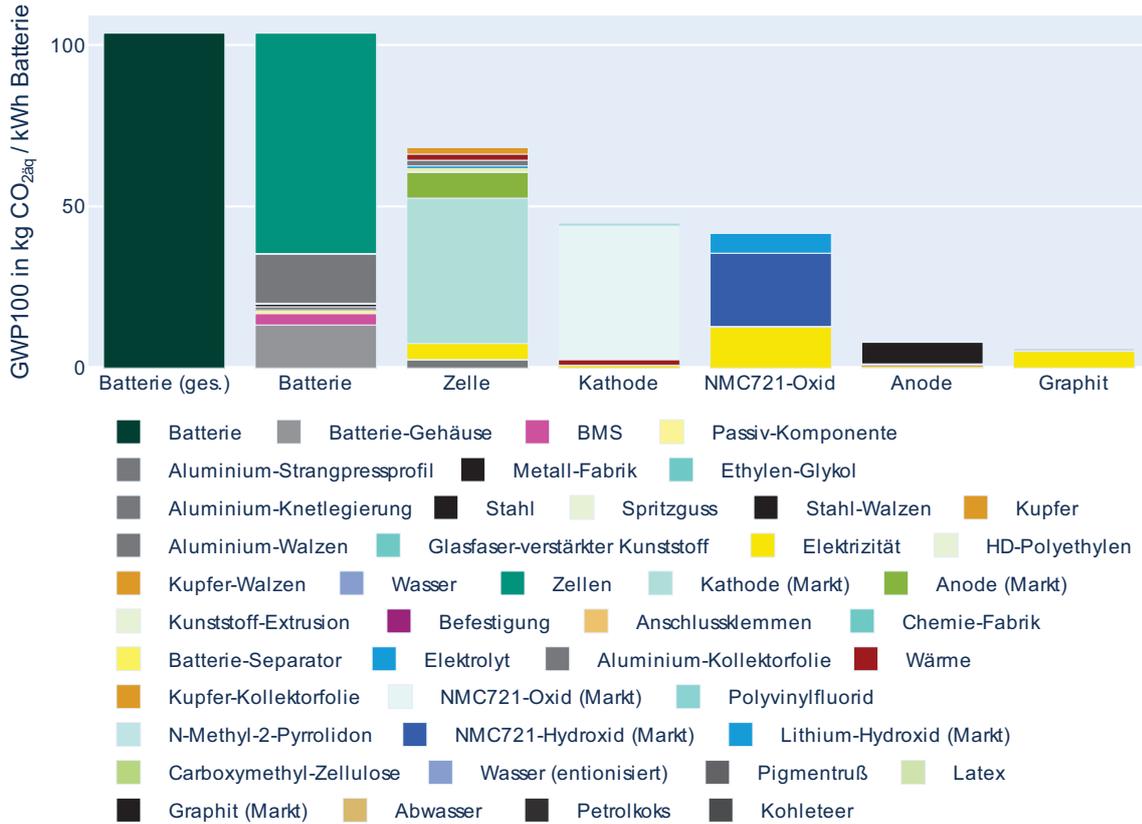


Bild 12. THG-Emission der Produktion einer NMC 721-Batterie pro kWh Batteriekapazität für die gesamte Batterie mit dem Batterie-Management-System (BMS), der Batteriezelle, der darin verwendeten Kathode und Anode sowie die wesentlichen Materialien hierzu

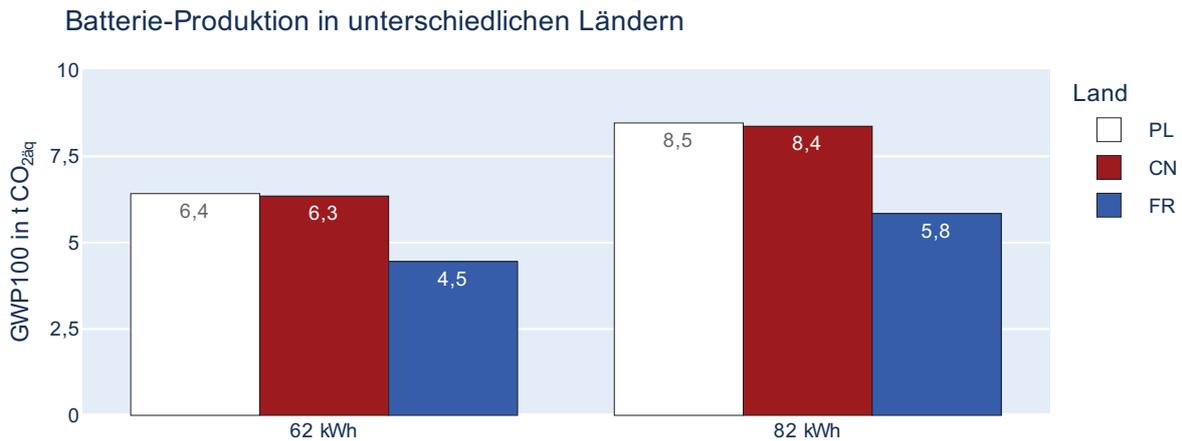


Bild 13. Auswirkung der Elektrizitätsversorgung auf die Batterieproduktion

## Massen- und GWP-Anteile der Batterie, 82 kWh

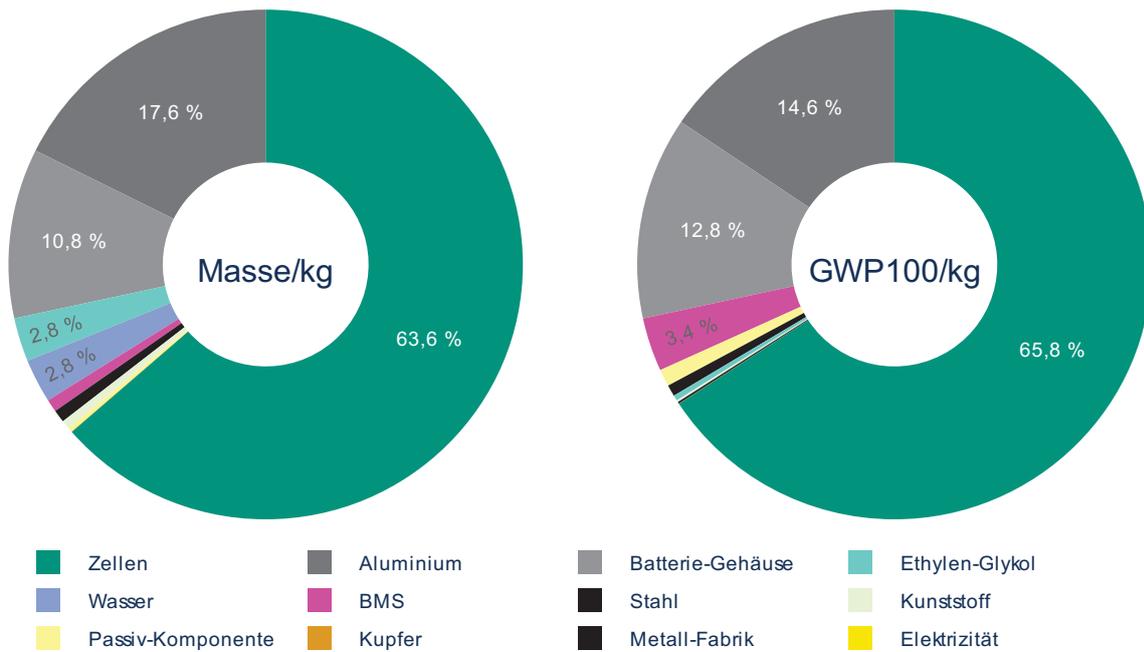


Bild 14. Vergleich der Massen- und GWP (pro kg)-Anteile der Batterie mit 82 kWh

### 6.2.2 Elektrische Maschine

Die produktionsbedingten Umweltwirkungen des elektrischen Motors können analog segmentiert und als Stapelgrafik dargestellt werden (siehe Bild 15). Die wesentlichen emissionsrelevanten Komponenten sind Rotor, Stator und Gehäuse. Der Vergleich eines Permanentmagnet-Synchronmotors (PMSM) mit einem Asynchronmotor (ASM) zeigt gemäß Literaturanalyse Vorteile für den Permanentmagnet-Synchronmotor auf [33; 79].

Die im Abschnitt 5.3.2 beschriebene Modellierung des Elektromotors bildet eine Abhängig-

keit von der Maximalleistung und dem Drehmoment des E-Motors ab. Im Anhang (Abschnitt 10.10) ist in Bild 84 dargestellt, welche Emissionen bei verschiedenen Konfigurationen der E-Maschine entstehen.

### 6.3 Produktion und Nutzung von BEV

Der Schritt von den wesentlichen Komponenten zum Gesamtfahrzeug fügt als signifikanten Verursacher der THG-Emissionen den sogenannten Glider hinzu (siehe auch Abschnitt 6.1). Dies führt gemäß Bild 16 bei der Modellierung der Fahrzeuge zu einer weiteren

#### THG-Emissionen der E-Maschine sowie ihrer Komponenten

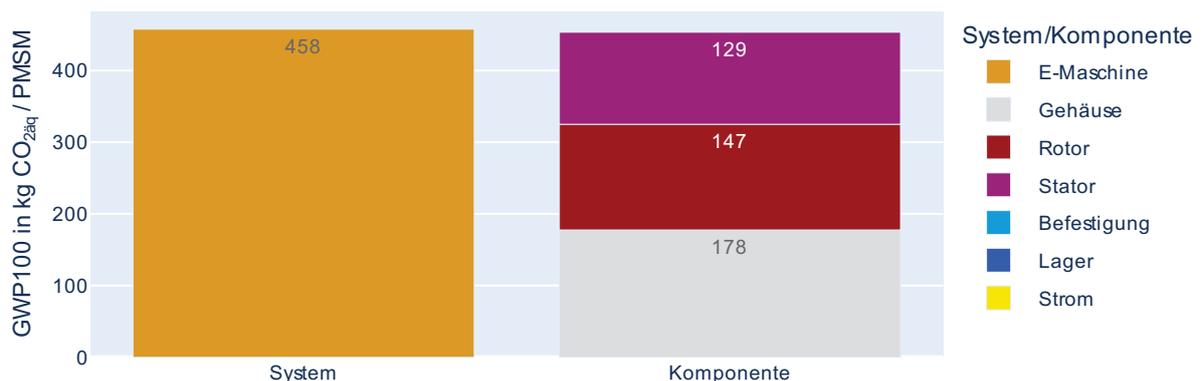


Bild 15. Komponentenaufgelöste THG-Emissionen eines 150-kW-Permanentmagnet-Synchronmotors (PMSM)

Erhöhung der produktionsbedingten THG-Emissionen.

Neben der Produktion werden Nutzung und Infrastruktur berücksichtigt. Werden die gesamten Emissionen des Fahrzeuglebens auf die Kilometerleistung bezogen, ergibt sich das Ergebnis pro funktionelle Einheit zu g CO<sub>2äq</sub>/km, siehe Bild 17.

Um die Wirkungsabschätzung besser bewerten zu können, folgen einige Sensitivitätsbetrachtungen. Hierbei werden gezielt einzelne Parameter variiert, um zu verdeutlichen, ob es sich dabei um einen Parameter mit wichtigem oder

eher vernachlässigbarem Systemeinfluss handelt.

Sofern nicht genannt oder gezielt variiert, werden dabei folgende Annahmen getroffen:

- Kraftwerksemissionswerte werden gemäß der ecoinvent-v3.8-Datensätze für Deutschland bilanziert sowie mit Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe 2016 (H) Midpoint berechnet.
- Das Referenzjahr ist 2021 mit Daten von Fraunhofer ISE ([energy-charts.de](http://energy-charts.de)).

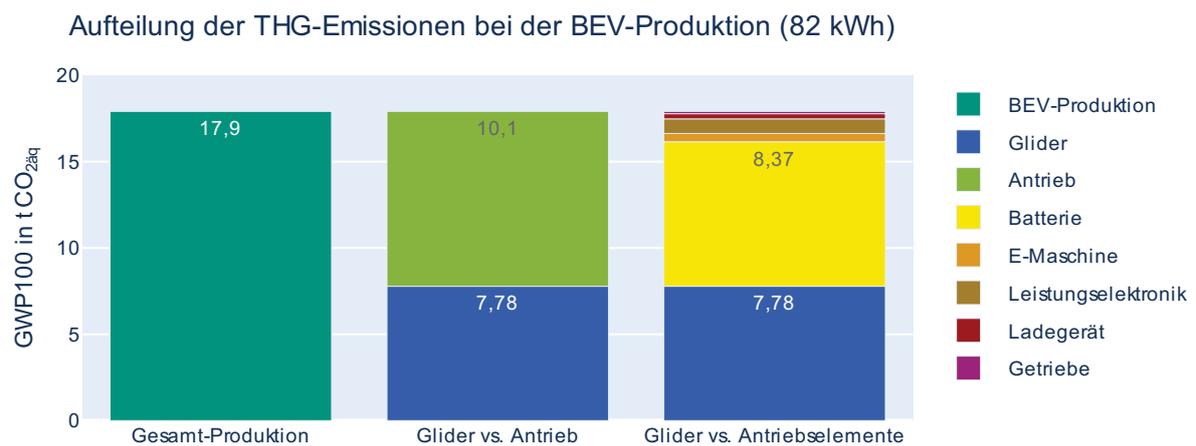


Bild 16. Segmentierung der produktionsbedingten THG-Emissionen eines batterieelektrischen Fahrzeugs

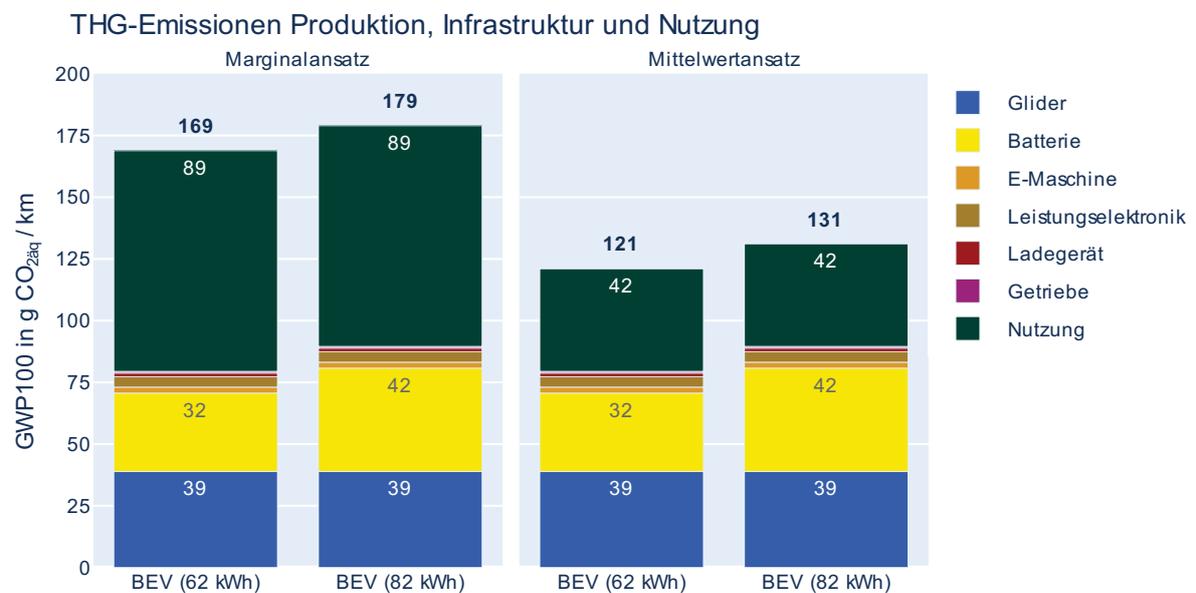


Bild 17. Vergleichende Stapelgrafik batterieelektrischer Fahrzeuge mit unterschiedlich großen, in China hergestellten Batterien sowie Nutzung und Infrastruktur in Deutschland nach Marginal- bzw. Mittelwertansatz im WLTP

- „Klimaneutrales Deutschland“ (KNDE2045) bildet das Energiezukunftszenario ab, inklusive der Annahmen zu:
  - installierter Leistung der Kraftwerkstypen
  - Volllaststunden
  - Ausbauziel elektrischer Fahrzeuge in der deutschen Flotte
  - elektrische Last (Energiebedarf)
- Fahrleistung pro Jahr beträgt 13.333 km, so dass über die 15-jährige Laufzeit bis 2035 eine Gesamtfahrleistung von 200.000 km erreicht wird.
- Es ist keine dezidierte Uhrzeit oder Phase priorisiert, zu der die Fahrzeuge geladen werden.
- Der Fahrzeugenergiebedarf basiert auf dem WLTP-Verbrauch inklusive Netzverlusten, was einen Wert von 16,8 kWh/100 km ergibt.

### 6.3.1 Sensitivität Stromszenario und betroffene Parameter

Der Einfluss der CO<sub>2äq</sub>-Emissionen des elektrischen Energiesystems auf die nutzungsbedingten CO<sub>2äq</sub>-Emissionen ist entscheidend.

Bei der Zuschaltung eines weiteren, größeren elektrischen Energiebedarfs muss dieser aus konventionellen Kraftwerken gedeckt werden, da die Energie aus Windrädern oder PV in dem betroffenen Zeitpunkt nicht hochgeregelt werden kann. Gemäß diesem Betrachtungsansatz wird Elektromobilität als großer zusätzlicher Verbrauchssektor mit konventionellen Energien gerechnet. Der Marginalansatz zeigt in dieser Bilanzanalyse die entsprechenden Ergebnisse. Beim Anschalten der Kaffeemaschine am Morgen oder des Fernsehers am Abend gilt die oben genannte Betrachtungsweise äquivalent. An den Beispielen wird schnell deutlich, dass es anspruchsvoll wird, die einzelnen Energieerzeuger im Energiemix einzelnen Verbrauchern zuzuordnen. Dies gilt auch für die Elektromobilität, da der Wechsel der Energieversorgung („Energiewende“) und der Wandel in der Mobilität („Verkehrswende“) bzw. der mögliche Wechsel

des Antriebssystems eng miteinander verknüpft sind. Für einen Wechsel im Verkehr muss Energie aus sogenannten erneuerbaren Quellen deutlich zugebaut werden.

Dies gilt sowohl im Bereich der Industrie mit ihrem Bestreben zur Nachhaltigkeit als auch im privaten Bereich mit beispielsweise der Kombination von PV-Anlagen und batterieelektrischen Fahrzeugen.

Diese Betrachtungen werden im weiteren Verlauf als Marginalansatz und als Mittelwertansatz parallel dargestellt. Die Auswahl des Berechnungsansatzes beeinflusst das Ergebnis. In diesem Absatz wird der Unterschied des Mittelwertansatzes im Vergleich mit den anfallenden CO<sub>2äq</sub>-Emissionen des Marginalansatzes gegenübergestellt.

In dieser Bilanzanalyse werden die resultierenden CO<sub>2äq</sub>-Zusatzemissionen generell der Nutzungsphase der Mobilität zugerechnet. Eine andersartige Allokation wäre z. B. die hälftige Zurechnung auf die Mobilität und den Energiesektor. Unabhängig von der Allokation werden die emittierten Treibhausgase auch unabhängig von der Sektorzuordnung analysiert.

Die beiden Ansätze werden sowohl hinsichtlich des energetischen Fußabdrucks in der Einheit g CO<sub>2äq</sub>/kWh als auch hinsichtlich der zurückgelegten Fahrstrecke in der Einheit g CO<sub>2äq</sub>/km analysiert, siehe Bild 18 und Bild 19.

Zur Einordnung der Emissionen in g CO<sub>2äq</sub>/kWh sind in Bild 18 zudem die Emissionen dargestellt, die sich gemäß ecoinvent-Datensätzen der Version 3.8 ergeben, wenn die Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe 2016 Midpoint (H) verwendet wird. Hier zeigt sich unter anderem, dass beim Datenstand von ecoinvent v3.8 auch Elektrizität aus Fotovoltaik zu signifikanten Emissionen von 96 g CO<sub>2äq</sub>/kWh führen. Noch niedrigere Emissionen von 16 g CO<sub>2äq</sub>/kWh ergeben sich bei Elektrizität von Wind Offshore.

Zwischen dem Referenzjahr 2021 und den Stützstellen in den Jahren 2022 und 2025 steigen die Emissionen gemäß der Berechnung zunächst an. Gründe dafür sind, dass die BEV-Anzahl und elektrische Last im Vergleich zu Stromsystemausbau überproportional steigt sowie zumindest vorübergehend teilweise

Elektrizität aus Kernkraft und Erdgas durch Kohlestrom ersetzt wird.

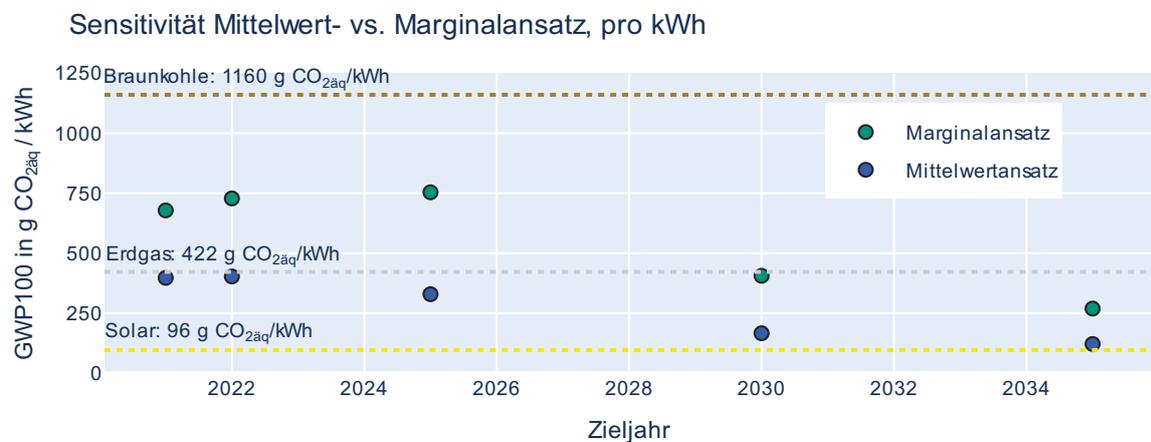
Werden die entsprechenden THG-Emissionen am Beispiel eines batterieelektrischen Fahrzeugs mit einer im Jahr 2021 mit chinesischem Strommix hergestellten 62 kWh-NMC721-Batterie und 16,8 kWh/100km Fahrenergiebedarf aufgetragen, entwickelt sich über 200.000 km bei einer Jahresfahrleistung von 13.333 km und der jährlich angepassten Strombereitstellung gemäß KNDE45 der kumulierte Verlauf entsprechend Bild 20.

Bei dem Mittelwertansatz gemäß Bild 20 wird der Jahresmittelwert des Fußabdrucks des elektrischen Energiesystems abgebildet.

Ein weiterer Parameter der Modellierung des Elektrizitätsnetzes sind die über die Hintergrunddatenbank oder andere Publikationen

abgebildeten Emissionsfaktoren. Diese Emissionsfaktoren beschreiben die mit einem speziellen Kraftwerkstyp verbundenen THG-Emissionen. Je nach Modellierung der Entwicklung der Technologie weichen vorliegende Publikationen voneinander ab. Im Zuge dieser Bilanzanalyse sind die Unterschiede gering, wie auch im Anhang (Abschnitt 10.9.6.2) dargestellt ist.

Eine Versorgung durch am Privathaus angebrachte Solarpaneele hängt aufgrund der Witterungsabhängigkeit von der Lokalisierung in Deutschland, der Größe des eventuell elektrischen Speichers und dem sonstigen Eigenverbrauch sowie der installierten Fotovoltaikleistung ab. Die Modellierung wird deswegen vereinfacht mit den in der Hintergrunddatenbank ecoinvent v3.8 hinterlegten Umweltwirkungen für Solarzellen in Deutschland abgebildet.



**Bild 18.** THG-Emissionen der elektrischen Energie nach Marginalansatz und Mittelwertansatz gemäß Szenario KNDE45 und Energiebedarf nach WLTP im Vergleich zu Elektrizität aus Braunkohle, Erdgas und Solarenergie gemäß mit der Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe 2016 Midpoint (H) berechneten ecoinvent-Datensätzen



**Bild 19.** THG-Emissionen der Nutzung eines BEV bei 16,8 kWh/100 km Fahrenergiebedarf nach WLTP nach Marginalansatz und Mittelwertansatz, Szenario KNDE45

### Sensitivität Mittelwert- vs. Marginalansatz, BEV (62 kWh)

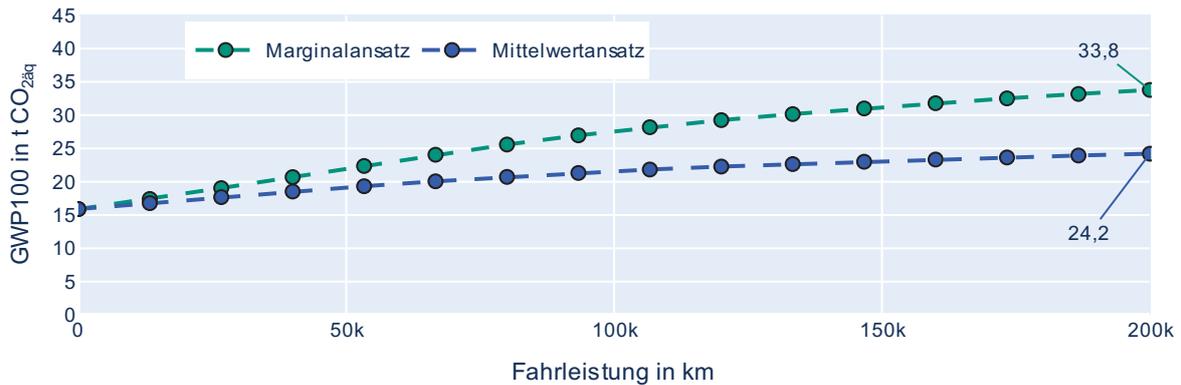


Bild 20. THG-Emissionen eines BEV, WLTP inklusive Ladeverluste, 62-kWh-NMC721-Batterie, Produktion 2021 in China, Nutzung in Deutschland ab 2021 mit 13.333 km/a für den Marginalansatz (Ma) und den Mittelwertansatz (Mi)

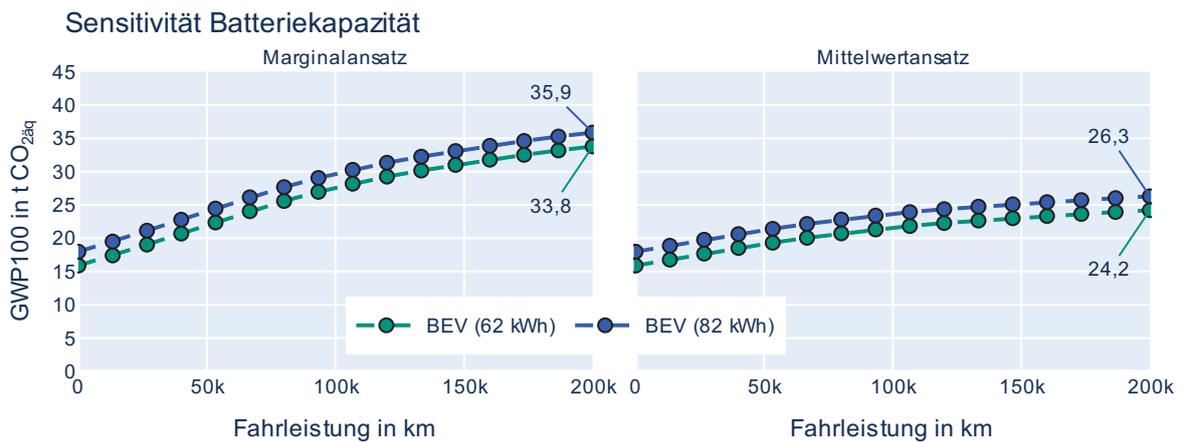


Bild 21. THG-Emissionen eines BEV mit einer 62 kWh und einer 82-kWh-Batterie vom Typ NMC721 bei Produktion mit chinesischer Energieversorgung 2021 für den Marginalansatz und den Mittelwertansatz

### 6.3.2 Sensitivität Entwicklung der Stromversorgung

Die zunehmende Defossilisierung der Energieträger des Stromnetzes wirkt sich natürlich auch auf die CO<sub>2aq</sub>-Bilanz elektrischer Verbraucher in der Zukunft aus. Diesen Einfluss zeigt Bild 22 auf der Basis des Ausbauszenarios KNDE45 im Vergleich mit einem Fahrzeugbetrieb mit Elektrizität aus verschiedenen, spezifischen Energieträgern. Als Ausblick auf optimistischere Ausbauszenario enthält die Abbildung zudem je eine Mittelwertansatz- und Marginalansatz-Kurve für das Szenario „Klimaneutrales Stromsystem 2035“ (KNS35).

Ein erwarteter Einfluss auf die THG-Emissionen der Nutzungsphase ist der Verbrauch und der Einfluss des Fahrprofils. In Bild 23 werden exemplarisch die THG-Emissionen unterschiedlicher Fahrprofile dargestellt.

Alle Verbrauchsdaten konnten publizierten Testergebnissen entnommen werden. Basis ist ein BEV mit 16,8 kWh/100 km WLTP-Bedarf inklusive Netzverlusten, einer 62 kWh-NMC721-Batterie mit Produktionsort in China 2021. Ohne Netzverluste ergibt sich ein Bedarf von 15,75 kWh/100 km.

### 6.3.3 Sensitivität der Netzverluste und des Entwicklungsszenarios des deutschen Elektrizitätsnetzes

Die Nutzbarkeit von Sonne und Wind als Quellen für sogenannte „erneuerbare Energien“ ist in Deutschland geografisch unterschiedlich umsetzbar. Die Nutzung bevorzugter Regionen beispielsweise für Windenergie im Küstenbereich führt zusammen mit der Lokalisierung großer Industrieverbraucher im Süden des Landes zu der Notwendigkeit, nationale Stromtrassen zu bauen.

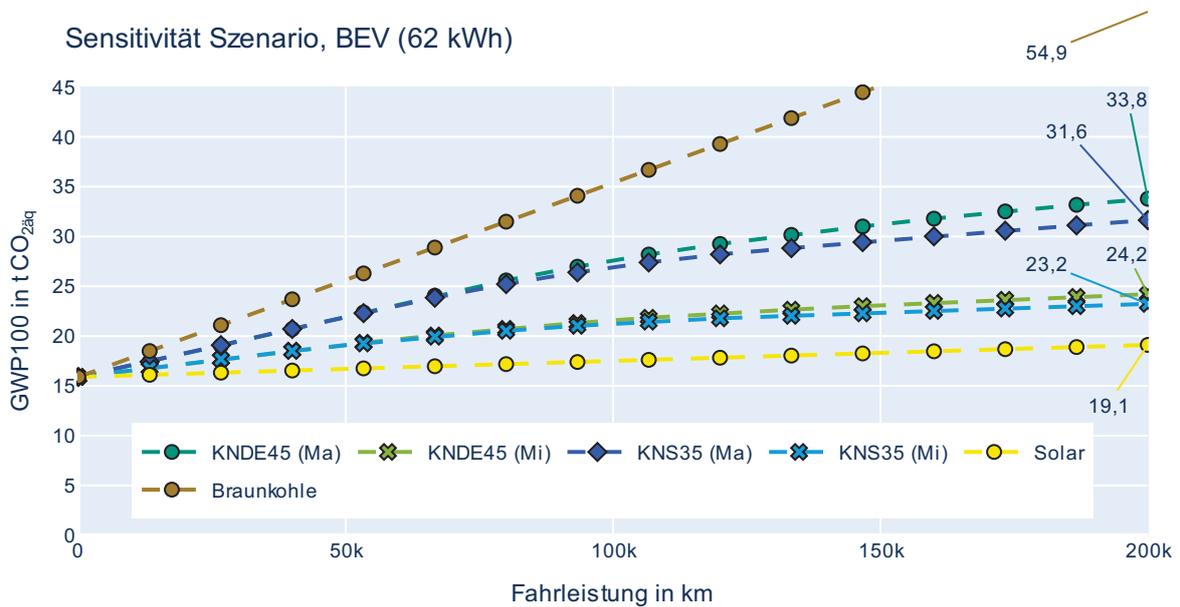


Bild 22. THG-Emissionen nach KNDE45 im Marginalansatz und Mittelwertansatz im Vergleich zur Nutzung mit Elektrizität auf Basis von Braunkohle und Solarenergie sowie Elektrizität gemäß dem Szenario „Klimaneutrales Stromsystem 2035“ (KNS35), ebenfalls gemäß Marginal- und Mittelwertansatz

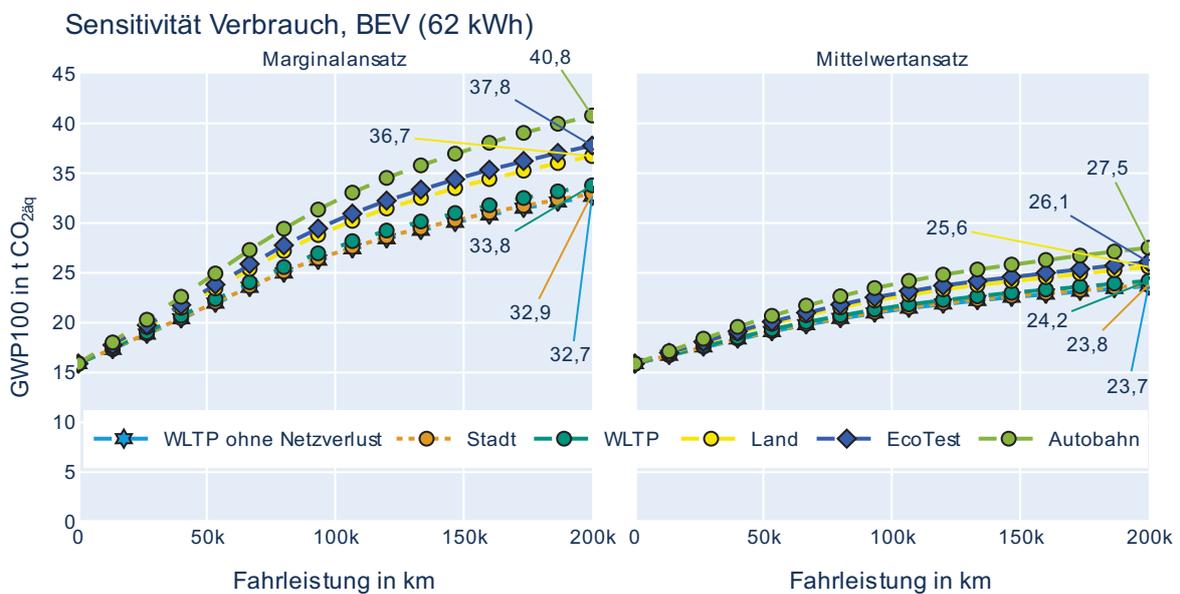


Bild 23. Variation der THG-Emissionen für unterschiedliche Fahrprofile (WLTP, Stadt, Land, Autobahn und ADAC EcoTest) eines BEV nach Marginalansatz und Mittelwertansatz mit einer 2021 in China hergestellten 62 kWh-NMC721-Batterie. Die WLTP- und Stadt-Kurve sind in der gewählten Skalierung fast deckungsgleich.

Trotz Nutzung der Technik der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) mit IGBT-Umrichtern (Umrichter auf Basis der Insulated-Gate Bipolar Transistor IGBT-Technologie) sind zwischen Windrad und Endverbraucher mehrere Umwandlungen notwendig, die zu Netzverlusten führen. Diese Netzverluste von ca. 6 % werden von den Übertragungsnetzbetreibern ausgewiesen.

### 6.3.4 Sensitivität der Klimatisierung

Die Klimatisierung der Fahrzeuge betrifft mehrere Bereiche. Neben dem Innenraum und der Windschutzscheibe, die innerhalb von drei Minuten nach dem Fahrzeugstart beschlagfrei sein muss, müssen auch die Batterie und die Leistungselektronik mit einem Thermomanagement optimal betrieben werden. Da im WLTP die Prüfprozedur bei 23 °C Umgebungstemperatur und ohne Nebenverbraucher durchgeführt wird,

wird im Folgenden der Einfluss abweichender Temperaturen auf den Energiebedarf betrachtet. Der Energiebedarf der Klimatisierung ist hierbei nach [44] abgebildet.

Folgende Chancen und Risiken bezüglich der resultierenden THG-Emission sind nicht dediziert abgebildet:

### Chancen mit dem Potenzial niedriger THG-Emissionen

- Das Laden der BEV in Phasen von überschüssiger Elektrizität aus sogenannter erneuerbarer Energie, die ansonsten

abgeregelt werden müsste, führt zu einer Verbesserung.

- Autonomes Fahren reduziert notwendige Antriebsleistungen, damit den Energiebedarf.
- Leichtbau führt zu einem geringeren Fahrzeugenergiebedarf in der Nutzungsphase.
- Wirkungsgradverbesserungen der Antriebstechnologie sind generell zielführend.
- Bidirektionales Laden als Teil des Energienetzes wird in „Überschussphasen“ genutzt.

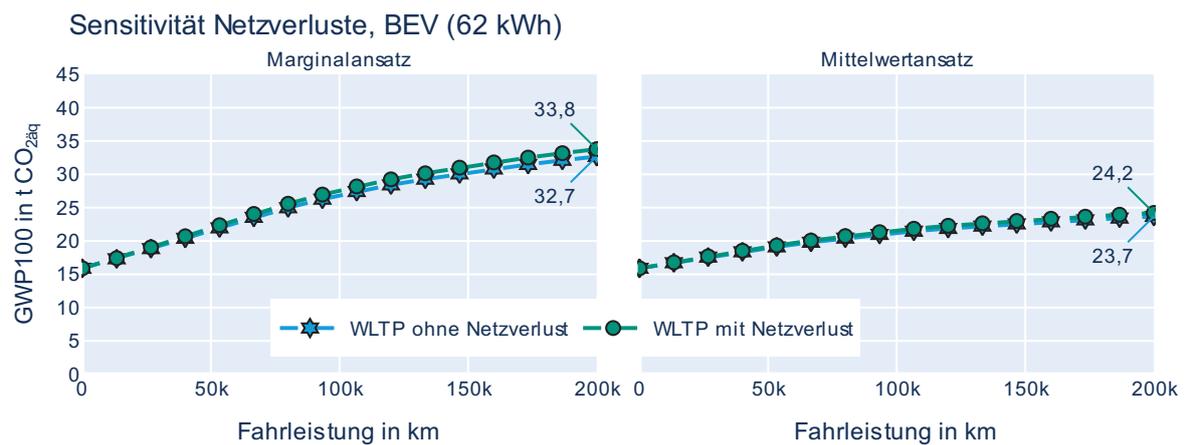


Bild 24. THG-Emissionen eines BEV mit Bezug auf km als führende Einheit, Ladeverluste (im WLTP berücksichtigt) mit und ohne Berücksichtigung der Netzverluste, dargestellt für den Marginalansatz (Ma) und den Mittelwertansatz (Mi), Batterie 62 kWh NMC 721, Produktionsort China 2021

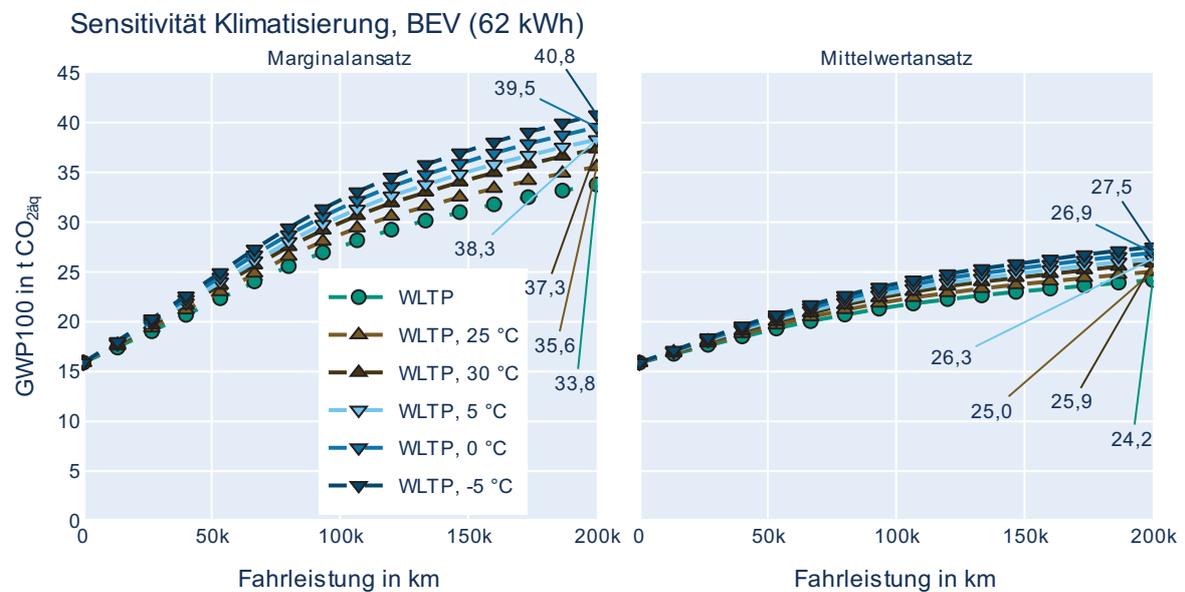


Bild 25. THG-Emissionen eines BEV über die Fahrleistung, WLTP-Verbrauch inklusive Ladeverluste mit Zusatzverbrauch durch Klimatisierung nach [44] bei unterschiedlichen im Marginalansatz und im Mittelwertansatz.

## Risiken mit dem Potenzial erhöhter THG-Emissionen

- Die Steigerung des Energiebedarfs beim autonomen Fahren durch Umweltsensorik (Radar, Lidar, Steuergeräte etc.) führt zu einer Erhöhung der THG-Emissionen, entgegen möglicher Einsparpotenziale (siehe „Chancen“).
- Problematische Lieferketten (Verfügbarkeit Rohstoffe und Leistungshalbleiter) können zu einer Verschlechterung des Antriebswirkungsgrads führen.
- Verzögerungen beim Aufbau der Netzinfrastruktur können zu erhöhten THG-Emissionen führen, wenn Windenergie aus dem Norden nicht im Süden abgenommen werden kann.
- THG-Emission durch Infrastrukturaufbau (Netzanschlüsse) wird nicht berücksichtigt.
- Die Wahl ungünstiger Ladezeitpunkte, insbesondere in der Nacht, führt typischerweise zu einer Verschlechterung der THG-Emissionen.
- Schnellladen (Effizienzverluste und gegebenenfalls Auswirkungen auf Batterielebensdauer) erhöht die THG-Emissionen.

## 6.4 Produktion und Nutzung von ICEV + MHEV + FHEV

Die Gesamtenergiebilanz und THG-Emissionen eines hybridisierten Antriebs werden insbesondere durch zwei Merkmale vorgegeben.

- Die verwendete Hardware (Speichergröße, Leistung des Elektromotors etc.) bestimmt den Fahranteil zwischen Verbrennungsmotor und Elektromotor und definiert die Grenzen der Funktionalität beziehungsweise der Fahrstrategie.
- Durch die hinterlegte Funktionalität (Lastpunktverschiebung, Lastpunktanhebung, Segeln, Rekuperation etc.) wird die Fahrstrategie definiert.

Aus Kostengründen finden sich viele Fahrzeuge mit einem geringen Hybridisierungsgrad im Markt. Ein geringer Hybridisierungsgrad bedeutet eine niedrige elektrische Leistung mit oftmals weniger als einem Zehntel der verbrennungsmotorischen Leistung. Fahrzeuge mit einem Hybridisierungsgrad über 10 % sind großflächig in der Entwicklung. Das Potenzial dieser Technologie wird nachfolgend diskutiert.

### 6.4.1 Sensitivität Verbrauch

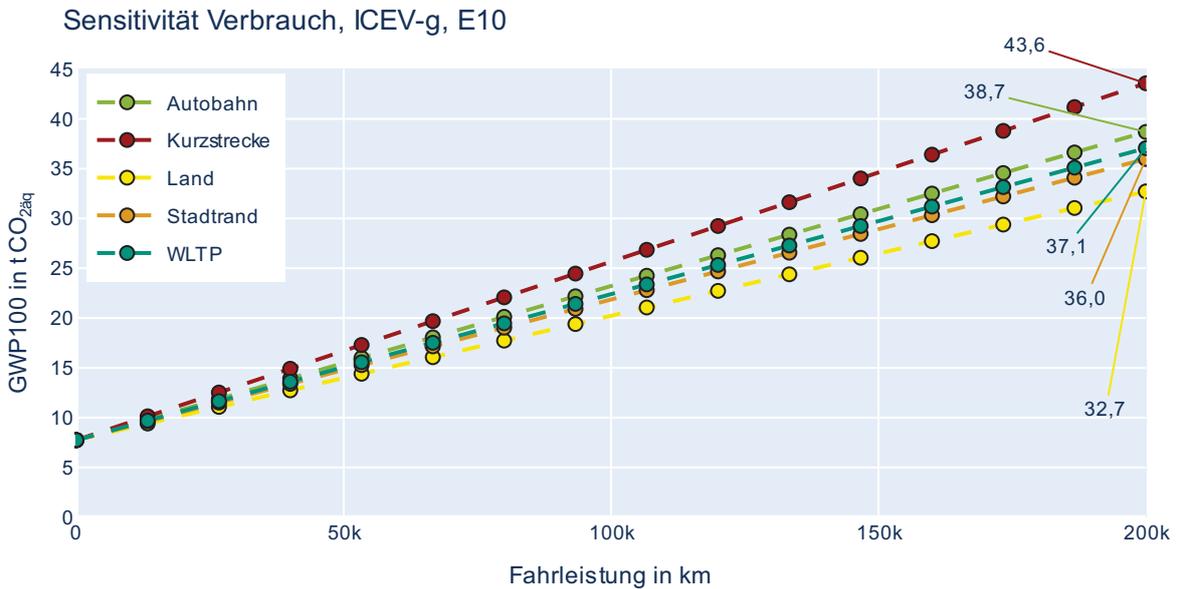
In der Folge wird für verschiedene verbrennungsmotorische Fahrzeuge das Verhalten des Kraftstoffbedarfs beziehungsweise der gesamten THG-Emissionen diskutiert. Dabei werden je nach Datenverfügbarkeit unterschiedliche Szenarien betrachtet, die neben dem WLTP-Verbrauch auch Werte für Kurzstrecken-, Stadt-, Stadtrand-, Land- und Autobahnfahrten sowie EcoTest-Verbrauchsdaten enthalten können. Dabei werden die jeweils gültigen Zertifizierungskraftstoffe herangezogen, also E10 für benzin- und B7 für dieselmotorische Fahrzeuge. Für die beigemengten biogenen Kraftstoffe wird Ethanol gemäß des ecoinvent-Datensatzes der Schweiz (15,9 g CO<sub>2äq</sub>/MJ) sowie Rapsmethyl-ester-Diesel (12,7 g CO<sub>2äq</sub>/MJ) gemäß des BioEnergieDat-Projekts verwendet.

Generell ist zu erkennen, dass unterschiedliche Antriebskonzepte antriebsspezifische Vor- und Nachteile je nach Szenario aufweisen können.

In Bild 26 ist dargestellt, wie sich die THG-Emissionen eines konventionellen benzinmotorischen Fahrzeugs (ICEV-g) über die Lebensdauer von 200.000 km entwickeln.

Bei Annahmen des WLTP-Verbrauchs von 5,4 l/100 km ergeben sich bis zum Lebensende 37,1 t CO<sub>2äq</sub>. In den Anwendungsfällen „Stadtrand“ und insbesondere „Land“ reduziert sich die Emission auf 32,7 t CO<sub>2äq</sub>. Bei Annahme von „Kurzstrecken“-Betrieb steigen die Gesamtemissionen dagegen um 4,5 t CO<sub>2äq</sub> an.

Für das ausgewählte konventionelle dieselmotorische Vergleichsfahrzeug (ICEV-d) stehen Messdaten des ADAC EcoTest zur Verfügung, die auch in Bild 27 Einzug gehalten haben.

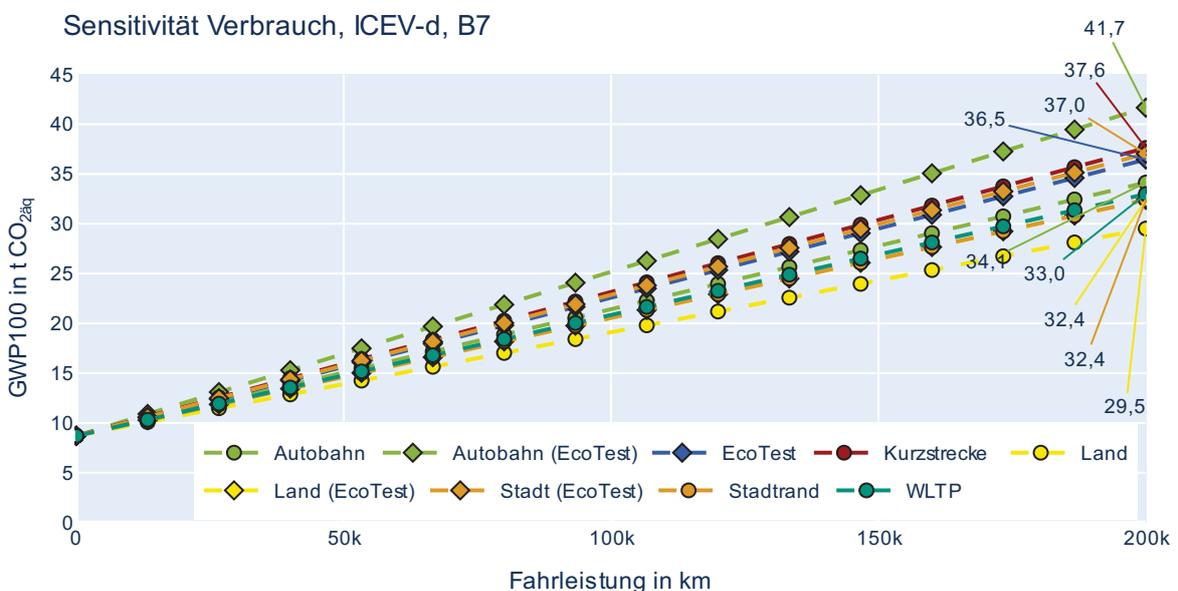


**Bild 26. Einfluss der Fahrdynamik auf die THG-Emissionen eines nicht hybridisierten ottomotorischen Fahrzeugs mit E10 (WLTP Energiebedarf 5,4 l/100 km; 1.330 kg Leergewicht)**

Hierbei wird beispielsweise zwischen Verbrauchswerten unterschieden, die im Zuge des WLTP ermittelt werden und solchen, die vom ADAC bestimmt werden. Am Beispiel „Autobahn“ (aus WLTP-Messungen) und „Autobahn (EcoTest)“ ist zu erkennen, dass sich die unterschiedlichen Fahrprofile deutlich unterscheiden können. In diesem Fall belaufen sich die Emissionen bei Annahme im EcoTest-Autobahn-Betrieb auf 41,7 t CO<sub>2äq</sub> und im WLTP-Autobahn-Betrieb auf 34,1 t CO<sub>2äq</sub>. Bei Annahme des WLTP-Verbrauchs von 4,2 l/100 km ergeben sich nach 200.000 km Emissionen von

33,0 t CO<sub>2äq</sub>, was 4,1 t CO<sub>2äq</sub> weniger als beim WLTP-betriebenen ICEV-g entspricht, siehe Bild 26. Ein besonderes Einsparpotenzial zeigt das ICEV-d, ähnlich zum ICEV-g, beim Betrieb auf der Landstraße. Hierbei belaufen sich die Emissionen auf 29,5 t CO<sub>2äq</sub>. Insbesondere im Kurzstreckenbetrieb steigen die Emissionen stark an, auf 37,6 t CO<sub>2äq</sub> nach 200.000 km.

Das in dieser Bilanzanalyse ausgewählte Vergleichsfahrzeug für das benzinmotorische Mildhybrid-Fahrzeug (MHEV-g-P0) weist im WLTP



**Bild 27. Einfluss der Fahrdynamik auf die THG-Emissionen eines nicht hybridisierten dieselmotorischen Fahrzeugs mit B7 (WLTP Energiebedarf 4,2 l/100 km; 1.380 kg Leergewicht)**

mit 5,1 l/100 km einen Verbrauchsvorteil von 0,3 l/100 km gegenüber dem konventionellen Vertreter auf. Damit belaufen sich die THG-Emissionen bei Annahme des WLTP-Verbrauchs auf 35,6 t CO<sub>2äq</sub>, was einer Reduktion um 1,5 t CO<sub>2äq</sub> im Vergleich zum ICEV-g entspricht, siehe Bild 28. Im Einsatzfall „Land“ verringert sich der THG-Vorteil im Vergleich zum ICEV-g um 0,3 t CO<sub>2äq</sub> auf 32,4 t CO<sub>2äq</sub>.

Bei den bisher betrachteten verbrennungsmotorischen Fahrzeugen befinden sich die THG-Emissionen im Einsatzfall „Land“ auf dem geringsten

Niveau. Beim Voll-Hybrid-Fahrzeug (FHEV-g) ändert sich dieses Verhalten, siehe Bild 29. Hier können die Treibhausgase von 32,1 t CO<sub>2äq</sub> im WLTP auf 30,0 t CO<sub>2äq</sub> auf der Landstraße bis zu 25,1 t CO<sub>2äq</sub> im Stadtbetrieb (EcoTest) reduziert werden. Dagegen weist das Fahrzeug im Vergleich zu den weniger hybridisierten Pendants ähnlich hohe Emissionen im Autobahnbetrieb auf. Dies unterstreicht nochmals den Zusammenhang zwischen der Fahrzeugauslegung und dem gewünschten Fahrprofil.

### Sensitivität Verbrauch, MHEV-g-P0, E10

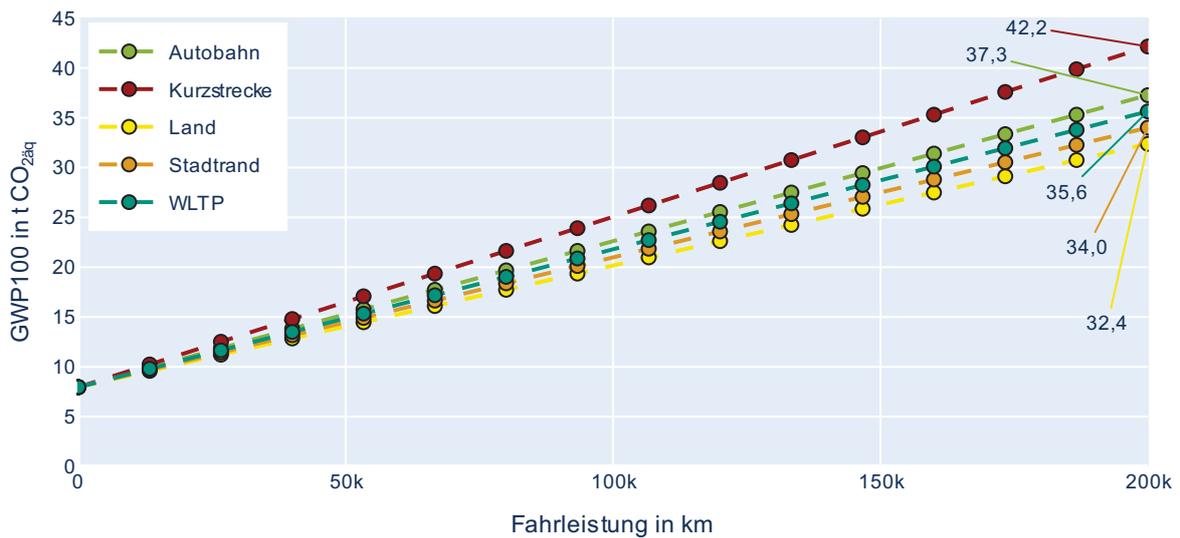


Bild 28. Einfluss des Fahrprofils auf die THG-Emissionen eines Mild-Hybrids mit E10 (WLTP Energiebedarf 5,1 l/100 km; 1.349 kg Leergewicht; 0,48 kWh Batteriekapazität; 11,5-kW-E-Motor)

### Sensitivität Verbrauch, FHEV-g, E10

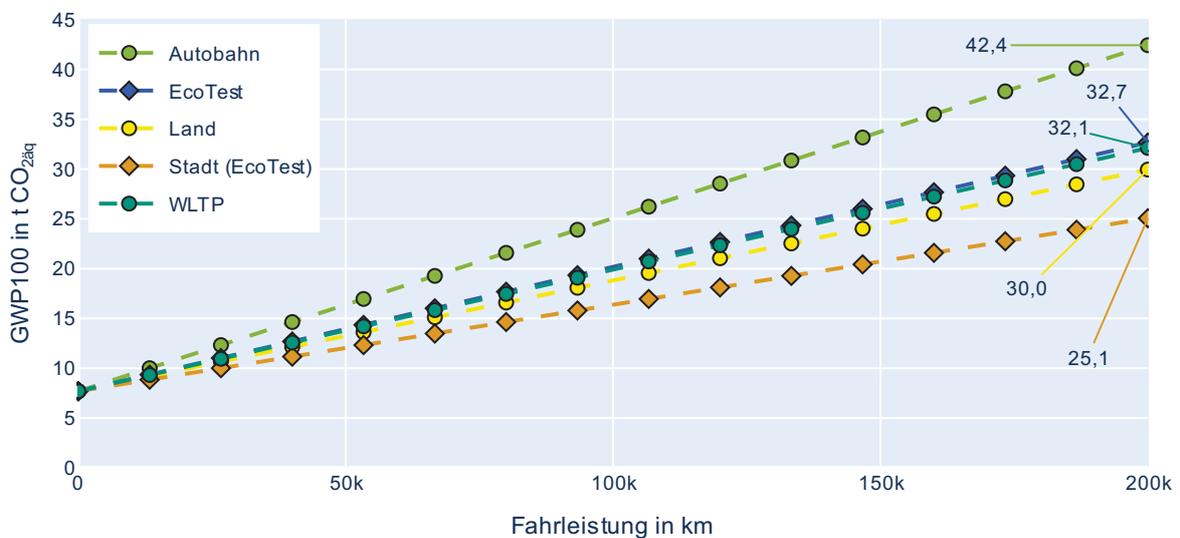


Bild 29. Einfluss der Fahrdynamik auf die THG-Emissionen eines Voll-Hybrids mit E10 (WLTP-Energiebedarf 4,5 l/100 km; 1.285 kg Leergewicht; 0,75 kWh Batteriekapazität; 53-kW-E-Motor)

## 6.4.2 Sensitivität Kraftstoffe

Die THG-Emission verbrennungsmotorischer Antriebe ist an die verwendeten Kraftstoffe gekoppelt. Wenn die Kraftstoffe in ihrer Synthesephase CO<sub>2</sub> aus der Umgebungsluft gebunden haben, können sie teilweise oder komplett den Kohlenstoffkreislauf schließen.

In Deutschland sind die zum öffentlichen Tanken zugelassenen Kraftstoffe in der 10. Bundes-Immissionsschutzverordnung geregelt. Bei Ottokraftstoffen sind innerhalb der EN 228 heute nur E5 und E10 als Kraftstoffe mit 5 Vol.-% oder 10 Vol.-% Ethanol zugelassen. Die gemäß den Daten in ecoinvent v3.8 erreichbare THG-Reduktion ist im Gegensatz zu den Möglichkeiten bei Dieselkraftstoffen eher gering.

Bei den Dieselkraftstoffen müssen in Deutschland die Kraftstoffe mit ihren physikalischen und chemischen Werten innerhalb der Kraftstoffnorm EN 590 liegen. Innerhalb dieser Norm ist eine Biodieselbeimischung von bis zu 7 Vol.-% erlaubt und für Inverkehrbringer als THG-Reduktionsoption zugelassen. Dieser Biodieseldieselkraftstoff wird aus konventioneller Biomasse hergestellt und ist deswegen regulatorisch begrenzt.

Seit einigen Jahren gibt es als fortschrittliche Biokraftstoffe wie hydrierte Pflanzenöle (HVO), die auch aus biogenen Rest- und Abfallstoffen (z. B. Speiseabfälle, biogene Reststoffe) hergestellt werden können. Die Kraftstoffe sind sogenannte paraffinische Dieselkraftstoffe und weisen eine 5 % bis 10 % geringere Dichte als herkömmlicher Dieselkraftstoff auf. Wegen dieser geringeren Dichte unterbieten sie die in der Dieseldieselkraftstoffnorm EN 590 vorgeschriebene Dichte leicht und sind aktuell in Deutschland als

Reinkraftstoff noch nicht zugelassen. Gemäß Ankündigung der Bundesregierung vom 28.02.2023 wird die Zulassung aber erfolgen. Dieseldieselkraftstoffe auf Basis des Fischer-Tropsch-Prozesses und Elektrolyse-Wasserstoff (e-Fuel-Diesel) sind chemisch vergleichbar mit hydriertem Pflanzenöl.

Die Erneuerbaren-Energien-Richtlinie II der EU (RED II) weist THG-Emissionen für verschiedene Arten von HVO aus. Im Vergleich zu fossilem Diesel lassen sich laut RED II je nach Feedstock THG-Einsparungen zwischen 35 % (Palmöl) und 87 % (Altspeiseöl) erzielen [27]. Für die Betrachtungen in dieser Bilanzanalyse wird Altspeiseöl als Feedstock herangezogen.

Neben einer zunehmenden Verbreitung von HVO-Kraftstoffen, siehe auch Abschnitt 6.7.3 und Anhang (Abschnitt 10.2.3), geben Hersteller zunehmend Motoren für den Betrieb mit HVO frei. Neben Neufahrzeugen schließt dies auch Fahrzeuge ein, die sich bereits im Feld befinden. Beispielsweise hat Citroen alle Dieselpkw aber 2011 für die Nutzung von HVO freigegeben [54].

In dieser Bilanzanalyse wurde bei der Bestimmung der Sensitivität nur eine Beimischung des hydrierten Pflanzenöls innerhalb der Grenzen der Dieseldieselkraftstoffnorm betrachtet.

Wie Bild 30 zeigt, ist schon mit einer Beimischung von HVO oder e-Fuel-Diesel (Fischer-Tropsch-Diesel) innerhalb der Dieseldieselkraftstoffnorm EN 590 eine THG-Reduktion erreichbar. Wenn das Fahrzeug mit R33<sup>7</sup> statt mit B7 betrieben wird, kann ein Einsparpotenzial von ca. 6,2 t CO<sub>2äq</sub> pro Fahrzeug bei einer betrachteten Fahrzeugwegstrecke von 200.000 km erreicht werden.

---

<sup>7</sup> Dieseldieselkraftstoff mit 33 Vol.-% Anteil aus „erneuerbaren“ Quellen, davon 7 Vol.-% Biodiesel und 26 Vol.-% HVO

### Sensitivität Kraftstoffe, ICEV-d, Betrieb im WLTP

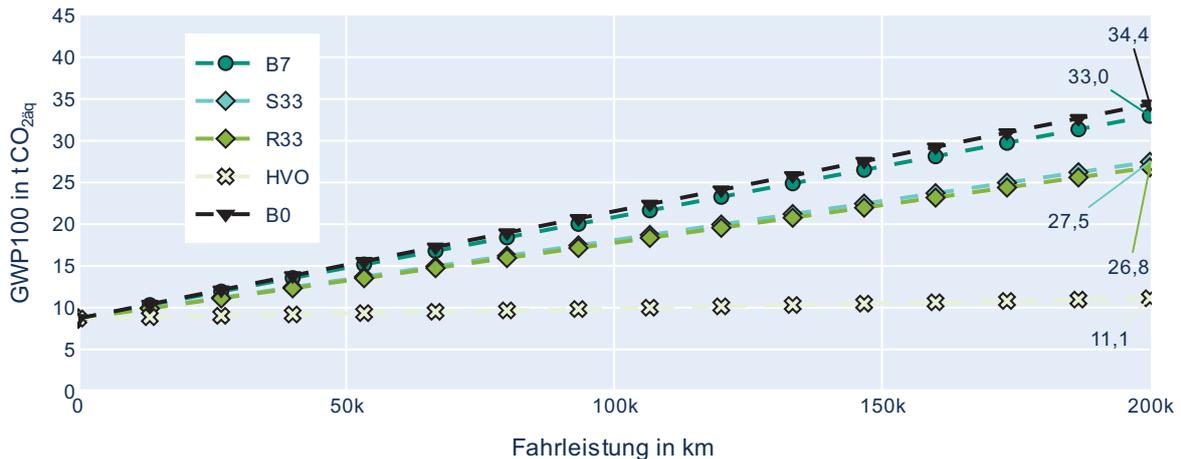


Bild 30. THG-Emissionen eines ICEV-d mit den Kraftstoffen B0, B7, R33 und S33 mit R33 = 26 Vol.-% HVO, 7 Vol.-% Biodiesel und 67 Vol.-% fossilem Diesel und S33 = 26 Vol.-% e-Fuel-Diesel (mit Offshore-Windenergie und DAC), 7 Vol.-% Biodiesel und 67 Vol.-% fossilem Diesel, Kraftstoffverbrauch nach WLTP, Verwendung von HVO aus Altpeiseöl.

### Chancen mit dem Potenzial niedriger THG-Emissionen

- Der Wegfall politischer Hemmnisse für regenerative Kraftstoffe in Europa kann die Verbreitung des Kraftstoffangebots verbessern.
- Wirkungsgradverbesserungen der Antriebstechnologie von entsprechenden Antrieben ermöglichen eine weitere Reduktion der CO<sub>2aq</sub>-Emissionen.
- Die Leichtbautechnologie reduziert auch den Energiebedarf von Hybridkonzepten.
- Neue Produktionsprozesse verbessern die Effizienz von HVO-Kraftstoffen.

### Risiken mit dem Potenzial erhöhter THG-Emissionen

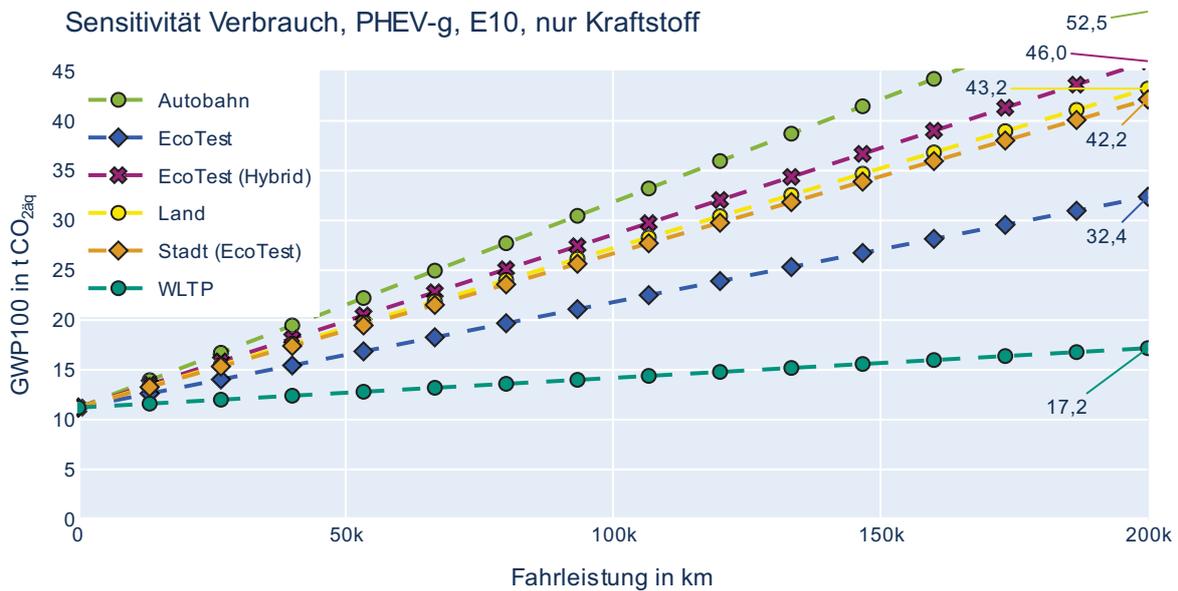
- Eine limitierte Verfügbarkeit von CO<sub>2aq</sub>-armen Kraftstoffen limitiert auch den Nutzen der Fahrzeuge.
- Rebound-Effekte durch mögliche hohe Antriebsleistung und erhöhte Kundenfahrstrecke durch sparsamere Antriebe mit reduzierten Betriebskosten können kontraproduktiv wirken.

### 6.5 Produktion und Nutzung von PHEV

Die Betrachtung der THG-Emissionen eines Plug-in-Hybrid-Fahrzeugs ist auf Basis von im Markt befindlichen Fahrzeugen erfolgt. Aktuell ist eine Änderung der regulatorischen Rahmenbedingungen des PHEV-Betriebs Gegenstand politischen Aktivitäten. Der vom ADAC durchgeführte EcoTest geht über die aktuellen gesetzlichen Bewertungskriterien hinaus und liefert Daten für unterschiedliche Fahrprofile.

In Bild 31 sind die THG-Emissionen dargestellt, die sich ergeben, wenn im ersten Schritt nur die kraftstoffbedingten Emissionen berücksichtigt werden und mögliche elektrizitätsbedingte Emissionen vernachlässigt werden.

Dies soll verdeutlichen, wie stark sich die Gesetzgebung auf die Aufteilung des Energiebedarfs in einen verbrennungsmotorischen und elektrischen Anteil auswirkt, siehe auch die weiterführenden Informationen im Anhang (Abschnitt 10.6). Beim WLTP ergibt sich nach der aktuell gültigen Berechnungsmethodik für das Vergleichsfahrzeug lediglich ein Kraftstoffbedarf von 0,9 l/100 km. Werden die zusätzlich anfallenden 13,7 kWh/100 km Elektrizität ausgeblendet, ergeben sich damit nach 200.000 km nur 17,2 t CO<sub>2aq</sub>. Wesentlich höhere Kraftstoffverbrauchswerte und damit Emissionen ergeben



**Bild 31.** THG-Emissionen eines Plug-in-Hybrid-Fahrzeugs (PHEV) mit 13 kWh Batterie, 0,9 l/100 km WLTP-Verbrauch, sofern lediglich die durch den Verbrennungsmotor bedingten Emissionen berücksichtigt werden, um den Einfluss unterschiedlicher Fahrprofile zu verdeutlichen.

sich, sofern höherlastige (EcoTest-)Tests durchgeführt werden bzw. keine Gewichtung zugunsten rein elektrischen Fahrens durchgeführt wird. So führt beispielsweise der EcoTest mit seinem zusätzlichen Autobahnanteil im Vergleich zum WLTP bereits zu wesentlich höheren Emissionen von 32,4 t CO<sub>2äq</sub>. Wird lediglich der ladungserhaltende Teil des EcoTest durchgeführt, in der Abbildung als „EcoTest (Hybrid)“ bezeichnet, ergeben sich sogar 46 t CO<sub>2äq</sub>.

Die Sensitivitätsbetrachtung des beispielhaft ausgewählten Plug-in-Hybrid-Fahrzeugs zeigt dessen Vorteile, wenn das Fahrzeug im applizierten Streckenprofil (der Bemessungszyklus und damit meist der WLTP-Zyklus) betrieben wird. Sowohl im reinen Stadt- als auch im reinen Autobahnbetrieb wird das Fahrzeug von diesem Auslegungsprofil abweichend betrieben.

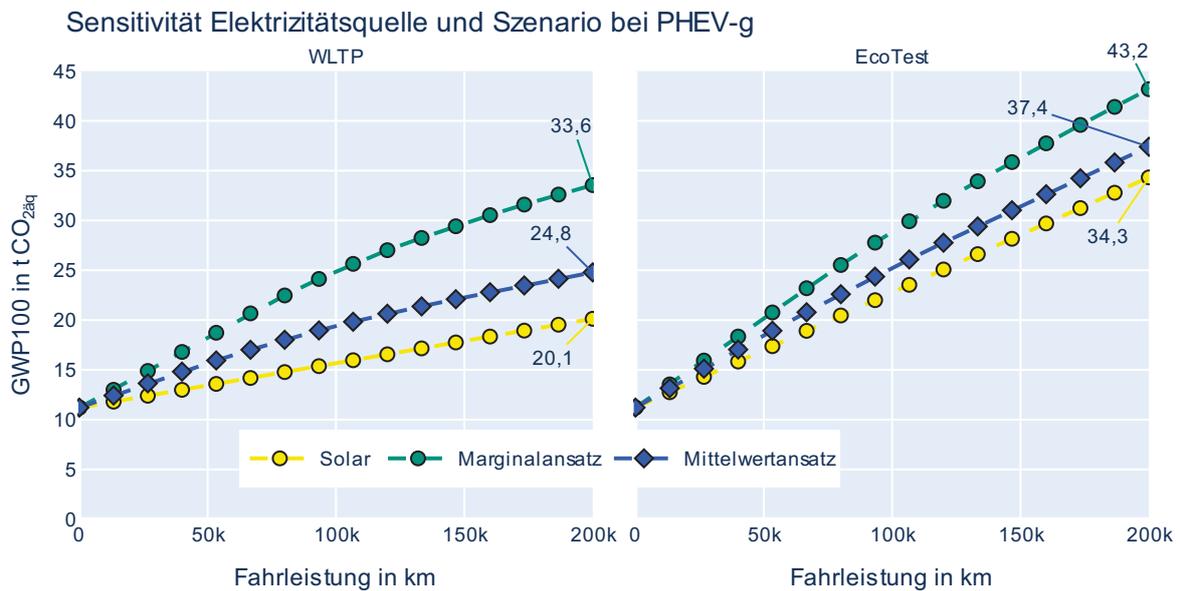
Im nächsten Schritt werden neben den kraftstoff- auch die elektrizitätsbedingten Emissionen berücksichtigt. In Bild 32 ist dargestellt, welche Emissionen sich im WLTP- und EcoTest-Betrieb ergeben, wenn die benötigte Elektrizität über Solarenergie bzw. nach Mittelwert- bzw. Marginalansatz bezogen wird. Ausgehend von den kraftstoffbedingten WLTP-Emissionen in Bild 31 von 17,2 t CO<sub>2äq</sub> ergeben sich je nach Elektrizitätsquelle insgesamt

20,1 t CO<sub>2äq</sub> (Solar) bis 33,6 t CO<sub>2äq</sub> (Marginalansatz). Mit den Energiebedarfsannahmen des EcoTest ergeben sich entsprechend höhere Werte zwischen 34,4 t CO<sub>2äq</sub> (Solar) bis 43,2 t CO<sub>2äq</sub> (Marginalansatz). Hierbei sei angemerkt, dass für die Fahrprofile „Stadt“, „Land“ und „Autobahn“ zwar Werte für den Kraftstoffverbrauch, siehe Bild 31, aber nicht für den elektrischen Energiebedarf vorliegen.

Ein Plug-in-Hybrid ist vom Auslegungskonzept dann ideal, wenn er mit der elektrisch gespeicherten Energie das individuelle Fahrprofil abdecken kann. Wird dieses Ladeprofil mit einer heimischen Solaranlage, mit einer Bilanzgrenze um diese Eigenheimversorgung, kombiniert, sind die niedrigsten THG-Emissionen erzielbar.

## 6.6 Vergleich aller Antriebssysteme nach WLTP und EcoTest

Nachdem die Fahrzeuge nach ihrer Hauptantriebsart getrennt auf unterschiedliche Sensitivitäten untersucht wurden, folgt an dieser Stelle eine Übersicht der Ergebnisse bei Annahme des Betriebs im WLTP und, sofern Daten vorliegen, im EcoTest. Gemäß der Angaben des ADAC besteht der ADAC EcoTest aus je einer WLTP-Fahrt (Distanz: 23,25 km) mit kaltem und warmem Motor sowie dem ADAC-Autobahnzyklus,



**Bild 32. Einfluss der Quelle des PHEV-Ladestroms auf die THG-Bilanz bei unterschiedlichen Fahrprofilen nach WLTP und EcoTest bei Annahme des KNDE45-Szenarios im Marginalansatz und im Mittelwertansatz.**

in dem eine Distanz von ca. 10 km zurückgelegt wird. Bei Elektrofahrzeugen und Plug-in-Hybriden wird ein Elektrozyklus aus angepasstem WLTP und Autobahnzyklus durchgeführt. Weitere Informationen können [3] entnommen werden.

In Bild 33 sind die Treibhausgase dargestellt, die sich beim Betrieb im WLTP ergeben. Dabei weisen die beiden batterieelektrischen Fahrzeuge sowie das PHEV-g die geringsten Emissionen auf, sofern bei der Berechnung der elektrizitätsbedingten Emissionen der Mittelwertansatz gewählt wird. Am besten schneidet das BEV mit kleinerer Batterie, BEV (62 kWh, Mi), mit 24,2 t CO<sub>2äq</sub> ab. Wird der THG-Footprint der elektrischen Energie mittels des Marginalansatzes bestimmt, BEV (62 kWh, Ma), resultieren 33,8 t CO<sub>2äq</sub>. Am schlechtesten schneidet das konventionelle benzinmotorische Fahrzeug, ICEV-g, mit 37,1 t CO<sub>2äq</sub> ab.

Bereits zwischen 50.000 km und 150.000 km Laufleistung werden die höheren Emissionen in der Herstellung einiger Fahrzeuge durch den emissionsärmeren Betrieb kompensiert. Dies ist in Bild 34 detailliert dargestellt.

Werden für den Energiebedarf Werte gemäß EcoTest verwendet, verschieben sich alle Kurven zu höheren Werten, siehe Bild 35. So weist das BEV mit kleinerer Batterie bei Annahme des Mittelwertansatzes, BEV (62 kWh, Mi), 26,1 t CO<sub>2äq</sub> auf, was einer Erhöhung um 1,9 t CO<sub>2äq</sub> im Vergleich zum Betrieb im WLTP entspricht. Der Emissionswert zuvor vergleichsweise treibhausgasarmen Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen verschiebt sich durch die Umstellung des Fahrprofils von 24,8 t CO<sub>2äq</sub> auf 37,4 t CO<sub>2äq</sub> nach Mittelwertansatz bzw. von 33,6 t CO<sub>2äq</sub> auf 43,2 t CO<sub>2äq</sub> nach Marginalansatz.

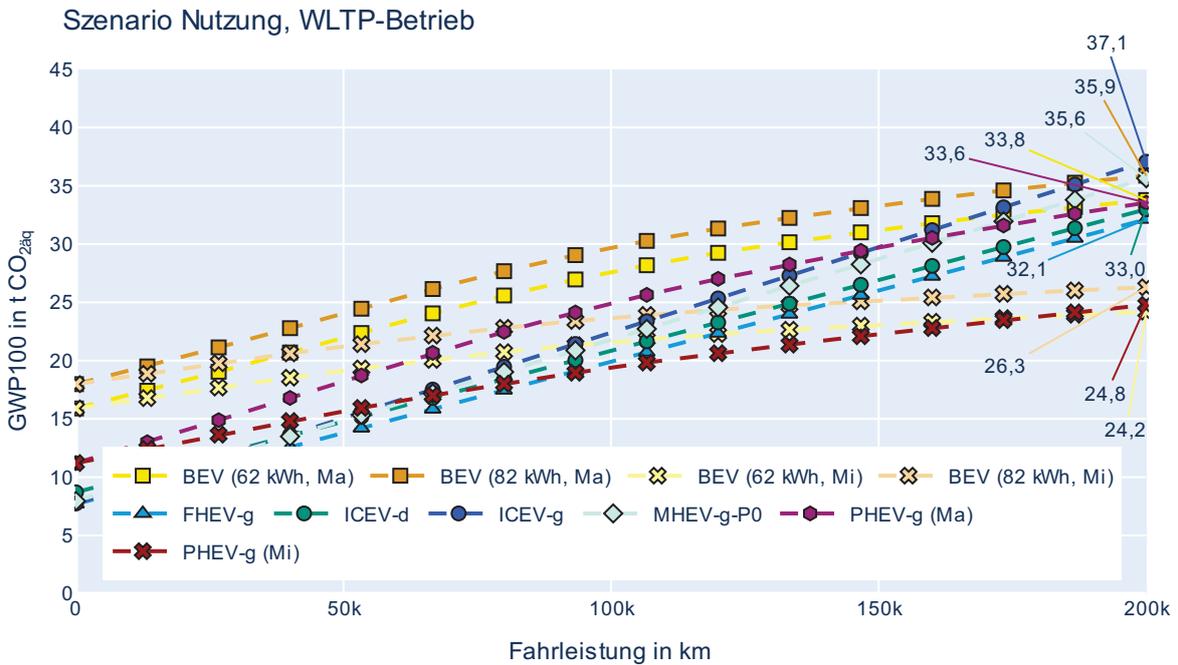


Bild 33. Vergleich der kumulativen THG-Emissionen für unterschiedliche Antriebsstrangkonzeppte auf Basis der WLTP-Verbräuche für den Marginalansatz (Ma) und den Mittelwertansatz (Mi) für BEV mit 62-kWh- bzw. 82-kWh-Batterie sowie PHEV-g und ICEV-d, FHEV-g, MHEV-g-P0, ICEV-g

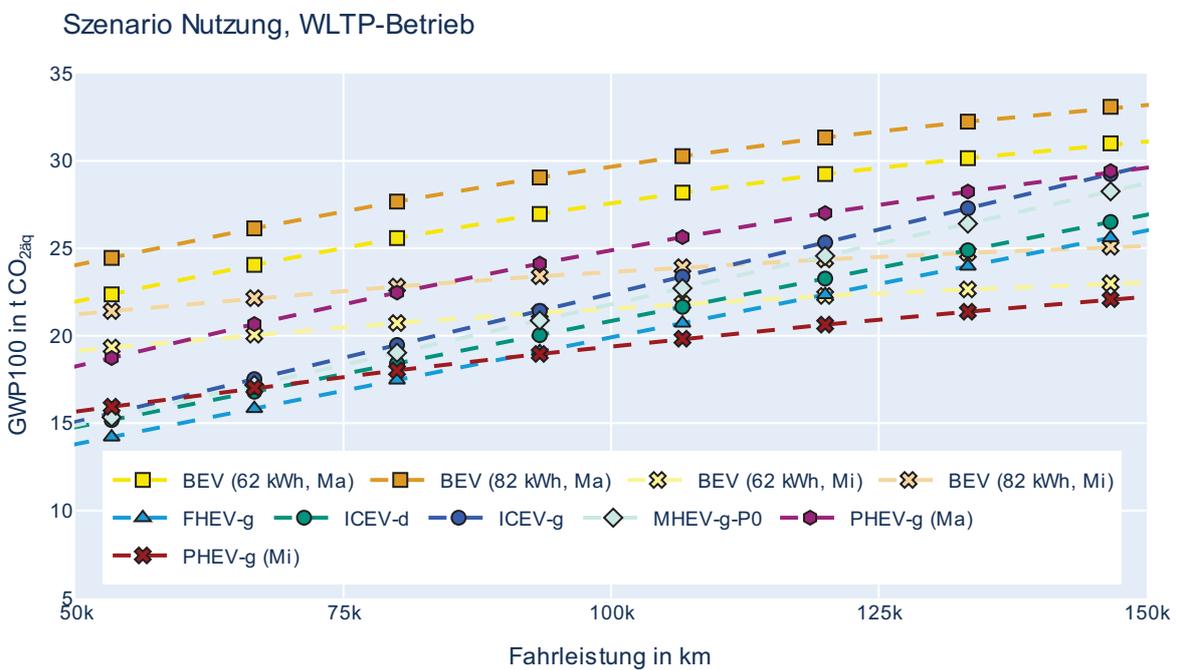
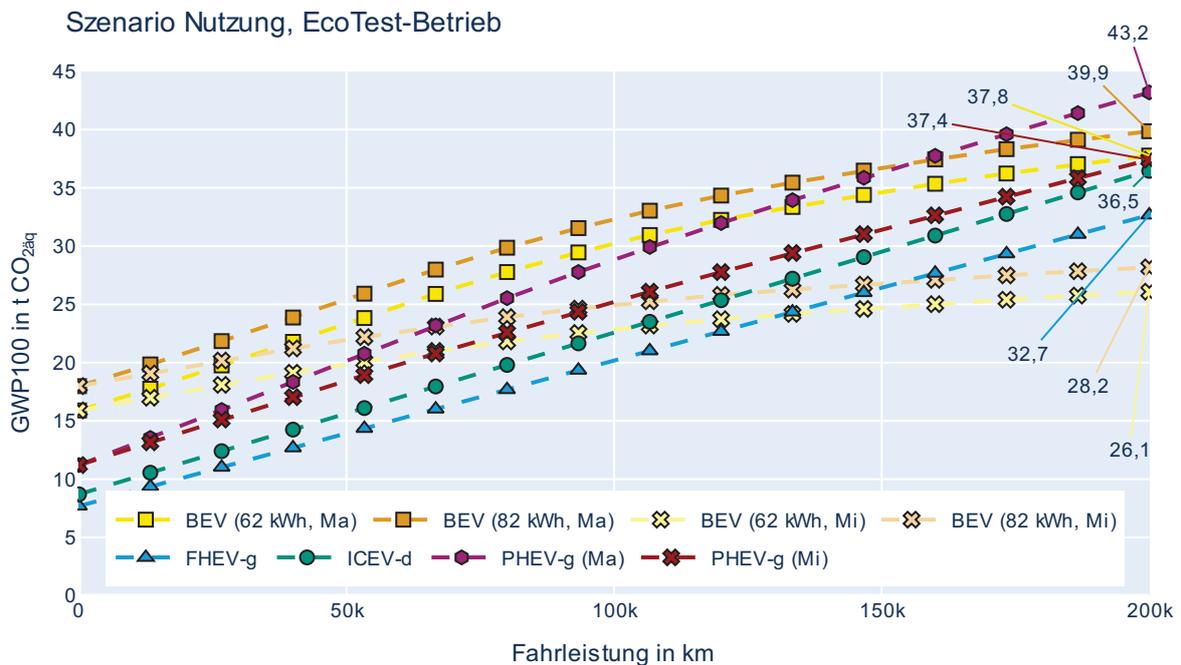


Bild 34. Ausschnitt des Vergleichs der kumulativen THG-Emissionen für unterschiedliche Antriebsstrangkonzeppte auf Basis der WLTP-Verbräuche für dem Marginalansatz (Ma) und den Mittelwertansatz (Mi) für BEV mit 62-kWh- bzw. 82-kWh-Batterie sowie PHEV-g und ICEV-d, FHEV-g, MHEV-g-P0, ICEV-g



**Bild 35. Vergleich der kumulativen THG-Emissionen für unterschiedliche Antriebsstrangkonzepte auf Basis der EcoTest-Verbräuche für dem Marginalansatz (Ma) und den Mittelwertansatz (Mi) für BEV mit 62-kWh- bzw. 82-kWh-Batterie sowie PHEV-g und ICEV-d, FHEV-g, MHEV-g-PO, ICEV-g**

## 6.7 Szenarien

In diesem Abschnitt werden kombinierte Annahmen und Szenarien künftiger Entwicklungen betrachtet. Der Einfluss des Benutzungsprofils (Use Case) ist bei Fahrzeugen mit hybridisierten Antriebsträngen von besonderer Bedeutung. Die unterschiedlichen und vielfältigen Auslegungsformen der Hybridisierung ermöglichen hier ein besonders effektives Fahrverhalten oder eine an das eigene Fahrprofil angepasste Fahrzeugauswahl. Wie in den Annahmen in Abschnitt 4.2.8 dargelegt, wird in jedem Szenario, also unabhängig vom Nutzungsprofil, eine Jahresfahrleistung von 13.333 km und somit eine Gesamtfahrleistung von 200.000 km in den Jahren 2021 bis 2035 angenommen.

### 6.7.1 Szenario „Fahrt zum Bäcker“

Für das Szenario „Fahrt zum Bäcker“ werden drei verschiedene Arten von Stadt- bzw. Kurzstreckenbetrieb betrachtet. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass bei manchen Fahrzeugen mehr oder weniger publizierte Daten vorliegen. Die drei Arten werden jeweils zusammengefasst, um zwei Varianten darzustellen: „Stadt- und Kurzstreckenbetrieb“ sowie „Stadt- und Stadtrandbetrieb“, siehe Bild 36 und Bild 37. In bei-

den Fällen liegen keine Daten für das ausgewählte Vergleichsfahrzeug des Plug-in-Hybrid-Fahrzeugs vor.

Der Stadtbetrieb hat besondere Anforderungen an das Fahrzeug. Häufiger Kurzstreckenbetrieb beinhaltet viele Fahrten bei niedriger Betriebstemperatur, aber auch viele Möglichkeiten zur Rekuperation. Eine geeignete Hybridisierungsapplikation kann eine reduzierte THG-Emission ermöglichen.

Bei vielen dieser Anwendungen resultiert aus diesem Fahrverhalten auch nur eine geringe jährliche Fahrtstrecke, die meist auch in einer reduzierten Gesamtfahrleistung mündet. Der Taxibetrieb ist eine Ausnahme, bei der das Stadtfahrprofil mit hoher Fahrleistung kombiniert wird.

Aus obigen Analysen resultiert die Schlussfolgerung, dass eine geringe Batteriekapazität und damit reduzierte produktionsbedingte THG-Emissionen ein geeignetes Konzept darstellen kann.

Das Fahrprofil Stadtrand (s. a. Bild 37) kann auf spezielle Nutzergruppen übertragen werden.

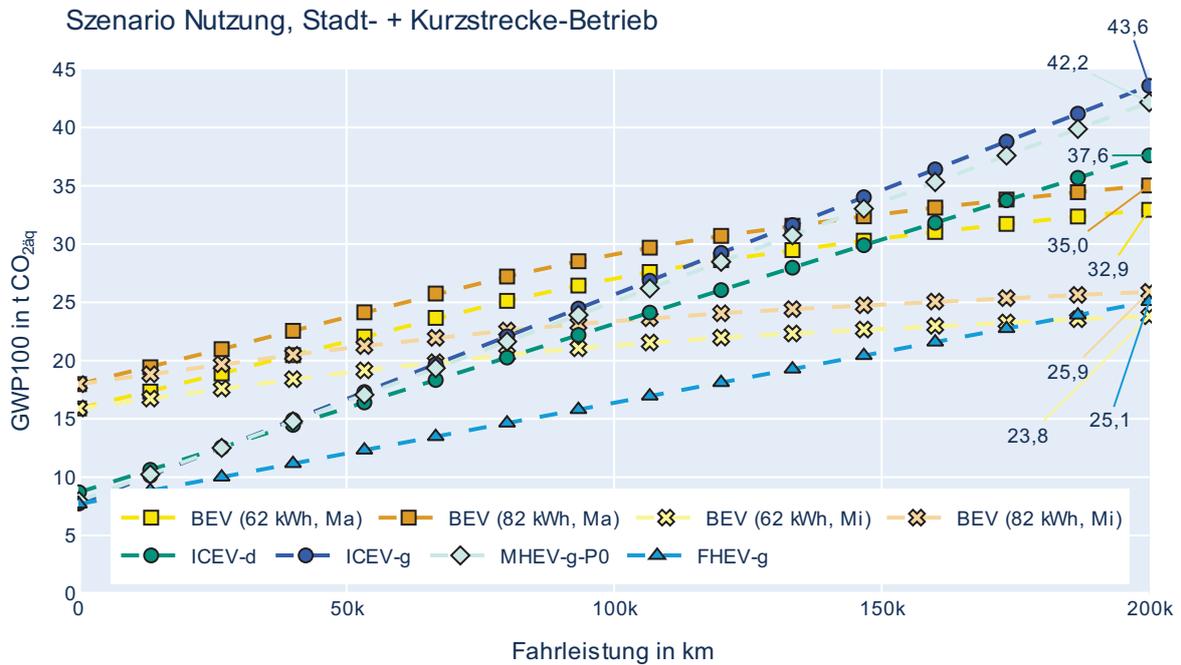


Bild 36. THG-Emissionen der Fahrzeuge im Stadt- bzw. Kurzstreckenbetrieb, FHEV-g mit Verbrauchswert „Stadt (EcoTest)“ unter Nutzung aktueller fossiler Kraftstoffe und elektrischer Energie im Marginal- (Ma) und im Mittelwertansatz (Mi)

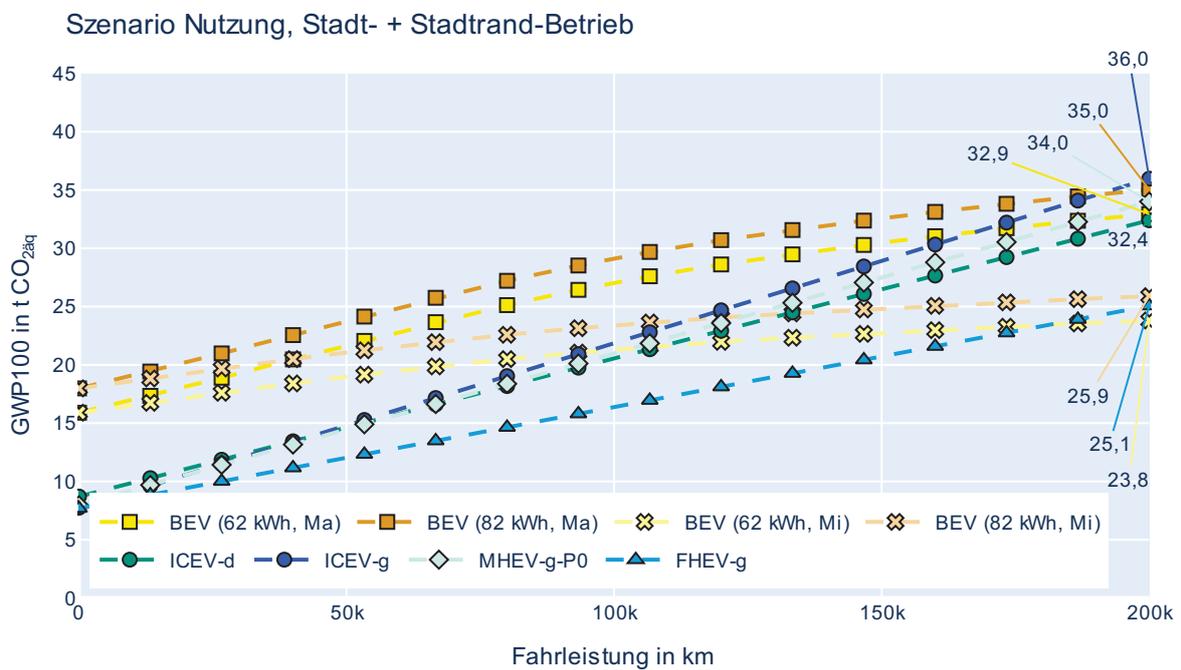


Bild 37. THG-Emissionen der Fahrzeuge im Stadt- bzw. Stadtrandbetrieb, FHEV-g mit Verbrauchswert „Stadt (EcoTest)“, BEV im Marginalansatz (Ma) und im Mittelwertansatz (Mi)

Ein Beispiel für dieses Nutzerprofil wären z. B. Pflegedienste, die sowohl im innerstädtischen, als auch im Stadtrandbetrieb aktiv sind. Die Szenarien machen deutlich, welcher Hybridisierungsgrad oder welcher Antriebsstrangtyp über einen angenommenen Nutzungszeitraum die niedrigsten THG-Emissionen aufweisen.

## 6.7.2 Szenario „Langstreckenfahrer“

Ein gegenläufiges Nutzerprofil ist der Langstreckenfahrer. Hier kombinieren sich lange Strecken und Fahrtzeiten oft mit hohen Jahreskilometerleistungen. Der Autobahnbetrieb zeigt wegen der Kombination hoher Lasten mit höheren Geschwindigkeiten eine Verbrauchsabhäng-

igkeit der verschiedenen Antriebskonzepte, siehe Bild 38.

THG-Emission der Umsetzung als Mild- und als Vollhybrid sind in Bild 39 dargestellt.

### 6.7.3 Szenario „P2 Diesel FHEV“

Die technischen Möglichkeiten des Einsatzes von Hybriden mit einer der parallel-seriellen Konfiguration (PS2) ermöglichen weitere Applikationsfreiheiten, mit denen sparsame hybridisierte Fahrzeuge realisiert werden können. Die

Im WLTP-Betrieb werden im nicht elektrifizierten Ausgangszustand 33,0 t CO<sub>2äq</sub> nach 200.000 km emittiert. Je nach Hybridkonzept reduzieren sich die Emissionen auf 30,6 t CO<sub>2äq</sub> bis 31,1 t CO<sub>2äq</sub>. Nicht berücksichtigt sind in beiden Fällen THG-Emissionen, die in der Entwicklungs- und Applikationsphase emittiert werden.

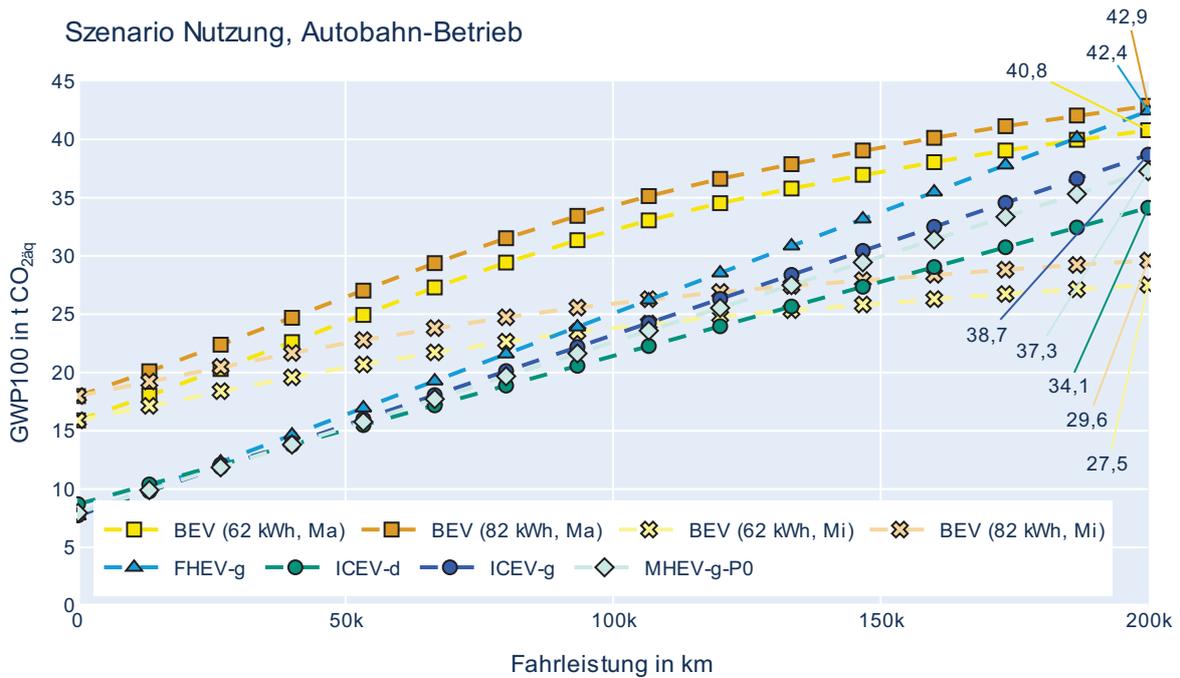


Bild 38. THG-Emissionen unterschiedlicher Antriebskonzepte im Autobahnbetrieb, Kraftstoffen E10 und B7 sowie über das Marginalansatz (Ma) und den Mittelwertansatz (Mi) bestimmte THG-Emissionen für den elektrischen Fahrenergiebedarf

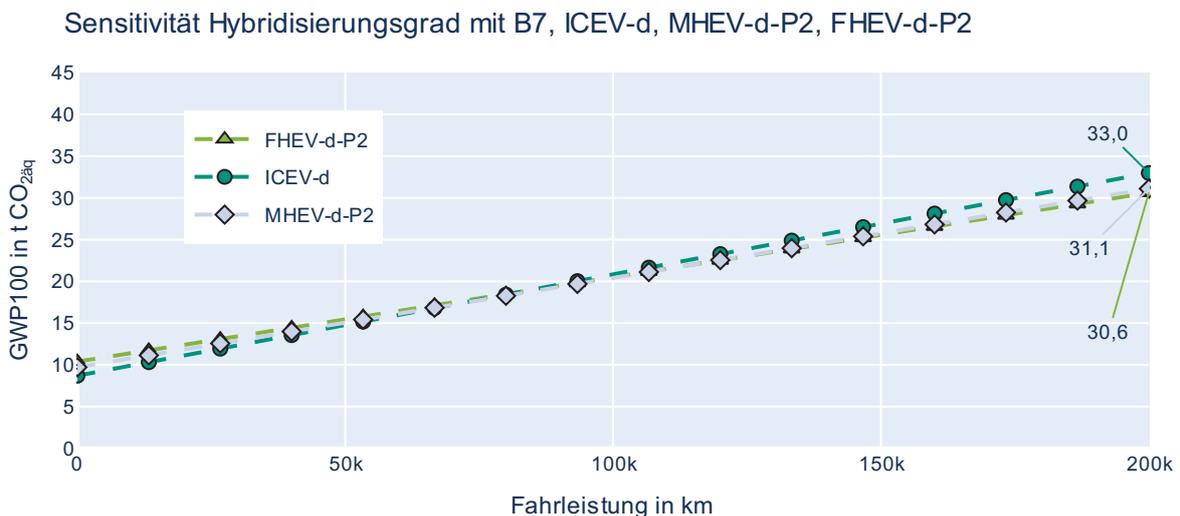


Bild 39. THG-Emissionen zweier stark hybridisierter dieselmotorischer Hybridfahrzeuge im WLTP

#### 6.7.4 Szenario „Kraftstoffentwicklung“

Synthetische Kraftstoffe aus regenerativen Quellen können als eFuels oder als fortschrittliche Biokraftstoffe die Bilanz der Bestandsflotte verbessern. Wesentliche Ursache ist die Speicherung von CO<sub>2</sub> aus der Umgebungsluft (direkt über direct air capture oder indirekt über Pflanzen, deren Rest- und Abfallstoffe das Ausgangsprodukt sind).

Die verfahrenstechnische Entwicklung ist so weit fortgeschritten, dass alle relevanten Technologien TRL 8 oder TRL 9 erreicht haben. Die Skalierung dieser Produkte wird wesentlich von dem regulatorischen Rahmen beeinflusst. Um die Potenziale in dieser Bilanzanalyse realistisch beschreiben zu können, werden exemplarisch die Wirkungen der THG-Reduktionsgesetzgebung in Deutschland und Schweden betrachtet.

Die deutsche Umsetzung in der 38. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchV) fordert eine 25%ige THG-Reduktion bis 2030. Da sich die THG-Reduktionspotenziale an den Bewertungen der RED II, Anhang IXa orientieren, kann der Kraftstoffmix 2030 berechnet werden. Eine Doppeltanrechnung bestimmter Kraftstoffanteile bei Überschreitung der Mindestmengen ist hierbei berücksichtigt<sup>8</sup>. Eine weitere Annahme dieser Berechnung ist, dass entsprechend der Vorgaben in der RED II Art. 29 Absatz Xa-d die konventionelle Bioanbaumasse nicht erhöht wird. Wenn keine weiteren<sup>9</sup> Kraftstoffe hinzugenommen werden, ergibt sich die im Anhang

(Abschnitt 10.2.3) in Bild 51 dargestellte Kraftstoffkomponentenzusammenstellung. Diese entspricht etwa den Kraftstoff-Blends R33 und E20 als Diesel- bzw. Benzinkraftstoff. Im Gegensatz zur deutschen Umsetzung der RED II ist die schwedische Umsetzung deutlich progressiver. Die entsprechende nationale Umsetzung des Lag2017 sieht deutlich höhere Mengen an THG-reduzierten Kraftstoffen vor, wie im Anhang (Abschnitt 10.2.3) in Bild 52 dargestellt.

Die möglichen Umweltwirkungen der Synthese und Nutzung dieser Kraftstoffe sind in [7] beschrieben. In Bild 40 bzw. Bild 41 sind die Effekte der Kraftstoff-Entwicklung in Deutschland und Schweden für Benzinkraftstoff bzw. Dieselmotorkraftstoff auf Basis von WLTP-Verbrauchswerten dargestellt. In Bild 40 ist durch die schrittweise Umstellung in Schweden auf E55 ein im Vergleich zu Deutschland (Umstellung auf E20) deutliches Einsparpotenzial zu erkennen. In Schweden betriebene Fahrzeuge sparen ca. 4,5 t CO<sub>2äq</sub> (FHEV-g) bzw. 5,5 t CO<sub>2äq</sub> (ICEV-g) im Vergleich zu Fahrzeugen mit deutscher Kraftstoffentwicklung.

In Bild 41 ist ein weiterer Effekt deutlich zu erkennen. Gemäß den Kraftstoffszenarien für Deutschland und Schweden (siehe Anhang, Abschnitt 10.2.3) wird in Schweden schrittweise der Dieselmotorkraftstoff in Richtung einer R80-Zusammenstellung entwickelt. Schweden greift dabei auf ein aus mehreren Ländern importiertes Biomassepotenzial zurück [22].

---

<sup>8</sup> Die nationale Umsetzung in der 38. BImSchV sieht zur Motivation eine Mehrfachanrechnung der THG-Reduktion bestimmter Kraftstoffsorten und eine Dreifachanrechnung der Elektrizität batterieelektrischer Fahrzeuge als

Erfüllungsoption der geforderten THG-Reduktion der Kraftstoffindustrie vor.

<sup>9</sup> Im Ausland gibt es Kraftstoffe auf Basis von hydriertem Naphtha.

### Szenario Kraftstoffe, Benzin-Kraftstoff, WLTP

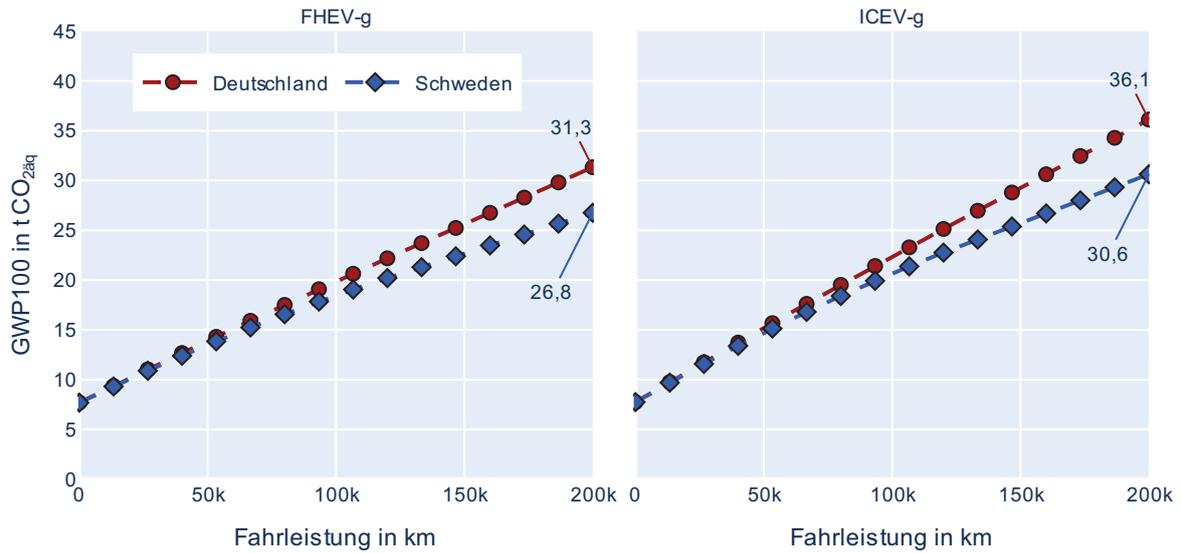


Bild 40. THG-Emissionen ottomotorischer Fahrzeuge unter Annahme der Kraftstoffentwicklung in Deutschland und Schweden bis 2030, ohne weitere Verbesserung von 2030 bis 2035 bzw. 200.000 km fortgeschrieben

### Szenario Kraftstoffe, Diesel-Kraftstoff, WLTP

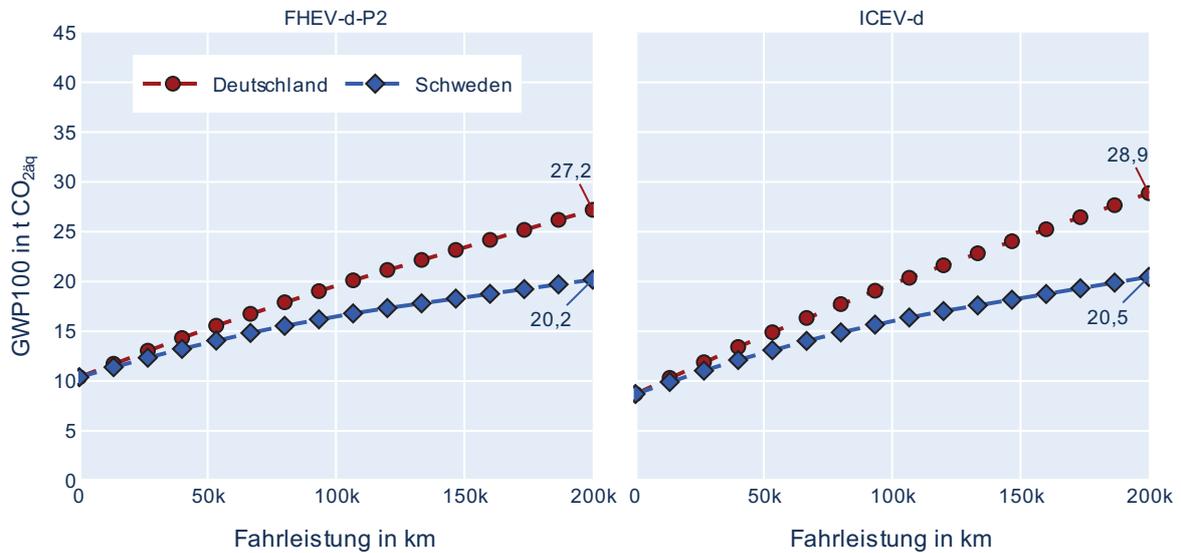


Bild 41. THG-Emissionen dieselmotorischer Fahrzeuge unter Annahme der Kraftstoffentwicklung in Deutschland und Schweden bis 2030, ohne weitere Verbesserung von 2030 bis 2035 bzw. 200.000 km fortgeschrieben

## 7 Interpretation

Die funktionale Betrachtungseinheit der Bilanzanalyse ist die zurückgelegte Wegstrecke eines Pkw, auch Fahrzeugkilometer genannt. Eine Übertragung in Personenkilometer ist mit Blick auf die damit verbundenen notwendigen Annahmen nicht erfolgt. Natürlich ist durch die Erhöhung der Fahrzeugauslastung mit mehr Passagieren ein zusätzliches Potenzial für alle Antriebskonzepte gegeben.

Die Herangehensweise berücksichtigt den kumulativen Charakter der Wirkung aller emittierter Treibhausgase (z. B. Bild 38). Damit vermittelt diese Darstellung ein leicht kommunizierbares Ergebnis. Mit Blick auf das international vereinbarte THG-Restbudget sind die jeweiligen Betrachtungen mit der jeweiligen Fahrzeuganzahl zu multiplizieren. Bei einer derartigen Analyse der Ergebnisse sind aber Flottenmodelle abzubilden, die die jeweiligen Fahrzeugtypen und gegebenenfalls Fahrzeugtypwechsel gemäß den Flottenwechseleffekten abzubilden vermögen.<sup>10</sup>

Wie im Abschnitt 5.1.1 beschrieben, werden bei allen Fahrzeugen, in deren Nutzungsphase Elektrizität den Energieträger stellt, parallel im Marginalansatz und im Mittelwertansatz dargestellt.

Eine Diskussion der Auswirkungen unterschiedlicher Fahrprofile auf die Nutzungsdauer der Fahrzeuge wird in dieser Bilanzanalyse nicht berücksichtigt, da die Datenlage zu den spezifischen Verbräuchen einer weiteren Streuung unterliegt. Es sei aber darauf hingewiesen, dass laut der Bandbreite der Auswertungen nach KBA viele Fahrzeuge keine Laufleistung von 200.000 km oder mehr erreichen, bevor sie im Betrachtungsrahmen Deutschland außer Betrieb gesetzt werden. Etwaige Weiternutzung nach Export oder Verschrottung wird nicht betrachtet. In Fällen niedriger Laufleistung sind die produktionsbedingten Emissionen als besonders relevant zu betrachten, was sich bei batterieelektrischen Fahrzeugen verhältnismäßig stark auswirkt. Ein solcher Fall kann beispielsweise bei einem Nutzungsszenario „Fahrt zum Bäcker“ auftreten.

---

<sup>10</sup> Die vorliegende Bilanzanalyse fokussiert auf Kompaktklasse-Fahrzeuge, die eine Art mittleres Fahrzeug abbilden, auch wenn die Fahrzeugflotte sich stark in Richtung J-Segment (Sport Utility Vehicle) verändert. Es würde den

Umfang der Bilanzanalyse noch weiter ausdehnen, die entsprechenden Flotteneffekte dezidiert abzubilden. Weitere Aussagen bzgl. des J-Segments können dem Anhang (Abschnitt 10.1) entnommen werden.

## 8 Grenzen der Bilanzanalyse

Der Bilanzanalyse liegen eine Reihe von Annahmen zugrunde, die in den jeweiligen Abschnitten beschrieben und diskutiert werden. Die Chancen und Risiken werden typischerweise zusammen mit einer grafischen Abbildung erörtert.

Diese Bilanzanalyse wurde auf Basis der beschriebenen Annahmen und zugänglicher und belegter Informationen durchgeführt. Die in der Bilanzanalyse betrachteten Prognosen basieren auf den erläuterten Szenarien. Weitergehende Prognosen wie beispielsweise zukünftige Batterietypen oder hocheffiziente Verbrennungsmotoren oder Hybridantriebe sind nicht Bestandteil der Bilanzanalyse. Die entsprechenden Szenarien müssten auf Basis weiterer Annahmen abgebildet werden. Damit liefe die Bilanzanalyse Gefahr, dass die Annahmen das Ergebnis der Betrachtungen vorwegnehmen.

Viele der betrachteten Annahmen und Szenarien hängen bezüglich ihrer möglichen Umsetzung stark von regulatorischen Randbedingungen ab. Entsprechende politische Entscheidungen der Zukunft können natürlich nicht prognostiziert werden.

Bei den in Verbrennungsmotoren genutzten Kraftstoffen wurde, wenn nicht in Szenarien dezidiert anders ausgewiesen, der Tankstellenkraftstoff E10 oder B7 zugrunde gelegt. Hier sind zwar über die 10. BImSchV 25 % THG-Reduktion bis 2030 gefordert, aber die laufende Diskussion über die Umsetzung der RED II, die zugehörigen Rechtsakte und die sich daraus ableitende nationale Umsetzung erschweren ein konkretes Szenario. Hier wurde bewusst der Worst Case angenommen, um den notwendigen weiteren THG-Reduktionsbedarf zu verdeutlichen.

Nicht berücksichtigt sind mit dem Aus- und Umbau der Hoch-, Mittel- und Niederspannungsversorgung verbundene Umweltwirkungen. Die Auswirkungen eines Netzbaus müssten je nach Einsatzort (innerstädtisch, ländlich) separiert betrachtet werden, um die jeweiligen Lademöglichkeiten bereitzustellen.

Bei den Betrachtungen werden Hintergrunddaten der ecoinvent-Datenbank verwendet. Hierbei sei angemerkt, dass die enthaltenen Datensätze zwar meist mit einer Gültigkeit bis zur Veröffentlichung der Datenbank (bei ecoinvent v3.8 Ende 2021) angegeben werden. Dennoch entsprechen nicht alle Datensätze dem aktuellsten Technologiestand, beispielsweise in Bezug auf Fotovoltaik, wo die IPCC niedrigere Emissionswerte ausweist.

Der Fahrenergiebedarf der einzelnen Modelle wurde nicht mit „Realdaten“, beispielsweise von [www.spritmonitor.de](http://www.spritmonitor.de) hinterlegt, da diese keine Rückschlüsse auf spezifische Fahrweisen zulassen und nicht vergleichbar sind. Dafür wurden vom ADAC publizierte Werte herangezogen, die neben dem Zertifizierungswert (WLTP) auch Unterscheidungen zwischen Stadt-, Land- und Autobahnbetrieb sowie nach ADAC EcoTest zulassen.

Neben den beiden dargelegten Betrachtungsarten der THG-Emissionen durch elektrische Energie (kurzfristiger Marginalansatz und Mittelwertansatz) können sich auch Abweichungen in Bezug auf den Ausbau der Energiequellen, des Stromnetzes sowie die Anzahl BEV ergeben und stellen somit nur einen kleinen Ausschnitt möglicher Szenarien dar.

## 9 Zusammenfassung

Die VDI-Ökobilanzanalyse betrachtet die THG-Emissionen von verschiedenen Pkw-Antriebskonzepten am Beispiel des Anwendungsfalls von heute produzierten Kompaktklassefahrzeugen. Batterieelektrische Antriebe, Hybridantriebe in unterschiedlichen Ausgestaltungsformen und rein verbrennungsmotorische Konzepte werden gegenübergestellt. Der THG-Emissionsvergleich erfolgte unter Berücksichtigung einer aktuellen Fahrzeugproduktion im Jahr 2021<sup>11</sup> und Nutzung bis zum Jahr 2035 mit einer Referenzlaufzeit von 200.000 km. Die technologiebasierte Modellierung der Ökobilanzanalyse basiert auf einer detaillierten Abbildung der Antriebstechnologien. Verschiedene Sensitivitäten wurden analysiert. Der Schwerpunkt lag auf einer Analyse des Bilanzraums Deutschland. Der Vergleich der verschiedenen Antriebsstrangkonzepete auf der Basis einer äußerst umfangreichen Berücksichtigung von vielfältigen Einflüssen (Material, Prozesse, Produktionsort, Einsatz der Technologie, Potenziale für Recycling etc.) zeigt deutlich, dass die wesentlichen Einflüsse auf die THG-Bilanz der Fahrzeuge

- die Eigenschaften und der Bedarf der Energieträger und
- der Bedarf an benötigten Rohstoffen aus fossiler Gewinnung (Primärrohstoffe, wie Kupfer, Stahl, Aluminium, Lithium usw.) sind.

Es ist im Rahmen der Bilanzanalyse aufgezeigt worden, dass Fahrprofil und Energieträger je nach Antriebskonzept entscheidenden Einfluss auf die THG-Emissionen ausüben. Eine weitere technische Verbesserung aller Fahrzeugantriebe kann die THG-Emissionen auch in Zukunft reduzieren. Dies gilt insbesondere für ein konsequent eingesetztes Recycling bei der

Batterieherstellung in der mittel- bis langfristigen Zukunft. Das Recycling hat in der im kurz- bis mittelfristigen Zeithorizont der Analyse der Recyclingfaktoren und in den betrachteten Jahren zur Verfügung stehenden Materialien keinen signifikanten Effekt gezeigt.

In Abhängigkeit der unterschiedlichen Randbedingungen der Bilanzanalyse, z. B. dem bei der Bilanzierung herangezogenen Ansatz der Energie (Mittelwertansatz und kurzzeitiger Marginalansatz) oder den unterschiedlichen Fahrprofilen (Kurzstrecke, WLTP usw.) ergibt sich eine Spreizung der resultierenden Bilanzergebnisse.

Auf der Basis eines mittleren, sogenannten WLTP-Energiebedarfs der Fahrzeuge ergeben sich bei der Verwendung des mittleren Strommix bei einem batterieelektrischen Fahrzeug mit einer Akkukapazität von 62 kWh THG-Emissionen in Höhe von 24,2 t CO<sub>2äq</sub> über die gesamte Lebensdauer bei Annahme einer Weiterentwicklung des Stromsystems bis 2035. Bei Berücksichtigung des Marginalstromansatzes resultiert je nach Betrachtung ein Wert bei ca. 33,8 t CO<sub>2äq</sub>. Wird das Fahrzeug mit Solarstrom geladen, ergeben sich 19,1 t CO<sub>2äq</sub>. Beim Fahrprofil Autobahn liegen die Werte bei 27,5 t CO<sub>2äq</sub> beim mittleren Strommix und 40,8 t CO<sub>2äq</sub> bei Berücksichtigung des Marginalstromansatzes.

Bei Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen ergeben sich THG-Emissionen zwischen 20,1 t CO<sub>2äq</sub> (WLTP, Solarstrom), 24,8 t CO<sub>2äq</sub> (WLTP, Mittelwertansatz), 33,6 t CO<sub>2äq</sub> (WLTP, Marginalansatz) und 46,0 t CO<sub>2äq</sub> (EcoTest, Hybridmodus) je nach Anwendungsprofil und Analyseansatz.

Bei Diesel- und Benzin-, sowie Hybridfahrzeugen ergeben sich THG-Emissionen zwischen

---

<sup>11</sup> Das Jahr 2021 wird als Nutzungsjahr der Fahrzeuge betrachtet. Die herangezogenen Vergleichsmodelle werden gemäß Tabelle 1 zwischen 2021 und 2024 verkauft.

25,1 t CO<sub>2äq</sub> (FHEV-g, Stadt) und 43,6 t CO<sub>2äq</sub> (ICEV-g, Kurzstrecke) je nach Technologieausführungen und Fahrprofilen.

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der Ergebnisse dieser Bilanzanalyse nach 200.000 km in Abhängigkeit des Energieträgers bzw. der zugrunde gelegten Analyseverfahren sowie dem Einsatzfall, wie beispielsweise „WLTP“ oder „Autobahn“.

Die größte Bandbreite an Ergebnissen weist das Plug-in-Hybrid-Fahrzeug (PHEV-g) auf. Einsatzfall und Analyseverfahren führen zu einer großen Bandbreite von 20,1 t CO<sub>2äq</sub> (WLTP, Solarstrom) bis 46,0 t CO<sub>2äq</sub> (EcoTest, Hybridmodus).

Die THG-Emissionen von batterieelektrischen Komponenten werden entscheidend durch die Produktion von Batterien und den Eigenschaften des Energieträgers bestimmt.

Mit Blick auf Materialbedarf und Materialverfügbarkeit wird dem Thema Recycling zukünftig eine immer wichtigere Rolle zukommen. Ein direkter Einfluss auf die THG-Emissionen liegt vor. Kleine und schnellladefähige Batterien verbessern die THG-Emissionen batterieelektrischer Fahrzeuge.

Bei hybridisierten Antrieben existiert ein Optimum zwischen den erhöhten THG-Emissionen während der Produktion durch Mehraufwände im Vergleich mit konventionellen Verbrennungsmotoren auf der einen Seite und THG-Einsparpotenziale im laufenden Betrieb durch einen sparsameren Betrieb andererseits. Es besteht die Chance, weitere THG-Reduktionen bzw. einen reduzierten Bedarf an Primärrohstoffen durch optimierte Hybridkonzepte zu realisieren.

Tabelle 2: THG-Emissionen der in t CO<sub>2äq</sub> nach 200.000 km je nach Energieträger und Einsatzfall

Fahrzeug	Energieträger	GWP100 in t CO <sub>2äq</sub>				
		WLTP	EcoTest	Stadt(rand) Kurzstrecke	Land	Autobahn
BEV (62 kWh) / BEV (82 kWh)	Marginalansatz	33,8/	37,8/	32,9/	36,7/	40,8/
		35,9	39,9	35,0	38,8	42,9
BEV (62 kWh) / BEV (82 kWh)	Mittelwertansatz	24,2/	26,1/	23,8/	25,6/	27,5/
		26,3	28,2	25,1	27,7	29,6
ICEV-d	B7	33,0	37,8	32,4 37,6	29,5	34,1
ICEV-g	E10	37,1	-	36,0 43,4	32,7	38,7
MHEV-g-PO	E10	35,6	-	34,0	32,4	37,3
FHEV-g	E10	32,1	32,7	25,1 32,9	30,0	42,4
PHEV-g	E10, Marginalansatz	33,6	43,2	-	-	-
PHEV-g	E10, Mittelwertansatz	24,8	37,4	-	-	-

Da der Energieträger des Antriebssystems, beispielsweise elektrische Energie oder Kohlenwasserstoffe, die THG-Emissionen der Fahrzeuge in der Nutzungsphase beeinflusst, ist dessen Weiterentwicklung zu einem CO<sub>2äq</sub>-armen Energieträger entscheidend.

Ein Ausbau von Fotovoltaik und Windkraft ermöglicht in den 2030er-Jahren eine spürbare Bilanzverbesserung der rein batterieelektrischen Nutzungsphase. Kraftstoffseitig sind geschlossene Kohlenstoffkreisläufe langfristig unabdingbar, um diesen Kraftstoff zunächst durch die Bindung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre eine negative und insgesamt eine neutrale Bilanz zu ermöglichen.

Die im Verhältnis zum Gesamtenergiebedarf begrenzten Möglichkeiten, in Deutschland Energie aus regenerativen Quellen zu nutzen, erfordern einen Wechsel beim Import der Energieträger. Während heute der Import von fossilem Gas und Öl dominiert, müssen die Energieträger der Zukunft defossilisiert sein, in Form von

elektrischer Energie, Wasserstoff oder CO<sub>2</sub>-negativen Kraftstoffkomponenten.

Eine Verbesserung der THG-Emissionen der Fahrzeuge bedarf einer Optimierung der produktionsbedingten Treibhausgase sowie der Optimierung der Emissionen in der Nutzungsphase. Trotz des Fokus der Analyse auf Kompaktklasse-Fahrzeuge lässt sich aus den Ergebnissen schließen, dass die Tendenz hin zu den meist schwereren SUVs durch deren höhere Masse und erhöhten Energiebedarf sowohl produktions- als auch nutzungsseitig zu höheren THG-Emissionen führt.

Die Optimierung der Emissionen in der Nutzungsphase hängt zudem entscheidend vom Einsatz der Fahrzeuge ab. Sie sind also an Nutzungsszenarien gekoppelt. Fahrzeuge für größere Reichweiten und häufigere Nutzungsfrequenz unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Ökobilanzeigenschaften von Fahrzeugen für kürzere Distanzen.

# 10 Anhang

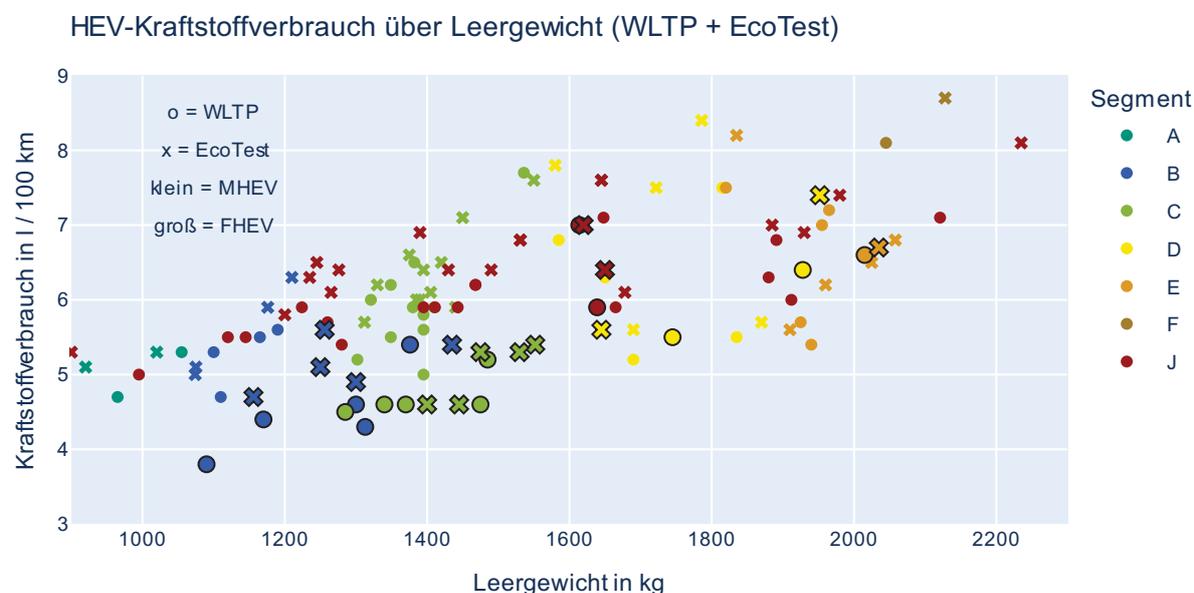
## 10.1 Überblick aktueller Fahrzeuge und deren Energiebedarf

Die Bilanzanalyse betrachtet den Lebenszyklus ab dem Jahr 2021 bis zum Jahr 2035 und interpoliert wichtige Eckdaten des elektrischen Stromsystems anhand der Stützstellen der Jahre 2021, 2025, 2030 und 2035. Es werden Produktion und Nutzung von Fahrzeugen der Kompaktklasse betrachtet.

Eine besondere Annahme ist die Festlegung der Technologiebasis, da alle Fahrzeugtypen einer kontinuierlichen Weiterentwicklung unterliegen. Zur Einschätzung der gewählten Annahmen wurden im Zuge einer Marktanalyse typische Merkmale aktueller Fahrzeuge im Zeitraum 2019 bis 2022 recherchiert. Die betrachteten Beispiele können natürlich bei der notwendigen Nutzung zugänglicher valider Daten nicht den aktuellen Stand der Entwicklung abbilden, da diese der aktuellen Fahrzeugserie hinterherhinkt. In Bild 42 sind Verbrauchswerte von Mild-Hybriden (Mild Hybrid Electric Vehicle MHEV) und Voll-Hybriden (Full Hybrid Electric Vehicle FHEV) über der jeweiligen Fahrzeugmasse (EG-Leergewicht) dargestellt. Im Zuge dieser Bilanzanalyse werden lediglich Fahrzeuge der Kompaktklasse betrachtet. Diese Fahrzeugklasse, auch C-Segment genannt,

stellte laut KBA Anfang 2022 mit 24,2 % den größten Anteil der deutschen Pkw-Flotte. Im Hinblick auf Neuzulassungen wurde das C-Segment vom J-Segment (SUVs und Geländewagen) abgelöst (39,5 % der Neuzulassung in 01/2022). Insbesondere aufgrund der Heterogenität vieler Fahrzeugtechnologien wird das J-Segment im Zuge dieser Bilanzanalyse nicht betrachtet. Gleichwohl wird eine Analyse des J-Segments Gegenstand von nachfolgenden Analysen sein, die eine Einteilung der SUV in verschiedene Größenklassen beinhalten wird. Diese reichen von Kleinstfahrzeug-SUVs bis hin zu großen Geländewagen und decken ein breites Fahrzeugspektrum ab. Für fortschrittliche Technologien, die sich bereits in der Serienentwicklung befinden, aber noch nicht Teil der Tests waren, wird auf publizierte Werte zurückgegriffen, bestätigt durch mehrfach abgeglichene Expertenaussagen.

Bild 43 zeigt einen Ausschnitt der in Bild 42 visualisierten Daten. Dabei werden lediglich Mild- (MHEV) und Voll-Hybrid-Fahrzeuge (FHEV) des C-Segments dargestellt, inklusive einer Markierung der für die Bilanzanalyse ausgewählten Vergleichsfahrzeuge. Die Auswahl des C-Segments erfolgte wegen des repräsentativen Volumens und der Zugänglichkeit der Daten, die



**Bild 42. Kraftstoffverbrauchs-Testergebnisse hybridisierter Fahrzeuge nach Leergewicht für unterschiedliche Fahrzeugsegmente (Daten nach ADAC)**

von Teilnehmern des Expertenkreises bereitgestellt oder aus publizierten Werten übernommen wurden.

Die in Tabelle 1 ausgewählten exemplarischen Fahrzeuge liegen somit in der in Bild 43 gezeigten Punktwolke.

Ein Wechsel des betrachteten Fahrzeugsegments würde in der Bilanzanalyse zunächst die Fahrzeugmasse und somit die Phase der Produktion betreffen, insbesondere die Masse des Gliders. Bei batterieelektrischen Fahrzeugen

erhöht sich zudem tendenziell die Masse bzw. Kapazität der verbauten Batterie. Dies ist Bild 44 zu entnehmen, wobei hier die Bruttokapazität der Batterie über der WLTP-Reichweite von batterieelektrischen Fahrzeugen aufgetragen ist.

Das Fahrzeug ID.3 von Volkswagen weist als Volumenfahrzeug der Kompaktklasse mit der kleineren Batteriekapazität und Fahrzeugreichweite bei 62 kWh ein für das Segment typische Ausstattung auf, zumal sich durch die Variante mit 82 kWh der Trend zu erhöhten Reichweiten

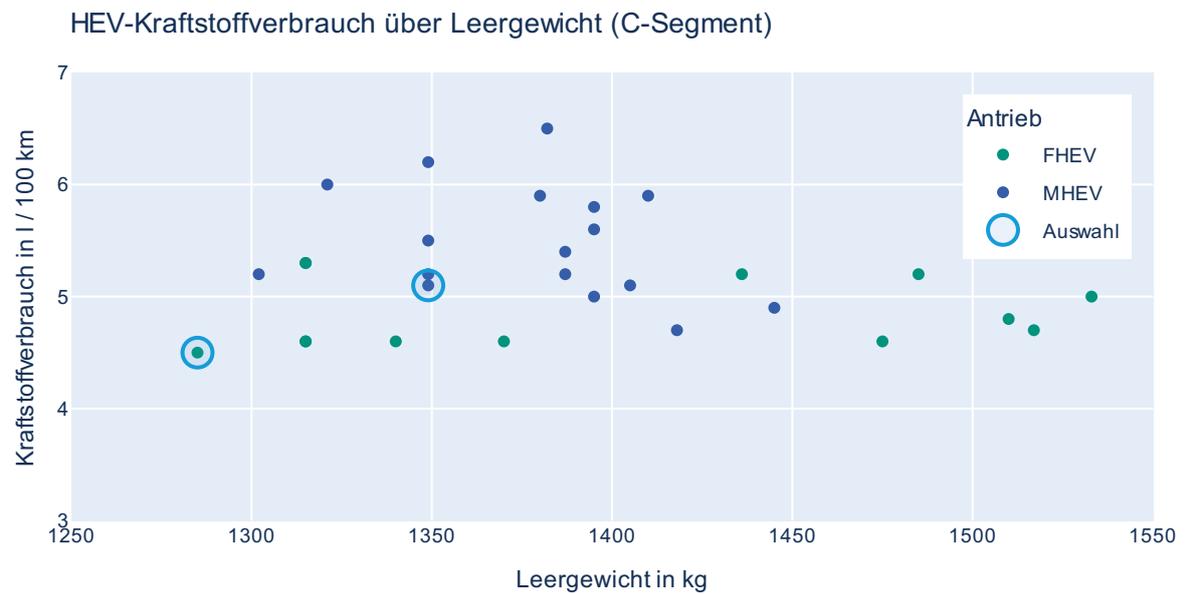


Bild 43. Auswahl der hybridisierten Fahrzeuge aus dem Kompaktklasse-Segment, Darstellung der WLTP-Verbräuche

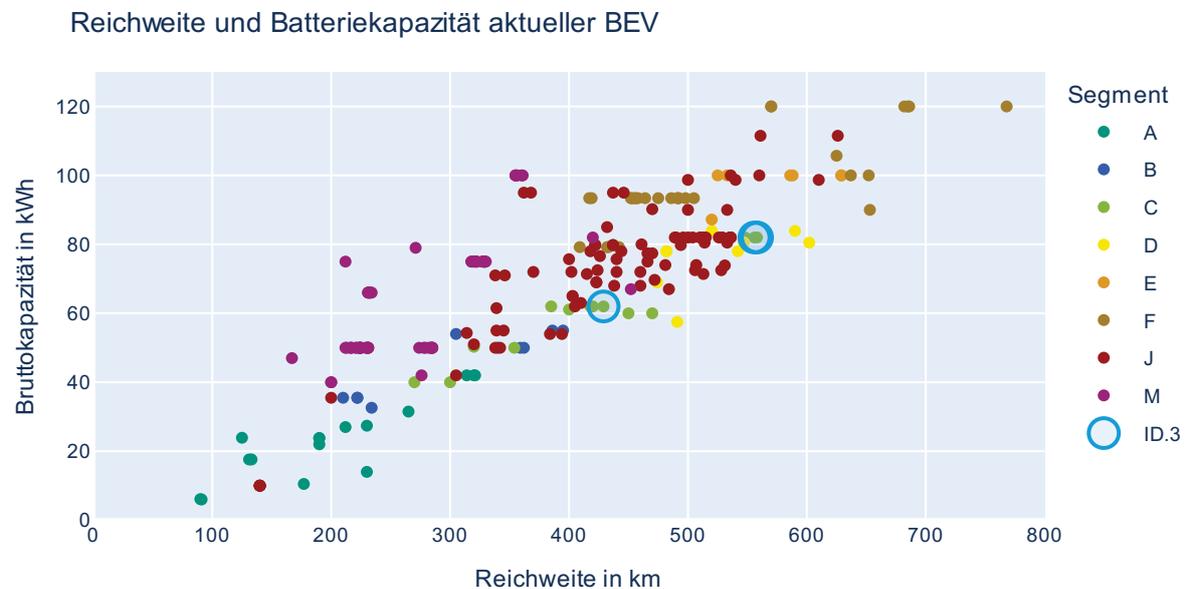


Bild 44. Streuband der Batteriekapazitäten über die im WLTP erreichte Reichweite für unterschiedliche Fahrzeugsegmente (Daten nach ADAC)

gut abbilden lässt. Ferner ist die Technologie dieses Fahrzeugs in der Literatur detailliert beschrieben und wurde deshalb mit den entsprechenden Parametern als Vertreter für BEV ausgewählt. Es sei angemerkt, dass durch den batterieelektrischen Antrieb liegt nicht nur die Antriebs-, sondern auch die Glider-Masse des ID.3 höher als im Vergleich mit verbrennungsmotorischen Modellen aus dem gleichen Segment.

Die Energiebedarfswerte sind aufgeschlüsselt nach Szenario in Tabelle A1 zu finden, zusammen mit dem elektrischen Energiebedarf des Plug-in-Hybrid-Fahrzeugs. Bei den angegebenen Werten sind keine Netzverluste enthalten. Hierbei ist anzumerken, dass die BEV-Variante mit der größeren Batterie (82 kWh) laut Datenblatt trotz der höheren Masse sogar einen geringfügig niedrigeren Energiebedarf im WLTP aufweist als die Variante mit der kleineren Batterie (62 kWh).

In Tabelle A2 sind die Kraftstoffverbrauchswerte der konventionellen Fahrzeuge aufgeschlüsselt nach Nutzungsart zu finden.

Die angenommenen Werte für den Kraftstoffverbrauch der hybridisierten Fahrzeuge sind in Tabelle A3 aufgelistet. Gemäß der Erläuterung der Fahrzeugübersicht in Tabelle 1 beziehen sich

die Suffixe „P0“ und „P2“ auf die Position der E-Maschine in Parallelhybriden.

## 10.2 Weitergehende Informationen zu den betrachteten Energieträgern

### 10.2.1 Aktualisierung der Elektrizitätsprozesse in der ecoinvent-Datenbank

Das Elektrizitätsnetz ist im Allgemeinen in unterschiedliche Spannungsebenen eingeteilt, was schematisch in Bild 45 dargestellt ist. Hierbei werden vier Ebenen betrachtet, von der Höchst- über die Hoch- zur Mittel- bis zur Niederspannung.

In der ecoinvent-Datenbank ist das Elektrizitätsnetz in drei Spannungsebenen abgebildet. Somit werden die Übertragungseffekte gemäß der Bereitstellung und Nutzung variabel abgebildet. Die sich über den Betrachtungszeitraum hinweg verbessernden Randbedingungen in den Szenarien zur Energieversorgung fließen in das Ergebnis ein. Die Energieanalyse umfasst neben den elektrischen Energiebeiträgen der verschiedenen Kraftwerke auch den Eigenverbrauch innerhalb der Spannungsebenen, sowie Transformationsverluste. Hierbei wird zunächst auf die in ecoinvent v3.8 hinterlegten Werte zurückgegriffen, die einen Netzverlust<sup>12</sup> von ca. 6 % ausweisen.

---

<sup>12</sup> Diese ergeben sich gemäß der ecoinvent-Datensätze als Leistungsverlust von 2,05 % im Hochspannungs-, 0,27 % im Mittelspannungs- sowie 1,8 % im

Niederspannungsnetz sowie 0,44 % bzw. 2,05 % in der Transformation von Hoch- zu Mittel- bzw. Mittel- zu Niederspannung.

Tabelle A1: Elektrischer Energiebedarf der betrachteten batterieelektrischen Fahrzeuge sowie des Plug-in-Hybrid-Fahrzeugs, dessen je nach Szenario zusätzlicher Kraftstoffbedarf in Tabelle A3 aufgeführt ist.

Kürzel	Vergleichsmodell	Energiebedarf in kWh / 100 km	Szenario
BEV (62 kWh)	VW ID.3 Pro Performance	22,0	Autobahn
		19,3	EcoTest
		18,4	Land
		16,1	WLTP
		17,7	WLTP, 25 °C
		19,3	WLTP, 30 °C
		22,4	WLTP, -5 °C
		21,2	WLTP, 0 °C
		20,1	WLTP, 5 °C
		15,0	Stadt
BEV (82 kWh)	VW ID.3 Pro S (5-Sitzer)	15,4	WLTP
		17,0	WLTP, 25 °C
		18,6	WLTP, 30 °C
		21,7	WLTP, -5 °C
		20,5	WLTP, 0 °C
		19,4	WLTP, 5 °C
PHEV-g	VW Golf GTE DSG	14,4	WLTP
		24,3	EcoTest (elektrisch)
		9,5	EcoTest

Tabelle A2: Kraftstoffverbrauchs-Werte der konventionellen Fahrzeuge

Kürzel	Vergleichsmodell	Energiebedarf inl/100 km	Szenario
ICEV-d	VW Golf 2.0 TDI SCR Life	3,6	Land
		4,1	Land (EcoTest)
		4,1	Stadttrand
		4,2	WLTP
		4,4	Autobahn
		4,8	EcoTest
		4,9	Stadt (EcoTest)
		5,0	Kurzstrecke
		5,7	Autobahn (EcoTest)
ICEV-g	Ford Focus 1.0 EcoBoost Cool & Connect Design	4,6	Land
		5,2	Stadttrand
		5,4	WLTP
		5,7	Autobahn
		6,6	Kurzstrecke
		5,1	WLTP
		5,4	Autobahn
		6,3	Kurzstrecke

Tabelle A3: Energiebedarf in l/100 km der hybridisierten Fahrzeuge, zusätzlicher elektrischer Energiebedarf des PHEV-g siehe Tabelle A1

Kürzel	Vergleichsmodell	Energiebedarf inl/100 km	Szenario
FHEV-d-P2	-	3,5	WLTP
FHEV-g	Toyota Corolla 1.8 Hybrid Comfort	3,2	Stadt (EcoTest)
		4,1	Land
		4,5	WLTP
		4,6	EcoTest
		6,4	Autobahn
MHEV-d-P2	-	3,7	WLTP
MHEV-g-P0	Ford Focus 1.0 EcoBoost Hybrid Cool & Connect Design	4,5	Land
		4,8	Stadttrand
		5,1	WLTP
		5,4	Autobahn
		6,3	Kurzstrecke
PHEV-g	VW Golf GTE DSG	1,1	WLTP
		3,9	EcoTest
		5,7	Stadt (EcoTest)
		5,9	Land
		7,6	Autobahn
		6,4	EcoTest (Hybrid)

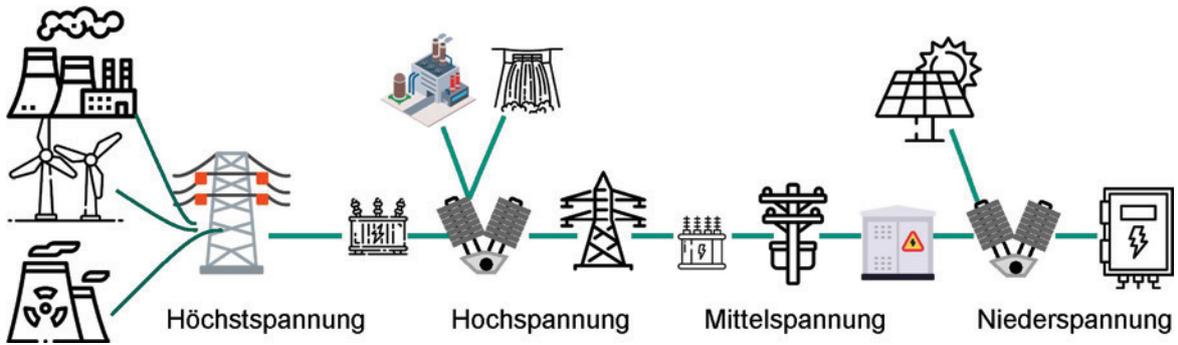


Bild 45. Struktur des Elektrizitätsnetzes und Abbildung der Spannungsebenen

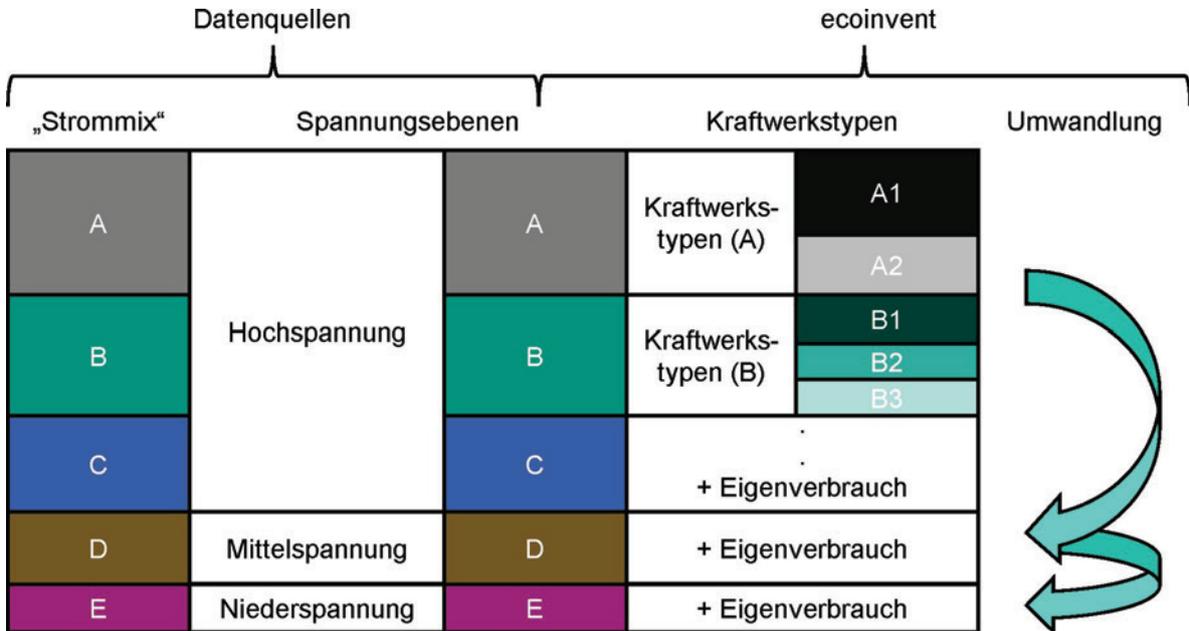


Bild 46. Modellierung eines Stromnetzes in die Prozesse, die Quellen mit Verbrauchern verbinden

$$E_{\text{Stromnetz}} = \left( \left( \left( \left( \left( \left( \sum_{i=1}^{n_{HV}} HV_i \right) \cdot \frac{1}{\eta_{HV}} \right) \cdot \frac{1}{\eta_{HV-MV}} \right) + MV_{\text{Müll}} \right) \cdot \frac{1}{\eta_{MV}} \right) \cdot \frac{1}{\eta_{MV-LV}} \right) + PV \right) \cdot \frac{1}{\eta_{LV}} \quad (1)$$

Die Anteile der einzelnen Energieträger müssen demnach, ausgehend von den in Bild 4 dargestellten Werten, entsprechend der Spannungsebenen und Übertragungsverluste umgerechnet werden, siehe Gleichung (1).

In Gleichung (1) bezeichnet  $E_{\text{Stromnetz}}$  die kumulierte elektrische Energie im gemäß Bild 46 modellierten Stromnetz innerhalb einer Zeiteinheit, beispielsweise einem Jahr, in der Einheit kWh. Dabei beschreibt  $HV_i$  die einzelnen Beiträge der Kraftwerkstypen des Hochspannungsnetzes, ebenfalls innerhalb einer Zeiteinheit in der Einheit kWh, von  $i = 1$  bis  $n_{HV}$  und  $\eta_{HV}$  den Wirkungsgrad der Übertragung im

Hochspannungsnetz, der die dort gültigen Verluste abbildet. So würden beispielsweise 2 % Übertragungsverlust zu einem Wirkungsgrad von 98 % führen. Des Weiteren beschreibt  $\eta_{HV-MV}$  den Wirkungsgrad der Transformation zwischen Hochspannungsnetz und Mittelspannungsnetz,  $MV_{\text{Müll}}$  die im Mittelspannungsnetz installierten Müllverbrennungskraftwerke und  $\eta_{MV}$  den Netzübertragungs-Wirkungsgrad im Mittelspannungsnetz. Es beschreibt  $\eta_{MV-LV}$  den Wirkungsgrad der Transformation zwischen Mittelspannungsnetz und Niederspannungsnetz,  $PV$  die im Niederspannungsnetz installierte Fotovoltaik und  $\eta_{LV}$  den Übertragungswirkungsgrad im Niederspannungsnetz.

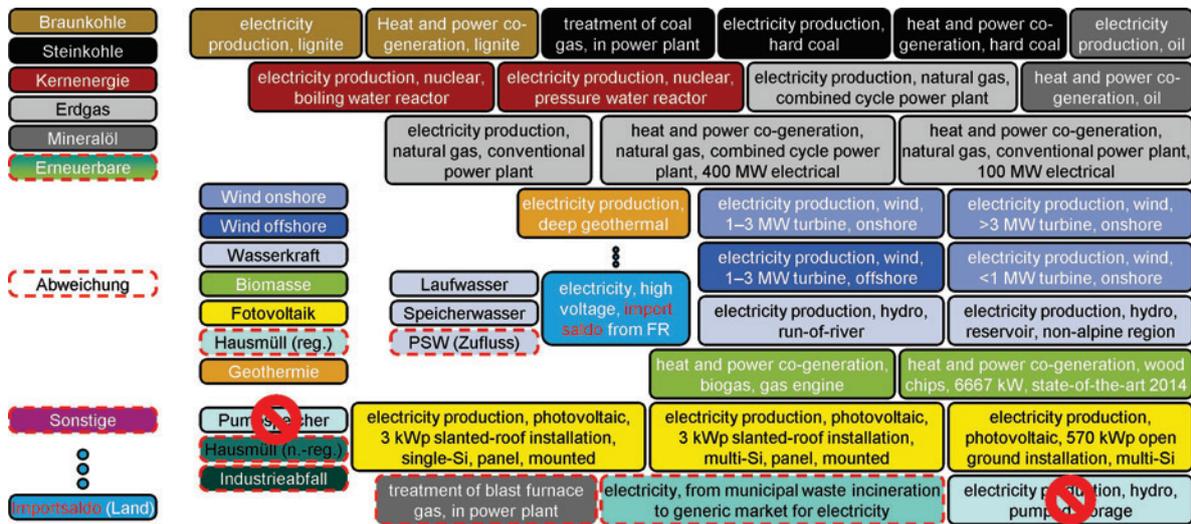


Bild 47. Nach Energieträger eingefärbte ecoinvent-Datensätze für die Modellierung eines Elektrizitätsnetzes

Je Energieträger kann wiederum zwischen einem und mehreren Kraftwerksarten bzw. Technologien unterschieden werden. Gemäß den Prozessen der Hintergrunddatenbank ecoinvent v3.8 wird „Wind onshore“ bspw. in die Leistungsklassen, „1–3 MW“ und „>3 MW“ eingeteilt und abgebildet.

Diese Art der Modellierung der Energieversorgung erlaubt es, die Vorkette eines Eingangsflusses zu modellieren. Ein Eingangsfluss bedient innerhalb der Ökobilanz verschiedene Prozesse, z. B. Produktions- oder Nutzungsprozesse. Derartige Prozesse können dann wiederum mit länder- und jahresspezifischen Daten parametrisiert werden. Auf diese Weise erlaubt die Modellierung eine Betrachtung über Zeiträume hinweg und ermöglicht eine Betrachtung, welche Standorte aus Sicht der Umweltwirkungen besser oder schlechter geeignet sind.

Flächenmäßig größere Länder können über unterschiedliche klimatische Zonen verfügen. Erschwerend kommt hinzu, dass in den Regionen mit hohem Potenzial an elektrischer Energie aus sogenannten regenerativen Quellen nicht zwingend die Produktionsstätten für Systeme und Komponenten lokalisiert sind. Dementsprechend wurde im Rahmen dieser Bilanzanalyse für die Batterieherstellung die chinesische elektrische Energiebereitstellung gemäß vorliegendem regional abhängigem Ausbau untergliedert. Dies wird zukünftig auch in ähnlicher Weise in der Version 3.9 der Hintergrunddatenbank ecoinvent implementiert sein. Um die elektrische Energiebereitstellung Chinas akkurat abbilden zu können (z. B. in die Hauptnetze

„China Southern Power Grid“ (CSG) und „State Grid Corporation of China“ (SGCC) oder sogar deren untergeordnete Stromnetze), wurden mehrere Bilanzanalysen mit den Daten aktueller lokaler Webseiten abgeglichen. Im Gegensatz zur Abbildung in der verwendeten Hintergrunddatenbank werden Steinkohle-, Braunkohle- und Gaskraftwerke unter dem Oberbegriff thermische Kraftwerke analysiert. Im Rahmen der Analyse wurde die entsprechende Strukturierung der fossilen Kraftwerke der Hintergrunddatenbank (in Abgleich mit den 5-Jahres-Plänen der chinesischen Volkspartei) übernommen. Die aktuelleren Werte der staatlichen Webseiten fassen mehrere fossile Kraftwerkstypen zusammen und wurden gemäß der in der Hintergrunddatenbank hinterlegten Verteilung gewichtet eingesetzt.

Eine ähnliche Vorgehensweise ist auch bei der Unterteilung der Windenergie in On- und Offshore-Anteile notwendig. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine Berücksichtigung der regionalen Struktur der Stromversorgung, wie sie in ecoinvent v3.8 noch nicht abgebildet ist.

Eine Sensitivitätsanalyse für die Produktion von Lithium-Ionen-Batterien hat aber gezeigt, dass die Auswirkung der detailliert abgebildeten Vorkette für den hier betrachteten Fall keine signifikante Veränderung gegen über den in der Datenbank hinterlegten aktuellen Werten für einen landesweiten Strommix aufweist.

Hierbei wurden die bekannten Produktionsorte für Kathodenpasten, Anodenpasten, Separatoren und Zellen mit den regionalen Stromdaten

modelliert und die resultierenden THG-Emissionen berechnet. Dies ist in Bild 48 dargestellt, sowohl in Bezug auf die Anteile der jeweiligen Energieträger als auch bezüglich der resultierenden CO<sub>2äq</sub>-Emissionen (rechte y-Achse in Bild 48). Die Elektrizitätsversorgung für die Produktion von Anode, Kathode, Zelle und Graphit setzt sich anteilig aus den beiden nachstehend erläuterten chinesischen Elektrizitätsnetzwerken in ecoinvent v3.8 zusammen. Hierbei ist der Beitrag des „China Southern Power Grid“ (CSG) in der Regel geringer als der Beitrag des „State Grid Corporation of China“ (SGCC). Bei der Betrachtung der Werte des Mittelspannungsnetzes liegen die CO<sub>2äq</sub>-Emissionen zwischen 1.000 g CO<sub>2äq</sub>/kWh und 1.170 g CO<sub>2äq</sub>/kWh.

Demnach bietet eine Verlagerung der Produktion in Gebiete mit höheren Anteilen sogenannter erneuerbarer Elektrizitätserzeugung die Chance, THG-Reduktionen der Produktionsphase zu erzielen.

Das THG-Einsparpotenzial in der Produktionsphase gilt insbesondere für die im Aufbau befindlichen Produktionskapazitäten in der Europäischen Union, da hier eine besondere Dynamik des Ausbaus der sogenannten erneuerbaren Energien angestrebt wird.

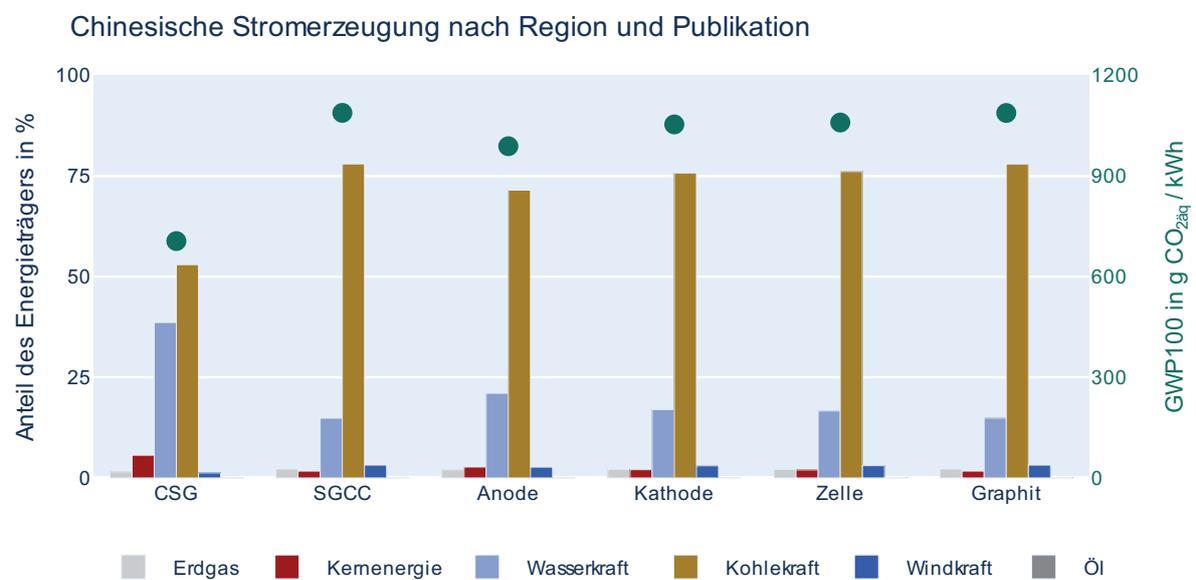
Als alternative Herstellungsorte für Batterien wurden auch Frankreich und Polen betrachtet.

Die vorhandenen ecoinvent-Datensätze der elektrischen Energie aus diesen Ländern weist auch hier einen Zeitversatz auf. Zur Aktualisierung der Elektrizitätsdaten europäischer Länder wird die „Transparency Platform“ von ENTSO-E herangezogen. Diese ist eine Abbildung des Verbunds der europäischen Übertragungsnetzbetreiber. In dieser Datenbank werden die zeit aufgelösten Produktionsmeldungen im für die Länder üblichen Zeittakt bereitgestellt.

In der Regel handelt es um stündlich bis viertelstündlich (wie beispielsweise in Deutschland) aufgelöste Daten. Im Rahmen dieser Bilanzanalyse wurde eine Analysemethode verfeinert, die die Ergebnisse der ENTSO-E-Plattform automatisiert mit der Struktur der LCA-Datenbank verbindet.

Der Ablauf der Prozedur ist in Bild 49 dargestellt. Im Rahmen dieser Bilanzanalyse wurde das zum Zeitpunkt der Erstellung aktuellste vollständig vorhandene Jahr verwendet, weshalb 2021 als Referenzjahr berücksichtigt wird.

Dabei werden sowohl Verluste als auch unterschiedliche Technologien je Energiequelle (beispielsweise drei verschiedene Prozesse für PV-Stromerzeugung) berücksichtigt. In einem ersten Schritt werden Importe vernachlässigt.



**Bild 48.**Anteile der Energieträger an zwei chinesischen Elektrizitätsnetzen aus CSG und SGCC (Balkendarstellung für linke y-Achse) sowie die damit verbundenen CO<sub>2äq</sub>-Emissionen (dunkelgrüne Punktdarstellung für rechte y-Achse)

In Frankreich bzw. Polen beträgt der Anteil der importierten Elektrizität ca. 2 % bzw. 8 %. Nachfolgend werden die Beiträge der einzelnen Technologien ermittelt und über eine Python-Schnittstelle in openLCA implementiert. Hierbei werden neue Prozesse erstellt, die der üblichen Strukturierung der ecoinvent-Datenbank mit drei Spannungsniveaus und zwei Transformationsprozessen folgen. Die Verkettung der entsprechenden Prozesse wird berücksichtigt.

Diese Prozedur erlaubt die Kombination der Nutzung von Datensätzen inklusive Vorketten, die in der Hintergrunddatenbank ecoinvent v3.8 hinterlegt sind. Diese berücksichtigen unterschiedliche klimatischen Randbedingungen, die durch die jeweiligen elektrischen „Erträge“ abgebildet sind.

Da ENTSO-E auch jahresspezifische Produktionsdaten bereitstellt, können mit diesem Tool vergangene als auch zukünftige aktuelle Daten herangezogen werden. Nur bei Prognosen muss auf die nicht so detailliert vorliegenden Szenarien zurückgegriffen werden.

Beispielhaft werden im Folgenden die drei relevanten Spannungsniveaus für Polen (2021 sehr ähnliche Werte wie China 2021) und Frankreich (mehrheitlich Kernkraft, kleine Anteile Wind- und Wasserkraft) als Ober- und Untergrenze dargestellt.

Auf diese Weise soll auch abgebildet werden, dass an mehreren europäischen Standorten Batterieproduktionen aufgebaut werden, wodurch sich eine Bandbreite des THG-Fußabdrucks, abhängig vom Produktionsort ergibt. Die Auswirkungen der Aktualisierung auf den THG-Effekt ist in Bild 50 für Polen und Frankreich dargestellt.

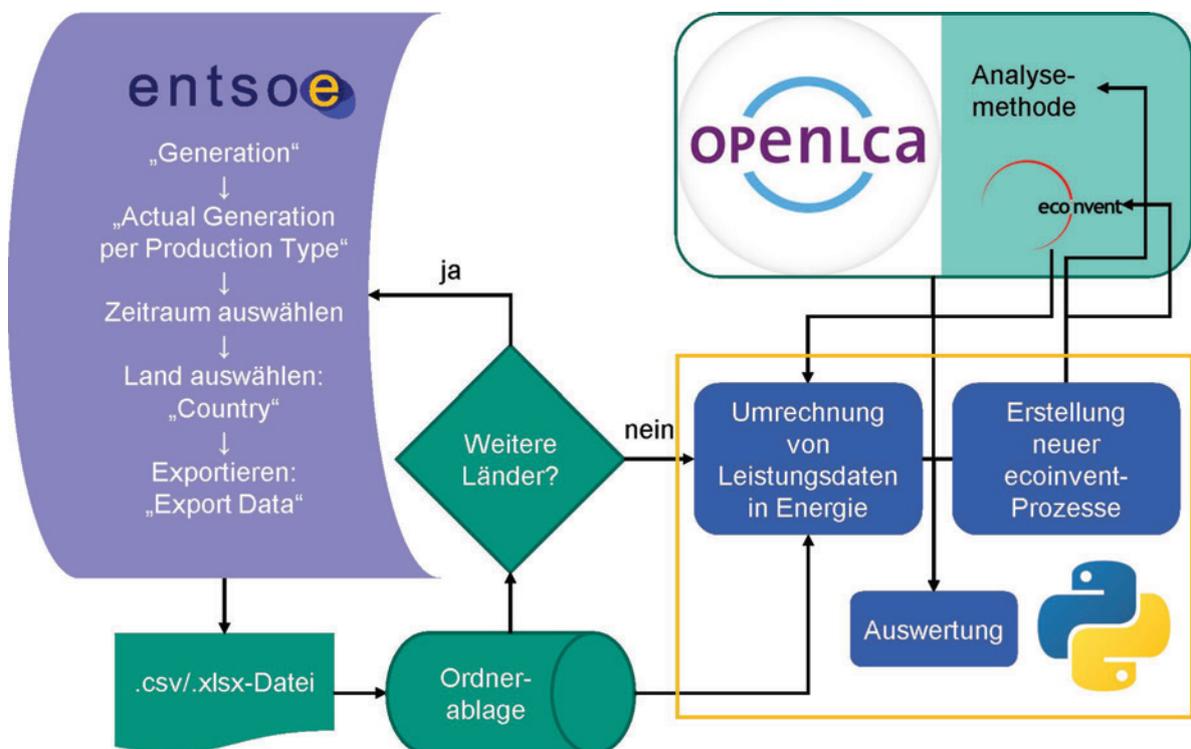
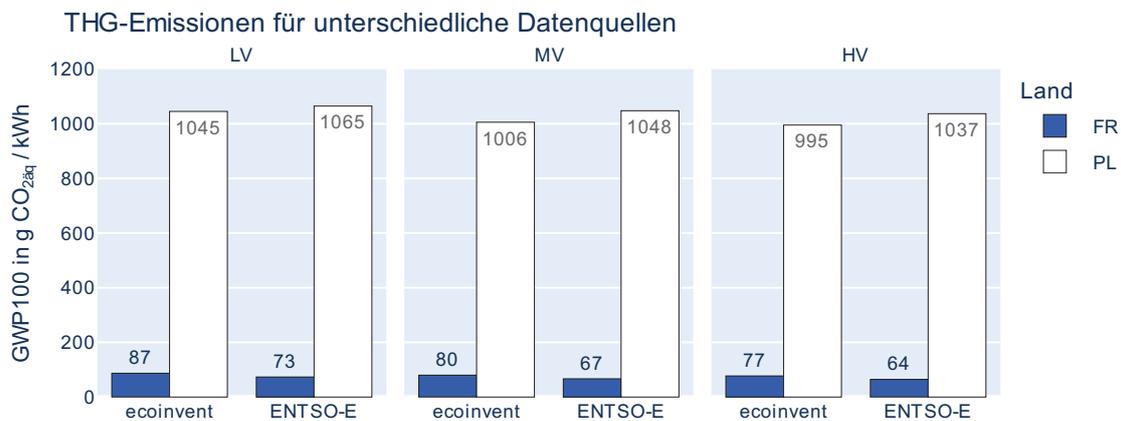


Bild 49. Import der Strom-Versorgungsdaten aus ENTSO-E



**Bild 50. Vergleich der THG-Emission der Energieversorgung unter Nutzung der ENTSO-E-Daten oder der ecoinvent-Daten für die Energieversorgung in Frankreich und Polen.**

LV = Niederspannungsnetz, MV = Mittelspannungsnetz, HV = Hochspannungsnetz

### 10.2.2 Technologische und politische Randbedingungen der Kraftstoffproduktion

Zur besseren Einordnung der in dieser Analyse betrachteten Kraftstoffe (Ethanol, Biodiesel, HVO, FT-Diesel) werden im folgenden Abschnitt einige Randbedingungen der Kraftstoffproduktion erläutert.

Bei der Abbildung der Kraftstoffe zeigt sich ein besonderes Spannungsfeld zwischen technischer Machbarkeit und „politischem Willen“. Während der Stromsektor zunehmend defossilisiert wird, werden mögliche THG-Einsparungen durch sogenannte „erneuerbare Kraftstoffe“ derzeit noch nicht bei der Fahrzeugzertifizierung berücksichtigt [27]. In Kombination mit den weniger ambitionierten Ausbaenzielen [77] werden daher im europäischen Markt aktuell nur geringe Anteile erneuerbarer Kraftstoffe für die Zukunft erwartet [16]. Sofern sich die Randbedingungen ändern, könnten laut der FVV-Kraftstoffstudie IVb 2.000 GW Kapazitäten für erneuerbarer Kraftstoffe bis 2034 aufgebaut werden [46]. In einem solchen Fall wird die technische Umsetzung bei der Analyse der Kraftstoffherstellung sowie hinsichtlich ihrer Wirkung im Motor- bzw. Fahrzeugbetrieb relevant. Voraussetzung der Betrachtung dieser Bilanzanalyse ist ausschließlich der Einsatz von Kraftstoffen, die den bestehenden Kraftstoffnormen EN 228 und EN 590 entsprechen. Das Deutsche Biomasseforschungszentrum (DBFZ) nennt in diesem Zusammenhang den Technologiereifegrad (Technology Readiness Level, TLR) verschiede-

ner erneuerbarer Kraftstoffe in einer Skala von 1 bis 11. Die in dieser Bilanzanalyse betrachteten alternativen Kraftstoffe Ethanol (8–11/11), FAME (4–11), FT-Diesel (7/11), MtX (4–5/11) und HVO/HEFA (4–11/11) erreichen dabei mittlere bis sehr hohe TRL-Werte [72]. Diese Werte können genutzt werden, um Grenzauschätzungen mit 100 % erneuerbarem Kraftstoff besser einordnen zu können. Bezüglich der Kraftstoffherstellung weist beispielsweise Ethanol einen hohen TRL-Wert auf. Für den Betrieb im Fahrzeug müssten bei der Nutzung von 100 % nicht fossilem Kraftstoff typischerweise kraftstoffaufbereitende Maßnahmen vorgenommen werden, damit die entsprechende Norm (EN 590/EN 228) eingehalten wird. Es werden im Rahmen dieser Bilanzanalyse keine vertieften Aussagen zur Verfügbarkeit und zum zeitlichen Hochlauf nicht fossiler Kraftstoffe getätigt. [47]

### 10.2.3 Kraftstoffszenarien für Deutschland und Schweden

Im Zuge dieser Bilanzanalyse werden zudem Kraftstoffszenarien untersucht. Hierbei ist relevant, inwiefern sich unterschiedliche politische Vorgaben bzgl. erneuerbarer Kraftstoffe auf die THG-Emissionen von Fahrzeugen auswirken können. Hierzu werden Werte von Deutschland (Bild 51) und Schweden (Bild 52) verglichen. Neben den Abkürzungen HVO (hydriertes Pflanzenöl) sowie R33 bzw. R80 (Dieselkraftstoff mit 33 % bzw. 80 % Anteil aus erneuerbaren Quellen) sind unterschiedliche Kraftstoffe gemäß ihres Ethanol- bzw. Biodieselgehalts in Volumenprozent von 0 % (E0, E100) bis 100 % (E100, B100) angegeben.

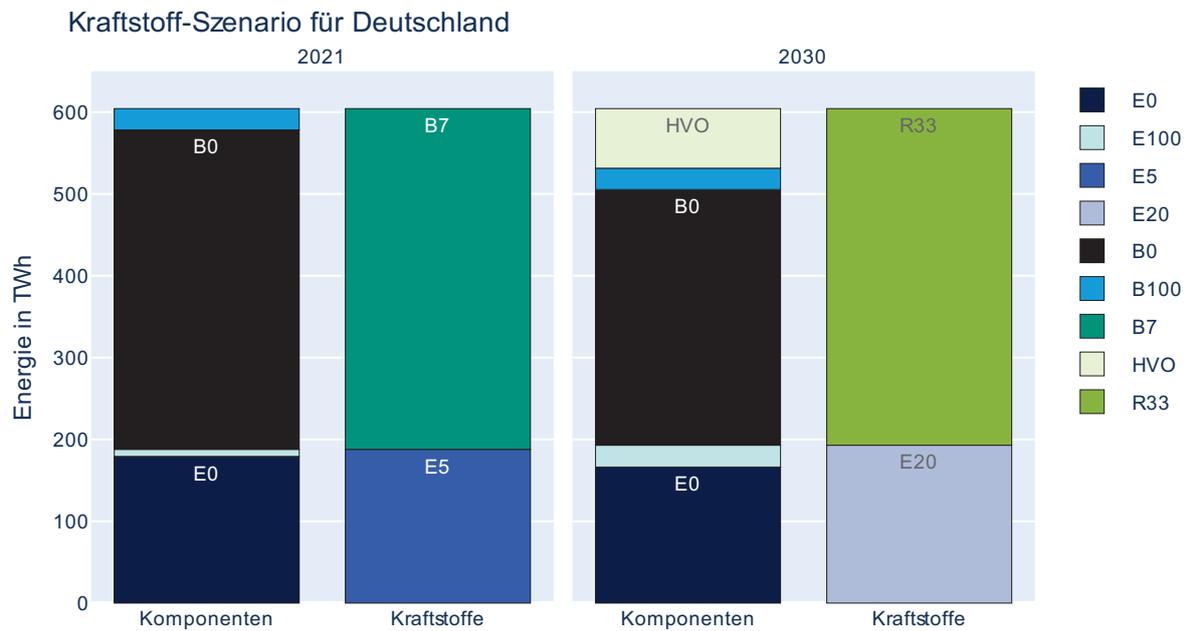


Bild 51. Szenario möglicher Kraftstoffzusammensetzung in Deutschland 2030 unter Erfüllung der 38. BImSchV

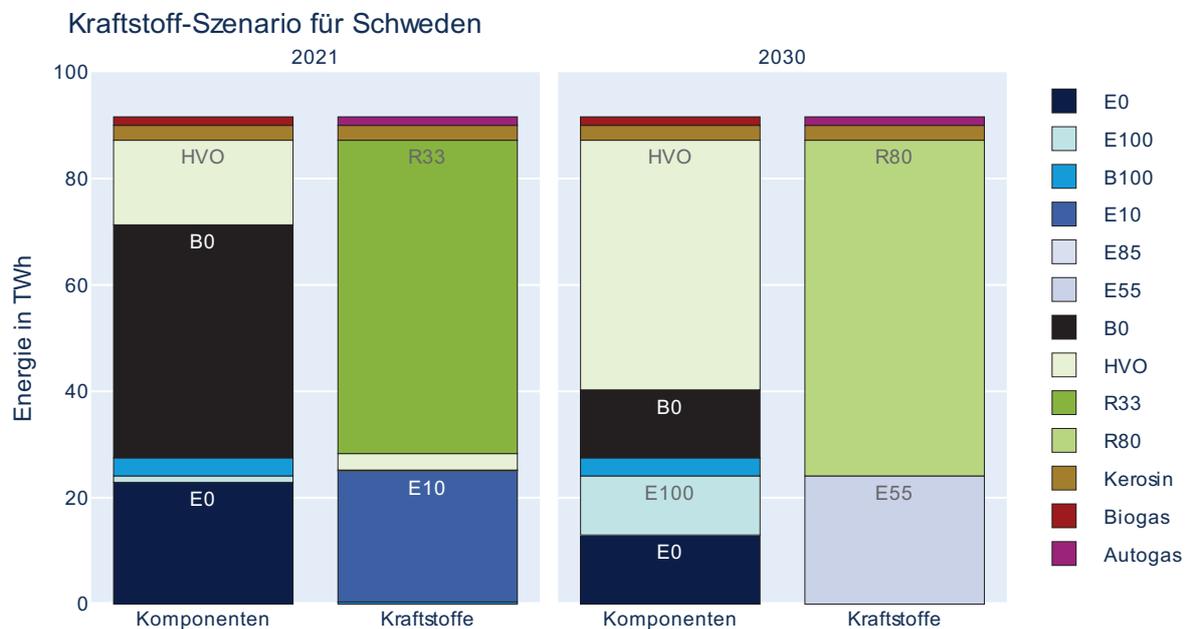


Bild 52. Szenario möglicher Kraftstoffzusammensetzung in Schweden 2030 unter Erfüllung der Angaben der Lag 2017-Gesetzgebung



## 10.4 Modellierung der Batterieproduktion

Im folgenden Abschnitt wird näher beschrieben, wie die Batterie modelliert wurde. Die resultierenden THG-Emissionen sind im Hauptteil in der Wirkungsabschätzung unter Abschnitt 6.2.1 zu finden, siehe auch Bild 12, Bild 13 und Bild 14.

Zur korrekten Abbildung der für die Ökobilanz relevanten Materialmasse müssen sämtliche relevanten Modulkomponenten, wie das in die Batterie teilweise integrierte und abzubildende Kühlsystem und die resultierende zusätzliche Gehäusemasse berücksichtigt werden.

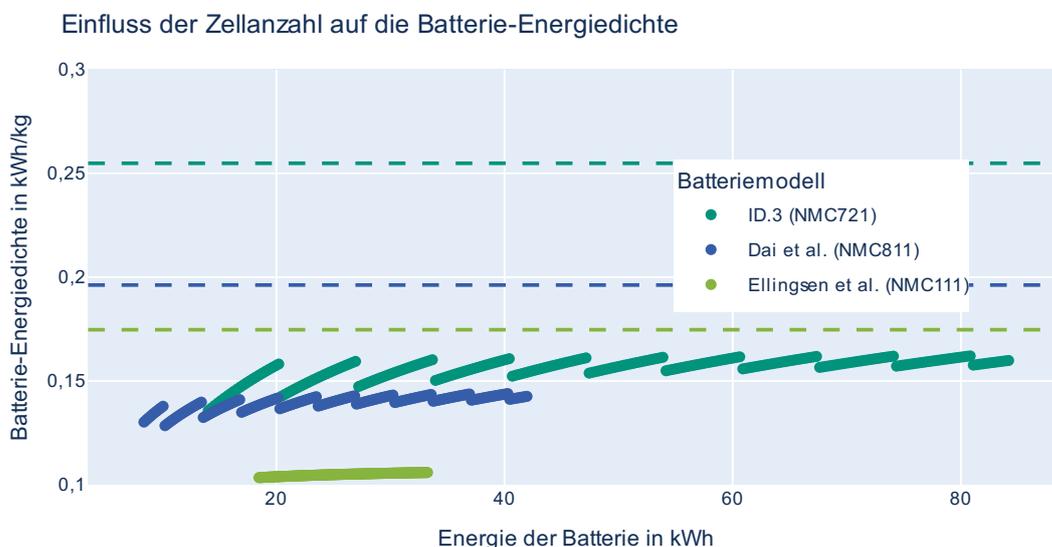
Um diesen wesentlichen Unterschied zwischen Batteriezellen und Batterien bei der Modellierung abzubilden, wird in dieser Bilanzanalyse ein entsprechend gegliedertes Modell implementiert. In Bild 54 ist dargestellt, welche Energiedichte unterschiedliche Modelle auf Zellebene (gestrichelte Linie) sowie in Bezug auf die gesamte Batterie (durchgezogene Linie) aufweisen. Basierend auf dem ecoinvent-Datensatz einer NMC 811-Batterie nach Dai et al. wurden im Zuge dieser Analyse technische Parameter eingeführt, die eine Skalierung der Batterie erlauben. Die Anzahl möglicher Zellen pro Modul und die Anzahl möglicher Module pro „Battery Pack“ sowie die Masse des Batteriemanagementsystems und der Gehäusematerialien werden aus Fahrzeuganalysen übernommen [82]. Um die Komplexität in Grenzen zu halten, wird

die Masse des Kühlsystems und des Kühlmediums jeweils als konstante Masse angenommen. Hierdurch können zellspezifische Größen, modulspezifische Größen und batteriespezifische Größen ausgehend von einer vorgegebenen Batteriekapazität berechnet werden. Dadurch ergeben sich auf Gesamtsystemebene die „Sägezahnprofile“, da ab einer bestimmten Anzahl Zellen ein neues Modul benötigt wird. Die Modelle erlauben neben dieser grundsätzlichen Skalierbarkeit die Variation des Produktionsorts und der zugehörigen Energieversorgung.

## 10.5 Modellierung des Batterierecyclings

### 10.5.1 Einordnung des Batterierecyclings

In der EU-Regulatorik werden unter dem Begriff der Recyclingeffizienz die Schritte der Batteriesammlung, der jeweilige Massenanteil der betrachteten Rohstoffe nach Demontage und die durch das Recycling erzielbare Materialrückgewinnungsrate zusammengefasst. Bei der Modellierung des Recyclings in der Umweltbilanz sowie in Teilen der Literatur werden diese Prozesse separiert [50], während andere Literaturquellen [17] diese Schritte sogar als Vorgabe zusammenfassen, ohne eine dezidierte Vorgehensweise anzugeben. In Tabelle A4 sind die wesentlichen Schritte des Batterierecycling-Kreislaufs aufgeführt. Dabei wird eingeordnet, inwiefern die unterschiedlichen Schritte des Recycling-Prozesses in die EU-Regulatorik aufgenommen oder zusammengefasst wurden.



**Bild 54.** Stufen des Zelleneinsatzes in Modulen eines in der Batteriegröße skalierbaren Batteriemodells und Einflüsse auf die gravimetrische Energiedichte der Gesamtbatterie (durchgezogene Linie) im Vergleich zu der gravimetrischen Energiedichten der Zellen (gestrichelte Linie).

Tabelle A4: Bezeichnungen und Abkürzungen des Batterierecycling-Stoffkreislaufs einer Lithium-Ionen-Batterie (LIB)

Teil der EU-Regulatorik	Abkürzung	Englische Bezeichnung	Erläuterung	Zusammenhänge und Beispiele
	CR	Collection rate / Sammel-Rate	Der Prozentsatz der ausscheidenden LIBs, die gesammelt und recycelt werden.	Die Sammelquoten sind aufgrund fehlender Berichterstattung und unsicherer Exportquoten unsicher. Der Wert ist eine Annahme.
	MS <sub>D</sub>	Mass share when dismantling / Masseanteil bei Demontage	Der Massenanteil eines bestimmten, aus der Batterie demontierten Materials, das für das Recycling geeignet ist. Jedes Material, das recycelt werden soll, hat seinen eigenen MS <sub>D</sub> . MS <sub>D</sub> muss aufgrund des Demontageverlusts kleiner sein als MS <sub>A</sub> .	$MS_{D,Al} \leq \frac{C + F + I + Q}{T}$ $MS_{D,Li} \leq \frac{J}{T} \text{ (hydrometallurgisch)}$ $MS_{D,Li} = 0 \text{ (pyrometallurgisch)}$
√	RE	Recycling efficiency / Recycling-effizienz	Summe MS <sub>D</sub> aller Materialien, die für das Recycling geeignet sind (material-spezifisch).	$RE = MS_{D,Al} + MS_{D,Cu} + MS_{D,Li} + \dots$
√	RR	Recovery rate / Zurückgewinnungsrate	Der Prozentsatz des aus dem Abfallmaterial zurückgewonnenen Materials. Das zurückgewonnene Material muss von gleicher Qualität sein, wie das Ausgangsmaterial.	$RR_{Co} = RR_{Ni} = 0,9 \text{ (in 2025)}$ $RR_{Co} = RR_{Ni} = 0,95 \text{ (in 2030)}$ $RR_{Li} = 0,35 \text{ (in 2025)}$ $RR_{Li} = 0,7 \text{ (in 2030)}$
	RT	Return rate / Rückführ-rate	Der Prozentsatz des zurückgewonnenen Materials, der in die Batterieproduktion zurückfließt. Dieser Parameter beschreibt, ob das Angebot an Second-Life-Material die Nachfrage decken kann.	$RT_{Ni} = \frac{m_{2030} \cdot MS_{A,Ni} \cdot RC_{Ni}}{m_{2022} \cdot CR \cdot MS_{D,Ni} \cdot RR_{Ni}}$ <p>(Annahme Produktion der Batterie 2022 und Rückführung 2030)</p>
√	RC	Recycled content / Recyclat-Produktionsanteil	Massenanteil eines Second-Life-Materials an der Gesamtnachfrage nach diesem Material in der Batterieproduktion.	$RC_{Co} = 0,12 \text{ (in 2030)}$ $RC_{Co} = 0,20 \text{ (in 2035)}$ $RC_{Ni} = 0,04 \text{ (in 2030)}$ $RC_{Ni} = 0,12 \text{ (in 2035)}$ $RC_{Li} = 0,04 \text{ (in 2030)}$ $RC_{Li} = 0,10 \text{ (in 2035)}$
	MS <sub>A</sub>	Actual mass share / Tatsächlicher Massenanteil	Tatsächlicher Massenanteil eines bestimmten Materials in der Batterie. MS <sub>A</sub> muss wegen der Demontageverluste größer sein als MS <sub>D</sub> .	$MS_{A,Al} = \frac{C+F+I+Q}{T}, MS_{A,Li} = \frac{J}{T}$

## 10.5.2 Hochlaufszzenarien für das Batterie-recycling

Durch den Zeitversatz zwischen Produktion eines Altfahrzeugs und dem Recycling der Batterie verstärkt sich der Bedarf an hohen Recycling-Quoten. In den wenigen zu der Thematik verfügbaren LCA-Publikationen [17; 50] wird davon ausgegangen, dass die Batterien zum selben Zeitpunkt recyclet werden, an dem sie produziert werden. Damit werden weder die notwendigen Recycling-Quoten noch die mit dem Recycling verbundenen THG-Emissionen korrekt abgebildet.

Am Beispiel der Elemente Nickel und Lithium sollen die Effekte des Recycling-Hochlaufs dargestellt werden. Inwiefern die von der EU-Regulatorik geforderten Quoten erfüllt werden, hängt von mehreren Faktoren ab. Relevant für die benötigte Masse Recycling-Material ist sowohl die chemische Zusammensetzung recycelten Batterien als auch der Neu-Batterien. Ein Technologieansatz zur kontinuierlichen Reduzierung des Kobalt-Gehalts ist zielführend. Für die Untersuchungen in dieser Analyse wurde das ERTRAC-Szenario des JRC-Kobalt-Reports [6] herangezogen. Die zugehörigen Eingangsdaten sind in Bild 55 dargestellt.

Auf dieser Datenbasis wurde ein Modell erstellt, mit dem der Anteil des Recycling-Materials in der Zukunft bestimmt werden kann. Dabei können die im vorigen Abschnitt erläuterten Prozessschritte parametrisiert werden.

In Bild 56 und Bild 57 ist dargestellt, welcher Materialbedarf sich für Nickel und Lithium über die Jahre gemäß dem Fahrzeughochlauf nach dem ERTRAC-Szenario ergibt. In der Folge wird bestimmt, wie viel Recyclingmaterial in den EoL-Batterien enthalten ist und wie viel davon für neu produzierte Batterien verwendet werden kann. Diese Kurve wird wiederum mit den Zielvorgaben der EU-Regulatorik für Anteile von Recycling-Material an Neubatterien abgeglichen.

Bild 56 zeigt, dass bei Nickel eine Rückführrate von 40 % ausreichen würde, um die in der EU-Vorgabe geforderten Recycling-Quoten zu erfüllen<sup>13</sup>. Hier ist allerdings noch nicht berücksichtigt, dass der Nickelanteil in der NMC-Chemie tendenziell ansteigt und sich wie vorher beschrieben von NMC 111 in Richtung NMC 721 verändert.

Auch im Falle von Lithium (Bild 57) ist eine Rückführrate von 40 % vonnöten, um die von der EU geforderten Recycling-Quoten in Verbindung mit den prognostizierten Hochlaufdaten zu erfüllen.

---

<sup>13</sup> Die Rückführrate beschreibt die Quote des Einsatzes rezyklierten Nickels in der Produktion von Folgeprodukten und bedarf entsprechender Sammlung an Altbatterien und

entsprechender Quoten im eigentlichen Recyclingprozess nach der Zerlegung der Altbatterie.



Bild 55. Historische Daten (EAFO Vehicle Statistics.2018 und IEA Global EV outlook 2017) und Trend-Projektion der EU-Neuzulassungen an batterieelektrischen Fahrzeugen und an Plug-In-Hybriden (ERTRAC Szenario in JRC report Cobalt: demand-supply balances in the transition to electric mobility)

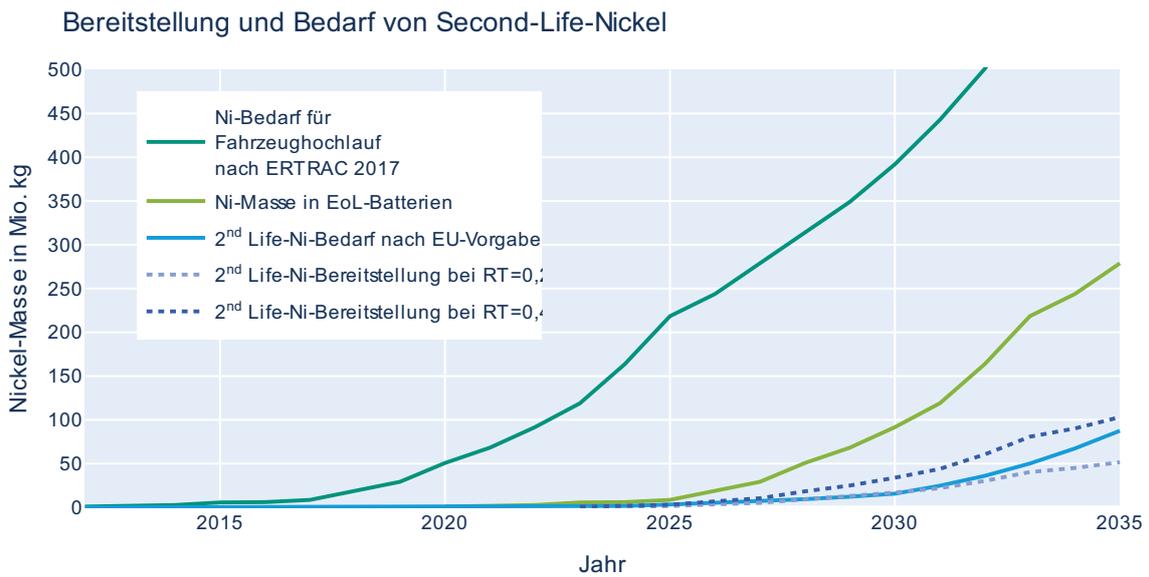


Bild 56. Bereitstellung und Bedarf von Nickel in einem Recycling-Stoffkreislauf mit in rot dargestellter EU-Vorgabe, die ab einer Rückführrate von 0,4 (dunkelblau gestrichelt) für den grün dargestellten Nickelbedarf aus zu dem Zeitpunkt verfügbaren (cyan nicht gestrichelt) Altbatterien erfüllt wird.

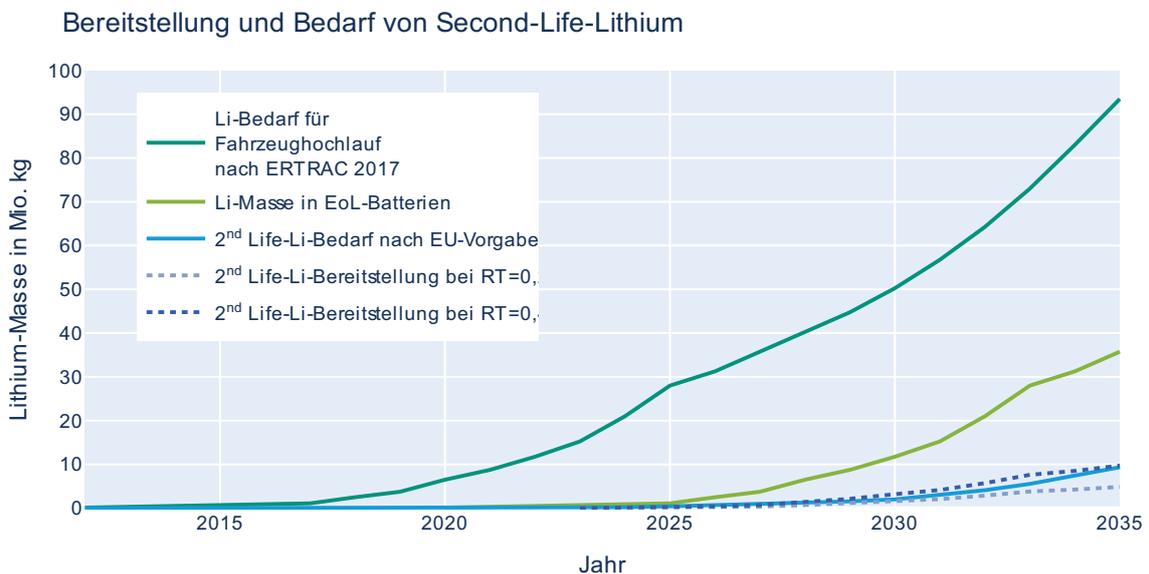


Bild 57. Bereitstellung und Bedarf von Lithium in einem Recycling-Stoffkreislauf

## 10.6 Modellierung von Leistungselektronik und E-Maschine

In diesem Abschnitt sind die Bestandteile der verwendeten Leistungselektronik nach Nordelöf et al. [57; 60] sowie des 48-V-Riemenstartergenerators auf Basis von bereitgestellten Herstellerdaten dargestellt, siehe Bild 58 bzw. Bild 59. Die Besonderheit des Leistungselektronikmodells besteht in der Skalierbarkeit gemäß Spannung und Leistung, die in den Publikationen von Nordelöf et al. [57; 60] eingeführt wurde.

Dies gilt ebenso für die Hochvolt-E-Maschine, die in diesem Abschnitt nicht gesondert diskutiert wird. Wie beim Leistungselektronikmodell

werden Massen- und Materialanteile gemäß der gewählten Leistung sowie Drehmoment nach den Publikationen von Nordelöf et al. [58; 59] bestimmt. In beiden Fällen handelt es sich in der Literatur um Sachbilanzstudien, die im Zuge dieser Bilanzanalyse um die LCA-Phase der Wirkungsabschätzung ergänzt werden.

Im Falle des 48-V-Riemenstartergenerators liegen zwar Primärdaten in großer Detaillierung vor, siehe die Untergliederung in Bild 59. Allerdings gelten diese Untergliederungen lediglich für eine spezielle E-Maschine mit spezifischen Leistungsdaten. Diese Art der Modellierung würde aber grundsätzlich erlauben, die einzelnen Bestandteile anzupassen.

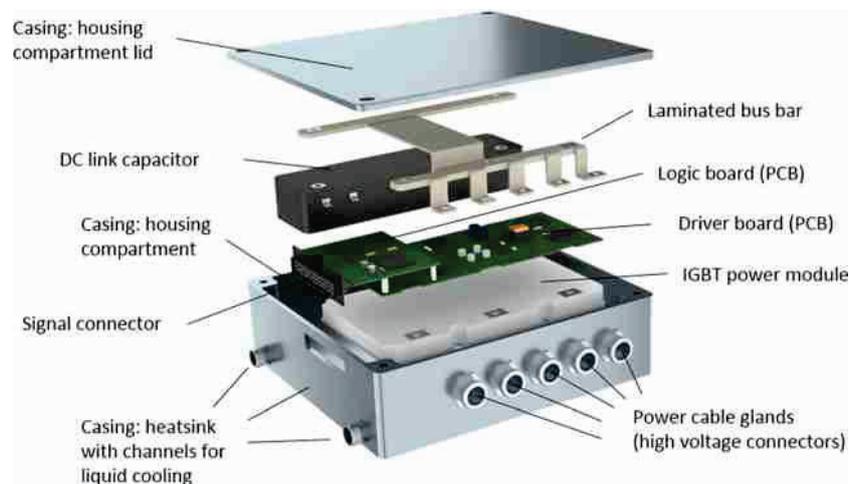


Bild 58. Skalierbare Leistungselektronikstruktur nach Nordelöf et al. [57]

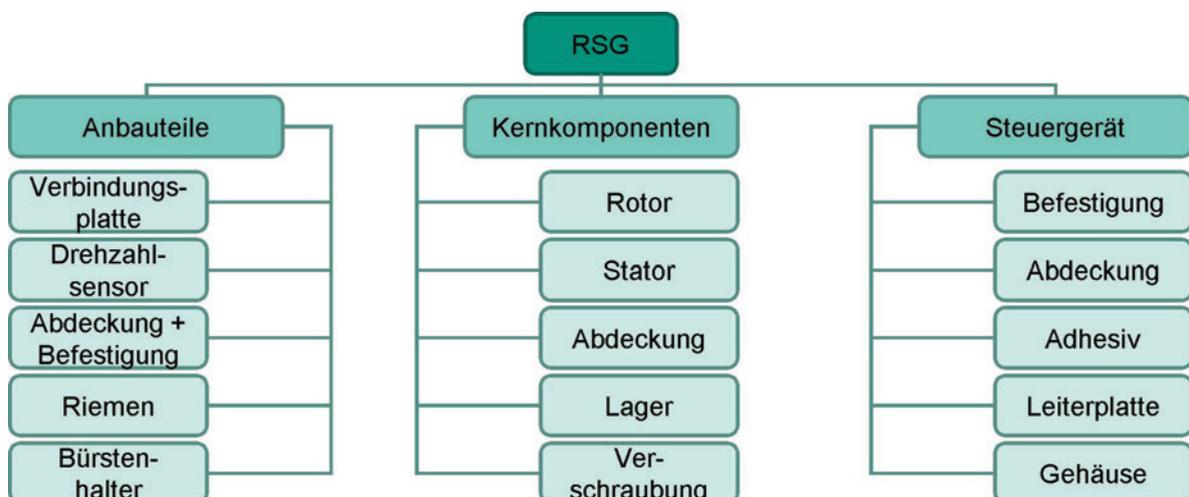


Bild 59. Skalierbare Beschreibung eines E-Antriebs gemäß Primärdaten von Expertengremium

## 10.7 Zertifizierung von Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen

Die Gewichtung von CS- und CD-Verbrauch lässt sich in Abhängigkeit des elektrischen Nutzungsfaktors  $UF_{el}$  darstellen zu Gleichung (2).

$$V_{\frac{1}{100 \text{ km}}^{\text{gew.}}} = UF_{el} \cdot V_{\frac{1}{100 \text{ km}}^{\text{CD}}} + (1 - UF_{el}) \cdot V_{\frac{1}{100 \text{ km}}^{\text{CS}}} \quad (2)$$

$V$  repräsentiert den Fahrzeugverbrauch,  $UF_{el}$  den Nutzungsfaktor im Betrieb mit den Betriebsarten CS Ladeerhaltung und CD Entladung.

Die Nutzungsfaktoren werden gemäß Gleichung (3) bestimmt.

$$UF_i(d_i) = 1 - \exp\left(-\sum_{j=1}^k C_j \cdot \left(\frac{d_i}{d_n}\right)^j\right) - \sum_{l=1}^{i-1} UF_l \quad (3)$$

Die Fahrtstrecke wird in die Phasen  $i$ , also die Kombination der WLTP-Phasen und der jeweiligen Betriebsart (CD, CS), unterteilt. Hierbei bezieht sich  $d_i$  auf die bis Ende der Phase  $i$  gefahrene Strecke und  $d_n$  repräsentiert eine „normalisierte Strecke“.  $C_j$  bezeichnet den  $j$ -ten der insgesamt zehn Koeffizienten, und  $\sum_{l=1}^{i-1} UF_l$  bildet die Summe der errechneten Nutzfaktoren bis zur Phase  $(i - 1)$  ab. Wird auf Gleichung (3) die gleiche Vereinfachung wie in Gleichung (2) angewendet, ergibt sich der elektrische Nutzungsfaktor  $UF_{el}$  nach Gleichung (4).

$$UF_{el}(d_{el}) = 1 - \exp\left(-\left(\sum_{j=1}^k C_j \cdot \left(\frac{d_{el}}{d_n}\right)^j\right)\right) \quad (4)$$

Hierbei wird die elektrische Reichweite  $d_{el}$  auf die „normalisierte Strecke“  $d_n$  bezogen. Die resultierenden Werte für  $UF_{el}$  überschätzen in vielen Fällen den elektrischen Fahranteil, wie verschiedene Publikationen berichten [63–65]. Dabei vergleichen die Autoren die gemäß Gleichung (4) ermittelten Werte für  $UF_{el}$  mit empirisch ermittelten Werten, bspw. gemäß Gleichung (5).

$$UF_{el,emp} = \frac{d_{el,a}}{d_{ges,a}} \quad (5)$$

Basierend auf Werten, die aus internetbasierten Portalen wie beispielsweise [spritmonitor.de](http://spritmonitor.de) entnommen wurden, wird in [63–65] die pro Jahr elektrisch gefahrene Strecke  $d_{el,a}$  auf die gesamte Jahresstrecke  $d_{ges,a}$  bezogen. Zur Korrektur der Abweichungen zwischen  $UF_{el}$  und  $UF_{el,emp}$  schlagen die Autoren von [65] vor, den Wert des Parameters  $d_n$  anzupassen, was in der EU-Verordnung 2023/443 [26] aufgegriffen wurde. Dabei wird  $d_n$  vom aktuellen Wert 800 km schrittweise auf 2.200 km (ab 2025) und 4.260 km (ab 2027) angepasst. Der Einfluss dieser Änderung auf den elektrischen Nutzungsfaktor ist in Bild 60 dargestellt. Für die Reichweite des betrachteten PHEV-g von 76 km sinkt der Wert von  $UF_{el}$  von 86 % auf 36 %.

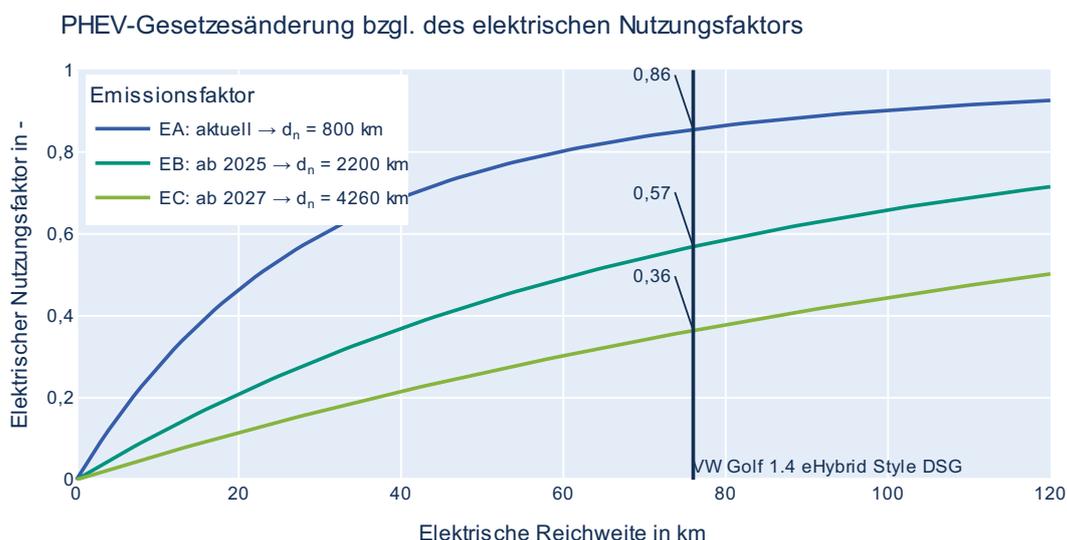


Bild 60. Einfluss der PHEV-Gesetzesänderung auf den elektrischen Nutzungsfaktor

## 10.8 Energiebedarfsabschätzung für die Fahrzeugklimatisierung

Zur Bedienung des HVAC-Consumption-Calculator [43] werden unterschiedliche Eingangsparmeter benötigt. In Tabelle A5 sind die

verwendeten Werte für Flächen, Winkel usw. aufgeführt.

In Tabelle A6 ist der resultierende Leistungs- und Energiebedarf in Abhängigkeit der Eingangsdaten aus Tabelle A5 sowie der Jahreszeiten und Temperaturen angegeben.

Tabelle A5: Eingangsdaten für die Bedienung des HVAC-Consumption-Calculator [43] nach [44]

Komponente	Parameter	Werte
Windschutzscheibe	Fläche in m <sup>2</sup>	1,36
	Winkel in °	27
Seitenfenster	Fläche in m <sup>2</sup>	0,67
	Winkel in °	65
Rückscheibe	Fläche in m <sup>2</sup>	0,5
	Winkel in °	41
Fahrzeugkabine	Fläche in m <sup>2</sup>	6,5
HVAC-Medium	Massenstrom in kg/min	5
Sonneneinstrahlung	Winkel in ° im Sommer / Frühling / Winter	60 / 45 / -
	Strahlungsintensität in W/m <sup>2</sup> im Sommer / Frühling / Winter	850 / 450 / -

Tabelle A6: Leistungs- und Energiebedarf zur Klimatisierung des BEV in Abhängigkeit von Jahreszeit und Temperatur

Jahreszeit	Temperatur in °C	Zus. Leistungsbedarf in kW	Zus. Energiebedarf in kWh/100 km	Zus. Energiebedarf in % <sup>14</sup>
Sommer	20	0	0	0
	25	1,013	1,57	9,8
	30	2,07	3,21	19,9
Frühling/ Herbst	5	1,254	1,94	12,1
	10	1,254	1,94	12,1
	15	1,254	1,94	12,1
Winter	-5	4,035	6,25	38,8
	0	3,299	5,11	31,8
	5	2,564	3,97	24,7

<sup>14</sup> Bezug auf den WLTP-Verbrauch des ID.3 Pro Performance von 16,1 kWh/100 km

## 10.9 CO<sub>2äq</sub>-Emissionen durch elektrischen Energiebedarf

### 10.9.1 Vorbemerkungen

Die Begrenzung der Steigerung der Erdtemperatur um 1,5 °C ist nach dem IPCC-Bericht [37] direkt mit der Menge an Treibhausgasen verbunden, die noch in die Atmosphäre emittiert werden dürfen. Dieses 2018 definierte „CO<sub>2</sub>-Restbudget“ von 420 Gigatonnen wurde mit einer Auftrittswahrscheinlichkeit definiert und würde ohne signifikante Maßnahmen nach ca. 12 Jahren erreicht werden.

Sämtliche Maßnahmen zur Einsparung der THG-Emissionen sind daher unter der Perspektive der Einhaltung des CO<sub>2</sub>-Restbudgets zu betrachten. Die abgeleiteten Maßnahmen müssen auf der einen Seite eine spürbare Reduktion der THG-Emissionen bewirken und auf der anderen Seite eine langfristige Wirkung ermöglichen. Daher sind bei der Betrachtung der THG-Reduktionsmaßnahmen auch die verschiedenen Lebenszyklus-Phasen zu berücksichtigen. Dies betrifft auch Verschiebungen und Energieflüsse zwischen den einzelnen Sektoren. Während industrielle Produktionsprozesse als Teil eines bestehenden Energiehaushalts und bestehender Wertschöpfungsketten im Sinne einer Insellösung betrachtet werden können, müssen die, die Nutzungsphase abbildenden Energiebedarfs- beziehungsweise Verbrauchsprozesse als Bedarfsgrößen eines elektrischen Energiesystems abgebildet werden. Dies gilt beispielsweise ebenso für einen Wechsel im Heimbereich auf Wärmepumpen anstatt fossil basierter Heizungssysteme.

Die Notwendigkeit einer Zusätzlichkeitsbetrachtung gilt für alle Energieträger. Bei fossilen Kraftstoffen wären über heute nicht erschlossene Quellen und Prozesse gewonnene Kraftstoffe (z. B. aus Schieferöl) genauso zusätzlich

abzubilden, wie für die Mobilität genutzte elektrische Energie und regenerativ synthetisierte Kraftstoffe, die durch die elektrische Energie eines offenen Stromsystems hergestellt werden. Letztere werden in der Bilanzanalyse im Zusammenhang mit explizit hierfür genutzten „Energiequellen“ aus Sonne und Wind abgebildet, da dies die kurz- und mittelfristigen Vorgehensweisen abbildet. Die hierzu begrenzten Möglichkeiten in Deutschland würden wegen der erhöhten Kosten für elektrische Energie zu erhöhten Kraftstoffpreisen führen und werden deswegen nicht erwartet. Die Nutzung von sogenannten Gunststandorten<sup>15</sup> bietet hier aber signifikante Möglichkeiten, wobei die Transport- und Speicherkosten berücksichtigt werden müssen.

Die Nutzung elektrischer Energie bedingt deutlich größere technische Aufwände zur Speicherung, um sie orts- und zeitunabhängig nutzbar zu machen. Um den größtmöglichen Effekt der Energiewende nutzbar zu machen, werden volatile „Quellen“ wie Sonnenenergie und Windenergie prioritär genutzt, um die vorhandene elektrische Nachfrage (Stromlast) zu bedienen. Übersteigen die Lasten der elektrischen Nachfrage diese Bereitstellung, werden erst Speicher, dann Kraftwerke mit höheren THG-Emissionen genutzt. Diese Reihenfolge erfolgt analog dem sogenannten Merit-Order-System. Das originäre Merit-Order-System bildet die Kosten dieser Kraftwerke ab. Dieses System in Kombination mit der Einführung eines CO<sub>2äq</sub>-Preises führt dazu, dass Kohlekraftwerke als letzte Instanz zugeschaltet werden müssen. Die komplexe Abbildung der Struktur der Versorgungsnetze zusammen mit der Berücksichtigung der voneinander unabhängigen Bereitstellungs- und Lastsituation kann nicht über Mittelwerte abgebildet werden. Eine zeitliche und örtliche Mittelwertbildung würde den überproportionalen THG-Anstieg nicht abbilden und unterschlagen [40], was dem zuvor beschriebenen

---

<sup>15</sup> Standorten mit hoher Verfügbarkeit an Wind- und/oder Solarenergie

Restbudgetgedanken entgegenwirkt. Aus diesen Gründen differenziert diese Bilanzanalyse zwischen einer Betrachtung eines Marginalansatzes anhand einer sogenannten Grenzwertbetrachtung im Vergleich zum Mittelwertansatz, der auf der arithmetischen Mittelwertbildung basiert. Der Marginalansatz analysiert die einsparbaren beziehungsweise zusätzlich anfallenden  $\text{CO}_{2\text{äq}}$ -Emissionen eines weiteren beziehungsweise eines eingesparten elektrischen Verbrauchers, wobei hier jede vorhandene elektrische Energie aller Verbraucher im gesamten Stromnetz mathematisch den gleichen Effekt ausüben. Der Mittelwertansatz beziffert den Mittelwert der  $\text{CO}_{2\text{äq}}$ -Emissionen über die gesamte zur Verfügung gestellt elektrische Energie für alle elektrischen Verbraucher. Die Betrachtung nach dem Marginalansatz ist bei Ökobilanzen für die Analyse von Wechseln und Zusätzlichkeiten etabliert und vergleicht zeitaufgelöst die Angebots- mit der Lastsituation, s. a. Bild 61. In der LCA-Szene üblich ist der langfristige Ansatz („long-term consequential“). Die Idee dahinter ist, dass zusätzliche Verbraucher mehr Bedarf verursachen, was Investitionen in zusätzliche Kapazitäten auslöst. Der hier betrachtete kurzfristige Ansatz („short-term consequential“) betrachtet die Wirkungen von

wegen zusätzlicher Lasten zugeschalteter fossil basierter Versorgungen.

Ein besonderes Augenmerk gilt der Betrachtung der beschlossenen Zukunftsszenarien und den hieraus resultierenden Energiesystemen, wobei diese Systeme mit aktuellen Lastkurven analysiert werden müssen, da zukünftige Lastkurven eine zusätzliche Unsicherheit bei der Bilanzrechnung darstellen.

Die Bestimmung der real anfallenden  $\text{CO}_{2\text{äq}}$ -Emissionen auf der Basis des sogenannten Marginalansatzes unterscheidet sich hinsichtlich der Ergebnisse für den Anwendungsfall des deutschen Stromnetzes circa um den Faktor 2 von dem Mittelwertansatz. Hieraus resultiert oftmals die weiterführende Frage, für welche Anwendung die bereits heute vorliegenden, sogenannten „erneuerbaren Energiebeiträge“, beispielsweise von Fotovoltaik und Windkraft, zu verbuchen sind. Eine Einzelzuordnung ist theoretisch möglich. So kann beispielsweise die durch Fotovoltaik zur Verfügung gestellte elektrische Energie exklusiv einem Sektor oder einer Technologie wie dem Elektrofahrzeug zugeordnet werden, sofern die PV-Anlage zum Laden des BEV verwendet wird.

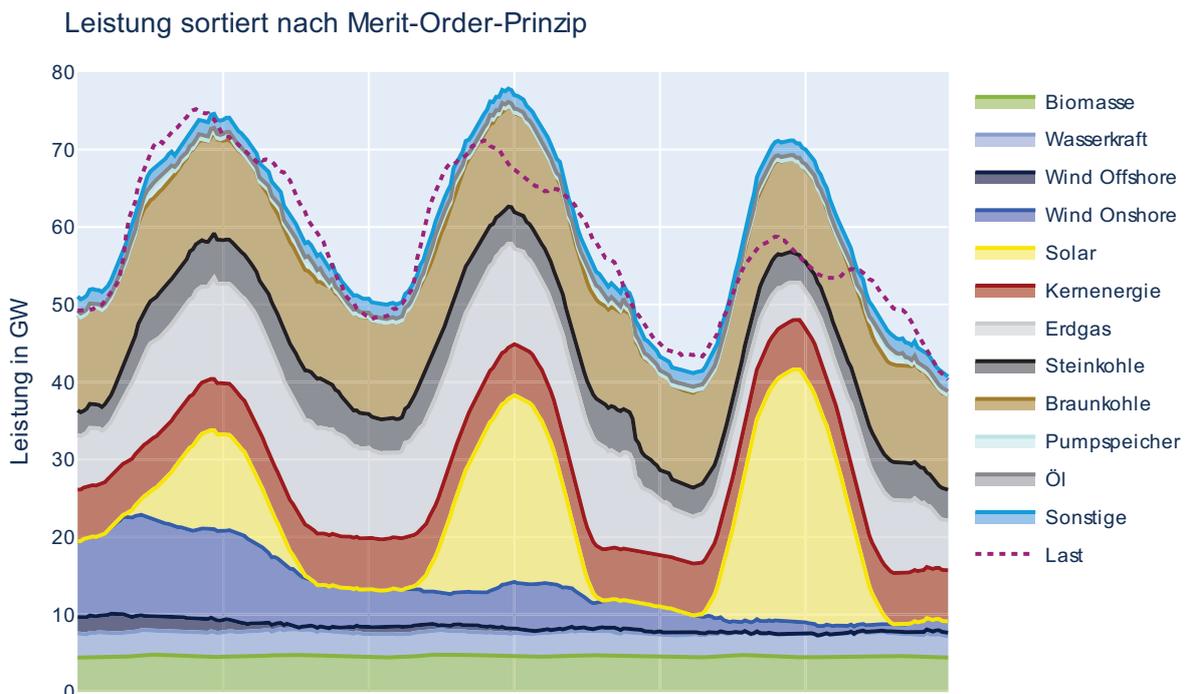


Bild 61. Beispielhafte Stapelung verschiedener Energieträger als Funktion des Merit-Order-Prinzips

Die analytische Betrachtung führt jedoch zu dem Ergebnis für ein gekoppeltes elektrisches Gesamtsystem mit einer Vielzahl an Kraftwerken mit unterschiedlichen CO<sub>2äq</sub>-Emissionen, dass generell jeder elektrische Verbraucher den Betrieb des CO<sub>2äq</sub>-intensivsten Kraftwerks bedingt. Diese Allokationsfrage bedeutet, dass generell jeder ohmsche Widerstandsverlust im Gesamtsystem einem Grenzbeitrag gleichzusetzen ist. Dies betrifft einen seit Jahrzehnten funktionierenden Dauerbetrieb (alter Kühlschrank, Beleuchtung, Industrieanlage ...) genauso wie ein neues, frisch installiertes Elektrogerät. Die Frage der Allokation betrifft im Übrigen insbesondere auch den Neueinsatz von Wärmepumpen oder die Elektrifizierung von Industrieanlagen (beispielsweise Elektrocracker, Elektrohochofen etc.). Die Reduzierung der Energie eines jeden alten oder neuen elektrischen Beitrags reduziert den Beitrag des CO<sub>2äq</sub>-intensivsten Kraftwerks. In anderen Worten eliminiert die Logik des Mittelwertansatzes implizit die Möglichkeit, einzelne elektrische Energiekonsumenten exklusiv als neutral hinsichtlich der resultierenden CO<sub>2äq</sub>-Emissionen zu benennen. Gegenstand der aktuellen Fachdiskussion ist der genaue Effekt des ETS-Systems auf die resultierenden CO<sub>2äq</sub>-Emissionen.

Diese Betrachtung ist generell auch bei einem Überschussangebot an „erneuerbaren Energiebeiträgen“ gültig, wenn insbesondere Windkraft und Fotovoltaik ein ausreichendes Angebot an elektrischer Energie beisteuern. Dieser Zustand wird insbesondere in den 2030er-Jahren vermehrt auftreten. Gleichwohl wird in einer Phase des Überschussangebots der Beitrag des CO<sub>2äq</sub>-intensivsten Kraftwerks eben derjenige der günstigen Windkraft oder Fotovoltaik sein, was in diesem Fall zu sehr niedrigen CO<sub>2äq</sub>-Emissionen jedes elektrischen Verbrauchers führt.

## 10.9.2 Generelle Vorgehensweise

Die THG-Belastung der berücksichtigten Energieversorgung wird stark von dem Angebot und der Nachfrage der elektrischen Energie bestimmt. In der Betriebs- und Volkswirtschaft hat sich hier der Ansatz der Grenzwertbetrachtung etabliert. Bei einer Ökobilanz wird diese Vorgehensweise als marginaler Ansatz bezeichnet und in dieser Bilanzanalyse als Marginalansatz für die Nutzungsphase verwendet, während der Mittelwertansatz für langfristig geplante Kraftwerkverbraucherssysteme wie die Produktion verwendet wird (s. a. Bild 62). Sonderfälle, wie eine Versorgung über Power-Purchase Agreements<sup>16</sup> oder Kompensation über THG-Zertifikate werden nicht behandelt. Die Nutzungsdaten wurden aus der Datenbank des FhG ISE importiert. Mithilfe eines Berechnungsansatzes wird mit einer Auflösung in 15-Minuten-Schritten die Versorgung aller Quellen wiederum mit der Last durch alle Verbraucher abgeglichen. Auf diesem Weg kann der zeitaufgelöste Zusatzbedarf hinsichtlich seiner THG-Emission betrachtet werden. In den Ergebnissen dieser Bilanzanalyse wurde angenommen, dass der elektrische Energiebedarf durch BEV sich gleichmäßig auf das ganze Jahr verteilt.

Die generelle Vorgehensweise zur Bestimmung der THG-Emissionen ist in Bild 63 schematisch dargestellt. In die Berechnung fließen die Annahmen und Daten eines Referenzjahres sowie jene des gewünschten Zieljahres ein. In der Grafik sind **Referenzjahr**- und **Zieljahr**daten jeweils in **grün** bzw. **blau** eingefärbt. Darüber hinaus werden pro Energieträger Emissionswerte in g CO<sub>2äq</sub>/kWh angegeben (**rot** dargestellt).

---

<sup>16</sup> Power Purchase Agreements sind Stromlieferverträge, die mittels Zertifikaten des Anbieters bilanziell eine Stromqualität bereitstellen.

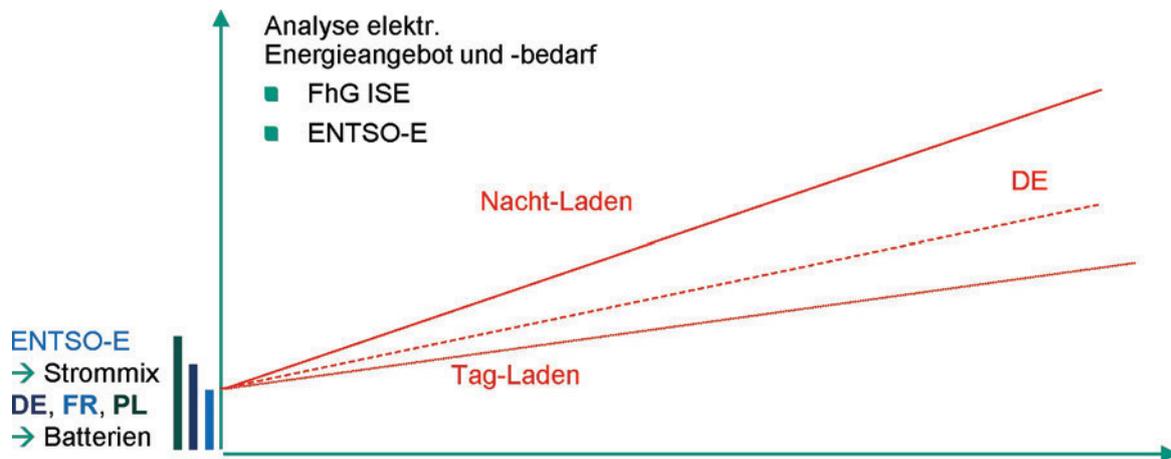


Bild 62. Zuordnung der länderspezifischen Stromsystemzusammenstellung für die Produktionsphase und gemäß Energiebedarf, abgebildet aus der resultierenden zusätzlich benötigten elektrischen Energie für die Nutzungsphase

Zum Start der Berechnung werden die Randbedingungen ausgewählt. Dies beinhaltet beispielsweise also Referenzjahr sowie Zieljahr und das Zieljahr. Für die Berechnungen werden Last-Zeitreihen sowie Werte für die installierte Leistung pro Energieträger benötigt. In Kombination mit der Ladestrategie wird nachfolgend berechnet, welche Mehremissionen für die zusätzliche Last bei den in diesem Zeitfenster zur Verfügung stehenden Quellen entstehen. Diese werden dann auf die erzeugte elektrische Energie mit der Einheit Kilowattstunde beziehungsweise den gefahrenen Kilometer bezogen.

- Auswahl des Referenzjahres sowie des Zieljahres inklusive dynamischer Entwicklung der elektrischen Energieversorgung
- Übertragung der Energieversorgung im Zieljahr auf normierte Zeitreihen des Referenzjahres
- Ermittlung der elektrischen Zusatzlasten auf Basis prognostizierter BEV-Zulassungen und -Energiebedarfe
- Übertragung der Lastverläufe auf normierte Zeitreihen
- Abgleich der Zeitreihen der Bereitstellungs- und Lastverläufe zur Ermittlung eines Mangels oder Überschusses elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen
- Vergleich der Residuallast mit und ohne Energiebedarf durch Zusatzverbraucher

- Ermittlung der THG-Emissionen durch Zusatzverbraucher nach kurzfristigem Marginalansatz sowie nach Mittelwertansatz

### 10.9.3 Emissionsfaktoren

Für die jeweiligen Energieträger bzw. Kraftwerke werden Emissionsfaktoren in  $\text{g CO}_{2\text{äq}}/\text{kWh}$  angenommen. Hierzu werden, abweichend zu den Veröffentlichungen von Koch, Böhlke 2021 [40] und Böhmeke, Koch 2021 [10], nicht die Werte von Fraunhofer ISE, sondern Werte aus LCA-Berechnungen gemäß ecoinvent 3.8 verwendet, siehe Bild 64.

Alternativ stehen auch Werte des IPCC-Berichts von 2014 zur Verfügung [70], die beispielsweise in der Applikation „Electricity Maps“ [2] herangezogen werden. Die LCA-basierten THG-Werte der deutschen Kraftwerkstechnologien wurden konkret mithilfe von ecoinvent v3.8 als GWP100 nach ReCiPe 2016 Midpoint (H) berechnet. Zumindest pro Kraftwerkstechnologie werden dabei über die betrachteten Jahre keine Verbesserungen oder Verschlechterungen angenommen, auch wenn sich über die Jahre die Zusammensetzung aller Kraftwerke ändern wird. Neben dem in Bild 64 dargestellten Ausschnitt der Emissionswerte sind in Bild 65 Emissionsfaktoren aus weiteren Quellen dargestellt, wobei sich teilweise eine große Streuung zeigt.

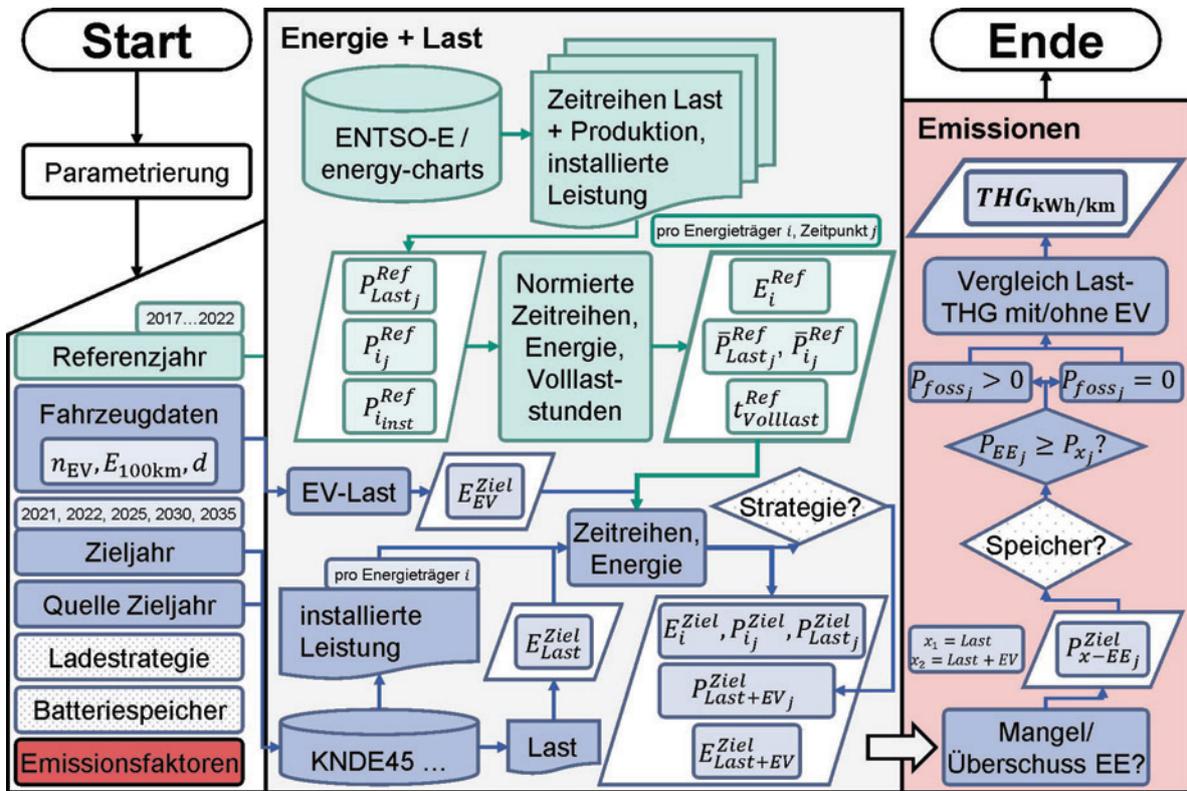


Bild 63. Vorgehensweise zur Bestimmung der THG-Emissionen durch elektrische Energie

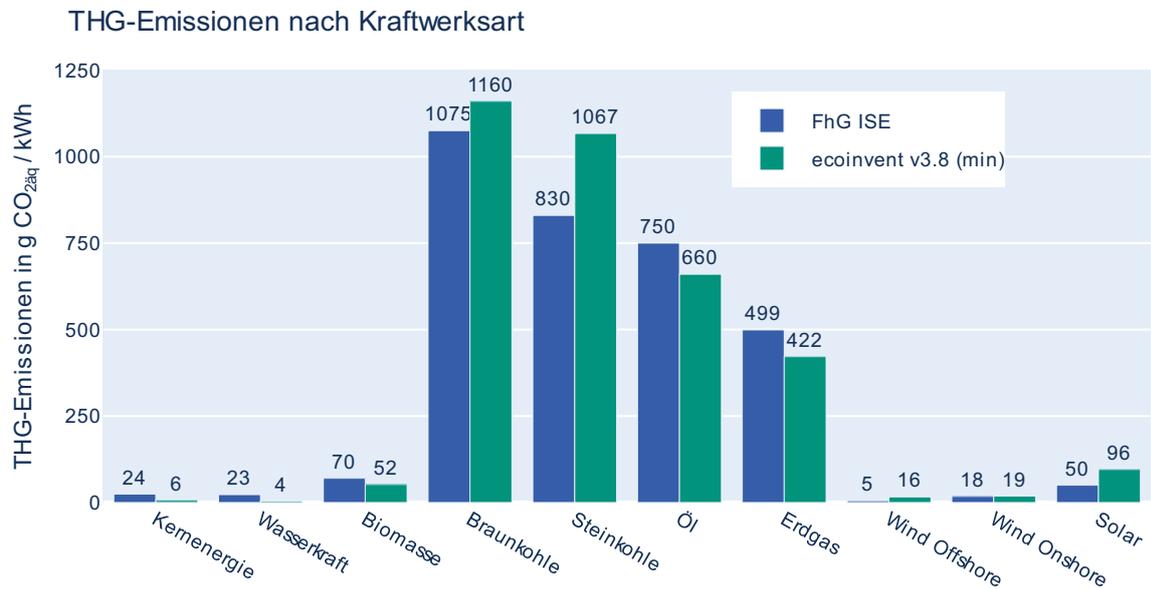


Bild 64. THG-Emissionen nach Kraftwerksart nach FhG ISE und Minimalwerten aus ecoinvent v3.8

## THG-Emissionen laut unterschiedlichen Quellen

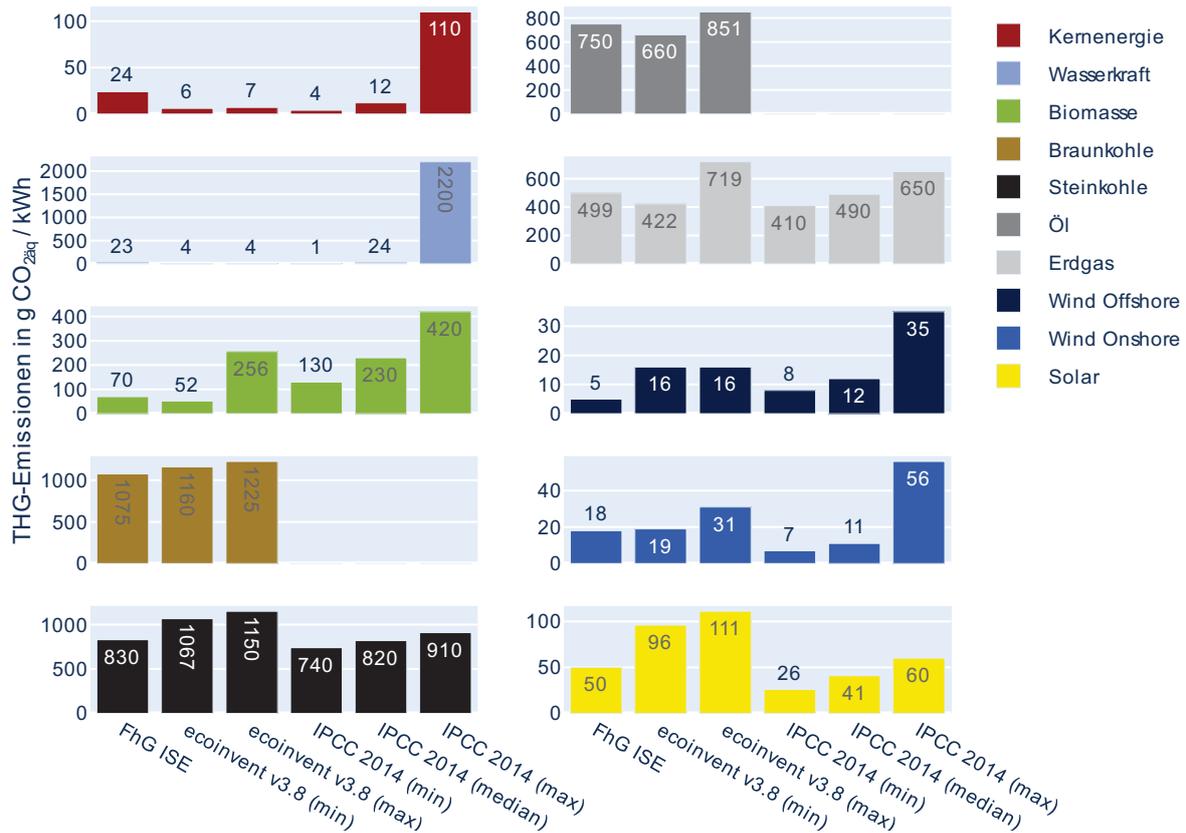


Bild 65. THG-Emissionen nach Kraftwerksart nach FhG ISE, ecoinvent v3.8 und IPCC 2014 [70]

### 10.9.4 Referenzjahr

#### 10.9.4.1 Datenbasis

Für die Berechnung werden Daten aus dem Referenzjahr herangezogen. Im Falle dieser Bilanzanalyse wurde 2021 als Referenzjahr definiert. Diese Datenmatrix umfasst viertelstündlich aufgelöste Leistungsdaten für die elektrische Gesamtlast sowie für die einzelnen Energieträger, die von Fraunhofer ISE auf energycharts.de zur Verfügung gestellt werden. Dabei kann zwischen der „öffentlichen“ und „gesamten“ Nettostromerzeugung differenziert werden. Standardmäßig wird hier der „gesamte“ Wert herangezogen, welcher die Eigenkraftwerksversorgung beinhaltet. Zusätzlich werden die Werte für die installierte Leistung der einzelnen Energieträger eingelesen.

#### 10.9.4.1.1 Unterschiedliche Zeitreihen je nach Referenzjahr

Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, liegen Leistungsdaten für mehrere Jahre vor, wobei die Daten des Referenzjahres 2021 die Basis der Bilanzanalyse bilden.

#### Jahres- und monatsbedingte Schwankungen

Durch Unterschiede des Wetters, des Ausbaus der „erneuerbaren“ Energien (EE) sowie durch Sondereffekte ergeben sich unterschiedliche Last- und Angebotsverläufe elektrischer Energie. Diese Unterschiede sind in Bild 66 für drei beispielhafte Tage im Juli, ausgewertet über den Zeitraum von 2017 bis 2022, zu sehen. Insbesondere tagsüber liegt eine große Spreizung des elektrischen Energiebedarfs zwischen den einzelnen Jahren vor. Die Differenz zwischen Minimal- und Maximalwert beträgt für den 02.07.2021 um 12:00 Uhr über den genannten Zeitraum hinweg beispielsweise über 20 GW bei einem Mittelwert von ca. 65 GW.

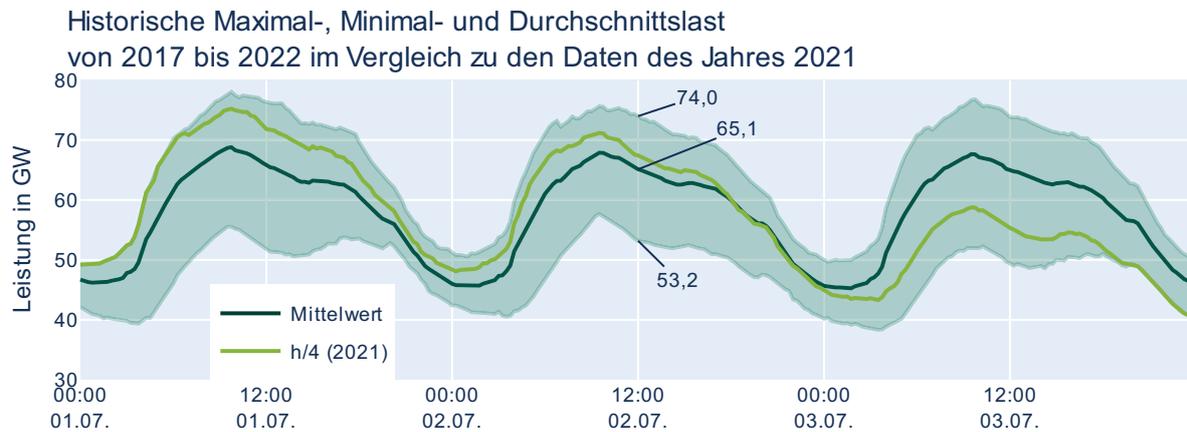


Bild 66. Auswertung des Lastverlaufs zweier Tage über mehrere Jahre

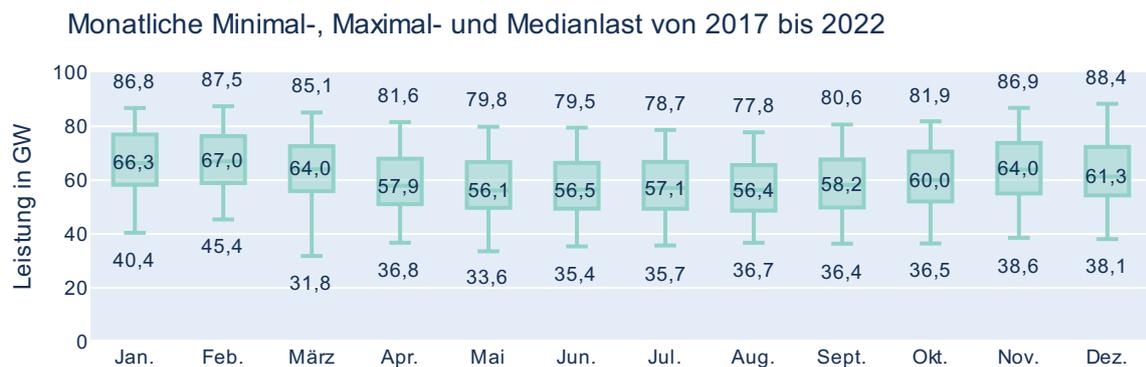


Bild 67. Variation der Last über das Jahr von 2017 bis 2022, berechnet pro Monat. Erläuterung: 40,4 GW als Minimalwert jeweils im Januar der Jahre 2017-2022. Die beispielsweise durchschnittliche monatliche Last von 66,3 GW lag gemittelt über alle Januarwerte der Jahre 2017-2022 vor.

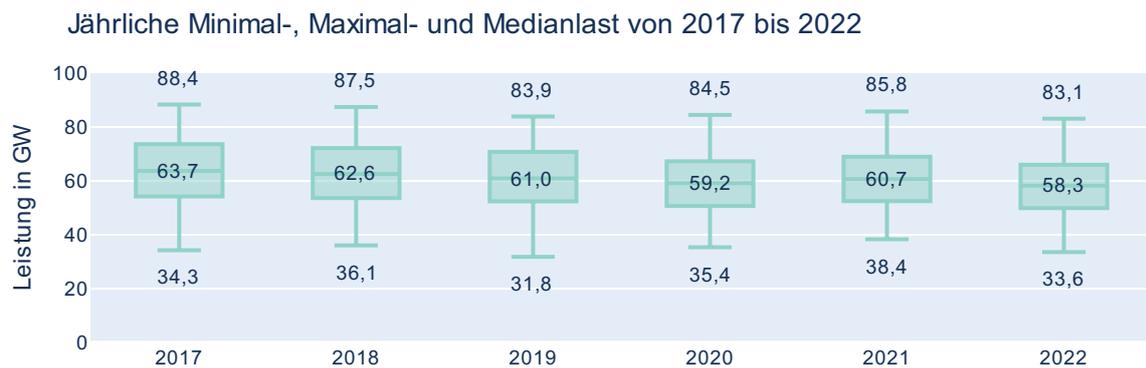


Bild 68. Variation der Last über das gesamte Jahr für den Zeitraum von 2017 bis 2022. Erläuterung: 34,36 GW als Minimalwert im Jahr 2017 bezieht sich auf eine durchschnittliche monatliche Last von 34,3 GW, die in diesem Fall im Mittel im Monat Juli im Jahr 2017 vorlag

Die nachfolgenden beiden Abbildungen zeigen Minimal-, Maximal- und Medianwerte über die Jahre 2017 bis 2022. Für die Berechnungen werden die Daten jeweils in Monate (Bild 67) bzw. Jahre (Bild 68) eingeteilt.

Dabei zeigt Bild 67 die Last-Variation über die einzelnen Monate in den Jahren zwischen 2017 bis 2022. Hierbei ist unter anderem zu

erkennen, dass typischerweise in der Mitte eines Jahres die geringste Last, also der geringste elektrische Energiebedarf vorliegt.

Bild 68 zeigt die Entwicklung der Last über das gesamte Jahr im Zeitraum 2017 bis 2022. Über die Jahre hat dabei der Medianwert der Last abgenommen, mit einem Tiefstwert im Jahr 2020.

## Einfluss der zeitlichen Auflösung

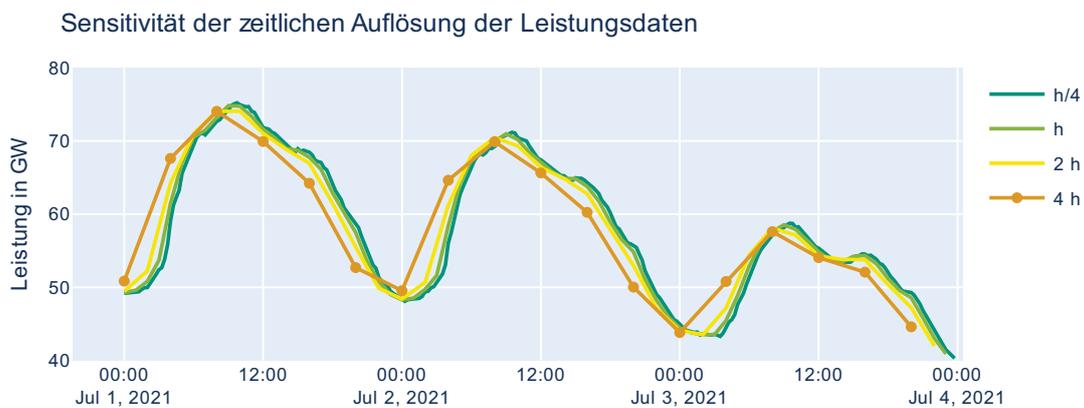
Wie obenstehend ausgeführt wurde, liegen die verwendeten Daten des elektrischen Energiebedarfs und der elektrischen Leistung in Deutschland in einer viertelstündlichen Auflösung vor. Da sich die zeitliche Auflösung auf die Ergebnisgüte auswirken kann, ist im Folgenden dargestellt, inwiefern sich die Last-Zeitreihen bei einer Verringerung der Auflösung verhalten.

Bild 69 und Bild 70 zeigen dabei einen Ausschnitt über drei Tage, sowohl in absoluten Werten (Bild 69) als auch in Form des Differenzwerts. Referenz ist Bild 70 die ursprüngliche viertelstündliche Auflösung.

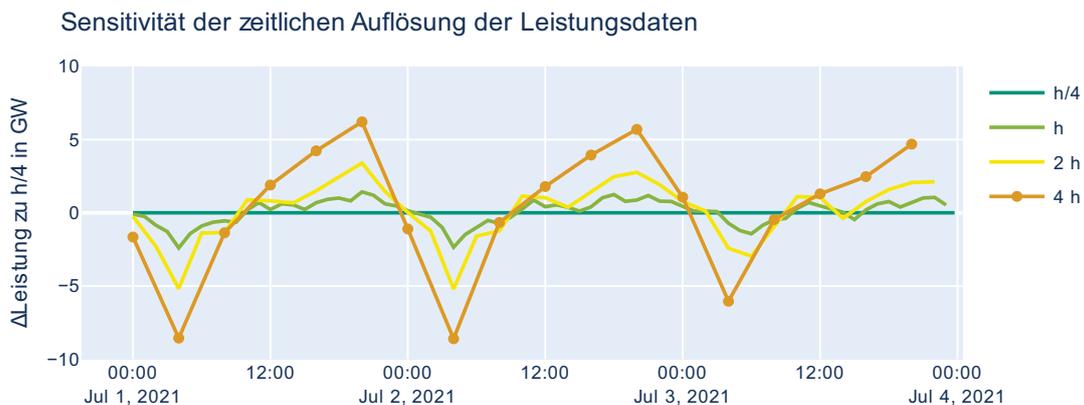
Die Elemente der Legende geben dabei an, in welchem Intervall die Werte vorliegen, bei „h/4“ also viertelstündlich, bei „h“ stündlich, bei „2 h“ mit einem Mittelwert über zwei Stunden etc. Dabei ist zu erkennen, dass mit abnehmender Auflösung die Abweichung von der viertelstündlichen Zeitreihe zunimmt.

Im betrachteten Zeitraum resultiert aus einem Wechsel von Viertelstunden- auf Stundenauflösung eine maximale Abweichung zwischen – 2,4 GW bis 1,4 GW, im gesamten Zeitraum von 2017 bis einschließlich 2022 resultiert sogar eine Maximalabweichung zwischen –4,6 GW und 4,2 GW. Bei Wahl einer 2-Stunden- oder gar 4-Stunden-Mittelung vergrößert sich die Abweichung weiter.

Dieser Sachverhalt ist insofern relevant, da unterschiedliche Publikationen aufgrund der Qualität der Eingangsdaten oder den Anforderungen an Modellierungswerkzeuge mit davon abweichenden zeitlichen Auflösungen arbeiten. So stellen *Wietschel et al. 2022* [84] beispielsweise einen  $CO_{2aq}$ -Emissionswert für Deutschland im Jahr 2030 in stündlicher Auflösung dar. In *García et al. 2023* [34] betrachten die Autoren die Auswirkungen des Marginalstrommixansatzes in Spanien auf Basis von Daten in 10-minütiger Auflösung.



**Bild 69.** Lastverlauf über drei Tage in Abhängigkeit der Sampling-Rate



**Bild 70.** Differenz der Lastverläufe im Vergleich zur viertelstündlichen Referenzauflösung. Erläuterung: Am 01.07.2021 um 20.00 Uhr unterschätzt die Angabe des elektrischen Leistungsbedarfs (Last) bei einer Angabe als 4-Stunden-Mittelwert (4 h) den real vorkommenden elektrischen Leistungsbedarf, abgeleitet aus der Viertelstundenauflösung (h/4) um 5,5 GW.

## Merit-Order-Darstellung der Energieträger

Bei der Bestimmung der Einsatzreihenfolge der Kraftwerke wird das Merit-Order-Prinzip angewendet. Über die Reihenfolge entscheiden die Grenzkosten, wonach sogenannte EE-Elektrizität (Fotovoltaik, Windkraft etc.) bevorzugt eingespeist wird. Nach und nach werden zur Deckung des elektrischen Bedarfs, also der elektrischen Last, weitere Kraftwerke mit jeweils höheren Grenzkosten zugeschaltet. Dies ist bereits exemplarisch in Bild 61 dargestellt.

### 10.9.4.2 Datenaufbereitung

#### 10.9.4.2.1 Umrechnung der Einheit

Sowohl Last- als auch Produktionsdaten liegen als Werte in der Einheit Megawatt vor. Zur einfacheren Handhabung von nachfolgenden Rechenschritten werden die Daten zunächst in die Einheit Gigawatt umgerechnet.

#### 10.9.4.2.2 Berechnung der elektrischen Energie, Filtern und Zusammenfassen von Energieträgern

Die vorliegende elektrische Leistung wird durch die Schreibweise  $P_{ij}^x$  dargestellt. Index  $i$  beziffert die Auswahl des Energieträgers (Steinkohle, Fotovoltaik etc.). Der hochgestellte Index  $x$  steht als Notation für das Kalenderjahr, z. B. 2021. Der Index  $j$  bestimmt ein Element eines gesamten Jahresarray, der durch die Elemente  $j$  von 1 bis  $n_{Jahr}$ , also in Summe durch  $n_{Jahr}$  Zeitschritte für jeden Energieträger  $i$  abgebildet ist.

Auf Basis der momentanen Leistung  $P_{ij}^x$  sowie der zeitlichen Auflösung der Datenreihen  $f$  wird die elektrische Energie  $E_i^x$  pro Jahr in  $n_{Jahr}$  Zeitschritten und pro Energieträger  $i$  berechnet nach Gleichung (6).

$$E_i^{Jahr} = \frac{\sum_j^{n_{Jahr}} P_{ij}^{Jahr}}{f} \quad (6)$$

Für eine hohe Auflösung der gesamten Matrix von 4 Messpunkten pro Stunde ( $f = 4$ , also eine 15-Minuten-Auflösung) erfolgt eine entsprechende Berücksichtigung. Bei einer Darstellung eines Zweistundenmittelwerts wäre analog  $f = 0,5$  (0,5 Messpunkte pro Stunde) anzusetzen.

Damit gilt bspw. für „Wind Onshore“ im Referenzjahr entsprechend Gleichung (7).

$$E_{Wind\ Onshore}^{Ref} = \frac{\sum_j^{n_{Jahr}} P_{Wind\ Onshore\ j}^{Ref}}{f} \quad (7)$$

Die Summe der elektrischen Energie im Referenzjahr ergibt sich gemäß der berücksichtigten Anzahl von Energieträgern  $n_{Energieträger}$  zu Gleichung (8).

$$E_{Prod}^{Ref} = \sum_i^{n_{Energieträger}} E_i^{Ref} \quad (8)$$

Für die Kategorien „Andere“, „Müll“, „Geothermie“ und „Pumpspeicher“ liegen teilweise keine Szenariodaten für die Zukunft vor. Aus diesem Grund werden diese Energieträger nicht berücksichtigt. Die daraus resultierende vernachlässigte Energie beläuft sich im Jahr 2021 auf  $E_{Prod\ vernachlässigt}^{2021} = 24,7\ TWh$ , was 4,6 % der verbliebenen, berücksichtigten Energie  $E_{Prod\ berücksichtigt}^{2021} = 531,8\ TWh$  entspricht.

Außerdem werden die beiden Kategorien „Laufwasser“ und „Speicherwasser“ zu „Wasserkraft“ zusammengefasst, da bei den Szenarien teilweise ebenfalls keine Unterscheidung vorgenommen wird. In Bild 71 ist die elektrische Energie der einzelnen Energieträger dargestellt.

Analog zur erzeugten Elektrizität durch die einzelnen Energieträger wird die Energie der angeforderten elektrischen Last berechnet,  $E_{Last}^{Ref}$ . Dies entspricht dem sogenannten Nettostromverbrauch.

#### 10.9.4.2.3 Installierte Leistung

Basierend auf Daten von Fraunhofer ISE, wird die installierte Leistung der einzelnen Energieträger eingelesen. Die Einheit beträgt GW. Die entsprechende Notation hierfür lautet:  $P_{Insti}^{Ref}$ . Beispielsweise ist eine Kapazität von 58,7 GW Fotovoltaik im Jahr 2021 installiert gewesen.

#### 10.9.4.2.4 Normierte Daten

Basierend auf der Last-Zeitreihe, also einer Zeitreihe des Strombedarfs über  $j$  Datenpunkte eines Referenzjahres, wird der Anteil eines jeden Zeitschrittwerts auf die Summe der Leistung normiert, siehe Gleichung (9).

## Elektrische Energie im Referenzjahr 2021

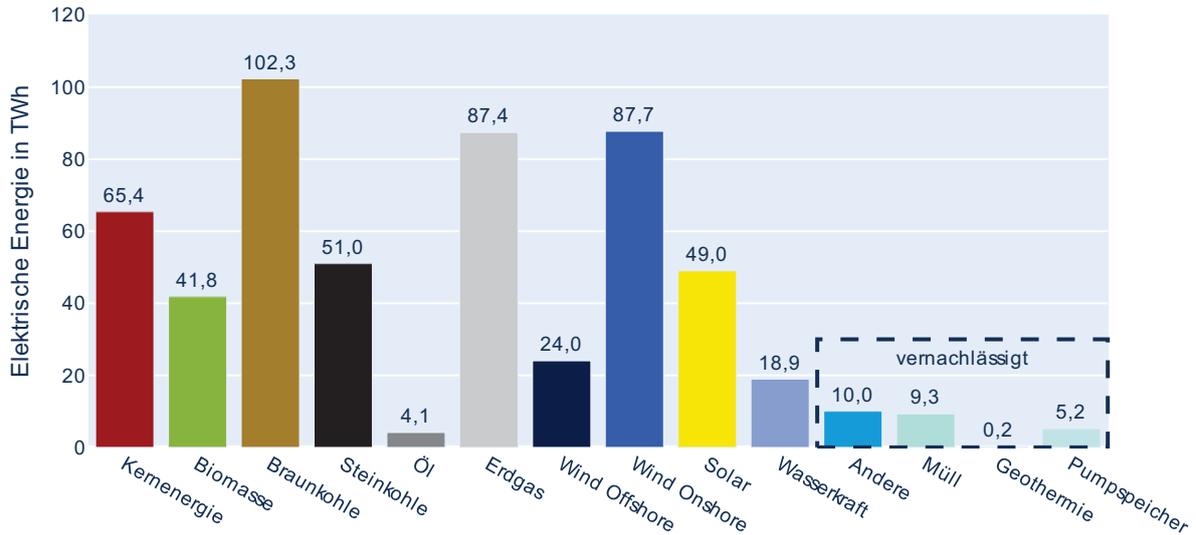


Bild 71. Gesamte elektrische Energie, aufgeführt nach Energieträger für das Jahr 2021,  $E_i^{2021}$

$$\tilde{P}_{Last_j}^{Ref} = \frac{P_{Last_j}^{Ref}}{\sum_j P_{Last_j}^{Ref}} \quad (9)$$

$$\tilde{P}_{i_j}^{Ref} = \frac{P_{i_j}^{Ref}}{P_{Inst_i}^{Ref}} \quad (10)$$

Die Größe  $\tilde{P}_{Last_j}^{Ref}$  stellt also einen Array über  $j$  Datenpunkte da, der die Schwankung des Strombedarfs, also der Last, im Verhältnis zur gesamten elektrischen Energie eines Jahres abbildet.

Bei den Energieträgern wird der Istbeitrag eines Energieträgers  $i$  in jedem Zeitschritt  $j$  in einem Referenzjahr auf die gesamte installierte Leistung des Energieträgers  $i$  normiert, siehe Gleichung (10).

Durch diese Definition ist vorgegeben, dass der Wert von  $\tilde{P}_{i_j}^{Ref}$  zwischen 0 und 1 schwanken muss. Dieser Sachverhalt ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt, siehe Bild 72. Dabei ist unter anderem zu sehen, dass im betrachteten Zeitraum ca. 80 % der installierten Kernenergieleistung sowie ca. 60 % der installierten Braunkohleleistung abgerufen worden ist.

## Normierte Momentanleistung im Referenzjahr 2021

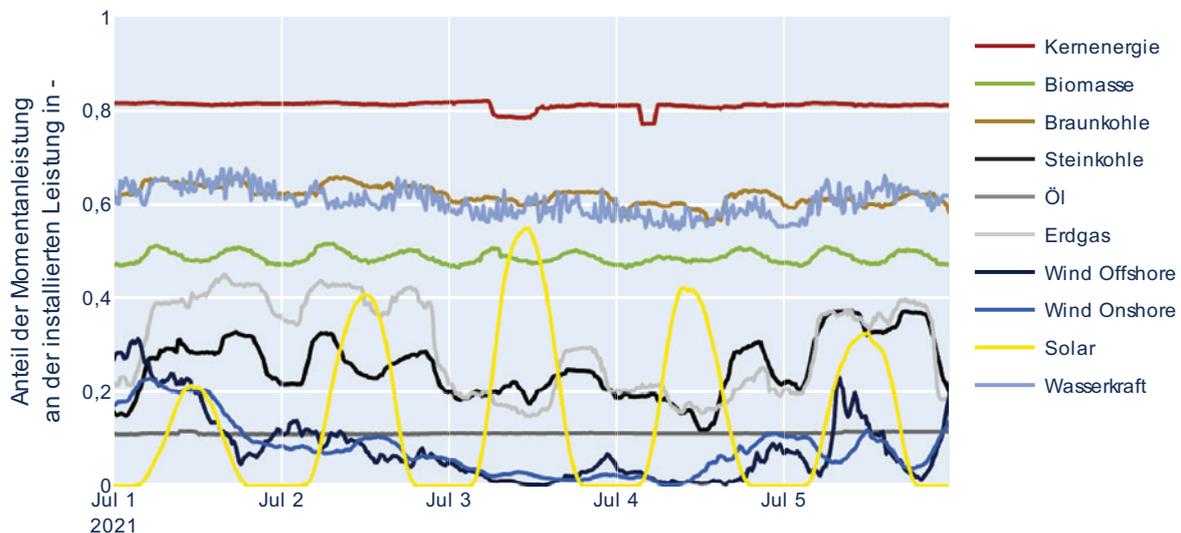


Bild 72. Auf die installierte Leistung normierte Istleistung  $\tilde{P}_{i_j}^{Ref}$  der einzelnen Energieträger

### 10.9.4.2.5 Volllaststunden

Die Volllaststunden für den jeweiligen Energieträger  $i$  werden im Referenzjahr über die Jahresenergie sowie die installierte Leistung bestimmt, siehe Gleichung (11).

$$t_{Volllast_i}^{Ref} = \frac{E_i^{Ref}}{P_{inst_i}^{Ref}} \quad (11)$$

### 10.9.5 Zieljahr

#### 10.9.5.1 Volllaststunden

Für die Volllaststunden des Zieljahres können entweder die Werte aus dem Referenzjahr übernommen werden, oder Werte aus Szenarien herangezogen werden.

In Bild 73 ist dargestellt, wie die Werte aus dem Referenzjahr, „2021“, im Vergleich zu verschiedenen Szenarien und Zieljahren einzuordnen sind. Dabei ist unter anderem die Tendenz zu erkennen, dass „Wind Onshore“ in der Zukunft durch Technologieverbesserungen einen höheren Volllaststundenanteil aufweisen wird.

#### 10.9.5.2 Installierte Leistung

Für das Zieljahr wird je nach Szenario die Entwicklung der installierten Leistung für jede Kraftwerksart hinterlegt. Bild 74 stellt die Werte für das Referenz- und Zieljahr gegenüber.

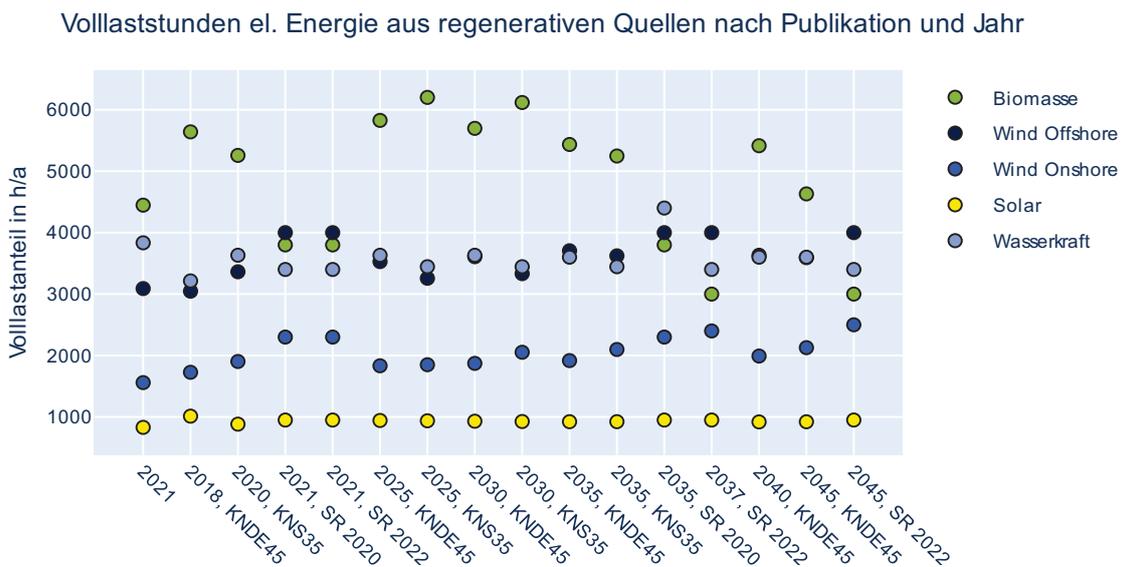


Bild 73. Regenerative Volllaststunden abhängig vom Zeitpunkt (Jahr), aufgelistet nach Energiequelle

#### Installierte Leistung im Referenz- und Zieljahr

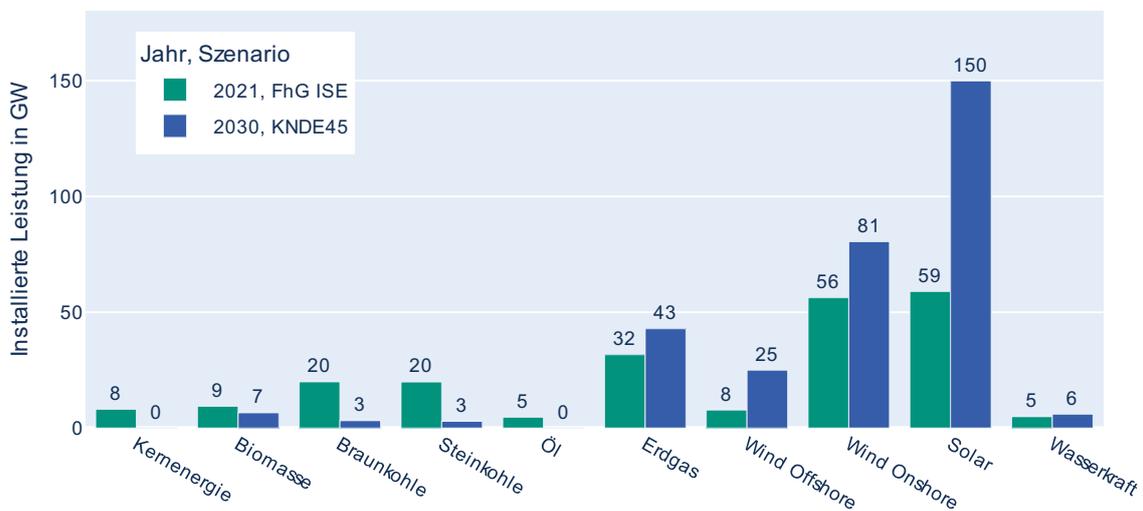


Bild 74. Installierte Leistung für das Referenz- und das Zieljahr; Erläuterung: Gemäß Szenario FhG ISE liegen im Jahr 2021 56 GW an installierter Leistung des Energieträgers Wind Onshore vor. Im Jahr 2030 wird dieser Wert gemäß Szenario KNDE45 einen Wert von 81 GW betragen.

Elektrische Energie im Referenz- und Zieljahr (2021, 2030)

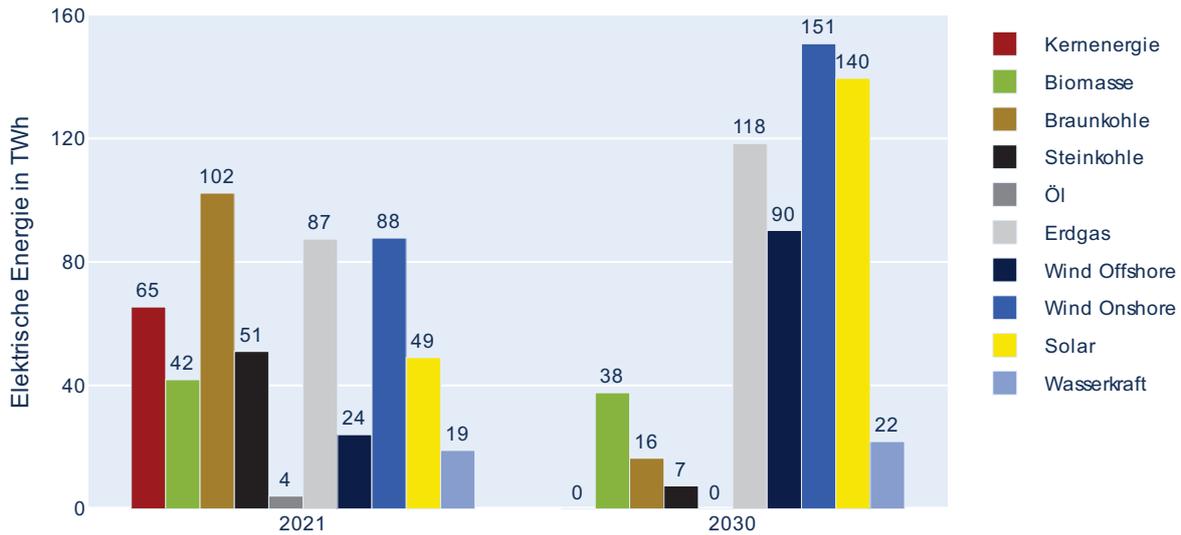


Bild 75. Darstellung der erzeugten Elektrizität im Referenzjahr 2021 und Zieljahr 2030

### 10.9.5.3 Berechnung der elektrischen Energie

Entsprechend der angenommenen Werte für die installierte Leistung sowie für die analysierten Volllaststunden ergeben sich die Werte für die elektrische Energie des Zieljahres gemäß Bild 75. Die entsprechende Berechnung erfolgt gemäß dem Flussdiagramm in Bild 63.

### 10.9.5.4 Zeitreihenberechnung

Sowohl bei der Last, also der gesamten elektrischen Nachfrage des Stromsystems, als auch der sogenannten „EE-Produktion“ wird das gleiche qualitative Verhalten über der Zeit bestimmt. Dies erfolgt unter Berücksichtigung eines möglicherweise erhöhten Verbrauchs sowie weiter ausgebauten EE-Kapazitäten.

Damit gilt für die Produktion „erneuerbarer“ Elektrizität nach Gleichung (12).

$$\tilde{p}_{ij}^{Ziel} = \tilde{p}_{ij}^{Ref} \quad (12)$$

Weiter ergeben sich mit den Zielwerten für die installierte Leistung die Leistungszeitreihen nach Gleichung (13).

$$p_{ij}^{Ziel} = \tilde{p}_{ij}^{Ziel} \cdot p_{insti}^{Ziel} \quad (13)$$

Korrigiert um eine mögliche Änderung der Volllaststunden ergibt sich gemäß Gleichung (14).

$$p_{ij}^{Ziel} = \tilde{p}_{ij}^{Ziel} \cdot p_{insti}^{Ziel} \cdot \frac{t_{Volllasti}^{Ziel}}{t_{Volllasti}^{Ref}} \quad (14)$$

Für die normierte Last gilt analog zur EE-Produktion, dass der qualitative Verlauf aus dem Referenzjahr für das Zieljahr übernommen wird, siehe Gleichung (15).

$$\tilde{p}_{Lastj}^{Ziel} = \tilde{p}_{Lastj}^{Ref} \quad (15)$$

Damit ergibt sich die Zeitreihe des Zieljahres gemäß Gleichung (16), wobei  $f$  wiederum die Abstrakte des Stromsystems abbildet.

$$p_{Lastj}^{Ziel} = \tilde{p}_{Lastj}^{Ziel} \cdot E_{Last}^{Ziel} \cdot f \quad (16)$$

Das gleiche Vorgehen wird durchgeführt, um die Entwicklung der Last abzubilden, die durch den gesamten Energiebedarf durch Elektrofahrzeuge EVs, abgebildet durch die Größe  $E_{EV}^{Ziel}$ , resultiert. Es ergibt sich nach Gleichung (17).

$$E_{EV}^{Ziel} = n_{EV}^{Ziel} \cdot E_{100km}^{Ziel} \cdot d_{EV}^{Ziel} \quad (17)$$

In Gleichung (17) stellt  $n_{EV}^{Ziel}$  die Anzahl der Fahrzeuge,  $E_{100km}^{Ziel}$  den Energiebedarf pro Wegstrecke (100 km) und  $d_{EV}^{Ziel}$  die zurückgelegte Strecke pro EV pro Jahr dar.

Im einfachsten Fall wird die EV-Last zur vorhandenen Last addiert, siehe Gleichung (18).

$$E_{Last+EV}^{Ziel} = E_{Last}^{Ziel} + E_{EV}^{Ziel} \quad (18)$$

Aus der EV-Last gemäß Gleichung (18) ergibt sich die Lastreihe mit EV nach Gleichung (19).

$$P_{Last+EV_j}^{Ziel} = \tilde{P}_{Last_j}^{Ziel} \cdot E_{Last+EV}^{Ziel} \cdot f \quad (19)$$

Anpassungen an dieser Betrachtung können vorgenommen werden, wenn der Ladezeitpunkt und/oder der Einfluss von Batteriespeichern berücksichtigt werden soll.

#### 10.9.5.4.1 Einfluss des Ladezeitpunkts

Zur Berücksichtigung des Ladezeitpunkts können ein Start- und Endzeitpunkt angegeben werden, bspw. 08:00 Uhr und 18:00 Uhr. Über dieses Zeitintervall wird der durch E-Mobilität bedingte Energiebedarf  $E_{EV}^{Ziel}$  in Form einer rechteckigen Zusatzlast mit der Einheit GW verteilt gemäß Gleichung (20).

$$P_{EV_j, Start \rightarrow Ende}^{Ziel} = \frac{E_{EV}^{Ziel}}{t_{Ende} - t_{Start}} \quad (20)$$

In diesem Fall ergibt sich die Lastkurve inklusive EV nach Gleichung (21).

$$P_{Last+EV_j}^{Ziel} = P_{Last_j}^{Ziel} + P_{EV_j, Start \rightarrow Ende}^{Ziel} \quad (21)$$

#### 10.9.5.4.2 Bestimmung von Mangel bzw. Überschuss von EE-Elektrizität

Die Leistungs-Zeitreihen der einzelnen EE sowie der einzelnen fossilen Energieträger werden zusammengefasst zu  $P_{EE_j}^{Ziel}$  und  $P_{fossil_j}^{Ziel}$ . Daraufhin wird mittels Gleichung (22) bestimmt, zu welchen Zeitpunkten genügend EE-Leistung bereitsteht.

Bei zusätzlicher Berücksichtigung der Zunahme des elektrischen Energiebedarfs durch EV ergibt sich nach Gleichung (22).

$$P_{fossil \text{ mit } EV_j}^{Ziel} = P_{Last+EV-EE_j}^{Ziel} = P_{Last+EV_j}^{Ziel} - P_{EE_j}^{Ziel} \quad (22)$$

Bei negativen Werten von  $P_{fossil \text{ mit } EV_j}^{Ziel}$  herrscht EE-Überschuss, bei positiven Werten EE-Mangel.

Bei einem negativen Wert kann durch Ein- und Ausspeichern eine mögliche installierte Batteriekapazität genutzt oder gegebenenfalls können andere Energiespeicher eingesetzt werden,

um die verfügbare elektrische Energie zu konservieren.

#### 10.9.5.4.3 Bestimmung nutzbarer EE-Leistung und -Energie

In der Folge wird die überschüssige EE-Leistung abgeregelt, also die negativen Werte zu null gesetzt. Damit verbleiben für  $P_{Last-EE_j}^{Ziel}$  und  $P_{Last+EV-EE_j}^{Ziel}$  nur Werte größer oder gleich 0. Die daraus resultierende Energie ergibt sich gemäß Gleichung (23).

Die daraus resultierende Energie ( $E_{Last-EE}^{Ziel}$  und  $E_{Last+EV-EE}^{Ziel}$ ) kann als zusätzlich benötigter EE-Energiebedarf bzw. notwendige fossile Erzeugung bezeichnet werden, siehe Gleichung (23) und Gleichung (24).

$$E_{Last \text{ fossil notwendig}}^{Ziel} = E_{Last-EE}^{Ziel} = \frac{1}{f} \cdot \sum_j^{n \text{ Stunden}} P_{Last-EE_j}^{Ziel} \quad (23)$$

$$E_{Last+EV \text{ fossil notwendig}}^{Ziel} = E_{Last+EV-EE}^{Ziel} = \frac{1}{f} \cdot \sum_j^{n \text{ Stunden}} P_{Last+EV-EE_j}^{Ziel} \quad (24)$$

Die nutzbare EE-Energie wird mittels der Last sowie der notwendigen fossilen Erzeugung siehe Gleichung (23) und Gleichung (24) nach Gleichung (25) und Gleichung (26) für die Last mit und ohne EV bestimmt.

$$E_{EE \text{ nutzbar}}^{Ziel} = E_{Last}^{Ziel} - E_{Last-EE}^{Ziel} = E_{Last}^{Ziel} - E_{fossil}^{Ziel} \quad (25)$$

$$E_{EE+EV \text{ nutzbar}}^{Ziel} = E_{Last+EV}^{Ziel} - E_{Last+EV-EE}^{Ziel} = E_{Last}^{Ziel} - E_{fossil \text{ mit } EV}^{Ziel} \quad (26)$$

Für die Berechnung der Emissionen werden die in Gleichung (23) bis Gleichung (26) definierten Energiemengen verwendet. Dabei werden zwei verschiedene Lasten („Last“ und „Last+EV“) sowie die jeweilige notwendige fossile Energie und die nutzbare EE-Energie bestimmt.

Damit wird in der Folge der fossile bzw. „erneuerbare“ Anteil der Emissionen zur Bereitstellung der Last mit und ohne EV berechnet. Hierfür werden zudem die energiespezifischen THG-Emissionen in g CO<sub>2äq</sub>/kWh benötigt.

Die Berechnung der fossilen THG-Emissionen erfolgt gemäß Gleichung (27). Dabei werden die Energieträger-spezifischen THG-Emissionen  $THG_{\frac{g}{kWh}i}^{Ziel}$  mit dem jeweiligen energetischen Anteil der fossilen Energieträger an der fossilen Gesamtzeugung  $\frac{E_i^{Ziel}}{E_{fossil}^{Ziel}}$  multipliziert und über die Anzahl der Energieträger aufsummiert.

$$THG_{\frac{g}{kWh}Last_{fossil}}^{Ziel} = \sum_i^{n_{fossil}} THG_{\frac{g}{kWh}i}^{Ziel} \cdot \frac{E_i^{Ziel}}{E_{fossil}^{Ziel}} \quad (27)$$

Die Berechnung der EE-THG-Emissionen erfolgt analog zum Vorgehen in Gleichung (27) gemäß Gleichung (28) und Gleichung (29) für die Fälle „Last“ und „Last+EV“.

$$THG_{\frac{g}{kWh}Last_{EE}} = \sum_i^{n_{EE}} THG_{\frac{g}{kWh}i}^{Ziel} \cdot \frac{E_i^{Ziel}}{E_{Last_{EE}nutzbar}^{Ziel}} \quad (28)$$

$$THG_{\frac{g}{kWh}Last+EV_{EE}} = \sum_i^{n_{EE}} THG_{\frac{g}{kWh}i}^{Ziel} \cdot \frac{E_i^{Ziel}}{E_{Last+EV_{EE}nutzbar}^{Ziel}} \quad (29)$$

Für die Betrachtung „Last+EV“ wird angenommen, dass der fossile THG-Emissionswert dem der Betrachtung ohne EV, also „Last“ entspricht, siehe Gleichung (30).

$$THG_{\frac{g}{kWh}Last+EV_{fossil}}^{Ziel} = THG_{\frac{g}{kWh}Last_{fossil}}^{Ziel} \quad (30)$$

Für die Fälle „Last“ und „Last+EV“ werden die fossilen und EE-Emissionsfaktoren jeweils mit der entsprechenden Energie multipliziert, siehe Gleichung (31) bis Gleichung (35).

$$THG_{t_{Last_{EE}}^{Ziel}} = E_{Last_{EE}nutzbar}^{Ziel} \cdot THG_{\frac{g}{kWh}Last_{EE}}^{Ziel} \quad (31)$$

$$THG_{t_{Last_{fossil}}^{Ziel}} = E_{Last_{fossil}notwendig}^{Ziel} \cdot THG_{\frac{g}{kWh}Last_{fossil}}^{Ziel} \quad (32)$$

Nach Gleichung (33) ergeben sich die absoluten THG-Emissionen für die Last ohne EV.

$$THG_{t_{Last}}^{Ziel} = THG_{t_{Last_{EE}}^{Ziel}} + THG_{t_{Last_{fossil}}^{Ziel}} \quad (33)$$

Analog zur Betrachtung für den Fall der Last ohne EV, ergeben sich die absoluten THG-Emissionen für „Last+EV“ gemäß Gleichung (34), Gleichung (35) und Gleichung (36).

$$THG_{t_{Last+EV_{EE}}^{Ziel}} = E_{Last+EV_{EE}nutzbar}^{Ziel} \cdot THG_{\frac{g}{kWh}Last+EV_{EE}}^{Ziel} \quad (34)$$

$$THG_{t_{Last+EV_{fossil}}^{Ziel}} = E_{Last+EV_{fossil}notwendig}^{Ziel} \cdot THG_{\frac{g}{kWh}Last+EV_{fossil}}^{Ziel} \quad (35)$$

$$THG_{t_{Last+EV}}^{Ziel} = THG_{t_{Last+EV_{EE}}^{Ziel}} + THG_{t_{Last+EV_{fossil}}^{Ziel}} \quad (36)$$

Gemäß Gleichung (37) werden die EV-bedingten zusätzlichen THG-Emissionen über die Differenz aus der Emissions-Berechnung mit und ohne EV bestimmt.

$$THG_{t_{EV}}^{Ziel} = THG_{t_{Last+EV}}^{Ziel} - THG_{t_{Last}}^{Ziel} \quad (37)$$

Aus dem Gesamtwert der EV-bedingten THG-Emissionen werden über Gleichung (38) und Gleichung (39) die THG-Emissionen pro km und kWh bestimmt.

$$THG_{km_{EV}}^{Ziel} = \frac{THG_{t_{EV}}^{Ziel}}{d_{km}^{Ziel} \cdot n_{EV}^{Ziel}} \quad (38)$$

$$THG_{kWh_{EV}}^{Ziel} = \frac{THG_{km_{EV}}^{Ziel}}{E_{100 km}^{Ziel}} \quad (39)$$

## 10.9.6 Ergebnisse

Das Ergebnis der beschriebenen Bilanzanalyse hängt von zahlreichen Eingangsparametern ab. In der Folge sind deshalb die Sensitivitäten der Eingangsgrößen dargestellt.

In allen Grafiken wird dabei das Zieljahr variiert, da für die weitere Verwendung in der LCA-Bilanzanalyse THG-Emissionswerte mehrere Stützstellen verwendet werden. Aktuell werden hierfür mittels expliziter Eingangsdaten die Jahre 2021, 2022, 2025, 2030 und 2035 abgebildet.

Einen weiteren wichtigen Eingangsparameter stellt das Referenzjahr dar, da passend zu diesem die qualitativen Last- und Erzeugungszeitreihen entnommen werden. Auch wenn Bilanzanalyse das Jahr 2021 als Referenzjahr verwendet wird, soll hier die Sensitivität im zeitlichen Intervall zwischen 2017 und 2022 aufgezeigt werden. In diesem Zeitraum ist nicht nur der Ausbau der EE vorangeschritten, sondern es sind auch einige Ereignisse eingetreten, die zu Sondereffekten führen.

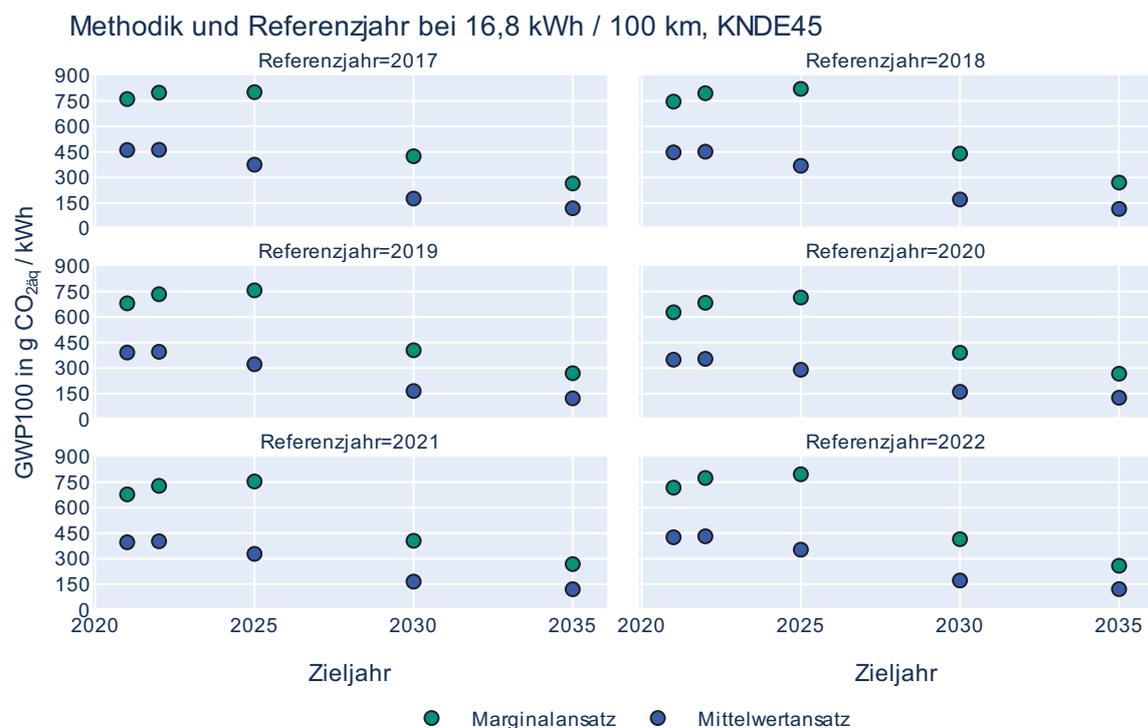
Als zentrale Ergebnisgrößen werden die THG-Emissionen in  $\text{g CO}_{2\text{äq}}/\text{kWh}$  oder  $\text{g CO}_{2\text{äq}}/\text{km}$  über das Ziel- bzw. Referenzjahr dargestellt. Weitere in der Folge dargestellten Einflussparameter umfassen die Berechnungsmethodik

(Marginal- vs. Mittelwertansatz), Emissionen in  $\text{g CO}_{2\text{äq}}/100 \text{ km}$ , Annahmen zu den Volllaststunden sowie Emissionsfaktoren.

### Einfluss der Methodik (Marginalansatz vs. Mittelwertansatz)

Der Einfluss der Methodik, also Marginalansatz und Mittelwertansatz, auf die Emissionen in  $\text{g CO}_{2\text{äq}}/\text{kWh}$  ist in Bild 76 für das Szenario KNDE45 dargestellt. Dabei wurde neben dem Zieljahr (x-Achse) auch das Referenzjahr der zeitaufgelösten Elektrizitätsdaten variiert. Randbedingungen dieser Analyse sind ein Energiebedarf von  $16,8 \text{ kWh}/100 \text{ km}$ , was dem WLTP-Wert inklusive Netzverlusten entspricht.

In Bild 77 sind die aus Bild 76 bei gleichen Randbedingungen folgenden Emissionswerte in  $\text{g CO}_{2\text{äq}}/\text{km}$  aufgetragen. Bild 78 bis Bild 83 zeigen weitere wichtige Sensitivitäten auf, insbesondere der Wahl des Referenzjahres, des elektrischen Energiebedarfs für den Antrieb oder der Wahl der Emissionsfaktoren der elektrischen Energielieferanten.



**Bild 76.** Vergleich der THG-Emissionen der elektrischen Energie pro kWh nach Marginal- und Mittelwertansatz für verschiedene Referenzjahre bei  $16,8 \text{ kWh}/100 \text{ km}$  Fahrenergiebedarf und dem Szenario KNDE45, bezogen auf die elektrische Energie in kWh

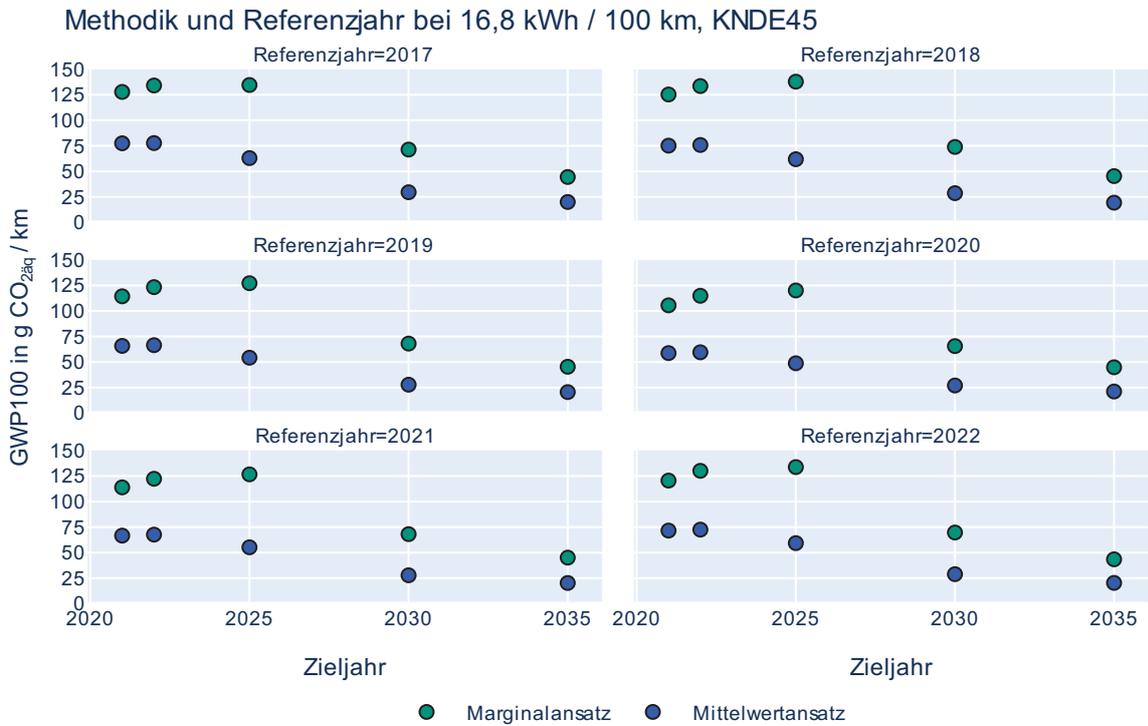


Bild 77. Vergleich der THG-Emissionen der elektrischen Energie pro km nach Marginal- und Mittelwertansatz für verschiedene Referenzjahre bei 16,8 kWh/100 km Fahrenergiebedarf und dem Szenario KNDE45, bezogen auf Fahrzeugkilometer

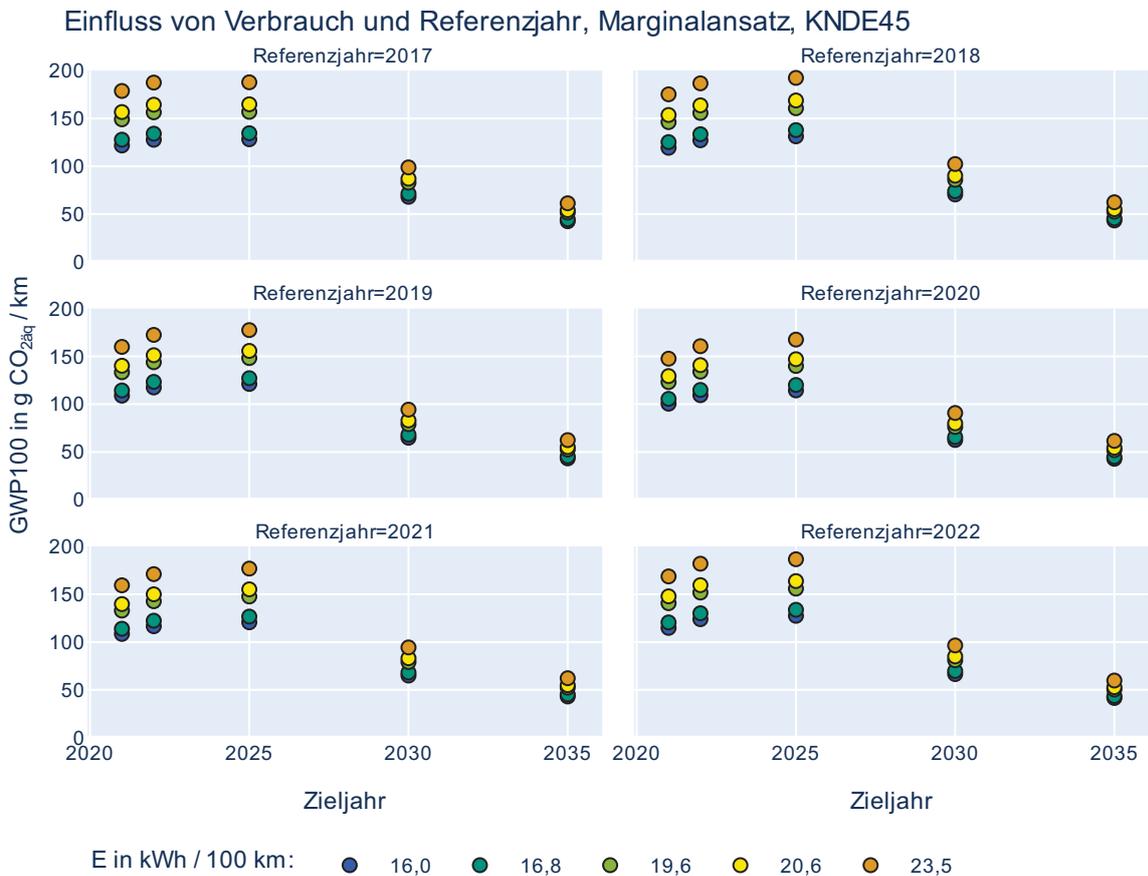


Bild 78. THG-Emissionen nach KNDE45 für unterschiedliche Referenzjahre und Verbräuche: Die unterschiedlichen Werte für die verschiedenen Referenzjahre resultieren aus den Unterschieden in elektrischem Energiebedarf und Angebot an sogenannten „erneuerbaren“ Energien in den einzelnen Jahren.

### Variation des Energiebedarfs, Marginalansatz, Referenzjahr 2021, KNDE45

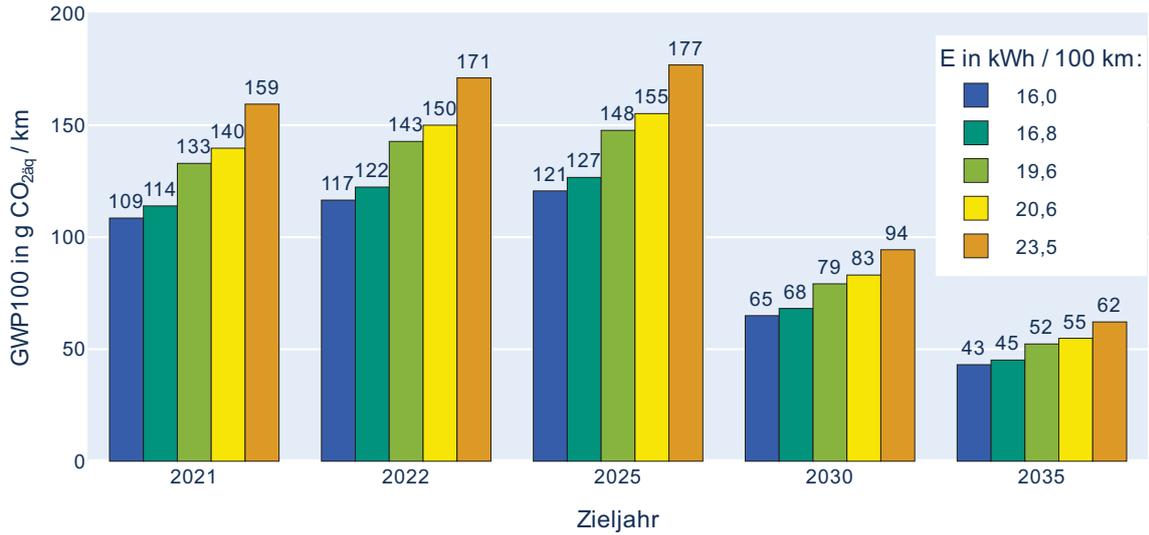


Bild 79. THG-Emissionen in Abhängigkeit des Energiebedarfs, Referenzjahr 2021, KNDE45

### Volllaststunden und Referenzjahr bei 16,8 kWh / 100 km, KNDE45

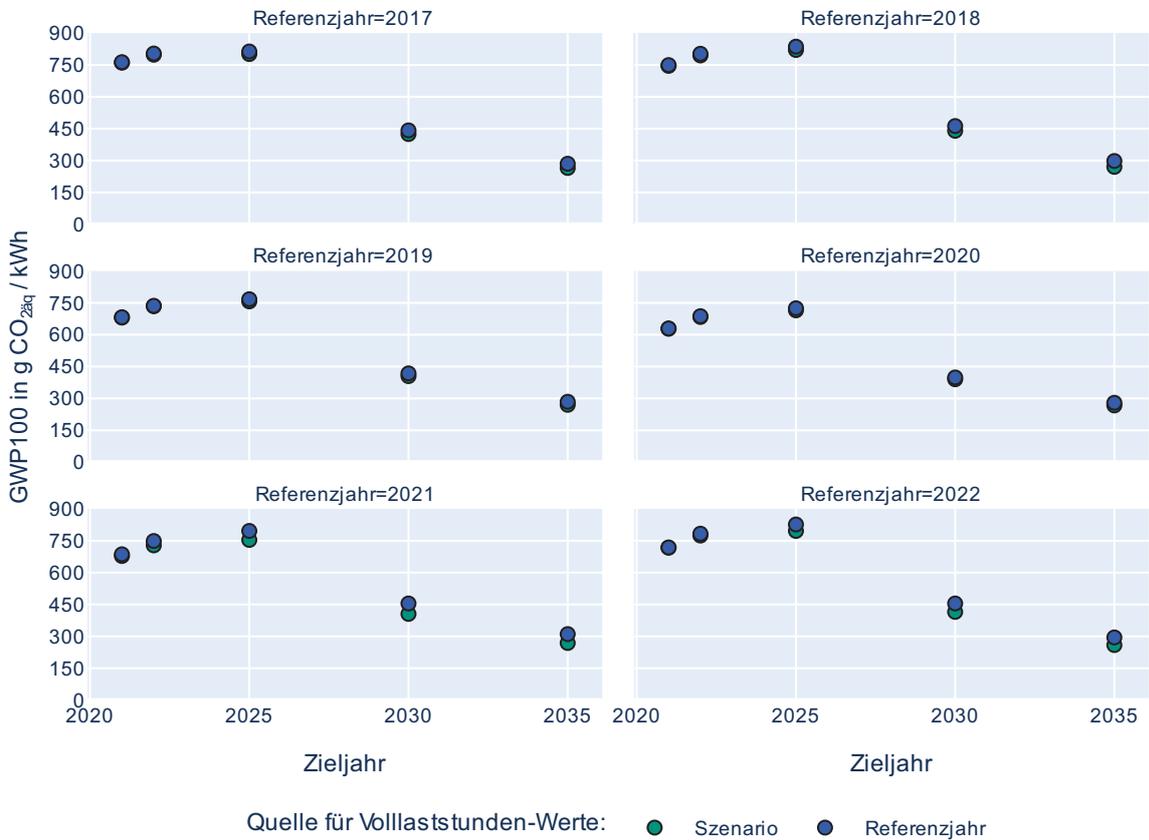


Bild 80. Einfluss der Wahl des Referenzjahres auf die THG-Emissionen, Zieljahre auf der x-Achse

### 10.9.6.1 Einfluss der Quellen der Emissionsfaktoren

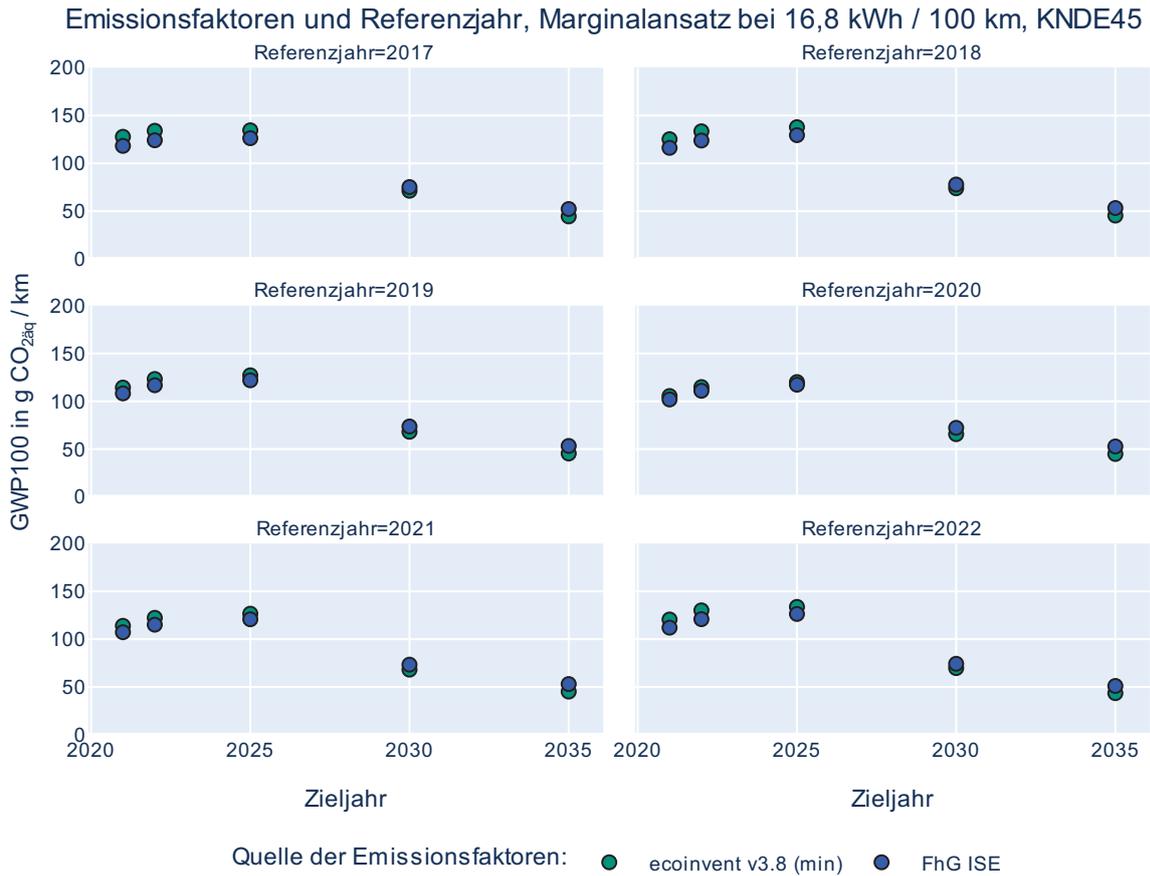


Bild 81. Einfluss der Quellen der Emissionsfaktoren auf die THG-Emissionen. Auf der x-Achse sind die Zieljahre dargestellt

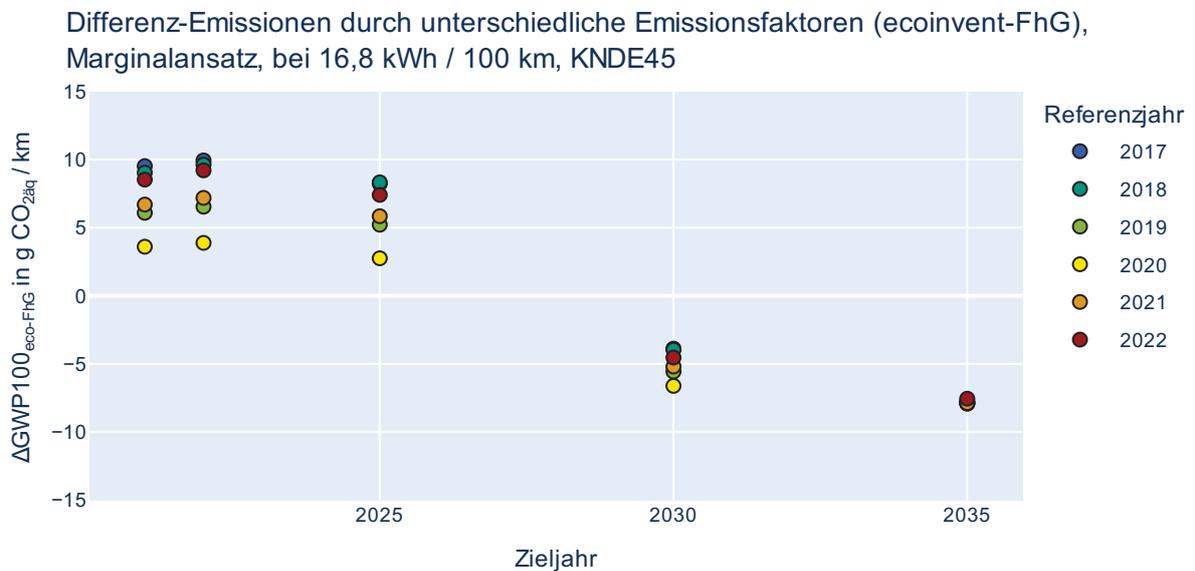


Bild 82. Darstellung der Differenz der THG-Werte für Emissionsfaktoren nach ecoinvent und FhG ISE für unterschiedliche Referenzjahre (farbig codiert) und Zieljahre (x-Achse)

Um zu demonstrieren, dass diese Abweichungen bei der Berechnung der THG-Emissionen eines batterieelektrischen Fahrzeugs eine untergeordnete Rolle spielen, sind im Rahmen dieser Bilanzanalyse sowohl die Emissionsfaktoren von FhG ISE und der Hintergrunddatenbank ecoinvent v3.8 jeweils für ein BEV mit WLTP-Bedarf von 16,8 kWh / 100 km inklusive Netzverluste untersucht worden. Es wurden keine expliziten Ladezeitpunkte bzw. Zeiträume

angenommen. Die Batterieproduktion erfolgte in China. Die Ergebnisse sind in Bild 83 zu sehen.

### 10.10 Wirkungsabschätzung der E-Maschine

Neben der für diese Arbeit ausgewählten E-Maschine sind weitere Parametrierungen möglich [58; 59]. Bild 84 zeigt, welche THG-Emissionen sich für beispielhafte Leistung-Drehmoment-Kombinationen ergeben.

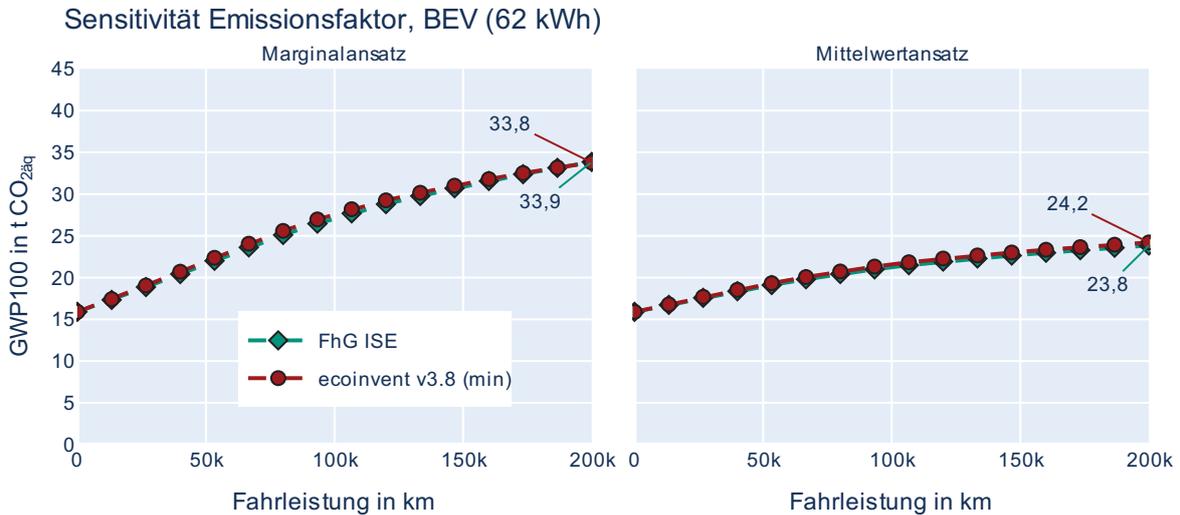


Bild 83. Einfluss der Emissionsfaktoren auf die THG-Emission eines BEV (62 kWh NMC721, Produktion 2021 in China, 16,8 kWh/100 km WLTP-Verbrauch inklusive Netzverluste)

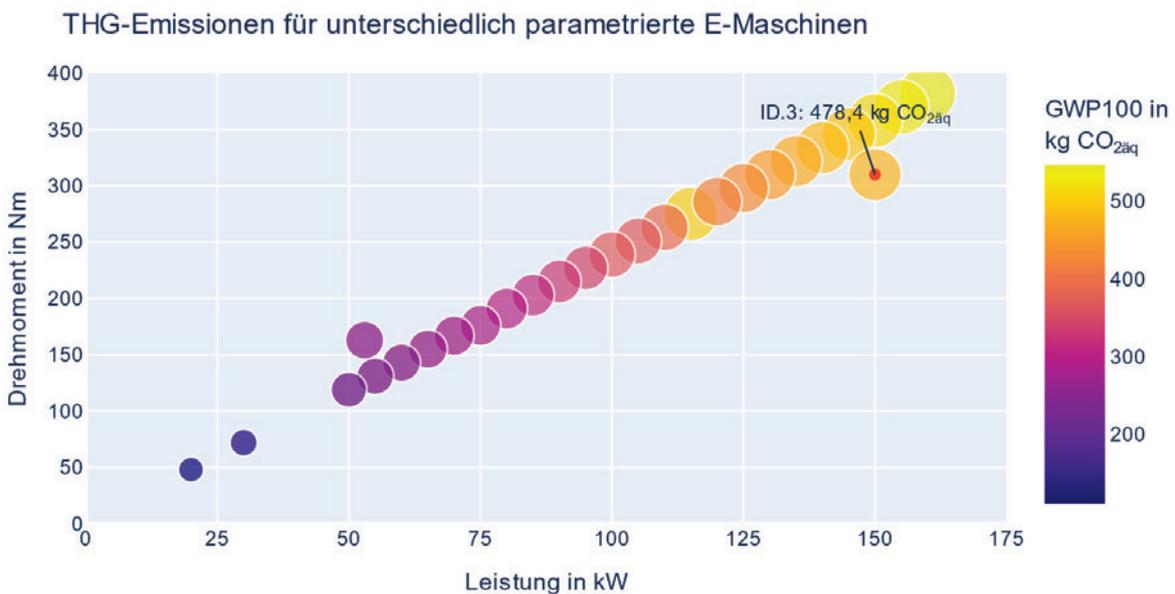


Bild 84. Einfluss der maximalen elektrischen Leistung auf die THG-Emissionen der Produktion eines Permanentmagnet-Synchronmotors PMSM

# Reviewbericht zur „VDI-Analyse der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Pkw mit verschiedenen Antriebssystemen“

Christian Bauer ([christian.bauer@psi.ch](mailto:christian.bauer@psi.ch))

08.10.2023

Die erste kritische Prüfung des Ökobilanz-Berichts «VDI-Bilanzanalyse zu Pkws mit verschiedenen Antriebssystemen» (2023-07-27 VDI Statusreport\_v1) erfolgte im September und Oktober 2023, basierend auf der vorliegenden Berichtsversion. Die zur Erstellung der Klimabilanz erforderlichen Sachbilanzdaten und dahinstehenden Berechnungen wurden nicht geprüft.

Im Fokus des Reviews lagen folgende Aspekte:

- Kompatibilität der Analyse mit den ISO-Normen ISO 14040/44
- Vollständigkeit der Klimabilanz hinsichtlich des Untersuchungsrahmen und der Systemgrenzen
- Qualität der Sachbilanzdaten und der Wirkungsabschätzung
- Nachvollziehbarkeit der Arbeit
- Transparenz in der Darstellung der Annahmen und genutzten Daten
- Vollständigkeit der Dokumentation, inklusive Quellangaben
- Plausibilität der Ergebnisse
- Vollständigkeit, Ausgewogenheit und Sinnhaftigkeit der Interpretation sowie der Schlussfolgerungen
- Lesbarkeit und Verständlichkeit des Berichts
- Qualität der Sprache und der grafischen Darstellungen des Berichts

Detaillierte Kommentare sind in der beigelegten PDF-Datei – Berichtsversion «2023-07-27 VDI Statusreport\_v1-review1-081023» – enthalten. Im Folgenden wird ein kurzes Fazit gezogen und

die wichtigsten Aspekte, für welche eine Überarbeitung empfohlen wird, werden angeführt.

Der vorliegende Bericht beinhaltet einen Vergleich der THG-Emissionen verschiedener Personenwagen der Kompaktklasse, basierend auf der Methodik der Ökobilanzierung. Die Bilanzierung erfolgt in enger Anlehnung an die Ökobilanz-Normen ISO 14040/44. Die Systemgrenzen sind – dem Ziel der Arbeit entsprechend – korrekt gezogen und erlauben es, alle hinsichtlich Klimabilanz relevanten Prozesse im Lebenszyklus der Fahrzeuge abzubilden. Die Qualität der erstellten bzw. genutzten Sachbilanzdaten kann als gut beurteilt werden und partielle Lücken in der Verfügbarkeit aktueller Sachbilanzdaten sollten keinen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Arbeit aufweisen.

Die Dokumentation der Arbeit ist generell umfassend – die untersuchten Fahrzeuge sowie die Energie-/Treibstoffversorgung sind spezifiziert und die getroffenen Annahmen angeführt. Deren Plausibilität kann dementsprechend geprüft und nachvollzogen werden. Mangels Angabe der erstellten Sachbilanzdaten ist vollständige Nachvollziehbarkeit jedoch nicht gegeben. Die genutzten Daten- und Informationsquellen sind weitgehend vollständig angegeben.

Die Ergebnisse der Klimabilanz sind – auch im Vergleich zu ähnlichen Arbeiten – plausibel und können somit auch ohne Prüfung der Sachbilanzdaten und Berechnungen als weitgehend korrekt eingeschätzt werden. Die Auswertung der Arbeit in Form der Identifizierung der wichtigsten

Einflussparameter sowie der Untersuchung des Einflusses dieser Parameter auf die Ergebnisse durch Sensitivitätsanalysen ist ausgezeichnet. Die umfangreichen Sensitivitätsanalysen beleuchten alle wichtigen Aspekte der Klimabilanz und ermöglichen der Leserschaft des Berichts

ein gutes Verständnis der Zusammenhänge. Die Interpretation der Ergebnisse und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen sind aus Sicht des Reviewers weitgehend korrekt und vollständig. Die Struktur des Berichts und dessen sprachliche Qualität sind ausgezeichnet; die Qualität der grafischen Darstellungen entspricht den üblichen Standards. Lesbarkeit ist dementsprechend generell gegeben – teilweise wäre allerdings eine vereinfachende und zusammenfassende Übersicht zur gewählten Vorgangsweise wünschenswert, bevor Details angegeben und diskutiert werden, um der Leserschaft das Verständnis zu erleichtern.

Die wichtigsten Vorschläge zur Verbesserung der Arbeit betreffen – neben Details, welche in den Kommentaren direkt im Bericht ersichtlich sind – folgende Aspekte:

- Wahl der verglichenen Fahrzeuge und deren Repräsentativität für Personenwagen der Kompaktklasse:

Einer der wenigen wirklich entscheidenden Faktoren (im Hinblick auf die Ergebnisse) in einer vergleichenden Klimabilanz von Personenwagen ist die ausgewogene Auswahl der Fahrzeuge. Dies betrifft vor allem die Frage, inwieweit die verglichenen Autos als repräsentativ für die analysierte Fahrzeugkategorie angesehen werden können. Dieses Thema wird zwar im Anhang des Berichts angesprochen, aus meiner Sicht allerdings nicht ganz zufriedenstellend. Es wäre auch hilfreich, dieses Thema der Repräsentativität bereits im Zusammenhang mit Tabelle 1 anzusprechen, da sich diese Frage genau dort bereits stellt.

- Bilanzierung des Treibstoff-/Energiebedarfs für den Betrieb der verglichenen Fahrzeuge:

Ein weiterer wichtiger Aspekt im Hinblick auf die Ergebnisse ist der Treibstoff-/Energiebedarf für den Betrieb der verglichenen Fahrzeuge. Auch hier stellt sich die Frage der Repräsentativität der verglichenen Fahrzeuge und inwieweit sie den Durchschnitt der Kompaktklasse abbilden. Da die Daten vieler Fahrzeuge aus der Kompaktklasse vorhanden sind, liesse sich auch die Bandbreite der THG-Emissionen als Folge der Variabilität des Treibstoffverbrauchs darstellen. Das

würde bei der Einordnung der Ergebnisse helfen.

Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob es nicht sinnvoller wäre, statt der WLTP-Verbrauchswerte entweder Praxiswerte oder Verbrauchsdaten basierend auf einem praxisnäheren Testzyklus in der Bilanzierung zu verwenden. Jedenfalls sollte der Einfluss dieser Entscheidung auf die Ergebnisse der verschiedenen Antriebsarten diskutiert werden.

- Bilanzierung der marginalen Stromversorgung der Elektroautos beim Laden der Batterien:

Hier sind zwei Aspekte zu nennen: 1) die Wahl des kurzfristigen Marginalansatzes an sich; und 2) die Erklärung, wie dieser konkret bilanziert wird.

Ad 1): Den kurzfristigen Marginalstrom für die Bilanzierung des Stroms zum Laden der Batterien der E-Autos zu wählen, ist durchaus eine legitime Möglichkeit. Allerdings eine aus LCA-Perspektive etwas ungewöhnliche; eher verbreitet ist die Bilanzierung einer marginalen Versorgung aus Langzeitperspektive. Der Bericht würde an Qualität gewinnen, wenn der Unterschied zwischen diesen beiden Perspektiven (short-term vs. long-term marginal) diskutiert würde und die Wahl des kurzfristigen Ansatzes begründet.

Ad 2): Im Anhang ist ja alles ausführlich erklärt und vollständig dargelegt, das ist vorbildlich. Was mir fehlt, um das Verständnis für die Leserschaft zu erleichtern, ist eine vorangestellte Erklärung der Vorgangsweise auf konzeptioneller Ebene. Etwa in Form eines Textkastens, der Punkt für Punkt die Vorgangsweise darlegt, rein qualitativ, ohne Formeln und Zahlen.

- Veröffentlichung der Sachbilanzdaten:

Wünschenswert – und generell dem «best practice» bei Ökobilanzen entsprechend – wäre eine vollständige Veröffentlichung der neu im Rahmen dieser Arbeit erstellten Sachbilanzdaten. Dies würde am besten in Form eines online Archivs geschehen.

Für das weitere Vorgehen wird empfohlen, dass die Autoren der Klimabilanz der Fahrzeuge die Review-Kommentare durchgehen und nach allfälliger Abklärung von Verständnisfragen mit dem Reviewer abarbeiten. Im Anschluss sollten eine überarbeitete Version des Berichts sowie eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Änderungen dem Reviewer zur Verfügung gestellt werden.

**14.11.2023**

Die überarbeitete Version des Ökobilanz-Berichts wurde Anfang November 2023 geprüft.

Kurz zusammengefasst kann festgehalten werden, dass den Empfehlungen zur Überarbeitung aus der ersten Prüfung des Berichts grossmehrerheitlich gefolgt wurde und darüber hinaus der Bericht hinsichtlich Darstellung der Ergebnisse und Lesbarkeit noch weiter verbessert wurde.

Allein die Erklärung der Vorgehensweise zur Berechnung des Marginalstromansatzes ist (zumindest für den Reviewer) immer noch nicht



Christian Bauer Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Technologie-Bewertung, Paul Scherrer Institut (PSI)

ganz einfach verständlich, was aber angesichts der Tatsache, dass es sich dabei um Informationen im Anhang handelt, akzeptabel erscheint.

Der einzige Hinweis zur überarbeiteten Version des Ökobilanz-Berichts ist der folgende: Es wird empfohlen, die Zahlenwerte hinsichtlich der THG-Emissionen der Fahrzeuge in der Management Summary und der Zusammenfassung (Abschnitt 9) einer Konsistenzprüfung zu unterziehen, um etwaige Missverständnisse zu vermeiden. So wird auf Seite 65 an zwei Stellen auf die THG-Emissionen von Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen eingegangen, wobei unterschiedliche Werte genannt werden; was zwar aller Wahrscheinlichkeit nach korrekt, aber dennoch verwirrend ist – auch, weil nur ein Teil dieser Information in der Management Summary zu finden ist.

Die kritische Prüfung der Arbeit wird hiermit für abgeschlossen betrachtet und der Bericht wird (unter allfälliger Berücksichtigung des obigen Hinweises) zur Veröffentlichung empfohlen.

# Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
AC	Alternate Current - Wechselspannung
B7	fossiler Dieselmotorkraftstoff mit 7 Vol.-% Biodiesel (FAME) gemäß EN 590
BEV	Battery Electric Vehicle - batterieelektrisches Fahrzeug
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
BMS	Batterie-Management-System
CD	charge depleting mode - Modus, in dem ein Plug-in-Hybrid aus der Batterieladung betrieben wird
CS	charge-sustaining mode - Modus, in dem ein Plug-in-Hybrid die Batterie lädt und überwiegend verbrennungsmotorisch angetrieben wird
-d	Suffix für verbrennungsmotorische Fahrzeuge mit Dieselmotor
DC	Direct Current - Gleichspannung
E10	fossiler Ottokraftstoff mit 10 Vol.-% Ethanol gemäß EN 228
EM	Elektrische Maschine
EN 15940	Kraftstoffnorm für paraffinischen Diesel
EN 228	Kraftstoffnorm für Standard Otto-Kraftstoff
EN 590	Kraftstoffnorm für Standard-Dieselmotorkraftstoff
FAME	Fatty Acid Methyl Ester - Biodiesel
FHEV	Full Hybrid Electric Vehicle - Voll-Hybrid-Fahrzeug
-g	Suffix für verbrennungsmotorische Fahrzeuge mit Benzinmotor
GWP100	Global Warming Potenzial 100 = THG-Effekt beim 100-jährigen Verbleib in der Atmosphäre
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstromübertragung
HVO	Hydrogenated Vegetable Oil - Hydriertes Pflanzenöl
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle - Verbrennungsmotorisches Fahrzeug
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor - Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode für Umrichter
KNDE45	Klimaneutrales Deutschland 2045
KNS35	Klimaneutrales Stromsystem 2035
LE	Leistungselektronik
LIB	Lithium-Ionen-Batterie
Ma	Marginalansatz

Abkürzung	Erläuterung
MHEV	Mild Hybrid Electric Vehicle - Mild-Hybrid-Fahrzeug
Mi	Mittelwertansatz
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle - Plug-in-Hybrid-Fahrzeug
R33	Dieselmotorkraftstoff mit 33 Vol.-% Anteil aus „erneuerbaren“ Quellen, davon 7 Vol.-% Biodiesel und 26 Vol.-% HVO
RED II	Renewable Energy Directive II - Erneuerbare-Energien-Richtlinie II
S33	Dieselmotorkraftstoff mit 33 Vol.-% Anteil aus „erneuerbaren“ Quellen, davon 7 Vol.-% Biodiesel und 26 Vol.-% e-Fuel
THG	Treibhausgas
TRL	Technology Readiness Level - Technologiereifegrad
VM	Verbrennungsmotor

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammenfassung der THG-Emission in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (CO<sub>2äq</sub>) unterschiedlich angetriebener Fahrzeuge nach 200.000 km inklusive Herstellung unter Variation des Energiebedarfs, der Bereitstellung elektrischer Energie gemäß Szenario Klimaneutrales Deutschland 2045 (KNDE45) unter Verwendung des kurzfristigen Marginalansatzes (Ma) sowie des Mittelwertansatzes (Mi) sowie der aktuellen Standardkraftstoffe E10 und B7. 2

Abbildung 2: Die vier Phasen einer Ökobilanz nach [83] aus [21] 12

Abbildung 3: Systemgrenzen der Umweltbilanzierung eines Fahrzeugs. Die Bereiche der Hintergrund-Datenbank sind dabei rot hinterlegt, die in dieser Bilanzanalyse durchgeführte Modellierung der Vordergrund-Datenbank in grün. Die Modellierung der Kraftstoffsynthese (hellblau hinterlegt) wurde aus dem Projekt „reFuels – Kraftstoffe neu denken“ [7] übernommen. Die benötigte Straßeninfrastruktur wird nicht berücksichtigt. 15

Abbildung 4: Entwicklung der Netto-Stromerzeugung in Deutschland nach AGEB [9] sowie Prognosen nach [74] 19

Abbildung 5: Massen-Zusammensetzung der selbstmodellierten Batterie mit NMC 721-Chemie und einer Bruttokapazität von 82 kWh. Die Modellierung basiert auf dem ecoinvent-Datensatz einer NMC 811-Batterie sowie einer publizierten Strip-Down-Analyse des VW ID.3 inklusive des Batteriesystems [82]. 23

Abbildung 6: Bandbreite des Kraftstoffverbrauchs der betrachteten verbrennungsmotorischen Fahrzeuge nach Nutzungsart basierend auf Testergebnissen [5] 28

Abbildung 7: Elektrischer Energiebedarf für BEV und PHEV-g nach Nutzungsart mit und ohne Netzverluste. BEV EcoTest-Werte mit Netzverlusten sind nicht dargestellt, um eine vergleichbare Skalierung der Achsen zu ermöglichen. Die angegebenen

Starttemperaturen berücksichtigen den Klimatisierungsaufwand beim Start bei den genannten Temperaturen. 29

Abbildung 8: Beispielhafter Stoffkreislauf zum Batterierecycling für Nickel (Größen nach Tabelle A 4) 31

Abbildung 9: THG-Emissionen der Materialien von 1 kg NMC532-Lithium-Ionen-Zelle und deren Recycling für unterschiedliche in der Literatur beschriebene Verfahren. Linke Seite ein globaler Mittelwert für 2035 laut ecoinvent v3.8, rechte Seite Energieversorgung Frankreich 2035, MS = Massenanteil, RC = Recyclat-Produktionsanteil 32

Abbildung 10: Beispielhafte Aufteilung der mit der Produktion verbundenen THG-Emissionen in Antriebsstrang und Glider für unterschiedliche Hybrisisierungsformen. Die jeweiligen Massen können Tabelle 1 entnommen werden. 33

Abbildung 11: Produktionsbedingte THG-Emissionen wesentlicher Blöcke hybridisierter Antriebstränge mit VM Verbrennungsmotor, EM Elektromotor und LE Leistungselektronik 34

Abbildung 12: THG-Emission der Produktion einer NMC 721-Batterie pro kWh Batteriekapazität für die gesamte Batterie mit dem Batterie-Management-System (BMS), der Batteriezelle, der darin verwendeten Kathode und Anode sowie die wesentlichen Materialien hierzu 35

Abbildung 13: Auswirkung der Elektrizitätsversorgung auf die Batterieproduktion 35

Abbildung 14: Vergleich der Massen- und GWP (pro kg)-Anteile der Batterie mit 82 kWh 36

Abbildung 15: Komponenten-aufgelöste THG-Emissionen eines 150 kW Permanentmagnet-Synchronmotors (PMSM) 36

Abbildung 16: Segmentierung der produktionsbedingten THG-Emissionen eines batterieelektrischen Fahrzeugs 37

Abbildung 17: Vergleichende Stapelgrafik batterieelektrischer Fahrzeuge mit unterschiedlich großen, in China hergestellten Batterien sowie Nutzung und Infrastruktur in Deutschland nach Marginal- bzw. Mittelwertansatz im WLTP 37

Abbildung 18: THG-Emissionen der elektrischen Energie nach Marginalansatz und Mittelwertansatz gemäß Szenario KNDE45 und Energiebedarf nach WLTP im Vergleich zu Elektrizität aus Braunkohle, Erdgas und Solarenergie gemäß mit der Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe 2016 Midpoint (H) berechneten ecoinvent-Datensätzen 39

Abbildung 19: THG-Emissionen der Nutzung eines BEV bei 16,8 kWh / 100 km Fahrenergiebedarf nach WLTP nach Marginalansatz und Mittelwertansatz, Szenario KNDE45 39

Abbildung 20: THG-Emissionen eines BEV, WLTP inklusive Ladeverluste, 62 kWh-NMC721-Batterie, Produktion 2021 in China, Nutzung in Deutschland ab 2021 mit 13.333 km/a für den Marginalansatz (Ma) und den Mittelwertansatz (Mi) 40

Abbildung 21: THG-Emissionen eines BEV mit einer 62 kWh und einer 82 kWh Batterie vom Typ NMC721 bei Produktion mit chinesischer Energieversorgung 2021 für den Marginalansatz und den Mittelwertansatz 40

Abbildung 22: THG-Emissionen nach KNDE45 im Marginalansatz und Mittelwertansatz im Vergleich zur Nutzung mit Elektrizität auf Basis von Braunkohle und Solarenergie sowie Elektrizität gemäß dem Szenario „Klimaneutrales Stromsystem 2035“ (KNS35), ebenfalls gemäß Marginal- und Mittelwertansatz 41

Abbildung 23: Variation der THG-Emissionen für unterschiedliche Fahrprofile (WLTP, Stadt, Land, Autobahn und ADAC EcoTest) eines BEV nach Marginalansatz und Mittelwertansatz mit

einer 2021 in China hergestellten 62 kWh-NMC721-Batterie. Die WLTP- und Stadt-Kurve sind in der gewählten Skalierung fast deckungsgleich. 41

Abbildung 24: THG-Emissionen eines BEV mit Bezug auf km als führende Einheit, Ladeverluste (im WLTP berücksichtigt) mit und ohne Berücksichtigung der Netzverluste, dargestellt für den Marginalansatz (Ma) und den Mittelwertansatz (Mi), Batterie 62 kWh NMC 721, Produktionsort China 2021 42

Abbildung 25: THG-Emissionen eines BEV über die Fahrleistung, WLTP-Verbrauch inklusive Ladeverluste mit Zusatzverbrauch durch Klimatisierung nach [44] bei unterschiedlichen im Marginalansatz und im Mittelwertansatz. 42

Abbildung 26: Einfluss der Fahrdynamik auf die THG-Emissionen eines nicht hybridisierten ottomotorischen Fahrzeugs mit E10 (WLTP Energiebedarf 5,4 l/100 km; 1330kg Leergewicht) 44

Abbildung 27: Einfluss der Fahrdynamik auf die THG-Emissionen eines nicht hybridisierten dieselmotorischen-Fahrzeugs mit B7 (WLTP Energiebedarf 4,2 l/100 km;1380 kg Leergewicht) 44

Abbildung 28: Einfluss des Fahrprofils auf die THG-Emissionen eines Mild-Hybrids mit E10 (WLTP Energiebedarf 5,1 l/100 km;1349 kg Leergewicht; 0,48 kWh Batteriekapazität; 11,5 kW E-Motor) 45

Abbildung 29: Einfluss der Fahrdynamik auf die THG-Emissionen eines Voll-Hybrids mit E10 (WLTP-Energiebedarf 4,5 l/100 km;1285 kg Leergewicht; 0,75 kWh Batteriekapazität; 53 kW E-Motor) 45

Abbildung 30: THG-Emissionen eines ICEV-d mit den Kraftstoffen B0, B7, R33 und S33 mit R33 = 26 Vol.-% HVO, 7 Vol.-% Biodiesel und 67 Vol.-% fossilem Diesel und S33 = 26 Vol.-% e-Fuel-Diesel (mit Offshore-Windenergie und DAC), 7 Vol.-% Biodiesel und 67 Vol.-% fossilem Diesel, Kraftstoffverbrauch nach WLTP, Verwendung von HVO aus Altspeiseöl. 47

Abbildung 31: THG-Emissionen eines Plug-in-Hybrid-Fahrzeugs (PHEV) mit 13 kWh Batterie, 0,9 l/100 km WLTP-Verbrauch, sofern lediglich die durch den Verbrennungsmotor bedingten Emissionen berücksichtigt werden, um den Einfluss unterschiedlicher Fahrprofile zu verdeutlichen. 48

Abbildung 32: Einfluss der Quelle des PHEV-Ladestroms auf die THG-Bilanz bei unterschiedlichen Fahrprofilen nach WLTP und EcoTest bei Annahme des KNDE45-Szenarios im Marginalansatz und im Mittelwertansatz. 49

Abbildung 33: Vergleich der kumulativen THG-Emissionen für unterschiedliche Antriebsstrangkonzeppte auf Basis der WLTP-Verbräuche für den Marginalansatz (Ma) und den Mittelwertansatz (Mi) für BEV mit 62 kWh- bzw. 82 kWh-Batterie sowie PHEV-g und ICEV-d, FHEV-g, MHEV-g-P0, ICEV-g 50

Abbildung 34: Ausschnitt des Vergleichs der kumulativen THG-Emissionen für unterschiedliche Antriebsstrangkonzeppte auf Basis der WLTP-Verbräuche für dem Marginalansatz (Ma) und den Mittelwertansatz (Mi) für BEV mit 62 kWh- bzw. 82 kWh-Batterie sowie PHEV-g und ICEV-d, FHEV-g, MHEV-g-P0, ICEV-g 50

Abbildung 35: Vergleich der kumulativen THG-Emissionen für unterschiedliche Antriebsstrangkonzeppte auf Basis der EcoTest-Verbräuche für dem Marginalansatz (Ma) und den Mittelwertansatz (Mi) für BEV mit 62 kWh- bzw. 82 kWh-Batterie sowie PHEV-g und ICEV-d, FHEV-g, MHEV-g-P0, ICEV-g 51

Abbildung 36: THG-Emissionen der Fahrzeuge im Stadt- bzw. Kurzstrecke-Betrieb, FHEV-g mit Verbrauchswert „Stadt (EcoTest)“ unter Nutzung aktueller fossiler Kraftstoffe und elektrischer Energie im Marginal- (Ma) und im Mittelwertansatz (Mi) 52

Abbildung 37: THG-Emissionen der Fahrzeuge im Stadt- bzw. Stadtrand-Betrieb, FHEV-g mit Verbrauchswert „Stadt (EcoTest)“, BEV im Marginalansatz (Ma) und im Mittelwertansatz (Mi) 52

Abbildung 38: THG-Emissionen unterschiedlicher Antriebskonzepte im Autobahn-Betrieb, Kraftstoffen E10 und B7 sowie über das Marginalansatz (Ma) und den Mittelwertansatz (Mi) bestimmte THG-Emissionen für den elektrischen Fahrenergiebedarf 53

Abbildung 39: THG-Emissionen zweier stark hybridisierter dieselmotorischer Hybridfahrzeuge im WLTP 53

Abbildung 40: THG-Emissionen ottomotorischer Fahrzeuge unter Annahme der Kraftstoff-Entwicklung in Deutschland und Schweden bis 2030, ohne weitere Verbesserung von 2030 bis 2035 bzw. 200.000 km fortgeschrieben 55

Abbildung 41: THG-Emissionen dieselmotorischer Fahrzeuge unter Annahme der Kraftstoff-Entwicklung in Deutschland und Schweden bis 2030, ohne weitere Verbesserung von 2030 bis 2035 bzw. 200.000 km fortgeschrieben 55

Abbildung 42: Kraftstoffverbrauchs-Testergebnisse hybridisierter Fahrzeuge nach Leergewicht für unterschiedliche Fahrzeugsegmente (Daten nach ADAC) 61

Abbildung 43: Auswahl der hybridisierten Fahrzeuge aus dem Kompaktklasse-Segment, Darstellung der WLTP-Verbräuche 62

Abbildung 44: Streuband der Batteriekapazitäten über die im WLTP erreichte Reichweite für unterschiedliche Fahrzeugsegmente (Daten nach ADAC) 62

Abbildung 45: Struktur des Elektrizitätsnetzes und Abbildung der Spannungsebenen 66

Abbildung 46: Modellierung eines Stromnetzes in die Prozesse, die Quellen mit Verbrauchern verbinden 66

Abbildung 47: Nach Energieträger eingefärbte ecoinvent-Datensätze für die Modellierung eines Elektrizitätsnetzes 67

Abbildung 48: Anteile der Energieträger an zwei chinesischen Elektrizitätsnetzen aus CSG und SGCC (Balkendarstellung für linke y-

Achse) sowie die damit verbundenen CO <sub>2</sub> aq-Emissionen (dunkelgrüne Punktdarstellung für rechte y-Achse)	68	Abbildung 57: Bereitstellung und Bedarf von Lithium in einem Recycling-Stoffkreislauf	76
Abbildung 49: Import der Strom-Versorgungsdaten aus ENTSO-E	69	Abbildung 58: Skalierbare Leistungselektronik-Struktur nach Nordelöf et al. [57]	77
Abbildung 50: Vergleich der THG-Emission der Energieversorgung unter Nutzung der ENTSO-E-Daten oder der ecoinvent-Daten für die Energieversorgung in Frankreich und Polen. LV = Niederspannungsnetz, MV = Mittelspannungsnetz, HV = Hochspannungsnetz	70	Abbildung 59: Skalierbare Beschreibung eines E-Antriebs gemäß Primärdaten von Expertengremium	77
Abbildung 51: Szenario möglicher Kraftstoffzusammensetzung in Deutschland 2030 unter Erfüllung der 38. BImSchV	71	Abbildung 60: Einfluss der PHEV-Gesetzesänderung auf den elektrischen Nutzungsfaktor	78
Abbildung 52: Szenario möglicher Kraftstoffzusammensetzung in Schweden 2030 unter Erfüllung der Angaben der Lag 2017-Gesetzgebung	71	Abbildung 61: Beispielhafte Stapelung verschiedener Energieträger als Funktion des Merit-Order-Prinzips	81
Abbildung 53: Systemaufgliederung der Technologien und Bauteile des Antriebs. Das Restfahrzeug, auch Glider genannt, wird nicht weiter aufgliedert.	71	Abbildung 62: Zuordnung der länderspezifischen Stromsystemzusammenstellung für die Produktionsphase und gemäß Energiebedarf, abgebildet aus der resultierenden zusätzlich benötigten elektrischen Energie für die Nutzungsphase	83
Abbildung 54: Stufen des Zelleneinsatzes in Modulen eines in der Batteriegroße skalierbaren Batteriemodells und Einflüsse auf die gravimetrische Energiedichte der Gesamtbatterie (durchgezogene Linie) im Vergleich zu der gravimetrischen Energiedichten der Zellen (gestrichelte Linie).	73	Abbildung 63: Vorgehensweise zur Bestimmung der THG-Emissionen durch elektrische Energie	84
Abbildung 55: Historische Daten (EAFO Vehicle Statistics.2018 und IEA Global EV outlook 2017 ) und Trend-Projektion der EU Neuzulassungen an Batterieelektrischen Fahrzeugen und an Plug-In-Hybriden (ERTRAC Szenario in JRC report Cobalt: demand-supply balances in the transition to electric mobility)	76	Abbildung 64: THG-Emissionen nach Kraftwerksart nach FhG ISE und Minimalwerten aus ecoinvent v3.8	84
Abbildung 56: Bereitstellung und Bedarf von Nickel in einem Recycling-Stoffkreislauf mit in rot dargestellter EU-Vorgabe, die ab einer Rückführrate von 0,4 (dunkelblau gestrichelt) für den grün dargestellten Nickelbedarf aus zu dem Zeitpunkt verfügbaren (cyan nicht gestrichelt) Altbatterien erfüllt wird.	76	Abbildung 65: THG-Emissionen nach Kraftwerksart nach FhG ISE, ecoinvent v3.8 und IPCC 2014 [70]	85
		Abbildung 66: Auswertung des Lastverlaufs zweier Tage über mehrere Jahre	86
		Abbildung 67: Variation der Last über das Jahr von 2017 bis 2022, berechnet pro Monat. Erläuterung: 40,4GW als Minimalwert jeweils im Januar der Jahre 2017-2022. Die beispielsweise durchschnittliche monatliche Last von 66,3 GW lag gemittelt über alle Januarwerte der Jahre 2017-2022 vor.	86
		Abbildung 68: Variation der Last über das gesamte Jahr für den Zeitraum von 2017 bis 2022. Erläuterung: 34,3GW als Minimalwert im Jahr 2017 bezieht sich auf eine durchschnittliche monatliche Last von 34,3 GW,	

welche in diesem Fall im Mittel im Monat Juli im Jahr 2017 vorlag	86	Abbildung 77: Vergleich der THG-Emissionen der elektrischen Energie pro km nach Marginal- und Mittelwertansatz für verschiedene Referenzjahre bei 16,8 kWh / 100 km Fahrenergiebedarf und dem Szenario KNDE45, bezogen auf Fahrzeugkilometer	95
Abbildung 69: Lastverlauf über drei Tage in Abhängigkeit der Sampling-Rate	87	Abbildung 78: THG-Emissionen nach KNDE45 für unterschiedliche Referenzjahre und Verbräuche: die unterschiedlichen Werte für die verschiedenen Referenzjahre resultieren aus den Unterschieden in elektrischem Energiebedarf und Angebot an sogenannten „erneuerbaren“ Energien in den einzelnen Jahren.	95
Abbildung 70: Differenz der Lastverläufe im Vergleich zur viertelstündlichen Referenz-Auflösung. Erläuterung: Am 1.7.2021 um 20.00 Uhr unterschätzt die Angabe des elektrischen Leistungsbedarfs (Last) bei einer Angabe als 4-Stundenmittelwert (4h) den real vorkommenden elektrischen leistungsbedarf, abgeleitet aus der Viertelstundenauflösung (h/4) um 5,5 GW.	87	Abbildung 79: THG-Emissionen in Abhängigkeit des Energiebedarfs, Referenzjahr 2021, KNDE45	96
Abbildung 71: Gesamte elektrische Energie, aufgeführt nach Energieträger für das Jahr 2021, <i>Ei2021</i>	89	Abbildung 80: Einfluss der Wahl des Referenzjahres auf die THG-Emissionen, Zieljahre auf der x-Achse	96
Abbildung 72: Auf die installierte Leistung normierte Istleistung <i>PijRef</i> der einzelnen Energieträger	89	Abbildung 81: Einfluss der Quellen der Emissionsfaktoren auf die THG-Emissionen. Auf der x-Achse sind die Zieljahre dargestellt	97
Abbildung 73: Regenerative Volllaststunden abhängig vom Zeitpunkt (Jahr), aufgelistet nach Energiequelle	90	Abbildung 82: Darstellung der Differenz der THG-Werte für Emissionsfaktoren nach ecoinvent und FhG ISE für unterschiedliche Referenzjahre (farbig codiert) und Zieljahre (x-Achse)	97
Abbildung 74: Installierte Leistung für das Referenz- und das Zieljahr; Erläuterung: Gemäß Szenario FhG ISE liegen im Jahr 2021 56 GW an installierter Leistung des Energieträgers Wind Onshore vor. Im Jahr 2030 wird dieser Wert gemäß Szenario KNDE45 einen Wert von 81 GW betragen.	90	Abbildung 83: Einfluss der Emissionsfaktoren auf die THG-Emission eines BEV (62 kWh NMC721, Produktion 2021 in China, 16,8 kWh / 100 km WLTP-Verbrauch inklusive Netzverluste)	98
Abbildung 75: Darstellung der erzeugten Elektrizität im Referenzjahr 2021 und Zieljahr 2030	91	Abbildung 84: Einfluss der maximalen elektrischen Leistung auf die THG-Emissionen der Produktion eines Permanentmagnet-Synchronmotors PMSM98	
Abbildung 76: Vergleich der THG-Emissionen der elektrischen Energie pro kWh nach Marginal- und Mittelwertansatz für verschiedene Referenzjahre bei 16,8 kWh / 100 km Fahrenergiebedarf und dem Szenario KNDE45, bezogen auf die elektrische Energie in kWh	94		

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Parameter der exemplarisch ausgewählten Fahrzeuge

Tabelle 2: THG-Emissionen der in t CO<sub>2äq</sub> nach 200.000 km je nach Energieträger und Einsatzfall

Tabelle A1: Elektrischer Energiebedarf der betrachteten batterieelektrischen Fahrzeuge sowie des Plug-in-Hybrid-Fahrzeugs, dessen je nach Szenario zusätzlich anfallender Kraftstoffbedarf in Tabelle A3 aufgeführt ist.

Tabelle A2: Kraftstoffverbrauchs-Werte der konventionellen Fahrzeuge

Tabelle A3: Energiebedarf in l/100 km der hybridisierten Fahrzeuge, zusätzlicher elektrischer Energiebedarf des PHEV-g siehe Tabelle A1

Tabelle A4: Bezeichnungen und Abkürzungen des Batterierecycling-Stoffkreislaufs einer Lithium-Ionen-Batterie (LIB)

Tabelle A5: Eingangsdaten für die Bedienung des HVAC-Consumption-Calculator [43] nach [44]

Tabelle A6: Leistungs- und Energiebedarf zur Klimatisierung des BEV in Abhängigkeit von Jahreszeit und Temperatur

# Referenzen

1. (2022) Studie: Elektroauto-Laden wird „Multimilliardengeschäft“. ecomento
2. (2023) Electricity Maps. <https://www.electricitymaps.com/>. Zugegriffen: 24. Februar 2023
3. ADAC (2021) ADAC Ecotest. Test- und Bewertungskriterien (ab 4/2021)
4. ADAC (2022) Elektroauto und Ladeverluste: So können Sie Kosten vermeiden. ADAC
5. ADAC (2023) Autotest-Suche. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/autotest/suche/?newCarsOnly=true&engineType=Voll-Hybrid&pageNumber=1>
6. Alves Dias P, Blagoeva D, Pavel CC, Arvanitidis N (2018) Cobalt. Demand-supply balances in the transition to electric mobility. JRC Science for Policy Report. Publications Office of the European Union, Luxembourg
7. Andresh M, Patyk A, Haase M, Toedter O, Weber P (2021) Ökobilanzen im Projekt reFuels – Kraftstoffe neu denken. Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
8. Apostolaki-Iosifidou E, Codani P, Kempton W (2017) Measurement of power loss during electric vehicle charging and discharging. *Energy* 127:730–742. doi:10.1016/j.energy.2017.03.015
9. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (2022) Stromerzeugung nach Energieträgern (Strommix) von 1990 bis 2021 (in TWh) Deutschland insgesamt, 26. Aufl
10. Böhmeke C, Koch T (2021) The remaining CO<sub>2</sub> budget: a comparison of the CO<sub>2</sub> emissions of diesel and BEV drivetrain technology. *Automot. Engine Technol.* 6(3-4):127–145. doi:10.1007/s41104-021-00081-6
11. Buchert M, Jenseit W, Merz C, Schüler D (2011) Ökobilanz zum "Recycling von Lithium-Ionen-Batterien" (LithoRec). Endbericht
12. Bundesnetzagentur (2023) Elektro-mo-bi-li-tät: Öff-ent-li-che Lad-ein-fra-struk-tur. <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Elektrizitaetund-Gas/E-Mobilitaet/start.html>. Zugegriffen: 22. März 2023
13. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW) (2020) Energiemarkt Deutschland 2020
14. Canals Casals L, Rodríguez M, Corchero C, Carrillo RE (2019) Evaluation of the End-of-Life of Electric Vehicle Batteries According to the State-of-Health. *WEVJ* 10(4). doi:10.3390/wevj10040063
15. Cobalt Institute (2022) Cobalt Market Report 2021, 2022. Aufl
16. Concawe (2021) Transition towards Low Carbon fuels by 2050: Scenario analysis for the European refining sector, 2021. Aufl
17. Dai Q, Winjobi O (2018) Updates for Battery Recycling and Materials in GREET 2019
18. Dai Q, Kelly JC, Gaines L, Wang M (2019) Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications. *Batteries* 5(2):48. doi:10.3390/batteries5020048
19. Del Duce A, Egede P, Öhlschläger G, Dettmer T, Althaus H-J, Bütler T, Szczechowicz E (2013) eLCAr: Guidelines for the LCA of electric vehicles. FP7
20. Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (2021) Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (14044:2021-02). Beuth, Berlin
21. Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (2021) Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (14040:2021-02). Beuth, Berlin
22. Energimyndigheten (2022) Drivmedel 2021. Resultat och analys av rapportering enligt regelverken för hållbarhetskriterier, reduktionsplikt och drivmedelslag. ER 2022:08
23. Europäische Kommission (2017) Verordnung (EU) 2017/1151 der Kommission vom 1. Juni 2017 zur Ergänzung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich

- der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Fahrzeugreparatur- und -wartungsinformationen, zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission sowie der Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 der Kommission und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission. VO 2017/1151/EU
24. Europäische Kommission (2020) Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über Batterien und Altbatterien, zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2020
  25. Europäische Kommission (2022) Production of renewable transport fuels – share of renewable electricity (requirements) Draft delegated regulation - Ares(2022)3836651
  26. Europäische Kommission (2023) Verordnung (EU) 2023/443 der Kommission vom 8. Februar 2023 zur Änderung der Verordnung (EU) 2017/1151 hinsichtlich der Emissionstypgenehmigungsverfahren für leichte Personenkraftwagen und Nutzfahrzeuge
  27. Europäische Union (2018) Richtlinie (EU) 2018/2001 des europäischen Parlamentes und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. RL 2018/2001/EU
  28. Europäischer Rat (2023) Batterien und Altbatterien: Rat nimmt neue Verordnung an
  29. Europäisches Parlament (2022) Batteries: deal on new EU rules for design, production and waste treatment. <https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20221205IPR60614/batteries-deal-on-new-eu-rules-for-design-production-and-waste-treatment>. Zugegriffen: 13. Januar 2023
  30. Europäisches Parlament, Europäischer Rat (2023) Verordnung (EU) 2023/... des Europäischen Parlaments und des Rates vom ... über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG
  31. European Commission - Joint Research Centre - IES The International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook (online version)
  32. Fördern. <http://nationale-leitstelle.de/foerdern/>. Zugegriffen: 22. März 2023
  33. Fragner S (2018) LCA-Vergleich von Elektromotoren. <https://epub.jku.at/obvulihs/download/pdf/2581983?originalFilename=true>. Zugegriffen: 22. März 2023
  34. García A, Monsalve-Serrano J, Martinez-Boggio S, Soria Alcaide R (2023) Carbon footprint of battery electric vehicles considering average and marginal electricity mix. *Energy* 268:126691. doi:10.1016/j.energy.2023.126691
  35. Günter FJ, Wassiliadis N (2022) State of the Art of Lithium-Ion Pouch Cells in Automotive Applications: Cell Teardown and Characterization. *J. Electrochem. Soc.* 169(3):30515. doi:10.1149/1945-7111/ac4e11
  36. Huijbregts M, Steinmann Z, Elshout P (2016) ReCiPe 2016. A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterization
  37. Intergovernmental Panel on Climate Change (2018) Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. 0
  38. International Energy Agency (2022) The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, 2022. Aufl
  39. Jung R, Metzger M, Maglia F, Stinner C, Gasteiger HA (2017) Oxygen Release and Its Effect on the Cycling Stability of LiNi<sub>x</sub>Mn<sub>y</sub>Co<sub>z</sub>O<sub>2</sub> (NMC) Cathode Materials for Li-Ion Batteries. *J. Electrochem. Soc.* 164(7):A1361-A1377. doi:10.1149/2.0021707jes

40. Koch T, Böhlke T (2021) The averaging bias - A standard miscalculation, which extensively underestimates real CO<sub>2</sub> emissions. *Z. Angew. Math. Mech.* 101(8). doi:10.1002/zamm.202100205
41. Kohlmeyer R (2022) Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2020. nach Art. 7 Abs. 2 der Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG, Dessau-Roßlau
42. Komarnicki P, Haubrock J, Styczynski ZA (2018) Elektromobilität und Sektorenkopplung. Infrastruktur- und Systemkomponenten. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
43. König A (2021) HVAC-Consumption-Calculator
44. König A, Mayer S, Nicoletti L, Tumphart S, Lienkamp M (2022) The Impact of HVAC on the Development of Autonomous and Electric Vehicle Concepts. *Energies* 15(2):441. doi:10.3390/en15020441
45. Kramer W, Maaßen U Das Bruttoprinzip ist europäische Vorgabe – Unterschiedliche Berechnungsmethoden schaffen Verwirrung bei der EE-Quote. *et (Energietechnische Tagesfragen)* 72(04/2022):45–47
46. Kramer U, Bothe D, Gatzel C, Reger M, Lothmann M, Dünnebeil F, Biemann K, Lieblich A, Dittrich M, Limberger S, Rosental M, Fröhlich T (2021) Zukünftige Kraftstoffe: FVV-Kraftstoffstudie IV. Transformation of Mobility to the GHG-neutral Post-fossil Age. Project no. 1378. [https://www.fvv-net.de/fileadmin/Transfer/Downloads/Publikationen/FVV\\_\\_Future\\_Fuels\\_\\_StudyIV\\_The\\_Transformation\\_of\\_Mobility\\_\\_H1269\\_2021-10\\_\\_EN.pdf](https://www.fvv-net.de/fileadmin/Transfer/Downloads/Publikationen/FVV__Future_Fuels__StudyIV_The_Transformation_of_Mobility__H1269_2021-10__EN.pdf)
47. Kramer U, Bothe D, Gatzel C, Pfannenschmidt A, Baum C (2022) Zukünftige Kraftstoffe: FVV-Kraftstoffstudie IVb. Follow-up study: Transformation of Mobility to the GHG-neutral Post-fossil Age. Project no. 1452. [https://www.fvv-net.de/fileadmin/Storys/Wie\\_schnell\\_geht\\_nachhaltig/FVV\\_H1313\\_1452\\_Future\\_Fuels\\_FVV\\_Fuel\\_Study\\_IVb\\_2022-12.pdf](https://www.fvv-net.de/fileadmin/Storys/Wie_schnell_geht_nachhaltig/FVV_H1313_1452_Future_Fuels_FVV_Fuel_Study_IVb_2022-12.pdf)
48. Kroher T (2023) Der Hybridantrieb: Mit der Kraft der zwei Herzen. <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/hybridantrieb/>
49. Lanz L, Noll B, Schmidt TS, Steffen B (2022) Comparing the levelized cost of electric vehicle charging options in Europe. *Nat Commun* 13(1):5277. doi:10.1038/s41467-022-32835-7
50. Mohr M, Weil M, Peters J, Wang Z (2020) Recycling of Lithium-Ion Batteries. In: Bard AJ (Hrsg) *Encyclopedia of Electrochemistry*. Wiley, S 1–33
51. Mohr M, Peters JF, Baumann M, Weil M (2020) Toward a cell-chemistry specific life cycle assessment of lithium-ion battery recycling processes. *Journal of Industrial Ecology* 24(6):1310–1322. doi:10.1111/jiec.13021
52. Myung S-T, Maglia F, Park K-J, Yoon CS, Lamp P, Kim S-J, Sun Y-K (2017) Nickel-Rich Layered Cathode Materials for Automotive Lithium-Ion Batteries: Achievements and Perspectives. *ACS Energy Lett.* 2(1):196–223. doi:10.1021/acsenerylett.6b00594
53. Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur (2020) Ladeinfrastruktur nach 2025/2030: Szenarien für den Markthochlauf
54. Neste (2022) Von Fahrzeugherstellern freigegeben. <https://www.neste.de/neste-my-renewable-diesel/produktinformationen/von-fahrzeugherstellern-freigegeben>. Zugegriffen: 26. Juli 2023
55. Netze BW GmbH (2021) Höhe der Durchschnittsverluste je Spannungsebene. §10 Abs.2 StromNEV. Betrachtungszeitraum: 01.01.2021 bis 31.12.2021
56. Niemann A-L (2022) „Wir bekommen 90 Prozent Recyclingquote hin“. <https://www.faz.net/aktuell/technik-motor/elektromobilitaet/elektroautos-alte-akkus-werden-derzeit-kaum-recycelt-18527467.html?premium>. Zugegriffen: 19. Dezember 2022
57. Nordelöf A (2019) A scalable life cycle inventory of an automotive power electronic inverter unit—part II: manufacturing

- processes. *Int J Life Cycle Assess* 24(4):694–711. doi:10.1007/s11367-018-1491-3
58. Nordelöf A, Tillman A-M (2018) A scalable life cycle inventory of an electrical automotive traction machine—Part II: manufacturing processes. *Int J Life Cycle Assess* 23(2):295–313. doi:10.1007/s11367-017-1309-8
59. Nordelöf A, Grunditz E, Tillman A-M, Thiringer T, Alatalo M (2018) A scalable life cycle inventory of an electrical automotive traction machine—Part I: design and composition. *Int J Life Cycle Assess* 23(1):55–69. doi:10.1007/s11367-017-1308-9
60. Nordelöf A, Alatalo M, Söderman ML (2019) A scalable life cycle inventory of an automotive power electronic inverter unit—part I: design and composition. *Int J Life Cycle Assess* 24(1):78–92. doi:10.1007/s11367-018-1503-3
61. Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (2006) DIN EN ISO 14044. Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006) (14044). Beuth, Berlin
62. Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (2009) DIN EN ISO 14040. Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006) (14040). Beuth, Berlin
63. Plötz P, Funke SÁ, Jochem P (2018) Empirical Fuel Consumption and CO2 Emissions of Plug-In Hybrid Electric Vehicles. *Journal of Industrial Ecology* 22(4):773–784. doi:10.1111/jiec.12623
64. Plötz P, Moll C, Bieker G, Mock P, Li Y (2020) Real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles. Fuel consumption, electric driving, and CO2 emissions
65. Plötz P, Link S, Ringelschwendner H, Keller M, Moll C, Bieker G, Dornoff J, Mock P (2022) Real-world usage of plug-in hybrid vehicles in Europe. A 2022 update on fuel consumption, electric driving, and CO2 emissions, 2022. Aufl
66. Prognos AG, Öko-Institut e.V., Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH (2021) Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Langfassung
67. Rajendran G, Vaithilingam CA, Naidu K, Oruganti KSP (2020) Energy-efficient converters for electric vehicle charging stations. *SN Applied Sciences* 2(4). doi:10.1007/s42452-020-2369-0
68. Rudolph F, Jochem P, Bradl R, Kost C, Koch T, Toedter O, Korte K, Möckl M (2020) Verbrauchssenkung der europäischen Pkw-Flotte – Flankierende Politikinstrumente des Green Deals. „Forschung für den European Green Deal“ – Jahrestagung 2020
69. Sacchi R, Bauer C, Cox B, Mutel C (2022) When, where and how can the electrification of passenger cars reduce greenhouse gas emissions? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 162:112475. doi:10.1016/j.rser.2022.112475
70. Schlömer S (2014) Technology-specific Cost and Performance Parameters. Annex III. IPCC. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_annex-iii.pdf#page=7](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf#page=7))%20report,%20and%20are%20fully%20described%20in%20our%20[wiki](<https://github.com/electricitymaps/electricitymaps-contrib/wiki/Default-emission-factors>
71. Schmidt M (2022) Rohstoffrisikobewertung – Lithium 2030. Update, Berlin
72. Schröder J, Naumann K (2022) Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
73. Seyerlein C (2022) Uhr Elektroauto-Laden entwickelt sich zum Multimilliardengeschäft. Exklusive Studie. *manager magazin*
74. Stiftung Klimaneutralität | Agora Energiewende | Agora Verkehrswende Klimaneutrales Deutschland 2045
75. The International Council on Clean Transportation (2022) Mild-Hybrid Vehicles: a Near Term Technology For CO2 Emissions Reduction. White Paper, 2022. Aufl
76. Tupy (11. Januar 2023) Austausch zu den Batterierecycling-Aktivitäten der Firma Tupy. Webmeeting
77. UBA Achtunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-

- Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Festlegung weiterer Bestimmungen zur THG-Minderung bei Kraftstoffen - 38. BImSchV ). 38. BImSchV
78. Urbansky F (2022) Warum Autos komplett recycelt werden können und müssen. MTZ Motortech Z 83(12):8–13. doi:10.1007/s35146-022-1416-3
79. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (VDE) (Hrsg) (2022) Benchmark of modern electrification concepts. Which powertrain technologies have the most benefits?
80. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (2020) Ökobilanz von Pkws mit verschiedenen Antriebssystemen. VDI-Studie, Düsseldorf
81. Vogt M (2022) Elektroauto-Batterie: Lebensdauer, Garantie, Reparatur. Die Batterie ist das wichtigste und teuerste Bauteil eines Elektroautos. Deshalb wollen Käufer wissen: Wie lange hält der Akku? Welche Garantien gibt der Hersteller? Können Akkus repariert werden? ADAC Technik Zentrum. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-batterie/>. Zugegriffen: 15. Januar 2023
82. Wassiliadis N, Steinsträter M, Schreiber M, Rosner P, Nicoletti L, Schmid F, Ank M, Teichert O, Wildfeuer L, Schneider J, Koch A, König A, Glatz A, Gandlgruber J, Kröger T, Lin X, Lienkamp M (2022) Quantifying the state of the art of electric powertrains in battery electric vehicles: Range, efficiency, and lifetime from component to system level of the Volkswagen ID.3. eTransportation:100167. doi:10.1016/j.etrans.2022.100167
83. Weber P, Toedter O, Buchgeister J, Koch T (2019) Ökobilanzierung - Kontroversen vorprogrammiert? Sonderprojekte ATZ/MTZ 24(S2):12–15. doi:10.1007/s41491-019-0042-y
84. Wietschel M, Link S, Biemann K, Helms H (2022) Langfristige Umweltbilanz und Zukunftspotenzial alternativer Antriebstechnologien. Studie zum deutschen Innovationssystem, Berlin
85. Windisch-Kern S, Gerold E, Nigl T, Jandric A, Altendorfer M, Rutrecht B, Scherhauser S, Raupenstrauch H, Pomberger R, Antrekowitsch H, Part F (2022) Recycling chains for lithium-ion batteries: A critical examination of current challenges, opportunities and process dependencies. Waste Manag 138:125–139. doi:10.1016/j.wasman.2021.11.038
86. Zacharof NG, Fontaras G (2016) Review of in use factors affecting the fuel consumption and CO2 emissions of passenger cars. JRC Science for Policy Report, Bd 27819. Publications Office of the European Union, Luxembourg
87. Zhang Z (2019) Life cycle environment assessment of charging infrastructure for electric vehicles in china. 电动汽车充电基础设施的全生命周期环境影响评价研究. Master, University of chinese academy of science
88. Zhang Z, Sun X, Ding N, Yang J (2019) Life cycle environmental assessment of charging infrastructure for electric vehicles in China. Journal of Cleaner Production 227:932–941. doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.167
89. Zhang Z, Sun X, Ding N, Yang J (2019) Life cycle environmental assessment of charging infrastructure for electric vehicles in China. Journal of Cleaner Production 227:932–941. doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.167



## Die VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik

Die VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (FVT) bietet mit ihren fünf Fachbereichen die Heimat für Ingenieurinnen und Ingenieure der unterschiedlichsten Fachrichtungen rund um die Verkehrsträger Straße, Schiene, Luft und Wasser. In einem aktiven Zusammenspiel mit den Arbeitskreisen der VDI-Bezirksvereine, den Young Engineers sowie den weiteren VDI-Fachgesellschaften ist die VDI-FVT national und international mit weiteren Kooperationspartnern vernetzt. Die VDI-FVT ([www.vdi.de/fvt](http://www.vdi.de/fvt)) hat es sich zur Aufgabe gemacht, die Wahrnehmung des Ingenieurberufs zu stärken und den VDI als technisch-wissenschaftlichen Meinungsführer in Fachwelt, Politik und Gesellschaft verstärkt zu etablieren. Dabei gilt es, das Zusammenwirken der unterschiedlichen Mobilitätsbereiche zu forcieren und fachliche Impulse zu geben sowie Perspektiven für Querschnittsthemen rund um die Bereiche „Mensch und Mobilität“ sowie „Transportmittel und Infrastruktur“ zu entwickeln.

## Der VDI

### Gestalter der Zukunft

Seit mehr als 165 Jahren gibt der VDI wichtige Impulse für den technischen Fortschritt. Mit seiner einzigartigen Community und seiner enormen Vielfalt ist er Gestalter, Wissensmultiplikator, drittgrößter technischer Regelsetzer und Vermittler zwischen Technik und Wissenschaft, Wirtschaft und Politik. Er motiviert Menschen, die Grenzen des Möglichen zu verschieben, setzt Standards für nachhaltige Innovationen und leistet einen wichtigen Beitrag, um Fortschritt und Wohlstand in Deutschland zu sichern. Der VDI gestaltet die Welt von morgen – als Schnittstelle zwischen Ingenieurinnen und Ingenieuren, Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft. In seinem einzigartigen multidisziplinären Netzwerk mit etwa 135.000 Mitgliedern bündelt er das Wissen und die Kompetenzen, die nötig sind, um den Weg in die Zukunft zu gestalten.



VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.  
VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik  
Dipl.-Ing. Christof Kerkhoff  
[ftv@vdi.de](mailto:ftv@vdi.de)  
[www.vdi.de](http://www.vdi.de)

ISBN 978-3-949971-73-0 LCA 2.0 | E-ISBN 978-3-949971-74-7 LCA 2.0