

Klima- und Ressourcenwirkung von Elektrofahrzeugbatterien

**Begleitdokument zum Artikel „Klimabilanz von
Elektrofahrzeugen – Ein Plädoyer für mehr
Sachlichkeit“**

Klima- und Ressourcenwirkung von Elektrofahrzeugbatterien

**Begleitdokument zum Artikel „Klimabilanz von
Elektrofahrzeugen – Ein Plädoyer für mehr
Sachlichkeit“**

Ansprechpartnerin: Anika Regett

Stand: Februar 2019

Impressum:

Auszug aus dem zweiten Zwischenbericht
der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
(FfE)

zum Projekt:

Ressourcensicht auf die Energiezukunft -
Potenzial der Kreislaufwirtschaft zur Senkung
des Ressourcenverbrauchs von
Schlüsseltechnologien der Energiewende

Auftraggeber:

Hans und Klementia Langmatz Stiftung
Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg

Kontakt:

Am Blütenanger 71
80995 München
Tel.: +49 (0) 89 158121-0
Fax: +49 (0) 89 158121-10
E-Mail: info@ffe.de
Internet: www.ffe.de

Wissenschaftlicher Leiter:

Prof. Dr.-Ing. U. Wagner

Geschäftsführer:

Prof. Dr.-Ing. W. Mauch

Projekt-Manager:

Dr.-Ing. Dipl.-Phys. R. Corradini

Inhalt

1	Vorgehen und Untersuchungsrahmen.....	1
2	Datengrundlage.....	2
3	Kritischer Rohstoffbedarf und Klimawirksamkeit von Traktionsbatterien ...	5
4	Gegenüberstellung von Elektro- und Benzinfahrzeug.....	8
5	Literatur	11

1 Vorgehen und Untersuchungsrahmen

Die Klima- und Ressourcenwirkung der Produktion von Traktionsbatterien wird anhand des kritischen Rohstoffbedarfs, den energiebedingten Treibhausgas (THG)-Emissionen und dem Primärenergie (PE)-Bedarf bewertet. Als Bezugsgröße dient eine Traktionsbatterie mit 1 kWh Batteriekapazität. Wie in **Abbildung 1-1** dargestellt, werden neben dem Energieeinsatz in der Batteriefertigung auch der Energiebedarf der Rohstoffgewinnung und Materialproduktion berücksichtigt. Im Folgenden werden unter dem Begriff „Batteriefertigung“ die Prozesse der Zellfertigung und der Montage des Batteriesystems und unter „Batterieproduktion“ die Gesamtheit aller Prozesse inklusive der Materialproduktion und der Rohstoffgewinnung verstanden.

Der Transport der Zwischen- und Endprodukte sowie der Bau der Anlagen für die Prozessschritte der Batterieproduktion werden nicht bilanziert. Zudem werden keine prozessbedingten, sondern ausschließlich THG-Emissionen, die durch die Brennstoffbereitstellung und -umwandlung entstehen, berücksichtigt. Neben den Emissionen aus der Verbrennung der Brennstoffe sind auch die Emissionen für den Bau der Energieinfrastruktur enthalten.

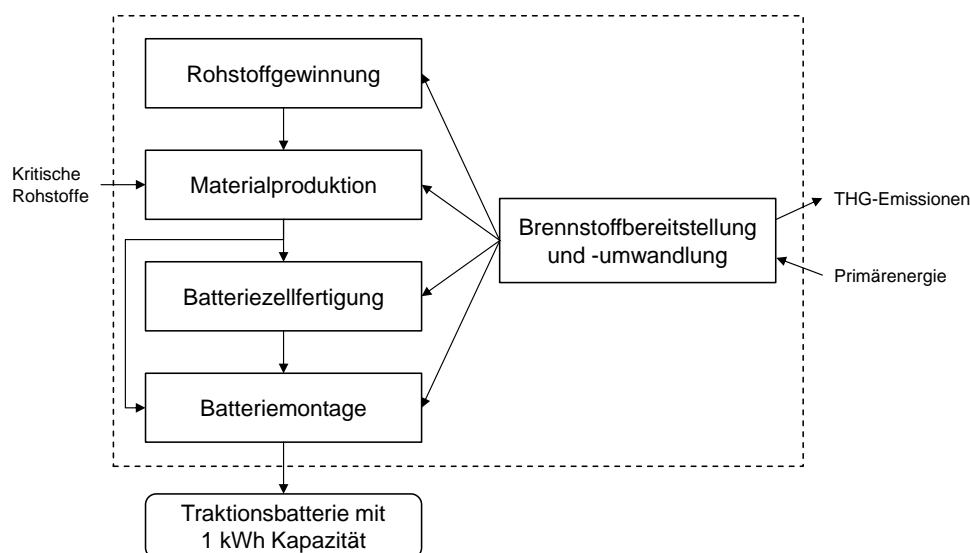


Abbildung 1-1: Berücksichtigte Prozesse für die Batterieproduktion

Zur Berechnung der Emissions- und Ressourcenwirkung wird zunächst für jeden Prozess der Batterieproduktion eine Energie- und Materialbilanz aufgestellt und auf eine Kilowattstunde Batteriekapazität bezogen. Der bilanzierte Energiebedarf je Prozess wird anschließend mit einem spezifischen Emissions- bzw. Primärenergiefaktor multipliziert, um auf die energiebedingten THG-Emissionen bzw. den PE-Bedarf zu schließen. Die Berechnung des kritischen Rohstoffbedarfs erfolgt auf Basis der Stöchiometrie der Prozesse unter Berücksichtigung der Produktionseffizienz des NMC (Nickel-Mangan-Kobalt)-Kathodenmaterials.

Aufbauend auf der detaillierten Berechnung der energiebedingten THG-Emissionen für die Produktion von Traktionsbatterien wird anschließend die Klimawirksamkeit eines batterieelektrischen Fahrzeugs der eines konventionellen Benzinfahrzeugs gegenübergestellt. Hierfür wird zunächst das Treibhauspotenzial für die Produktion der

beiden Fahrzeuge bestimmt. Dabei wird für die Traktionsbatterie auf die vorherigen Berechnungen und für alle weiteren Fahrzeugkomponenten auf die Ergebnisse einer bestehenden Ökobilanz zurückgegriffen. Anschließend wird über die betriebsbedingten THG-Emissionen je Kilometer sowie die jährliche Fahrleistung die emissionsbezogene Amortisationszeit eines Elektrofahrzeugs abgeleitet.

2 Datengrundlage

Die Energie- und Materialbilanzen der Prozesse der Rohstoffgewinnung, Materialproduktion und Batteriefertigung basieren auf Daten des Argonne National Laboratory (ANL). Diese werden in der Software GREET /ELG-01 17/ sowie den dazugehörigen Hintergrundberichten bereitgestellt.

Das untersuchte Lithium-Ionen-Batteriesystem mit einer Batteriekapazität von 30 kWh bestehend aus einer NMC-Kathode und einer Graphit-Anode besitzt nach BatPac /ANL-01 17/ eine Gesamtmasse von 177 kg. Die Materialzusammensetzung des Batteriesystems wird in **Tabelle 2-1** aufgeschlüsselt.

Tabelle 2-1: *Zusammensetzung der NMC-Traktionsbatterie nach /ANL-01 17/*

Material	Masse in kg	Anteil in %
NMC-Aktivmaterial	45	25
Aluminium	36	20
Graphit	32	18
Kupfer	21	12
Elektrolyt	20	11
Plastik	6	4
Andere	17	10

Der Energiebedarf für die Produktion des NMC-Aktivmaterials, die Fertigung der Zellen sowie die Batteriemontage basieren auf dem Bericht von Dai et al. /ANLA-01 17/. Als Aktivmaterial wird NMC622 verwendet, welches geringere Kobaltanteile als NMC424 und NMC111 aufweist und laut der Energiespeicher-Roadmap /ISI-09 17/ heute bereits eingesetzt wird. Der in /ANLA-01 17/ ausgewiesene Energiebedarf für die Batteriefertigung entstammt den Angaben einer industriellen Anlage in China.

Der angegebene Energiebedarf wird mithilfe der an einer Pilotanlage gemessenen Werte aus Yuan et al. /YUA-01 17/ validiert. Während für die chinesische Anlage ein Endenergiebedarf von 47 kWh/kWh Batteriekapazität ausgewiesen wird, beträgt der Strombedarf für die Pilotanlage in /YUA-01 17/ 13 kWh pro Zelle bzw. 107 kWh/kWh für das Batteriesystem mit 192 Zellen und einer Gesamtkapazität von 24 kWh. Der Strombedarf für die Batteriefertigung wird in **Tabelle 2-2** noch einmal anteilig nach Prozessschritten aufgeschlüsselt. Für den industriellen Maßstab geben Yuan et al. eine mögliche Einsparung von bis zu 72 % gegenüber der Pilotanlage an, sodass sich der Strombedarf potenziell auf 30 kWh/kWh Batteriekapazität reduzieren lässt. Die größten Einsparungen lassen sich mit 85 % im Trocknungsprozess und mit 56 % für den Trockenraum erzielen.

Der Energiebedarf der chinesischen Batteriefabrik aus /ANLA-01 17/ wird folglich als plausibel eingestuft und für die weitere Betrachtung als Referenzfall verwendet. In der dort betrachteten Anlage wird ein Teil des Endenergiebedarfs durch Fernwärme gedeckt. Da dies ein Einzelfall ist, wird im Folgenden wie in den anderen Studien von einer ausschließlichen Bereitstellung der Endenergie durch Strom ausgegangen. Mit einer Effizienz von 99 % eines Elektrodenheizkessel /FFE-20 17/ ergibt sich somit ein Strombedarf für die Batteriefertigung von 48 kWh/kWh Batteriekapazität.

Tabelle 2-2: *Kurzbeschreibung der Prozesse der Batteriefertigung nach /RWTH-05 15/ und Anteil der Prozessschritte am Strombedarf der Batteriefertigung für die Pilotanlage aus /YUA-01 17/*

Prozessschritt	Kurzbeschreibung (industrieller Prozess)	Anteil am Strombedarf (Pilotanlage)
Mischen	Herstellung von Slurries durch Mischen des Anoden- und des Kathodenaktivmaterials (separat) mit Additiven, Lösungs- und Bindemitteln.	0,8%
Beschichten	Beschichtung der Kupfer- bzw. Aluminiumträgerfolie mit dem Anoden- bzw. Kathodenslurry.	1,4%
Trocknen	Verdampfung und Rückgewinnung des Lösemittels in einem Schwebebahntrockner bei 80-150°C.	46,7%*
Kalandern	Verdichtung der beschichteten Folien durch Walzen.	2,9%
Vakuumtrocknen und Trockenraum	Feuchteentzug durch Lagerung in einem Vakuumofen (1-2 Tage, 60-130°C, 0,07 mbar) und Überführung in den Trockenraum.	29,3%*
Schneiden	Thermisches (Laser) oder mechanisches (Messer) Zuschneiden der Elektrodenbänder.	5,3%
Stapeln oder Wickeln	Stapeln bzw. Wickeln von Anode, Kathode und Separator.	5,8%
Anschweißen und Verschließen	Kontaktieren der Zellableiter durch Ultraschall- oder Laserschweißen sowie Verschluss der Verpackung.	1,9%
Elektrolytbefüllen	Befüllen der Zelle mit dem Elektrolyt.	4,4%
Endgültiges Verschließen	Endgültiger Verschluss der Zelle.	0,8%
Erstbeladen	Bildung der Grenzschicht zwischen Elektrolyt und Elektrode durch erstes Beladen der Zelle.	0,5%
Montage des Batteriepacks	Montage der einzelnen Komponenten zu einem Batteriepack.	0,3%

*Im industriellen Maßstab erhebliche Reduktion des Strombedarfs in den Trocknungsprozessen möglich.

Der Bedarf an kritischen Rohstoffen wird basierend auf der Massenbilanz aus BatPac /ANL-01 17/ sowie der Stöchiometrie des NMC-Aktivmaterials berechnet. Dabei wird die angegebene NMC-Ausbeute in der Produktion des Aktivmaterials von 85 % nach /ANLA-01 17/ berücksichtigt.

Grundsätzlich wird für den Anteil von Primär- und Sekundärmaterialien auf die in GREET /ELG-01 17/ hinterlegten Anteile zurückgegriffen. Da sich der Energieeinsatz in der Primär- und Sekundäraluminiumproduktion jedoch sehr stark unterscheidet und

Aluminium mit 20 % einen großen Anteil am Gewicht der Batterie ausmacht, wird für Aluminium ein spezifischer Datensatz für den europäischen Markt hinterlegt. Gemäß der Angaben zu Knetlegierungen aus /TRE-01 16/ beläuft sich der Sekundärmaterialanteil für Aluminium auf 46 %.

Um den Energieträgereinsatz in den Prozessen der Batterieproduktion in THG-Emissionen zu übersetzen, werden für die direkten Emissionen aus der Verbrennung von Brennstoffen die Emissionsfaktoren aus dem Nationalen THG-Inventarbericht /UBA-03 16/ verwendet. Für die Emissionsfaktoren von Strom und für die Vorkette der Brennstoffbereitstellung wird das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential - GWP₁₀₀) gemäß CML-Wirkungsabschätzungsmethode aus der ecoinvent-Datenbank /ECOINV-01 17/ verwendet. Als Emissionsfaktor für den Strom, der in der Rohstoffgewinnung und Materialproduktion eingesetzt wird, wird der Emissionsfaktor des globalen Strommixes angesetzt. Für die NMC-Produktion und Batteriefertigung hingegen wird ein Misch-Emissionsfaktor berechnet, der den Anteil der batterieproduzierenden Länder bzw. Regionen in Anlehnung an das Trendszenario aus der Energiespeicher-Roadmap /ISI-09 17/ widerspiegelt. Dieser wird mit 49 % durch China dominiert, gefolgt von den USA mit 20 %, Europa mit 12 % sowie Korea und Japan mit 5 % bzw. 3 %. Es ergibt sich ein Emissionsfaktor des Stroms mit Vorkette in Höhe von 0,907 kg CO₂-Äquivalenten (Äq.)/kWh.

Für die Berechnung des PE-Bedarfs werden die brennstoffbezogenen Faktoren aus GEMIS /IINAS-01 17/ verwendet. Für den PE-Bedarf von Strom wird zunächst der PE-Faktor des deutschen Strommixes bestimmt. Dieser wird mithilfe des PE-Einsatzes für die Stromerzeugung aus der deutschen Energiebilanz /AGEB-02 17/, der Zusammensetzung der Erneuerbaren Energien (EE) aus den Energiedaten /BFRW-01 18/ und den brennstoffbezogenen Faktoren berechnet. Anschließend wird der PE-Faktor für Deutschland auf den globalen Strommix und den gewichteten Strommix für die Batteriefertigung hochskaliert. Der Skalierungsfaktor wird aus dem Verhältnis der THG-Emissionsfaktoren des Stroms in den jeweiligen Regionen abgeleitet.

Die berechneten energiebedingten THG-Emissionen für die Produktion der Traktionsbatterie fließen schließlich in den Fahrzeugvergleich ein. Das Treibhauspotenzial der restlichen Fahrzeugkomponenten für das Elektro- und das Verbrennungsfahrzeug stammen aus Hawkins et al. /HAW-01 13/. Für den spezifischen Benzin- bzw. Stromverbrauch der Fahrzeuge im Betrieb werden keine Herstellerangaben, sondern reale Verbräuche der Golf-Klasse nach ADAC EcoTest /ADAC-01 18/ in Höhe von 5,9 l/100 km bzw. 17,3 kWh/100 km angesetzt. Ausgehend von Angaben des Kraftfahrtbundesamts /KBA-11 18/ wird für die Berechnung der Amortisationszeit eines Elektrofahrzeugs von einer Jahresfahrleistung von 14.000 km ausgegangen.

Als Emissionsfaktor von Strom in der Betriebsphase des Elektrofahrzeugs dient der Emissionsfaktor des deutschen Strommixes im Jahr 2015 gemäß Umweltbundesamt /UBA-11 17/ als Ausgangspunkt. Da dieser noch nicht die Emissionen in der Vorkette beinhaltet, wird ein Skalierungsfaktor auf Basis des Verhältnisses des Emissionsfaktors für 2014 mit Vorkette aus der ecoinvent-Datenbank /ECOINV-01 17/ und dem Emissionsfaktor für 2014 ohne Vorkette nach /UBA-11 17/ abgeleitet. Es resultiert ein Emissionsfaktor für den deutschen Strommix im Jahr 2015 mit Vorkette in Höhe von

0,580 kg CO₂-Äq./kWh. Für den Benzinverbrauch im Fahrzeugbetrieb wird der gleiche Emissionsfaktor inklusive Vorkette wie für den Benzinverbrauch in der Batterieproduktion angesetzt.

3 Kritischer Rohstoffbedarf und Klimawirksamkeit von Traktionsbatterien

Der Bedarf an Metallen für das NMC622-Aktivmaterial ist in **Tabelle 3-1** dargestellt. Die kritischen Rohstoffe Kobalt und Lithium sind vor allem in der NMC-Kathode enthalten. Mit 4 g pro kWh Batteriekapazität enthält auch der Elektrolyt geringe Lithiummengen, welche im Vergleich zum Lithiumgehalt der Kathode jedoch vernachlässigbar sind.

Tabelle 3-1: *Bedarf an Metallen für das NMC622-Aktivmaterial*

Metall	Metallgehalt der Batterie in g/kWh Batteriekapazität	Metallbedarf unter Berücksichtigung der NMC-Produktionsverluste in g/kWh Batteriekapazität
Lithium	115	115
Nickel	528	621
Mangan	165	194
Kobalt	177	208

Der mit der Batterieproduktion einhergehende Endenergiebedarf beläuft sich über alle Prozessschritte auf insgesamt 164 kWh. Davon entfallen 102 kWh auf Strom und der Rest auf konventionelle Brennstoffe, vor allem Erdgas und Öl. Wird dieser Endenergiebedarf in Primärenergie umgerechnet, ergibt sich ein kumulierter Energieverbrauch für die Batterieproduktion von 423 kWh/kWh Batteriekapazität.

Die energiebedingten THG-Emissionen für die Produktion einer Traktionsbatterie belaufen sich auf 105,6 kg CO₂-Äquivalenten (Äq.) je kWh Batteriekapazität. Die in **Abbildung 3-1** dargestellte Beitragsanalyse zeigt, dass der Strombedarf in der Batteriefertigung und die Produktion des NMC-Aktivmaterials einen Großteil der energiebedingten THG-Emissionen verursachen.

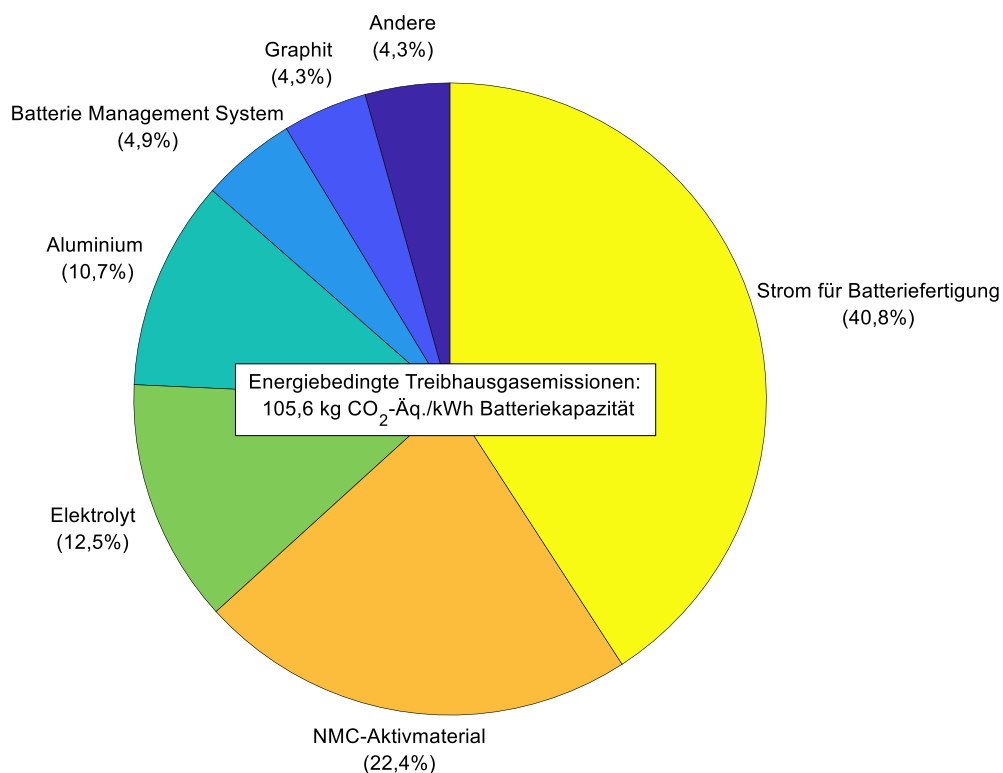


Abbildung 3-1: Klimawirksamkeit der Batterieproduktion und Anteil der Prozesse

Der tatsächliche Strombedarf in der Batteriefertigung ist mit Unsicherheiten behaftet und liegt in bisherigen Ökobilanzstudien meist im Bereich von unter 10 bis knapp 170 kWh/kWh Batteriekapazität /ELL-01 17/. Weiterhin sind die mit diesem Strombedarf einhergehenden Emissionen stark von dem Standort der Batteriefertigung und dem dort vorherrschenden Strommix abhängig. In **Abbildung 3-2** werden daher die THG-Emissionen der gesamten Batterieproduktion in kg CO₂-Äq./kWh Batteriekapazität in Abhängigkeit des Strombedarfs für die Batteriefertigung und des Emissionsfaktors für den dort eingesetzten Strom dargestellt.

Es zeigt sich, dass sich die Klimabilanz der Traktionsbatterie erheblich verbessert, wenn der Fertigungsprozess in Ländern mit einem niedrigen Emissionsfaktor stattfindet bzw. der Strombedarf durch EE gedeckt wird. Wird beispielsweise weiterhin von einem Strombedarf von knapp 50 kWh je kWh Batteriekapazität für die industrielle Batteriefertigung ausgegangen, aber für den Emissionsfaktor nicht der durch China dominierte, sondern der aktuelle deutsche Strommix von ca. 0,5 kg CO₂-Äq./kWh angesetzt, so reduzieren sich die Emissionen der Batterieproduktion um 18 % auf 87 kg CO₂-Äq./kWh Batteriekapazität. Im Falle einer zunehmenden Bereitstellung des Stroms für die Batteriefertigung aus EE nähern sich die energiebedingten THG-Emissionen der Batterieproduktion den Emissionen für die Rohstoffgewinnung und Materialproduktion in Höhe von 62 kg CO₂-Äq./kWh Batteriekapazität an.

Zudem ist die Klimabilanz der Batterieproduktion stark von dem Strombedarf in der Batteriefertigung abhängig. Während in der vorliegenden Analyse auf Daten der industriellen Anlage aus /ANLA-01 17/ zurückgegriffen wurde, verschlechtert sich die Klimabilanz der Batterieproduktion für den Strombedarf von Pilotanlagen (obere Grenze der in /ELL-01 17/ ausgewiesene Werte) wie in Abbildung 3-2 dargestellt. Der geringere

spezifische Energiebedarf je produzierter Batteriekapazität von industriellen Anlagen lässt sich durch Skaleneffekte und Prozessoptimierung erklären.

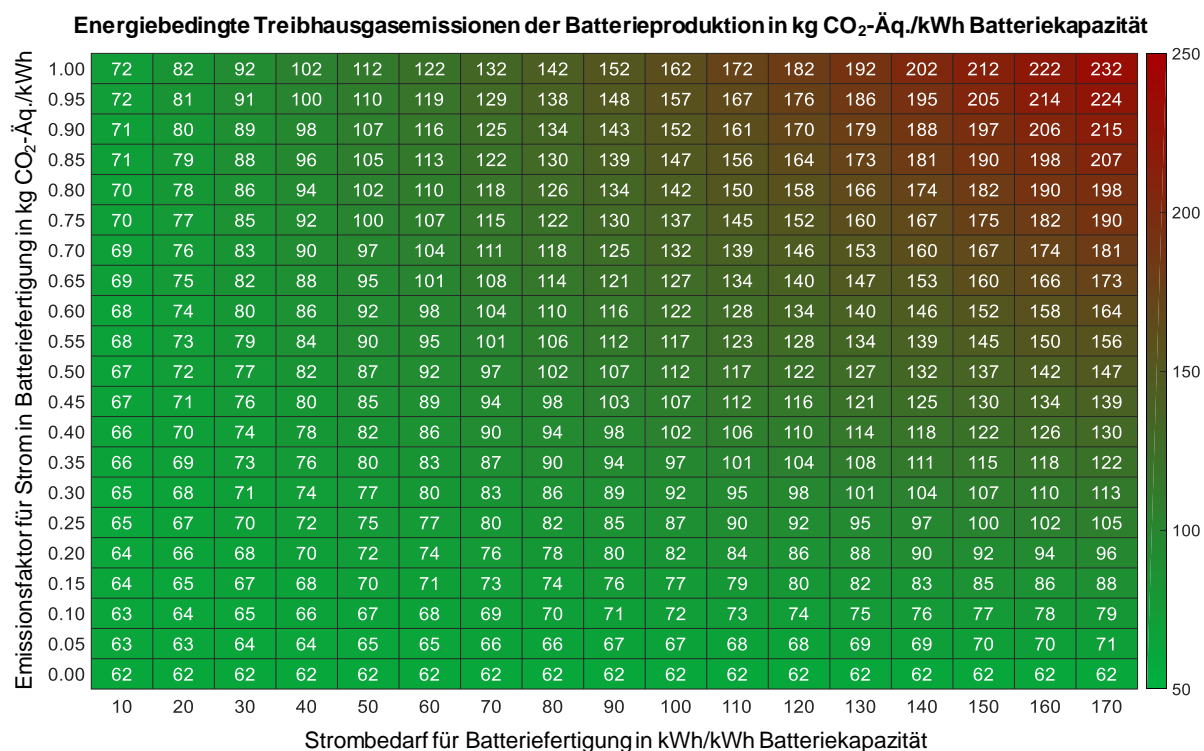


Abbildung 3-2: *Auswirkung des Strombedarfs und des Emissionsfaktors für Strom in der Batterieherstellung auf die Klimawirksamkeit der Batterieproduktion*

Ein weiterer Parameter, der sich auf die energiebedingten THG-Emissionen des Batteriesystems auswirkt, ist die Herkunft des Aluminiums. Dabei erhöhen sich diese im Fall einer ausschließlichen Verwendung von Primäraluminium auf 113 kg CO₂-Äq. und verringern sich für Sekundäraluminium auf 97 kg CO₂-Äq. je kWh Batteriekapazität.

Da die Ergebnisse von der Materialzusammensetzung und Energiedichte abhängig sind und sich diese je nach Batteriesystem unterscheiden, wird die Berechnung noch einmal für das in Cerdas et al. /CERD-01 18/ beschriebene Batteriesystem durchgeführt. Die Materialzusammensetzung unterscheidet sich gegenüber dem Referenzsystem (vgl. Tabelle 2-1) vor allem durch niedrigere Anteile von Graphit (13 %) und Aluminium (5 %) und einen wesentlich größeren Anteil von Stahl (28 %) am Gesamtgewicht. Zudem kommt das kobalthaltigere NMC111 zum Einsatz. Die Erhöhung der energiebedingten THG-Emissionen für die Batterieproduktion auf 113 kg CO₂-Äq./kWh Batteriekapazität ist jedoch nicht auf die Materialzusammensetzung, sondern auf die niedrigere Energiedichte des Batteriesystems von 132 Wh/kg zurückzuführen.

Es lässt sich somit festhalten, dass die energiebedingten THG-Emissionen für die Batterieproduktion in Abhängigkeit der genauen Zusammensetzung und Energiedichte des Batteriesystems derzeit im Bereich von gut 100 kg CO₂-Äq./kWh Batteriekapazität liegen. Dabei sind in etwa die Hälfte der Emissionen auf die Materialproduktion und die andere Hälfte auf die Batterieherstellung zurückzuführen. Dieser Wert gilt für einen

Strombedarf in der Batteriefertigung von knapp 50 kWh/kWh Batteriekapazität und einen Emissionsfaktor für Strom von 0,9 kg/kWh, der durch den asiatischen Markt dominiert wird. Die Emissionen für die Batterieproduktion können im Falle einer zu erwartenden Effizienzsteigerung des Batteriefertigungsprozesses sowie einer zunehmenden Bereitstellung des Strombedarfs in der Batteriefertigung durch EE folglich um nahezu die Hälfte gesenkt werden.

4 Gegenüberstellung von Elektro- und Benzinfahrzeug

Im Folgenden wird eine Einordnung der berechneten 105,6 kg CO₂-Äq. je kWh produzierter Batteriekapazität durch einen vereinfachten Fahrzeugvergleich vorgenommen. Mit diesem Vergleich soll insbesondere die Abhängigkeit eines Fahrzeugvergleichs vom geladenen Strom verdeutlicht werden. Da der Fokus nicht auf dem Ausweisen absoluter Werte für die gesamte Fahrzeugproduktion liegt, wird die Klimawirkung der übrigen Fahrzeugkomponenten vereinfachend Hawkins et al. /HAW-01 13/ entnommen.

Gemäß /HAW-01 13/ ergeben sich für die Produktion des Benzinfahrzeugs THG-Emissionen in Höhe von ca. 6,6 t CO₂-Äq., während sich die THG-Emissionen für das Elektrofahrzeug ohne Batteriesystem mit 6,8 t CO₂-Äq. in der gleichen Größenordnung bewegen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen des Vergleichs des KEA von konventionellen und elektrischen Antriebssträngen /KNO-01 11/. Die Gesamtemissionen für die Produktion eines Elektrofahrzeugs inklusive Batteriesystem mit einer Kapazität von 30 kWh belaufen sich unter Berücksichtigung der zuvor dargestellten Ergebnisse folglich auf 10 t CO₂-Äquivalente.

Die Ergebnisse des Vergleichs in **Abbildung 4-1** gelten für Fahrzeuge der Kompaktklasse mit Verbräuchen von 5,9 l/100 km für den Benziner und 17,3 kWh/100 km für das Elektrofahrzeug sowie den weiteren in Kapitel 2 beschriebenen Annahmen und Datensätzen. Die Emissionen in der Betriebsphase wurden auf Well-to-Wheel-Basis bestimmt und beinhalten folglich auch die Bereitstellung der Brennstoffe und des geladenen Stroms. Es ist zu beachten, dass den im Folgenden ausgewiesenen Amortisationsentfernungen und -dauern die Annahme zugrunde liegt, dass die Jahresfahrleistung, Lebensdauer und Auslastung beider Fahrzeugtypen in einer gleichen Größenordnung liegen. Potenzielle Vorteile von Verbrennern, die sich aus größeren Reichweiten ergeben, werden durch diesen Vergleich nicht abgebildet.

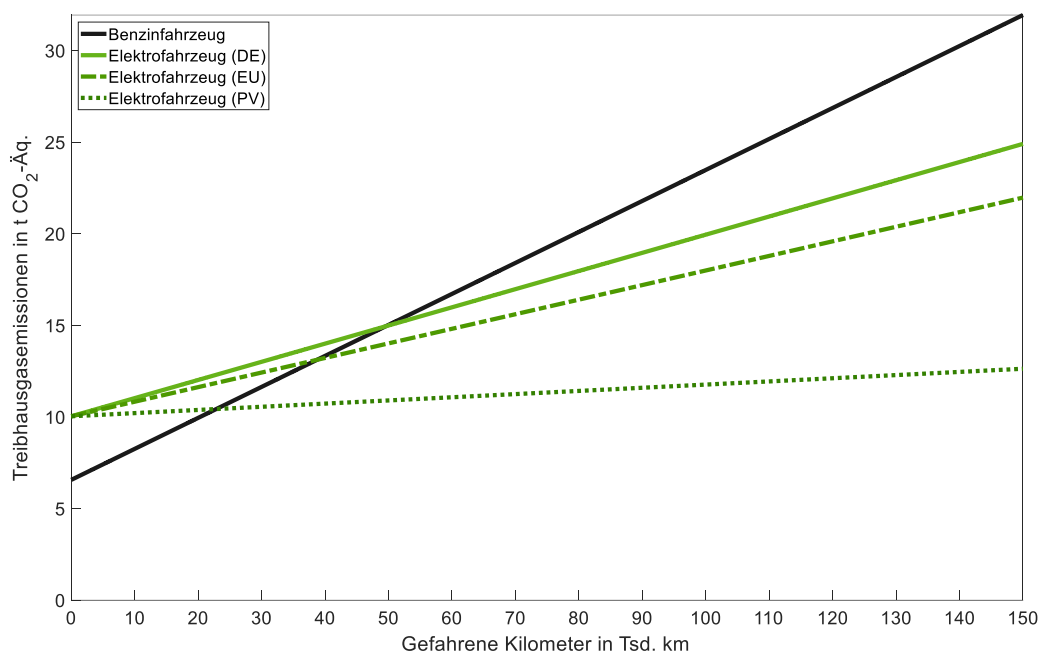


Abbildung 4-1: Klimawirksamkeit eines Benzin- und eines batterieelektrischen Fahrzeugs der Kompaktklasse in Abhängigkeit der Fahrleistung und des geladenen Stroms (DE: deutscher Strommix, EU: europäischer Strommix, PV: Photovoltaik)

Es zeigt sich, dass das Elektrofahrzeug im Falle eines Ladens mit dem deutschen Strommix aus dem Jahr 2015 (Emissionsfaktor: 0,58 kg CO₂-Äq./kWh, EE-Anteil: 29 %) ab einer gefahrenen Strecke von ca. 50.000 km aus Emissionssicht besser abschneidet als das Benzinfahrzeug. Die Berechnung dieser Amortisationsentfernung erfolgt nach **Formel (1)**.

$$d_{am} = \frac{E_{P,Ben} - E_{P,El}}{e_{B,El} - e_{B,Ben}} \quad (1)$$

d_{am}	Amortisationsentfernung in km
$E_{P,Ben}$	THG-Emissionen für die Produktion des Benzinfahrzeugs in kg CO ₂ -Äq.
$E_{P,El}$	THG-Emissionen für die Produktion des Elektrofahrzeugs in kg CO ₂ -Äq.
$e_{B,Ben}$	Spezifische THG-Emissionen im Betrieb des Benzinfahrzeugs in kg CO ₂ -Äq./km
$e_{B,El}$	Spezifische THG-Emissionen im Betrieb des Elektrofahrzeugs in kg CO ₂ -Äq./km

Für eine Jahresfahrleistung von in etwa 14.000 km entspricht die berechnete Entfernung einer Amortisationsdauer von 3,6 Jahren. Diese reduziert sich für den EU-Strommix (0,46 kg CO₂-Äq./kWh) auf knapp 2,8 Jahre und für Strom aus Photovoltaik (0,1 kg CO₂-Äq./kWh) auf 1,6 Jahre.

Die Ergebnisse zeigen zudem, dass selbst im Falle eines noch sehr durch konventionelle Kraftwerke geprägten Strommixes die Mehremissionen für die Produktion des Elektrofahrzeugs durch die geringeren Emissionen im Betrieb ausgeglichen werden. Dies ist auf den geringeren Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors im Vergleich zu einem Elektromotor zurückzuführen. Erst ab einem Emissionsfaktor des geladenen Stroms von über 0,98 kg CO₂-Äq./kWh sind die betriebsbedingten Emissionen eines Benzinfahrzeugs geringer als die eines Elektrofahrzeugs.

Eine Sensitivitätsanalyse verdeutlicht, dass die Amortisationsdauer des Elektrofahrzeugs nicht nur von dem geladenen Strom, sondern von weiteren Parametern abhängig ist. So erhöht sich die Amortisationsdauer im Falle von Strom aus Photovoltaik von 1,6 auf 2,1 Jahre, wenn das Elektrofahrzeug mit einem Dieselfahrzeug verglichen wird, da dieses im Betrieb geringere THG-Emissionen als das Benzinfahrzeug aufweist. Zudem ist die Amortisationsdauer von der Größe der Traktionsbatterie abhängig und beträgt 2,6 Jahre bei einer vereinfachten Hochrechnung der Ergebnisse für das beschriebene 30 kWh-Batteriesystem auf eine Batterie mit 50 kWh Kapazität. Gemäß aktuellem Trend ist jedoch zukünftig von einer Erhöhung der Energiedichte und somit einer Senkung der spezifischen THG-Emissionen je kWh Batterie auszugehen. Weiterhin kann der Fußabdruck der Batterie auf bis zu 62 kg CO₂-Äq. je kWh Batteriekapazität reduziert werden (vgl. Abbildung 3-2), wenn in der Batterieproduktion erneuerbarer Strom eingesetzt wird. Die Amortisationsdauer sinkt in diesem Fall für Strom aus Photovoltaik von 1,6 auf 1,4 Jahre.

5 Literatur

- ADAC-01 18** ADAC EcoTest . In: www.adac.de/infotestrat/tests/eco-test/. (Abruf am 2018-03-14); München: ADAC e.V., 2018.
- AGEB-02 17** Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2015 - Stand: 28.02.2017. Berlin: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB), 2017
- ANL-01 17** BatPac Version 3.1: <http://www.cse.anl.gov/batpac/download.php>; Argonne: Argonne National Laboratory, 2017 (überarbeitet: 2017).
- ANLA-01 17** Dai, Q. et al.: Update of Life Cycle Analysis of Lithium-ion Batteries in the GREET Model. Chicago: Argonne Nationale Laboratory (ANL), 2017.
- BFRW-01 18** Energiedaten: Gesamtausgabe. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2018.
- CERD-01 18** Cerdas, Felipe et al.: Exploring the Effect of Increased Energy Density on the Environmental Impacts of Traction Batteries: A Comparison of Energy Optimized Lithium-Ion and Lithium-Sulfur Batteries for Mobility Applications. In: *Energies* 11(1). Basel: MDPI, 2018.
- ECOINV-01 17** The ecoinvent Database, Version 3.4. In: www.ecoinvent.org. Zürich: ecoinvent, 2017
- ELG-01 17** Elgowainy, Amgad et al.: Software GREET (version: 1.3.0.13239). Chicago: UChicago Argonne, LLC as Operator of Argonne National Laboratory under Contract No. DE-AC02-06CH11357 with the Department of Energy (DOE), 2017.
- ELL-01 17** Ellingsen, Linda et al.: Identifying key assumptions and differences in life cycle assessment studies of lithium-ion traction batteries with focus on greenhouse gas emissions. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 55, 82-90. Amsterdam: Elsevier, 2017.
- FFE-20 17** Guminski, Andrej; von Roon, Serafin: Transition Towards an “All-electric World” - Developing a Merit-Order of Electrification for the German Energy System in: 10. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien. Wien, Österreich: Technische Universität Wien, 2017
- HAW-01 13** Hawkins, Troy et al.: Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles - supporting information. In: *Journal of Industrial Ecology* 17(1), 53-64. Hoboken: Wiley, 2013.
- IINAS-01 17** Ausgewählte Ergebnisse von GEMIS 4.95: http://iinas.org/tl_files/iinas/downloads/GEMIS/2017_GEMIS-Ergebnisse-Auszug.xlsx; Darmstadt: Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien (IINAS), 2017.
- ISI-09 17** Thielmann, Axel et al.: Energiespeicher-Roadmap (Update 2017) - Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2017.
- KBA-11 18** Kurzbericht - Verkehr in Kilometern, Jahr 2017. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt, 2018.

-
- KNO-01 11** Knodt, Janina: Analyse und Vergleich des Kumulierten Energieaufwandes (KEA) der Antriebsstränge für konventionelle und elektrische Automobile . Diplomarbeit. Herausgegeben Universität Bayreuth, betreut durch Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE): München, Bayreuth, 2011.
- RWTH-05 15** Kampker, Achim et al.: Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batteriezelle. Aachen: RWTH Aachen, 2015.
- TRE-01 16** Stolz, Philippe et al.: Life Cycle Inventories of Aluminium and Aluminium Profiles. Uster: treeze, 2016.
- UBA-03 16** Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2016 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2014. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2016
- UBA-11 17** Icha, Petra et al.: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990-2016. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2017.
- YUA-01 17** Yuan, Chris et al.: Manufacturing energy analysis of lithium ion battery pack for electric vehicles. In: CIRP Annals - Manufacturing Technolog 66(1), 53-56. Paris: CIRP, 2017.