

# Klimabilanz von Elektrofahrzeugen – Ein Plädoyer für mehr Sachlichkeit

**Autoren:** Anika Regett, Wolfgang Mauch, Ulrich Wagner

**Institution:** Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) e.V.

## Einleitung

Der Verkehrssektor war im Jahr 2015 mit einem Primärenergieverbrauch von 3433 PJ und energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 204 Mio. t für 25,8 % des gesamten Primärenergieverbrauchs und 27,6 % der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland verantwortlich (nach [1]). Anders als im Bereitstellungssektor befinden sich die Emissionen im Verkehr seit 1990 auf einem konstanten Niveau [2].

Wenngleich der Verkehrssektor in dieser Hinsicht stagniert, stellt ein Abrücken von den ambitionierten Zielen zur Treibhausgasminderung von 40% bis 2040 und 80-95% bis 2050 gegenüber 1990 [3] angesichts des Pariser Klimaabkommens keine Option dar. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, welchen Beitrag Elektrostraßenfahrzeuge (ESF) zur Einhaltung der Klimaziele leisten können.

Die Wahrnehmung von ESF, eine bereits seit Ende des 19. Jahrhunderts bekannte Technologie, schwankte im Laufe der Jahrzehnte immer wieder zwischen Elektro-Hype und Elektrophobie. Die Bedeutung von ESF für die Ressourcenschonung und den Klimaschutz hat erst im letzten Jahrzehnt im Zuge der Energiewende an Fahrt aufgenommen. In diesem Zusammenhang wird die tatsächliche Umweltbilanz von ESF, zum Teil sehr emotional, zur Debatte gestellt.

So ist im Mai 2017 die Studie „The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries“ [4] des IVL (Swedish Environmental Research Institute) erschienen, die eine Literaturübersicht bestehender Ökobilanzstudien zur Produktion und Entsorgung von Elektrofahrzeugbatterien darstellt. Sie hat große mediale Aufmerksamkeit erhalten und die Ergebnisse wurden kontrovers diskutiert. Dabei wurden Vergleiche von ESF mit konventionellen verbrennungsmotorischen Fahrzeugen (VKM) aufgestellt. Es ergaben sich emissionsbezogene „Amortisationsdauern“ von Elektrofahrzeugen von drei bis acht Jahren.

Daraufhin hat das IVL im Juli 2017 eine Stellungnahme [5] veröffentlicht, um Fehlinterpretationen der Studie richtig zu stellen. In dieser Stellungnahme stellen die Autoren explizit klar, dass die Studie einen Überblick über die Ergebnisse bestehender Studien zum aktuellen Stand der Technik der Batterieproduktion gibt, sich die Technologie jedoch rasant entwickelt und somit ein großes Verbesserungspotenzial besteht. Zudem wird darauf hingewiesen, dass die in verschiedenen Medien aufgestellten Fahrzeugvergleiche auf den in der Studie ausgewiesenen 150-200 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (Äq.) pro produzierter Kilowattstunde (kWh) Batteriekapazität beruhen und somit noch keine zukünftigen Verbesserungspotenziale beinhalten. Weiterhin wird auf die Notwendigkeit zur Verbesserung der Datenbasis hingewiesen.

Hier noch einmal die wichtigsten Ergebnisse der Studie in Kürze:

- Gemäß der Literaturübersicht ist die Batterieproduktion aktuell mit **Treibhausgasemissionen von 150-200 kg CO<sub>2</sub>-Äq. je kWh Batteriekapazität verbunden**. Dies gilt für die Annahme eines Energiebedarfs der Batterieproduktion von 97-181 kWh je produzierter kWh Batteriekapazität.
- In etwa die  **Hälfte der Emissionen**  entfallen auf die **Batterie- und Zellfertigung**, die andere Hälfte auf die **Bereitstellung der Ausgangsmaterialien**.
- Der **Emissionsfaktor des in der Fertigung eingesetzten Stroms** hat einen entscheidenden Einfluss auf die Klimabilanz. Diese ist somit stark von den zugrunde gelegten Annahmen abhängig.
- Die **Umweltbilanz von Batterien** kann durch die Steigerung der Energieeffizienz und den Einsatz von erneuerbarem Strom in der Batterie- und Zellfertigung verbessert werden. Weitere Potenziale liefern die **Reduktion des Chemikalieneinsatzes** sowie die Verbesserung von **Recyclingverfahren**. Es gibt somit keine abschließende Antwort auf die Umweltbilanz von Batterien.

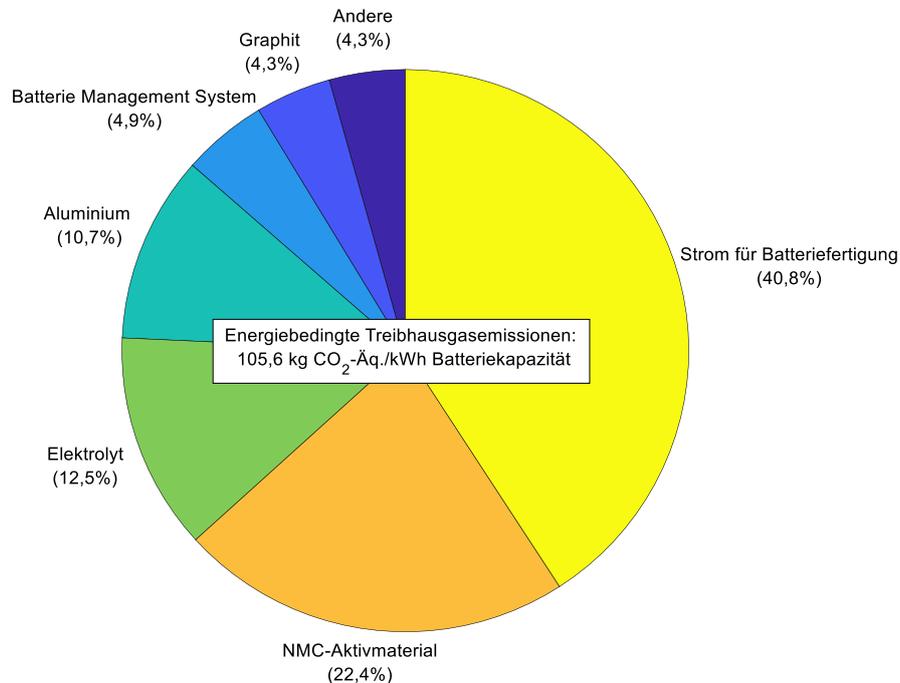
Die FfE beschäftigt sich seit Jahrzehnten mit Fragen der ganzheitlichen Bilanzierung von Produkten und Dienstleistungen [6] und war auch Initiator der VDI-Richtlinie 4600 zum Kumulierten Energieaufwand (KEA) [7]. Dabei befasst sie sich bereits seit vielen Jahren auch mit Vergleichen von unterschiedlichen Antriebskonzepten [8].

Für mehr Sachlichkeit in der aktuellen Diskussion hat sich die FfE daher im Rahmen des Projekts „Ressourcensicht auf die Energiezukunft“, das durch die Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg und die Hans und Klementia Langmatz Stiftung gefördert wird, intensiv mit der Klimabilanz der Batterieproduktion befasst. Im Folgenden werden die Kernergebnisse der Analyse zusammengefasst und diskutiert. Eine ausführliche Erläuterung des Untersuchungsrahmens, der Berechnungsmethodik und der Datenbasis kann dem Begleitdokument entnommen werden, das auf der Projektwebseite [9] zum Download zur Verfügung steht.

## Klimabilanz der Batterieproduktion: Eine Frage des Wie und Wo

Die Bewertung der Klimabilanz der Batterieproduktion erfolgt durch die Berechnung der energiebedingten Treibhausgas (THG)-Emissionen bezogen auf eine **kWh produzierte Elektrofahrzeugbatterie**. Diese beinhalten alle THG-Emissionen, die mit der **Bereitstellung und Umwandlung von Energie für die Materialproduktion sowie die Batterieproduktion verbunden sind**. Das untersuchte Lithium-Ionen-Batteriesystem bestehend aus einer **Nickel-Mangan-Kobalt (NMC)-Kathode** und einer **Graphit-Anode** nach [10] hat eine Gesamtmasse von 177 kg und eine Batteriekapazität von 30 kWh. Als Energiebedarf für die Batterieproduktion, die auch die Fertigung der Zellen beinhaltet, wird der in [11] für ausgewiesene Wert von knapp 50 kWh je produzierter Kilowattstunde Batteriekapazität angesetzt, wovon ein großer Anteil auf energieintensive Trocknungsprozesse entfällt. Dieser Energiebedarf stammt aus einer industriellen Anlage in China und liegt weit unter den in der IVL-Studie verwendeten Werten. Es wird angenommen, dass der Energiebedarf durch elektrische Energie mit einem vergleichsweise hohen Emissionsfaktor für Strom von 0,9 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kWh gedeckt wird. Dieser Emissionsfaktor spiegelt den Anteil der batterieproduzierenden Regionen in Anlehnung an das kurzfristige Trendszenario aus der Energiespeicher-Roadmap [12] wider und wird mit einem Anteil von 49 % durch China dominiert.

Unter Berücksichtigung der im Begleitdokument ausführlich dokumentierten Annahmen und Daten ergeben sich energiebedingte THG-Emissionen in Höhe von knapp 106 kg CO<sub>2</sub>-Äq. je kWh produzierter Batteriekapazität. Die Beitragsanalyse in **Abbildung 1** zeigt, dass gut 40 % der Emissionen auf den Strombedarf in der Batteriefertigung (inklusive Zellen) und knapp ein Viertel auf die Produktion des NMC-Aktivmaterials zurückzuführen sind.



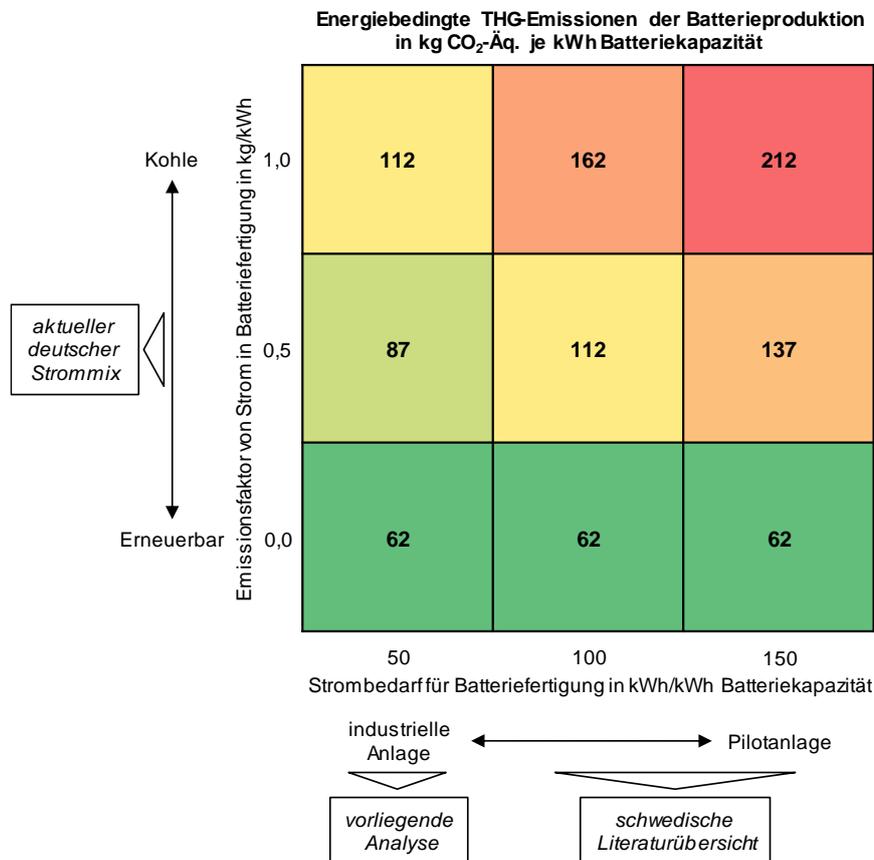
**Abbildung 1:** Klimawirksamkeit der Batterieproduktion und Anteil der Prozesse

Der Energiebedarf in der Batteriefertigung ist jedoch mit Unsicherheiten behaftet und liegt in bisherigen Ökobilanzstudien laut [13] meist im Bereich von unter 10 bis knapp 170 kWh je produzierter kWh produzierter Batteriekapazität. Weiterhin sind, wie auch in der IVL-Studie [4] diskutiert, die mit diesem Strombedarf einhergehenden Emissionen stark von dem am Standort der Batteriefertigung vorherrschenden Strommix abhängig. In **Abbildung 2** werden daher die THG-Emissionen der gesamten Batterieproduktion in kg CO<sub>2</sub>-Äq. je kWh Batteriekapazität in Abhängigkeit des Strombedarfs für die Batteriefertigung und des Emissionsfaktors für den in der Batteriefertigung eingesetzten Stroms dargestellt.

Es zeigt sich, dass sich die Klimabilanz der Traktionsbatterie erheblich verbessert, wenn der Fertigungsprozess in Ländern mit einem niedrigen Emissionsfaktor von Strom stattfindet bzw. der Strombedarf durch Erneuerbare Energien (EE) gedeckt wird. Wird beispielsweise weiterhin von einem Strombedarf von knapp 50 kWh je produzierter kWh Batteriekapazität für die industrielle Batteriefertigung ausgegangen, aber für den Emissionsfaktor nicht Kohlestrom, sondern der aktuelle deutsche Strommix angesetzt, so reduzieren sich die Emissionen der Batterieproduktion auf 87 kg CO<sub>2</sub>-Äq. je kWh Batteriekapazität. Wird der Strom für die Batteriefertigung zunehmend aus EE bereitgestellt, nähern sich die energiebedingten THG-Emissionen der Batterieproduktion den Emissionen für die Rohstoffgewinnung und Materialproduktion in Höhe von 62 kg CO<sub>2</sub>-Äq. je 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 [11]

zurückgegriffen wurde, verschlechtert sich das Ergebnis für den Strombedarf von Pilotanlagen wie in Abbildung 2 dargestellt. Der geringere spezifische Energiebedarf bezogen auf die produzierte Batteriekapazität lässt sich durch Skaleneffekte und Prozessoptimierung erklären.



**Abbildung 2:** Auswirkung des Strombedarfs und des Emissionsfaktors von Strom in der Batterieproduktion auf die Treibhausgas (THG)-Emissionen der Batterieproduktion

Die Ergebnisse verdeutlichen die starke Abhängigkeit der Klimabilanz der Batterie von dem Stand der Technik des Produktionsprozesses sowie dem Standort der Produktionsanlage. Für die Produktion von Batteriezellen und -systemen im industriellen Maßstab ist zukünftig mit einer Senkung des Strombedarfs und somit einer Verbesserung der Klimabilanz zu rechnen. Weiterhin sollte bei der Standortwahl neuer Produktionsanlagen auch die Energieversorgung Berücksichtigung finden, da diese einen starken Effekt auf die Klimabilanz der produzierten Batterien hat.

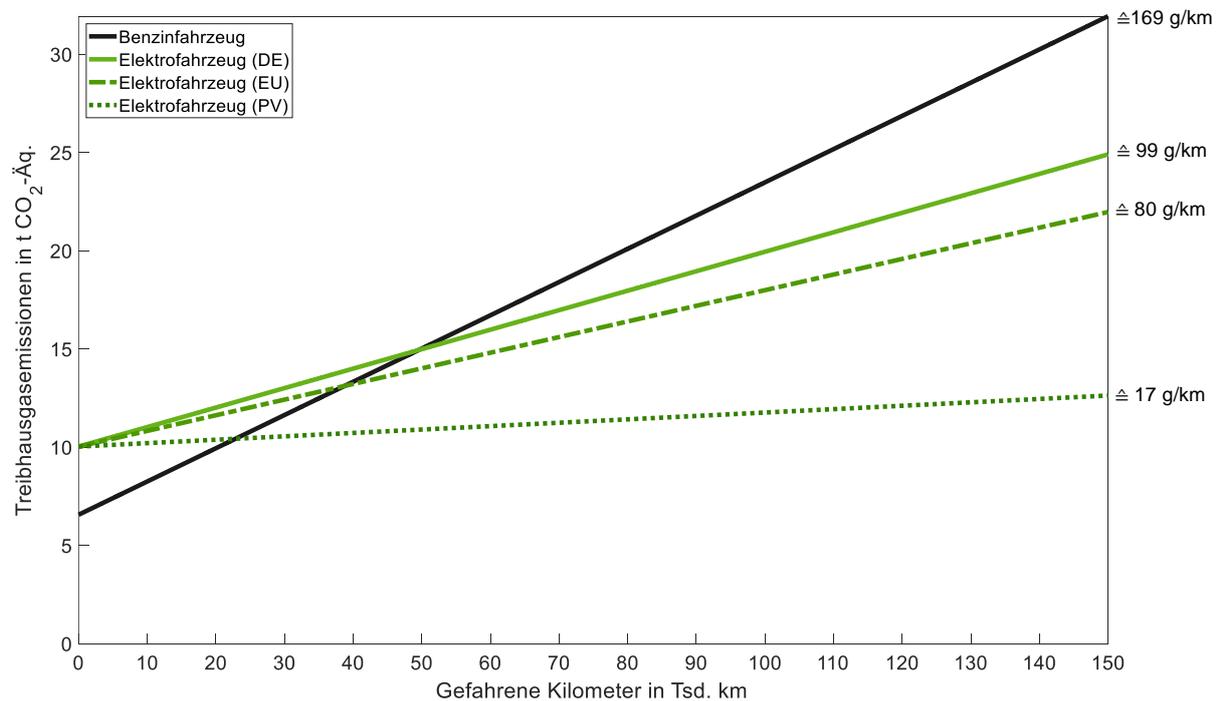
### Elektrofahrzeug vs. Benziner: die Abhängigkeit vom geladenen Strom

Im Rahmen der Diskussion der IVL-Studie kam auch die Frage nach der sogenannten „Amortisationsdauer“ eines Elektrofahrzeugs gegenüber einem konventionellen verbrennungsmotorischen Fahrzeug auf. Daher wird im Folgenden eine Einordnung der berechneten 105,6 kg CO<sub>2</sub>-Äq. je kWh produzierter Batteriekapazität (vgl. Abbildung 1) durch einen vereinfachten Fahrzeugvergleich vorgenommen. Es ist zu beachten, dass diesem Wert die oben beschriebenen Annahmen zugrunde liegen und er somit nicht den besten Fall aus Abbildung 2 widerspiegelt. 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. [15] entnommen.

Für den Standort Deutschland ergeben sich gemäß [15] für die Produktion des Benzinfahrzeugs THG-Emissionen in Höhe von ca. 6,6 t CO<sub>2</sub>-Äq., während sich die THG-Emissionen für das Elektrofahrzeug ohne Batteriesystem mit 6,8 t CO<sub>2</sub>-Äq. in der gleichen Größenordnung bewegen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen des an der FfE und der Universität Bayreuth durchgeführten Vergleichs des KEA von konventionellen und elektrischen Antriebssträngen [16]. Unter Berücksichtigung eines Batteriesystems mit einer Kapazität von 30 kWh, das gemäß [12] zu 57 % in Asien, 20 % in den USA, 12 % in Europa und 11 % in anderen Regionen hergestellt wird, belaufen sich die Gesamtemissionen für die Produktion eines Elektrofahrzeugs folglich auf 10 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente.

Die Ergebnisse des Vergleichs in **Abbildung 3** gelten für Fahrzeuge der Kompaktklasse mit Verbrauchswerten von 5,9 l/100 km für den Benziner und 17,3 kWh/100 km für das Elektrofahrzeug sowie den weiteren im Begleitdokument 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 gilt jedoch zu berücksichtigen, 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 3:** 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 CO<sub>2</sub>-Äq./kWh, EE-Anteil: 29 %) ab einer gefahrenen Strecke von ca. 50.000 km aus Emissionssicht besser abschneidet als das Benzinfahrzeug. Für eine durchschnittliche

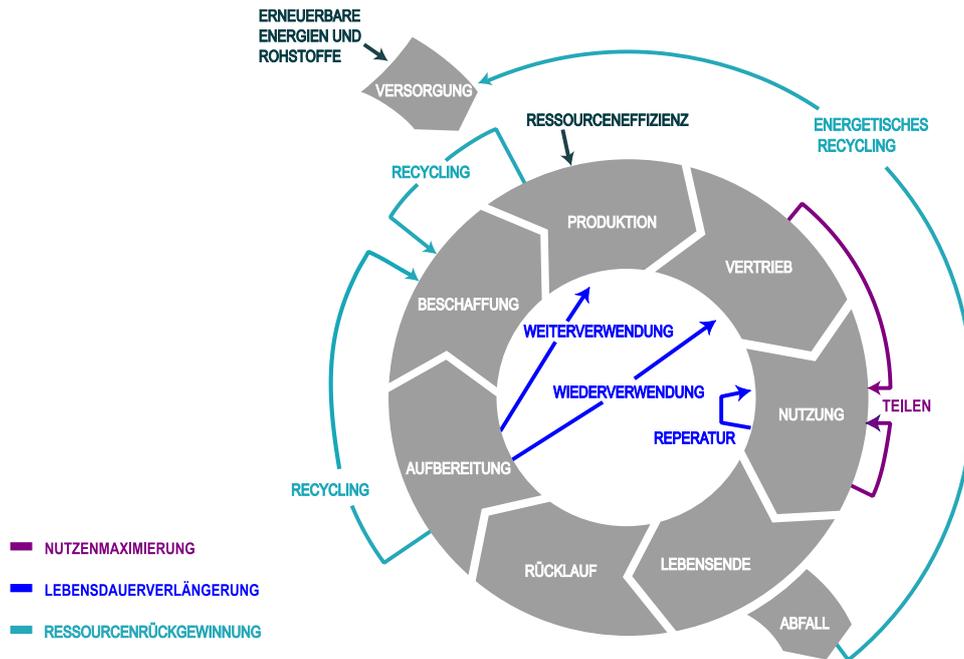
Jahresfahrleistung von in etwa 14.000 km gemäß Kraftfahrtbundesamt [17] entspricht die berechnete Entfernung einer Amortisationsdauer von 3,6 Jahren. Diese reduziert sich für den EU-Strommix (0,46 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kWh) auf knapp 2,8 Jahre und für Strom aus Photovoltaik (0,1 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kWh) auf 1,6 Jahre.

Die Ergebnisse zeigen zudem, dass selbst im Falle eines noch sehr durch konventionelle Kraftwerke geprägten Strommixes die Mehrmissionen 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Äq. je kWh Batteriekapazität reduziert werden (vgl. Abbildung 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.

## Verbesserungspotenziale durch Kreislaufwirtschaft

Die Kreislaufwirtschaft (Englisch: Circular Economy) ist eine Möglichkeit, den Ressourcenverbrauch zu senken und Umweltwirkungen zu mindern. Die Fragestellung, inwiefern kreislaufwirtschaftliche Ansätze (vgl. **Abbildung 4**) die Umwelt- und Ressourcenwirkung von Batterien als Kernelement der Elektromobilität mindern können, ist daher Gegenstand des Projekts „Ressourcensicht auf die Energiezukunft“ [9]. In diesem Kontext wird untersucht, welche Auswirkungen kreislaufwirtschaftliche Ansätze wie Sharing-Konzepte, Reuse-/Second-Life-Anwendungen und Recycling von Batterien auf die energiebedingten THG-Emissionen und die Nachfrage nach kritischen Rohstoffen wie Lithium und Kobalt haben.



**Abbildung 4:** Übersicht über mögliche Ansätze der Kreislaufwirtschaft in den verschiedenen Lebenszyklusphasen (eigene Grafik in Anlehnung an [18])

## Fazit

Nachdem in der Vergangenheit die Wahrnehmung von Elektrostraßenfahrzeugen (ESF) zwischen „Allheilmittel“ und „Placebo“ gewechselt hat, befinden wir uns nun an einem Punkt, an dem die Elektromobilität unumkehrbar an Fahrt aufgenommen hat. Unstrittig ist, dass ein elektrisch betriebenes Fahrzeug eine erheblich bessere Effizienz aufweist als ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Der höhere kumulierte Energieaufwand für die Herstellung des ESF – insbesondere der Traktionsbatterie – schmälert aktuell diesen Vorteil. Aber zum einen besteht bei der Produktion von Fahrbatterien noch erhebliches Reduktionspotenzial, zum anderen sind ESF (mit Batterie oder Brennstoffzelle) die aus heutiger Sicht einzige nennenswerte und unverzichtbare Alternative, um Erneuerbare Energien effizient und flächendeckend im Verkehrssektor zu integrieren. Entscheidend sind jetzt verstärkte Forschung und Entwicklung bei Fahrzeugbatterien, der Ladeinfrastruktur und im Betriebsmanagement der Fahrzeuge (z.B. Lademanagement zur Netzentlastung, zuverlässige Reichweitenanzeige).

Dieser Beitrag ist ein Plädoyer für mehr Sachlichkeit. Auf der einen Seite erfordert die Kommunikation wissenschaftlicher Ergebnisse durch Wissenschaftler oder Wissenschaftsjournalisten zwar eine Vereinfachung komplexer Sachverhalte. Auf der anderen Seite dürfen die zugrundeliegenden Annahmen und die Gültigkeit der dargestellten Ergebnisse nicht vernachlässigt werden, da dies wie im oben genannten Fall der schwedischen Studie zu gravierenden Fehlinterpretationen führen kann.

## Quellen

- [1] Rasch, M., Regett, A.; Pichlmaier, S. et al.: Eine anwendungsorientierte Emissionsbilanz - Kosteneffiziente und sektorenübergreifende Dekarbonisierung des Energiesystems in: BWK Ausgabe 03/2017, S. 38-42. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2017
- [2] Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen. Dessau: Umweltbundesamt (UBA), 2018
- [3] Sechster Monitoring-Bericht zur Energiewende - Berichtsjahr 2016. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2018.
- [4] Romare, M.; Dahllöf, L.: The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries - A Study with Focus on Current Technology and Batteries for light-duty vehicles. Stockholm: IVL Swedish Environmental Research Institute, 2017
- [5] IVL comments to reactions in media on battery study. In: [www.ivl.se/english/startpage/top-menu/pressroom/news/nyheter---arkiv/2017-07-03-ivl-comments-to-reactions-in-media-on-battery-study](http://www.ivl.se/english/startpage/top-menu/pressroom/news/nyheter---arkiv/2017-07-03-ivl-comments-to-reactions-in-media-on-battery-study). Stockholm: IVL Swedish Environmental Research Institute, 2017
- [6] Verbund-Forschungsvorhaben zur „Ganzheitlichen energetische Bilanzierung der Energiebereitstellung (GABIE)“. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FFE) e.V., 1996
- [7] VDI-Richtlinie 4600: Kumulierter Energieaufwand (KEA) - Begriffe, Berechnungsmethoden. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI) e.V., 2012
- [8] Corradini, R.; Krimmer, A.: Systemvergleich alternativer Antriebstechnologien - Primärenergetische Analyse der Herstellung und Nutzung alternativer Antriebstechnologien im Vergleich zu konventionellen Systemen für den Pkw-Bereich. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FFE) e.V., 2003
- [9] Regett, A. et al.: Laufendes Projekt: Ressourcensicht auf die Energiezukunft - Bewertung des Potenzials der Kreislaufwirtschaft zur Senkung des Ressourcenverbrauchs von Schlüsseltechnologien der Energiewende. In: <https://www.ffe.de/themen-und-methoden/ressourcen-und-klimaschutz/698-ressourcensicht-auf-die-energiezukunft>. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FFE), 2018
- [10] BatPac Version 3.1. Lemont: Argonne National Laboratory (ANL), 2017
- [11] Dai, Q. et al.: Update of Life Cycle Analysis of Lithium-ion Batteries in the GREET Model. Lemont: Argonne National Laboratory (ANL), 2017.
- [12] Thielmann, Axel et al.: Energiespeicher-Roadmap (Update 2017) - Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2017.
- [13] Ellingsen, L. 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, 2017.
- [14] The ecoinvent Database, Version 3.4. In: [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org). Zürich: ecoinvent, 2017
- [15] Hawkins, T. et al.: Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles - supporting information. In: Journal of Industrial Ecology 17(1), 53-64, 2013.
- [16] Knodt, J.: Analyse und Vergleich des Kumulierten Energieaufwandes (KEA) der Antriebsstränge für konventionelle und elektrische Automobile. Bayreuth/München: Universität Bayreuth/Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FFE) e.V., 2011
- [17] Kurzbericht - Verkehr in Kilometern, Jahr 2017. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), 2017
- [18] Circular Advantage - Innovative Business Models and Technologies to Create Value in a World without Limits to Growth. Dublin: Accenture, 2014