



Dokumentation

Einzelfragen zum Recycling von Elektrofahrzeugen
Recycling von Akkumulatoren in der Ökobilanzierung

Einzelfragen zum Recycling von Elektrofahrzeugen
Recycling von Akkumulatoren in der Ökobilanzierung

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 100/21
Abschluss der Arbeit: 16. Dezember 2021
Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und
Forschung

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste zu ökologischen Aspekten der Elektromobilität	5
3.	Ökobilanzierung in der Elektromobilität	6
4.	Ökologische Aspekte verschiedener Verfahrensschritte des Batterierecyclings	7

1. Einleitung

In Deutschland gibt es Recyclingbetriebe mit einer Gesamtkapazität von mindestens 20.000 t/anno, in denen lithiumhaltige Batterien recycelt werden. Das derzeit durchgeführte Recycling für Akkumulatoren der Elektromobilität sieht im Wesentlichen eine Rückgewinnung der metallhaltigen Bestandteile als Sekundärrohstoffe vor. Dieses Recyclingverfahren ist technisch aufwendig, energieaufwendig und entsprechend kostspielig. Die Wiederaufbereitung einer Tonne Lithium-Ionen-Batterien kostet mehrere Tausend Euro und rechnet sich beim jetzigen Stand der Technik nur, wenn die Batterie über einen hohen Kobaltanteil verfügt.¹

Die Autorin eines Beitrags des Bayerischen Rundfunks bezeichnet das Recycling und die Wiederverwertung als ein Zukunftsgeschäft und diskutiert die aktuellen ökonomischen und technischen Aspekte. Nach Aussage der Autorin werden Recycling-Unternehmen durch die Zunahme der Elektromobilität und durch die wachsende Menge der Alt-Akkumulatoren vor weitere Herausforderungen auch in der Quantität gestellt.²

Vor dem Recycling können ausrangierte Batterien aus Elektrofahrzeugen für andere Zwecke verwendet werden, für die sie noch leistungsfähig genug sind. Dadurch verlängert sich nicht nur die Nutzungsdauer, sondern auch der Zeitraum, um Recyclingkapazitäten zu erhöhen und verbesserte Recyclingverfahren zu entwickeln. Zu diesen „second-use“-Verwendungen gehören die Bereitstellung von Regelleistungen für Stromnetzbetreiber oder der Einsatz als Hausspeicher, der an Photovoltaikanlagen gekoppelt ist. Diese Akkumulatoren können zudem in der Notstromversorgung, für den Antrieb von Flurförderfahrzeugen, im Spitzenlastmanagement von Großverbrauchern oder zur Leistungspufferung in Schnellladesäulen eine Wiederverwendung finden.³

In der Antwort der Bundesregierung zur Kleinen Anfrage der Fraktion der AfD „Recycling- und Entsorgungsstrategien für Elektroautobatterien“ finden sich umfangreiche Informationen u.a. zum Recyclingsystem und Recyclingprozess von Akkumulatoren der Elektromobilität. Die Antwort der Bundesregierung gibt Auskunft über den Rechtsrahmen, beschreibt den grundsätzlichen Recyclingprozess, liefert eine Aufstellung der Verfahrenstechnologien (Seite 9) und beschreibt die von der Bundesregierung geförderten Vorhaben und Projekte.⁴

-
- 1 Antwort der Bundesregierung zur Kleinen Anfrage der Fraktion der AfD (2020). „Recycling- und Entsorgungsstrategien für Elektroautobatterien“, BT-Drs 19/9322, <https://dserver.bundestag.de/btd/19/193/1919322.pdf>
 - 2 Grimmer, C. BR (2021). „Wohin mit ausgepowerten E-Auto-Batterien?“, <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/batterien-elektroautos-recycling-101.html>
 - 3 Antwort der Bundesregierung zur Kleinen Anfrage der Fraktion der AfD (2020). „Recycling- und Entsorgungsstrategien für Elektroautobatterien“, BT-Drs 19/9322, <https://dserver.bundestag.de/btd/19/193/1919322.pdf>
Umweltbundesamt (2019). „Altfahrzeugverwertung und Fahrzeugverbleib“, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altfahrzeugverwertung-fahrzeugverbleib#2019-knapp-eine-halbe-million-altfahrzeuge>
 - 4 Antwort der Bundesregierung zur Kleinen Anfrage der Fraktion der AfD (2020). „Recycling- und Entsorgungsstrategien für Elektroautobatterien“, BT-Drs 19/9322, <https://dserver.bundestag.de/btd/19/193/1919322.pdf>

Mit der Weiterentwicklung der Recycling-Verfahren tritt die Betrachtung des Recyclings in Ökobilanzierungen weiter in den Fokus. Experten sehen in der Erarbeitung von effektiven Recycling-Verfahren ein hohes Potential für die Verbesserung der Ökobilanzierung der Akkumulatoren.⁵

Die vorliegende Arbeit liefert einen Einblick in die Bewertung des Recyclings von Akkumulatoren bei der Betrachtung von Ökobilanzierungen von Elektrofahrzeugen. Die Begriffe Batterien und Akkumulatoren werden dabei synonym verwendet.

2. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste zu ökologischen Aspekten der Elektromobilität

Folgende Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste behandeln unterschiedliche Aspekte der Ökobilanzierung von Elektrofahrzeugen:

Wissenschaftliche Dienste (2019). „Einzelfragen zu Elektrofahrzeugen – Ökobilanzierung“, <https://www.bundestag.de/resource/blob/651462/cfb52980172a05f419a58fcf3d330474/WD-8-060-19-pdf-data.pdf>.

Diese Zusammenstellung beinhaltet Literaturangaben zu Aspekten der Ökobilanzierung von Elektrofahrzeugen und den **möglichen Umweltschäden** der Batteriespeicher.

Der Sachstand „Nachhaltigkeit in der Elektromobilität – **Ökologische und soziale Aspekte** der Speicherbatterien“ befasst sich u.a. auch mit der Ökobilanzierung, dem Treibhauspotential, der Umweltbeeinträchtigung und dem Recyclingverfahren insbesondere von Lithium-Ionen-Batterien. Kapitel 4 (Seite 12-13) befasst sich mit den ökologischen und ökonomischen Aspekten des Batterierecyclings. Wissenschaftliche Dienste (2019).

<https://www.bundestag.de/resource/blob/813478/29e75079eee43a9c948a64c59921688e/WD-8-081-19-pdf-data.pdf>.

Die Arbeit „Ökobilanzierung von Energiespeichern für Elektrofahrzeuge“ enthält Hinweise zur Normierung der Ökobilanzierung und liefert Beispiele für **unterschiedliche Vorgehensweisen und Fragestellungen** verschiedener Studien und Metastudien zu Ökobilanzierungen, Wissenschaftliche Dienste (2018). <https://www.bundestag.de/resource/blob/700558/3b2ea0c2f3f021672be4759f00a1c474/WD-8-099-18-S-pdf-data.pdf>.

Die folgende Dokumentation stellt Literaturquellen zur Ökobilanzierung im Fahrzeugsektor für **unterschiedliche Antriebssysteme** zusammen. Eine Grafik des Zentrums für Klima, Energie und Gesellschaft zur Klimabilanz zu aktuellen Antriebssystemen zeigt exemplarisch für das Beispiel „Golf“ die CO₂-Äquivalente für die Fahrzeugherstellung, Kraftstoff-

Zu den verfügbaren Recyclingprozessen siehe auch Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI im Auftrag der IMPULS-Stiftung (2021). Kurzstudie „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau“, https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2021/VDMA_Kurzstudie_Batterierecycling.pdf, Kapitel 3

5 Agora Verkehrswende (2019). „Klimabilanz von Elektroautos - Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial“, https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf

und Energiebereitstellung, Fahrzeugnutzung und **Entsorgung**. (Grafik s. Seite 11): Wissenschaftliche Dienste (2019). „Energieeffizienz im Fahrzeugsektor“, <https://www.bundestag.de/resource/blob/711190/42e9651247989ad24d2632adfa9f383e/WD-8-143-19-pdf-data.pdf>.

Im Sachstand „Batterieproduktion in China“ finden sich informative Aspekte zur Energieeffizienz einzelner Herstellungsschritte in **Abhängigkeit vom Standort und dem dort verwendeten Strommix**. Wissenschaftliche Dienste (2019). <https://www.bundestag.de/resource/blob/710958/88d53d0482edb1731594729850ee49e7/WD-8-165-19-pdf-data.pdf>.

3. Ökobilanzierung in der Elektromobilität

Im Folgenden sind ausgewählte Studien, die auch in den bisherigen Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste vorgestellt wurden und aktuelle Studien zu Ökobilanzierungen aufgeführt.

Das Themenfeld „Ökobilanzen von Elektroautos“ und die fachlichen Zusammenhänge, relevante Studien und Akteure fasst ein Übersichtsartikel zusammen.⁶ Der Artikel verdeutlicht die zahlreichen Faktoren, die bei der Erstellung einer Ökobilanz eine Rolle spielen. Nicht nur die Nichtberücksichtigung von Prozessschritten, sondern auch die Wahl der variablen Parameter wie Lebensdauer oder verwendeter Strommix kann zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen. Auch können Ökobilanzen, deren Erstellung mehrere Jahre auseinander liegen, aufgrund des technologischen Fortschritts und insbesondere der sich ändernden Herstellungsparameter kaum miteinander verglichen werden.

Die Einbindung bzw. das Weglassen der Verfahrenskomponente Recycling wird beispielsweise in folgenden Quellen behandelt:

Ein Artikel der Zeitschrift Nature „Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles“, beschreibt **aktuelle Ansätze für Recycling und Wiederverwendung** von Lithium-Ionen-Batterien u.a. für Elektrofahrzeuge und zeigt künftige Forschungsentwicklungen auf. Der Artikel enthält eine Beschreibung der verschiedenen Verwertungsmethoden der Abfallwirtschaft wie beispielsweise Wiederverwendung, Recycling, Verwertung oder Beseitigung. Die Autoren zeigen u.a. dass in Abhängigkeit vom Batteriedesign der Lithium-Ionen-Batterien unterschiedliche Wiederverwendungen und Recyclingmethoden zu entwickeln sind. Das sehr unterschiedliche Design stellt z.B. auch eine Herausforderung bei der Umstellung von manueller auf maschinelle Verarbeitung dar. Harper, G. et al. nature (2019). „Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles“, <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1682-5>.

Nach Auswertung verschiedener Lebenszyklusanalysen kommen Experten zu dem Schluss, dass die Anwendung der derzeitigen Recyclingverfahren auf die derzeitige Generation von Lithium-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge möglicherweise nicht immer zu

6 Schrader, Ch., Spektrum Die Woche (2017). „Ökobilanz - Ein kritischer Blick“, <https://www.spektrum.de/news/wie-ist-die-umweltbilanz-von-elektroautos/1514423>

einer Verringerung der Treibhausgasemissionen im Vergleich zur Primärproduktion führt. Die Autoren meinen, dies läge u.a. an der Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit des Recyclings vom **Kobaltgehalt**. Aufgrund des geringen zurückgewonnenen Wertes und des sinkenden Kobaltgehalts rentiert sich das Recycling mit den derzeitigen Methoden weniger. Effizientere Methoden wären dringend notwendig. Rich, K. et al. (2017). „Eco-Efficiency Analysis of a Lithium-Ion Battery Waste Hierarchy Inspired by Circular Economy“, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jiec.12607>.

Eine aktuelle Studie zur Ökobilanzierung von Elektroautos im Auftrag der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN stellt die CO₂-Emissionen von Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit fossilen Brennstoffen gegenüber. Die Experten verwenden dabei einen **konservativen Ansatz und behandeln die Komponenten „Second Life“ und „Recycling“ nicht**. Die Autoren begründen ihre Vorgehensweise ausführlich (Seite 13). Sie meinen, dass es derzeit noch energieintensive Recycling-Verfahren gibt, die in einem kohleintensiven Strommix nicht unbedingt zu einer Treibhausgasreduzierung führen würden. Da der größte Teil des Recyclings erst in Zukunft stattfinden wird, wenn das Stromnetz weniger kohlenstoffintensiv ist, könnte dies eine erhebliche Einsparung an Treibhausgasemissionen bedeuten. Die Autoren haben, um auf der konservativen Seite zu bleiben, die CO₂-Einsparungen für das Recycling in ihrem Vergleich nicht berücksichtigt. Eindhoven University of Technology (2021). „Vergleich der lebenslangen Treibhausgasemissionen von Elektroautos mit den Emissionen von Fahrzeugen mit Benzin- oder Dieselmotoren“, https://www.gruene-bundestag.de/fileadmin/media/gruenebundestag_de/themen_az/mobilitaet/pdf/200831-Studie_EAuto_versus_Verbrenner_CO2.pdf.

Die Treibhausgasemissionen im Herstellungsprozess und sofern angegeben auch des Recyclings für Akkumulatoren von Hybrid- und Elektrofahrzeugen analysiert folgende Studie: Bieker, G., ICCT - International Council on Clean Transportation Europe (2021). „A Global Comparison of the Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions of Combustion Engine and Electric Passenger Cars“, https://theicct.org/sites/default/files/publications/Global-LCA-passenger-cars-jul2021_0.pdf. Der Autor führt aus, dass die Produktion der Batteriepacks, einschließlich Gewinnung und Verarbeitung der Rohstoffe, der Zellenproduktion und der Packungsmontage betrachtet wurden, jedoch **„second-use“ und Recycling nicht**.

4. Ökologische Aspekte verschiedener Verfahrensschritte des Batterierecyclings

In der Studie der „Agora Verkehrswende“ „Klimabilanz von Elektroautos – Einflussfaktoren und Verbesserungspotential“ haben die Autoren verschiedene Studien und Metastudien zur Ökobilanzierung ausgewertet. Sie diskutieren die ökologischen Aspekte verschiedener technischer Verfahrensschritte hinsichtlich der Entsorgung und des Recyclings und deren Wirkung auf die Treibhausgasemissionen. Die Autoren legen den Fokus auf pyrometallurgische Entsorgung im Schachtofen:

„Über die Herstellung hinaus sind auch die Prozesse am Lebensende der Batterie relevant (sogenannte End-of-Life-Prozesse), also die Entsorgung und das Recycling der Batteriematerialien. Wird eine **pyrometallurgische Entsorgung im Schachtofen** durchgeführt, verbrennen die kohlenstoffhaltigen Bestandteile der Zelle (z.B. das Graphit aus der Anode)

und setzen Kohlendioxid frei. Aus der bei diesem Prozess entstehenden Legierung kann jedoch ein Teil der eingesetzten Metalle (insbesondere Kobalt und Nickel) zurückgewonnen werden. Durch die **Einsparung von Primärrohstoffen** kann es per Saldo zu geringeren Treibhausgasemissionen kommen. Eine detaillierte Analyse der Prozesse nach dem Schachtofen übersteigt den Rahmen dieser Studie. Diese Prozesse liegen damit außerhalb des betrachteten Systems, sodass das Lebensende der Batterie eher konservativ abgebildet ist: Die **Aufwendungen zur Metallrückgewinnung** tragen zwar einerseits nicht negativ zur Klimabilanz bei, es werden jedoch auch keine Vorteile (Gutschriften) durch Sekundärmaterialien berücksichtigt. **Damit liegen die Treibhausgasemissionen der Batterieentsorgung aktuell bei etwa 7,6 kg CO₂-Äquivalenten pro kWh Batterie und führen damit zu einem Aufschlag von gut 5 Prozent auf die bilanzierten Herstellungsemissionen in Höhe von 145 kg CO₂-Äquivalenten pro kWh Batterie.**⁷

Im folgenden Teil führen die Autoren das Verfahren der pyrometallurgischen Entsorgung im Schachtofen detaillierter aus und diskutieren den Einfluss zukünftiger Recyclingquoten auf die Ökobilanzierung:

„Für die Entsorgung der Batterien und das Recycling von Materialien wird heute üblicherweise entweder ein hydrometallurgisches oder ein pyrometallurgisches Verfahren angewendet. Für die Bilanzierung in dieser Studie wurde davon ausgegangen, dass eine **pyrometallurgische Entsorgung der Zellen im Schachtofen** erfolgt. Die Zellen werden zunächst in einem Schachtofen zusammen mit einem schlackebildenden Zusatzstoff (z.B. Kalkstein) erhitzt. Dabei verdampft der Elektrolyt, die kohlenstoffhaltigen Zellkomponenten (Graphitanode und die Kunststoffe) werden verbrannt und setzen dabei Kohlendioxid frei. Neben der Schlacke entsteht dabei eine Legierung, die die Metalle Kupfer, Nickel und Kobalt enthält. Bei einer hydrometallurgischen Entsorgung werden die Zellen dagegen nicht verbrannt, sondern zerkleinert und mit verschiedenen Chemikalien aufgelöst. Auch hierbei entsteht eine Legierung. In einem weitergehenden Raffinationsschritt können aus dieser Legierung Kupfer, Nickel und Kobalt zurückgewonnen werden. Dabei können bis zu 99,5 Prozent der enthaltenen Metalle wiedergewonnen werden. Für die hier vorliegenden Ergebnisse wurde der Datensatz aus Helms et al. (2016) genutzt, aber bereits nach dem Schachtofen abgeschnitten, das heißt, Raffination und Rückgewinnung der Metalle liegen außerhalb der Systemgrenze; es wurden jedoch auch keine Gutschriften für die Materialien vergeben.“[...]

Die Autoren prüften auch, „ob ein Recycling von Nickel und Kobalt im Sinne eines Closed-Loop-Verfahrens sinnvoll ist. Dabei wird methodisch eine hypothetische Nutzung der erhaltenen Sekundärmaterialien in der baugleichen Batteriezelle unterstellt. **Eine grobe Abschätzung zeigt, dass die Treibhausgasemissionen der Raffination durch Einsparungen an Treibhausgasemissionen für Primärmaterialien unter heutigen Bedingungen mehr als kompensiert würden. Methodisch bleibt eine Anrechnung von Gutschriften jedoch komplex, da ein mögliches Recycling und eine in Zukunft vermiedene Belastung**

7 Agora Verkehrswende (2019). „Klimabilanz von Elektroautos - Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial“, https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf.

siehe auch Abbildung 13 „Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung und Entsorgung im Vergleich“.

schon heute der Batterie positiv angerechnet werden. Beide können jedoch nicht als selbstverständlich angesehen werden. Im Hinblick auf den geschlossenen Kreislauf sind zum Beispiel Veränderungen in den Materialketten und die Recyclingquoten (auch in anderen Staaten) zu berücksichtigen. **Der Ansatz leiht sich also einen Umweltkredit aus der Zukunft und geht damit bewusst das Risiko ein, dass dieser Kredit möglicherweise nicht zurückgezahlt wird,** insbesondere dann, wenn es sich um längere Zeitspannen und Zweitmärkte mit unterschiedlichen Recyclingquoten handelt.“⁸

8 Agora Verkehrswende (2019). „Klimabilanz von Elektroautos - Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial“, Seite 70, https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf