



Sachstand

Nachhaltigkeit in der Elektromobilität Ökologische und soziale Aspekte der Speicherbatterien

Nachhaltigkeit in der Elektromobilität

Ökologische und soziale Aspekte der Speicherbatterien

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 081/19
Abschluss der Arbeit: 29. Juli 2019
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.	Akkumulatoren für die Elektromobilität	4
3.	Nachhaltigkeitsaspekte der einzelnen Rohstoffe	5
3.1.	Lithium	7
3.2.	Grafit	8
3.3.	Nickel	8
3.4.	Kobalt	9
3.5.	Geopolitische Verfügbarkeit	10
3.6.	Ökologische Verfügbarkeit	11
4.	Recycling	12
5.	Studien zu Ökobilanzierung und Treibhausgaspotentialen der Elektromobilität	14
5.1.	Nachhaltigkeit in der Elektromobilität - Analyse der externen Folgen von Lithium-Ionen-Batterien	14
5.2.	Agora Verkehrswende „Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität“	14
5.2.1.	Lithium	15
5.2.2.	Kobalt	15
5.2.3.	Nickel	16
5.2.4.	Grafit	17
5.2.5.	Platin	17
5.3.	Agora Verkehrswende „Klimabilanz von Elektroautos“	18
5.4.	Fraunhofer-Institut (ISI) „Gesellschaftspolitische Fragestellungen der Elektromobilität“	24
5.5.	Fraunhofer-Institut (ISE) „Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge“	24
5.6.	Icct „Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions“	25
5.7.	POLiS	25
5.8.	Forschungsprojekte des Umweltbundesamtes	25
6.	Aufstellung von Studien zum Themenspektrum Umwelt, Menschenrechte und Nachhaltigkeit	26
7.	Aufstellung von Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste zum Themenkomplex Batteriespeicher für die Elektromobilität	28
8.	Quellenverzeichnis	29

1. Einleitung

Für elektrisch angetriebene Fahrzeuge mit Batterien bzw. Akkumulatoren¹ sind eine Reihe von knappen, nichterneuerbaren Rohstoffen erforderlich. Die Rohstoffe Lithium, Kobalt, Nickel, Graphit und Platin sind, nach Aussage von Studien, für ein schnelles weltweites Wachstum ausreichend vorhanden. Die Förderung von Rohstoffen für die Elektromobilität ist mit Umwelt- und sozialen Problemen verbunden. Oft besteht ein erhöhter Energiebedarf bei der Herstellung, es entstehen saure Grubenwässer, Wasserkonflikte zwischen Bergbauunternehmen und indigenen Völkern bestehen oder es existieren nicht vertretbare Arbeitsbedingungen in den Minen. Ein effizientes Recyclingsystem dieser Rohstoffe kann die Nachfrage von Primärrohstoffen und die Umwelt- und Sozialprobleme reduzieren.²

Für die Klimabilanz von Elektroautos sind in ihrer Nutzungsphase die Lebensfahrleistung, der Energieverbrauch und insbesondere die Strombereitstellung und in ihrer Herstellungsphase die Batteriekapazität, die Energiedichte, die Zellchemie und der Energieeinsatz in der Fertigung ausschlaggebend. Eine Vielzahl von Studien und Studienauswertungen sind in den letzten Jahren durchgeführt worden.³

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit Aspekten der Nachhaltigkeit von Batterien der Elektromobilität, insbesondere der Ökobilanzierung, dem Treibhausgaspotential, der Umweltbeeinträchtigung und den sozialen Zuständen bei der Herstellung der Rohstoffe. Sofern vorhanden, wird auf bestehende Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste verwiesen.

2. Akkumulatoren für die Elektromobilität

Es gibt verschiedene Batteriesysteme: Redox-Flow, Blei-Säure, Natrium-Schwefel und Lithium-Ionen-Akkumulatoren. Blei-Säure-Batterien (Pb-PbO₂) werden in fast allen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren eingesetzt. Als Speicherbatterien für die Elektromobilität sind sie aufgrund ihrer geringen Energiedichte nicht geeignet. „In den Elektrofahrzeug-Entwicklungen der letzten 20 Jahre wurden folgende chemische Zellen als Basiszellen für Fahrzeugakkus verwendet: Nickel-Metallhydrid-Akku (NiMH), Natrium-Nickelchlorid-Batterie (ZEBRA-Batterie) und Lithium-Ionen-Akku. Da die ZEBRA-Batterie zwar keinerlei Selbstentladung hat, aber für ihren Betrieb auf

1 Batterie und Akku bzw. Akkumulator werden, wie oft in der Fachliteratur, auch in dieser Arbeit synonym verwendet. Ganz korrekt ist es nicht, da die Batterien zwar Energie speichern und abgeben können, danach aber entladen und als Speicher unbrauchbar sind. Im englischsprachigen Raum gibt es nur den Begriff „battery“. Karle, A., (2015). „Elektromobilität: Grundlagen und Praxis, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München 2015, Seite 75

2 Agora Verkehrswende (2017). „Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität“, https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Synthesepapier_WEB.pdf

3 Spektrum der Wissenschaft, Serie Elektromobilität (2018). „Umwelt - Die Ökobilanz der E-Mobilität“, Seite 12-19, „Batterietechnik - Energiespeicher für eine Elektromobile Gesellschaft“, Seite 20-25, „Elektromobilität - Ausgebremst durch Rohstoffmangel?“, Seite 46-51, Heft 5, 2018

Peters, J. F. et al. (2017). The Environmental Impact of Li-Ion Batteries and the Role of Key Parameters – A Review“ Renewable and Sustainable Energy Reviews 67, S. 491–506, 2017

300 °C aufgeheizt werden muss, konnte sie sich auf dem Markt nicht durchsetzen. Da NiMH-Akkus im Vergleich zu Li-Ionen-Akkus eine deutlich geringere Energiedichte haben, konnten sie sich trotz des günstigeren Preises im Pkw-Bereich ebenfalls nicht durchsetzen. Praktisch alleinige Technik bei den Fahrzeugakkus der Elektrofahrzeuge sind derzeit die Li-Ionen-Akkus. Lediglich bei Hybridfahrzeugen, dort aber nicht bei den Plug-Ins, finden sich noch die Nickel-Metallhydrid-Akkus.⁴

In der Elektromobilität hat die Redox-Flow-Batterie-Technologie einen Vorteil in der Ladezeit gegenüber den Lithium-Ionen-Akkus. Die verbrauchte Elektrolytflüssigkeit könnte an der Tankstelle gegen unverbrauchten ausgetauscht, der verbrauchte Elektrolyt dort aufgeladen und vom nächsten Verbraucher wieder verwendet werden. Allerdings gibt es auch einen Nachteil. Die Reichweite in der Elektromobilität beträgt derzeit etwa ein Viertel die der Lithium-Ionen-Akkus.⁵

Eine Arbeit der Wissenschaftlichen Dienste liefert weitere einführende Informationen und behandelt Studien zur Ökobilanzierung von Energiespeichern für Elektrofahrzeuge (s. Anlage 1).⁶

Zwei weitere Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste enthalten Aufstellungen kommentierter Literaturquellen zum Rohstoffbedarf für Batterietechnologie sowie zur Energievergleichsanalyse und zur Ökobilanzierung.⁷

3. Nachhaltigkeitsaspekte der einzelnen Rohstoffe

Grundlage der aktuellen Ausbaupläne ist der batterieelektrische Lithium-Ionen-Akkumulator. Für seine Herstellung benötigt man Lithium (Kathodenmaterial und Elektrolyt), Kobalt (Kathodenmaterial) und Grafit (Anodenmaterial). Weiteres Kathodenmaterial wie Nickel, Mangan und

4 Karle, A., (2015). „Elektromobilität: Grundlagen und Praxis, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München 2015, Seite 76

5 Sterner, M., Stadler, I. (2017). „Energiespeicher“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017, Kapitel 7.6.7

6 Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2018). „Ökobilanzierung von Energiespeichern für Elektrofahrzeuge“, WD 8-099/18

Eine weitere Dokumentation der Wissenschaftlichen Dienste kommentiert Literaturstellen hinsichtlich der ökologischen Bewertung des verwendeten Energiemixes von Elektrofahrzeugen: Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2019). „Zu Elektroautos“, WD 8-009/19

7 Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2019). Dokumentation „Einzelaspekte der Batterietechnologie in Elektroautos“, WD 8-010/19

Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2019). Dokumentation „Einzelfragen zu Elektrofahrzeugen Ökobilanzierung“, WD 8-060/19

Grundsätzliche Informationen zur Lithium-Ionen-Technologie werden in der Arbeit: Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2019). „Großbatteriespeicher - Einzelfragen zur Lithium-Ionen-Batterietechnologie“ WD 8-002/19 <https://www.bundestag.de/resource/blob/627424/74e15e4e6f393a030176b8cb29effc24/WD-8-002-19-pdf-data.pdf> behandelt.

Eisen können zur Verwendung kommen. Die Grafik zeigt die Anteile der derzeit genutzten Verbindungen für Kathoden von Lithium-Ionen-Akkumulatoren:⁸

- Lithium-Kobalt-Oxide (LCO)
- Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt Oxide (NMC)
- Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxide (NCA)
- Lithium-Mangan-Oxide (LMO)
- Lithium-Eisen-Phosphate (LFP)

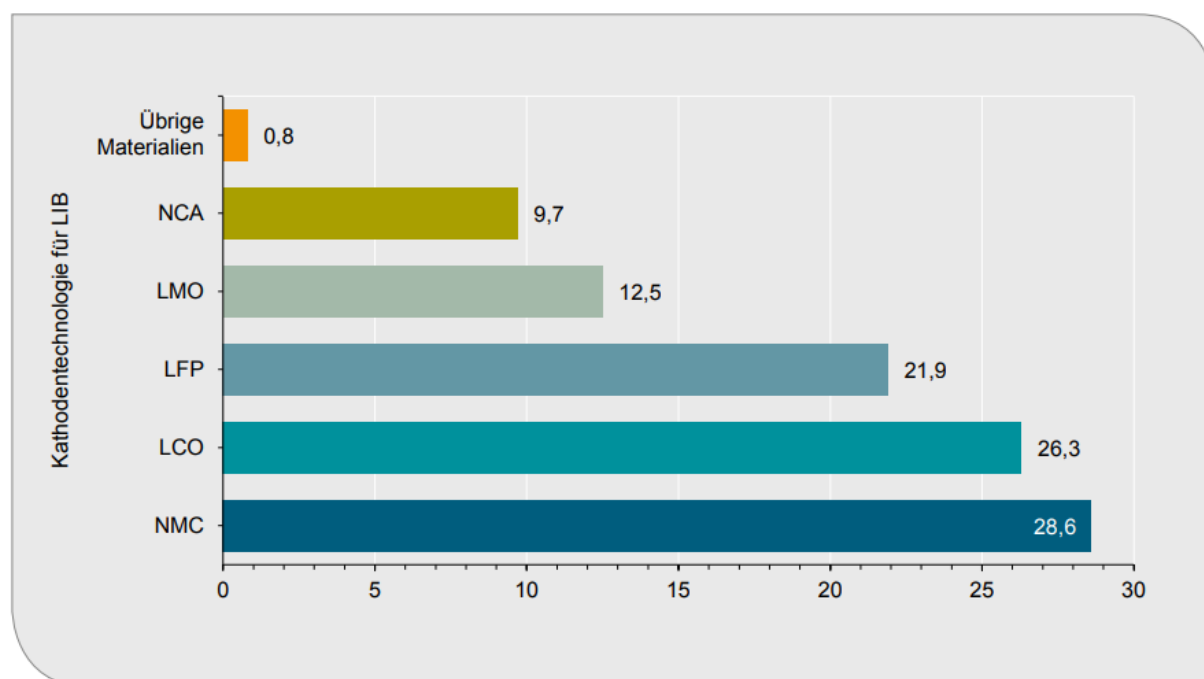


Abb. 10: Anteile der genutzten Kathodenmaterialien in LIB im Jahr 2015
(Datenquelle: ROSKILL 2016b).

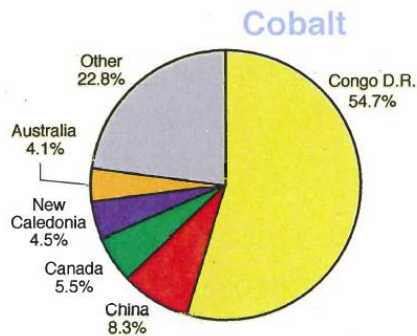
Die folgende Grafik zeigt Vorkommen für die drei am häufigsten verwendeten Batterie-Rohstoffe Kobalt, Graphit und Lithium.⁹ Zu Vorkommen, Abbaugebieten, Schürfrechten und zu Rohstoffstrategie von Rohstoffen der Elektromobilität beschäftigt sich ausführlich eine Antwort der Bundesregierung.¹⁰

8 Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2017). „Rohstoffrisikobewertung – Lithium“, Seite 27. https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-33.pdf?__blob=publicationFile&v=2

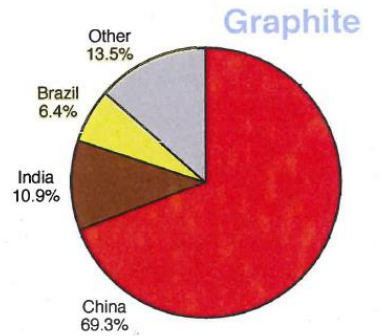
9 Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2018). „World Mining Data 2018-Minerals Production“, Wien, Volume 33, https://www.world-mining-data.info/?World_Mining_Data_PDF-Files

10 Antwort der Bundesregierung (2019). „Auswirkungen des Abbaus von Rohstoffen für die Elektromobilität, BT-Drs. 19/11686, <http://dipbt.bundestag.de/doc/btd/19/116/1911686.pdf>

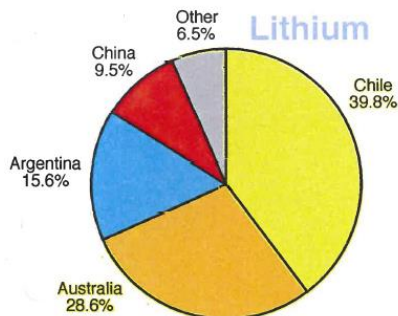
**Key commodities for battery technology:
Cobalt, Lithium, Graphite**



Since decades Congo D.R. is dominating primary Cobalt production.



China leads Natural Graphite production since the early 1990's.



Largest 4 producer countries share 93.5 %

Lithium
Li₂O-ratio of
brines to hard rock
ore is around

62.0 % to 38.0 %

Die folgenden Kapitel liefern Informationen zu den am häufigsten eingesetzten Rohstoffen und den mit ihnen verbundenen ökologischen, ökonomischen, geopolitischen und sozialen Aspekten.

3.1. Lithium

Lithium wird aus Erzen oder aus Solen gewonnen. Vorkommen in Mineralien gibt es in Australien, China und Mozambique und in Solen in den USA, Bolivien, Chile und China.¹¹

Ein Artikel der Washington Post beschreibt die Situation der Bevölkerung im „Lithium-Triangle“ Argentinien, Bolivien und Chile. Der dortige Lithium-Abbau hat für die Bevölkerung zwei Seiten. Zum einen der ökonomische Nutzen durch die Schaffung von Arbeitsplätzen und zum anderen die finanzielle Ausbeutung und das Umweltverschmutzungspotenzial und die Verknappung des Wassers.¹²

11 Gunn, G., British Geological Survey (2014). „Critical metals handbook“, Veröffentlichung von American Geophysical Union and Wiley, Chichester, Edition 2014, Seite 230ff.

12 Frankel, T.C., Whoriskey, P. (2016). „Tossed Aside in the ‘White Gold’ Rush Indigenous people are left poor as tech world takes lithium from under their feet“, Washington Post, 19.12.2016. <https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/tossed-aside-in-the-lithium-rush/?tid=batteriesseriesbox>

Mit Lithium und seinem Vorkommen, Abbau und den ökologischen und sozialen Auswirkungen am Beispiel Bolivien befasst sich ein Sachstand der Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages (s. Anlage).¹³

3.2. Grafit

Grafit gibt es als natürlichen und synthetischen Grafit. Für Li-Ionen-Akkus wird meist natürlicher Grafit verwendet, dessen Vorkommen groß sind. Der Grafit muss hochfein sein und wird über mehrere Produktionsschritte erzeugt. China fördert etwa drei Viertel der Jahresabsatzmenge. Weitere Förderstätten befinden sich in Brasilien und Kanada. Grafit besitzt ein geringes Recyclingpotential, kann aber weiter verwendet werden.

3.3. Nickel

„Im Gegensatz zu Kobalt ist die Minenproduktion von Nickel auf viele Staaten verteilt. Die Philippinen waren 2016 mit 347.000 Tonnen Nickel das Land mit der größten Minenproduktion.“¹⁴

Weitere Förderländer sind Indonesien, Neukaledonien und die Russische Föderation. Letzteres baut Nickel im Untertageabbau ab. Die Lagerstätte hat einen hohen Sulfidgehalt. Durch saure Grubenwässer und damit ausgetragener Metalle kann es zu Umweltschädigungen kommen. Bei der Verhüttung der Erze entstehen erhebliche Schwefeldioxid-Emissionen. Verbleibende Rückstände können zu Umweltschädigungen führen.¹⁵

Beispielsweise ist „in der nordsibirischen Stadt Norilsk vor allem die Luft stark verschmutzt. Im Winter ist der Schnee fast schwarz, der Schwefelgeruch dominant - Ergebnis von jährlich fast vier Millionen Tonnen an Kadmium, Kupfer, Nickel, Zink und anderen Metallen, die von der Schwerindustrie herausgeblasen werden. Vor allem die Gesundheit der Kinder ist gefährdet, die Zahl von Frühgeburten übersteigt die anderer Städte der Region. Als Hauptverursacher der Luftverschmutzung gilt das Unternehmen Norilsk Nickel, der größte Nickelproduzent der Welt.“¹⁶

13 Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2018). „Lithium-Vorkommen, Abbau und ökologische Auswirkungen in Bolivien“, WD 8-3000-135/18, <https://www.bundestag.de/resource/blob/627440/21dc4b97c8404198595dec98a4506a79/WD-8-135-18-pdf-data.pdf>

14 Öko-Institut (2019). „Gigafactories für Lithium-Ionen-Zellen – Rohstoffbedarfe für die globale Elektromobilität bis 2050“, <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Fab4Lib-Rohstoffe-Elektromobilitaet.pdf>

15 Deutscher Bundestag (2019). Kleine Anfrage der Fraktion der FDP „Auswirkungen des Abbaus von Rohstoffen für die E-Mobilität“, BT-Drs. 19/11137, <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/111/1911137.pdf>

Neue Züricher Zeitung (NZZ) „Kommentierte Bilderstrecke“, <https://www.nzz.ch/wirtschaft/bildstrecke/umweltverschmutzung-norilsk-nickel-ld.1300115#lg=1&slide=1>

16 Süddeutsche Zeitung (2010). „Tödliche Ortschaften“, 17.05.2010. <https://www.sueddeutsche.de/panorama/umweltverschmutzung-toedliche-ortschaften-1.235014-0>

Der Abbau von Nickel auf den Philippinen hat schwerwiegende Folgen für die Umwelt und Bevölkerung.¹⁷ Ein Beispiel aus dem Jahr 2008 zeigt die Umweltschädigungen.¹⁸

3.4. Kobalt

Kobalt ist ein giftiges Schwermetall und ein teurer Rohstoff. Die Kobaltproduktion erfolgt meist in Koppelproduktion mit anderen Erzen, wie Nickel (35%) und Kupfer. Kobaltvorkommen, die ökonomisch genutzt werden, befinden sich im zentralafrikanischen Kupfergürtel und in Marokko. Die Demokratische Republik Kongo ist mit 60% größter Produzent. Weitere Förderstätten liegen in Australien, auf den Philippinen, Neu-Kaledonien und Kuba. Der Abbau unterseeischer Manganknollen kann zukünftig für den Kobaltabbau an Bedeutung gewinnen.

Die Vorkommen sind häufig mit Schwermetallen wie Blei und Uran verbunden. Über die gesundheitliche Belastung von Minenarbeitern, ihre unzureichende Schutzausrüstung in Minen des Kongos berichtet beispielsweise ein Artikel der Washington Post.¹⁹

Nach Berichten von Menschenrechtsorganisationen gibt es Verletzungen der Menschenrechte in der Demokratischen Republik Kongo. Gesundheitliche Schädigungen kann es vor allem durch Arbeitsunfälle, beispielsweise durch Hangrutschungen oder Einstürze insbesondere im artisanalen Bergbau²⁰, geben. Hohe körperliche Belastungen bei der händischen Gewinnung können langfristig zu gesundheitlichen Schädigungen führen. Ebenso gibt es Kinderarbeit.²¹

17 Business & Human Rights and Resource Center „Luzifer, Toter Mann und blutrote Flüsse – Nickelabbau in den Philippinen“, <https://www.business-humanrights.org/de/luzifer-toter-mann-und-blutrote-fl%C3%BCsse-%E2%80%93-nickelabbau-in-den-philippinen> und <https://power-shift.de/rote-fluesse-und-tote-fische-und-nickelabbau-in-den-philippinen-teil-1/>

Süddeutsche Zeitung „Die vergiftete Insel, Teil 1-4“, <https://gfx.sueddeutsche.de/apps/5885d7a07b38d49f09517a2b/www/>

Gesellschaft für bedrohte Völker (gfbv) (2017). „Philippinen: Umweltministerin Lopez muss gehen“, <https://www.gfbv.de/de/news/philippinen-umweltministerin-lopez-muss-gehen-8557/>

18 Gesellschaft für bedrohte Völker (gfbv) (2017). „‘Galapagos der Philippinen‘ durch Nickelabbau bedroht“, 04.05.2017. <https://www.gfbv.de/de/news/galapagos-der-philippinen-durch-nickelabbau-bedroht-1187/>

19 Frankel, T.C., (2016). „The Cobalt Pipeline - Tracing the path from deadly hand-dug mines in Congo to consumers' phones and laptops“, Washington Post, 30.09.2016. <https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/congo-cobalt-mining-for-lithium-ion-battery/?tid=batteriesseriesbox>

20 Kleinbergbau, bei dem die bergmännischen Arbeiten nur manuell getätigt werden, bezeichnet man als artisanalen Bergbau.

21 Amnesty international (2017). „Time to Recharge Corporate Action and Inaction to Tackle Abuses in the Cobalt Supply Chain“, <https://www.amnesty.org/download/Documents/AFR6273952017ENGLISH.PDF>

Amnesty international (2017). „Grosskonzerne tun zu wenig gegen Kinderarbeit“, <https://www.amnesty.de/informieren/aktuell/demokratische-republik-kongo-grosskonzerne-tun-zu-wenig-gegen-kinderarbeit>

Zu weiteren Umweltrisiken beim Kobaltabbau kommt es insbesondere im artisenalen Bergbau durch die Abholzung von Waldflächen, fehlende Rekultivierung und durch unsachgemäße Entsorgung von Rückständen, die zur Schädigung der Böden führen. Das Grund- und Oberflächenwasser wird nachhaltig verändert. Auch beim industriellen Bergbau und bei der Verhüttung der Erze entstehen Umweltschäden. Das Trinkwasser wird mit Chemikalien und Oberflächengewässer mit schwermetallhaltigen Abwässern aus der Metallurgie kontaminiert. Die zumeist knappen Wasserressourcen werden zu Lasten der Bevölkerung überwiegend für den Bergbau eingesetzt.²²

3.5. Geopolitische Verfügbarkeit

Die Analyse der globalen Angebotskonzentration beruht auf der Berechnung des Herfindahl-Hirschman-Index (HHI). Für das gewichtete Länderrisiko (GLR) werden die „Worldwide Governance Indicators“ (WGI) der Weltbank verwendet.²³ Beispielsweise haben Nickel bzw. Nickelerze

Amnesty international (2017). „VW, Daimler und andere Konzerne müssen entschieden gegen Kinderarbeit in der Lieferkette der Akku-Produktion vorgehen – neue Bundesregierung gefordert“. <https://cloud.amnesty.de/index.php/s/6kViVddYZ2DHiyF#pdfviewer>

Edison (2019). „Kinderarbeit in Minen: Weniger E-Autos sind auch keine Lösung“. <https://edison.handelsblatt.com/erklaeren/kinderarbeit-in-minen-weniger-e-autos-sind-auch-keine-loesung/22671726.html>

Deutscher Bundestag (2019). Kleine Anfrage der Fraktion der FDP „Auswirkungen des Abbaus von Rohstoffen für die E-Mobilität“, BT-Drs. 19/11137. <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/111/1911137.pdf>

Adelphi, Wuppertal-Institut, Umweltbundeamt (2011). „Rohstoffkonflikte nachhaltig vermeiden: Fallstudie und Szenarien zu Kupfer und Kobalt in der Demokratischen Republik Kongo“, https://www.adelphi.de/de/system/files/mediathek/bilder/rohkon_bericht_3-2_kongo_1_0.pdf

22 Deutscher Bundestag (2019). Kleine Anfrage der Fraktion der FDP „Auswirkungen des Abbaus von Rohstoffen für die E-Mobilität“, BT-Drs. 19/11137. <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/111/1911137.pdf>

23 Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2016). „DERA-Rohstoffliste 2016“, Seite 15, 18. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/rohstoffliste-2016.pdf?__blob=publicationFile und (2017). „Rohstoffrisikobewertung - Lithium“, Seite 131 ff. https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-33.pdf?__blob=publicationFile&v=2

Der Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) ist ein Indikator zur Bewertung der Marktkonzentration eines (Roh)stoffes. „Der Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) ist eine Kennzahl, welche die unternehmerische Konzentration in einem Markt angibt. Sie wird durch das Summieren der quadrierten Marktanteile aller Wettbewerber errechnet. Die Bewertungsskala für den HHI richtet sich nach den Vorgaben des U. S. Department of Justice und der Federal State Commission, die einen Markt bei einem HHI unter 1.500 als gering und zwischen 1.500 und 2.500 Punkten als mäßig konzentriert definieren. Bei einem Indexwert über 2.500 gilt ein Markt als hoch konzentriert.“

Worldwide Governance Indicators (WGI) der Weltbank bewertet jährlich in einem Set von sechs Indikatoren die Regierungsführung von über 200 Staaten. Durch die Aggregation und Mittelung aller sechs Indikatoren ergibt sich ein Wert für das Länderrisiko, das in einem Intervall zwischen +2,5 und -2,5 liegt. Länder mit schwacher Regierungsführung haben einen negativen WGI-Wert, Länder mit einer guten Regierungsführung einen positiven WGI-Wert. Als Indikatoren werden „(1) Mitspracherecht und Rechenschaftspflicht, (2) politische Stabilität und Abwesenheit von Gewalt, (3) Leistungsfähigkeit der Regierung, (4) Regulierungsqualität, (5) Rechtsstaatlichkeit und (6) Korruptionsbekämpfung gemessen.“

und ihre Konzentrate einen WGI von -0,20, Kobalterze und ihre Konzentrate -1,52, Manganerze und ihre Konzentrate 0,44, natürlicher Graphit -0,95 und Lithium mit einen WGI von 0,95 liegt im unkritischen Bereich. Die nachfolgende Tabelle zeigt beispielhaft das sehr unterschiedliche Länderrisiko (WB) im Vergleich der produzierenden Länder am Beispiel Lithium.²⁴

Tab. 17: Geopolitisches Risiko (Länderkonzentration und gewichtetes Länderrisiko) der Weltbergwerksförderung von Lithium 2005 und 2015 im Vergleich.

Land	2005				2015				
	Li [t Inh.]	Anteil [%]	HHI ¹	GLR ²	Li [t Inh.]	Anteil [%]	HHI ¹	Länder-risiko WB ³	GLR ²
Australien	4.835	24,1			13.160	39,9		1,58	
Chile	8.308	41,5			11.788	35,7		1,07	
Argentinien	2.742	13,7			3.516	10,7		-0,36	
China	717	3,6			2.002	6,1		-0,43	
Simbabwe	731	3,6			1.025	3,1		-1,20	
USA	1.500	7,5			846	2,6		1,25	
Portugal	304	1,5			470	1,4		1,04	
Brasilien	207	1,0			186	0,6		-0,17	
übrige Länder ⁴	694	3,5			19	0,1		-	
Summe⁵	20.038	100	2.586	0,803	33.011	100	3.033		0,95

¹ Herfindahl-Hirschman-Index, ² gewichtetes Länderrisiko, ³ WB = Weltbank (WORLD BANK 2016),

⁴ enthält: Spanien und Kanada, ⁵ geringe Abweichung durch Rundung möglich

3.6. Ökologische Verfügbarkeit

Der Environmental Performance Index (EPI) ist ein Modell der Yale Universität, das mittels Nutzwertanalyse die ökologische Leistungsbilanz von Staaten quantitativ vergleicht. Anhand von 24 Indikatoren wie Luftqualität, Wasser, Biodiversität, Klima/Energie und natürlicher Ressourcen erhebt der EPI ein Ranking (von 0 bis 100) für 180 Staaten für die Aspekte Umweltgesundheit und Vitalität des Ökosystems. Die Schweiz steht im Ranking mit 87.42 Punkten an oberster Stelle, Deutschland belegt Platz 13 (78.37), Australien Platz 21 (74.12), die USA Platz 27 (71.19), Argentinien Platz 74 (59.30), Chile Platz 84 (57.49), Bolivien Platz 92 (55.98), China Platz 120

Das gewichtete Länderrisiko (GLR) errechnet sich aus der Summe der Anteilswerte der Länder an der Produktion, dem Nettoexport oder dem deutschen Import, multipliziert mit dem Länderrisiko (LR). Das gewichtete Länderrisiko liegt in einem Intervall zwischen +2,5 und -2,5. Bei Werten über 0,5 wird das Risiko als niedrig eingestuft, zwischen +0,5 und -0,5 liegt ein mäßiges Risiko vor und Werte unter -0,5 gelten als kritisch.

24 Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2017). „Rohstoffrisikobewertung – Lithium“, Seite 64. https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-33.pdf?__blob=publicationFile&v=2.

(50.74), Mozambique Platz 135 (46.37), Republik Kongo (ehemals Volksrepublik Kongo) Platz 157 (42.39) und die Demokratische Republik Kongo (ehemals Zaire) Platz 178 (30.41).²⁵

4. Recycling

„In den letzten Jahren wurden bereits deutsche Forschungs- und Entwicklungsprojekte in diesen Bereichen, wie zum Beispiel BMUB-Recyclingprojekte zu Lithium-Ionen-Batterien (LiBRi, Litho-Rec, EcoBatRec etc.) oder UBA-Substitutionsprojekte (zum Beispiel SubSKrit), durchgeführt.“²⁶

Ökonomische und ökologische Aspekte des Batterierecyclings wurden im Rahmen eines Expertenforums erörtert: „Es existieren bereits mehrere Studien zu den potentiellen Umweltauswirkungen und –nutzen von Batterierecyclingprozessen. Dabei kommt die Mehrheit der Arbeiten zu dem Schluss, dass der größte Nutzen in den ersten Prozessschritten erzielt wird, d.h. dem mechanischen Zerlegen der Batteriepacks, deren Gehäuse und Batteriemodule, wo die einzelnen Komponenten vollständig und sortenrein getrennt und individuell einer geeigneten Wiederverwertung zugeführt werden können. Allerdings ist auch hier selbst bei Massenmaterialien (Stahl, Aluminium) die genaue Legierung oft unbekannt, was ein hochwertiges Recycling (d.h. unter Minimierung von Qualitätsverlusten) verhindert. Das Recycling der Batteriezellen selbst erscheint energieaufwendig, benötigt teils erhebliche Mengen an chemischen Hilfsprodukten bei hydrometallurgischen Prozessen und ermöglicht eine Rückgewinnung von nur einem Teil der Ausgangsmaterialien, was den ökologischen Nutzen deutlich verringert. Teilweise ist sogar der Aufwand höher als der Nutzen, so dass dieser Prozessschritt (abhängig von der betrachteten Wirkungskategorie) zu einer Erhöhung der Umweltbelastung führen kann. Eine stärkere Fokussierung auf eine frühzeitige, chemikalienfreie Trennung von Batteriekomponenten würde die Wahrscheinlichkeit erhöhen, sortenreine Materialien zurückzugewinnen und diese mit hoher Qualität zu recyceln. Dabei ist die Bauart der Zelle (Pouch, prismatic, Rundzelle) eher nebensächlich, während die Zellchemie von hoher Bedeutung ist. In starker Korrelation mit ökonomischen Kriterien wird der höchste ökologische Mehrwert aus dem Recycling von Zellen mit hohem Kobalt und Nickelgehalt erzielt, da die Gewinnung dieser (vergleichsweise teuren) Metalle ebenfalls mit hohen Umweltbelastungen verbunden ist.“

„Dagegen kann die Zurückgewinnung von einfach abzubauenen Metallen wie z.B. Lithium oder Eisen aus den Batteriezellen fallweise sogar mit höheren Umweltbelastungen verbunden sein als deren Gewinnung als Primärrohstoffe. In diesem Fall wäre ein Recycling dieser Materialien ökologisch nicht sinnvoll, obwohl es dies z.B. unter Aspekten der strategischen Leitung des Materialflusses durchaus sein kann. Hier zeigen sich die ökologischen Grenzen des Batterierecyclings auf, denn ein 100%iges Recycling aller Bestandteile ist womöglich nicht sinnvoll. Somit müsste eine

25 Hedeler, B. (2015). „Nachhaltigkeit in der Elektromobilität: Analyse der externen Folgen von Lithium-Ionen-Batterien“, diplomica Verlag GmbH, 2015

Yale University (2015). „EPI“, <https://epi.envirocenter.yale.edu/>

Yale University (2018). „The 2018 EPI Rankings“, <https://epi.envirocenter.yale.edu/epi-report-2018/executive-summary>

26 Agora Verkehrswende (2017). „Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität“, Seite 61. [https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige Rohstoffversorgung Elektromobilitaet/Agora Verkehrswende Synthesepapier WEB.pdf](https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Synthesepapier_WEB.pdf)

ökologisch optimale Recyclingtiefe identifiziert werden, über die hinaus Aufwand mit zunehmender Rückgewinnungsrate exponentiell ansteigt und den zusätzlichen Nutzen überkompensiert. Die ist jedoch auch abhängig vom Ursprung der Primärressourcen die durch die Recyclingmaterialien ersetzt werden, und mit zunehmend schwindenden Ressourcen würde sich das Bild in zeitlicher Abhängigkeit ändern. So wird zum Beispiel bereits jetzt ein zunehmend großer Anteil des Lithiumbedarfs durch Spodumene-Abbau gedeckt. Dieser ist mit höheren Umweltauswirkungen verbunden als das aus Salzlaugen gewonnene Lithium, weshalb eine Rückgewinnung von Lithium mit zunehmenden Anteilen an Spodumene basierendem Lithium konkurrenzfähig werden könnte. Während es aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll sein mag, Batterien für das Recycling in Drittländer zu exportieren, könnte dies, aufgrund der zum Teil deutlich niedrigeren Umweltstandards, zu erhöhten Umweltbelastungen durch das Recycling führen. So werden in manchen Fällen die Zellen ohne besondere Vorkehrungen geöffnet, um den Elektrolyt ungefiltert in die Atmosphäre verdampfen zu lassen und die trockenen Zellen anschließend zu recyceln. Auch die Abgasbehandlung eines Recyclingprozesses, einer der kritischen Punkte unter Umweltaspekten, hätte womöglich niedrigere Standards zu erfüllen. Für low-cost Batterien (z.B. aus LFP-Batterien), die außer Kupfer keine wertvollen Metalle enthalten, ist es wirtschaftlich uninteressant die Schwarzmasse weiterzuverarbeiten, weshalb diese dann unkontrolliert bzw. informell mit den entsprechenden Umweltauswirkungen entsorgt werden könnte. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in Europa aktuell 30- 40 % der Altbatterien nicht in der Sammelstelle abgegeben werden, sondern auf anderen Pfaden entsorgt werden, weshalb diese Aspekte durchaus zu betrachten sind. Auch wurde angemerkt, dass eine Bindung von Stoffströmen an Europa Vorteile hätte, jedoch war dieser Punkt kontrovers. Die Sicherung von kritischen Ressourcen ist erstrebenswert, jedoch nicht unbedingt sinnvoll wenn die Batterieproduktion in Asien stattfindet und somit Europa keinen Bedarf an diesen Rohstoffen hat. Die Nutzumwandlung nach Erstgebrauch (Re-use) und die Wiederaufarbeitung (Refurbish) von gebrauchten Batterien verlängert deren Lebenszeit und ist deshalb ökologisch vorteilhaft. Allerdings gibt es auch hier Bedenken seitens der anwesenden Vertreter von Recyclingfirmen bezüglich der Anforderung, Batterien sortenrein zu sammeln und diese einem frühzeitigen Recycling zuzuführen mit dem Ziel, möglichst hochqualitative Materialien zurückzugewinnen. [...]“²⁷

27 Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) (2018). „Recycling aktueller und zukünftiger Batteriespeicher: Technische, ökonomische und ökologische Implikationen“, Seite 5.
https://www.itas.kit.edu/downloads/veranstaltung_2018_batteriespeicher_abschlussbericht.pdf.

Buchert, M. et al., (2016). Aktualisierte Ökobilanzen zum Recyclingverfahren EcoBatRec für Lithium-Ionen-Batterien. Öko-Institut, Berlin/Darmstadt, 2016 3 M, www.ecobatrec.de/index.html

Buchert, M. et al., (2016). Aktualisierte Ökobilanzen zum Recyclingverfahren LithoRec II für Lithium-Ionen-Batterien. Öko-Institut, Berlin/Darmstadt, 2016 4, „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien - LithoRec II“, Abschlussbericht www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2017-01/Abschlussbericht_LithoRec_II_20170116.pdf

Gemeinsamer Abschlussbericht des Konsortiums nach NKBF 98 Nr. 8.1 (2011). „Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzeptes für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge - Lithium-Ionen Batterierecycling Initiative - LiBRi“, Abschlussbericht www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-libri_1.pdf

5. Studien zu Ökobilanzierung und Treibhausgaspotentialen der Elektromobilität

Bei der Erstellung der Ökobilanz eines Produktes/Rohstoffes, muss die gesamte Prozesskette von der Herstellung über die Nutzungsphase und einschließlich der Verwertungsphase betrachtet werden. In der Nutzungsphase spielen neben dem CO₂-Ausstoß auch Aspekte wie Lärm, Luftschadstoffe und der verwendete Strommix (z.B. fossil, nicht fossil oder gar Eigenversorgung über Photovoltaik) eine Rolle. Eine Arbeit vergleicht die CO₂-Emissionen der B-Klasse „Electric Drive“ der Daimler AG mit der Benzinvariante „B180“. Die CO₂-Emissionen pro Tonne PKW betragen für das Elektrofahrzeug: Verwertung 0.6, Fahrbetrieb 0, Stromerzeugung (EU-Strommix) 11.9, Stromerzeugung (aus Wasserkraft) 0.2 und PKW-Herstellung 10.1. Für den Benziner lauten die Zahlen: Verwertung 0.5, Fahrbetrieb 23.8, Stromerzeugung (EU-Strommix) 0, und PKW-Herstellung 5.5. Deutliche Unterschiede gibt es im Fahrbetrieb und in der Herstellung.²⁸

In den folgenden Kapiteln werden Studien und ihre Ergebnisse zu Aspekten der Nachhaltigkeit bzw. ökologischen Bewertung der Prozesskette von Speicherbatterien für die Elektromobilität behandelt.

5.1. Nachhaltigkeit in der Elektromobilität - Analyse der externen Folgen von Lithium-Ionen-Batterien

Die Arbeit untersucht anhand von Studien die Rohstoffe Lithium, Kobalt und Grafit auf ihre Kritikalität hin und identifiziert alle drei auf kritische Rohstoffe. Die Betrachtung der sozialen und ökonomischen Aspekte führte im Ergebnis nicht zu einer schlechteren Ressourcenkritikalität. Die Autorin gibt zu bedenken, dass die Vergleichbarkeit der von ihr ausgewerteten Studien, durch die „starke Ausrichtung der einzelnen Studien auf die Interessen ihrer Verfasser insgesamt als beschränkt zu betrachten“ wäre. Die Umweltverträglichkeit der Elektromobilität sei aber kritisch zu bewerten. Beispielsweise während des Rohstoffabbaus und auch während des Herstellungsprozesses der Akkumulatoren sei die Umwelt erheblichen Belastungen ausgesetzt und fehlende Recyclingkonzepte vorhandener Batterien führten zu einer schlechteren Ökobilanz. Ausgewählte Beispiele für Produktionsprozesse zeigen die Umweltauswirkungen.²⁹

5.2. Agora Verkehrswende „Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität“

Für die Lithium-Ionen-Batterien liegt der Fokus auf den Schlüsselrohstoffen Lithium, Kobalt, Grafit und Nickel. Platin wird in der Komponente Brennstoffzelle der Brennstoffzellenfahrzeuge

SubSKrit = Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien. Potentialermittlung für Second-Best-Lösungen

Unterreiner, L. et al. (2016). „Recycling of Battery Technologies – Ecological Impact Analysis Using Life Cycle Assessment (LCA)“, Energy Procedia 99, 2016, 229-234

28 Karle, A., (2015). „Elektromobilität: Grundlagen und Praxis, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München 2015, Seite 166

29 Hedeler, B. (2015). „Nachhaltigkeit in der Elektromobilität: Analyse der externen Folgen von Lithium-Ionen-Batterien“, diplomica Verlag GmbH, 2015

eingesetzt. Die Neodym-Eisen-Bor-Magnete, der Elektromotoren für Hybrid-Pkw (HEV), Plug-in-Hybride (PHEV), vollelektrische Pkw (BEV) sowie Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV), enthalten Seltene Erden wie Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium (zusammen rund 30 Gewichtsprozent des Magnetmaterials). In Kapitel 4.4 werden die größten sozialen und ökologischen Risiken für die betrachteten Rohstoffe zusammengetragen. Zusammenfassend kommen die Autoren zu dem Schluss: „Die Förderung von Rohstoffen für die Elektromobilität ist mit Umwelt- und Sozialproblemen verbunden – wie die Förderung vieler anderer Rohstoffe auch. [...] Besonders problematisch ist zurzeit die Kobaltförderung im Kleinbergbau in der Demokratischen Republik Kongo einzuschätzen, wo der Großteil der bekannten Kobalt-Vorkommen zu finden ist.“³⁰ Die Autoren geben weiter zu bedenken, dass „eine einseitige Betrachtung der möglichen sozio-ökonomischen und ökologischen Auswirkungen des verstärkten Abbaus von Schlüsselrohstoffen der Elektromobilität aus Nachhaltigkeitssicht nicht zielführend und angemessen ist. Durch die steigende Elektrifizierung des Verkehrssektors werden mittel- und langfristig gewaltige Mengen anderer Rohstoffe eingespart. Allen voran kann auf die Einsparung von Rohöl verwiesen werden.“ Die Autoren geben am Ende ihrer Studien Handlungsempfehlungen für einen verantwortlichen, umwelt- und sozialverträglichen Bergbau. Der Bereich des nachhaltigen Bergbaus wird zum Beispiel im Horizon2020-Projekt „Strade“ adressiert.³¹

5.2.1. Lithium

Die beiden unterschiedlichen Abbaumethoden, Abbau im Tagebau und Gewinnung aus Salzseen, weisen sehr unterschiedliche ökologische Risiken auf. „Der Abbau von Spodumen in Australien birgt die gängigen Umweltgefährdungspotenziale eines Erzbergbaus. Beim Spodumen Abbau ist vor allem der Energiebedarf von Bedeutung und damit sind Treibhausgasemissionen sowie der Anfall von Bergbauabfällen zu nennen. Darüber hinaus kann die bei der Aufbereitung verwendete Schwefelsäure bei Handhabungsfehlern in die Umwelt gelangen.“³² Diverse Konflikte in Wasserstressgebieten zwischen der lokalen Bevölkerung und Bergbauunternehmen sind bekannt.

5.2.2. Kobalt

„Seit 2010 besteht durch den Erlass des Dodd-Frank Acts³³ eine Berichts- und Sorgfaltspflicht für amerikanische Unternehmen, die Konfliktminerale aus dem Kongo importieren. [...] Generell

30 Agora Verkehrswende (2017). „Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität“, Seite 7 und 49. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Synthesepapier_WEB.pdf

31 Ebenda: 52

Projekt „Strade“ (2016). „Strategic Dialogue on Sustainable Raw Materials for Europe“, www.stradeproject.eu/index.php?id=3

32 British Geological Survey (BGS) (2016). „Lithium Profile“, https://www.bgs.ac.uk/news/docs/2016/Lithium_Profile_Press_Release.pdf, und <http://www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=3100>, Seite 16

33 Dodd-Frank Act = börsennotierte amerikanische Unternehmen haben entlang ihrer Lieferkette eine verbindliche Berichts- und Sorgfaltspflicht beim Import von Konfliktmineralien (Zinn, Wolfram, Tantal und Gold) aus der DR Kongo und ihren Nachbarstaaten.

sind insbesondere zwei Risiken zu nennen. Zum einen ist der Kleinbergbau aufgrund des informellen Charakters häufig von Kinderarbeit und schlechten Arbeitsbedingungen geprägt. Auf der anderen Seite entstehen Risiken (wie zum Beispiel Korruption und irreguläre Besteuerung) aufgrund schwacher staatlicher Strukturen und der politischen Situation im Kongo.“³⁴

„Bezogen auf die Umwelt ist vor allem folgender Punkt von Bedeutung: Kupfer-Kobalt-Lagerstätten sind häufig mit sulfidischen Mineralen vergesellschaftet und bergen daher das Risiko, saure Grubenwässer zu generieren (Acid Mine Drainage³⁵). Häufig lässt sich die Bildung von Acid Mine Drainage nur schwer vermeiden. Präventive Maßnahmen sind beispielsweise das Abdecken von Abfall- und Reststoffen mit Membranen oder mit Schichten tonhaltiger Minerale wie beispielsweise Bentonit. Zudem werden alkalische Chemikalien eingesetzt, können aber die Bildung von Säure nicht immer langfristig gewährleisten. Liegen bereits saure Grubenwässer vor, kommt häufig Kalk zum Einsatz, um den pH-Wert auszugleichen.“³⁶

5.2.3. Nickel

„Nickel wird etwa zu gleichen Teilen aus sulfidischen Erzen und lateritischen³⁷ Lagerstätten gewonnen. Beide Arten des Abbaus werden von unterschiedlichen Umweltauswirkungen begleitet. Nickel aus sulfidischen Erzen ist meistens mit Platin-Gruppen-Metallen, Kupfer und Kobalt vergesellschaftet und kann sowohl im Untertage- als auch im Tagebau gefördert werden. Sulfidische Erze bergen sowohl im Untertage- als auch im Tagebau das Potenzial, saure Grubenwässer (AMD³⁸) zu bilden, welche zu nachhaltigen negativen Einwirkungen auf Boden und Wasser führen können.“³⁹

„Lateritische Lagerstätten sind mit höherem Energieaufwand bei der Aufbereitung verbunden als sulfidische Erze, unter anderem aufgrund einer hohen Feuchte im Erz. Daraus ergibt sich für lateritische Lagerstätten ein höheres Treibhausgaspotenzial, welches zwischen 25 und 46 Tonnen

34 Deutsche Rohstoffagentur (DERA) (Hrsg.) (2017). „Kobalt aus der DR Kongo - Potenziale, Risiken und Bedeutung für den Kobaltmarkt“, Commodity Top News 53 5/2017, BGR, https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/53_kobalt-aus-der-dr-kongo.pdf?__blob=publicationFile&v=2

35 Acid Mine Drainage (AMD): Sulfidische Erze können durch Sauerstoff und Wasser Schwefelsäure bilden, welche wiederum Schwermetalle aus dem Erz lösen und Gewässer und Umwelt nachhaltig schädigen.

36 Agora Verkehrswende (2017). „Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität“, Seite 49f, https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Synthesepapier_WEB.pdf

Santiago, P.-A., et al. (2017). „Techniques to correct and prevent acid mine drainage - A review“, DYNA 81 (186), Seite 73 – 80, <https://core.ac.uk/download/pdf/25641997.pdf>

37 Laterit = Geologie: stark verwittertes mineralogisch-chemisches Verwitterungsprodukt

38 AMD = Acid Mine Drainage

39 Agora Verkehrswende (2017). „Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität“, Seite 50. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Synthesepapier_WEB.pdf

CO₂ je produzierter Tonne primärem Metall liegt. Sulfidische Erze erreichen weniger als 10 Tonnen CO₂ je Tonne Metall. Beide Lagerstättentypen werden vom Ausstoß von Schwefeldioxid begleitet, welcher sauren Regen hervorruft.“⁴⁰

„Durch den Nickelbergbau kam es in Kanada und Russland zu weitreichenden negativen Auswirkungen, welche sich vor allem durch einen Biodiversitätsverlust, sauren Regen und die Kontamination mit Schwermetallen äußern. Soziale Folgen sind meist umweltinduziert und betreffen gesundheitliche Auswirkungen und den Verlust landwirtschaftlicher Nutzflächen.“⁴¹

5.2.4. Grafit

„Grafit wird sowohl bergbaulich gefördert als auch synthetisch hergestellt. Fast zwei Drittel der globalen bergbaulichen Produktion kommen aus China. Weiterhin tragen Indien mit 14 Prozent und Brasilien mit knapp 7 Prozent nennenswerte Mengen zur globalen Produktion bei.“⁴²

„Berichten der Washington Post zufolge werden viele chinesische Grafitabbaustandorte von massiven Staubemissionen begleitet. Die Stäube setzen sich in der unmittelbaren Umgebung ab und beeinträchtigen die Gesundheit der Anwohner, ebenso werden die Gewässer durch Rückstände der Aufbereitung verunreinigt.“⁴³

5.2.5. Platin

„Platin kommt immer mit anderen Elementen der Platingruppen-Metalle (Palladium, Rhodium, Ruthenium, Iridium, Osmium) vor und wird daher nicht isoliert abgebaut.“ Drei Viertel der Weltproduktion kommt aus Südafrika, zehn Prozent aus Russland und etwa sieben Prozent aus Simbabwe. „Umweltseitige Probleme beim Platingruppen-Metallbergbau ergeben sich beispielsweise beim Abbau sulfidhaltiger Erze. Diese weisen ein hohes AMD-Potenzial auf und damit ein Risiko, die Umwelt durch Verschmutzung der Gewässer mit Schwermetallen und dem Herabsetzen des pH-Wertes zu belasten. Weiterhin enthalten die Erze im Schnitt nur 0,002 Prozent Platin-Gruppen-Metalle. Dadurch fallen große Mengen bergbaulicher Reststoffe an. Ferner sind damit ein hoher Energieaufwand und enorme Treibhausgasemissionen bei der Aufbereitung verbunden. Vor allem das enorm hohe Treibhausgaspotenzial der Primärplatinherstellung spielt eine wesentliche Rolle bei der Bewertung der Umweltbelastungen. Mit 14.000 Tonnen CO₂ je produzierter Tonne Primärmetall liegen die Emissionen um ein Vielfaches höher als beispielsweise bei Kupfer, mit

40 Agora Verkehrswende (2017). „Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität“, Seite 50. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Synthesepapier_WEB.pdf

41 Ebenda: 51.

42 Ebenda.

43 Ebenda.

Whoriskey, P., (2016). „In your phone, in their air - A trace of graphite is in consumer tech, Washington Post, <https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/graphite-mining-pollution-in-china/>, 28.10.2016

3,4 Tonnen CO₂ je Tonne Metall. Allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass die globale jährliche Primärplatinproduktion weniger als 200 Tonnen beträgt.“⁴⁴

„Im Jahr 2012 kam es infolge von Streitigkeiten über Arbeitsbedingungen und Bezahlung zu einer Reihe von Streiks in „PGM22“-Minen⁴⁵ in Südafrika. Nur aufgrund einer geringen Nachfrage in dem Jahr konnten Preissteigerungen und temporäre Lieferengpässe vermieden werden. Auch in Zukunft sind soziale Friktionen (Streiks etc.) im ehemaligen Apartheitsstaat mit entsprechenden Auswirkungen auf die Minenproduktion jederzeit möglich.“

Auch nach den Schlichtungsgesprächen des „Massakers von Marikana“ sollen die Arbeits- und Lebensbedingungen vor Ort nach wie vor schlecht sein. Nur unzureichender Zugang zu Elektrizität, Wasser und sanitären Einrichtungen ist gewährleistet. Verbesserungen treten nur langsam ein.⁴⁶

5.3. Agora Verkehrswende „Klimabilanz von Elektroautos“

Die Autoren der Studie haben 23 Studien zur Ökobilanzierung von Elektrofahrzeugen verglichen und ausgewertet. Es gibt auch Aussagen zu Einzelkomponenten, wie den Akkumulatoren: „Die bei der Batterieherstellung verursachten Emissionen sind in der Phase der Fahrzeugherstellung für den größten Unterschied zwischen Verbrenner- und Elektroauto verantwortlich. [...] Der Beitrag der Batterie an der Klimawirkung der Fahrzeugherstellung für ein Kompaktklassefahrzeug

44 Agora Verkehrswende (2017). „Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität“, Seite 51. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Synthesepapier_WEB.pdf

Gunn, G., British Geological Survey (2014). „Critical metals handbook“, Veröffentlichung von American Geophysical Union and Wiley, Chichester, Edition 2014, Seite 284ff

45 PGM = Platingruppen-Metalle

46 Agora Verkehrswende (2017). „Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität“, Seite 52. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Synthesepapier_WEB.pdf

Chetty, R., (2018). „The Marikana Massacre - Insurgency and Counter-Insurgency in South Africa“, New Labor Forum 25(2), Seite 62–70, <https://newlaborforum.cuny.edu/2018/01/05/the-marikana-massacre-insurgency-and-counter-insurgency-in-south-africa/>

Nicolson, G., Daily Maverick (2017). „Five years later, we haven't learnt anything from Marikana“, <https://www.dailymaverick.co.za/article/2017-08-15-five-years-later-we-havent-learnt-anything-from-marikana/>, 15.8.2017

March L., Deutschlandfunk Kultur (2015). „Streik, Gewalt und Trauer - Südafrikas Pulverfass Platinbergbau“, 23.02.2015. https://www.deutschlandfunkkultur.de/suedafrikas-pulverfass-platinbergbau-streik-gewalt-und.979.de.html?dram:article_id=312229

liegt bei 36 Prozent. [...] Bezogen auf den kompletten Lebensweg des Fahrzeugs (inklusive Nutzungsphase) sind dies jedoch nur noch 10 Prozent.“ Eine weitere Studie kommt auf 33 bzw. 10 Prozent.⁴⁷

Ein ausführlicher Teil der Arbeit behandelt Batterietypen- und -parameter. „Für die Batteriebilanz wichtiger als die eingesetzte Zellchemie ist jedoch der Energieeinsatz in der Zellfertigung. Hierzu liegen nur wenige primäre Industriedaten vor, entsprechend groß sind die Unsicherheiten. Die Bandbreite der Klimawirkung der Batterieherstellung ist in den untersuchten Studien besonders groß: Sie reicht von 39 bis 275 kg CO₂-Äquivalenten pro Kilowattstunde (kWh). In der Mehrzahl der Studien werden allerdings Angaben zwischen 100 bis 200 kg CO₂-Äquivalenten pro kWh gemacht; das grenzt den typischen Bereich stärker ein. [...] In einem ersten Differenzierungsschritt lässt sich der Energieverbrauch nach Zellherstellung und Batteriemontage untergliedern. Die Zellherstellung ist deutlich energieintensiver als der letzte Prozessschritt der Batteriemontage [...]. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Treibhausgasemissionen aus der Batteriefertigung bezogen auf eine Kilowattstunde Batteriekapazität.“⁴⁸

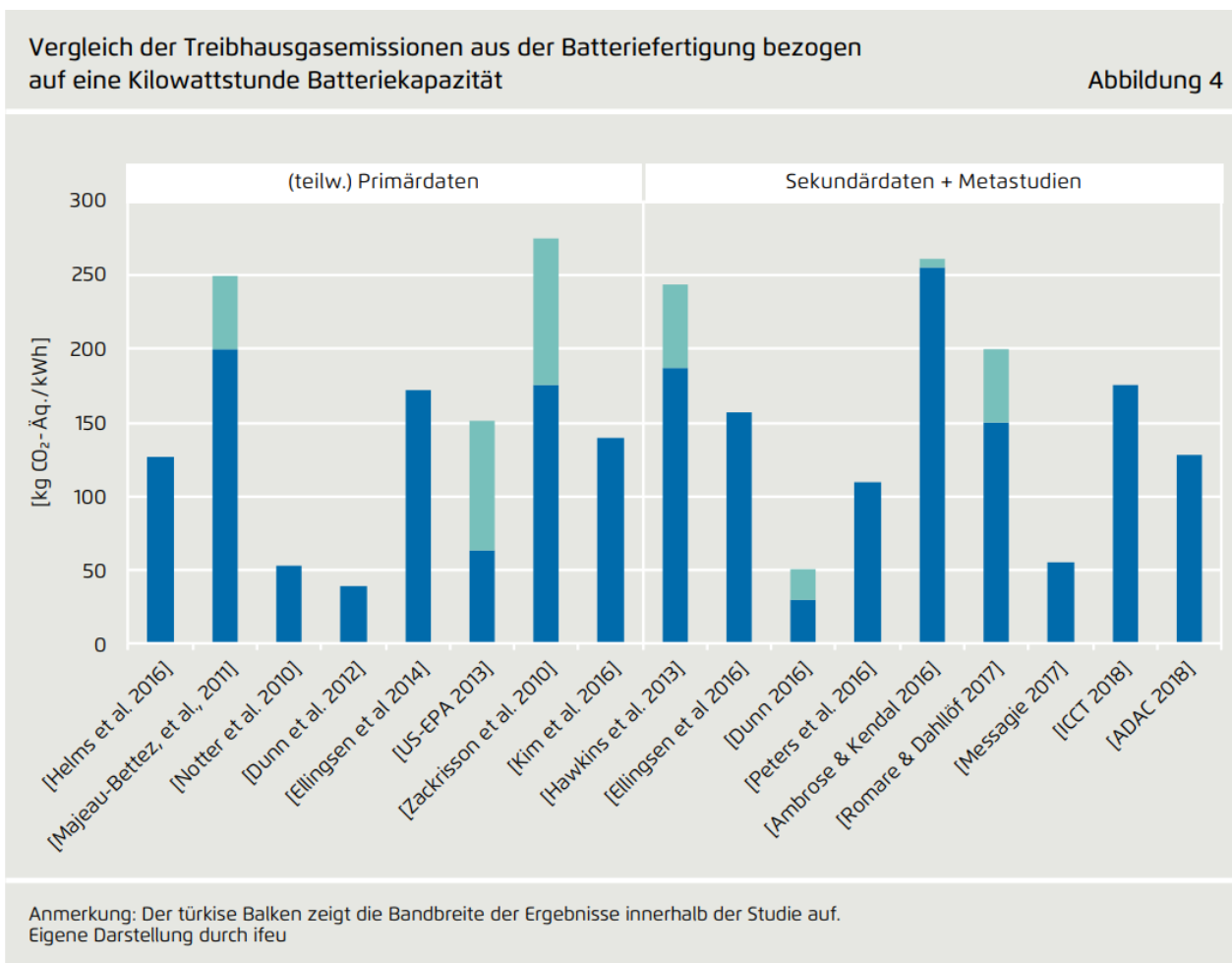
47 Agora Verkehrswende (2017). „Klimabilanz von Elektroautos - Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial“, Seite 24. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf

Die Liste der 23 Studien findet sich auf Seite 67.

Ellingsen, L. A.-W. et al. (2016). „The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles“, Environmental Research Letters 11 (5), <https://pdfs.semanticscholar.org/bd17/2fca2b88b90405fc9d27e7b8662876c26e3d.pdf>

Umweltbundesamt (UBA) (2016). „Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen“, 27/2016, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_27_2016_umweltbilanz_von_elektrofahrzeugen.pdf

48 Agora Verkehrswende (2017). „Klimabilanz von Elektroautos - Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial“, Kapitel 3.4. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf



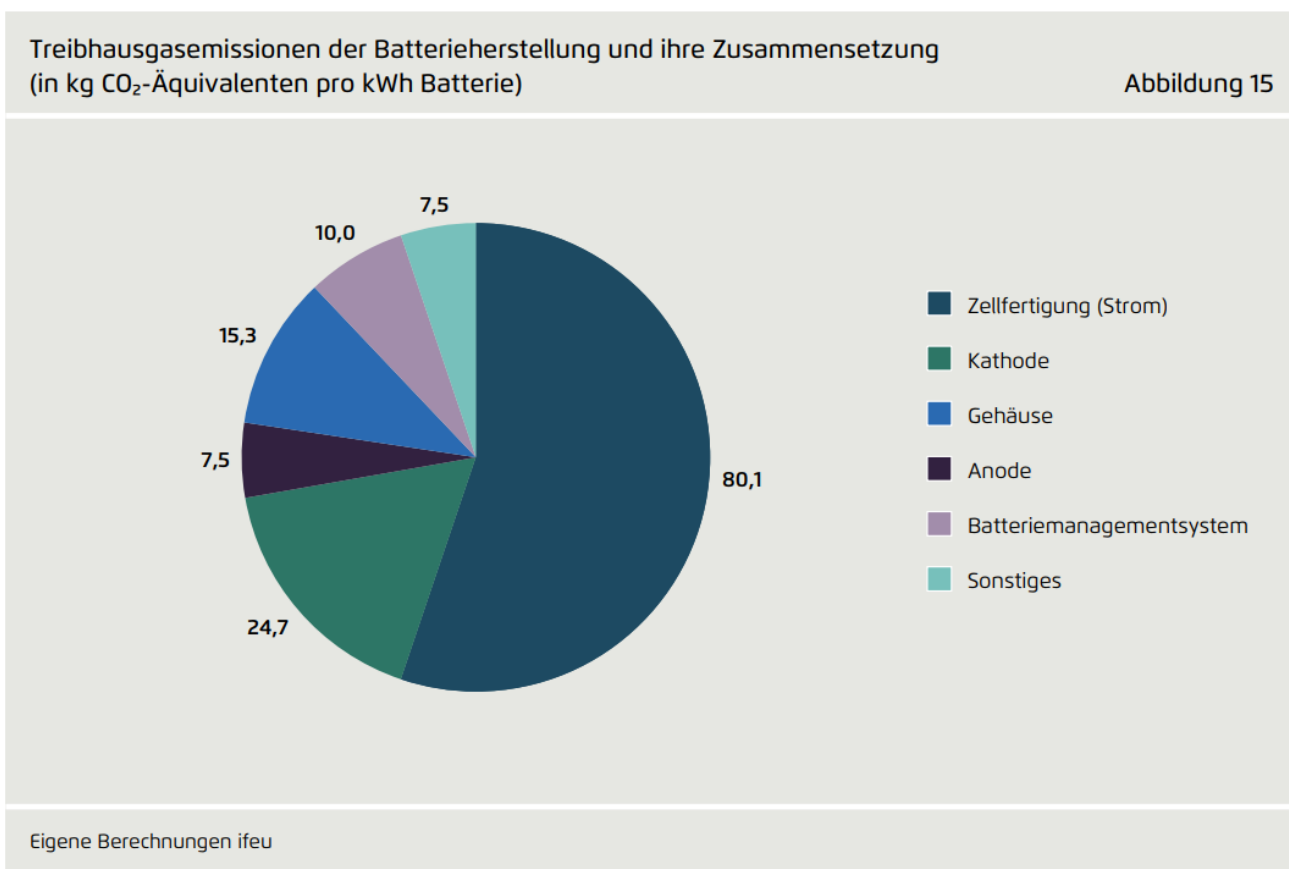
Eine grobe Betrachtung des Recyclings von Akkumulatoren erbrachte, bei einer pyrometallurgischen Entsorgung im Schachtofen, Treibhausgasemissionen der Batterieentsorgung von etwa 7,6 kg CO₂-Äquivalenten pro kWh Batterie. Dies führt zu einem Aufschlag von gut 5 Prozent auf die bilanzierten Herstellungsemissionen in Höhe von 145 kg CO₂-Äquivalenten pro kWh Batterie.⁴⁹

Einen Einfluss der Batteriefertigung auf die Klimabilanz hat auch der mit dem Fertigungsprozess verbundene Energieaufwand, der stark, je nach Hersteller und Anlage, variiert. „Für das Fallbeispiel in der Sensitivitätsanalyse wurde zunächst von einem konservativen Strombedarf von 11 kWh_{el} pro kg Batterie ausgegangen. Dies entspricht bei einer Energiedichte von 115 Wh pro kg etwa 100 kWh_{el} pro kWh Batterie. Der Vergleich mit anderen Quellen zeigt, dass auch eine effizientere Fertigung möglich sein könnte. Bereits heute ist nach Angaben von VW bei hoher Produktionsauslastung und in einem eingeschwungen Serienprozess ein Stromverbrauch von 50 kWh_{el}

49 Agora Verkehrswende (2017). „Klimabilanz von Elektroautos - Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial“, Seite 44. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf

pro kWh Batterie (bei einer Energiedichte von 115 Wh/kg) erreichbar. Dies würde eine Halbierung des für heute als typisch angenommenen Wertes bedeuten. Für diese besonders günstigen Produktionsbedingungen liegen die Treibhausgasemissionen pro kWh Batteriekapazität dann nur noch bei 105 kg CO_{2eq}.⁵⁰

Die folgenden Grafiken zeigen den Anteil der einzelnen Batteriekomponenten am Treibhausgaspotenzial. Der Anteil von Aluminium, Kobalt (als Sulfat) und die Elektronik sind am größten.

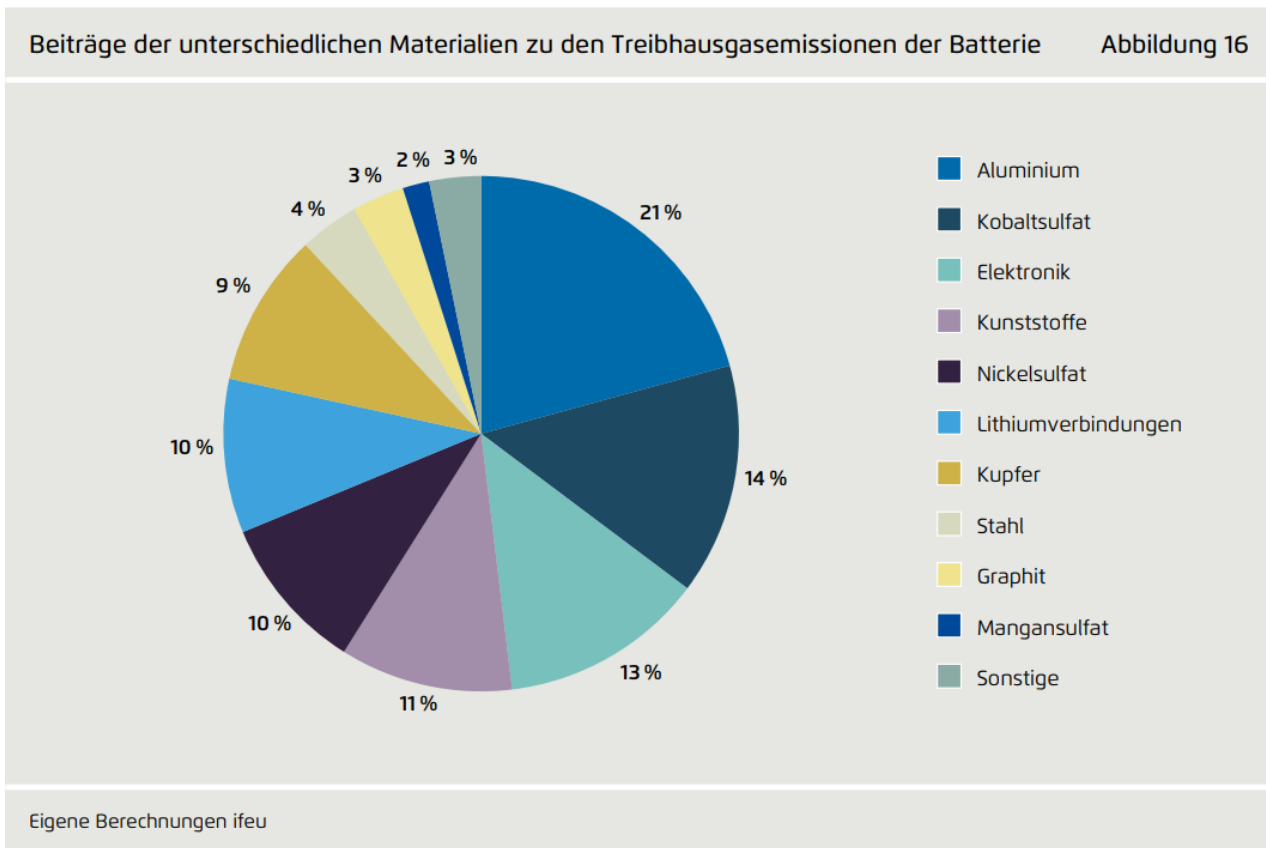


50 Ebenda: 46.

Rescharge (2018). „PEFCR - Product Environmental Footprint Category Rules for High Specific Energy Rechargeable Batteries for Mobile Applications“, http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR_Batteries.pdf

Produktspezifische und lebenszyklusbasierte Regeln, die die allgemeinen methodischen Leitlinien für Ökobilanzierungen (PEF) nach ISO 14025:2006 ergänzen.

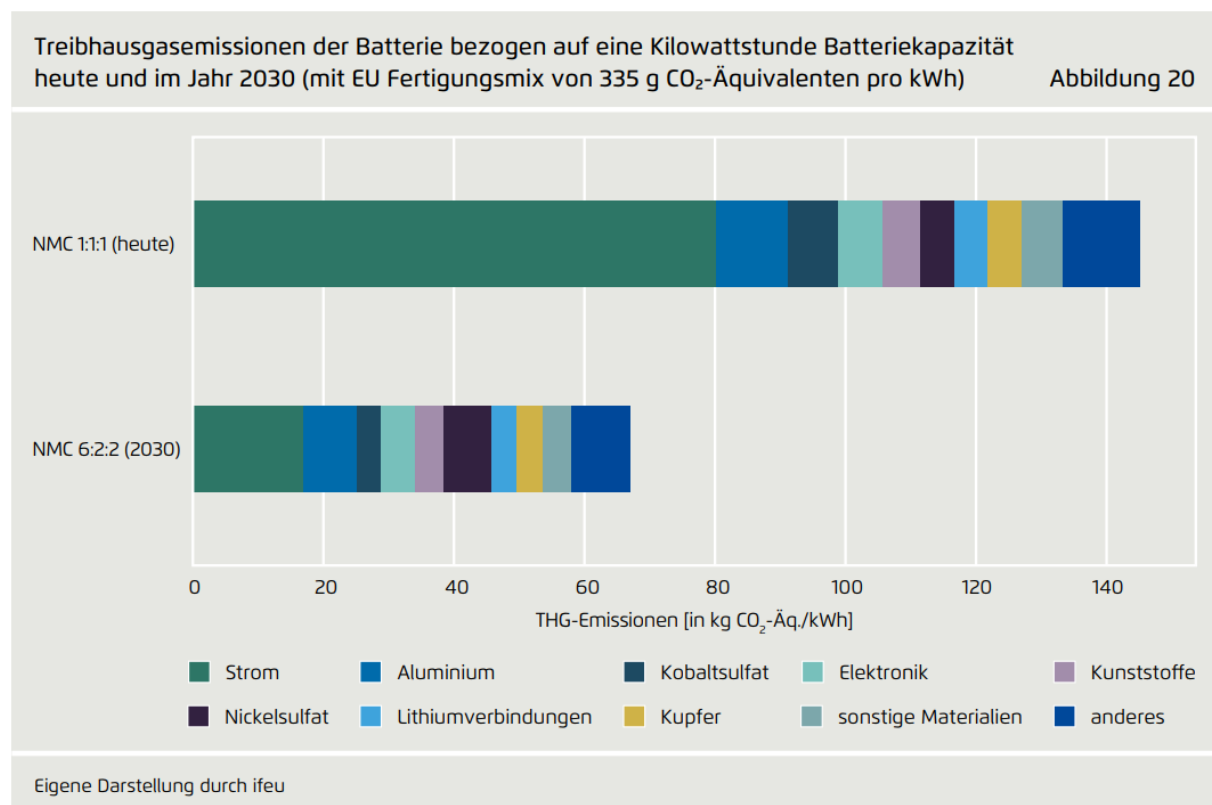
DIN EN ISO 14025: Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Typ III Umweltdeklarationen - Grundsätze und Verfahren (ISO 14025:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14025:2011,



„Neben der Höhe des Strombedarfes ist auch der Ort der Zellfertigung entscheidend, da die Treibhausgasemissionen der Strombereitstellung weltweit sehr unterschiedlich sind. Heute erfolgt ein großer Teil der Zellfertigung in Ostasien (China, Japan und Korea) sowie in den USA. Für die Fertigung der Batterie im Beispielfahrzeug wurde eine Strombereitstellung im Durchschnitt der heutigen Produktionsländer entsprechend ihrem Anteil an der Fertigung angesetzt, die Treibhausgasemissionen in Höhe von 805 g CO₂-Äquivalenten pro kWh entspricht.“ Weiter schreiben die Autoren: „Bei einer Zellfertigung allein in China erhöht sich die energieabhängige Klimawirkung der Batterieherstellung demgegenüber jedoch deutlich, da hier pro Kilowattstunde Strom Treibhausgase in Höhe von etwa 1.100 g CO₂-Äquivalenten emittiert werden. Pro Kilowattstunde Batteriekapazität entstehen dann 175 kg CO₂-Äquivalente anstelle von 145 kg CO₂-Äquivalente. Umgekehrt ist zukünftig durch Batteriefertigung mit einem dekarbonisierten Strommix (z.B. in der EU) auch eine deutliche Verbesserung der Klimabilanz möglich. Die Fertigungsbedingungen haben dann auch Auswirkungen auf die gesamte Klimabilanz des Elektroautos. Werden die Zellen in China gefertigt, verschiebt sich die Fahrleistungsschwelle für einen Klimavorteil (Breakeven) zwischen Verbrennern und Elektroauto bei Energiewende nach Basisszenario der Langfristszenarien auf 75.000 km beim Benziner und gut 95.000 km beim Diesel. Findet die Zellherstellung wie bisher in Ostasien und den USA jedoch bei hoher Auslastung und in optimierter Serienfertigung statt, kann das Elektroauto gegenüber dem Benziner bereits ab knapp 50.000 km

vorteilhaft sein und ab 60.000 km gegenüber dem Diesel. In der Gesamtbilanz liegt der Unterschied zwischen den beiden Sensitivitäten aufgrund des begrenzten Beitrags der Batterie bei unter 10 Prozent.“⁵¹

In der folgenden Grafik werden Treibhausgasemissionen von Lithium-Ionen-Batterien des heutigen Technikstands und eines möglichen Batterie-Typ aus dem Jahr 2030 verglichen. Das Szenario zeigt eine Halbierung der Emissionen.⁵²



51 Agora Verkehrswende (2017). „Klimabilanz von Elektroautos - Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial“, Seite 46. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf

Datenbank „ecoinvent“, <https://www.ecoinvent.org/>

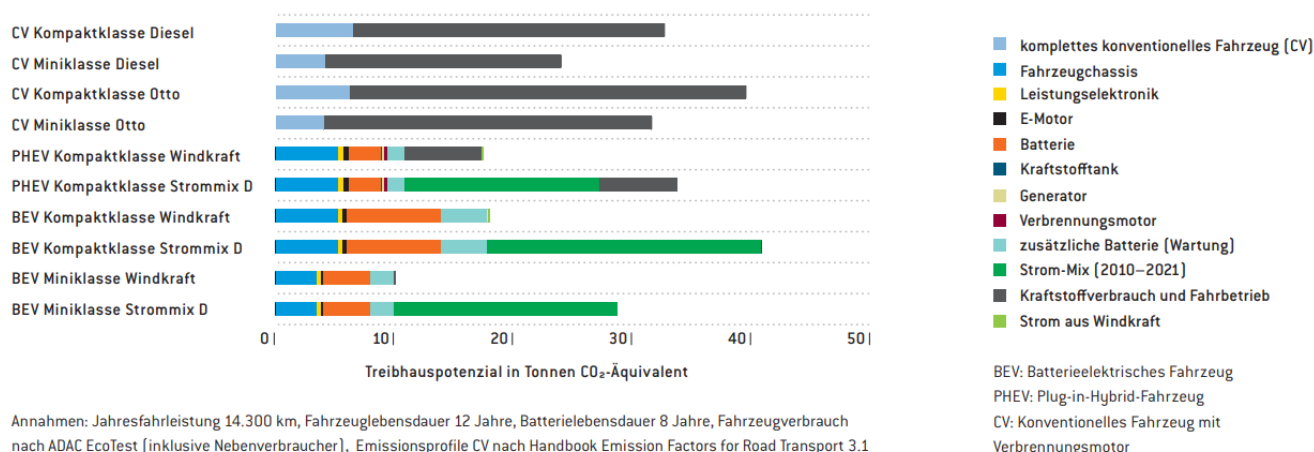
52 Standard-NMC-Kathodenmaterial enthält Nickel, Cobalt und Mangan zu gleichen Anteilen (1:1:1-NMC). Nickelreichen Varianten sind 5:3:1, 6:2:2 und 8:1:1. 6:2:2-NMC hat bereits die Marktreife erreicht und wird in einigen Elektrofahrzeugen eingesetzt.

Batterieforum Deutschland (2019). „Lithium-Ionen-Batterien“, <https://www.batterieforum-deutschland.de/info-portal/batterie-kompendium/sekundaere-batterie/metal-ionen-batterien/lithium-ionen-batterien/>

Agora Verkehrswende (2017). „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

5.4. Fraunhofer-Institut (ISI) „Gesellschaftspolitische Fragestellungen der Elektromobilität“

Das Fraunhofer ISI hat das Treibhausgaspotential verschiedener Fahrzeugtypen gegenübergestellt. Die Grafik zeigt Beiträge der Herstellung und Nutzung verschiedener Fahrzeugkonzepte zum Treibhauspotenzial über die komplette Nutzung in Deutschland. Die Anteile der Batterien sind ebenfalls gesondert ausgewiesen.⁵³



5.5. Fraunhofer-Institut (ISE) „Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge“

Das Ergebnis einer aktuellen Studie des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) für H2-Mobility „zum Lebenszyklus-Vergleich von Elektrofahrzeugen mit höherer Reichweite ist eindeutig: Ab einer Reichweite von 250 Kilometer sind Pkw mit Wasserstoff und Brennstoffzelle (FCEV) klimafreundlicher als Batteriefahrzeuge (BEV). Der entscheidende Faktor ist der wesentlich größere CO₂-Rucksack, den Batterieautos durch die Produktion der Batterie tragen müssen.“ Beide sind jedoch klimafreundlicher als der Diesel.⁵⁴

53 Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) (2011). „Gesellschaftspolitische Fragestellungen der Elektromobilität“, https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2011/elektromobilitaet_broschuere.pdf

54 H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG (2019). „Fraunhofer Studie zu THG-Emissionen BEV und FCEV“, <https://h2.live/news/860>

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) (2019). „Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km“, https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/news/2019/ISE_Ergebnisse_Studie_Treibhausgasemissionen.pdf

Spiegel Online (2019). „Wann die Brennstoffzelle das Batterieauto schlägt“, <https://www.spiegel.de/auto/aktuell/brennstoffzelle-oder-elektroauto-welcher-antrieb-ist-besser-fuers-klima-a-1276800.html> vom 14.7.2019

5.6. Icct „Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions“

Eine kurze Zusammenfassung über die Ökobilanz des Herstellungsprozesses von Lithium-Ionen-Batterien liefert u.a. einen Überblick über aktuelle Forschungsergebnisse zu den Treibhausgasemissionen bei der Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge. Die Autoren fanden heraus, dass die Emissionen aus der Batterieherstellung etwa so hoch sind wie die bei der Herstellung eines durchschnittlichen Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor bzw. etwa einem Viertel der Emissionen aus der Lebensdauer eines Elektroautos entsprechen. Die Schätzungen der Emissionen der Batterieherstellung variieren jedoch um den Faktor 10.⁵⁵

5.7. POLiS

„Im Exzellenzcluster POLiS [Post Lithium Storage] arbeiten 25 Forschungsgruppen an leistungsfähigen Batterietechnologien jenseits von Lithium. Das ITAS begleitet den Entwicklungsprozess mit dem Ziel, von Beginn an ökologische, ökonomische und soziale Aspekte zu berücksichtigen.“⁵⁶

Die Wissenschaftler des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und der Universität Ulm forschen in den nächsten sieben Jahren unter Berücksichtigung ökologischer, ökonomischer und sozialer Aspekte an Batterien, die komplett ohne Lithium oder Kobalt auskommen.

5.8. Forschungsprojekte des Umweltbundesamtes

Seit 2012 führt das Umweltbundesamt sieben Forschungsprojekte zum Themenkomplex Umweltgefährdungspotential von Rohstoffen, Auswirkungen auf den Klimawandel auf die Rohstoffgewinnung und Governance im Rohstoffsektor durch. Aktuelle Beispiele hierfür sind:

- RohPolRes (FhG ISI, adelphi) „Entwicklung von Politikempfehlungen für die Weiterentwicklung und Ausgestaltung von strategischen Ansätzen einer nachhaltigen und effizienten Rohstoffnutzung“ (FKZ 3713 11 104)
- UmSoRes (adelphi, Montanuniversität Leoben, MinPol) „Ansätze zur Reduzierung von Umweltbelastung und negativen sozialen Auswirkungen bei der Gewinnung von Metallrohstoffen“, (FKZ 3712 94 315)
- ÖkoRes (Öko-Institut, IFEU, Projekt-Consult) „Erörterung ökologischer Grenzen der Primärrohstoffgewinnung und Entwicklung einer Methode zur Bewertung der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit zur Weiterentwicklung des Kritikalitätskonzeptes“, (FKZ 3713 94 302)

55 International Council on Clean Transportation (icct) (2018). „Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions“, https://theicct.org/sites/default/files/publications/EV-life-cycle-GHG_ICCT-Briefing_09022018_vF.pdf

56 Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) (2019). „Nachhaltige Batterien von morgen“, https://www.itas.kit.edu/2019_010.php

6. Aufstellung von Studien zum Themenspektrum Umwelt, Menschenrechte und Nachhaltigkeit

Adelphi (2018). „Negative Sozial- und Umweltauswirkungen bei der Rohstoffgewinnung reduzieren“, <https://www.adelphi.de/de/projekt/negative-sozial-und-umweltauswirkungen-bei-der-rohstoffgewinnung-reduzieren>

Bodenheimer, M. Ökologisches Wirtschaften (2018). „Stärkung der sozialen Nachhaltigkeit in globalen Produktionsnetzwerken“, <https://www.oekologisches-wirtschaften.de/index.php/oew/article/view/1652/1599>

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2018). „Zukunft? Jugend fragen! Nachhaltigkeit, Politik, Engagement eine Studie zu Einstellungen und Alltag junger Menschen“, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/jugendstudie_bf.pdf

Deutsches Institut für Menschenrechte (2019). „Nachhaltigkeit und Menschenrechte“, <https://www.institut-fuer-menschenrechte.de/themen/nachhaltigkeit/>

Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI) (2010). Endbericht „Potenziale der Elektromobilität bis 2050 – Eine szenarienbasierte Analyse der Wirtschaftlichkeit, Umweltauswirkungen und Systemintegration“, https://www.ewi.research-scenarios.de/cms/wp-content/uploads/2015/12/EWI_2010-07-02_Elektromobilitaet-Studie.pdf

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2019). Projekt „Transition in globalen Wertschöpfungsketten: Förderung der sozialen Nachhaltigkeit“ (SoNa-WSK), <https://www.isi.fraunhofer.de/de/competence-center/nachhaltigkeit-infrastruktursysteme/projekte/sona-wsk.html>

Henkel, A. Soziologie und Nachhaltigkeit (SuN) (2016). „Natur, Wandel, Wissen - Beiträge der Soziologie zur Debatte um nachhaltige Entwicklung“, <https://www.uni-muenster.de/Ejournals/index.php/sun/article/view/1675/1616>

Horizon2020-Projekt „Strade“, <https://www.stradeproject.eu/index.php?id=3>

Initiative for Responsible Mining Assurance (IRMA) (2019). „Resources“, <https://responsiblemining.net/resources/>

Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu) (2017). „Erörterung ökologischer Grenzen der Primärrohstoffgewinnung und Entwicklung einer Methode zur Bewertung der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit zur Weiterentwicklung des Kritikalitätskonzeptes (ÖkoRess I)“, <https://www.ifeu.de/oekologische-rohstoffverfuegbarkeit/> und <https://www.ifeu.de/projekt/oekoress/>

Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (2019). „Nachhaltigkeit und Transformation“, <https://www.izt.de/themen/nachhaltigkeit-und-transformation/>

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2019). „Due Diligence Guidance for Responsible Supply Chains of Minerals from Conflict-Affected and High-Risk Areas“, <http://www.oecd.org/daf/inv/mne/mining.htm>

Soziologie und Nachhaltigkeit (SuN) (2017). „Soziologie der Nachhaltigkeit - Herausforderungen und Perspektiven“, <https://www.uni-muenster.de/Ejournals/index.php/sun/article/view/2070/1987>

Thünen-Institut (2019). „Leistungen des ökologischen Landbaus für Umwelt und Gesellschaft“, https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen_Report_65.pdf

Umweltbundesamt (UBA) (2017). „Verantwortungsvolle Rohstoffgewinnung? Herausforderungen, Perspektiven, Lösungsansätze“, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-08-18_texte_66-2017_umsoress_zusamm.pdf

Umweltbundesamt (UBA) (2018). „Umweltbewusstsein in Deutschland 2018. Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage“, <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/umweltbewusstseinsstudie-2018>

Umweltbundesamt (UBA) (2019). „Nachhaltige Produkte attraktiv für Verbraucherinnen und Verbraucher? Eine Untersuchung am Beispiel von elektronischen Kleingeräten“, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-19_texte_11-2019_nachhaltige-produkte.pdf

Weil, M, et al., Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) (2015). „Elektrochemische Energiespeicher für mobile Anwendungen im Fokus der Systemanalyse“, http://www.tatup-journal.de/downloads/2015/tatup153_weua15a.pdf

7. Aufstellung von Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste zum Themenkomplex Batteriespeicher für die Elektromobilität

Neben den in dieser Arbeit zitierten Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste gibt es weitere Arbeiten zum Themenspektrum „Elektromobilität“:

WD 5 - 064/14	Dokumentation „Elektromobilität“
WD 5 - 066/16	Ausarbeitung „Rahmenbedingungen für Carsharing- und Scootersharing-Unternehmen und die Ziele und Maßnahmen im Zusammenhang mit der Elektromobilitätsstrategie der Bundesregierung“
WD 5 - 070/17	Dokumentation „Beschäftigungswirkungen eines Strukturwandels der Automobilindustrie in Richtung Elektromobilität“
WD 5 - 079/14	Sachstand „Elektromobilität als Baustein der Energiewende“
WD 5 – 082/16	Sachstand „Förderung von Batteriespeichern unter besonderer Berücksichtigung der Bundesländer“
WD 5 - 123/18	Ausarbeitung „Ladepunkte für Elektromobile als Letztverbraucher von Strom oder als Teil des Stromversorgungsnetzes?“
WD 7 – 156/12	Sachstand „Batterien und Akkus in Elektrogeräten“

8. Quellenverzeichnis

Adelphi, Wuppertal-Institut, Umweltbundesamt (2011). „Rohstoffkonflikte nachhaltig vermeiden: Fallstudie und Szenarien zu Kupfer und Kobalt in der Demokratischen Republik Kongo“, https://www.adelphi.de/de/system/files/mediathek/bilder/rohkon_bericht_3-2_kongo_1_0.pdf

Agora Verkehrswende (2017). „Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität“, [https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige Rohstoffversorgung Elektromobilitaet/Agora Verkehrswende Synthesepapier WEB.pdf](https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Synthesepapier_WEB.pdf)

Agora Verkehrswende (2017). „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](https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf)

Amnesty international (2017). „Grosskonzerne tun zu wenig gegen Kinderarbeit“, <https://www.amnesty.de/informieren/aktuell/demokratische-republik-kongo-grosskonzerne-tun-zu-wenig-gegen-kinderarbeit>

Amnesty international (2017). „Time to Recharge Corporate Action and Inaction to Tackle Abuses in the Cobalt Supply Chain“, <https://www.amnesty.org/download/Documents/AFR6273952017ENGLISH.PDF>

Amnesty international (2017). „VW, Daimler und andere Konzerne müssen entschieden gegen Kinderarbeit in der Lieferkette der Akku-Produktion vorgehen – neue Bundesregierung gefordert“, <https://cloud.amnesty.de/index.php/s/6kViVddYZ2DHiyF#pdfviewer>

Antwort der Bundesregierung (2019). „Auswirkungen des Abbaus von Rohstoffen für die Elektromobilität, BT-Drs 19/11686, <http://dipbt.bundestag.de/doc/btd/19/116/1911686.pdf>

Batterieforum Deutschland (2019). „Lithium-Ionen-Batterien“, <https://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/batterie-kompendium/sekundaere-batterie/metall-ionen-batterien/lithium-ionen-batterien/>

British Geological Survey (BGS) (2016). „Lithium Profile“, https://www.bgs.ac.uk/news/docs/2016/Lithium_Profile_Press_Release.pdf, und <http://www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=3100>

Buchert, M. et al., (2016). Aktualisierte Ökobilanzen zum Recyclingverfahren EcoBatRec für Lithium-Ionen-Batterien. Öko-Institut, Berlin/Darmstadt, 2016 3 M, www.ecobatrec.de/index.html

Buchert, M. et al., (2016). Aktualisierte Ökobilanzen zum Recyclingverfahren LithoRec II für Lithium-Ionen-Batterien. Öko-Institut, Berlin/Darmstadt, 2016 4, „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien - LithoRec II“, Abschlussbericht [www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2017-01/Abschlussbericht LithoRec II 20170116.pdf](http://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2017-01/Abschlussbericht_LithoRec_II_20170116.pdf)

Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2018). „World Mining Data 2018-Minerals Production“, Wien, Volume 33, [https://www.world-mining-data.info/?World Mining Data PDF-Files](https://www.world-mining-data.info/?World_Mining_Data_PDF-Files)

Business & Human Rights and Resource Center „Luzifer, Toter Mann und blutrote Flüsse - Nickelabbau in den Philippinen“, <https://www.business-humanrights.org/de/luzifer-toter-mann-und-blutrote-fl%C3%BCsse-%E2%80%93-nickelabbau-in-den-philippinen> und <https://power-shift.de/rote-fluesse-und-tote-fischteiche-nickelabbau-in-den-philippinen-teil-1/>

Chetty, R., (2018). „The Marikana Massacre - Insurgency and Counter-Insurgency in South Africa“, New Labor Forum 25(2), Seite 62–70, <https://newlaborforum.cuny.edu/2018/01/05/the-marikana-massacre-insurgency-and-counter-insurgency-in-south-africa/>

Datenbank „ecoinvent“, <https://www.ecoinvent.org/>

Deutsche Rohstoffagentur (DERA) (Hrsg.) (2017). „Kobalt aus der DR Kongo - Potenziale, Risiken und Bedeutung für den Kobaltmarkt“, Commodity Top News 53 5/2017, BGR, https://www.deutsche-rohstoffagen-tur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/53_kobalt-aus-der-dr-kongo.pdf?_blob=publicationFile&v=2

Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2017). „Rohstoffrisikobewertung - Lithium“, https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-33.pdf?_blob=publicationFile&v=2

Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2016). „DERA-Rohstoffliste 2016“, https://www.deutsche-rohstoffagen-tur.de/DERA/DE/Downloads/rohstoffliste-2016.pdf?_blob=publicationFile und (2017). „Rohstoffrisikobewertung - Lithium“, https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-33.pdf?_blob=publicationFile&v=2

Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2017). „Rohstoffrisikobewertung - Lithium“, https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-33.pdf?_blob=publicationFile&v=2

Deutscher Bundestag (2019). Kleine Anfrage der Fraktion der FDP „Auswirkungen des Abbaus von Rohstoffen für die E-Mobilität“, BT-Drs 19/11137, <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/111/1911137.pdf>

Edison (2019). „Kinderarbeit in Minen: Weniger E-Autos sind auch keine Lösung“, <https://edison.handelsblatt.com/erklaeren/kinderarbeit-in-minen-weniger-e-autos-sind-auch-keine-loesung/22671726.html>

Ellingsen, L. A.-W. et al. (2016). „The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles“, Environmental Research Letters 11 (5), <https://pdfs.semanticscholar.org/bd17/2fca2b88b90405fc9d27e7b8662876c26e3d.pdf>

Frankel, T.C., (2016). „The Cobalt Pipeline - Tracing the path from deadly hand-dug mines in Congo to consumers' phones and laptops“, Washington Post, <https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/congo-cobalt-mining-for-lithium-ion-battery/?tid=batteries-seriesbox>, 30.9.2016

Frankel, T.C., Whoriskey, P. (2016). „Tossed Aside in the ‘White Gold’ Rush Indigenous people are left poor as tech world takes lithium from under their feet“, Washington Post, <https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/tossed-aside-in-the-lithium-rush/?tid=batteriesseriesbox>, 19.12.2016

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) (2019). „Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km“, https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/news/2019/ISE_Ergebnisse_Studie_Treibhausgasemissionen.pdf

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) (2011). „Gesellschaftspolitische Fragestellungen der Elektromobilität“, https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2011/elektromobilitaet_broschuere.pdf

Gemeinsamer Abschlussbericht des Konsortiums nach NKBF 98 Nr. 8.1 (2011). „Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzeptes für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge - Lithium-Ionen Batterierecycling Initiative - LiBRi“, Abschlussbericht www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-libri_1.pdf

Gesellschaft für bedrohte Völker (gfbv) (2017). „‘Galapagos der Philippinen‘ durch Nickelabbau bedroht“, <https://www.gfbv.de/de/news/galapagos-der-philippinen-durch-nickelabbau-bedroht-1187/>, 4.5.2017

Gesellschaft für bedrohte Völker (gfbv) (2017). „Philippinen: Umweltministerin Lopez muss gehen“, <https://www.gfbv.de/de/news/philippinen-umweltministerin-lopez-muss-gehen-8557/>

Grundsätzliche Informationen zur Lithium-Ionen-Technologie werden in der Arbeit: Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2019). „Großbatteriespeicher - Einzelfragen zur Lithium-Ionen-Batterietechnologie“, WD 8-002/19, <https://www.bundestag.de/resource/blob/627424/74e15e4e6f393a030176b8cb29effc24/WD-8-002-19-pdf-data.pdf>

Gunn, G., British Geological Survey (2014). „Critical metals handbook“, Veröffentlichung von American Geo-physical Union and Wiley, Chichester, Edition 2014, Seite 230ff

H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG (2019). „Fraunhofer Studie zu THG-Emissionen BEV und FCEV“, <https://h2.live/news/860>

Hedeler, B. (2015). „Nachhaltigkeit in der Elektromobilität: Analyse der externen Folgen von Lithium-Ionen-Batterien“, diplomica Verlag GmbH, 2015

Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) (2018). „Recycling aktueller und zukünftiger Batteriespeicher: Technische, ökonomische und ökologische Implikationen“, https://www.itas.kit.edu/downloads/veranstaltung_2018_batteriespeicher_abschlussbericht.pdf

Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) (2019). „Nachhaltige Batterien von morgen“, https://www.itas.kit.edu/2019_010.php

-
- International Council on Clean Transportation (icct) (2018). „Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions“, https://theicct.org/sites/default/files/publications/EV-life-cycle-GHG_ICCT-Briefing_09022018_vF.pdf
- Karle, A., (2015). „Elektromobilität: Grundlagen und Praxis, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München 2015
- March L., Deutschlandfunk Kultur (2015). „Streik, Gewalt und Trauer - Südafrikas Pulverfass Platinbergbau“, https://www.deutschlandfunkkultur.de/suedafrikas-pulverfass-platinbergbau-streik-gewalt-und.979.de.html?dram:article_id=312229, 23.2.2015
- Neue Züricher Zeitung (NZZ) „Kommentierte Bilderstrecke“, <https://www.nzz.ch/wirtschaft/bildstrecke/umweltverschmutzung-norilsk-nickel-ld.1300115#lg=1&slide=1>
- Nicolson, G., Daily Maverick (2017). „Five years later, we haven't learnt anything from Marikana“, <https://www.dailymaverick.co.za/article/2017-08-15-five-years-later-we-havent-learnt-anything-from-marikana/>, 15.8.2017
- Öko-Institut (2019). „Gigafactories für Lithium-Ionen-Zellen - Rohstoffbedarfe für die globale Elektromobilität bis 2050“, <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Fab4Lib-Rohstoffe-Elektromobilitaet.pdf>
- Peters, J. F. et al. (2017). „The Environmental Impact of Li-Ion Batteries and the Role of Key Parameters – A Re-view“ Renewable and Sustainable Energy Reviews 67, S. 491–506, 2017
- Projekt „Strade“ (2016). „Strategic Dialogue on Sustainable Raw Materials for Europe“, www.stradeproject.eu/index.php?id=3
- Rescharge (2018). „PEFCR - Product Environmental Footprint Category Rules for High Specific Energy Recharge-able Batteries for Mobile Applications“, http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR_Batteries.pdf
- Santiago, P.-A., et al. (2017). „Techniques to correct and prevent acid mine drainage - A review“, DYNA 81 (186), Seite 73 – 80, <https://core.ac.uk/download/pdf/25641997.pdf>
- Spektrum der Wissenschaft, Serie Elektromobilität (2018). „Umwelt - Die Ökobilanz der E-Mobilität“, Heft 5, 2018, Seite 12-19
- Spektrum der Wissenschaft, Serie Elektromobilität (2018). „Batterietechnik - Energiespeicher für eine Elektromobile Gesellschaft“, Heft 5, 2018, Seite 20-25
- Spektrum der Wissenschaft, Serie Elektromobilität (2018). „Elektromobilität - Ausgebremst durch Rohstoffmangel?“, Heft 5, 2018, Seite 46-51
- Spiegel Online (2019). „Wann die Brennstoffzelle das Batterieauto schlägt“, <https://www.spiegel.de/auto/aktuell/brennstoffzelle-oder-elektroauto-welcher-antrieb-ist-besser-fuers-klima-a-1276800.html> vom 14.7.2019

Sterner, M., Stadler, I. (2017). „Energiespeicher“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017

Süddeutsche Zeitung (2019). „Tödliche Ortschaften“, <https://www.sueddeutsche.de/panorama/umweltverschmutzung-toedliche-ortschaften-1.235014-0>, 17. Mai 2010, 21:07 h

Süddeutsche Zeitung „Die vergiftete Insel, Teil 1-4“, <https://gfx.sueddeutsche.de/apps/5885d7a07b38d49f09517a2b/www/>

Umweltbundesamt (UBA) (2016). „Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen“, 27/2016, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_27_2016_umweltbilanz_von_elektrofahrzeugen.pdf

Unterreiner, L. et al. (2016). „Recycling of Battery Technologies – Ecological Impact Analysis Using Life Cycle Assessment (LCA)“, Energy Procedia 99, 2016, 229-234

Whoriskey, P., (2016). „In your phone, in their air - A trace of graphite is in consumer tech, Washington Post, <https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/graphite-mining-pollution-in-china/>, 28.10.2016

Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2018). „Lithium-Vorkommen, Abbau und ökologische Auswirkungen in Bolivien“, WD 8-3000-135/18, <https://www.bundestag.de/resource/blob/627440/21dc4b97c8404198595dec98a4506a79/WD-8-135-18-pdf-data.pdf>

Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2018). „Ökobilanzierung von Energiespeichern für Elektrofahrzeuge“, WD 8-099/18

Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2019). „Zu Elektroautos“, WD 8-009/19

Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2019). Dokumentation „Einzelaspekte der Batterietechnologie in Elektroautos“, WD 8-010/19

Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2019). Dokumentation „Einzelfragen zu Elektrofahrzeugen Ökobilanzierung“, WD 8-060/19

Yale University (2015). „EPI“, <https://epi.envirocenter.yale.edu/>

Yale University (2018). „The 2018 EPI Rankings“, <https://epi.envirocenter.yale.edu/epi-report-2018/executive-summary>