



E-Mobilität – fit für den Kreislauf?

Recycling von
Lithium-Ionen-Batterien



INHALT

1 Einleitung	2
2 Aufbau einer Li-Ionen-Batterie	3
3 Recyclingmethoden für Li-Ionen-Batterien	5
4 Status Quo des Recyclings von Li-Ionen-Batterien und Perspektiven	8
5 Handlungsansätze und Empfehlungen	10
Fazit	11
Mehr lesen / Impressum	12

1 Einleitung

Elektromobilität kommt immer mehr ins Rollen: Mit rund 6,6 Mio. Exemplaren wurden im Rekordjahr 2021 weltweit doppelt so viele E-Autos wie im Vorjahr verkauft, Ende des Jahres waren 16,5 Mio. Elektroautos auf den Straßen unterwegs.¹ Zwar können elektrisch betriebene Fahrzeuge einen wichtigen Beitrag zur Erreichung klimapolitischer Verkehrsziele leisten, problematisch ist jedoch insbesondere der hohe Rohstoffverbrauch durch die in ihnen verwendeten Lithium-Ionen-Batterien (LIB).² So ist Berechnungen der Internationalen Energieagentur zufolge der Mineralienbedarf eines E-Autos sechs Mal höher als bei Verbrenner-Fahrzeugen.³ Zu den wichtigsten Batterierohstoffen zählen hierbei Lithium, Kupfer, Nickel, Kobalt, Grafit und Mangan.

Der Abbau dieser Rohstoffe erfolgt größtenteils in Ländern des Globalen Südens, oftmals einhergehend mit negativen menschenrechtlichen, sozialen und ökologischen Auswirkungen. So ist der Kupferbergbau in Ländern wie Chile und Peru von hohem Flächen- und Wasserverbrauch sowie Umweltver-

- 1 IEA (2022): <https://www.iea.org/news/global-electric-car-sales-have-continued-their-strong-growth-in-2022-after-breaking-records-last-year>
- 2 Die Bezeichnungen Batterie und Akku werden in dieser Publikation synonym verwendet. Beide Begriffe beziehen sich auf wiederaufladbare Lithium-Ionen-Akkus.
- 3 IEA (2021): The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. S. 89. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>

Extrem hoher Flächenverbrauch: Kupfer-tagebau in Peru.



Foto: iStock.com/tifonimages

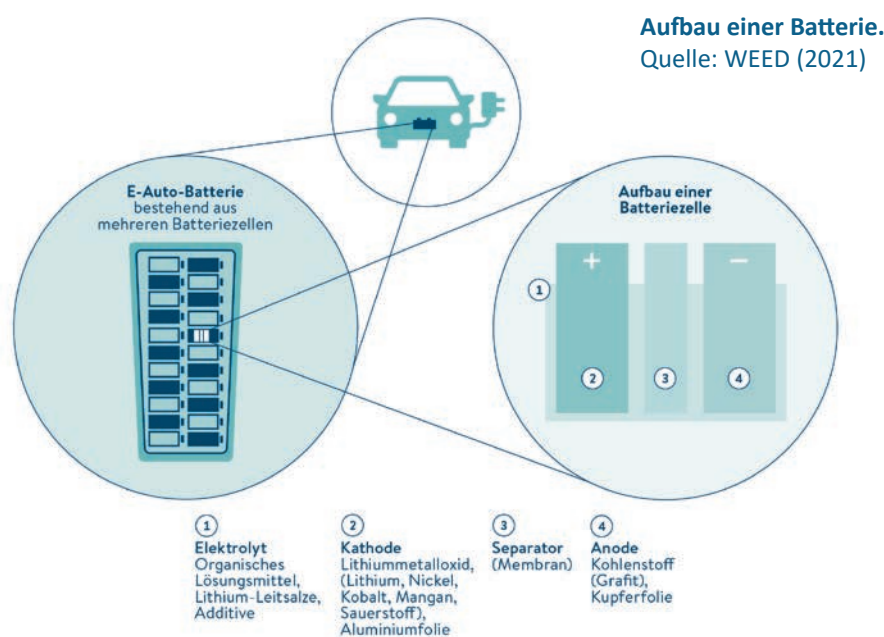
schmutzung und Vertreibung der lokalen Bevölkerung gekennzeichnet.⁴ Kobalt, das überwiegend in der DR Kongo als Nebenprodukt von Kupfer gewonnen wird, steht vor allem aufgrund der prekären Arbeitsbedingungen von Kleinschürfer*innen, Kinderarbeit und den Geschäftspraktiken von Großkonzernen wie Glencore in der Kritik.⁵ Durch die Produktion von Nickel in Russland werden hohe Mengen an Schwefeldioxid ausgestoßen, die neben Schädigungen der lokalen Vegetation durch sauren Regen auch zu gesundheitlichen Problemen wie Atemwegserkrankungen der Bevölkerung führen.⁶ Diese Beispiele zeigen: Nachhaltiger Rohstoffabbau ohne Umweltschäden und soziale Folgen ist derzeit nicht die Regel. Das Recycling von ausgedienten LIB und die Rückgewinnung der in ihnen enthaltenen Rohstoffe ist daher dringend notwendig, um den Rohstoff-Primärbedarf auf ein global gerechtes Maß zu reduzieren und so die Verkehrswende innerhalb planetarer Grenzen sozial gerechter und umweltschonender zu gestalten. Hierzu können nicht nur E-Fahrzeughersteller, Recyclingunternehmen, politische Entscheidungsträger*innen und einzelne Bürger*innen beitragen. Auch Beschaffungsverantwortliche können im Zuge der Umstellung der öffentlichen Fuhrparks auf Fahrzeuge mit elektrischen Antrieben im Vergabeverfahren deutlich machen, dass die Verwendung von recycelten Metallen und die Notwendigkeit von Recycling-Konzepten für LIB vergaberelevant sind. So können Vergabestellen aktiv darauf hinwirken, Strategien zur Etablierung einer Kreislaufwirtschaft von LIB nachhaltig zu stärken.

Doch während das Recycling anderer Akkutypen wie Blei-Säure-Akkus bereits seit vielen Jahren im industriellen Maßstab erfolgt, steht das Recycling von LIB noch am Anfang. Das vorliegende Factsheet beleuchtet daher zunächst den Aufbau von Li-Ionen-Akkus, erläutert die wichtigsten derzeit angewandten Recycling-Verfahren und beschreibt den aktuellen Stand des Recyclings. Abschließend werden Empfehlungen für Unternehmen, politische Entscheidungsträger*innen und öffentliche Vergabestellen vorgestellt.

- 4 PowerShift, Misereor & Brot für die Welt (2021): Weniger Autos, mehr globale Gerechtigkeit. S. 26-28. <https://power-shift.de/wp-content/uploads/2021/09/Weniger-Autos-mehr-globale-Gerechtigkeit-2021-web02.pdf>
- 5 Vgl. Resource Governance (2022): https://resourcegovernance.org/sites/default/files/documents/glencore_statement_18_july_2022.pdf, Public Eye (o.J.): <https://www.publiceye.ch/de/themen/rohstoffhandel/glencore-dr-kongo>, Brot für Alle (2018): https://sehen-und-handeln.ch/content/uploads/2018/05/Bericht_Glencore_Kongo_Zusammenfassung_D.pdf
- 6 WEED e.V. (2021): E-Mobilität auf dem Prüfstand: Sorgfaltspflichten in der E-Fahrrad-Branche. S. 6-13. https://www2.weed-online.org/uploads/weed_2021_e_mobilitaet_auf_dem_pruefstand_web.pdf

2 Aufbau einer Li-Ionen-Batterie

Die kleinste Einheit einer LIB ist die Lithium-Ionen-Zelle. Diese besteht aus vier Komponenten: Zwei Elektroden (Kathode und Anode), Separator und Elektrolyt. Die für die Elektroden genutzten Rohstoffe – auch Aktivmaterialien genannt – stehen aktuell im Fokus bei der Entwicklung und Optimierung von Recycling-



verfahren. Während für die Anode hierbei zumeist Graphit genutzt wird, kommen bei der Kathode eine Reihe unterschiedlicher Lithium-Metalloxide zum Einsatz: Am häufigsten für E-Fahrzeuge werden hierbei nickelbasierte Mischungen wie Lithium-Nickel-Kobalt-Mangan-Oxide (NMC)⁷ und Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxide (NCA) verwendet, im Jahr 2021 machten diese rund 85 % der E-Auto-Batterien aus.⁸ Zunehmend finden auch Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LFP) Anwendung, die weder Nickel noch Kobalt enthalten. LFP-Batterien machten 2021 jedoch nur rund 15 % der in E-Autos verbauten Batterien aus,⁹

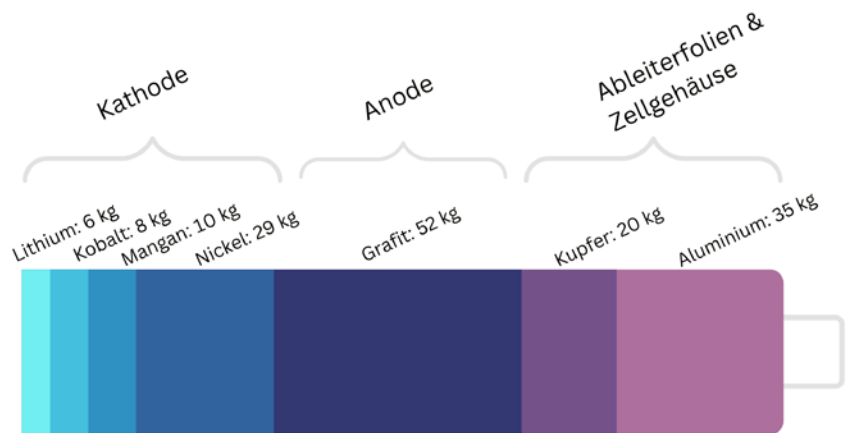
- 7 Die Benennung der verschiedenen Lithium-Ionen-Batterien bezieht sich auf die in der Kathode enthaltenen Metalle und deren Verhältnis zueinander. In einer NMC811-Batterie beispielsweise sind die Materialien Nickel, Mangan und Kobalt im Verhältnis 8:1:1 enthalten.
- 8 IEA (2022): Global EV Outlook 2022. S. 140. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ad8fb04c-4f75-42fc-973a-6e54c8a4449a/Global-ElectricVehicleOutlook2022.pdf>.
- 9 IEA (2022): Global EV Outlook 2022. S. 140. Aufgrund aktueller Entwicklungen ist jedoch davon auszugehen, dass sich der Anteil von LFP-Akkus weiter erhöhen wird, unter anderem aufgrund einer 2022 auslaufenden Vereinbarung über LFP-Patentrechte (ebd). Darüber hinaus haben Lieferengpässe von Nickel aus Russland verschiedene Automobilhersteller dazu veranlasst, zunehmend auf LFP-Batterien zu setzen. Siehe ausführlicher hierzu: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/lithium-ionen-batterien-autobatterien-e-autos-lfp-nickel-kobalt-lithium-101.html>. Die Marktanteile der unterschiedlichen Akku-Typen könnten sich daher in den kommenden Jahren stark verändern.

weshalb sich das vorliegende Factsheet auf Recyclingmethoden von NMC und NCA-Akkus fokussiert.

Da die Aktivmaterialien selbst nur eine geringe elektrische Leitfähigkeit aufweisen, werden diese auf sog. Ableiterfolien angebracht; typischerweise sind dies bei der Kathode dünne Aluminium-, bei der Anode Kupferfolien. Damit die Kathodenmaterialien ausreichend aneinanderhaften, kommen fluorhaltige Binder zum Einsatz, die als eine Art Klebstoff fungieren. Zudem werden bspw. Leitruße eingesetzt, die die elektrische Leitfähigkeit der Aktivmaterialien erhöhen. Getrennt werden Kathode und Anode durch einen aus Kunst- oder Vliesstoff bestehenden Separator, der einen Kurzschluss in der Batterie verhindert. Die letzte Komponente der Zelle ist der Elektrolyt, ein in der Regel flüssiges organisches Lösungsmittel mit einem fluorhaltigen Leitsalz, welches die Wanderung der Lithium-Ionen zwischen den beiden Elektroden während der Auf- und Entladung des Akkus ermöglicht. Um ein kompakteres Maß zu erreichen, werden die Zellen je nach Hersteller und Fahrzeugmodell in drei verschiedenen Formaten angeordnet (prismatische Flachwicklung, zylindrische Rundwicklung oder gestapelt bei der Pouch/Stack-Variante). Die fehlende Standardisierung erschwert jedoch das Recycling der Akkus, da sie eine manuelle Demontage erfordert und (Teil-)Automatisierungen verkompliziert.

Um Spannung und Kapazität der Batterie zu erhöhen, werden einzelne Lithium-Ionen-Zellen zu Modulen zusammengeschaltet. Anschließend werden mehrere Module mit Peripherieteilen wie Kühlsystem, Kabelsatz, und Isolierplatten sowie einem Batteriemanagementsystem zu einem Batteriepack zusammengeführt. In der Regel werden diese Komponenten miteinander verklebt, was einerseits für Stabilität sorgt, andererseits jedoch sowohl für die Reparatur einzelner Module oder Zellen als auch für das Recycling hinderlich ist.¹⁰ Der fertige Batteriepack, der zwischen 200 und 800 kg wiegt, wird anschließend in einem E-Fahrzeug verbaut. Zwar variieren die Mengen der einzelnen Metalle je nach Fahrzeugmodell und Batterietyp, die folgende Grafik veranschaulicht dennoch die durchschnittlichen Rohstoffmengen der

im Jahr 2020 auf dem Markt eingeführten Fahrzeugbatterien mit einer Kapazität von 60kWh.¹¹ Dies entspricht einem mittelgroßen E-Fahrzeug.



Durchschnittlicher Rohstoffbedarf einer Fahrzeugbatterie mit einer Kapazität von 60kWh

Bei einem E-Fahrzeug-Akku mit einer Kapazität von 60 kWh wiegen alleine die in den Batteriezellen verbauten Metalle rund 160 kg. Quelle: Eigene Darstellung, Daten basierend auf Transport & Environment (2021).

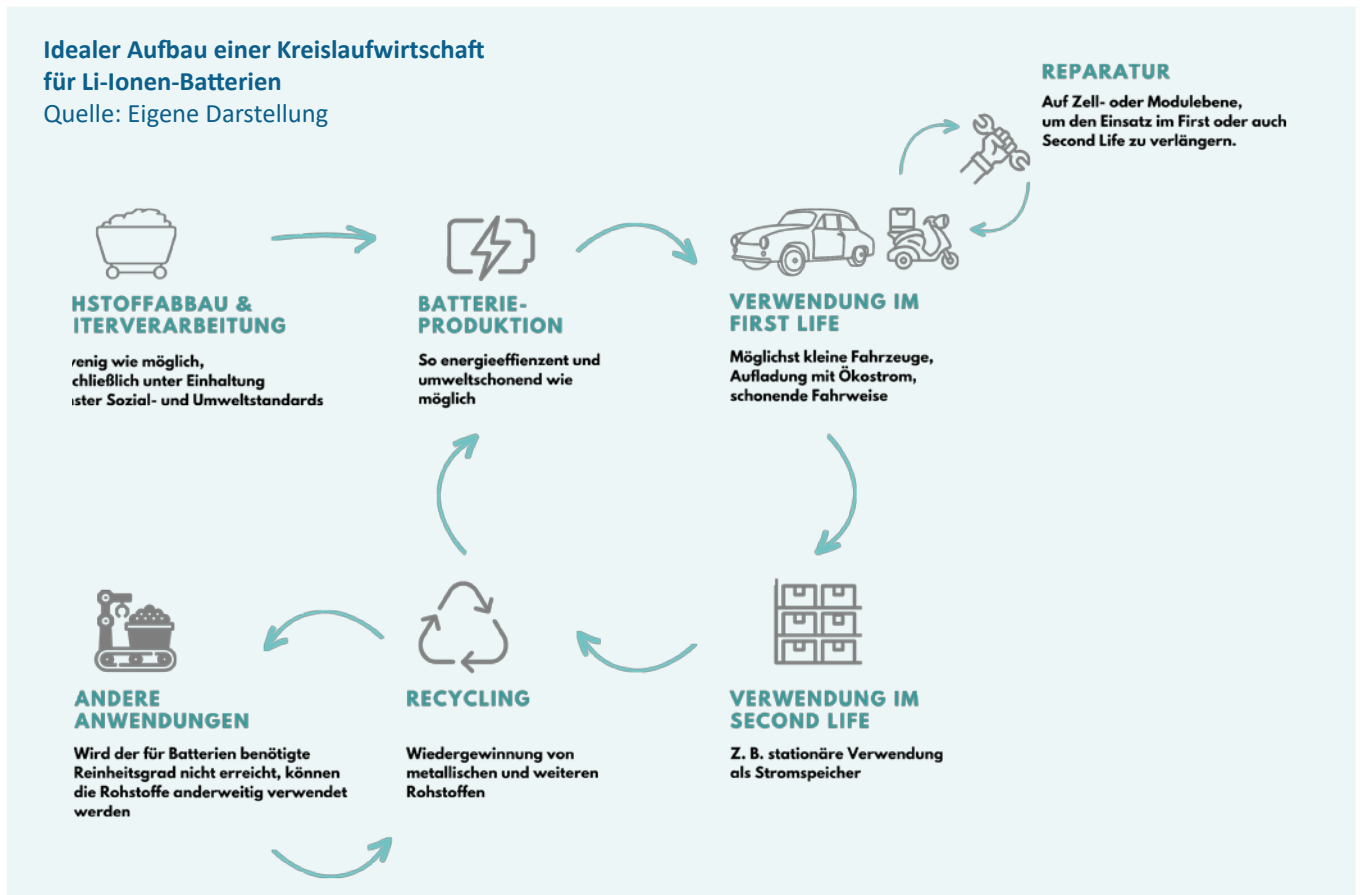
Im Laufe ihrer Nutzung verlieren LIB jedoch an Kapazität, was folglich zu geringeren Reichweiten führt. Liegt die Leistungsfähigkeit nach rund 8 bis 10 Jahren Nutzung unter 70 – 80 % (ca. 1500 – 2500 Ladezyklen),¹² ist zunächst eine Weiterverwendung als stationärer Pufferspeicher in der Stromversorgung möglich. So kann die an wind- oder sonnenreichen Tagen nicht benötigte Energie kurzfristig gespeichert und in Leistungstälern wieder zur Verfügung gestellt werden, was mit der Umstellung auf erneuerbare Energien zunehmend an Relevanz gewinnt. Dies bietet nicht nur zusätzliche Speicherflexibilität, sondern ist auch notwendig, um die Netzfrequenz stabil zu halten. Schätzungsweise kann eine Nutzung im sog. „Second life“ zehn bis zwölf weitere Jahre andauern. So dienen beispielsweise seit 2016 im Hafen von Hamburg 100 ehemalige E-Auto-Batterien als Stromspeicher mit einer Leistung von 2 MW und einer Speicherkapazität von 2,8 MWh.¹³ Für einen privaten Haushalt kann bereits ein einziger ausgedienter E-Fahrzeug-Akku als Stromspeicher ausreichen.¹⁴ Ist auch dies aufgrund zu geringer Kapazität nicht mehr möglich, so sollten LIB recycelt werden. Die gängigsten Methoden hierfür werden im Folgenden beschrieben.

10 Thompson et al (2020): The importance of design in lithium ion batteryrecycling – a critical review. S. 7589. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2020/gc/d0gc02745f>

11 Transport & Environment (2021): From dirty oil to clean batteries. S.40. https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2021_02_Battery_raw_materials_report_final.pdf
 12 https://www.energis.de/ratgeber/mobilitaet/e_auto_akkus_entsorgen
 13 <https://future.hamburg/artikel/batteriespeicher-gebrauchte-akkus-nutzen>
 14 <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-akku-recycling/>

Idealer Aufbau einer Kreislaufwirtschaft für Li-Ionen-Batterien

Quelle: Eigene Darstellung



3 Recyclingmethoden für Li-Ionen-Batterien

Zur Wiedergewinnung der Rohstoffe aus LIB kommen im Wesentlichen drei Verfahren zum Einsatz, die in unterschiedlichen Varianten miteinander kombiniert werden: Mechanische, pyrometallurgische und hydrometallurgische Aufbereitung. Bislang konnte sich kein Recycling-Verfahren für LIB flächendeckend durchsetzen, was auf das hohe Entwicklungs- und Optimierungspotential der Verfahren hinweist. Aufgrund der in den letzten Jahren kontinuierlich steigenden Rohstoffpreise von Nickel, Kobalt und Kupfer zielt Batterienrecycling bislang verstärkt auf deren Wiedergewinnung ab. Zunehmend wird jedoch auch die Weiterentwicklung von Recyclingmethoden für Lithium, Graphit sowie Mangan vorangetrieben.¹⁵

Bei den meisten Verfahren besteht der erste Schritt des Recyclingverfahrens in der Deaktivierung der LIB, um die Wahrscheinlichkeit eines Batteriebrandes zu minimieren. Die Batterien werden dafür entladen und der Strom entweder zwischengespeichert oder in das Stromnetz eingespeist. Anschließend erfolgt die Demontage der LIB, bei der das Batteriegehäuse (meist Aluminium oder Stahlbleche), Kabel, Leiterplatten, Kühlsystem und das Batteriemanagementsystem manuell entfernt und dem klassischen Metall-, Elektroschrott- und Kunststoffrecycling zugeführt werden. Das Batteriepack wird dann bis auf Modul- oder Zellebene demontiert. Im Anschluss erfolgt entweder ein mechanisches oder pyrometallurgisches Verfahren.

Mechanische Aufbereitung

Bei der mechanischen Aufbereitung werden die Module oder Zellen zunächst in einem Schredder zerkleinert. Aufgrund der hohen Reaktionsfähigkeit der Komponenten mit anderen Stoffen muss dies zum Beispiel im Vakuum oder in Schutzgasatmosphäre erfolgen, um eine Entzündung zu verhindern. Dabei

Lithium-Ionen-Batterien aus der Elektromobilität. S. 10f. <https://www.oeko.de/publikationen/p-details/stand-und-perspektiven-des-recyclings-von-lithium-ionen-batterien-aus-der-elektromobilitaet>

¹⁵ Öko-Institut e.V. (2020): Stand und Perspektiven des Recyclings von

können giftige und ätzende Gase entstehen, die eine Filterung und Reinigung der Abluft notwendig machen. Vorteil des Schredderns ohne vorherige thermische Behandlung (Pyrolyse) ist, dass ein Teil des Elektrolyts mithilfe von Vakuumdestillation zurückgewonnen werden kann.

Die Pyrolyse ist ein optionaler Prozessschritt, die entweder vor dem Schreddern bei rund 400 °C oder hinterher bei 700 °C durchgeführt werden kann.¹⁶ Der fluorhaltige Binder wird dabei zerstört, was im Anschluss die Trennung der Elektrodenmaterialien von den Ableiterfolien deutlich erleichtert. Dabei verdampfen jedoch auch Elektrolytkomponenten, die nicht mehr zurückgewonnen werden können. Darüber hinaus machen die dabei entstehenden Gase eine Abgasreinigung erforderlich. Problematisch ist auch, dass dieser optionale Schritt energieintensiv ist und den CO₂-Fußabdruck vergrößert.¹⁷

Nach der Entfernung von Plastikteilen erfolgt dann die mechanische Trennung von Eisen, Alumi-

über 1300 °C geheizt wird. Eine mechanische Zerkleinerung muss jedoch nicht zwingend vorher erfolgen, denn die Zellen können nach der Demontage auch direkt eingeschmolzen werden. Hierbei verdampfen dann zunächst die organischen Bestandteile (Elektrolyt, Binder, Polymere). Das in der Anode verwendete Graphit sowie Kunststoffteile verbrennen und setzen dabei Kohlendioxid frei. Diese Materialien gehen folglich für eine Wiederverwendung verloren. In der höchsten Temperaturphase bilden Kobalt, Kupfer, Nickel und Eisen Zwischenlegierungen, die in einem späteren hydrometallurgischen Prozess aufgetrennt und so erneut Produktkreisläufen zugeführt werden können. Problematisch bei der pyrometallurgischen Aufbereitung ist, dass u.a. die Rohstoffe Lithium, Mangan und Aluminium verschlacken¹⁸ und deren Rückgewinnung bislang kostenintensiv und aufwendig ist. Darüber hinaus ist das Verfahren aufgrund der benötigten hohen Temperaturen für das Betreiben der Schachtofen extrem energieaufwendig, was mit einem hohen CO₂-Ausstoß einhergeht. Darüber hinaus kann es ein Problem sein, wenn pyrometallurgische Verfahren in Ländern mit niedrigen Anforderungen bezüglich der Filterung und Reinigung der entstehenden Emissionen kritischer Stoffe durchgeführt werden und diese ungefiltert in die Umwelt entlassen werden.¹⁹

Hydrometallurgisches Verfahren

Die Kobalt-, Nickel-, Kupfer-, und Eisenlegierung, die Schlacke oder die Schwarzmasse werden in einem letzten Schritt einem hydrometallurgischen Verfahren unterzogen. Mithilfe von Säuren,

zumeist Schwefelsäure, werden in mehreren Schritten und verschiedenen Verfahren (Ausfäll-, Filter-, oder Lösungsmittelverfahren) die einzelnen Metallverbindungen gelöst. Hierbei lassen sich Rückgewinnungsraten von über 99 % für Nickel, Kobalt und Mangan erreichen.²⁰ Problematisch ist jedoch vor allem die Aufbereitung des Abwassers, welches Rückstände der für das Verfahren verwendeten ätzenden Chemikalien enthält. Wird das hydrometallurgische Verfahren unmittelbar nach dem Zerkleinern angewandt, fällt die Recyclingeffizienz außerdem eher gering aus.

18 Unter einer Schlacke versteht man Stoffgemische, die als Nebenprodukt bei hydrometallurgischen Prozessen anfallen und in glasiger oder kristalliner Form erstarren.

19 Fraunhofer (2021): S. 31

20 Neumann et. al. (2022): Recycling of Lithium-Ion Batteries—Current State of the Art, Circular Economy, and Next Generation Recycling, S. 19. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/aenm.202102917>



Die Batteriegehäuse bestehen meist aus Aluminium oder Stahlblech, hier zu sehen in einer Recyclinganlage der Firma Veolia, SARPI, in Dieuze, Frankreich.

Foto: Veolia 2022

nium und Kupfer. Übrig bleibt die nach ihrer Färbung benannte „Schwarzmasse“, die neben den Elektrodenmaterialien auch Binder, Additive und Reste des Elektrolyts enthält, falls keine Pyrolyse erfolgte. Um die Elemente Kobalt, Nickel, Mangan und Lithium aus der Schwarzmasse zu gewinnen, werden daraufhin entweder pyrometallurgische oder hydrometallurgische Verfahren angewandt.

Pyrometallurgisches Verfahren

Bei dem pyrometallurgischen Verfahren wird die Schwarzmasse einem Schachtofen zugeführt, der auf

16 RWTH Aachen u.a. (2021): Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. S.23. https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaablmhmatg

17 Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2021): Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau. S. 29-30.



Foto: Veolia 2022

Hohe Standards bei Arbeitsschutzkleidung ist beim Recycling von Li-Ionen-Batterien besonders wichtig, hier zu sehen in einer Recyclinganlage der Firma Veolia, SARPI, in Dieuze, Frankreich

gewinnung der Rohstoffe Energie und Ressourcen. Zudem entsteht durch die Anwendung von Chemikalien und Säuren teilweise neuer Abfall. Gleichzeitig muss bedacht werden, dass die gewonnenen Metalle nicht zwangsläufig wieder in Batterien eingesetzt werden können, da hierfür hohe Reinheitsgrade benötigt werden: Lithiumhydroxid beispielsweise muss einen Reinheitsgrad von mind. 99,5 % aufweisen, Nickel von rund 99,8 %.²³ Erreichen die Recyclingverfahren diese Werte nicht, oder ist eine erneute Aufbereitung zu energie- und kostenintensiv, so können diese dennoch in anderen Anwendungen verwendet werden.

Herausforderungen beim LIB-Recycling

Zu beachten ist, dass sich die Zusammensetzung der LIB, besonders des Kathodenmaterials, im Laufe der Zeit aufgrund schwankender Rohstoffpreise, geänderter Anforderungen und optimierter Produktionsverfahren in der Vergangenheit häufig geändert hat und anzunehmen ist, dass dies auch in Zukunft der Fall sein wird. Recyclingverfahren müssen daher optimalerweise flexibel auf veränderte Zusammensetzungen reagieren können, um sowohl neue LIB, die direkt aus dem Ausschuss kommen (siehe Punkt 4), als auch bereits vor 10–20 Jahren produzierte LIB effizient recyceln zu können. Eine weitere Herausforderung besteht in der bereits erwähnten Vielzahl an Formen und Größen und unterschiedlichen Arten, wie die Zellen und Module zusammengesetzt werden. Damit stehen sie im starken Gegensatz zu Starterbatterien in konventionellen Fahrzeugen (meist Blei-Säure-Batterien), bei denen neben der Zusammensetzung sogar das Batteriegehäuse standardisiert ist, diese also vom Hersteller unabhängig recycelt werden können – ein entscheidender Grund, warum die Sammelquote und Recyclingeffizienz für Blei-Säure-Batterien überdurchschnittlich hoch ist.²¹

Zu den Recyclingeffizienzen und CO₂-Bilanzen der einzelnen Verfahren lassen sich zum aktuellen Zeitpunkt keine allgemein gültigen Aussagen treffen. Im Vergleich zur Neugewinnung der Rohstoffe werden zwar signifikante Mengen an Treibhausgas-Emissionen eingespart,²² dennoch bedarf auch die Wieder-

Neue Recycling-Ansätze

Die Forschung an LIB-Recyclingverfahren ist von einer hohen Dynamik gekennzeichnet, zwei vielversprechende neue Ansätze seien an dieser Stelle kurz erwähnt: Direktes Recycling und biobasierte Verfahren. Ersteres zielt darauf ab, die Aktivmaterialien mit Hilfe von physikalischen Verfahren direkt aus den verbrauchten Zellen zu trennen. Dadurch wird ohne chemische Veränderungen Elektrodenmaterial extrahiert, das unmittelbar in neuen Batterien eingesetzt werden kann. Der Grundgedanke des direkten Recyclings besteht also darin, die Aktivmaterialien aufzufrischen oder zu reaktivieren, anstatt sie zunächst in ihre einzelnen Bestandteile zu zerlegen und dann neu zusammenzufügen. Das biobasierte Verfahren nutzt Mikroorganismen, die selektiv Elemente wie Kobalt und Lithium aus der Schwarzmasse lösen können und so eine besonders umweltfreundliche Wiedergewinnung sicherstellen sollen. Diese und weitere Verfahren befinden sich aktuell jedoch erst im Forschungs- oder Pilotstatus, die Erprobung im industriellen Maßstab steht noch aus.²⁴

21 UBA (2022): <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehelter-abfallarten/altbatterien#im-jahr-2021-hat-deutschland-alle-von-der-eu-geforderten-mindestziele-erreicht>

22 Die CO₂-Einsparung ist abhängig vom angewandten Verfahren, den zu recycelnden LIB und weiteren Faktoren wie Transportwegen. Zur Einordnung: Mercedes-Benz rechnet mit einer CO₂-Einsparung von bis zu 70 % pro Batterie. <https://group.mercedes-benz.com/unternehmen/news/recyclingfabrik-kuppenheim.html>

23 Ein aktuelles Forschungsprojekt des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und weiteren Instituten arbeitet an einem energieeffizientem Verfahren, das die Gewinnung von hohen Rezyklatstandards als Ziel hat. https://www.kit.edu/kit/pi_2022_077_materialrecycling-aus-alten-batterien-werden-neue.php

24 Siehe ausführlicher hierzu Neumann et al. (2021): Recycling of Lithium-Ion Batteries—Current State of the Art, Circular Economy, and Next Generation Recycling. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/aenm.202102917>

4 Status Quo des Recyclings von Li-Ionen-Batterien und Perspektiven

Aufgrund ihrer Lebensdauer und der erst seit wenigen Jahren ansteigenden Verkaufszahlen von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen ist die Recyclingindustrie von LIB aktuell noch überschaubar. Mit größeren zu recycelnden Mengen an LIB aus E-Fahrzeugen wird aufgrund ihrer Lebensdauer im First und Second life erst ab Ende der 2020er Jahre gerechnet. Zu den Fragen, welche Mengen an LIB pro Jahr das Ende ihres Lebenszyklus erreichen und wie hoch der Recycling-Anteil ist, liegen momentan keine gesicherten Zahlen vor. Dies liegt unter anderem daran, dass beispielsweise in der EU keine offiziellen Statistiken für diesen Bereich erfasst werden. Berechnungen der Internationalen Energieagentur zufolge beliefen sich die weltweiten Recyclingkapazitäten für LIB im Jahr 2021 auf rund 180.000 Tonnen pro Jahr, davon entfällt jedoch ein Großteil auf LIB der Verbraucherelektronik (wie Smartphones, Tablets und Laptops).²⁵ Welchem Anteil dies entspricht, ist umstritten, Schätzungen variieren stark zwischen 5 und 50 %.²⁶ Klar ist, dass aufgrund der steigenden Verkaufszahlen von elektrisch betriebenen Fahrzeugen die Menge an Akkus ebenfalls in den kommenden Jahren rasant steigen wird, alleine für die im Jahr 2019 verkauften E-Fahrzeuge werden am Ende ihrer Nutzung rund 500.000 Tonnen Batteriematerial anfallen.²⁷ 2040 könnte die Menge bereits bei acht Mio. Tonnen pro Jahr liegen.²⁸ Für Europa rechnet das Fraunhofer-Institut mit einem Volumen zu recycelnder LIB von rund 230.000 Tonnen im Jahr 2030, zehn Jahre später mit 1,5 Mio. Tonnen.²⁹

Unbestritten ist, dass aktuell ein Großteil der LIB in Ostasien recycelt wird.³⁰ Grund hierfür ist die Do-

minanz Chinas, Südkoreas und Japans in der Zell- und Batterieproduktion, alleine China verfügt über 70 % der weltweiten Produktionskapazität für Batteriezellen.³¹ Bei der Batteriezellproduktion entsteht ein nicht zu unterschätzender Anteil an Ausschuss bspw. aufgrund von Produktionsfehlern oder von Entwicklungs- und Testfahrzeugen. Dieser wurde in den vergangenen Jahren von ostasiatischen Herstellern bereits genutzt, um Recyclingverfahren zu verbessern. Da es in der EU Bestrebungen gibt, die Fertigung von Batterien stärker zu regionalisieren, ist in den kommenden Jahren auch in Europa mit zunehmendem Ausschuss-Material zu rechnen.³² Dies könnte dem LIB-Recycling einen weiteren An Schub geben, da die aussortierten Akkus der europäischen Batterieproduktion unmittelbar und lokal verfügbar sind. Aus Sicht der EU ist der Aufbau von Recyclingfähigkeiten in Europa auch deshalb zu fördern, um die aktuellen Importabhängigkeiten der EU zu mindern und so zu der Versorgungssicherheit der für die Verkehrswende benötigten Rohstoffe beizutragen.³³

Der Aufbau der Recycling-Industrie in Europa nimmt bereits jetzt Fahrt auf, bis zum Jahr 2030 könnte sich die europaweite Kapazität mit bis zu 400.0000 Tonnen pro Jahr fast vervierfachen.³⁴ Dem Fraunhofer-Institut zufolge könnte bspw. der europäische Kobaltbedarf für Batterien bis 2040 bis zu 40 % über Recycling abgedeckt werden, bei Nickel, Lithium und Kupfer könnten es bis zu 15 % sein.³⁵

Weltweit recyceln aktuell rund 40-50 Unternehmen LIB.³⁶ In Deutschland sind unter anderem die Unternehmen Düsenfeld, Accurec, Redux und Primobius im LIB-Recycling aktiv. Derzeit recyceln die genannten Unternehmen zwischen 2.000 und 10.000 Tonnen LIB pro Jahr.³⁷ Auch Automobilhersteller wie VW oder Mercedes haben bereits Pilotanlagen installiert oder arbeiten an deren Fertigstellung. Nennenswert ist auch ein Projekt der Firma Audi, die derzeit zusammen mit dem Start-up Nunam eine Second-Life-Verwendung von LIB aus Testfahrzeugen in elektrisch betriebenen Rikschas in Indien erprobt.³⁸

25 IEA (2021): The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. S. 183f. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/24d5dfbb-a77a-4647-abcc-667867207f74/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>

26 <https://www.pv-magazine.com/2019/07/12/lithium-ion-recycling-rates-far-higher-than-some-statistics-suggest/>

27 <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/electric-vehicles-take-off-recycling-ev-batteries>

28 Ebenda.

29 Fraunhofer (2021): S. 2.

30 Die IEA (siehe Quelle Nr. 14) schätzt alleine den Anteil Chinas auf rund 50 %; die Londoner Beratungsfirma Circular Energy Storage schätzt den Marktanteil auf bis zu 80 %. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-09-01/the-next-big-battery-material-squeeze-is-old-batteries>

31 IEA (2021): Global EV Outlook 2021 - Accelerating Ambitions despite the Pandemic. S. 34. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ed5f4484-f556-4110-8c5c-4ede8bcb637/GlobalEVOutlook2021.pdf>

32 Fraunhofer (2021): S. 23f.

33 So liegt die Importabhängigkeit der EU aktuell bei 86 % für Kobalt, 98 % für Grafit und 100 % bei Lithium. Europäische Kommission (2020): Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken. S. 20-24. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=DE>

34 <https://battery-news.de/index.php/2022/07/08/batterie-recycling-in-europa-stand-juli-2022/#jul-22>

35 Fraunhofer (2021): S. 26.

36 Eine Übersicht aller LIB-Recyclingunternehmen findet sich in Beigl et. al. (2021): Entwicklung einer Wertschöpfungskette für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) in Österreich, S.27-29.

37 <https://battery-news.de/index.php/2022/02/18/batterie-recycling-in-europa-stand-februar-2022/>

38 <https://www.elektroauto-news.net/2022/audi-second-life-akkus-elektro-rikschas-indien>



Foto: Fortum

Erster Schritt des Recyclingverfahrens ist das Entladen der Li-Ionen-Batterie, hier in der Recyclinganlage von Fortum in Ikaalinen, Finnland

Gesetzliche Regulierung

Bislang ist das Recycling der Aktivmaterialien von LIB aus rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten wenig profitabel und stark abhängig von schwankenden Rohstoffpreisen. Dabei ist klar: Viele der Vorteile von Recycling, insbesondere der geringere Bedarf an Rohstoffprimärförderung und -weiterverarbeitung und die damit einhergehenden CO₂-Einsparungen, sind zwar nicht monetarisierbar, jedoch zur Abschwächung des Klimawandels dringend erforderlich. Ambitionierte politische Vorgaben sind daher zwingend notwendig, um bislang fehlende finanzielle Anreize auszugleichen und eine flächendeckende Recyclinginfrastruktur zu etablieren.

Zentral ist hierfür eine einheitliche Regulierung auf EU-Ebene. Bereits jetzt gilt, dass die Hersteller zur Rücknahme der von ihnen hergestellten Batterien verantwortlich sind. E-Fahrzeugbatterien gelten laut dem bestehenden deutschen Batteriegesetz (BattG2) als Industriebatterien, die weder verbrannt noch deponiert werden dürfen. Mit dem Batt2G wurde die seit 2006 geltende Batterierichtlinie 2006/66/EG der EU in deutsches Recht umgesetzt, aktuell wird an deren Novellierung gearbeitet. Anfang Dezember 2022 erzielten das Parlament und der Rat eine vorläufige

Einigung, im Jahr 2023 soll die neue Batterieverordnung final verabschiedet werden. Sie beinhaltet den Vorschlag, einen Batteriepass ab dem Jahr 2026 einzuführen, um Daten über die in Umlauf gebrachten Batterien einheitlich sammeln und nutzen zu können. Dieser soll u.a. Informationen über die Herkunft und Zusammensetzung der enthaltenen Materialien sowie Verwertungs- und Recyclingverfahren, denen die Batterie am Ende ihres Lebenszyklus unterzogen werden könnte, enthalten.³⁹ Aus kreislaufwirtschaftlicher Sicht ist dies begrüßenswert, da die damit einhergehende Transparenz bezüglich der verwendeten Rohstoffe Recycling-Unternehmen darin unterstützen kann, ihre Verfahren zu optimieren.

Der Entwurf sieht darüber hinaus vor, dass ab dem 1. Juli 2024 in der EU auf den Markt gebrachte wiederaufladbare E-Fahrzeugbatterien mit einer Mindestkapazität von 2kWh mit einer Erklärung zu ihrem CO₂-Fußabdruck versehen werden sollen, die über einen QR-Code auf der Batterie einzusehen ist.⁴⁰ Ab Juli 2027 sollen Batterien nur dann in der EU in Verkehr gebracht werden dürfen, wenn sie Höchstwerte für den CO₂-Fußabdruck über ihre gesamte Lebensdauer einhalten. Der Einsatz von metallischen Rezyklaten bei der Produktion von Akkus wird so indirekt gefördert. Entscheidend hierfür sind auch die vorgeschlagenen Rezyklatanteile, die LIB zukünftig enthalten müssen, wobei noch unklar ist, ab wann diese gelten: Sie liegen für Lithium und Nickel bei jeweils 6 %, für Kobalt bei 16 %.⁴¹ Hier besteht allerdings, ebenso wie bei den Zurückgewinnungsraten der einzelnen Metalle, noch deutliches Verbesserungspotential.⁴² Auch die Erhöhung der Recyclingeffizienz von aktuell mind. 50 % auf 65 % im Jahr 2025 und dann auf 70 % ab 2030 ist zwar grundsätzlich zu begrüßen, müsste jedoch noch ambitionierter ausfallen. Denn aktuell wird die Quote von 50 % meist bereits mit dem Recycling des Gehäuses und anderer Peripherieteile erreicht, da die Effizienz lediglich am Gesamtgewicht der Batterie gemessen wird.

³⁹ https://www.batteriegesetz.de/wp-content/uploads/BATT2_Ratsentwurf_14032022.pdf

⁴⁰ <https://www.batteriegesetz.de/themen/die-neue-batterieverordnung-batt2-2022/#artikel-batt2-2022-aenderung5>

⁴¹ <https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20221205IPR60614/batteries-deal-on-new-eu-rules-for-design-production-and-waste-treatment>

⁴² Die vorläufige Einigung sieht vor, dass die Verwertungsquote für Lithium ab 2027 bei 50 %, ab 2031 bei mind. 80 % liegen sollte, also mind. 50 bzw. 80 % des Lithiums zurückgewonnen werden muss. Über die angestrebten Verwertungsquoten für Nickel, Kobalt und andere Rohstoffe wurde noch keine Einigung bekannt gegeben. <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2022/12/09/council-and-parliament-strike-provisional-deal-to-create-a-sustainable-life-cycle-for-batteries/>

5. Handlungsansätze und Empfehlungen

Die folgenden Abschnitte geben Hinweise und Empfehlungen an E-Fahrzeug- und Batterienhersteller, Politiker*innen sowie Beschaffungsverantwortliche.

E-Fahrzeug- und Batterienhersteller:

- Kreislaufwirtschaft sollte als zentraler Baustein für eine verantwortungsvolle Rohstoffbeschaffung etabliert werden: So sollten Faktoren wie Langlebigkeit, Reparatur- und Recyclingfähigkeit von Anfang an mitgedacht werden und LIB dementsprechend designt werden. Darüber hinaus sollten recycelte Rohstoffe (Sekundärrohstoffe) gegenüber Primärrohstoffen priorisiert werden, um die Notwendigkeit des Ressourcenabbaus zu minimieren. Dies kann auch einen Beitrag zur Versorgungssicherheit leisten, damit Unternehmen unabhängiger von einzelnen Förderländern, schwankenden Rohstoffpreisen und Versorgungsengpässen werden.
- Darüber hinaus sollten E-Fahrzeughersteller Informationen bereitstellen, die eine Wiederverwendung (z. B. als stationärer Speicher) und eine Reparatur erleichtern. Ein recyclingfreundliches Design sowie Informationen über die verwendeten Materialien, deren Zusammensetzung und Hinweise für die Demontage können Recycling-Unternehmen helfen, die darin enthaltenen Rohstoffe effizient zu recyceln.
- Batterieleihmodelle und Batteriepfandsysteme können gerade für solche Fahrzeugproduzenten sinnvoll sein, die Recyclingkapazitäten aufbauen, um einen ausreichenden Rücklauf von zu recycelnden Batterien sicherzustellen.

Politiker*innen:

- Die Bundesregierung sollte den in der EU-Batterieverordnung eingeführten Batteriepass effektiv und transparent umsetzen, um die Rückverfolgung und Identifikation von Batterien zu ermöglichen und wichtige Informationen für Recyclingunternehmen und Verbraucher*innen bereitzustellen.
- Für eine drastische Reduktion sämtlicher eingesetzter Rohstoffe bedarf es verbindlicher Ressourcenschutzziele. Diese sollten sektorspezifische

Zwischenziele beinhalten und Rohstoffe und Produktgruppen mit hohem Gefährdungspotential für Menschenrechte, Umwelt und Klima priorisieren.

- Ebenso sollten ehrgeizige Rückgewinnungsraten sowie ambitionierte Quoten für Rezyklatanteile in LIB formuliert werden, um die Nachfrage nach metallischen Primärrohstoffen signifikant zu reduzieren. Dabei ist zu beachten, dass sich die Quoten am technischen Stand orientieren und daher sukzessive angehoben werden sollten.
- Darüber hinaus bedarf es klarer Leitlinien für die Sammlung, Beförderung und Lagerung von Lithium-Ionen-Alt-Batterien.
- Recycling sollte möglichst lokal stattfinden, um THG-Emissionen beim Transport z. B. nach Ostasien zu vermeiden.
- Die Bundesregierung sollte die Förderung von Forschung und Pilotprojekten zu Batterienrecycling stärker vorantreiben.

Beschaffungsverantwortliche:

Bei der Beschaffung von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen könnten Vergabestellen von den Anbietenden Informationen zu folgenden Fragestellungen einholen:

- Wie hoch ist der Anteil der verwendeten Sekundärmetalle (insb. Lithium, Kobalt, Nickel, Kupfer)?
- Wird die Rezyklierbarkeit der LIB im Design und der Produktion mitgedacht?
- Gibt es ein internes Rücknahmesystem (reverse logistics) bzw. alternative Geschäftsmodelle (wie Leasing der LIB)?
- Wie wird die Reparaturfähigkeit der LIB sichergestellt? Werden die LIB nach ihrer Rücknahme in einem Second life genutzt?
- Eine besonders wirksame Möglichkeit, auch soziale Kriterien beim Einkauf von E-Fahrzeugen zu integrieren, bietet darüber hinaus eine Mitgliedschaft in der unabhängigen Monitoring-Organisation Electronics Watch.



Fazit

Der Aufbau von Recyclinganlagen für alte LIB befindet sich in Europa bereits in vollem Gange. Wenn gleich diese Entwicklung begrüßenswert ist, so muss bedacht werden, dass die aktuell im industriellen Maßstab angewendeten Recyclingverfahren teilweise sehr energieaufwendig sind und aktuell nur ein Bruchteil der Metalle wiedergewonnen werden kann. Wichtig ist deshalb: Recycling kann nicht als alleinige Lösung angesehen werden, sondern muss ergänzt werden durch effektive Ansätze zur Reduktion des absoluten Rohstoffbedarfs. So müssen Strategien erarbeitet und umgesetzt werden, um die Anzahl der genutzten Fahrzeuge zu reduzieren. Insgesamt müssen kleinere und leichtere Fahrzeuge produziert werden. Insbesondere der Aus- und Umbau des öffentlichen Nah- und Fernverkehrs auf umweltfreundliche Verkehrsmittel sind dabei von Bedeutung, um den Bedarf an Primärrohstoffen auf ein global gerechtes Maß zu senken. Darüber hinaus sollten bereits produzierte LIB möglichst lange genutzt werden (Second life) und einfach zu reparieren sein. Beim Recycling sollte das Augenmerk vor allem auf energieeffiziente und umweltschonende Verfahren gelegt werden, und so viel Material wie möglich in gleichbleibender Qualität zurückgewonnen werden. Klar ist: Kohlenstoffarmer Mobilität gehört die Zukunft – und nachhaltiges Recycling ist zentral, um E-Mobilität fit für den Kreislauf zu machen.



Foto: Fortum
Unser Titelbild zeigt die Demontage einer gebrauchten E-Fahrzeug-Batterie, bei der einzelne Komponenten manuell entfernt werden, Recyclinganlage von Fortum in Ikaalinen, Finnland.

Wer ist WEED?



WEED – Weltwirtschaft, Ökologie & Entwicklung e.V. wurde 1990 gegründet und ist eine unabhängige Nichtregierungsorganisation. Die sozialen und ökologischen Auswirkungen der Globalisierung verlangen nach einer Wende in der Finanz-, Wirtschafts- und Umweltpolitik hin zu mehr sozialer Gerechtigkeit und ökologischer Tragfähigkeit. WEED trägt mit seiner Arbeit zur Aufklärung über die Ursachen der globalen Armuts- und Umweltprobleme bei und entwickelt wirksame Reform- und Transformationsvorschläge.

Ein wichtiger Schwerpunkt von WEED e.V. liegt bei den Produktions- und Arbeitsbedingungen in der Fahrzeug- und E-Mobilitätsbranche sowie der Einhaltung von sozialen Kriterien bei der öffentlichen Beschaffung. WEED ist aktives Mitglied im Good-Electronics-Network, im CorA-Netzwerk für Unternehmensverantwortung und dem Arbeitskreis (AK) Rohstoffe.

Mehr zu WEED e. V. und aktuelle Veröffentlichungen und Veranstaltungshinweise finden Sie unter www.weed-online.org.

Tragen Sie sich in unseren Newsletter ein, um immer über unsere Aktivitäten auf dem Laufenden zu bleiben:
www.weed-online.org/maillinglisten/weednews.html

Für die Arbeit von WEED sind Spenden und Mitgliedsbeiträge sehr wichtig. Wir danken für jede Unterstützung.

Spenden können Sie auf unserer Webseite:
www.weed-online.org/about/spenden.html

oder per Überweisung an:
Bank für Sozialwirtschaft
IBAN: DE03 1002 0500 0003 2206 00
BIC: BFSWDE33BER

MEHR LESEN



„Rohstoffe im Fokus von IT-Beschaffung – Stand der Elektronikbranche beim verantwortungsvollen Rohstoffbezug und Handlungsoptionen für die öffentliche Beschaffung“

Wo steht die Elektronikbranche beim verantwortungsvollen Bezug von Rohstoffen? Dieser Frage geht die aktuelle WEED-Studie nach und formuliert Handlungsoptionen für öffentliche Beschaffung.

https://www2.weed-online.org/uploads/weed_2023_rohstoffe_im_fokus_von_it_beschaffung_web.pdf

IMPRESSUM

Herausgeber:
WEED – Weltwirtschaft, Ökologie & Entwicklung e.V.
Am Sudhaus 2, 12053 Berlin
kontakt@weed-online.org
www.weed-online.org

Autor*innen: Lea Strack, Anton Pieper

Layout: Marco Fischer – grafischer.com

Titelbild: Fortum

Druck: dieUmweltDruckerei GmbH

Diese Publikation wurde auf 100 % Recycling-Papier gedruckt, ausgezeichnet mit dem Umweltsiegel Blauer Engel.

FÖRDERHINWEIS: Für den Inhalt dieser Publikation ist allein WEED – Weltwirtschaft, Ökologie & Entwicklung e.V. verantwortlich; die hier dargestellten Positionen geben nicht den Standpunkt der Förderer wieder.

Gefördert durch

**ENGAGEMENT
GLOBAL**

Service für Entwicklungsinitiativen



mit ihrer

SERVICESTELLE
KOMMUNEN IN DER EINEN WELT

mit Mitteln des



Bundesministerium für
wirtschaftliche Zusammenarbeit
und Entwicklung

Mit freundlicher Unterstützung der Landesstelle für Entwicklungszusammenarbeit (LEZ) des Landes Berlin

WEED e.V. erhält eine Strukturförderung durch



Landesstelle für Entwicklungszusammenarbeit

**Brot
für die Welt**