

Impulse für die Energiewende

Kritikalität und Recycling von Lithium-Ionen-Batterien

Die Debatte auf eine breitere Basis stellen

White Paper

Marc Dusseldorp
Athan Fox
Simon Glöser-Chahoud
Sebastian Heinz



Vielen Dank an Dr. Saskia Ziemann, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), die mit wertvollen Kommentaren und Vorschlägen zur Entwicklung dieses White Papers beigetragen hat.

High Performance Battery Technology GmbH (Herausgeber)
Schumannstr. 61
D-53113 Bonn (Germany)
impulse@highperformancebattery.de

Ever Resource Ltd. (Mitherausgeber)
St John's Innovation Centre
Cowley Road
Cambridge CB4 0WS (UK)
enquiries@ever-resource.com

Twinprint Verlag (Verlag)
Königswinter, 2022
ISBN: 978-3-96856-054-0



Die High Performance Battery Technology GmbH mit Sitz in Bonn ist auf die Erforschung und Entwicklung von High-Tech-Batterien spezialisiert.

Sie wurde zweimal für den Deutschen Nachhaltigkeitspreis in den Kategorien „Unternehmen 2022“ und „Design 2022“ nominiert.



Ever Resource Ltd, ein innovatives Unternehmen der Kreislaufwirtschaft mit Sitz in Cambridge (UK) ist auf Forschung und Entwicklung im Bereich des Recyclings von Batterien spezialisiert.

Im Jahr 2022 erhielt Ever Resource die Auszeichnung „Cleantech Company of the Year“ des Cambridge Independent.

Inhalt

00	Vorwort	
01	Einführung	1
02	Lithium-Ionen-Batterien – Ihr enormer Aufstieg und dessen enorme Konsequenzen	3
03	First Life, Second Life, Langlebigkeit – Verschiedene Perspektiven auf die Lebensdauer von Batterien	7
04	Technologien für Batterierecycling – ein kurzer Überblick	11
05	Was wollen wir mit Recycling erreichen? Einige Abwägungen	13
06	Die Rezyklierbarkeit von Lithium-Ionen-Batterien verbessern	17
07	Recycling regulieren – Gut gemeint ist nicht zwingend gut gemacht	22
08	Vorausschauender Umgang mit Kritikalität	27
09	Referenzen	31
10	Autorenprofile	38

00 Vorwort

Die Energiewende ist eine enorme Herausforderung. Sie betrifft die physischen Grundlagen unserer Gesellschaft, wirkt sich auf alle Lebensbereiche aus und bedarf dringend einer umfassenden Umgestaltung. Die Gesellschaft ringt damit, den aktuellen und zukünftigen Energiebedarf mit der Notwendigkeit der Dekarbonisierung des Energiesektors in Einklang zu bringen. Bei der Energiewende gibt es viele Variablen, und vieles ist noch unklar – ein laufender Prozess, bei dem sowohl die Wissenschaft als auch die Politik darüber nachdenken, wie Prioritäten gesetzt werden sollten.

Das Gleiche gilt für die Rolle von Batteriespeichersystemen für die Energiewende. Es ist Konsens, dass sie eine Schlüsselrolle bei der Elektrifizierung des Verkehrs und beim Wachstum der erneuerbaren Energieversorgung spielen werden. Gleichzeitig wird immer deutlicher, dass die Debatte über Batteriespeicher für die Energiewende breiter geführt werden muss, da es noch viele blinde Flecken, Fallstricke wie auch unerforschte Möglichkeiten gibt.

An dieser Stelle setzen wir mit unseren Impulsen für die Energiewende an.

In unserem letzten White Paper haben wir uns mit dem Nachhaltigkeitspotenzial von Batterie-Rightsizing beschäftigt. Nun wollen wir ein besonders drängendes und komplexes Thema angehen: Kritikalität und Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. Beide Themen spielen nicht nur in der Batterieforschung, sondern auch in der politischen und öffentlichen Debatte bereits eine wichtige Rolle. Die Debatte muss aber auf eine breitere Basis gestellt werden, denn ihre ökonomische und ökologische Tragweite wird weiter zunehmen und zukünftige Generationen betreffen.

Wir hoffen, dass unser White Paper die Debatte bereichert und dem Leser nützliche Informationen und Denkanstöße liefert – und dass es Aufschluss darüber gibt, wie die aktuellen Herausforderungen angegangen werden könnten.

Prof. Dr. Günther Hambitzer

Geschäftsführer der High Performance Battery Technology GmbH

Bonn, September 2022

01 Einführung

Die ersten Monate des Jahres 2022 haben unsere Abhängigkeit von Rohstoffimporten auf dramatische Weise gezeigt. Der russische Krieg gegen die Ukraine hat viele Länder dazu veranlasst, einen möglichst baldigen Importstopp für Kohle, Öl und Gas aus Russland zu erwägen. Gleichzeitig wurden vor allem in der Wirtschaft Stimmen laut, die vor den potenziell gravierenden negativen Folgen eines umfassenden Energieembargos für die heimische Wirtschaft warnten. Energierohstoffe, so stellte sich heraus, sind kritische Rohstoffe: Rohstoffe, die für Volkswirtschaften existenziell wichtig sind und deren Versorgungssicherheit gleichzeitig gefährdet ist.

Das Konzept der Kritikalität hat somit Eingang in die politische und öffentliche Debatte gefunden. Doch dabei geht es um mehr als nur um fossile Brennstoffe. Auch die Technologien der Energiewende sind von Rohstoffen abhängig, deren Versorgung mit bestimmten Risiken behaftet ist. So benötigen Elektromotoren, die wesentliche Bestandteile von E-Autos sind, für ihre Dauermagnete Seltene Erden wie Neodym und Dysprosium. Das Gleiche gilt für die Generatoren von Windkraftanlagen (Erdmann 2021). Und auch Batterien mit ihren zahlreichen Anwendungsfeldern für die Energiewende sind auf kritische Rohstoffe angewiesen. Hier steht meist das Metall Kobalt im Mittelpunkt der Diskussion, das als Kathodenmaterial in Batteriechemien mit hoher Energiedichte, wie z. B. Traktionsbatterien für Elektrofahrzeuge, bislang unverzichtbar ist. Aber auch andere Batterierohstoffe wie Nickel, Lithium und das Anodenmaterial Graphit könnten sich als kritisch erweisen (Weil et al. 2018).

Neben der Substitution von Rohstoffen und Suffizienzansätzen wird Recycling als vielversprechender Weg angesehen, um Kritikalität längerfristig abzumildern. Wenn es uns gelingt, Rohstoffe aus gebrauchten Batterien zurückzugewinnen, benötigen wir weniger neue (d.h. primäre) Rohstoffe für die Herstellung neuer Batterien. Dies könnte erklären, warum der Entwicklung von Batterierecyclingverfahren und dem Aufbau einer entsprechenden Kreislaufwirtschaft derzeit viel Aufmerksamkeit geschenkt wird. Recycling ist aber auch aus anderen Gründen wichtig: Es soll insbesondere verhindern, dass durch den Batterieboom riesige Abfallmengen entstehen, die deponiert werden müssen. Recycling hat zudem das Potenzial, den Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen im Zusammenhang der Batterieherstellung zu senken – allerdings nur, wenn die Recyclingprozesse im Vergleich zu den Prozessen der Primärindustrie einen kleineren Energie- und

Die aktuellen geopolitischen Entwicklungen zeigen uns deutlich: Energierohstoffe sind kritische Rohstoffe.

Dies gilt nicht nur für fossile Brennstoffe, sondern auch für Rohstoffe, die für die Technologien der Energiewende unerlässlich sind, wie z. B. Batteriespeichersysteme.

Neben der Substitution von Rohstoffen und Suffizienzansätzen ist Recycling ein vielversprechender Faktor, um Kritikalität längerfristig zu mindern.

Kohlenstoff-Fußabdruck haben. Es wurde nachgewiesen, dass die erheblichen Umweltauswirkungen der Gewinnung von Batterierohstoffen (Helms et al. 2019) durch den Einsatz von Sekundärstoffen aus Recycling reduziert werden können (Crenna et al. 2021; Bothe und Steinfort 2020; Xu et al. 2020).

Obwohl die Bedeutung von Kritikalität und Recycling weithin anerkannt wird, sind noch viele Fragen offen, etwa: Welche Batterietypen sind am anfälligsten für Kritikalität und nach welchen Kriterien? Was sind die derzeitigen Hindernisse für ein umfassendes Recycling von Lithium-Ionen-Batterien, und wie könnten diese Hindernisse abgebaut werden? Welche Rolle könnten Second-Life-Batterieprodukte spielen, und können sie die Probleme bei der Rohstoffversorgung für die Energiewende entschärfen? Die folgenden Kapitel sollen diese und andere Fragen beleuchten – und so auch Impulse für die Debatte über Kritikalität und Recycling geben.

02 Lithium-Ionen-Batterien – Ihr enormer Aufstieg und dessen enorme Konsequenzen

Blickt man auf die Entwicklung der Lithium-Ionen-Batterien zurück, so fällt vor allem eines ins Auge: ein gewaltiger Boom. Nach ihrer Markteinführung Anfang der 1990er Jahre verdrängten die innovativen Batterien mit ihren überlegenen Leistungswerten nach und nach Nickel-Metallhydrid-Akkus in Unterhaltungselektronik und Elektrowerkzeugen. Mit dem Durchbruch der Elektromobilität in den letzten Jahren entstand ein neues großes Anwendungsfeld: Lithium-Ionen-Batterien werden seitdem als Antriebsbatterien in Autos sowie in E-Bikes und anderen elektrisch betriebenen Fahrzeugen eingesetzt. Während ihr globales Marktvolumen im Jahr 2000 weniger als 2 GWh betrug, lag es im Jahr 2018 bereits bei über 160 GWh – davon entfielen 62 Prozent auf die Elektromobilität, 6 Prozent auf industrielle Speicher und 32 Prozent auf alle anderen Anwendungen (Avicienne Energy 2019, zitiert nach Mähliß 2020). Dies entspricht einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von fast 28 Prozent.

Lithium-Ionen-Batterien haben in letzter Zeit einen enormen Aufschwung erlebt. Dies dürfte indes nur ein Vorgeschmack auf die Entwicklungen der kommenden Jahre sein.

More Batteries Everywhere

Demand for lithium-ion batteries is forecast to surge after a virus-linked stumble in 2020

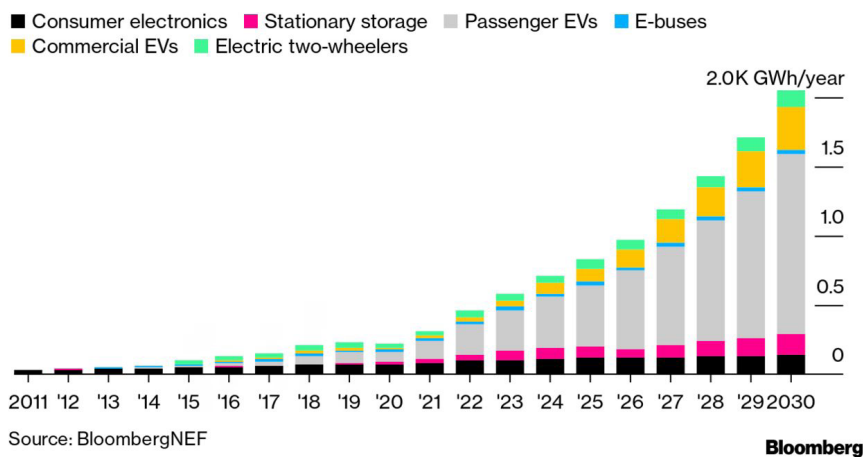


Abb. 1: Entwicklung und Prognose der Nachfrage bei Lithium-Ionen-Batterien
Quelle: www.bloomberg.com

Trotz dieser beeindruckenden Zahlen dürfte der Boom der vergangenen Jahre nur ein Vorgeschmack auf die Entwicklung in den kommenden Jahren sein (Abbildung 1). In Deutschland verdoppelte sich der Markt für Elektroautos trotz der Corona-Pandemie von 2020 auf 2021, und der Markt für Heimspeichersysteme wuchs um 50 Prozent – mit schätzungsweise 145.000 Neuinstallationen allein im Jahr 2021 (Figgener et al. 2022). Auf globaler Ebene stieg die Zahl der Elektrofahrzeuge von 7,1 Millionen im Jahr 2019 auf 10,2 Millionen im Jahr 2020, was einem Wachstum von 43 Prozent entspricht. Schätzungen gehen davon aus, dass sich dieses enorme Wachstum fortsetzen wird: Im Jahr 2025 könnten weltweit 46 Millionen und bis 2030 ganze 125 Millionen Elektrofahrzeuge unterwegs sein. Dies entspräche einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von 28 Prozent über das gesamte Jahrzehnt (IEA 2021a). Im Bereich der stationären Batteriespeicher sehen die Prognosen ähnlich aus: Die IEA geht von einem mehr als sechsfachen Anstieg von 9,6 GW im Jahr 2020 auf 62,9 GW im Jahr 2026 aus – das entspricht einem jährlichen Wachstum von 37 Prozent (IEA 2021b).

Zentrale Triebfeder dieser Entwicklung ist das politische Programm der Energiewende: der Umstieg von fossilen und nuklearen auf erneuerbare Energieträger in allen Wirtschaftssektoren und innerhalb einer vergleichsweise kurzen Zeit. Als Konzept aus den frühen 1980er Jahren stieß die Energiewende zunächst in der Wissenschaft auf Resonanz. In den 1990er Jahren fand die Debatte Eingang in die politische Arena, aber es dauerte noch weitere 30 Jahre, bis die Dringlichkeit einer Abkehr von fossilen Brennstoffen in vollem Umfang erkannt wurde: zum einen durch den Krieg Russlands gegen die Ukraine, der die Folgen bestehender geopolitischer Abhängigkeiten aufzeigt, zum anderen durch den Sechsten Sachstandsbericht des IPCC (2022) und andere einschlägige Berichte, die eindringlich vor den Gefahren eines weiter fortschreitenden Klimawandels warnen.

Die Energiewende betrifft alle Bereiche unseres Lebens: Energieerzeugung und -verbrauch, private Haushalte, Industrie und Gewerbe, Strom, Wärme und Mobilität. Entsprechend vielfältig sind die notwendigen Maßnahmen und komplex die Wechselwirkungen. Sicher ist jedoch, dass Batterien zusammen mit der Wind- und Solarstromerzeugung eine zentrale Rolle bei der Energiewende spielen werden. Sie machen elektrische Energie „mobil“ und ermöglichen eine Integration der fluktuierenden erneuerbaren Energieerzeugung in das Stromnetz. Vor diesem Hintergrund ist es nicht verwunderlich, dass die Nachfrage nach Batterien, wie oben skizziert, enorm gestiegen ist und weiter steigen wird – und dass es eine entsprechende Entwicklung auf Seiten der Batterieproduktion gibt: Wie Moores (2021) berichtet,

Die zentrale Triebfeder dieser Entwicklung ist das politische Programm der Energiewende: der Wechsel von fossilen und nuklearen Brennstoffen zu erneuerbaren Energien.

Batterien werden dabei eine zentrale Rolle spielen, denn sie machen elektrische Energie „mobil“ und ermöglichen eine Integration der fluktuierenden erneuerbaren Energieerzeugung in das Stromnetz.

gungen schon nach kurzer Zeit überholt ist – was wir heute herstellen, könnte sich schnell als veraltet erweisen. Die derzeitige Hochskalierung der Batterieproduktion betrifft indes nicht nur die Technologien von gestern, sondern auch deren Probleme. Neben der Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen wie Kobalt und der Notwendigkeit, die inhärenten Sicherheitsprobleme herkömmlicher Lithium-Ionen-Batterien zu bewältigen, müssen wir uns auch mit deren relativ kurzer Lebensdauer auseinandersetzen.

Vor diesem Hintergrund ist bereits jetzt absehbar, dass der Batterieboom enorme Konsequenzen an zwei Fronten haben wird: auf der Ressourcenseite und auf der Abfallseite. Eine nachhaltige Entwicklung ist hiervon in mehrfacher Hinsicht stark betroffen: Es drohen die Erschöpfung endlicher Ressourcen, Umweltschäden entlang der Produktionskette, die Entstehung großer Mengen gefährlicher Abfälle und die wirtschaftliche Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen. Daher sind die Themen Kritikalität und Recycling von entscheidender Bedeutung: mit Blick auf die Zukunft, aber auch für heute – denn die heutigen Entscheidungen haben große Auswirkungen auf die Kritikalitäts- und Recyclingprobleme, mit denen wir uns in Zukunft auseinandersetzen müssen.

Der Batterieboom wird enorme Konsequenzen an zwei Fronten haben: auf der Ressourcenseite und auf der Abfallseite.

03 First life, second life, Langlebigkeit – Verschiedene Perspektiven auf die Lebensdauer von Batterien

Die sich abzeichnenden Folgen des Batteriebooms werden bereits heute intensiv diskutiert. Große Bedeutung wird vor allem dem Ressourcenproblem beigemessen, das die langfristige Verfügbarkeit von Batterierohstoffen in Frage stellt. Auch die Umweltzerstörung durch die Rohstoffproduktion spielt eine wichtige Rolle, wohingegen das Abfallproblem, das untrennbar mit dem Boom verbunden ist, bisher nur wenig Beachtung gefunden hat. In der Debatte über mögliche Lösungen werden zwei naheliegende und zugleich wirkungsvolle Ansätze, welche die skizzierten Probleme an der Wurzel packen könnten, fast vollständig ignoriert: nämlich Langlebigkeit und Rightsizing von Batterien (Dusseldorp et al. 2021). Eine gewisse Rolle spielen Bemühungen, nachhaltige Quellen für Primärrohstoffe zu finden. Der Schwerpunkt der Debatte liegt jedoch auf dem Recycling und dem „zweiten Leben“ (*second life*) von Batterien.

Die verschiedenen Folgen des Batteriebooms werden in unterschiedlichem Maße debattiert. Das Gleiche gilt für die Debatte über mögliche Lösungen, die sich bisher auf das Recycling und die zweite Lebensdauer von Batterien konzentriert hat.

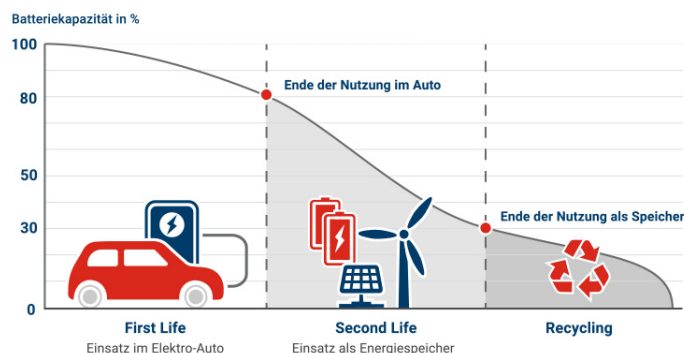


Abb. 3: Das Konzept der zweiten Batterie-Lebensdauer
Quelle: elektroautomatik.com

Das Konzept des Second Life bedeutet, dass gebrauchte Batterien aus Elektrofahrzeugen anschließend in stationären oder industriellen Speicheranwendungen eingesetzt werden, anstatt direkt dem Recycling zugeführt zu werden (Abbildung 3). Dies ist möglich, weil die letztgenannten Anwendungen weitaus geringere Anforderungen an Batterien stellen als Kraftfahrzeuganwendungen mit ihren anspruchsvollen Spezifikationen. Da bei stationären Anwendungen die Größe und das Gewicht der Batterien eine weit geringere Rolle spielen, ist

„Zweites Leben“ bedeutet, dass gebrauchte Batterien aus Elektrofahrzeugen nach dem Ende ihres „ersten Lebens“ in stationären Anwendungen wiederverwendet werden.

der Performanceverlust aus ihrem ersten Leben kein grundlegendes Problem für die weitere Verwendung: Wenn eine höhere Leistung oder eine größere Kapazität erforderlich ist, kann diese durch den Einsatz einer größeren Anzahl von Batterien erreicht werden. Zwei Anwendungsbereiche gelten als besonders attraktiv: die Bereitstellung von Primärregelleistung und die Verwendung als Heimspeicher (insbesondere in Verbindung mit Photovoltaikanlagen) (Fischhaber et al. 2016).

Der Hauptvorteil, der für Second-Life-Anwendungen angeführt wird, sind die Kosten: Second-Life-Batterien sind (derzeit) kostengünstiger als neue Batterien. Dies kann Investitionskosten senken, die Kapitalrendite erhöhen und damit Anwendungen befördern, die der Energiewende zugute kommen. Darüber hinaus werden mit Second-Life-Batterien erhebliche Vorteile für die Umwelt und die Ressourceneffizienz assoziiert: In dem Maße, in dem Second-Life-Batterien neue Batterien ersetzen, können sie Treibhausgasemissionen und andere mit der Batterieproduktion verbundene Schadstoffe reduzieren und gleichzeitig die Abhängigkeit von Primärrohstoffen verringern (Fischhaber et al. 2016). Sind Second-Life-Batterien, entsprechend ihrer prominenten Rolle in der öffentlichen Debatte, also der Königsweg für eine nachhaltige Nutzung von Batterien?

Die Frage der Kostenentwicklung von neuen und Second-Life-Batterien ist eine nähere Betrachtung wert: Lithium-Ionen-Batterien werden immer sicherer und kostengünstiger, so dass irgendwann (und in einigen Gegenden) die Kosten für eine fabrikneue Batterie niedriger sein könnten als die Kosten für die Wiederverwendung einer Batterie im Second Life. Ähnliche Argumente lassen sich jedoch auch für den Second-Life-Markt anführen, da die Entlade-, Demontage- und Wiederherstellungsprotokolle, die den Einsatz von Second-Life-Batterien ermöglichen, ebenfalls unweigerlich kostengünstiger und skalierbarer werden. Unterm Strich wird der Zweitnutzungsmarkt in einigen Gegenden weiter wachsen und stärker sein als in anderen Gebieten.

Hintergrundfeld 1: Ungewisse Kostenentwicklung bei neuen und Second-Life-Batterien

Zunächst sei darauf hingewiesen, dass ein Second Life von Batterien kein Recycling ist. Es *ersetzt nicht* das Recycling, sondern *verschiebt* lediglich den Zeitpunkt, zu dem Recycling notwendig wird, weiter in die Zukunft. Das hat Konsequenzen, die einerseits positiv betrachtet werden können: Die Verlängerung der ersten Lebensdauer von Batterien gibt uns mehr Zeit, um effektive und wirtschaftliche Recyclingverfahren zu entwickeln. Auch aus wirtschaftlicher Sicht kann es für

Ein Second Life von Batterien *ersetzt nicht* das Recycling, sondern *verschiebt* lediglich den Zeitpunkt, zu dem das Recycling notwendig wird, weiter in die Zukunft.

Unternehmen vorteilhaft sein, die Recyclingkosten, die sie für die von ihnen produzierten Batterien tragen müssen, in die Zukunft zu verlagern. Andererseits ließe sich ebenso gut sagen, dass das Second-Life-Konzept die Tatsache verschleiern, dass das Problem des Batterierecyclings mit all seinen Nachhaltigkeitsaspekten alles andere als gelöst ist (Jehle 2021) – denn es beantwortet nicht die Frage, ob und wann ein effektives und wirtschaftliches Batterierecycling in Zukunft möglich sein wird. Vielmehr tendiert es dazu, eben von dieser Frage abzulenken.

Wie ist es um mögliche Umwelt- und Ressourcenvorteile von Second-Life-Anwendungen bestellt? Um diese Frage beantworten zu können, müssen zwei Fälle unterschieden werden: Wird durch den Einsatz von Second-Life-Batterien die Produktion von neuen Batterien vermieden, kann von ökologischen Einsparungen ausgegangen werden. Werden jedoch zusätzliche Anwendungen von Batteriespeichern geschaffen, hängt der ökologische Nutzen von den Umweltauswirkungen dieser Anwendungen sowie der konkurrierenden Technologien ab (Fischhaber et al. 2016). Dies zeigt erneut, wie wichtig es ist, die Prämissen von Ökobilanzen zu reflektieren (Dusseldorp et al. 2021). Ein weiterer relevanter Aspekt ist der spezifische Ressourcenbedarf für eine bestimmte Anwendung: Second-Life-Batterien haben im Vergleich zu neuen Batterien eine geringere Leistung und Kapazität. Daher wird für dieselbe Anwendung „mehr Batterie“ benötigt. Und „mehr Batterie“ bedeutet: mehr Nachfrage nach Batterierohstoffen, mehr Energiebedarf bei der Herstellung usw..

Die vorangegangenen Fragen setzten implizit eine bestimmte Entscheidungsperspektive voraus, nämlich die Suche nach der bestmöglichen Verwendung für bereits produzierte Batterien, die ihr erstes Leben hinter sich haben. Was aber passiert, wenn es darum geht zu entscheiden, welche Batterien in Zukunft produziert werden sollen? Dann stellt sich die Situation wesentlich anders dar. Unter dieser Perspektive ist es wichtig, von vornherein Batterietechnologien zu wählen, die sich durch einen geringen Ressourcenbedarf über den gesamten Lebenszyklus und durch eine hohe Recyclingfähigkeit auszeichnen. Das Konzept des Second Life ist dann nicht Teil der effizientesten Lösung, sondern es lindert lediglich die negativen Folgen einer grundsätzlich schlechten Technologieauswahl. Die Möglichkeit von Second-Life-Anwendungen sollte daher heute nicht als Argument dienen, um die künftige Produktion von Batterien auf der Grundlage einer alten Technologie zu rechtfertigen.

Die Entscheidungsperspektive macht einen großen Unterschied: Geht es darum, die bestmögliche Verwendung für bereits produzierte und genutzte Batterien zu finden, oder um die Frage, welche Batterien in Zukunft produziert werden sollen?

Der Perspektivwechsel hin zu Technologieentscheidungen für die Zukunft macht insbesondere auch deutlich, dass Langlebigkeit von Batterien in vielerlei Hinsicht ein positiver Faktor für Nachhaltigkeit ist. Unter sonst gleichen Bedingungen ersetzt eine Batterie mit fünffach längerer Lebensdauer fünf Batterien, ohne zusätzlichen Energie-, Rohstoff- oder sonstigen Kapitalaufwand – allein in der ersten Nutzungsphase, ohne Berücksichtigung eines späteren Second Life. Erst nach der fünffachen Lebensdauer wird sie ein Fall für Second Life oder Recycling. Dies bedeutet zugleich, dass am Ende weniger Batterien recycelt werden müssen, was mit einer erheblichen Verringerung des Energieeinsatzes, der Rohstoffverluste und der mit dem Recyclingprozess verbundenen Kosten einhergeht. Während also der Second-Life-Ansatz den Druck auf Recycling nur verlagert, wird er durch langlebige Batterien tatsächlich gelindert. Langlebigkeit lindert auch das Problem der Kritikalität. Schließlich helfen langlebige Batterien die Sicherheitsrisiken zu vermeiden, die mit bereits genutzten, auf konventioneller Technologie basierenden Batterien verbunden sind, d. h. mit Second-Life-Batterien.

Somit lässt sich zusammenfassen: Es ist ein technologisches Defizit, nämlich die schnelle Batteriealterung, die das Second-Life-Konzept überhaupt erst ins Spiel bringt – mit all seinen Nachteilen in Bezug auf Sicherheit und Ressourcenbedarf. Der naheliegende technologische Ansatz, um die genannten Probleme zu vermeiden, lautet daher: langlebige Batterien.

Angesichts dessen sollte nicht der *Second-Life*-Ansatz, sondern ein *längeres (erstes) Leben* von Batterien im Mittelpunkt der Debatte, der Technologieentwicklung, der Technologieauswahl und letztlich auch der Batterieanwendungen stehen.

So wird auch deutlich, dass die Langlebigkeit von Batterien ein besonders vorteilhafter Faktor für Nachhaltigkeit ist, da sie den Druck auf Recycling lindert, während der Second-Life-Ansatz diesen nur verlagert.

Nicht der *Second-Life*-Ansatz, sondern ein *längeres (erstes) Leben* von Batterien sollte im Mittelpunkt von Entscheidungen über Batterietechnologien stehen.

04 Technologien für Batterierecycling – Ein kurzer Überblick

Irgendwann muss jede Batterie recycelt werden – früher oder später, nach ihrem ersten oder zweiten Leben. Für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien werden verschiedene Wege diskutiert, die jeweils ihre spezifischen Vor- und Nachteile haben. Wesentliche Unterschiede liegen im *Technology Readiness Level* (TRL), in der Möglichkeit, unterschiedliche Zellchemien zu verarbeiten (Robustheit), in den Recyclingeffizienzen sowie der Qualität und Reinheit des Materialoutputs (Chen et al. 2019; Harper et al. 2019; Heimes et al. 2021; Elwert et al. 2016; Velázquez-Martínez et al. 2019). Die verschiedenen Recyclingpfade lassen sich grob in drei Verfahrenstypen unterteilen, wie in Abbildung 4 dargestellt (Glöser-Chahoud et al. 2021).

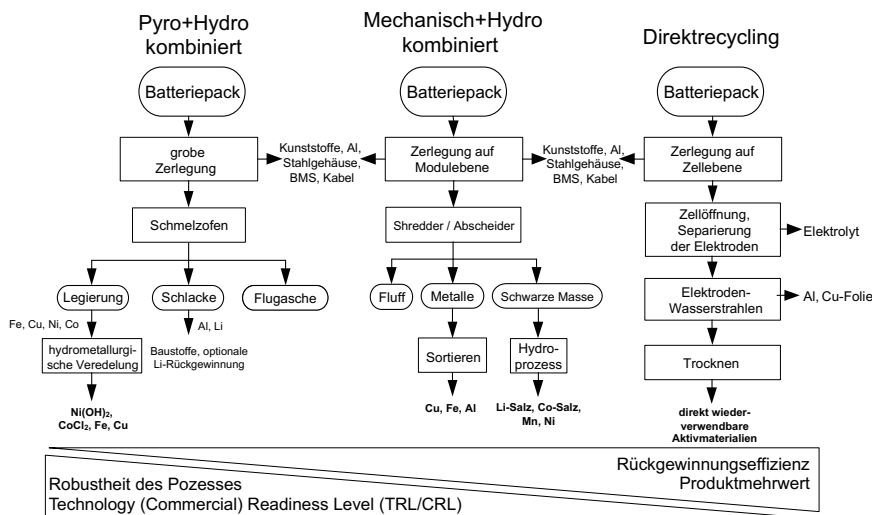


Abb. 4: Schemata von Recyclingprozessen
Quelle: Glöser-Chahoud et al. 2021, basierend auf Kurz et al. 2021, Elwert et al. 2016

Zum einen sind Verfahren zu nennen, bei denen Altbatterien pyrometallurgisch behandelt werden. Bei diesen Verfahren wird die Batterie nur grob zerlegt und sodann in einem Ofen eingeschmolzen. Die Metallfraktion kann anschließend als Legierungsmaterial in der Metallproduktion verwendet werden (z. B. für kobalt- und nickelhaltige Hochleistungslegierungen). Alternativ können die verschiedenen, in der Schmelze enthaltenen Metalle durch eine anschließende hydrometallurgische Behandlung getrennt werden. Der gesamte Prozess zielt in der Regel darauf ab, die hochwertigen Kathodenmaterialien

Für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien werden verschiedene Wege diskutiert, die sich grob in drei Verfahrenstypen einteilen lassen.

wie Nickel und Kobalt sowie Kupfer zu recyceln, während Leichtmetalle wie Aluminium oder Lithium in der Regel verloren gehen oder nur schwer in Batteriequalität zurückgewonnen werden können. Auch Graphit, Kunststoffe und der Elektrolyt werden während des pyrometallurgischen Prozesses schlicht verbrannt.

Ein im Hinblick auf die Recyclingeffizienz vorteilhafteres Verfahren zur Behandlung von Altbatterien ist die kombinierte mechanische und hydrometallurgische Behandlung. Dabei werden die Batteriepacks bis auf Modulebene zerlegt, was eine bessere mechanische Trennung der Komponenten gleich zu Beginn des Prozesses ermöglicht. Anschließend wird alles, was nicht bereits im ersten Schritt aussortiert wurde, geschreddert und in einer Reihe von mechanischen Trennschritten weiter sortiert. Die schwarze Masse (aktives Elektrodenmaterial) wird schließlich in einem hydrometallurgischen Prozess behandelt (Heimes et al. 2021). Bei fortgeschrittenen Ansätzen dieser Art können Recyclingwirkungsgrade von über 90 Prozent erreicht werden, und alle Metalle wie auch Graphit, Kunststoffe und der Elektrolyt können abgetrennt und als Sekundärmaterial (nicht zwingend innerhalb der Batterieproduktion) wiederverwendet werden (Düsenfeld 2022).

Jüngste Forschungen konzentrieren sich auf das direkte Recycling von Aktivmaterialien. Ziel ist hier, diese „schwarze Masse“ möglichst präzise und kontaminationsfrei von den Elektrodenfolien abzutrennen, um sie direkt in der Zellproduktion wiederverwenden zu können. Dazu sind eine detaillierte Zerlegung bis auf Zellebene sowie ein Zellöffnungsprozess notwendig. Zwar wäre die direkte Wiederverwendung aktiver Materialien die ressourceneffizienteste Lösung. Allerdings ist zu bedenken, dass die Zellchemie und die Aktivmaterialien ständig verändert und verbessert werden. Daher ist fraglich, ob zehn Jahre alte Aktivmaterialien noch für die zukünftige Zellproduktion geeignet sind. Aus diesem Grund dürfte das Direktrecycling besonders für (Gigafactory-) Produktionsabfälle oder vorzeitige Rückläufer, z. B. aus beschädigten Fahrzeugen, relevant sein. Nichtsdestotrotz kann eine detailliertere und teilweise automatisierte Zerlegung veralteter Batteriesysteme zu höheren Recyclingeffizienzen beitragen, unabhängig davon, welcher anschließende Verarbeitungsweg beschritten wird.

Auch wenn pyrometallurgische Verfahren in Bezug auf Recyclingeffizienz eher mittelmäßig abschneiden, wird erwartet, dass sie für das Batterierecycling auch in Zukunft eine Rolle spielen werden, um das große Volumen, die Vielfalt und die Heterogenität der allgemeinen Altbatterieströme aus Elektronikgeräten, kleineren Fahrzeugen oder E-Bikes bewältigen zu können. Gleichzeitig werden die effizienteren mechanischen und hydrometallurgischen Verfahren für das Recycling größerer Akkus aus batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen oder stationären Speichersystemen eingesetzt.

Pyrometallurgische Verfahren haben eine eher geringe Recyclingeffizienz, dürften aber auch in Zukunft eine Rolle spielen, da sie die große Vielfalt von Altbatterien aus elektronischen Geräten, kleineren Fahrzeugen oder E-Bikes bewältigen helfen.

Die effizienteren mechanischen und hydrometallurgischen Verfahren werden für das Recycling größerer Akkus aus batterieelektrischen Fahrzeugen oder stationären Speichersystemen eingesetzt.

05 Was wollen wir mit Recycling erreichen? Einige Abwägungen

Batterierecycling wäre dann ideal, wenn alle Rohstoffe der Batterie in einem sicheren und wirtschaftlichen Prozess, ohne übermäßigen Energie- oder Materialverbrauch vollständig zurückgewonnen werden könnten. Wie das vorherige Kapitel gezeigt hat, entspricht die Realität diesem Ideal jedoch nicht. Stattdessen realisiert keines der bestehenden Batterierecyclingverfahren eine nahezu perfekte Kreislaufwirtschaft mit geringen wirtschaftlichen und energetischen Kosten. Es sind, allgemein gesprochen, Abwägungen erforderlich, weshalb wir uns die Frage stellen müssen: Was genau wollen wir mit Batterierecycling eigentlich erreichen?

Erstens gilt es, einen engen Zusammenhang zwischen der Batteriechemie und der Wirtschaftlichkeit des Recyclings zu beachten (Heimes et al. 2021). Recycling ist dann wirtschaftlich, wenn der Wert der zurückgewonnenen Rohstoffe einen rentablen Betrieb des Prozesses ermöglicht. Derzeit ist der wertvollste Batteriebestandteil das Kathodenmetall Kobalt, so dass im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit des Recyclingprozesses ein hoher Kobaltgehalt wünschenswert ist. Kobalt ist jedoch auch der Batteriebestandteil, der die höchste Kritikalität aufweist (siehe Kapitel 8) und mit dessen Gewinnung erhebliche ökologische und soziale Probleme verbunden sind. Diese Wechselbeziehung spiegelt sich auch auf der Produktionsseite wider: Die Materialien, die das Batterierecycling rentabel machen, machen die Batterieproduktion teuer. Pointiert ließe sich sagen: Die Entscheidung liegt zwischen Batterien, die billig herzustellen sind, und Batterien, deren Recycling rentabel ist.

Die Wirtschaftlichkeit des Recyclingprozesses ist seinerseits abhängig von politischen Rahmenbedingungen. Diese beeinflussen mittels Arbeits- und Umweltschutzbestimmungen sowie Vorgaben zu Recyclingquoten die Kosten des Recyclingprozesses, aber auch mögliche Einnahmequellen für Recyclingunternehmen. Ist das Recycling gesetzlich vorgeschrieben, sind die Marktpreise für Rohstoffe nicht mehr der zentrale Faktor für die Rentabilität des Recyclings. Das bedeutet: Das Recycling von Batterien kann durch eine entsprechende Regulierung wirtschaftlich rentabel werden, auch wenn die zurückgewonnenen Rohstoffe selbst keinen ausreichend hohen intrinsischen Wert haben. Inzwischen gehen verschiedene nationale und transnationale Regulierungen diesen Weg der Festlegung von Recyclingquoten für Batterien (siehe Kapitel 7 für das Beispiel der EU). Auch hier ist es entscheidend, sich über den Zweck des Recyclings klar zu werden und entsprechende Prioritäten zu setzen. Ein

Beim Batterierecycling sind Abwägungen erforderlich, weshalb wir uns fragen müssen: Was genau wollen wir mit damit eigentlich erreichen?

Pointiert ausgedrückt: Die Entscheidung liegt zwischen Batterien, die billig zu produzieren sind, und Batterien, deren Recycling rentabel ist.

Die Wirtschaftlichkeit des Recyclingprozesses hängt wiederum von politischen Rahmenbedingungen ab.

Grund dafür ist, dass die Regulierung auch unerwünschte Nebeneffekte haben kann, die die Nachhaltigkeit des gesamten Systems der Batterie-nutzung konterkarieren können. Ein zweiter Grund ist, dass das Recycling selbst nicht ohne Kosten ist, was Energie und Ressourcen angeht.

Daher ist die Frage zu beantworten, welche Inhaltsstoffe es tatsächlich wert sind, recycelt zu werden. Die bisher dominierenden Batterie-chemien (NMC, NCA, etc.) basieren auf Rohstoffen, die mittlere bis hohe Kritikalitätswerte aufweisen, zu relativ hohen Preisen gehandelt werden und die als Abfall problematische Materialien darstellen würden. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei den Rohstoffen der LFP-Chemie zu einem großen Anteil um „Alltagsmaterialien“, die keine oder höchstens eine geringe Kritikalität aufweisen, die relativ kostengünstig und im Vergleich zu anderen gängigen Batterieinhaltsstoffen weniger schädlich sind. Eine solche Differenzierung kann zu dem Ergebnis führen, dass sich die vollständige Rückgewinnung aller Batterieinhaltsstoffe nicht für alle Batteriechemien lohnt – nicht nur finanziell, sondern auch in Bezug auf den Energieaufwand beim Recycling und die (nicht gegebene) Kritikalität. Sie öffnet zudem den Blick für die Tatsache, dass Recycling ein wichtiger, aber nicht der einzige Weg ist, um die mit dem Batterieboom verbundenen Ressourcen- und Abfallprobleme zu lösen.

Ein weiterer wichtiger Ansatzpunkt wurde oben bereits angesprochen: Langlebigkeit. Batterien, die länger halten, müssen seltener ersetzt werden, erfordern weniger Recycling und verursachen letztlich weniger Abfall. Darüber hinaus gibt es weitere Batterieeigenschaften, die ebenfalls eine wichtige Rolle für eine nachhaltigere Batterienutzung spielen können. Echte Schnellladefähigkeit und Tiefentladefähigkeit sind solche Eigenschaften. Wenn Automobilhersteller ihre Fahrzeuge mit groß dimensionierten Batterien ausstatten, liegt dies nicht zuletzt daran, dass herkömmliche Batterietechnologien nur in einem begrenzten Ladekorridor (zwischen Ladeständen von 20 – 80 Prozent) schnellgeladen werden können und immer bis zu einem bestimmten Grad geladen bleiben müssen: andernfalls würde die Batteriechemie irreversibel geschädigt (Dusseldorp et al. 2021). Durch den Einsatz einer verbesserten Batterietechnologie könnte diese Überdimensionierung vermieden werden – und damit auch der Rohstoff- und Energiebedarf bei der Herstellung sowie der Recyclingbedarf am Ende des Batterielebens deutlich reduziert werden.

Ein weiterer wichtiger Zusammenhang wird deutlich, wenn wir unseren Blick über die einzelne Recyclinganlage hinaus weiten und die Sammel- und Recyclinginfrastruktur betrachten. Hier zeigt sich, dass die Beschaffung, die Lagerung und der Transport von Altbatterien in der Kostenstruktur des Batterierecycling stark ins Gewicht fallen (Sattar et al. 2020). Es ist daher von großer Bedeutung, die Transport-

Die vollständige Rückgewinnung aller Inhaltsstoffe lohnt sich eventuell nicht für alle Batterietypen – nicht nur in finanzieller Hinsicht, sondern auch in Bezug auf den Energieaufwand und die (nicht gegebene) Kritikalität.

Neben dem Recycling gibt es weitere Ansätze, um die mit dem Batterieboom verbundenen Ressourcen- und Abfallprobleme zu lösen. Langlebigkeit und andere Batterieeigenschaften wie Tiefentladefähigkeit können hier ebenfalls eine wichtige Rolle spielen.

Ein weiterer Kompromiss besteht zwischen dezentralen Anlagen, die die Transportkosten minimieren, und zentralen Anlagen mit Größenvorteilen bei den Recyclingprozessen.

kosten niedrig zu halten. Gleichzeitig ist zu erwarten, dass die heute gängigen (hydro- und pyrometallurgischen) Recyclingverfahren durch steigende Kapazitäten von Skaleneffekten profitieren werden. Recyclinganlagen mit großen Kapazitäten erhöhen jedoch die Transportentfernungen und damit die Transportkosten sowie den ökologischen Fußabdruck. Da die Behandlung von Altbatterien immer auch eine Zerlegung umfasst und die Zerlegung von Batterien eine frühzeitige Trennung bestimmter Batteriekomponenten wie Module oder Zellen ermöglicht, könnte sich als sinnvoll erweisen, dezentrale Demontageanlagen zur Konzentration bestimmter Abfallfraktionen einzusetzen und das anschließende Recycling in großen zentralen Anlagen durchzuführen.

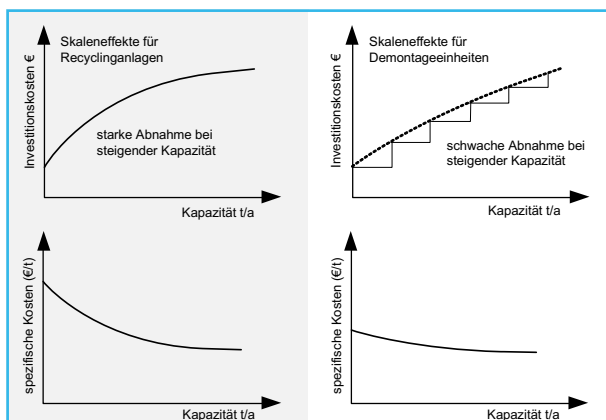


Abb. 5: Erwartete Skaleneffekte für Recycling- und Demontageanlagen
Quelle: eigene Darstellung

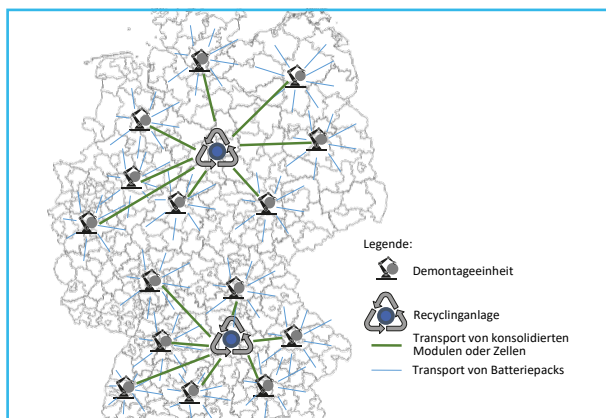


Abb. 6: Zweistufiges Reverse-Logistics-Netzwerk
Quelle: eigene Darstellung

Ein solches zweistufiges System könnte auch im Hinblick auf Skaleneffekte sinnvoll sein, da die Auswirkungen einer Kapazitätsdegression bei Demontageanlagen geringer zu sein scheinen als bei Recyclinganlagen (siehe Abbildung 5). Dies liegt vor allem daran, dass die Demontageanlagen für Batterien eine begrenzte Kapazität haben, so dass eine Erhöhung des Recyclingvolumens zu einer Parallelisierung verschiedener Demontageanlagen führen würde. Ein zweistufiges

Demontage- und Recyclingnetz könnte daher die Vorteile einer dezentralen Behandlung in Bezug auf Transportkosten und -entfernungen mit den Skaleneffekten bei Recyclingprozessen kombinieren. Das Konzept eines solchen Rücknahmenetzes ist in Abbildung 6 dargestellt.

Dieser kurze Exkurs zeigt, dass wir unsere Perspektive auf das Thema Batterierecycling erweitern müssen, wenn es darum geht, eine insgesamt nachhaltigkeitsorientierte Nutzung von Batterien für die Energiewende zu realisieren. Letztlich geht es nicht nur um hohe Recyclingquoten (bei gleichzeitigem Ignorieren der auf den Markt gebrachten Batterietechnologien), sondern darum, eine Kombination aus geeigneten Batterietechnologien und Recyclingansätzen zu finden, die den Anforderungen einer nachhaltigen Entwicklung insgesamt gerecht wird.

Letztlich geht es nicht allein um hohe Recyclingquoten, sondern darum, eine Kombination aus geeigneten Batterietechnologien und Recyclingansätzen zu finden, die den Anforderungen einer nachhaltigen Entwicklung insgesamt gerecht wird.

06 Die Rezyklierbarkeit von Lithium-Ionen-Batterien verbessern

Lithium-Ionen-Batterien sind eine vergleichsweise junge Batterietechnologie. Sie haben sich erst in den letzten zwei Jahrzehnten zu einem Massenmarkt entwickelt. Vor diesem Hintergrund ist es leicht zu erklären, warum bisher keine etablierte Recyclingindustrie für sie existiert. Tatsächlich gibt es nicht einmal verlässliche Daten über den ersten Schritt des Recyclings: die Sammlung von Altbatterien. Schätzungen zufolge liegt die Sammelquote von Lithium-Ionen-Batterien in der EU bei nur etwa 10 Prozent (Wahlström et al. 2019). Dies liegt zum Teil daran, dass Lithium-Ionen-Batterien oft fest in Geräte eingebaut sind und von den Nutzern nicht separat entsorgt werden können. Derzeit wird Lithium aus Altbatterien in der EU nicht in großem Umfang zurückgewonnen, da es im Vergleich zu Lithium aus Primärquellen als unwirtschaftlich angesehen wird (EP 2022). Zahlreiche Projekte zielen jedoch darauf ab, die Rückgewinnung und Veredelung von Lithium aus Altbatterien zu steigern.

Die derzeitige Situation indes ist unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit nicht akzeptabel. Der Sektor der Elektrofahrzeuge wächst rasant, während die Recycling-Infrastruktur damit nicht Schritt hält. Es besteht die Gefahr, dass wertvolle Rohstoffe verloren gehen und große Mengen problematischer Abfälle anfallen. Geopolitische Abhängigkeiten, wie sie im Krieg Russlands gegen die Ukraine zutage treten, verleihen dem Thema Recycling zusätzliche Dringlichkeit. Darüber hinaus häufen sich Medienberichte über Brände in Entsorgungsanlagen, die durch unsachgemäß entsorgte Lithium-Ionen-Batterien verursacht wurden. Es wird geschätzt, dass etwa 48 Prozent aller jährlich im Vereinigten Königreich auftretenden Müllbrände durch Lithium-Ionen-Batterien verursacht werden – und dass diese die Wirtschaft jährlich über 150 Millionen Pfund kosten (Neumann et al. 2022). Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass wir dringend eine effektive Recyclingwirtschaft für Lithium-Ionen-Batterien brauchen.

Für andere Batterietypen, die schon länger auf dem Markt sind, gibt es bereits effektive Recyclingsysteme. Blei-Säure-Batterien sind hierfür gewiss das prominenteste Beispiel. Sie wurden in den 1850er Jahren erfunden, also noch vor der kommerziellen Verbreitung von elektrischem Strom, die um das Jahr 1882 einsetzte. Dennoch zählen sie heute zu den am erfolgreichsten recycelten Gebrauchsgegenständen. Bleibatterien werden als Starterbatterien in Autos, als Antriebsbatterien (vor allem in Gabelstaplern), als Notstromaggregate u. a.

Das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien steckt noch in den Kinderschuhen.

Das gegenwärtige Recyclingdefizit ist nicht länger hinnehmbar – nicht zuletzt, weil viele Müllbrände durch unsachgemäß entsorgte Lithium-Ionen-Batterien verursacht werden.

Für andere Batterietypen gibt es bereits wirksame Recyclingsysteme. Blei-Säure-Akkus sind das bekannteste Beispiel.

für medizinische Geräte und Notbeleuchtung, sowie in stationären Speichersystemen einschließlich der Speicherung erneuerbarer Energien verwendet. Das Europäische Parlament geht davon aus, dass 99 Prozent aller Blei-Säure-Batterien aus Autos in der EU tatsächlich gesammelt und recycelt werden, wobei die Verwertungsquoten für Blei in den meisten Mitgliedstaaten über 97 Prozent liegen (EP 2022). Die gesamte Recyclingeffizienz, die neben Blei auch die anderen Batteriebestandteile umfasst, wird in fast allen EU-Mitgliedstaaten auf 70 bis über 90 Prozent geschätzt (Eurostat 2021). Grundsätzlich gelten Blei-Säure-Batterien beim heutigen Stand der Technik als nahezu 100prozentig recycelbar.

Wie ist es möglich, dass ein Produkt aus den 1850er Jahren heute das beste Beispiel für Kreislaufwirtschaft und Recyclingeffizienz ist? Dafür gibt es mehrere Gründe: Erstens haben alle Blei-Säure-Batterien die gleiche Grundchemie. Obwohl jeder Hersteller sein eigenes Geheimrezept für die molekulare Zusammensetzung der Aktivmaterialien (die so genannte „Batteriepaste“) verwendet, ist die Chemie der Materialien mehr oder weniger dieselbe: Blei und Schwefelsäure sind die wesentlichen Bestandteile; die geringfügigen Unterschiede, die etwa das Separatormaterial betreffen, haben keine Auswirkungen auf die Recyclingschritte am Ende des Lebenszyklus. Zweitens gestaltet sich die Demontage und physische Trennung der Batteriebestandteile recht einfach, nicht zuletzt, weil Blei-Säure-Batterien in hohem Maße standardisiert sind: Die Art und Weise, wie sie konstruiert sind, hat sich im Laufe der Jahrzehnte nicht wesentlich geändert. Nach der mechanischen Zerkleinerung der Batterien schwimmt der Kunststoffanteil (hauptsächlich das Gehäuse) im Wasser, das Blei sinkt und der Elektrolyt löst sich im Wasser auf. Drittens gibt es wirtschaftliche Gründe: Blei, das etwa 60 Gewichtsprozent der Batterien ausmacht, hat einen hohen Materialwert, was das Recycling lukrativ macht. Schließlich hat sich längst ein effektives Rücknahmesystem etabliert, das dafür sorgt, dass fast alle gebrauchten Blei-Säure-Batterien tatsächlich dem Recycling zugeführt werden. All dies ermöglichte die Rationalisierung, Automatisierung (bis zu einem gewissen Grad) und Skalierung des Recyclings von Blei-Säure-Akkus – was eine Batterie aus den 1850er Jahren zu einem Recycling-Vorreiter des 21. Jahrhunderts macht.

Im Vergleich dazu haben herkömmliche Lithium-Ionen-Batterien eine Reihe von Nachteilen für ein effektives Recycling (Abbildung 7): Es gibt nicht nur einen Typ von Lithium-Ionen-Batterien auf dem Markt, sondern verschiedene Zellchemien, die sich vor allem in den verwendeten Kathodenmaterialien unterscheiden (hauptsächlich Lithium-Kobalt-Oxid (LCO), Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid (NCA), Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NMC) und

Die Faktoren, die das Recycling von Blei-Säure-Batterien erleichtern, sind bei Lithium-Ionen-Batterien nicht gegeben.

Lithium-Eisenphosphat (LFP). Darüber hinaus werden die Batteriechemien laufend verändert. So ist Lithium-Mangan-Eisen-Phosphat derzeit in aller Munde, Lithium-Schwefel und andere konkurrierende Technologien befinden sich in der Entwicklung, und auch Lithium-Festkörperbatterien sind auf dem Weg in den Mainstream. Auch in Bezug auf die Konstruktion gibt es bei Lithium-Ionen-Batterien kaum eine Standardisierung, sondern vielmehr drei grundlegende Bauarten von Batteriezellen – Pouch-, zylindrische und prismatische Zellen – die auf unterschiedlichste Weise zu Batteriemodulen und -packs zusammengesetzt werden können. Die Inhaltsstoffe haben nur teilweise einen hohen Materialwert, wobei es große Unterschiede zwischen den verschiedenen Zellchemien gibt. Schließlich gibt es wirksame Rücknahmesysteme bisher nur für Teile des Marktes. Zudem stellen herkömmliche Lithium-Ionen-Batterien aufgrund ihrer Entflammbarkeit und Explosionsgefahr besonders hohe Anforderungen an den Transport- und Arbeitsschutz. Alles in allem also herausfordernde Bedingungen für ein effektives und wirtschaftliches Recycling.

	<i>Blei-Säure-Batterien</i>	<i>Lithium-Ionen-Batterien</i>
<i>Grundlegende Chemie</i>	einheitlich	sehr vielfältig
<i>Demontage</i>	einfach	schwierig
<i>Standardisierung</i>	hoch	niedrig
<i>Rücknahmesysteme</i>	etabliert	im Entstehen

Abb. 7: Vergleich des Recyclings von Blei-Säure-Batterien und Lithium-Ionen-Batterien

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob es Erfolgsfaktoren aus dem Recycling von Blei-Säure-Batterien gibt, die sich auf Lithium-Ionen-Batterien übertragen lassen. Zunächst zur Standardisierung: Lithium-Ionen-Batterien haben erheblich mehr Anwendungsfelder als Blei-Säure-Akkus, weshalb eine Standardisierung hier deutlich schwieriger ist. Gleichwohl könnte sie in gewissem Umfang gesteigert werden, zum Beispiel innerhalb einzelner Anwendungsbereiche wie denen der Elektromobilität oder der Elektrowerkzeuge. Dies würde freilich Vereinbarungen zwischen den Herstellern oder aber politische Vorgaben erfordern. Darüber hinaus gibt es neue informationstechnische Ansätze, die den Nachteil der Variabilität von Batterien für das Recycling ein Stück weit ausgleichen könnten. Wenn Batterien mit einer Demontageanleitung (z. B. in Form von QR-Codes) versehen würden, könnte dies eine Vereinfachung ihrer Behandlung nach dem End-of-Life ermöglichen, indem z. B. automatisch Entscheidungen über den Recyclingweg oder die Demontageverfahren getroffen werden. Das

Einige Erfolgsfaktoren könnten jedoch auf das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien übertragen werden, z. B. die Standardisierung – zumindest in bestimmten Anwendungsbereichen.

Gleiche gilt für die Verfügbarkeit von Informationen aus dem Batteriemanagementsystem (STABL 2021).

Wie verhält es sich mit dem Bereich der Zellchemie? Wäre es möglich, die Vielfalt der verwendeten Chemien und damit auch die Komplexität des Batterierecyclings zu verringern? Die oben genannten Typen von Lithium-Ionen-Batterien unterscheiden sich erheblich in ihren Leistungsparametern und Kosten. Je nach Anwendung werden entsprechende Zellchemien verwendet, was bedeutet, dass es (potenziell gute) Gründe für den Einsatz unterschiedlicher Zellchemien gibt. So werden beispielsweise NMC-Batterien bevorzugt in Anwendungen eingesetzt, bei denen eine hohe Energiedichte gewünscht ist, während LFP-Batterien favorisiert werden, wenn Kosten- und Sicherheitsaspekte im Vordergrund stehen. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass veränderte Verbraucherwünsche zu Verschiebungen in den Anteilen der verwendeten Batteriechemien führen können: Wenn Sicherheit, Kosten oder Ressourceneffizienz bei künftigen Verbraucherentscheidungen eine wichtigere Rolle spielen, könnte dies zu einer Reduktion oder gar Eliminierung weniger nachhaltiger Batteriechemien und damit zu einer Ausdünnung der Batterievielfalt führen. So gesehen könnte sich das Verbraucherverhalten als komplementär zur Standardisierung erweisen.

Generell wäre es am besten, die Recyclingfähigkeit von Batterien von Beginn des Entwicklungsprozesses an umfassend zu berücksichtigen. Dieser „Design for Recycling“-Ansatz umfasst neben der Standardisierung auch Konstruktionsmethoden für Batteriezellen, Module und Packs, die es ermöglichen, Batterien am Ende ihres Lebens möglichst einfach und vollständig zu recyceln. Dabei spielt eine gute mechanische Demontage zu Beginn des Recyclingprozesses eine wichtige Rolle. Die frühzeitige Trennung verschiedener Batteriekomponenten begünstigt in der Regel hohe Recyclingquoten und -qualitäten, da die Komponenten, anders als beim Shreddern, nicht gemeinsam in die nachgelagerten Recyclingschritte gelangen. Darüber hinaus begünstigt eine gute Zerlegbarkeit auch die Verwendung der Batterien in einem Second Life: denn auch hier müssen Batterien zerlegt werden, damit gut erhaltene Zellen oder Module für neue Anwendungen ausgewählt und neu zusammengesetzt werden können. Schließlich ist die Einrichtung neuer Rücknahmesysteme für Lithium-Ionen-Batterien entscheidend. Hier ist die Entwicklung von geeigneten Geschäftsmodellen und Kooperationsformen ein Faktor, der wesentlich zur Verbesserung der Recyclingwirtschaft beitragen kann.

Während wir versuchen zu prognostizieren, wie Batterierecycling der Zukunft aussehen könnte, handelt es sich bei den fraglichen Batterien um solche der Gegenwart – Batterien, die bereits heute auf dem Markt sind. Wie sieht es mit Batterietechnologien der Zukunft und

Die sich ändernden Verbraucherwünsche könnten zu einer Ausdünnung der derzeitigen Vielfalt an Batteriechemien führen. So gesehen könnte sich das Verbraucherverhalten als komplementär zur Standardisierung erweisen.

Der „Design for Recycling“-Ansatz umfasst Konstruktionsmethoden für Batteriezellen, -module und -packs, die es ermöglichen, Batterien am Ende ihres Lebens so einfach und vollständig wie möglich zu recyceln.

Die Batterien der nächsten Generation werden andere Recyclingeigenschaften haben.

deren Recyclingfähigkeit aus? Feststoffakkus werden von vielen als mögliche Nachfolgetechnologie für die heutigen Lithium-Ionen-Batterien gehandelt. Sie zeichnen sich durch einen festen Elektrolyten aus und versprechen Vorteile in Bezug auf Sicherheit, Langlebigkeit und Energiedichte. Auch beim Recycling wird es erhebliche Unterschiede zwischen Feststoff- und herkömmlichen Batterien geben. Der offensichtlichste Unterschied ist die Transport- und Arbeitssicherheit: In Feststoffbatterien gibt es keinen flüssigen organischen Elektrolyten (es sei denn, in Feststoffbatterien wird zusätzlich ein flüssiger Elektrolyt verwendet, um Probleme mit der Ionenleitfähigkeit zu mildern, [Bates et al. 2022](#)). Dies hat wichtige Auswirkungen, da der flüssige Elektrolyt in den derzeitigen Lithium-Ionen-Batterien nicht nur entflammbar, sondern oft auch giftig ist. Die Bildung von hochkorrosiver Flusssäure kann im Falle von Feststoffakkus ebenfalls vermieden werden. Andererseits können Feststoffbatterien je nach der spezifischen Zellchemie in Zukunft auch neue Herausforderungen für das Batterierecycling mit sich bringen. Einige Feststoffakku-Chemien enthalten Metalle, die in den derzeitigen Batteriechemien nicht enthalten sind, wie Germanium, Titan oder Zinn. Diese Inhaltsstoffe können einige der heute üblichen Recyclingverfahren beeinträchtigen ([Neumann et al. 2022](#)).

Bei alledem sollte es darum gehen, einen zentralen Fehler der Vergangenheit nicht zu wiederholen: sich erst viele Jahre nach der Markteinführung von Batterietechnologien um deren Recycling zu kümmern. Im Falle von Lithium-Ionen-Batterien ist, mehr als bei früheren Technologien, bereits frühzeitig absehbar, dass enorme Mengen an Akkus produziert und früher oder später zum Recycling anfallen werden. Daher müssen die Entwicklung von Batterien und die Entwicklung der zugehörigen Recyclingtechnologien viel stärker aufeinander abgestimmt werden. Design for Recycling von Anfang an – eine nicht zu vernachlässigende Anforderung an die Batterieentwicklung.

Im Falle von Lithium-Ionen-Batterien ist bereits absehbar, dass enorme Mengen an Akkus produziert und zum Recycling anfallen werden. Daher müssen die Entwicklung von Batterien und die Entwicklung der zugehörigen Recyclingtechnologien viel stärker aufeinander abgestimmt werden.

07 Recycling regulieren – Gut gemeint ist nicht zwingend gut gemacht

Wie bereits erwähnt, stellt staatliche Regulierung einen entscheidenden Faktor für das Batterierecycling dar. Sammelquoten können sicherstellen, dass ein großer Teil der in Verkehr gebrachten Batterien nach ihrer Nutzungsphase recycelt wird. Recyclingquoten können dafür sorgen, dass auch Batteriebestandteile mit geringem intrinsischen Wert zurückgewonnen werden. Auf diese Weise wirkt sich die Regulierung auch auf die Wirtschaftlichkeit des Recyclings, die Verfügbarkeit und die Preise von Rohstoffen, die Kritikalität von Rohstoffen sowie andere Aspekte der Batteriewirtschaft aus.

Die Europäische Union ist dabei, einen ehrgeizigen Rechtsrahmen für die nachhaltige Nutzung von Batterien zu schaffen. Dies dürfte sich auch auf die Politik und die Debatte außerhalb der EU auswirken, nicht zuletzt, weil der EU-Batteriemarkt eine globale Ausstrahlung besitzt. Die neue Batterieverordnung soll 2022 verabschiedet werden und wird die Batterierichtlinie aus dem Jahr 2006 ersetzen – und deutlich darüber hinausgehen: Zum ersten Mal wird der gesamte Lebenszyklus von Batterien abgedeckt, d. h. Herstellung, Nutzung und Lebensende von Batterien. Die Verordnung legt unter anderem Mindestanforderungen an die Haltbarkeit und Leistung von Industriebatterien und Allzweck-Gerätebatterien fest. Die Batteriehersteller werden außerdem verpflichtet, die Einhaltung von Nachhaltigkeitskriterien entlang der gesamten Lieferkette zu gewährleisten. Schließlich soll ein sogenannter Batteriepass, als erster digitaler Produktpass auf europäischer Ebene, wichtige Informationen entlang des Lebenszyklus von Batterien zusammenführen und verfügbar machen (BMUV 2022).

Das Recycling von Batterien wird ein Schwerpunkt der neuen EU-Verordnung sein – beginnend mit der Anforderung, dass Gerätebatterien sowie Batterien in leichten Transportmitteln (LMT) künftig durch die Kunden selbst oder unabhängige Anbieter komplett entnehmbar und austauschbar sein müssen. Dies in Verbindung mit der verpflichtenden Batterieerkennung ist eine wesentliche Voraussetzung für hohe Sammelquoten von Altbatterien und für ein sicheres Recycling, aber auch für eine Verlängerung der Lebensdauer der betreffenden Geräte. Die Sammelquoten sind noch Gegenstand der laufenden Trilog-Verhandlungen zwischen der EU-Kommission, dem Parlament und dem Rat. Der jüngste Vorschlag des EU-Ministerrats sieht verbindliche Sammelquoten von 45 Prozent ab 2024 und 70 Prozent ab

Staatliche Regulierung ist ein entscheidender Faktor für Batterierecycling.

Die EU arbeitet an einer neuen Batterieverordnung, in der Recycling ein Schwerpunktthema sein wird.

Dazu gehören auch die Vorschrift, dass Batterien vollständig aus Geräten entfernbar sein müssen, sowie die Sammel- und Recyclingquoten.

2030 für Gerätebatterien und 54 Prozent ab 2030 für LMT-Batterien vor (DUH et al. 2022).

Recyclingquoten sind ein weiterer wichtiger Bestandteil der neuen EU-Batterieverordnung. Zum einen sind Recyclingeffizienzen vorgesehen: So müssen Blei-Säure-Batterien ab Anfang 2025 zu mindestens 75 Gewichtsprozent recycelt werden, lithiumbasierte Batterien zu 65 Prozent (nach dem Vorschlag des Rates drei Jahre später). Diese Quoten sollen danach steigen, im Falle von Lithium-Batterien auf 70 Prozent ab 2026 und 90 Prozent ab 2030 nach dem Vorschlag der Kommission (70 Prozent ab 2026 und 90 Prozent ab 2030 nach dem Vorschlag des Parlaments). Hinzu kommen Quoten für die Wiedergewinnung einzelner Bestandteile: Kobalt, Kupfer, Blei und Nickel sollen nach dem Kommissionsvorschlag ab 2026 zu 90 Prozent und ab 2030 zu 95 Prozent recycelt werden (nach dem Ratsvorschlag zwei Jahre später). Bei Lithium unterscheiden sich die Vorschläge stärker: Die Kommission sieht 35 Prozent ab 2026 und 70 Prozent ab 2030 vor, der Rat die gleichen Prozentsätze ab 2028, während das Parlament 70 Prozent ab 2026 und 90 Prozent ab 2030 festlegen will (DUH et al. 2022).

„In der EU ist in der Batterierichtlinie (2006/66/EG) eine spezielle Formel für die Bestimmung der Sammelquote bei Gerätebatterien festgelegt; für Autobatterien auf Bleibasis ist keine Sammelquote vorgeschrieben.

Die Sammelquote ist definiert als: ‚Das Gewicht der im laufenden Jahr gesammelten Batterien geteilt durch den Durchschnitt der Summe der Gewichte der im laufenden Jahr und in den beiden vorangegangenen Jahren in Verkehr gebrachten Batterien‘. In diesem Zusammenhang bezieht sich der Begriff ‚in Verkehr gebrachte Batterien‘ auf die Verkaufsmengen von Batterien, die die Hersteller melden müssen.

Es ist jedoch wichtig, darauf hinzuweisen, dass diese Methode speziell für Gerätebatterien und -akkumulatoren entwickelt wurde; daher wird ein Durchschnitt der letzten drei Jahre verwendet, was dem Lebenszyklus von Gerätebatterien entspricht, der etwa drei Jahre beträgt. [...]

Tatsächlich glauben wir, dass diese ‚Sammelraten‘-Methode für Autobatterien nicht geeignet ist, sowohl wegen deren längeren Lebenserwartung als auch wegen des größeren Potenzials von Autobatterien, nationale Grenzen innerhalb der EU zu überschreiten. Die Anwendung der Sammelraten-Methode für Fahrzeugbatterien würde zu unzuverlässigen Ergebnissen führen.“ (IHS Markit et al. 2014, Übersetzung durch die Autoren)

Hintergrundfeld 2: Methodische Herausforderungen bei der Bestimmung von Batteriesammelquoten

Schließlich wird die neue Batterieverordnung auch Quoten für die Verwendung von Rohstoffen aus Recycling („Sekundärrohstoffe“) bei der Herstellung neuer Batterien festlegen. Nach Ansicht der Kommission würde dies „die Marktteilnehmer dazu ermutigen, in Recyclingtechnologien zu investieren, die andernfalls nicht entwickelt würden, weil sie gegenüber der Produktion von Primärrohstoffen nicht wettbewerbsfähig sind“ (EU 2020). Was diese Quoten betrifft, so stimmen die Vorschläge der drei EU-Institutionen in den Zahlen überein (während Uneinigkeit in Bezug auf die Batterietypen besteht, für die die Spezifikationen überhaupt gelten sollen): 85 Prozent für Blei, 12 Prozent für Kobalt, 4 Prozent für Nickel und ebenfalls 4 Prozent für Lithium ab 2030, sowie 20 Prozent für Kobalt, 12 Prozent für Nickel und 10 Prozent für Lithium ab 2035. Darin können auch Sekundärrohstoffe aus dem Recycling von Produktionsabfällen enthalten sein, was im Falle von Lithium-Ionen-Batterien eine beträchtliche Menge sein kann. Vor diesem Hintergrund fordern Nichtregierungsorganisationen, dass nur recyceltes Material aus gebrauchten Batterien berücksichtigt werden soll (DUH et al. 2022).

Die neue Batterieverordnung wird auch Quoten für die Verwendung von Rohstoffen aus Recycling („Sekundärrohstoffe“) für die Herstellung neuer Batterien festlegen.

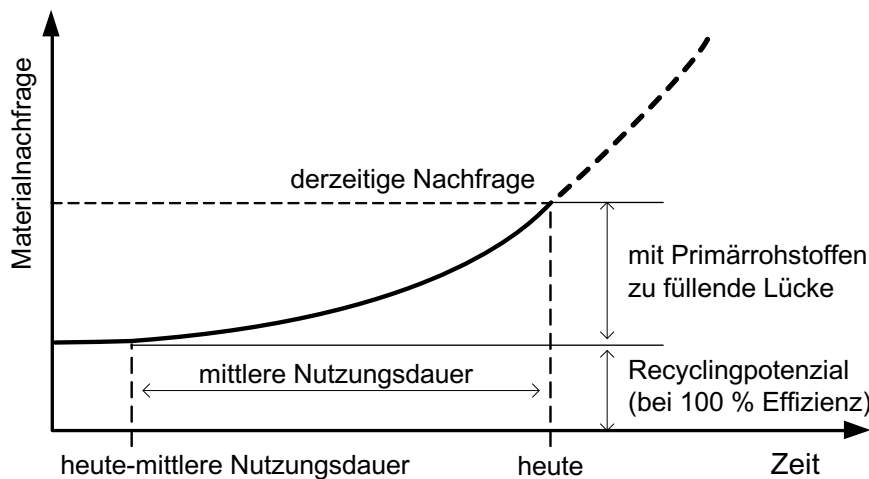


Abb. 8: Verfügbarkeit von Altmaterialströmen in neuen Märkten und potenzieller Beitrag von Sekundärmaterialien zur Gesamtversorgung. Da die Nachfrage nach Batterierohstoffen stark ansteigt, wird die derzeitige Versorgungslage durch Recyclingmaterialien aus Altbatterien nur schwach beeinflusst.
Quelle: eigene Darstellung

Das hier skizzierte Regulierungssystem wird, unabhängig von seinen Details, als wichtiger Schritt in Richtung einer nachhaltigen Batteriewirtschaft angesehen. Es ist jedoch zu hinterfragen, ob alle darin enthaltenen Maßnahmen überhaupt geeignet sind, die gewünschten Ziele zu erreichen. So lohnt es sich beispielsweise, die Quoten für die Verwendung von Rohstoffen aus Recycling genauer zu betrachten und zu fragen, welche Entwicklungen sie voraussichtlich nach sich

Es ist fraglich, ob alle enthaltenen Maßnahmen geeignet sind, die gewünschten Ziele zu erreichen. So könnten beispielsweise Quoten für die Verwendung von Rohstoffen aus Recycling als Anreiz zur Herstellung kurzlebiger Batterien fungieren.

ziehen werden. Die Maßnahme könnte in der Tat zu verstärkten Investitionen in Recyclingtechnologien führen, wie die Kommission annimmt. Sie könnte jedoch ebenso einen Anreiz bieten, kurzlebige Batterien zu produzieren. In einem Wachstumsmarkt, wie er für mindestens das nächste Jahrzehnt prognostiziert wird, bleibt das Volumen der Altbatterien weit hinter dem Volumen der neu auf den Markt kommenden Batterien zurück (siehe Abbildung 8). Da der Anteil der konventionellen Altfahrzeuge, die in andere (Entwicklungs-) Länder außerhalb der EU exportiert werden, hoch ist, ist davon auszugehen, dass auch eine gewisse Menge an Traktionsbatterien durch den Export von gebrauchten Elektrofahrzeugen verloren geht. Daher könnte die einzige Möglichkeit, die gesetzten Quoten zu erreichen, darin bestehen, auf Batterien mit einer relativ kurzen Lebensdauer zu setzen. Langlebigkeit ist jedoch ein zentraler Faktor für die Nachhaltigkeit von Batterien. Unter sonst gleichen Bedingungen reduziert sie den Bedarf an Rohstoffen und Energie über den Lebenszyklus einer Batterieanwendung und führt nicht zuletzt zu weniger Altbatterien, die recycelt oder deponiert werden müssen.

Auch die Quoten für die Recyclingeffizienz sollten kritisch reflektiert werden. Vergleicht man Lithium-Ionen-Batterien mit unterschiedlichen Zellchemien (z.B. NMC und LFP), erscheinen die Quoten durchaus unterschiedlich sinnvoll: NMC-Batterien enthalten relativ große Mengen an Inhaltsstoffen, die sowohl einen hohen Eigenwert als auch eine hohe Kritikalität aufweisen und die gleichzeitig umwelt- oder gesundheitsschädlich sind. Die Verpflichtung zum Recycling eines hohen Gewichtsanteils von NMC-Batterien ist vor diesem Hintergrund sinnvoll. LFP-Batterien hingegen enthalten in weit geringerem Maße wertvolle und schädliche Inhaltsstoffe. Eisen und Phosphat, die Namensgeber dieser Zellchemie, sind alltägliche Rohstoffe, die zumindest in vielen Verbindungen vergleichsweise geringe Schädlichkeit für Umwelt und Gesundheit aufweisen. Der Nutzen eines Quotensystems für die Recyclingeffizienz erscheint bei diesem Batterietyp fraglich – zumal es dazu führen könnte, dass der komparative Preisvorteil von LFP-Zellen gegenüber kobalt- oder manganhaltigen Zellchemien sinkt, während die LFP-Chemie nennenswerte Nachhaltigkeitsvorteile mit sich bringt, nämlich: Langlebigkeit, Ressourcenschonung und nicht zuletzt eine höhere Anwendungssicherheit. Schließlich kann die Langlebigkeit von LFP-Systemen auch das Recyclingsystem entlasten.

Vor diesem Hintergrund ist es eine Überlegung wert, ob durch eine Neuausrichtung der Recyclingschwerpunkte Nachhaltigkeitsgewinne erzielt werden könnten. Würde sich das Recycling von LFP-Batterien auf das enthaltene Lithium oder andere recyclingwürdige Inhaltsstoffe (z. B. Nickel und Graphit) konzentrieren und nicht auf die mengen-

Auch die Recycling-Effizienzquoten sollten kritisch reflektiert werden.

mäßig dominierenden, aber nicht besonders kritischen oder schädlichen Bestandteile, würde die Rückgewinnung der ersteren tendenziell vereinfacht werden, ohne dass dieser Vorteil durch wesentliche Nachteile konterkariert würde.

08 Vorausschauender Umgang mit Kritikalität

Kritische Rohstoffe sind Rohstoffe, die für Volkswirtschaften existenziell wichtig sind und deren Versorgungssicherheit gleichzeitig gefährdet ist. Diese Definition klingt eingängig, aber was genau bedeutet sie? Wie lässt sich feststellen, welche Rohstoffe für eine Volkswirtschaft von existenzieller Bedeutung sind und welche Faktoren ihre Versorgungssicherheit gefährden könnten?

Während sich das eingangs formulierte Grundverständnis von Kritikalität seit den 1930er Jahren kaum verändert hat, sind die Faktoren, die zur Bewertung der wirtschaftlichen Bedeutung und des Versorgungsrisikos herangezogen werden, im Laufe der Jahrzehnte deutlich vielfältiger geworden. Ursprünglich war der Grad der Importabhängigkeit der einzige Faktor, der zur Bewertung des Versorgungsrisikos herangezogen wurde. Spätestens seit den 1980er Jahren werden einige weitere Faktoren berücksichtigt: die Konzentration der Rohstoffproduktion auf Länderebene (siehe Abbildung 9 für den Fall der Lithium-Ionen-Batterien), die politische Stabilität der Erzeugerländer, das Vorhandensein alternativer (z. B. inländischer) Bezugsquellen, das Substitutionspotenzial, das Recycling- und Einsparpotenzial sowie die Existenz strategischer Lagerbestände. Auch aufseiten der wirtschaftlichen Bedeutung hat in den letzten Jahrzehnten eine deutliche Verschiebung stattgefunden: Während sich frühere Kritikalitätsdebatten auf die Verfügbarkeit von Massenrohstoffen für militärische Anwendungen konzentrierten, steht in den letzten Jahren vor allem die Bedeutung von Rohstoffen für technologische Innovationen und damit für die gesamte Volkswirtschaft im Vordergrund ([Gandenberger et al. 2012](#)).

Alle oben genannten Faktoren können sich im Laufe der Zeit ändern. Da der Zweck von Kritikalitätsbewertungen darin besteht, wirtschaftlich relevante Versorgungsengpässe zu vermeiden, ist es wichtig, diese Kritikalitätsdynamik vorherzusehen – nur dann können Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Einige Veränderungen in der Kritikalität von Rohstoffen sind allmählich und vorhersehbar, andere wiederum sind abrupt und unerwartet. Die weltweiten wirtschaftlichen Veränderungen infolge des russischen Krieges gegen die Ukraine beispielsweise waren Anfang 2022 noch nicht absehbar. Solche Ereignisse mit geringer Wahrscheinlichkeit und großen Auswirkungen, die in Foresight-Studien als „Wild Cards“ bezeichnet werden, sind bei der Bewertung der Kritikalität nur sehr schwer zu berücksichtigen. Viele Entwicklungen können jedoch mit neueren Methoden der dynamischen Kritikalitätsanalyse besser vorhergesagt werden ([Glöser-Chahoud 2017](#)).

Es gibt eine Vielzahl von Faktoren, die in die Bewertung des Versorgungsrisikos eines jeden Rohstoffs einfließen.

Alle relevanten Faktoren können sich im Laufe der Zeit ändern – teils allmählich und vorhersehbar, teils abrupt und unerwartet.

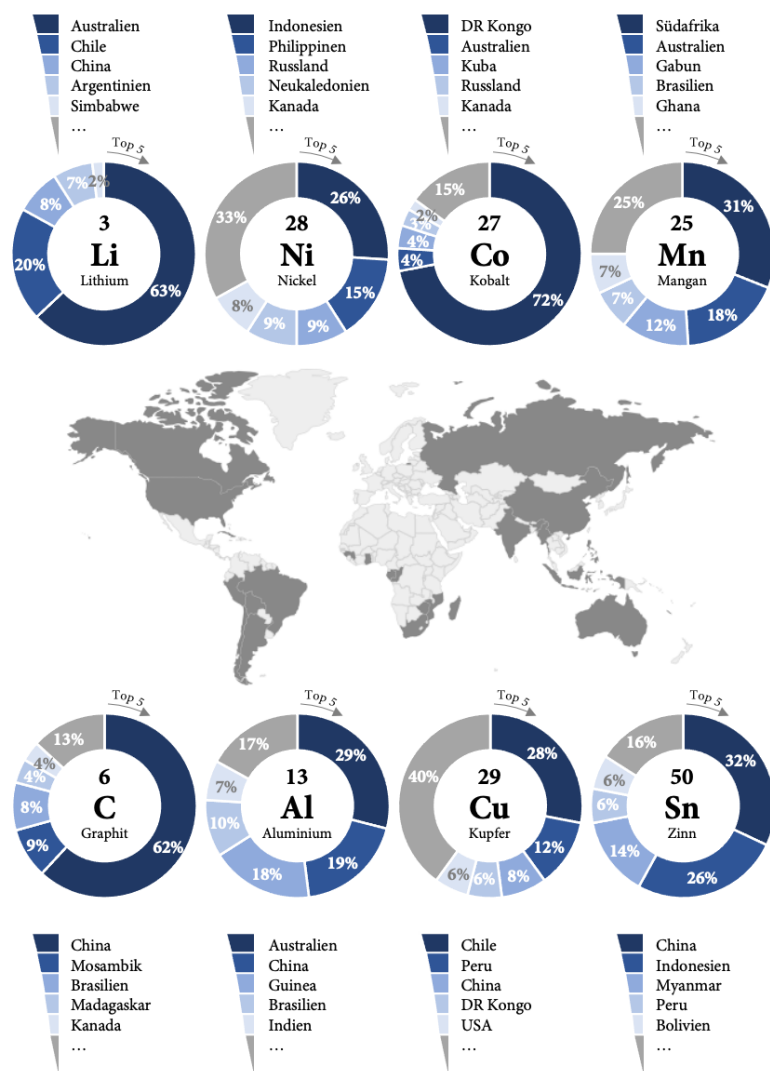


Abb. 9: Kritikalität von Batterierohstoffen. Der Markt für einige wichtige Rohstoffe wird von nur wenigen Ländern beherrscht, darunter autokratisch regierte Staaten und solche mit geringer politischer Stabilität. Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an GIZ & BGR (2021)

Dabei haben die Anpassungsfähigkeit der Nachfrage und die Entwicklung der Stoffkreisläufe einen erheblichen Einfluss. Das folgende Beispiel mag dies verdeutlichen: Der Kupfermarkt ist durch eine breite Verwendung gekennzeichnet. Insbesondere im Bausektor wird Kupfer für eine Vielzahl von Baumaterialien verwendet. Gleichzeitig gibt es eine Fülle von alternativen Materialien, die bei spontanen Preiseffekten oder Engpässen (verursacht z. B. durch Konflikte, Exportbeschränkungen oder Naturkatastrophen) verwendet werden können. Aufgrund seiner nachfrageseitigen Anpassungsfähigkeit stellt der Bausektor somit einen wichtigen Puffer zur Bewältigung von Engpässen in der Gesamtkupfernachfrage dar. Eine hohe Recyclingquote, die in Europa bereits Realität ist, trägt beim Kupfer ebenfalls zur Verringerung von Versorgungsrisiken bei. Für Technologiemetalle wie Tantal, Indium, Rhodium

und Seltene Erden gibt es dagegen keinen solchen Puffer, weshalb spontane Ereignisse zu extremen Preisspitzen bei relativ geringer Veränderung des Angebots führen können (Glöser-Chahoud 2017).

Wenn Kritikalitätsanalysen die Gefahr einer drohenden Rohstoffknappheit aufzeigen, stellt sich die Frage: Was können wir dagegen tun? Wie oben skizziert, kann Recycling hierbei eine wichtige Rolle spielen. Darüber hinaus gibt es verschiedene andere Ansätze, die dazu beitragen können, wirtschaftlichen Schaden durch Rohstoffknappheit zu vermeiden. Suffizienz ist einer dieser Ansätze. Er zielt darauf ab, den Verbrauch der betreffenden Waren oder Dienstleistungen zu verringern – denn weniger ist ausreichend, wie der Name des Ansatzes zum Ausdruck bringt. Im Zusammenhang mit der Nutzung von Batterien kann weniger tatsächlich ausreichend sein, zum Beispiel im Bereich der Elektromobilität (Dusseldorp et al. 2021). Dies zeigt, dass Suffizienz und Effizienz eng miteinander verknüpft sind; tatsächlich kann die Verwendung effizienterer Batterien auch die Suffizienz beeinflussen, indem der Verbrauch reduziert wird. Eine weitere Strategie ist die Substitution des jeweiligen Rohstoffs. So wird z. B. der Kobaltanteil in Batteriezellen mit besonders hoher spezifischer Energie seit Jahren kontinuierlich reduziert, wobei sich das Nickel-Mangan-Kobalt-Verhältnis von NMC 1:1:1 auf 6:2:2 und sodann 8:1:1 verändert hat. Diese Strategie setzt natürlich die technische Möglichkeit der Substitution voraus. Sie kann auch eine grundlegende Änderung der Zellchemie beinhalten – z. B. einen Wechsel von NMC zu LFP, der den Einsatz von Kobalt ganz vermeidet, aber mit einer niedrigeren spezifischen Energie einhergeht. Beim Nachdenken über solche Änderungen müssen daher die Auswirkungen auf die Anwendungsfälle sorgfältig reflektiert werden.

Die Diversifizierung von Rohstoffquellen ist eine weitere Strategie, um Kritikalität abzumildern. Auch hier sind die internationalen Sanktionen gegen Russland und ihre Folgen ein gutes Beispiel: Während die Abhängigkeit Deutschlands von russischem (Pipeline-) Gas außerordentlich hoch ist, sind die Benelux-Staaten aufgrund eigener Vorkommen sowie LNG-Terminals deutlich weniger abhängig. Neue Bezugsquellen sollen auch in Deutschland die Abhängigkeit von russischem Gas verringern. Inwieweit die Abhängigkeit langfristig reduziert werden kann, hängt freilich u. a. von der Stabilität der neu hinzugewonnenen Herkunftsländer ab. Schließlich gibt es die Strategie der Ausweitung der Verfügbarkeit des betreffenden Rohstoffs. Dazu gehört die Identifizierung und Erschließung neuer Lagerstätten ebenso wie die Verbesserung der Zugänglichkeit von Sekundärrohstoffen über die Abfall- und Entsorgungswirtschaft. So könnte beispielsweise Lithium auch in Deutschland in nennenswerten Mengen gewonnen werden. Projekte zu Rohstoff-

Es gibt verschiedene Ansätze für den Umgang mit Kritikalität: Neben dem Recycling gibt es Suffizienz, Substitution von Rohstoffen und Diversifizierung der Rohstoffquellen.

vorkommen und deren Erschließung im Oberrheingraben weisen auf attraktive Quellen hin und sind ein Beispiel für eine solche Ausweitung der Verfügbarkeiten. Wie bereits erwähnt, ist das Recycling ein weiterer Hebel, insbesondere für Länder, die auf Rohstoffimporte angewiesen sind und große Mengen an Abfällen aus Altprodukten haben.

Aus den verschiedenen Strategien zum Umgang mit Kritikalität wird deutlich, dass die Reduktion von Kritikalität eine gemeinsame Aufgabe von Forschung, Politik und Wirtschaft ist, dass die Verantwortung aber von jedem einzelnen Akteur in seinem jeweiligen Entscheidungsbereich übernommen werden muss.

09 Referenzen

Bates, A. M.; Preger, Y.; Torres-Castro, L.; Harrison, K. L.; Harris, S. J.; Hewson, J. (2022): Are solid-state batteries safer than lithium-ion batteries? In: Joule Volume 6, Issue 4, Pages 742-755.
Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.02.007>
[Zugriff am 26.08.2022]

Battery-News (2022): Batterieprojekte in Europa (Stand: Juli 2022).
Verfügbar unter: <https://battery-news.de/index.php/2022/07/01/batterieproduktion-in-europa-juli-2022/>
[Zugriff am 24.10.2022]

Bhutada, D. (2022): The Key Minerals in an EV Battery.
Verfügbar unter: <https://elements.visualcapitalist.com/the-key-minerals-in-an-ev-battery/>
[Zugriff am 26.08.2022]

Bothe, D.; Steinfurt, T. (2020): Cradle-to-Grave Life-Cycle Assessment in the Mobility Sector. A Meta-Analysis of LCA Studies on Alternative Powertrain Technologies.
Verfügbar unter: https://www.fvv-net.de/fileadmin/Downloads/FVV_LCA_Life-cycle_analysis_Frontier_Economics_R595_final_2020-06_EN.pdf
[Zugriff am 26.08.2022]

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2022): EU-Umweltrat beschließt neue Regeln für nachhaltigere Batterien.
Verfügbar unter: <https://www.bmuv.de/pressemitteilung/eu-umweltrat-beschliesst-neue-regeln-fuer-nachhaltigere-batterien>
[Zugriff am 26.08.2022]

Chen, M.; Ma, X.; Chen, B.; Arsenault, R.; Karlson, P.; Simon, N.; Wang, Y. (2019): Recycling End-of-Life Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries. In Joule 3 (11), pp. 2622–2646.
Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.09.014>
[Zugriff am 26.08.2022]

Crenna, E.; Gauch, M.; Widmer, R.; Wäger, P.; Hischer, R. (2021): Towards more flexibility and transparency in life cycle inventories for Lithium-ion batteries. In Resources, Conservation and Recycling 170 (1), p. 105619.
Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105619>
[Zugriff am 26.08.2022]

Deutsche Umwelthilfe (DUH) et al. (2022): EU-Batterieverordnung: Vier-Punkte-Papier.

Verfügbar unter: https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Kreislaufwirtschaft/Elektroger%C3%A4te/220913_Battery_regulation_four_Position-Paper_actualized_final.pdf

[Zugriff am 26.08.2022]

Düsenfeld (2022): Recycling.

Verfügbar unter: <https://www.duesenfeld.com/recycling.html>

[Zugriff am 26.08.2022]

Dusseldorp, M.; Heinz, S.; Lange, Ch.; Pohl, S. (2021): Rightsizing— but the right way. Design of battery storage systems for more sustainability in the energy transition.

Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/356128994_Rightsizing_-_but_the_right_way_Design_of_battery_storage_systems_for_more_sustainability_in_the_energy_transition

[Zugriff am 26.08.2022]

Elwert, T.; Goldmann, D.; Römer, F.; Buchert, M.; Merz, C.; Schueler, D.; Sutter, J. (2016): Current Developments and Challenges in the Recycling of Key Components of (Hybrid) Electric Vehicles. In Recycling 1 (1), pp. 25–60.

Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3390/recycling1010025>

[Zugriff am 26.08.2022]

Erdmann, M. (2021): Seltene Erden – Informationen zur Nachhaltigkeit.

Verfügbar unter: https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/seltene_erden.pdf?__blob=publicationFile&v=3

[Zugriff am 26.08.2022]

Eurostat (2021): Waste statistics – recycling of batteries and accumulators.

Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics_-_recycling_of_batteries_and_accumulators#Sales_and_collection_of_portable_batteries_and_accumulators

[Zugriff am 26.08.2022]

European Union (EU) (2006): Directive 2006/66/EC of the European Parliament and of the Council of 6 September 2006 on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators.

Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32006L0066>

[Zugriff am 26.08.2022]

European Union (EU) (2020): Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020.

Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020PC0798>

[Zugriff am 26.08.2022]

European Parliament (EP) (2022): New EU regulatory framework for batteries – Setting sustainability requirements.

Verfügbar unter: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689337/EPRS_BRI\(2021\)689337_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689337/EPRS_BRI(2021)689337_EN.pdf)

[Zugriff am 26.08.2022]

Figgenger, J.; Hecht, Ch.; Haberschusz, D.; Bors, J.; Spreuer, K. G.; Kairies, K.-Ph.; Stenzel, P.; Sauer, D. U. (2022): The development of battery storage systems in Germany – A market review (status 2022).

Verfügbar unter: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2203/2203.06762.pdf>

[Zugriff am 26.08.2022]

Fischhaber, S.; Regett, A.; Schuster, S. F.; Hesse, H. (2016): Studie: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen – Analyse von Nachnutzungsanwendungen, ökonomischen und ökologischen Potenzialen.

Verfügbar unter: <https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2016/06/StudieSecondLifeKonzepte1.pdf>

[Zugriff am 26.08.2022]

Gandenberger, C.; Glöser, S.; Marscheider-Weidemann, F.; Ostertag, Katrin; Walz, Rainer (2012): Die Versorgung der deutschen Wirtschaft mit Roh- und Werkstoffen für Hochtechnologien – Präzisierung und Weiterentwicklung der deutschen Rohstoffstrategie.

TAB-Arbeitsbericht Nr. 150.

Verfügbar unter: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000085570/122449037>

[Zugriff am 26.08.2022]

GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit) & BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) (Eds.) (2021): Rohstoffe für die E-Mobilität – Entwicklungspolitische Perspektiven.

Verfügbar unter: <https://www.bmz.de/resource/blob/86342/2d2f486cf6f69568d44b500f4bf10630/rohstoffe-fuer-e-mobilitaet-data.pdf>

[Zugriff am 26.08.2022]

Glöser-Chahoud, S. (2017): Quantitative Analyse der Kritikalität mineralischer und metallischer Rohstoffe unter Verwendung eines systemdynamischen Modell-Ansatzes.

Verfügbar unter: https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/servlets/MCRFileNodeServlet/clausthal_derivate_00000303/Db113324.pdf
[Zugriff am 06.07.2022]

Glöser-Chahoud, S.; Huster, S.; Rosenberg, S.; Baazouzi, S.; Kiemel, S.; Singh, S. et al. (2021): Industrial disassembling as a key enabler of circular economy solutions for obsolete electric vehicle battery systems. In *Resources, Conservation and Recycling* 174, p. 105735. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105735>
[Zugriff am 26.08.2022]

Harder, J. (2020): Batterierecycling – Hohe Wachstumsraten durch Elektromobilität.

Verfügbar unter: https://www.recovery-worldwide.com/de/artikel/hohe-wachstumsraten-durch-elektromobilitaet_3580402.html
[Zugriff am 26.08.2022]

Harper, G.; Sommerville, R.; Kendrick, E.; Driscoll, L.; Slater, P.; Stolkin, R. et al. (2019): Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. In *Nature* 575 (7781), pp. 75–86.

Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>
[Zugriff am 26.08.2022]

Heimes, H. H.; Kampker, A.; Offermanns, Ch.; Kreisköther, K.; Kwade, A.; Doose, S.; Ahuis, M.; Michalowski, P.; Michaelis, S.; Rahimzei, E.; Brückner, S.; Rottnick, K. (2021): Recycling of Lithium-Ion Batteries.

Verfügbar unter: https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaablhmcye
[Zugriff am 26.08.2022]

Heimes, H. (Ed.) (2022): Battery Atlas 2022 – Shaping the European Lithium-ion Battery Industry.

Verfügbar unter: https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaabpjuwfj
[Zugriff am 26.08.2022]

- Helms, H.; Kämpker, C.; Biemann, K.; Lambrecht, U.; Jöhrens, J.; Meyer, K. (2019):** Klimabilanz von Elektroautos Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial. 2. Auflage. Edited by Agora Verkehrswende. Berlin.
Verfügbar unter: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf
[Zugriff am 26.08.2022]
- IHS Markit et al. (2014):** The Availability of Automotive Lead-Based Batteries for Recycling in the EU.
Verfügbar unter: https://www.eurobat.org/wp-content/uploads/2021/09/ihs_eurobat_report_lead_lores_final_2.pdf
[Zugriff am 26.08.2022]
- International Energy Agency (IEA) (2021a):** Global EV Data Explorer.
Verfügbar unter: <https://www.iea.org/articles/global-ev-data-explorer>
[Zugriff am 26.08.2022]
- International Energy Agency (IEA) (2021b):** How rapidly will the global electricity storage market grow by 2026?
Verfügbar unter: <https://www.iea.org/articles/how-rapidly-will-the-global-electricity-storage-market-grow-by-2026>
[Zugriff am 26.08.2022]
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022):** Sixth Assessment Report.
Verfügbar unter: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>
[Zugriff am 26.08.2022]
- Jehle, Ch. (2021):** E-Mobile und das leidige Akku-Recycling.
Verfügbar unter: <https://www.heise.de/tp/features/E-Mobile-und-das-leidige-Akku-Recycling-6034161.html>
[Zugriff am 26.08.2022]
- Köllner, Ch. (2019):** Ist Second Life besser als direktes Akku-Recycling?
Verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/batterie/recycling/ist-second-life-besser-als-direktes-akku-recycling-/16512034>
[Zugriff am 26.08.2022]
- Kurz, L.; Faryadras, M.; Klugius, I.; Reichert, F.; Scheibe, A.; Schmidt, M.; Wörner, R. (2021):** Global Warming Potential of a New Water-jet-Based Recycling Process for Cathode Materials of Lithium-Ion Batteries. In Batteries 7 (2), p. 29.
Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3390/batteries7020029>
[Zugriff am 26.08.2022]

- Mähliß, J. (2020):** Trends im Lithium-Ionen-Batterie-Markt.
Verfügbar unter: <https://www.vde.com/resource/blob/1954528/be19b6edcad2be323ce8cc6485151cd8/download---praesentation-maehliss-data.pdf>
[Zugriff am 26.08.2022]
- Moore, S. (2021):** The Global Battery Arms Race: Lithium-ion Battery Gigafactories and Their Supply Chain.
Verfügbar unter: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2021/02/THE-GLOBAL-BATTERY-ARMS-RACE-LITHIUM-ION-BATTERY-GIGAFACTORIES-AND-THEIR-SUPPLY-CHAIN.pdf>
[Zugriff am 26.08.2022]
- Neumann, J.; Petranikova, M.; Meeus, M.; et al. (2022):** Recycling of Lithium-Ion Batteries – Current State of the Art, Circular Economy, and Next Generation Recycling. In: *Advanced Energy Materials* 12 (17).
Verfügbar unter: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/aenm.202102917>
[Zugriff am 26.08.2022]
- Sattar, A.; Greenwood, D.; Dowson, M.; Unadkat, P. (2020):** Automotive Lithium ion Battery Recycling in the UK. Edited by University of Warwick.
Verfügbar unter: https://warwick.ac.uk/fac/sci/wmg/business/transportelec/22350m_wmg_battery_recycling_report_v7.pdf
[Zugriff am 26.08.2022]
- STABL (2021):** 5 Gründe, weshalb Second-Life-Speicher (noch) nicht serienreif sind.
Verfügbar unter: <https://stabl.com/blog/5-gruende-weshalb-second-life-speicher-noch-nicht-serienreif-sind/>
[Zugriff am 26.08.2022]
- Umweltbundesamt (UBA) (2021):** Altbatterien.
Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/resourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altbatterien#im-jahr-2020-hat-deutschland-alle-von-der-eu-geforderten-mindestziele-erreicht>
[Zugriff am 26.08.2022]
- Velázquez-Martínez, O.; Valio, J.; Santasalo-Aarnio, A.; Reuter, M.; Serna-Guerrero, R. (2019):** A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective.
In *Batteries* 5 (4), p. 68.
Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3390/batteries5040068>
[Zugriff am 26.08.2022]

Wahlström, M.; Pohjalainen, E.; Teittinen, T.; Van der Linden, A.;

Christis, M.; Manshoven, S. (2019): ETC Report: Are we losing resources when managing Europe's waste?

Verfügbar unter: https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/etc-wmge-reports/are-we-losing-resources-when-managing-europes-waste-1/@@download/file/EEA%20task%201.9.1.4_Loss%20of%20resources_FINAL%2018.10.2019.pdf
[Zugriff am 26.08.2022]

Weil, M.; Ziemann, S.; Peters, J. F. (2018): The issue of metal resources in li-ion batteries for electric vehicles. In: Pistoia, G. & Liaw, B. (Eds.): Behaviour of lithium-ion batteries in electric vehicles.

Cham, Switzerland: Springer International Publishing, pp. 59–74

Xu, C.; Dai, Q.; Gaines, L.; Hu, M.; Tukker, A.; Steubing, B. (2020):

Future material demand for automotive lithium-based batteries. In Commun Mater 1 (1).

Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1038/s43246-020-00095-x>
[Zugriff am 26.08.2022]

10 Autorenprofile

Dr. phil. Marc Dusseldorp, Dipl.-Geoökol., ist seit Januar 2020 als Senior Research Scientist bei der High Performance Battery Technology GmbH tätig. Dort beschäftigt er sich vor allem mit Fragen der Nachhaltigkeit von Batteriespeichern für die Energiewende. Zuvor war er seit 2004 am Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des KIT und am Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag tätig, unter anderem als Koordinator einer internationalen Graduiertenschule zu Energiezukünften. Seit 2005 ist er Lehrbeauftragter am KIT. Neben seiner Anstellung arbeitet Marc Dusseldorp als freiberuflicher Wissenschaftler. Seine Arbeitsschwerpunkte liegen in der Methodik von Nachhaltigkeitsbewertungen, wie in seiner Dissertation zum Thema „Sustainability Goal Conflicts“, sowie in der Nachhaltigkeitstransformation.

Dr. phil. Athan Fox, promovierter Chemiker, ist CEO und Mitbegründer der Silicon-Fen-Tech-Unternehmen Ever Resource und 17Cicada. Bei Ever Resource ist er hauptsächlich mit der Entwicklung, Skalierung und Kommerzialisierung von Kreislaufwirtschaftsinnovationen befasst – mit besonderem Schwerpunkt auf dem Batterierecycling. Im Mai 2022 wurde Ever Resource von Cambridge Independent mit dem Preis „Cleantech Company of the Year“ ausgezeichnet. Dr. Fox ist auch Vorstandsmitglied von ALGOLiON, einem israelischen Unternehmen, das Lösungen entwickelt, um Defekte in Lithium-Ionen-Batterien im Vorfeld von Bränden oder Explosionen zu erkennen. Zuvor war er im Technologietransfer in Cambridge, UK, tätig und hat mit börsennotierten Unternehmen zusammengearbeitet, um Innovationen im Bereich der Kreislaufwirtschaft auf den britischen und europäischen Markt zu bringen. Seinen Dokortitel erwarb er an der Universität Cambridge (UK), wo er auf dem Gebiet der organischen und Polymerchemie forschte.

Dr.-Ing. Simon Glöser-Chahoud ist gelernter Wirtschaftsingenieur und hat einen Diplomabschluss der TU Berlin. Er promovierte an der TU München und der TU Clausthal auf dem Gebiet des Ressourcenmanagements. Bevor er zum Institut für Industrielle Produktion (IIP) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) kam, war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI) tätig. Neben seiner Tätigkeit als Forschungsgruppenleiter im Bereich nachhaltige Wertschöpfungsketten ist er derzeit stellvertretender Direktor des Deutsch-Französischen Instituts für Umweltforschung am KIT. Simon Glöser-Chahoud wurde auf den Lehrstuhl für Betriebliches Nachhaltigkeits- und Umweltmanagement an der TU Bergakademie Freiberg berufen, wo er im September 2022 seine Professur antritt.

Dr. rer. pol. Sebastian Heinz, MSc Humangeographie, ist seit Juni 2018 Chief Sales Officer der High Performance Battery Holding AG. Zuvor war er bei der Telekom Deutschland im Geschäftskundenvertrieb für das Internet der Dinge (IoT) verantwortlich. Mit seiner Dissertation zur Marktentwicklung in einem kooperativen Modell entwickelte er eine alternative Strategie für die freiwillige Einführung von Smart-Metering-Systemen in Deutschland. Die darin entwickelten Ansätze sind auch für den Einsatz von Batteriespeichern geeignet und erschließen damit das Potenzial von Plattformmodellen für die Energiewirtschaft. Im Jahr 2018 gründete er zudem das Institut für Innovations- und Kooperationsmanagement (Incoom), das sich auf die Entwicklung von in jeder Hinsicht nachhaltigen Geschäftsmodellen spezialisiert hat.

High Performance Battery Technology GmbH (Herausgeber)
Schumannstr. 61
D-53113 Bonn (Germany)
impulse@highperformancebattery.de

Ever Resource Ltd. (Mitherausgeber)
St John's Innovation Centre
Cowley Road
Cambridge CB4 0WS (UK)
enquiries@ever-resource.com

Twinprint Verlag (Verlag)
Königswinter, 2022
ISBN: 978-3-96856-054-0

