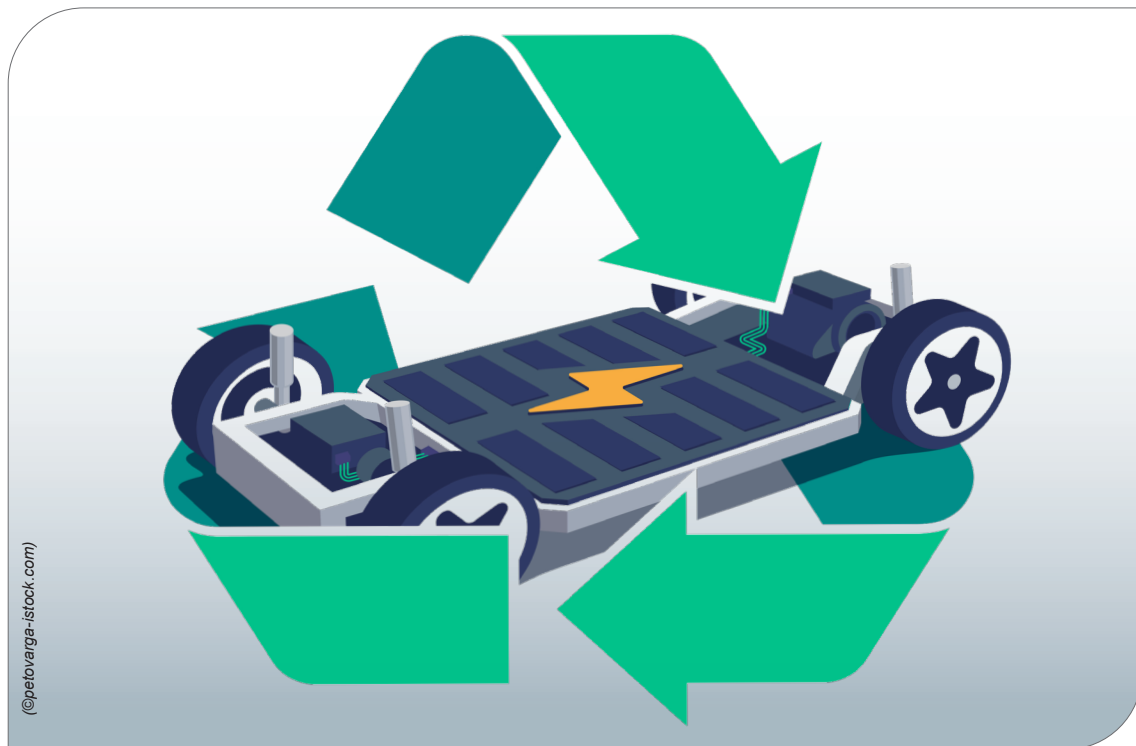


LITHIUM-IONEN-BATTERIERECYCLING IN DEUTSCHLAND UND EUROPA

*Carolin Kresse, Dennis Bastian, Britta Bookhagen, *Max Frenzel*



Elektroauto-Chassis mit Batteriezellpack

EINLEITUNG

Die EU plant mit dem Green Deal bis zum Jahr 2050 klimaneutral zu sein (EU 2019). In einem ersten Schritt sollen die Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 55 % gegenüber dem Stand von 1990 sinken. Der für diese Dekarbonisierung nötige Strukturwandel wird alle Sektoren beeinflussen, allen voran die Energieversorgung und den Verkehr. Der Straßenverkehr verursacht rund ein Fünftel aller Treibhausgasemissionen der EU (DESTATIS 2022). Um das Emissionsziel zu erreichen, plant die EU-Kommission ab 2035 ein Verkaufsverbot von Neuwagen mit Verbrennungsmotor.

Die Elektrifizierung der Mobilität, also der Ersatz von Technologien und Systemen, die mit fossilen Energieträgern betrieben werden, durch alternative Antriebsformen wie zum Beispiel batterieelektrische Fahrzeuge, steht als emissionsarme Option stark im Fokus der EU. Lithium-Ionen-Batterien (LIB) sind derzeit der wichtigste kommerziell erhältliche Batterietyp für Anwendungen wie Verbraucherelektronik, Elektromobilität und Energiespeichersysteme in Kombination mit Photovoltaik- oder Windanlagen. LIB haben viele Vorteile gegenüber beispielsweise Blei-Akkumulatoren (Akkus): Sie besitzen eine hohe Energiedichte, können schnell geladen werden, haben eine konstante Leistungsfähigkeit

(einen geringen sog. Memory-Effekt) und einen hohen Wirkungsgrad (Batterie-Forum Deutschland 2022). Die Umsetzung des Green Deals der EU wird die LIB-Produktion insbesondere für die Elektromobilität steigen lassen (EU 2019). Da die meisten Batterierohstoffe wie Lithium (Li), Kobalt (Co), Nickel (Ni), Graphit und Mangan (Mn) aus primären Ressourcen stammen, deren Gewinnung einen erheblichen CO₂-Fußabdruck hinterlässt, rücken das Recycling der LIB und die dadurch gewinnbaren Sekundärrohstoffe beziehungsweise Recyclingrohstoffe immer weiter in den Fokus.

MARKTENTWICKLUNG VON LITHIUM-IONEN-BATTERIEN

Seit der Kommerzialisierung der ersten LIB für mobile Elektrogeräte im Jahr 1991 ist eine kontinuierliche Weiterentwicklung und Ausweitung auf verschiedenste Anwendungsgebiete wie Elektrowerkzeuge, Elektroautos und Energiespeichersysteme zu beobachten (Tab. 1, Abb. 1).

Marktanteil von 56 %; zwei der zehn meistverkauften Autos in den Niederlanden waren batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) (VDA 2021). Das Vereinigte Königreich und einige andere Länder meldeten für das Jahr ein dreistelliges prozentuales Wachstum. Haupttreiber dieser Entwicklung waren politische Vorgaben, massive Subventionen, Steuererleichterungen für BEV sowie ein gewisser Wandel in der Einstellung der Verbraucher, der vor allem durch die wachsende Besorgnis über den Klimawandel ausgelöst wurde.

Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels haben bei vielen europäischen Regierungen hohe Priorität. Viele Länder änderten bereits ihre Zielvorgaben, ab welchem Zeitpunkt keine neuen PKWs mit Verbrennungsmotor zugelassen werden dürfen. Das Vereinigte Königreich verpflichtet sich ab dem Jahr 2050 CO₂-neutral zu werden und schlägt ein Verkaufsverbot für alle Verbrennerfahrzeuge ab 2030 vor. Norwegen plant dieses Ziel schon im Jahr 2025 umzusetzen. Im Jahr 2020 beliefen sich die deutschen Emissionen aus dem Verkehrssektor laut Klimabilanz des Umweltbundesamtes auf 146 Mio. Tonnen CO₂. Deutschland zielt darauf ab, die Emissio-

Tabelle 1: *Hauptanwendungsbereiche für LIB und jährliche Wachstumsraten zwischen 2006 und 2021 (AVICENNE ENERGY 2021).*

Anwendung	Wachstumsrate in % (2006 – 2021)
Verbraucherelektronik	8,2
Elektrowerkzeuge	23,4
Elektroautos	88,0 (seit 2010)
Stationäre Energiespeichersysteme (ESS)	75,3 (seit 2008)
E-Busse (China)	82,7 (seit 2012)

Aufgrund des prognostizierten globalen Hochlaufs der Elektromobilität werden LIB in diesem Markt auch in Zukunft ihre Hauptanwendung finden (Abb. 1). Der europäische Elektromobilitätssektor verzeichnete im Jahr 2019 deutlich mehr Wachstum als andere Regionen (EV VOLUMES 2022). Die nordeuropäischen Länder und die Niederlande waren dabei führend; Norwegen erreichte einen

nen des Verkehrssektors bis zum Jahr 2030 auf höchstens 85 Mio. Tonnen CO₂ zu reduzieren. Die Bundesregierung plant sieben bis zehn Millionen Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen in Deutschland bis zum Jahr 2030 (BUNDESREGIERUNG 2022). Trotz des Wachstums im Jahr 2019 wurde die allgemeine Einführung von Elektrofahrzeugen bisher durch die begrenzte Anzahl der

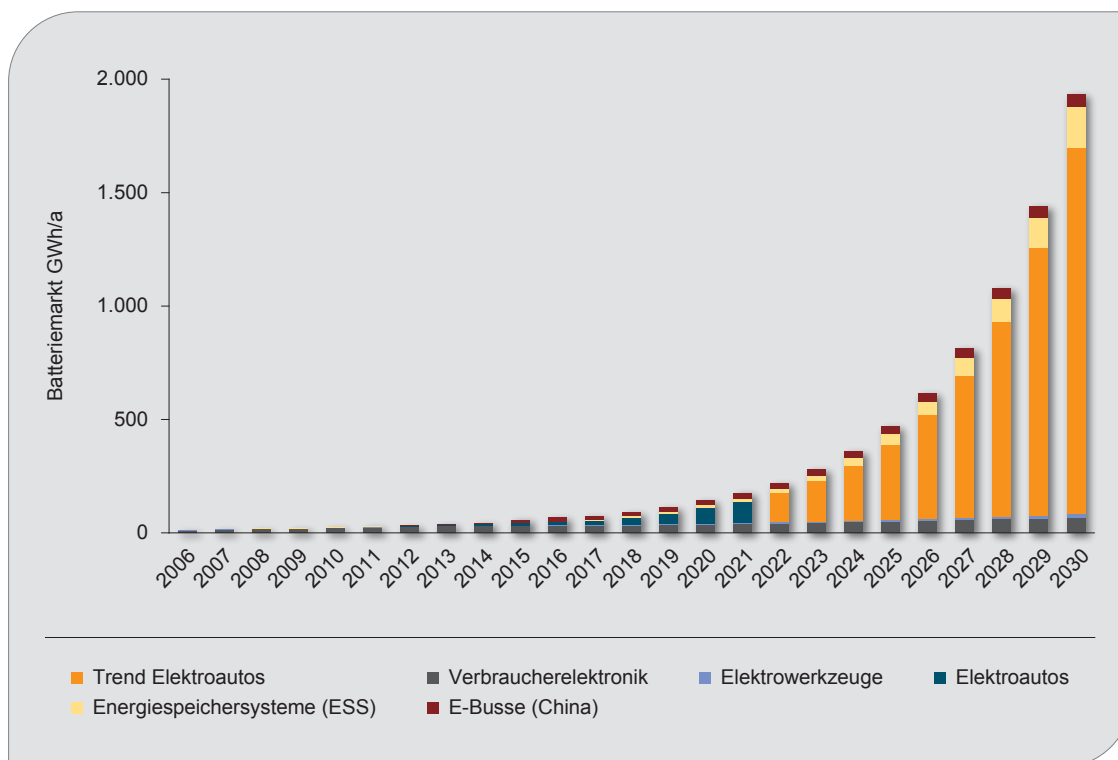


Abb. 1: Globaler Trend des Lithium-Ionen-Batteriemarkts nach Anwendung (Quelle: AVICENNE ENERGY 2021). Der zukünftige Trend von Elektroautos bis 2030 ist in orange hervorgehoben.

auf dem europäischen Markt verfügbaren Modelle und die Wahrnehmung der Verbraucher hinsichtlich einer unzureichenden Ladeinfrastruktur in einigen Regionen behindert. Dennoch wird das weiterhin starke Wachstum der weltweiten Elektrofahrzeugflotte unweigerlich zu einer erhöhten Nachfrage nach Batterierohstoffen führen und damit die Frage der Rezyklierbarkeit der Batterien an Bedeutung gewinnen.

TYPEN VON LITHIUM-IONEN-BATTERIEN

Lithium-Ionen-Batterien haben sich bei vielen Herstellern von Elektrofahrzeugen als bevorzugtes Batteriesystem durchgesetzt. Unter dem Begriff Lithium-Ionen-Batterien werden verschiedene LIB-Typen subsumiert, die sich vor allem durch die chemische Zusammensetzung der Kathode unterscheiden (KLIB 2022). Hauptbestandteile der LIB sind je nach Kathodentyp Lithium, Kobalt, Nickel, Aluminium, Eisen,

Mangan und Phosphat (Abb. 2). Für die Anode wird hauptsächlich Graphit verwendet. Die für Elektrofahrzeuge wichtigsten LIB-Typen sind der Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid-Typ (NMC) und der Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid-Typ (NCA). Aufgrund technologischer Weiterentwicklungen haben sich die relativen Anteile von Nickel, Mangan und Kobalt innerhalb der NMC- und NCA-Typen über die Zeit verändert. Während die NMC-Typen der ersten Generation (NMC 111) gleiche Anteile an Nickel, Mangan und Kobalt besaßen, verschob sich dieses Verhältnis im Laufe der Zeit auf je ein Teil Kobalt und Mangan und acht Teile Nickel (NMC 811). Ein zunehmend wichtiger Typ vor allem für preisgünstige batterieelektrische Fahrzeuge sind Lithium-Eisen-Phosphat Zellen (LFP).

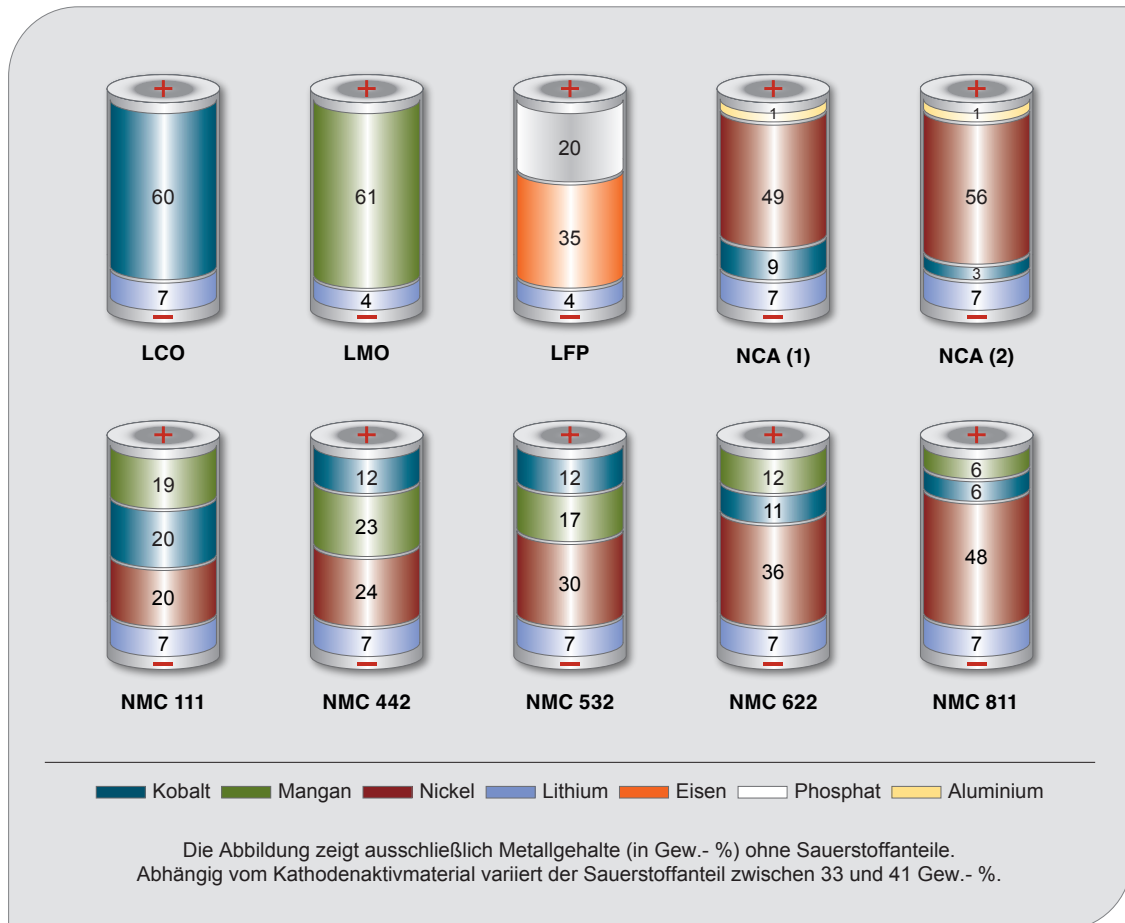


Abb. 2: Lithium-Ionen-Batterietypen und die Zusammensetzungen ihres Kathodenaktivmaterials (DERA Berechnungen).

BATTERIERECYCLING

Potenziell könnte durch eine Steigerung des Recyclinganteils der verwendeten Batterierohstoffe die CO₂-Bilanz verbessert werden. Das Recycling von LIB ist eine anspruchsvolle Aufgabe, da es sich um einen technisch komplexen Prozess handelt, der insbesondere aufgrund der Explosions- und Brandgefahr mit Sicherheitsfragen verbunden ist. Die Nutzung, Entsorgung und das Recycling von LIB fallen unter die europäische Batterierichtlinie.

Rechtsrahmen, Strategien und Fördermaßnahmen

Die europäische Batterierichtlinie aus dem Jahr 2006 stellte sich den Herausforderungen ihrer Zeit und kontrollierte eine Reihe von gefährli-

chen Stoffen wie Blei, Kadmium und Quecksilber in Geräte- und Industriebatterien (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2022). Die Richtlinie wurde jedoch in einer Zeit entwickelt, in der die Lieferketten noch eine andere Rolle spielten und das exponentielle Wachstum der großformatigen LIB in Elektrofahrzeugen noch nicht absehbar war. Der Vorschlag der neuen Batterieverordnung reagiert auf die Herausforderungen der heutigen Zeit. So sind in der neuen Verordnung Kennzeichnungs- und Informationsvorschriften festgelegt, Anforderungen an die Sorgfaltspflicht in der Lieferkette aufgestellt und metall-spezifische Recyclingraten sowie die Verwendung von recycelten Materialien (Rezyklaten) für Batterien über zwei kWh werden vorgeschrieben, von denen die meisten in Elektrofahrzeugen verwendet werden. Außerdem werden erstmalig Angaben zum CO₂-Footprint der Batterieproduktion festgelegt. Diese EU-Ziele, die mit der neuen Batterieverordnung

formuliert werden, betreffen den Recyclinganteil und die Rückgewinnungsraten für bestimmte Metalle wie Kobalt, Nickel und Lithium. Die neue Verordnung, die im Jahr 2019 vorgeschlagen wurde, tritt möglicherweise 2023 in Kraft (Abb. 3).

Im Jahr 2017 wurde die European Battery Alliance gegründet, um eine vollständige, weltweit wettbewerbsfähige und nachhaltige Wertschöpfungs-

aber mit steigenden CO₂-Preisen an Bedeutung zunehmen. Jedoch ist bisher unklar, welches Preisniveau für einen signifikanten Anreizeffekt für das Recycling erforderlich ist, welche Recyclingprozesse einen Wettbewerbsvorteil haben und wie der CO₂-Preis die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen LIB-Recyclingindustrie beeinflussen wird. Die Europäische Kommission zieht in Betracht, den „Batterie“-Ansatz auch für Alt-

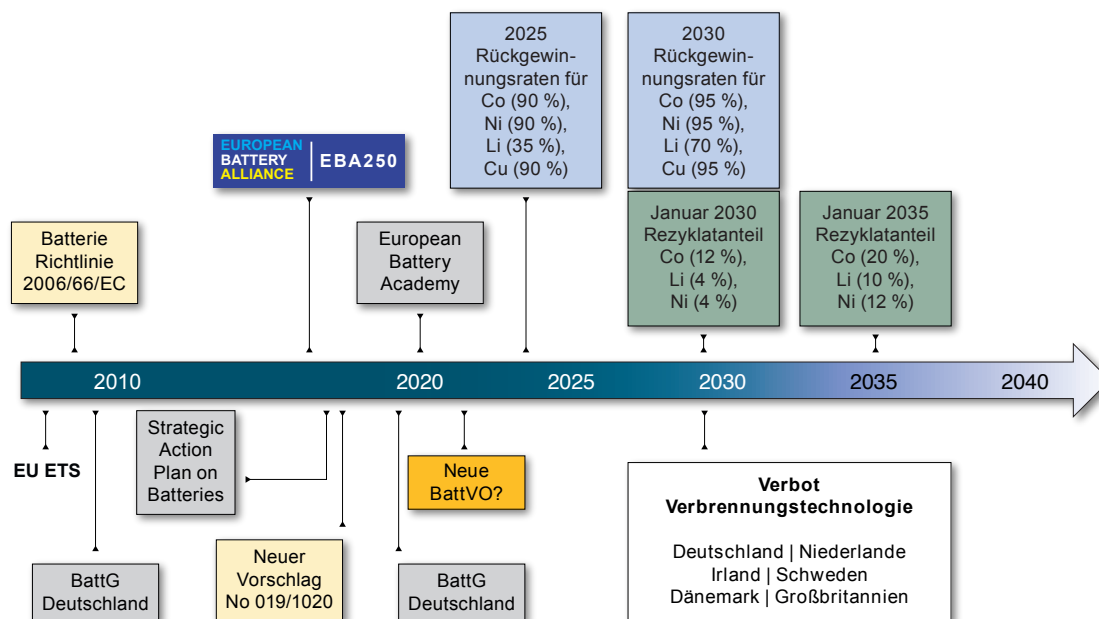


Abb. 3: Entwicklung der rechtlichen Rahmenbedingungen seit der Einführung der europäischen Batterierichtlinie im Jahr 2006. EU ETS: European Union Emissions Trading System.

fungskette für Batterien in der EU zu schaffen. Die Kommission, die Mitgliedstaaten, die Europäische Investitionsbank und Akteure aus Industrie und Forschung erarbeiten gemeinsam Ziele und Maßnahmen und wirken als Katalysator für die schnelle Entwicklung des Batterieökosystems. Des Weiteren hat die European Battery Alliance erst im Februar 2022 die European Battery Academy ins Leben gerufen mit dem Ziel, Kompetenzen für das schnell wachsende Batterie-Ökosystem in Europa zu fördern.

Ein weiterer Rechtsrahmen, der das Recycling von LIB zukünftig beeinflussen könnte, ist das Emissionshandelssystem der Europäischen Union. Derzeit ist der Einfluss noch gering, könnte

fahrzeuge sowie Elektro- und Elektronikaltgeräte anzuwenden, wo ein hoher Anteil an Verwertungsgesellschaften besteht.

Das Batteriegesetz setzt die europäische Batterierichtlinie in deutsches Recht um und regelt das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren. Das Gesetz wurde im Jahr 2021 umfassend novelliert (BattG2). Im Zuge der neuen EU-Batterieverordnung werden weitere Änderungen voraussichtlich ab dem Jahr 2022 erwartet.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert in Deutschland seit 2014 verschiedene Projekte zum Thema Batterierecy-

cling. Aktuelle Forschungsaktivitäten fokussieren die Aufbereitung der Rohstoffe sowie die Digitalisierung von Recyclingprozessen (BMBF 2021). Im Kompetenzcluster Recycling & Grüne Batterie beschäftigen sich insgesamt 16 Projekte an 34 Instituten deutscher Universitäten und Forschungseinrichtungen an der Erforschung des Batterierecyclings.

Recyclinganlagen in Europa

Trotz des rasanten Verbrauchswachstums und der zunehmenden Verbreitung batterieelektrischer Fahrzeuge sind dem Recycling enge Grenzen gesetzt, da die Menge des rückführbaren Materials nicht vom Volumen der aktuellen jährlichen Batterieproduktion abhängig ist, sondern von den vergangenen Produktionsjahren, den Produkttypen und der Produktlebensdauer.

Die allgemeine Prozessroute für das Recycling von LIB umfasst folgende Schritte:

- *Erfassung/Sammlung der End-of-Life Batterien*
- *Vorbereitung: Sortierung, Demontage, Entladung*
- *Thermische oder mechanische Vorbehandlung oder Kombination*
- *Hauptprozesse: Pyrometallurgie und/oder Hydrometallurgie zur Erzeugung von marktfähigen Feinmetallen oder Metallsalzen*

Der europäische Markt für das LIB-Recycling befindet sich in einer frühen Phase mit großem Wachstumspotenzial. Industriell etablierte Recyclinganlagen in Europa und Deutschland mit einer Kapazität von > 2.000 Tonnen Batterien pro Jahr umfassen z. B. Umicore, Accurec, Nickelhütte Aue, AkkuSer und Duesenfeld. Zu den Pilotanlagen mit einer jährlichen Recyclingkapazität von < 2.000 Tonnen zählen unter anderem TEM, SNAM, Volkswagen und Primobius. Lithium-Ionen-Batterien stellen ein schwieriges Einsatzmaterial für Recyclinganlagen dar, insbesondere im Hinblick auf Korrosion, Schlackeneigenschaften,

Energie- und Massenbilanz. Die Rückgewinnung von Lithium steht aktuell noch vor Herausforderungen, da Lithium unter Umständen die feuerfesten Materialien in konventionellen Kobalt, Kupfer- und Nickel-Schmelzöfen stark angreifen kann. Während der Verarbeitung der LIB wird Lithium z.B. in die Schlacke überführt und kann hydrometallurgisch zurückgewonnen werden. Der Lithiumgehalt der Schlacken ist vergleichbar mit dem Lithiumgehalt von Spodumenkonzentraten. Nach den in dem Patent veröffentlichten Informationen des Forschungsprojektes LiBRri wäre eine Gesamtlithiumausbeute von etwa 90 % aus der Schlacke erreichbar, was mit der Lithiumausbeute aus Spodumenkonzentraten vergleichbar ist (BRÜCKNER et al. 2020).

Im Folgenden werden die Prozesse von Umicore, Accurec und Duesenfeld beschrieben.

Umicore

Die industrielle Pilot-Recyclinganlage im belgischen Hoboken wird bereits seit 2011 betrieben und besitzt eine zulässige jährliche Gesamtkapazität von 7.000 Tonnen LIB. Der Umicore-Prozess kombiniert pyro- und hydrometallurgische Schritte ohne eine mechanische Vorbehandlung. Allein große Industriebatterien müssen bis auf ihr Modul- oder Zellelevel demontiert werden. Die pyrometallurgisch erzeugte Metalllegierung wird zur Rückgewinnung von Kobalt, Nickel und Kupfer hydrometallurgisch (weiter-)behandelt. Lithium kann aus der produzierten lithium- und manganhaltige Schlacke gewonnen werden. (SOJKA et al. 2020; UMICORE 2022). Das Unternehmen hat angekündigt, im Laufe des Jahres 2022 die neueste Generation seiner Recyclingtechnologie einzuführen. Kobalt, Nickel und Kupfer sollen mit einer Ausbeute von über 95 % für eine Vielzahl von Batterietypen zurückgewonnen werden. Auch die Rückgewinnung des größten Teils des Lithiums soll die Technologie ermöglichen (UMICORE 2022).

Accurec

Der Accurec-Prozess recycelt tragbare und industriell genutzte LIB, einschließlich LIB aus der

Automobilindustrie. Die Recyclinganlage in Krefeld verfügt seit 2016 über eine Gesamtkapazität von etwa 6.000 Tonnen pro Jahr. Die LIB werden je nach Anforderung sortiert, demontiert und entladen und anschließend thermisch vorbehandelt (Pyrolyse) sowie durch eine mehrstufige betriebsinterne Separationsanlage mechanisch getrennt. Daraus resultierende Produkte sind eine Stahlfraktion, eine Kupfer-Aluminium-Fraktion sowie ein kobalt- und nickelreiches Elektrodenpulver. Dieses wird pyro- und anschließend hydrometallurgisch aufbereitet für die Rückgewinnung der Kobalt-/Nickelsalze bzw. der -metalle. Accurecs zukünftiges zielgerichtetes Vorgehen schließt die Rückgewinnung von Lithium und Graphit ein (SOJKA et al. 2020).

Duesenfeld

Duesenfeld betreibt seit 2018 eine auf mechanische Separation spezialisierte Recyclinganlage in Wendeburg. Nach der Entladung und Demon-

tage der LIB – teilweise auf Zelllevel – erfolgt die mechanische Zerkleinerung in einem mehrstufigen Prozess. Endprodukte umfassen neben der Schwarzmasse auch Stahl, Aluminium, Kunststoffe und Elektrolytmaterial. Für die Rückgewinnung von Lithium, Nickel, Kobalt, Mangan und Graphit wird die Schwarzmasse momentan noch im Labormaßstab hydrometallurgisch behandelt (SOJKA et al. 2020; DUESENFELD 2022).

Recyclingkapazitäten Europa

Europaweit liegen zahlreiche Ankündigungen von Projekten zum Batterierecycling vor. Hier sind vor allem die Anlagen der SMS Group zu nennen, zu denen die Anlage von Primobius gehört, die ein effektives Recycling von LIB verspricht. Die Unternehmen Solvay und Veolia forcieren ihre Batterierecycling-Partnerschaft und haben die Errichtung einer Demonstrationsanlage für das Recycling von Batteriematerialien in Frankreich angekündigt.

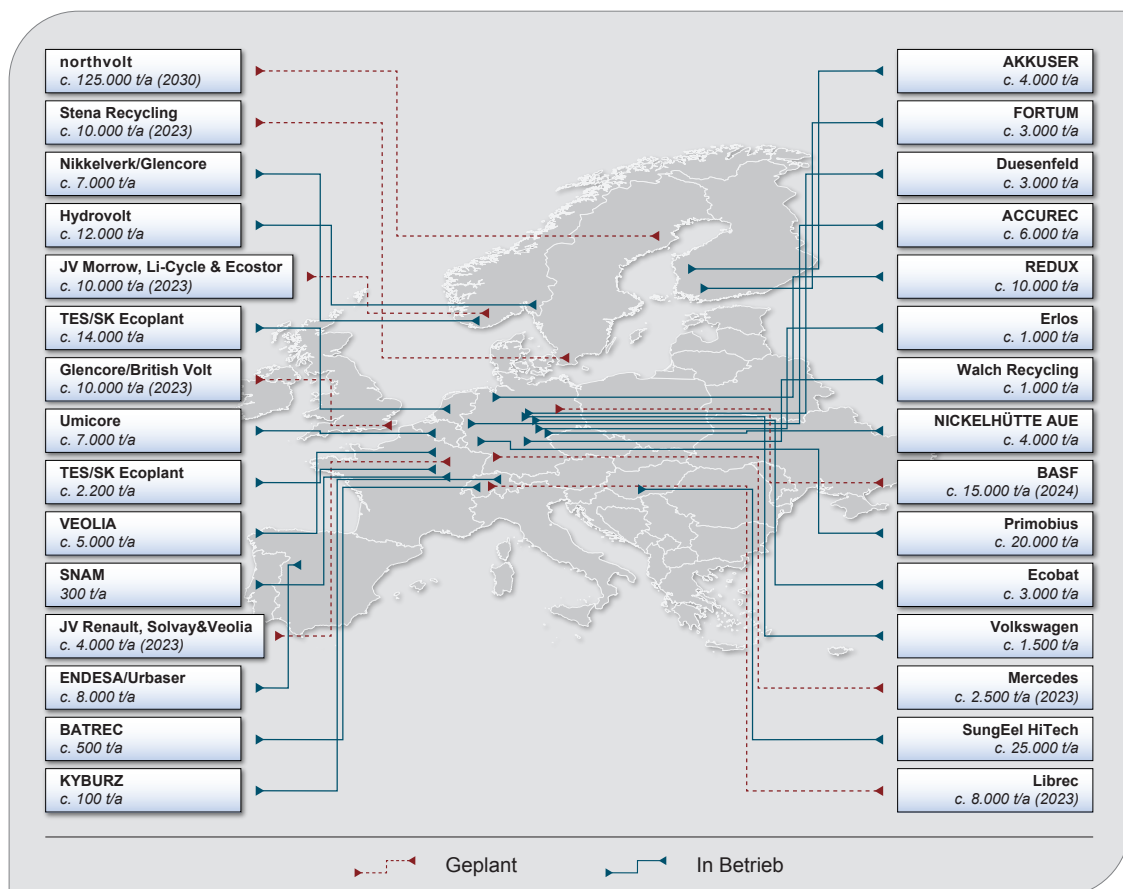


Abb. 4: Übersichtskarte der Recyclingkapazitäten in Europa. Etablierte und geplante (gestrichelte Linie) Anlagen (Daten stammen aus offiziellen Pressemitteilungen der jeweiligen Akteure).

In Schweden plant Stena Recycling eine neue Batterierecycling-Anlage mit einer Kapazität von 10.000 Tonnen pro Jahr ab dem Jahr 2023. In Mitteleuropa hat Volkswagen kürzlich eine Pilotanlage in Salzgitter eröffnet und auch das Recyclingunternehmen Elemental Holding hat eine neue Anlage zur Behandlung von Batterien in Polen angekündigt. Die Unternehmen Endesa und Urbaser haben eröffnet, im Jahr 2023 eine eigene Batterierecycling-Anlage in der spanischen

genommen werden. Die momentane Recyclingkapazität in Europa beläuft sich auf circa 100.000 Tonnen pro Jahr. Europaweite Ankündigungen zu Recyclinganlagen könnten die Gesamtkapazität bis auf 220.000 Tonnen bis 2023 erhöhen. In Deutschland werden LIB momentan an neun Standorten mit einer geschätzten Kapazität von etwa 49.000 Tonnen pro Jahr recycelt (Abb. 4).

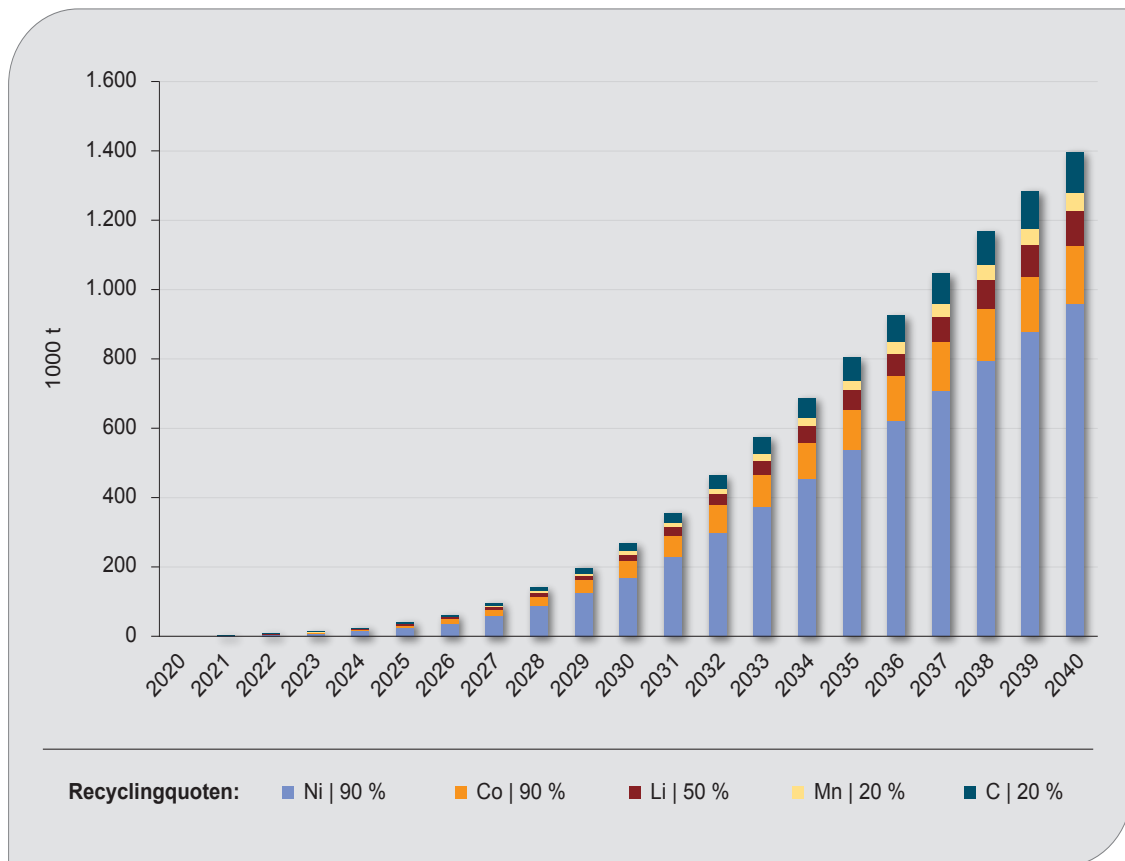


Abb. 5: Recyclingbeitrag von Batterierohstoffen Nickel, Kobalt, Lithium, Mangan und Graphit (C) bis zum Jahr 2040. Berechnungen basieren auf Daten zum Rohstoffbedarf von 2020 bis 2030 für die Elektromobilität (MARSCHIEDER-WEIDEMANN et al. 2021) sowie Annahmen zu Rücklaufmengen und Recyclingquoten.

Stadt León mit einer Kapazität von 8.000 Tonnen Batterien pro Jahr zu betreiben. Darüber hinaus wurden weitere Pläne für die Errichtung von Recyclinganlagen bekannt gegeben. Eines davon ist Northvolt, das eine Anlage mit einer Kapazität von 25.000 Tonnen pro Jahr in Betrieb nehmen will. BASF plant eine Anlage in Deutschland und das Joint Venture zwischen Glencore und Britishvolt beabsichtigt eine Anlage in Großbritannien, beide sollen im Jahr 2023 in Betrieb

Abschätzung des Recyclingpotenzials von Lithium-Ionen-Batterien

Automobilhersteller für batterieelektrische Fahrzeuge geben eine Garantie von etwa acht Jahren beziehungsweise 160.000 km auf einen Mindestanteil an nutzbarer Akkukapazität (70 %).

Zur Quantifizierung des Recyclingbeitrags durch LIB aus dem Elektromobilitätssektor wurden

folgende Annahmen zu Rücklaufmengen getroffen: 50 % Rücklauf von LIB nach acht Jahren Nutzung; 60 % Rücklauf von LIB nach zehn Jahren Nutzung; 90 % Rücklauf von LIB nach zwölf Jahren Nutzung; verbleibende 10 % Verlust durch Produktionsabfälle und Exportverluste. Ein Verbleib in der Second-Life-Nutzung wurde nicht berücksichtigt. Diese würde den Rücklaufzeitraum der LIB signifikant verlängern. Die Recyclingquoten für Nickel und Kobalt in industriell etablierten pyrometallurgischen sowie hydrometallurgischen Recyclingprozessen liegen zwischen 90 und 95 % (BRÜCKNER et al. 2020). Für Lithium wurde eine potenzielle Recyclingquote von 50 % angenommen, da Lithium im metallurgischen Prozess schwer zurückzugewinnen ist und das Metall aktuell noch nicht wirtschaftlich zurückgewonnen wird. Mangan und Graphit werden aus wirtschaftlichen Gründen ebenfalls noch nicht im Industriemaßstab zurückgewonnen. Dennoch wird aufgrund technologischer Neuerungen zukünftig von einer Recyclingquote von Mangan und Graphit von 20 % ausgegangen. Basierend auf diesen Annahmen könnten im Jahr 2030 etwa 18.000 Tonnen Lithium, 169.000 Tonnen Nickel, 49.000 Tonnen Kobalt, 9.000 Tonnen Mangan sowie 21.000 Tonnen Graphit aus dem Recycling von LIB zur Verfügung stehen (Abb. 5). Der Anteil an Sekundärlithium am Bedarf 2030 läge theoretisch bei 9 %, für Sekundärnickel bei 16 %, für Sekundärkobalt bei 26 % und für Sekundärmangan bei 3 %. Diese vereinfachten Abschätzungen werden spezifiziert und detailliert mittels statistischer Unsicherheiten im Rahmen des BMBF-geförderten Projekts BatMix.

Daten für den E-Mobilitätssektor in Europa zeigen Rohstoffbedarfe im Jahr 2030 von etwa 97.000 Tonnen Lithium, 449.000 Tonnen Nickel, 65.000 Tonnen Kobalt und 100.000 Tonnen Mangan. Dabei wird von einer jährlichen Gesamtproduktionskapazität von 1.000 GWh für Elektroautos ausgegangen.

Für die Abschätzung der Rohstoffmengen ist zu beachten, dass sich noch kein vorherrschender LIB-Typ durchgesetzt hat und auch nicht absehbar ist, welcher sich zukünftig durchsetzen wird. Dies macht Abschätzungen des Recyclingbei-

trags und den wirtschaftlichen Betrieb aktueller sowie Investitionen in neue Recyclinganlagen relativ ungewiss. Potenzielle Recyclingverfahren müssen zukünftig alle aktuellen und zukünftigen Zelltypen verarbeiten können. Sie müssen darüber hinaus skalierbar sein, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen.

ZUKÜNFTIGE BATTERIETYPEN

Vorhersagen über den zukünftigen Marktanteil der verschiedenen Batterietypen sind aufgrund neuer Materialien, die auf den Markt kommen, noch unsicher. Von den ersten Berichten bis zum kommerziellen Vertrieb kann es bis zu 30 Jahre dauern, je nach Forschungsfortschritt und Materialnachfrage im Zusammenhang mit gegenwärtigen Energiequellen. Batterietypen wie zum Beispiel Lithium-Luft und Lithium-Schwefel wurden bereits in den 1960er und 70er Jahren erwähnt und befinden sich noch immer in der Laborphase. Von der Patentierung bis zur kommerziellen Markteinführung vergingen im Falle der LCO- und NMC-Typen hingegen nur zehn bis 15 Jahre. Die Verfeinerung etablierter Batteriechemikalien kann bis zu elf Jahre dauern, wie am Beispiel des NCA-Typs zu beobachten war. Ab dem Jahr 2025 werden voraussichtlich neue Batterietypen auf der Basis von z. B. Natrium auf den Markt kommen. Die Batterie der Zukunft ist jedoch noch ungewiss, da es viele entscheidende Faktoren gibt, welche die Etablierung neuer Batterietypen beeinflussen (Abb. 6).

Batterieentwicklung

Die Sony Corporation brachte 1991 ihre erste Lithium-Ionen-Batterie, einen LCO-Typ, auf den Markt, doch gingen dem Produkt bereits Arbeiten an frühen LIB voraus. Das Goodenough-Labor entdeckte bereits 1980 die Fähigkeit der Familie der lithiierten Übergangsmetalloxide der NaFeO_2 -Struktur zur reversiblen Einlagerung von Lithium-Ionen bei relativ hohen Potenzialen (MIZUSHIMA et al. 1981). Elemente wie Nickel und

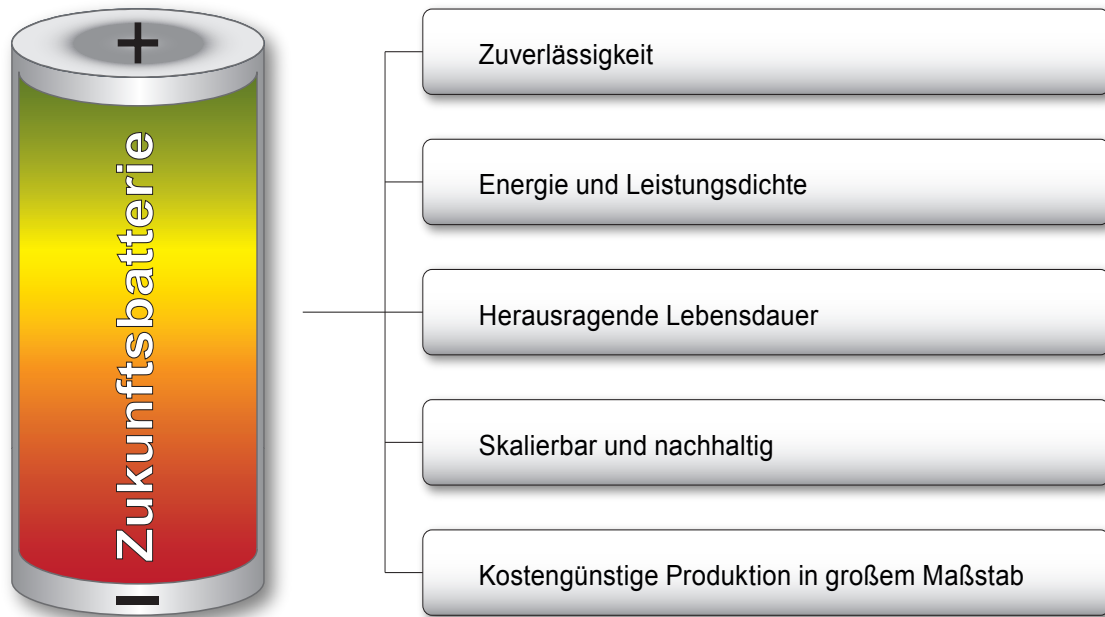


Abb. 6: Kriterien für die Batterie der Zukunft.

Kobalt sowie deren Mischungen mit Mangan, Aluminium, Eisen usw. zeigten ebenfalls diese Fähigkeit (BLOMGREN 2017). Diese Grundidee führte in den 1980er Jahren zur Entdeckung von drei Klassen von Oxidkathoden: 1) geschichtete Oxide (LiCoO_2), 2) Spinelloxide (LiMn_2O_4) und 3) Polyanionenoxide (z. B. die heutige LFP-Kathode). Das lithiumreiche NMC-Kathodenmaterial wurde erstmals im Jahr 1998 von JOHNSON et al. (1998) beschrieben und 2001 patentiert (Abb. 7). Die Entwicklung neuer Systeme wie anderer Me-

tallanoden, z. B. Natrium-Ionen-Batterien, und gasförmiger oder flüssiger Kathodensysteme haben das Potenzial, zumindest einige der bestehenden LIB-Typen bei bestimmten Anwendungen zu verdrängen. Die Verbesserung der Sicherheit durch die Verwendung thermisch stabilerer Materialien und die Senkung der Kosten durch den Ersatz von z. B. Kobalt durch kostengünstigere Materialien wie Mangan sind der Auslöser für die Entwicklung neuer Materialien.

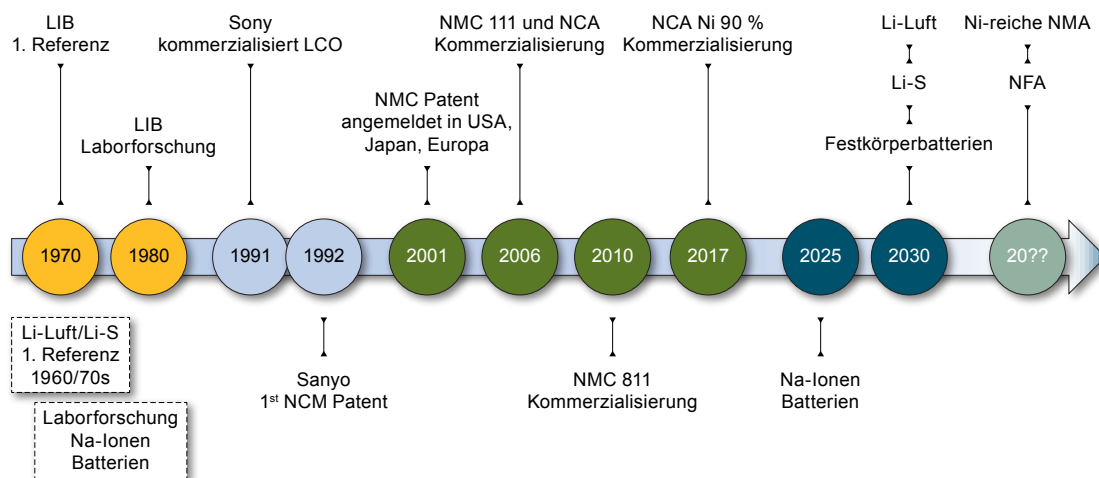


Abb. 7: Innovationsanalyse zu Lithium-Ionen-Batterietypen und Alternativen. High-Ni NMA – Nickel-Mangan-Aluminium-Typ, NFA – Nickel-Eisen-Aluminium-Typ.

Eine weitere anspruchsvolle Aufgabe ist die Erhöhung der Energiedichte von LIB. Dabei wird vor allem an der Lithium-Schwefel- und Lithium-Luft-Batterien geforscht. Die erste Lithium-Schwefel-Batterie wurde in den 1960er Jahren von HERBERT & ULAM (1962) vorgeschlagen und patentiert, aber erst im Jahr 2009 erzielten Nazzari und Kollegen einen wichtigen Entwicklungsdurchbruch (NAZZARI et al. 2009). Die Lithium-Luft-Batterie wurde im Jahr 1996 von ABRAHAM UND JIANG vorgeschlagen (IMANISHI & YAMAMOTO 2019). Im Jahr 2009 erlangte dieser Batterietyp weltweite Aufmerksamkeit als möglicher Energiespeicher für Elektrofahrzeuge.

Festkörperbatterien haben in letzter Zeit als Energiespeicher für Elektrofahrzeuge stark an Interesse gewonnen. Lithiummetall, eingesetzt als Anodenmaterial, könnte die Energiedichte im Vergleich zur derzeit verwendeten Kohlenstoffanode um 20 % erhöhen (ULVESTAD 2018). Basierend auf den Technologiefahrplänen der Hersteller von Elektrofahrzeugen und den technologischen Errungenschaften geht Yole Développement davon aus, dass die kommerzielle Einführung von Festkörperbatterien im Jahr 2025 beginnen wird, wobei der Start der Massenproduktion von Fahrzeugen mit Festkörperbatterien nicht vor dem Jahr 2030 erwartet wird (YOLE DÉVELOPPEMENT 2020).

FAZIT

Das industrielle Recycling von LIB erfolgt aktuell auf zwei, teilweise miteinander kombinierten, Wegen: 1) pyrometallurgisch mit nachträglicher hydrometallurgischer Behandlung zur Gewinnung der Feinmetalle beziehungsweise Salze und 2) hydrometallurgisch wobei zuvor ein mechanischer Aufschluss („Shredder“) der Zellen oder Module erforderlich ist. Beide Prozesse für sich genommen haben spezifische Vor- und Nachteile. Aufgrund unterschiedlicher physikochemischer Eigenschaften der in LIB enthaltenen Rohstoffe ist eine jeweils maximale Ausbringung im Moment noch nicht möglich. Somit liegt der Fokus aktuell noch auf den wertbringenden Metallen wie bei-

spielsweise Nickel und Kobalt. Auch könnten höhere Wertanteile des Lithiums in Batterien dazu beitragen Anstrengungen zur Rückgewinnung zu intensivieren.

Durch intensive Forschung auf dem Gebiet des LIB-Recyclings konnten in den vergangenen zehn bis 15 Jahren zahlreiche Forschungsprojekte zu Pilotanlagen in Europa weiterentwickelt werden. Wirtschaftlich etablierte Anlagen arbeiten mit einer Jahreskapazität von einigen Tausend Tonnen. Mit der fortschreitenden Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen wird die Menge der LIB, die dem Recycling zur Verfügung stehen, deutlich und konstant zunehmen. Folglich wird erwartet, dass die Recyclingkapazitäten in Europa stark steigen werden, um die wachsende Nachfrage zu bedienen. Die rechtlichen Rahmenbedingungen und die Forderung des Einsatzes von Rezyklaten, die sich durch die Novellierung der Batterieverordnung ergeben, werden Einfluss auf die Recyclingindustrie in der EU haben. Die Kapazität der Recyclinganlagen in Europa könnte im Jahr 2030 bei etwa 380.000 Tonnen pro Jahr liegen. Trotz der bereits definierten Hauptprozessrouten gibt es noch offene Fragen bezüglich der Aufrüstung bestehender Anlagen sowie der nächsten Generation von Recyclinganlagen.

Zukünftig werden auch Verfahrenskombinationen sowie der Durchbruch weiterer innovativer LIB-Typen und alternative konkurrenzfähige Batterietypen eine große Rolle spielen. Die Entwicklungen von LIB und deren Recycling sind sehr dynamisch, daher werden auch in den kommenden Jahren weitere Fortschritte in vielen Bereichen erwartet. Ein wichtiger Entwicklungsschwerpunkt in diesem Zusammenhang muss auch auf dem „Design for Recycling“ zukünftiger LIB liegen, welches die Eignung des Produktdesigns für das Recycling sowie die Wiederverwertbarkeit aller Arten von Batteriematerialien berücksichtigt. Darüber hinaus bleibt eine Kernherausforderung, eine umfassende Erfassung von LIB an deren Lebensende und die Einsteuerung in hochwertige Recyclingprozesse sicherzustellen. Dem in der neuen Batterie-Verordnung geforderte Batteriepass könnte hierbei eine entscheidende Rolle zukommen.

LITERATUR

ABRAHAM, K. M. & JIANG, Z. (1996): A Polymer Electrolyte-Based Rechargeable Lithium/Oxygen Battery. - J. Electrochem. Soc., v 143, 1.

ADAC (2021): Elektroautobatterie. - URL: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-batterie/> (Stand 11.05.2022)

BATTERIE-FORUM DEUTSCHLAND (2022): Infoportal. - URL: <https://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/batterie-kompendium/sekundaere-batterie/metall-ionen-batterien/lithium-ionen-batterien> (Stand 11.05.2022).

BLOMGREN, GEORGE E. (2017): The Development and Future of Lithium Ion Batteries. - In J. Electrochem. Soc. 164 (1), A5019-A5025.

BMBF (2021): <https://batterie-2020.de/foerderinitiative/foerderungen-der-batterieforschung-durch-das-bmbf/rueckblick-foerderung-seit-2007/> (Stand 11.05.2022).

BRÜCKNER, L., FRANK, J. & ELWERT, T. (2020): Industrial Recycling of Lithium-Ion Batteries. - A Critical Review of Metallurgical Process Routes. Metals, 10, 1107.

BUNDESREGIERUNG: Thema Verkehr. - URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/verkehr-1672896> (Stand 11.05.2022).

DESTATIS (2022): Statistisches Bundesamt. Europäischer Green Deal. - URL: <https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/GreenDeal/GreenDeal.html> (Stand 11.05.2022).

DUESENFELD (2022): Umweltfreundliches Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. URL: <https://www.duesenfeld.com/recycling.html> (Stand 11.05.2022).

EUROPÄISCHE KOMMISSION (2022): Batteries and accumulators. URL: https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/batteries-and-accumulators_en (Stand 11.05.2022).

EV VOLUMES (2022): URL: <https://www.ev-volumes.com/country/total-euefta-plug-in-vehicle-volumes-2/> (Stand 11.05.2022).

HERBERT, D. & ULAM, J. (1962): Electric dry cells and storage batteries. - United States Patent Office.

IMANISHI, N. & YAMAMOTO, O. (2019): Perspectives and challenges of rechargeable lithium air batteries. - Materials Today Advances 4, 100031.

NAZAR, L. JI, X. & LEE, K. (2009): A highly ordered nanostructured carbon-sulphur cathode for lithium-sulphur batteries. - Nature Materials, 8, 500–506.

JOHNSON, C. S., VAUGHEY, J. T., THACKERAY, M. M., BOFINGER, T. E. & HACKNEY, S. A. (1998): Layered Lithium-Manganese Oxide Electrodes Derived from Rock-Salt Li_xMnyO_z ($x+y=z$) Precursors. - 194th Meeting of the Electrochemical Society, Boston, MA, Nov.1-6.

MARSCHIEDER-WEIDEMANN, F., LANGKAU, S., BAUR, S. J., BILLAUD, M., DEUBZER, O., EBERLING, E., ERDMANN, L., HAENDEL, M., KRAIL, M., LOIBL, A., MAISEL, F., MARWEDE, M., NEEF, C., NEUWIRTH, M., ROSTEK, L., RÜCKSCHLOSS, J., SHIRINZADEH, S., STIJEPIC, D., TERCERO ESPINOZA, L. & TIPPNER, M. (2021): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021. – DERA Rohstoffinformationen 50: 366 S., Berlin.

MIZUSHIMA, K., JONES, P., WISMAN, P. & GOODENOUGH, J. (1981): Li_xCoO_2 ($0 < x < 1$): A new cathode material for batteries of high energy density. - In Solid State Ionics 3-4, 171–174.

SOJKA, R., PAN, Q. & BILLMANN, L. (2020): Comparative study of Lithium-ion battery recycling processes. 54 S. Accurec Recycling GmbH.

ULVESTAD, A. (2018): A Brief Review of Current Lithium Ion Battery Technology and Potential Solid State Battery Technologies, Applied Physics, 17 S. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1803/1803.04317.pdf> (Stand 11.05.2022).

UMICORE (2022): Battery recycling. - URL: <https://csm.umicore.com/en/battery-recycling/our-recycling-process#tabs>

UMICORE (2022): Battery recycling. - Press release
URL: <https://www.umicore.com/en/newsroom/news/new-generation-li-ion-battery-recycling-technologies-and-announces-award-with-acc/>
(Stand 11.05.2022)

VDA (2021): Daten zur Automobilindustrie. - Verband der Automobilindustrie, Ausgabe 2021.

YOLE DÉVELOPPMENT (2021): Solid-state battery as an ultimate milestone in the company's roadmaps. -
URL: http://www.yole.fr/Solid_State_Battery_Market_Update_2021.aspx (Stand 11.05.2022).

IMPRESSUM

Herausgeber:

© **Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Mai 2022**

B1.1 Deutsche Rohstoffagentur (DERA)
in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Wilhelmstraße 25-30 | 13593 Berlin-Spandau

E-Mail: dera@bgr.de

www.deutsche-rohstoffagentur.de

www.bgr.bund.de

*Max Frenzel ist Gruppenleiter für Geometallurgie und Lagerstättenkunde am Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie.

Förderung:

Das dieser Veröffentlichung zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im Rahmen des Kompetenzclusters Recycling & Grüne Batterie (greenBatt) unter dem Förderkennzeichen 03XP0335B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.