

IMPULS



Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau

Recycling of Lithium-Ion Batteries: Opportunities and Challenges for Mechanical and Plant Engineering

Stiftung für den Maschinenbau,
den Anlagenbau und die Informationstechnik



Kurzstudie im Auftrag der IMPULS-Stiftung
(Stiftung für den Maschinenbau, den Anlagenbau und die
Informationstechnik)

Recycling von Lithium-Ionen- Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Str. 48, 76139 Karlsruhe, Deutschland
Dr. Christoph Neef (christoph.neef@isi.fraunhofer.de)
Dr. Thomas Schmaltz (thomas.schmaltz@isi.fraunhofer.de)
Dr. Axel Thielmann

Karlsruhe, November 2021

Zusammenfassung und Kernergebnisse	2
1. Einleitung	8
1.1. Marktentwicklung von Batterien	9
1.2. Nachhaltigkeit und Rohstoffkritikalität.....	10
1.3. Regulatorische Rahmenbedingungen.....	11
1.4. Wertpotenzial.....	14
1.5. Status Quo: Batterierecycling in Europa und China	16
2. Quantifizierung des Batterierecyclings	19
2.1. Batterienachfrage in Europa	19
2.2. Batterienutzung und Lebensende.....	21
2.3. Zellproduktion und Ausschuss	23
2.4. Rezyklate und Materialwert	25
3. Recyclingtechnologien und Marktentwicklung für den Maschinen- und Anlagenbau	27
3.1. Recyclingprozesse	27
3.2. Quantifizierung der Investitionsvolumina in Anlagentechnik	34
3.3. Beschäftigungspotenziale für den Maschinen- und Anlagenbau	41
4. Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau	43
4.1. Rahmenbedingungen.....	43
4.2. Technologisches Angebot und Innovationen	44
4.3. Wettbewerbssituation.....	47
4.4. Zusammenfassung und Ausblick	50
5. Literaturverzeichnis	51
Danksagung	56

Zusammenfassung und Kernergebnisse

Der Übergang hin zur Elektromobilität hat Fragen zum ökologischen Fußabdruck von Fahrzeugbatterien, der Kritikalität von Rohstoffen und der Wettbewerbsfähigkeit europäischer Industrien entlang der Wertschöpfungskette Batterie aufgeworfen. Ein lokales Recycling von Batterien und die Rückführung der Rohstoffe wird in diesem Kontext als wichtiger Baustein für eine europäische Kreislaufwirtschaft angesehen. Besonders für Deutschland als traditionellem Maschinenbaustandort ist dabei nicht nur die Entwicklung entlang der direkten Batterie-Wertschöpfungskette (von Batteriefertigung, über deren Anwendungen bis hin zum Recycling), sondern auch in vorgelagerten Wertschöpfungsstufen wie dem Maschinen- und Anlagenbau und dem damit verbundenen Markt- und Beschäftigungswachstum von enormer Wichtigkeit.

Die vorliegende Studie *„Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau“* zielt auf die Quantifizierung dieser sekundären Effekte einer europäischen Recyclingindustrie. Dazu wurde ein Marktmodell des Fraunhofer ISI genutzt, um Prognosen für das Wachstum eines europäischen Batterierecyclingmarktes abzuleiten. Die Effekte für den Maschinen- und Anlagenbau wurden auf Grundlage von Interviewergebnissen mit Batterierecycling- und Anlagenexperten quantifiziert.

Die Untersuchung zeigt, dass das Volumen zu recycelnder Lithium-Ionen-Batterien und Batteriekomponenten in Europa 2030 etwa 230 Kilotonnen pro Jahr (Szenarienbreite 150 bis 300 Kilotonnen pro Jahr), 2040 etwa 1.500 Kilotonnen pro Jahr (Szenarienbreite 600 bis 2.500 Kilotonnen pro Jahr) betragen könnte. In den nächsten Jahren müsste die Industrie jährliche Wachstumsraten von über 30%, um das Jahr 2040 von über 10% aufweisen, um die hier anfallenden Altbatterien recyceln zu können. Die Entwicklung wird dabei kurzfristig besonders durch die in Europa entstehenden Zellfertigungen und entsprechende Produktionsausschüsse, mittel- und langfristig durch den Rücklauf von Traktionsbatterien aus der Elektromobilität getrieben werden.

Zur Bewältigung zukünftiger Recyclingmengen müssen die Kapazitäten, die heute im niedrigen zweistelligen Kilotonnen-pro-Jahr-Bereich liegen, massiv hochskaliert werden. Dafür wird in Europa Anlagentechnik benötigt, welche, je nach Geschwindigkeit des Marktwachstums und des globalen Anteils europäischer Recyclingkapazitäten, kumulierte Investitionen (inkl. Serviceleistungen) in Höhe von etwa 6,6 Mrd. € (Szenarienbreite 3,0 bis 8,9 Mrd. €) bis 2040 erfordert. Dies entspricht für das Jahr 2040 einer europäischen Marktgröße von etwa 810 Mio. €

(Szenarienbreite 300 bis 1,1 Mrd. €). Hinzu könnten Serviceleistungen für die Wartung und Weiterentwicklung der Anlagen von etwa 180 Mio. € (Szenarienbreite 80 bis 250 Mio. €) kommen.

Während sich diese zukünftigen Volumina bereits durch heute in Verkehr gebrachte Lithium-Ionen-Batterien abzeichnen, ist noch unklar, wie die Prozesse genau ausgestaltet sein werden, welche die Industrie zur Bewältigung des Recyclingaufkommens einsetzen wird. Verschiedene Kombinationen mechanischer, pyro- und hydrometallurgischer Verfahren stehen zur Verfügung und befinden sich derzeit in Anwendung oder Erprobung. Das *eine* Verfahren und damit die *eine* Anlagentechnologie hat sich bislang nicht etabliert, sodass in der Industrie ein Bedarf nach innovativen, grünen und automatisierbaren Technologien besteht.

Der deutsche und europäische Anlagenbau verfügt über langjährige Erfahrung mit industrieller Recyclingtechnologie für eine Vielzahl von Wertstoffen und besitzt somit eine gute Ausgangsposition, um neue und effiziente Verfahren in den Markt zu bringen. Diese werden im Hinblick auf die neuesten Regulierungsvorschläge der Europäischen Kommission auch erforderlich sein. Denn zukünftige Recyclingprozesse und Anlagen sollen nicht nur die sachgemäße Behandlung und Entsorgung von Batteriekomponenten sichern, sondern auch hohe Rückgewinnungsquoten wichtiger Batterierohstoffe ermöglichen. Gemäß den Ergebnissen dieser Studie könnte sich der Beitrag des Recyclings zur Deckung der Rohstoffnachfrage der Batterieproduktion in Europa bis 2040 auf über 40% für Kobalt und auf über 15% für Lithium, Nickel und Kupfer belaufen. Ein effizientes Batterierecycling kann also dazu beitragen, den CO₂-Fußabdruck von Batterien insgesamt zu reduzieren und langfristig die Abhängigkeit von Rohstoffimporten zu reduzieren. Dies macht es für die gesamte Wertschöpfungskette wichtig. Neben diesen ökologischen und strategischen Effekten tragen gebrauchte Batterien auch ein enormes Wertpotenzial, das es zu heben gilt. Der Wert der nach derzeitigem Stand der Technik rückgewinnbaren Materialien einer typischen Fahrzeugbatterie liegt zwischen 600 und 1.300 € und könnte Europa in der Summe zu einem Milliardenmarkt für Batterierohstoffe machen.

Gerade bei den heute in Europa entstehenden Pilotanlagen kann die Zusammenarbeit mit lokalen Anlagenzulieferern entscheidend sein. Zwar sind die grundsätzlichen Recyclingrouten verstanden, jedoch besteht noch enormer Entwicklungsaufwand für die Verfahrensoptimierung bei gleichzeitiger Erhaltung der Flexibilität für sich ändernde Anforderungen und Batteriechemien und letztlich für die Skalierung der Anlagen für große elektrifizierte Mobilitätsmärkte. Der deutsche und europäische Maschinen- und Anlagenbau ist bereits heute als

Entwicklungspartner und Zulieferer für die wachsende Recyclingindustrie aktiv. Langfristig gilt es, diese gute Wettbewerbsposition auszubauen, um von den Beschäftigungspotenzialen dieses wachsenden Marktes zu profitieren.

Gemäß der im Rahmen der Studie ermittelten Wachstumsprognosen könnten weltweit im Maschinen- und Anlagenbau bis 2030 etwa 570 (Szenarienbreite 370 bis 660), bis 2040 sogar etwa 3.800 (Szenarienbreite 1.500 bis 5.300) Arbeitsplätze für die Bereitstellung und den Service von Anlagen für das europäische Batterierecycling entstehen; mit guten Aussichten für den europäischen Maschinen- und Anlagenbau an dieser Entwicklung maßgeblich zu partizipieren. Wie auch bei der Herstellung von Batterien ist mit einem starken Wettbewerb internationaler Anlagenhersteller, insbesondere aus Asien, zu rechnen. In China beispielsweise ist die Batterierecyclingindustrie heute bereits deutlich größer als in Europa, sodass praktische Erfahrungen mit den Verfahren und Anlagen vorliegen. Flankiert von einem Regulierungsrahmen, welcher den ökologischen Fußabdruck von Batterien ganzheitlich adressiert und regionale Gegebenheiten wie Energiemix und Logistikaufwand berücksichtigt, könnte sich Europa dennoch zu einem Leitmarkt für ein grünes und hocheffizientes Batterierecycling entwickeln. Der deutsche und europäische Maschinen- und Anlagenbau mit seiner Erfahrung in der Industrialisierung innovativer Technologien und in der Implementierung von Verfahren, die anspruchsvollste Grenzwerte erfüllen, kann ein Schlüsselpartner sein, um diese politischen, ökologischen und wirtschaftlichen Ziele zu erreichen. Das Auftreten von Europa als Gesamtmarkt mit einheitlichen Genehmigungsverfahren und Anforderungen an Recyclingprozesse und deren Tiefe kann dazu beitragen, die Wertschöpfung hier aufzubauen. Die europäische Betrachtung in dieser Untersuchung ist dabei nicht als geschlossen anzusehen. So kann die Etablierung einer europäischen Batterierecycling- und Zulieferindustrie mittelfristig als Ausgangsbasis für die Erschließung globaler Märkte mit entsprechend höheren Investitionsvolumina und Beschäftigungspotenzialen angesehen werden.

Summary and key findings

The transition towards electromobility has raised questions about the environmental footprint of vehicle batteries, the criticality of raw materials and the competitiveness of European industries along the battery value chain. In this context, local recycling of batteries and the return of raw materials is seen as an important building block for a European circular economy. Particularly for Germany as a traditional mechanical engineering location, the development along the direct battery value chain (from battery production through its applications to recycling), but also in upstream value creation stages such as mechanical and plant engineering and the associated market and employment growth is of enormous importance.

The present study „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau“ ("Recycling of Lithium-Ion Batteries: Opportunities and Challenges for Mechanical and Plant Engineering") aims to quantify these secondary effects of a European recycling industry. For this purpose, a market model of the Fraunhofer ISI was used to derive forecasts for the growth of a European battery recycling market. The effects for mechanical and plant engineering were quantified based on interview results with battery recycling and plant engineering experts.

The study shows that the volume of lithium-ion batteries and battery components to be recycled in Europe could be about 230 kilotons per year in 2030 (scenario range 150 to 300 kilotons per year), and about 1,500 kilotons per year in 2040 (scenario range 600 to 2,500 kilotons per year). In the next few years, the industry would have to show annual growth rates of more than 30%, and around 2040 of more than 10%, in order to be able to recycle the spent batteries that accumulate here. In the short term, this development will be driven in particular by the cell production facilities being built in Europe and the corresponding production scrap, and in the medium and long term by the return of traction batteries from electromobility.

In order to cope with future recycling volumes, capacities, which are currently in the low double-digit kilotons per year range, will have to be massively scaled up. This requires plant technology in Europe, which, depending on the speed of market growth and the global share of European recycling capacities, will require cumulative investments (incl. services) of about € 6.6 billion (scenario range € 3.0 to 8.9 billion) by 2040. This corresponds to a European market size of about € 810 million for 2040 (scenario range € 300 million to 1.1 billion). In addition, services for

the maintenance and further development of the plants could amount to about € 180 million (scenario range € 80 to 250 million).

While these future volumes are already apparent from lithium-ion batteries put on the market today, it is still unclear exactly how the processes will be designed that the industry will use to manage the recycling volume. Various combinations of mechanical, pyrometallurgical and hydrometallurgical processes are available and are currently being used or tested. The *one* process and thus the *one* plant technology has not yet established itself, so there is a need in the industry for innovative, green and automatable technologies.

The German and European plant engineering industry has many years of experience with industrial recycling technology for a wide range of recyclables and is therefore in a good position to bring new and efficient processes to the market. These will also be necessary in view of the latest regulatory proposals of the European Commission. Because future recycling processes and plants should not only ensure the proper treatment and disposal of battery components, but also enable high recovery rates of important battery raw materials. According to the results of this study, the contribution of recycling to meeting the raw material demand of battery production in Europe could amount to more than 40% for cobalt and to more than 15% for lithium, nickel and copper by 2040. Efficient battery recycling can therefore help reduce the overall carbon footprint of batteries and reduce dependence on raw material imports in the long term, which makes it important for the entire value chain. In addition to these ecological and strategic effects, used batteries also carry enormous value potential that needs to be exploited. The value of the materials of a typical vehicle battery that can be recovered according to the current state of the art is between 600 and 1,300 € and could turn Europe into a billion euro market for battery raw materials.

Especially with the pilot plants emerging in Europe today, collaboration with local plant suppliers can be crucial. While the general recycling routes are understood, there is still enormous development work to be done to optimize the process while maintaining flexibility for changing requirements and battery chemistries, and ultimately to scale up the plants for large electrified mobility markets. The German and European mechanical and plant engineering sector is already active as a development partner and supplier for the growing recycling industry. In the long term, this good competitive position must be expanded in order to benefit from the employment potential of this growing market.

According to the growth forecasts determined in the study, around 570 (scenario range 370 to 660) jobs could be created worldwide in the mechanical and plant engineering sector by 2030, and even about 3,800 (scenario range 1,500 to 5,300) by 2040 for the provision and servicing of equipment for European battery recycling; with good prospects for the European mechanical and plant engineering industry to participate significantly in this development. As with the production of batteries, strong competition from international plant manufacturers, especially from Asia, is to be expected. In China, for example, the battery recycling industry is already much larger than in Europe, so that practical experience with the processes and plants is available. Flanked by a regulatory framework that addresses the ecological footprint of batteries holistically and takes into account regional circumstances such as energy mix and logistics costs, Europe could nevertheless develop into a lead market for green and highly efficient battery recycling. The German and European mechanical and plant engineering sector, with its experience in industrializing innovative technologies and implementing processes that meet the most demanding limits, can be a key partner in achieving these political, environmental and economic goals. The emergence of Europe as an overall market with uniform approval procedures and requirements for recycling processes and their depth can help to build value creation here. The European view in this study should not be seen as closed. The establishment of a European battery recycling and supplier industry can be seen in the medium term as a starting point for the development of global markets with correspondingly higher investment volumes and employment potential.

1. Einleitung

Mit dem dynamischen Übergang hin zu einem elektrifizierten Verkehr sind weltweit Produktionskapazitäten für Lithium-Ionen-Batteriekomponenten, -Zellen und -Systeme entstanden. Bis 2030 könnte die globale Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien (LIB) 1 bis 2 TWh pro Jahr betragen [Avicenne2020, Roskill2020], was einer Batteriemenge von etwa 10 Mio. Tonnen pro Jahr entspricht. Nach ihrer Lebenszeit in ersten oder zweiten Anwendungen müssen die Batterien dem Recycling zugeführt werden, um einen nachhaltigen Verbleib zu gewährleisten und um die Wertstoffe aus gebrauchten Batterien in die Fertigung neuer Batterien zurückzuführen. Die Schließung dieses Stoffkreislaufs in der Batteriewertschöpfung wird zurzeit durch politische Initiativen flankiert und im Sinne von Sammel- und Recyclingquoten regulatorisch vorbereitet.

Für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien stehen bereits heute verschiedene Verfahren zur Verfügung, welche jedoch noch nicht auf einer industriellen „GWh-Skala“ implementiert sind. In Zukunft müssen jedoch genau solche Recyclinginfrastrukturen aufgebaut werden, welche die großen Batteriemengen aus dem Rücklauf der ersten Generationen an Elektrofahrzeugen bewältigen können. Dazu ist einerseits eine hocheffiziente und hoch-automatisierte aber andererseits auch eine hoch-flexible Anlagentechnik notwendig, welche die Verarbeitung unterschiedlichster Batteriedesigns und Batteriechemien zulässt und damit ein hohes Maß an Innovationen in der Prozess- und Anlagentechnik erfordert.

In der vorliegenden Kurzstudie für die *IMPULS-Stiftung für den Maschinenbau, den Anlagenbau und die Informationstechnik* wurde ein Material- und Wertstrommodell entwickelt und ausgewertet, welches den Lebenszyklus von LIB von der Produktion bis zum Recycling und der Aufbereitung der Rohstoffe abbildet, um die folgenden Forschungsfragen zu beantworten:

- Wann und welche Mengen an Lithium-Ionen-Batterien werden für ein Recycling in Europa zur Verfügung stehen? Welche Prozessierung ist notwendig, welche Verfahrensschritte fallen dabei an?
- Welches Angebot für die Batterierecyclinginfrastruktur hat der deutsche und europäische Maschinen- und Anlagenbau heute? Wie wird die Wettbewerbssituation gegenüber globalen Wettbewerbern für den Vertrieb von Anlagen in Europa und global eingeschätzt?
- Wie kann die passende Maschinen- und Anlagentechnik zur Erfüllung regulatorisch vorgegebener Recyclingeffizienzen, bzw. zur Schöpfung des

Wertpotenzials gebrauchter Fahrzeugbatterien beitragen? Mit welchen Innovationen ist in den nächsten Jahren zu rechnen?

Die Kurzstudie baut auf Ergebnisse einer im Auftrag des *Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI* für die *Nationale Plattform Zukunft der Mobilität NPM* durchgeführten Untersuchung [NPM2021a], sowie anderen Studien zum Batterierecycling auf. Zur Aufstellung von Annahmen zu Recyclingtechnologie, Anlagenkosten und Beschäftigungseffekten wurden Interviews mit jeweils mehreren Expertinnen und Experten aus den Bereichen angewandte Forschung, Automobilindustrie, Batterierecyclingindustrie und Maschinen- und Anlagenbau geführt. Die Interviews wurden im Zeitraum März bis Juni 2021 geführt. Es wurden qualitative sowie quantitative Informationen zu regulatorischen Rahmenbedingungen, Recyclingverfahren, Recyclinganlagen, Marktentwicklung, Wettbewerbssituation und zukünftigen Innovationen abgefragt. Außerdem wurden die Expertinnen und Experten zu allgemeinen Entwicklungen und Herausforderungen ihrer jeweiligen Branchen befragt.

Die Studie gliedert sich in vier Kapitel:

- Kapitel 1 stellt die Rahmenbedingungen für und den Status Quo der sich entwickelnden europäischen Batterierecyclingindustrie dar.
- In Kapitel 2 wird das Mengengerüst für die Quantifizierung von Batterie- und Recyclingmärkten vorgestellt und für drei Szenarien: ein Basis- ein Minimal- und ein Maximal-Szenario ausgewertet.
- Kapitel 3 diskutiert verschiedene Recyclingtechnologien und -routen und quantifiziert auf Grundlage der Ergebnisse aus Kapitel 2 den Investitionsbedarf und die Beschäftigungseffekte für eine wachsende europäische Recyclingindustrie.
- In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Marktprognosen und der Experteneinschätzungen aus den Interviews hinsichtlich ihrer Implikationen für den deutschen und europäischen Maschinen- und Anlagenbau eingeordnet.

1.1. Marktentwicklung von Batterien

Von 2019 auf 2020 hat sich der Absatz von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) in Europa mehr als verdoppelt, der von Plug-In-Hybriden (PHEV) sogar beinahe verfünffacht [EAFO2021, IEA2021]. Vorläufige Zahlen aus Deutschland [KBA2021] legen nahe, dass sich dieser enorme Wachstumstrend auch in 2021 fortsetzen könnte. Eine aktuelle Studie der IEA [IEA2021] prognostiziert für Europa einen

Anstieg der elektrischen PKW-Verkäufe von 1,3 Mio. in 2020 auf 7 bis 13 Mio. in 2030. Ebenso bilden Szenarien des ICCT [Mock2021] ein Wachstum der BEV- und PHEV-Marktanteile im PKW-Bereich auf 50% in 2030, bei günstigen politischen Rahmenbedingungen sogar auf bis zu 70% ab. Auch die aktuelle Studie „Antrieb im Wandel“ des VDMA [AiW2021] geht im Jahr 2030 von BEV- und PHEV-Verkaufsanteilen im PKW-Bereich von ungefähr 50%, bzw. ungefähr 8 Mio. Einheiten, in Europa aus. Europäische Automobil-OEMs spielen dabei eine wichtige Rolle. Heute besitzen sie nicht nur in Europa (BEV: >60% Neuzulassungen in 2020), sondern auch global (BEV: ~25%) einen hohen Marktanteil. Häufig werden die Fahrzeugmodelle in Europa gefertigt, sodass in den letzten Jahren eine große Nachfrage nach LIB entstanden ist. Durch europäische OEMs dürfte diese 2020 bei knapp 40 GWh gelegen haben.

Auch jenseits von Elektrofahrzeugen ist Europa seit vielen Jahren ein wichtiger Absatzmarkt für Lithium-Ionen-Batterien und batterieelektrische Anwendungen. Besonders mobile Elektronikanwendungen und e-Bikes werden hier in großen Stückzahlen in Verkehr gebracht. Neue Mobilitätskonzepte und immer mehr industrielle und private Anwendungen versprechen auch für die Zukunft wachsende Absatzmärkte.

Während die in den Anwendungen integrierten Batterien heute noch überwiegend aus Asien nach Europa importiert werden, deuten zahlreiche Ankündigungen und Projekte industrieller und politischer Akteure auf den baldigen Aufbau großer Produktionskapazitäten in Europa hin. Mit einem Schwerpunkt auf Batterien für die Elektromobilität könnte sich Europa somit in den nächsten Jahren vom reinen Absatzmarkt zum Produzenten entwickeln. Aus beiden Rollen ergibt sich eine Verpflichtung zum nachhaltigen Umgang mit Batterien und der Rückgewinnung von Batterierohstoffen durch Recycling.

1.2. Nachhaltigkeit und Rohstoffkritikalität

Batterieelektrische Anwendungen können einen wichtigen Beitrag zur Erreichung klimapolitischer Ziele, so etwa im Verkehrssektor oder bei der Energieerzeugung und -speicherung, leisten. Gerade jedoch die Herstellung von Batterien ist selbst mit unerwünschten ökologischen und sozialen Effekten verknüpft, welche häufig aus der Gewinnung der notwendigen Batteriematerialien resultieren. In heutigen LIB werden die Batterierohstoffe Lithium, Aluminium, Mangan, Eisen, Kobalt, Nickel, Kupfer, Graphit und vermehrt auch Silizium genutzt. Der Rohstoffabbau und die Gewinnung aus Erzen und Solen findet überwiegend außerhalb Europas statt [Schmidt2016]. Zwar ist davon auszugehen, dass die genannten Rohstoffe für einen

globalen Hochlauf der Elektromobilität in ausreichender Menge zur Verfügung stehen [Buchert2017], dennoch stellt der Abbau und die energie- und materialintensive Aufbereitung eine hohe ökologische Belastung dar. Im Gegensatz zu einigen anderen Anwendungsfeldern bestehen für Batteriematerialien sehr hohe Reinheitsanforderungen („battery grade“) an die Rohstoffe, was aufwendige Veredlungsverfahren erfordert. Verschiedene Ergebnisse in der Literatur lassen darauf schließen, dass etwa die Hälfte der mit der Batterieproduktion verbundenen CO₂-Emissionen auf den Abbau von Rohstoffen und die Materialherstellung entfallen [Romare2017, Pettinger2017, Regett2018, Peters2018]. Darüber hinaus ist gerade der Rohstoffabbau mit unerwünschten ökologischen [Becker2020, Buchert2016, OECD2019] und sozialen Risiken [Faber2017, Mancini2020] in den Abbauregionen verknüpft.

Die Nutzung von Sekundärrohstoffen aus dem Recycling könnte den ökologischen Fußabdruck in der Batterieherstellung insgesamt verringern [Buchert2016, Qiao2020], u.a., da die Konzentration der zu gewinnenden Metalle in der Batterierecyclingmasse im Vergleich zu Erzen deutlich höher ist (Energie- und Materialeffizienz) und die Umweltauswirkungen in den Abbaugebieten reduziert werden.

Über den Direktvergleich der heutigen Gewinnungsverfahren für Primär- und Sekundärrohstoffe hinaus könnte sich auch zukünftig die Relevanz des Batterierecyclings für die Vermeidung ökologischer Risiken erhöhen. So wird in einigen Studien argumentiert, dass die hohe Wachstumsdynamik der Batteriemärkte in Zukunft noch zur stärkeren Nutzung von Rohstoffen aus Regionen mit problematischen Abbaubedingungen führen könnte [AlBarazi2019, BGR2019, Home2019], bzw. sich die wachsende Erschließung von Vorkommen, auch geringerer Qualität, negativ auf den ökologischen Fußabdruck der Materialien auswirken würde [Ambrose2020, Henckens2020].

1.3. Regulatorische Rahmenbedingungen

Der Aufbau einer Batteriekreislaufwirtschaft in Europa wird gegenwärtig durch eine Gesetzesinitiative innerhalb der Europäischen Union flankiert. Dazu hat die Europäische Kommission Ende 2020 einen sogenannten Regulierungsrahmen [EU2020b] vorgeschlagen, welcher Teil des Aktionsplans Kreislaufwirtschaft (Circular Economy Action Plan [EU2020a]) ist und der die bestehende „Batteriedirektive“ (Directive 2006/66/EC on batteries and accumulators) ersetzen soll. Gegenüber dieser Direktive, welche den Verbleib und die Behandlung von Batterien nach ihrem Lebensende betrifft, adressiert der Regulierungsvorschlag

Aspekte von der Produktion und Inverkehrbringung von Batterien über Leistungsanforderungen bis hin zum Recycling und der Verfügbarmachung für die Produktion neuer Batterien. Der Vorschlag bezieht sich somit auf den gesamten Lebenszyklus der Batterie und soll insgesamt die Kreislaufführung unterstützen.

Durch die Vorgabe von Mindestzyklatanteilen in der Batterieproduktion, d.h. der verpflichtenden Einspeisung von Rohstoffen aus Altbatterien in die Produktion neuer Batterien, zielt der Regulierungsvorschlag auf das tatsächliche Schließen des Materialkreislaufs in der Batterieindustrie ab.

Zwar erscheinen die geforderten Rezyklatanteile in der ersten Stufe ab 2030 noch gering (12% Kobalt, 4 % Lithium und 4% Nickel), jedoch müssen sie vor dem Hintergrund des hochdynamischen Batteriemarktwachstums gesehen werden und dürften damit zu einer hohen Nachfrage nach Rohstoffen aus Altbatterien führen. Mit der Erhöhung ab 2035 (20% Kobalt, 10% Lithium und 12% Nickel) wird der allmählichen Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen Rechnung getragen. Wobei davon auszugehen ist, dass für einen eingeschwungenen Batteriemarkt in Zukunft nochmals höhere Quoten definiert werden müssen, um den Steuerungseffekt des Regulierungsvorschlags aufrecht zu erhalten.

Besonders betroffen, bzw. erleichtert könnte die technische Ausgestaltung von Recyclingprozessen durch die Vorgaben zu Austausch- und Entfernbarkeit von Batterien aus Geräten sein. Dies betrifft vor allem Kleinanwendungen wie mobile Elektronik. Zwar wird der Regulierungsvorschlag in diesem Punkt noch nicht konkret, dennoch könnte der Ansatz den ersten Schritt des Recyclings, nämlich die Sortierung und Trennung, erleichtern. Demgegenüber stellen die geplanten Vorgaben zu Recyclingeffizienzen auf Rohstoffebene sehr klare Anforderungen an mögliche Prozesse. Das Metall Lithium, welches aktuell häufig gar nicht oder nur zu kleinen Anteilen aus den Batterieschrotten wiedergewonnen wird, steht dabei unter anderem im Fokus. Bis 2025 soll eine Rückgewinnungseffizienz von 65%, bis 2030 von 70% erreicht werden. Für Kobalt, Nickel und Kupfer soll die Vorgabe von 90% in 2025 auf 95% in 2030 ansteigen. Damit werden auch klare Anforderungen an die Anlagentechnik gestellt, welche eine möglichst verlustfreie und hocheffiziente Prozessführung gewährleisten muss.

Weitere Vorschläge wie die Kennzeichnungspflicht zu CO₂-Fußabdruck und enthaltenen Materialien ("Battery Passport") adressieren zwar stärker die Produktions- und Inverkehrbringungsseite des Batteriekreislaufs, könnten sich aber dennoch auch auf das Recycling und die Anlagentechnik auswirken, falls Sortierung und Behandlung durch entsprechende Kennzeichnungen erleichtert werden.

Der Regulierungsvorschlag gibt in vielen Fällen ein eindeutiges Mengen- und Quotengerüst vor. Nicht spezifiziert wird jedoch der Ort des Recyclings selbst. So ist für die Erfüllung der Rezyklatquoten z. B. unerheblich, ob der Recyclingprozess innerhalb oder außerhalb Europas stattgefunden hat. Die Kennzeichnung des CO₂-Fußabdrucks, bzw. die Einführung eines maximalen CO₂-Fußabdrucks ab 2027 nimmt demgegenüber indirekt Einfluss auf die globalen Wertschöpfungsketten, da sich lange Logistikpfade in diesem Punkt negativ auswirken würden.

Das Verfahren zur Umsetzung des Regulierungsvorschlags ist noch im Gange und bedarf noch einiger Schritte. Neben der Weiterführung des Gesetzgebungsprozesses im Europäischen Parlament und dem Europäischen Rat muss die Regulierung am Ende in nationales Recht umgesetzt werden.

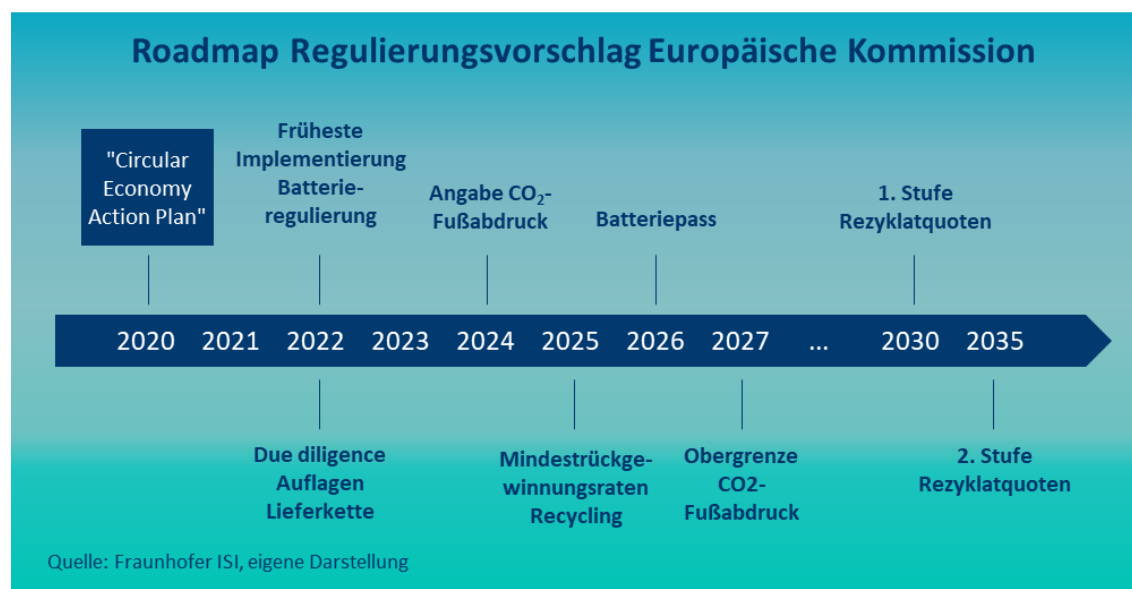


Abbildung 1: Roadmap zur Umsetzung der Batterieregulierungsmaßnahmen nach aktuellem Kommunikationsstand der Europäischen Kommission [EU2021] (eigene Darstellung).

Weitere bestehende Regulierungen wie das „Bundes-Immissionsschutzgesetz“ (BImSchG [BImSchG2021]) oder die „Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft“ (TA Luft [Luft2002]) besitzen keinen batteriespezifischen Bezug, geben jedoch klare Anforderung an Umweltauflagen wie Schadstoffausstoß und somit an die Ausgestaltung von Recyclingprozessen.

Konkret betrifft dies Grenzwerte für die Immission von Stäuben, welche zum Beispiel in der Zerkleinerung von Batterien und Batteriekomponenten entstehen können, sowie für Säuren wie Fluorwasserstoff (HF), welches bei der Reaktion von Elektrolytbestandteilen mit Wasser entstehen kann. Je nach eingesetztem

Recyclingprozess (siehe Kapitel 3.1) können sich weitere Auflagen für die Verwendung von Prozesschemikalien wie Lösungsmitteln ergeben.

Viele der Gesetze und Vorgaben folgen der „Richtlinie 2010/75/EU über Industrieemissionen“, welche auf die Vereinheitlichung von Umweltstandards innerhalb der EU abzielt. Gegenüber dem vorgeschlagenen Regulierungsrahmen der Europäischen Kommission zum Batterierecycling, welcher als „regulation“ in bindendes EU Recht übergehen könnte, können somit Unterschiede in der nationalen Umsetzung der Richtlinie bestehen. Dies betrifft ebenfalls die bisherige Batteriedirektive, welche die Verantwortung für den gesetzlichen Rahmen den Mitgliedsländern überlässt.

1.4. Wertpotenzial

Der Materialwert von Batterien und damit das Wertpotenzial, welches durch ein Batterierecycling gehoben werden kann, ist durch die jeweils verwendeten Batterietechnologien gegeben. Sowohl das Design von Batteriepacks und Modulen als auch die Batteriezellchemie haben durch die verwendeten Rohstoffe starken Einfluss auf den Restwert.

Im Batteriepack für Elektrofahrzeuge sind besonders strom- und wärmeleitende Kupferelemente von hohem Wert, sowie Gehäusestrukturen aus Aluminium oder anderen Metallen. Demgegenüber stehen Kunststoffkomponenten sowie Kleber und Schäume, welche teilweise nur mit hohem Aufwand recycelt werden können und selbst keinen hohen Materialwert besitzen. Laut Untersuchungen des Argonne National Lab [Dai2018] setzen sich heutige Batteriepacks (ohne die Batteriezellen) vor allem aus großen Masseanteilen Aluminium, Stahl und Kupfer zusammen (etwa 40 kg Aluminium, 2 kg Stahl und 1,4 kg Kupfer für ein BEV Pack mit 70 kWh).

Der Materialwert von Batteriezellkomponenten ist sehr viel stärker technologie- und damit auch anwendungsabhängig. Neben Aluminium- und Kupferfolien für die Strom- und Wärmeleitung tragen die verwendeten Kathodenmaterialien einen wesentlichen Materialwert.

Im Bereich mobiler Elektronikanwendungen kommen dabei häufig Lithium-Kobalt-Schichtoxide (LiCoO_2 , „LCO“) zum Einsatz. Aufgrund ihrer guten Eigenschaften hinsichtlich Zyklenfestigkeit und Schnellladefähigkeit sowie aktueller Entwicklungen, welche den Betrieb mit hohen Zellspannungen zulassen, sind die Materialien trotz hoher Kosten weiterhin für den Elektronikbereich hochattraktiv. Aufgrund der vergleichsweise hohen Metallpreise von Lithium (etwa 40 €/kg) und Kobalt (zwischen 25 und 34 €/kg) besitzt z. B. eine typische Smartphone-Batterie mit

10 Wh einen Restmaterialwert von 0,4 €. In Anwendungen aus dem Bereich Power Tools und Haushalt werden hingegen häufig Lithium-(Nickel, Kobalt, Aluminium)-Oxid Mischverbindungen ($\text{Li}(\text{Ni},\text{Co},\text{Al})\text{O}_2$, „NCA“) eingesetzt. Trotz eines im Vergleich zu Smartphones deutlich größeren Akkus von z. B. 50 Wh beträgt der Restmetallwert aktuell etwa 1,1 € (und somit relativ auf die Größe gesehen deutlich weniger), was den im Vergleich zu Kobalt deutlich niedrigeren Preis von Nickel (10 €/kg) und Aluminium (1,4 €/kg) widerspiegelt.

Neben NCA werden in Elektrofahrzeugbatterien weitere Mischoxide der Gruppe Lithium-(Nickel, Mangan, Kobalt)-Oxid („NMC“) eingesetzt. Der Trend der letzten Jahre folgte einer Erhöhung des Nickelanteils bei gleichzeitiger Senkung der Kobalt- und Mangananteile, um einerseits die Materialkosten zu senken und andererseits höhere Energiedichten auf Zellebene zu ermöglichen. Aktuell kommen Batterien mit einem Nickelanteil von 60 bis 80% unter den Übergangsmetallen zum Einsatz. Für ein typisches Fahrzeugbatteriepack mit 70 kWh liegt damit der Restmetallwert bei etwa 1.300 €.

Die Roadmaps verschiedener OEMs und Zellhersteller deuten auf den Einsatz zukünftig noch nickelreicherer Materialien hin. So plant etwa Tesla [Presse2020a], Zellen mit einem Ni-Gehalt von 90% für seine Model Y-Fahrzeuge in China zu verwenden. LGES sowie SKI haben angekündigt, Zellen auf Basis von Materialien mit einem Co-Gehalt von lediglich 5% zu entwickeln [Presse2020b], der chinesische Zellhersteller SVolt plant sogar den kompletten Verzicht auf Kobalt, was im Umkehrschluss höchste Nickelanteile erfordert [Presse2020c]. Der Materialwert derartiger Fahrzeugbatterien dürfte sich also nochmals leicht verringern.

Parallel zum Einsatz der NMC-Schichtoxide haben im letzten Jahr mehrere europäische Automobilhersteller Interesse an der Verwendung von Lithium-Eisen-Phosphat-basierten Batterien (LiFePO_4 , „LFP“) für zukünftige Elektrofahrzeuge im Niedrigpreissegment geäußert [Presse2021a]. Bisher wurde das Material vor allem durch chinesische OEMs eingesetzt, könnte damit jedoch eine breitere globale Marktdurchdringung erfahren. Der Grund für diese Entwicklung sind Kostenvorteile auf Batteriepack-Ebene, die sich aus den niedrigen Kosten der LFP-Zellen ergeben, aber auch aus ihren guten Sicherheitseigenschaften, die eine direkte Integration von großvolumigen Zellen in das Batteriepack ermöglichen. Diese so genannten "cell to pack"-Konzepte [Presse2020d] verzichten auf den Zwischenschritt der Modulverpackung, was die Komplexität der Produktion reduziert und gleichzeitig die Energiedichte auf Packebene erhöht. Obwohl die Gesamtenergiedichte auf Packebene noch nicht mit NMC- oder NCA-basierten

Batterien vergleichbar ist, könnte das Konzept für kleinere Fahrzeuge mit begrenzter Reichweite sinnvoll sein.

Die Rückgewinnung von Eisen aus LFP-Batteriekathoden ist aus wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll, womit nur Kupfer, Aluminium und Lithium als Wertträger in gebrauchten Batterien verbleiben. Bezogen auf ein 70 kWh Batteriepack beträgt der Restmetallwert einer LFP-Batterie nur etwa 600 €.

1.5. Status Quo: Batterierecycling in Europa und China

Bereits heute engagieren sich zahlreiche Akteure in Europa (und auch in anderen Regionen der Welt, insb. Asien) im Bereich LIB-Recycling. Die Mehrzahl der in Europa in Betrieb befindlichen oder entstehenden Anlagen sind Pilotanlagen und zielen auf die Skalierung neuer Recyclingverfahren für die großindustrielle Nutzung ab. Die geplanten Recyclinganlagen entstehen vor sehr unterschiedlichen Kontexten.

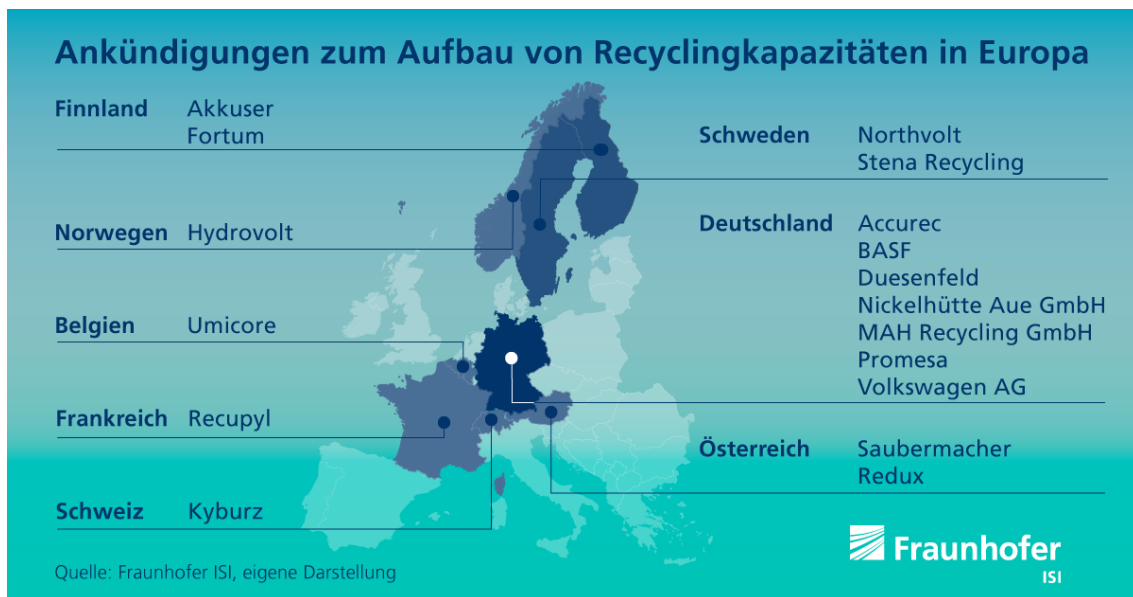


Abbildung 2: Ankündigungen zum Aufbau von Recyclingkapazitäten in Europa (eigene Darstellung).

So befinden sich unter den Akteuren sowohl technologiegetriebene Start-ups, welche neue Prozesse in die Anwendung bringen, als auch Konsortien oder Akteure aus der Batterieproduktion oder -anwendung, die die Verwertung eigener Abfallströme als Business Case im Fokus haben. Die Diversität der Recyclingprojekte

spiegelt den frühen Stand der Marktentwicklung wider, gleichzeitig aber auch die Wichtigkeit, die neben der Politik auch die Industrie dem Thema beimisst.

Abbildung 2 verortet einige der operativen oder konkret geplanten Recyclinganlagen in Europa. Die angekündigten Recyclinganlagen entsprechen einer Gesamtkapazität von 33 Kilotonnen pro Jahr (Summe der bekannten bzw. angekündigten Kapazitäten). Zusätzlich zu den gezeigten Anlagen gibt es zahlreiche Forschungsprojekte sowie Vorhaben, zu welchen noch keine Standortinformationen verfügbar sind.

Auch im Vergleich zu Asien (und hier besonders zu China) muss die Recyclingindustrie in Europa als eher jung eingestuft werden. Laut Medienberichten [Presse2021b] lag das Recyclingvolumen von LIB in China in den letzten Jahren bereits im Bereich hoher zweistelliger Kilotonnen pro Jahr und damit in einer Größenordnung, die Europa vermutlich erst in den nächsten Jahren erreichen wird (siehe auch Abschnitt 2.2). Die chinesische Recyclingindustrie profitiert dabei nicht nur von der Größe Chinas als Batteriemarkt und damit vom Rücklauf hoher Mengen gebrauchter LIB, sondern ebenso von der Rolle Chinas als weltweit größter Batteriematerial- und Zellproduzent. Der frühe Zugang zu großen Mengen gebrauchter Batterien, flankiert von zum Teil hochambitionierten regulatorischen Vorgaben [Presse2020e, Wang2020, Melin2021], haben zu einer schnellen Vergrößerung der chinesischen Industrie geführt. So implementiert die chinesische Regierung seit einigen Jahren zunehmend Regeln, die insbesondere die Hersteller von Elektrofahrzeugen beim Recycling in die Pflicht nehmen. Dies betrifft z. B. den Aufbau von Recyclingnetzwerken, sodass zumindest die Sammlung und temporäre Lagerung der Batterien in Regionen mit hohen Zulassungszahlen gewährleistet ist [Presse2019]. Die Maßnahmen der Regierung unterstützen dabei die Offenlegung relevanter Informationen zur Batteriebewertung und Batteriedemontage, z. B. durch den Informationsaustausch zwischen Zellhersteller und Fahrzeughersteller. Ebenso sollen lokale Gebrauchtwagenhändler und Schrotthändler in die Netzwerke miteinbezogen werden. Auch für die Rückgewinnungsraten der Verfahren wurden hohe Zielwerte von 98% für Ni, Co und Mn, bzw. 85% für Li vorgegeben [Li2020], welche jedoch auf das Gesamtsystem Batterie bezogen aus technologischer Sicht sehr herausfordernd wirken. Eine klare Systemgrenze setzt die entsprechende Regulierung nicht. Insgesamt wird die Summe der Regulierungsvorschriften in China noch als lückenhaft beschrieben, da der Fokus vor allem auf die Rohstoffsicherung und die Verhinderung einer unsachgemäßen Entsorgung der Batterien gelegt sei, was in China in der Vergangenheit problematisch war [Presse2021c]. Der ökologische Fußabdruck der Verfahren selbst steht derweil noch nicht im Vordergrund [Wang2020].

Um als Batterierecycler in China tätig werden zu können, muss eine Akkreditierung durch die Regierung vorliegen [Presse2021c]. So konnten sich bislang vor allem chinesische Akteure auf dem heimischen Markt etablieren. Unter den großen Playern setzt z. B. die Firma Shenzhen Highpower Technology auf eine Kombination aus mechanischem, pyro- und hydrometallurgischem Prozess [Highpower2021]. Brunp, eine Tochterfirma des Zellherstellers CATL, setzt ebenfalls auf eine hydrometallurgische Route mit, nach eigenen Angaben, höchsten Recyclingeffizienzen von 99% für Ni, Co und Mn, welche den Vorgaben der chinesischen Regulierung folgen [Li2020]. Das Unternehmen soll bereits über ein Netzwerk außerhalb Chinas in Korea, Japan, Taiwan und den USA verfügen [Brunp2021]. Während Brunp selbst eine Recyclingkapazität von jährlich 6 Kilotonnen nennt, belaufen sich die Angaben von CATL auf 120 Kilotonnen pro Jahr [CATL2021]. Ob damit tatsächlich Kapazitäten im Sinne einer stofflichen Aufbereitung gemeint sind, ist nicht bekannt.

2. Quantifizierung des Batterierecyclings

Zur Quantifizierung möglicher zukünftiger Recyclingvolumina in Europa wurde ein Material- und Wertstrommodell des Fraunhofer ISI genutzt, welches das Batterieleben vom Ressourcenbedarf bei der Herstellung, über die Nutzung in verschiedenen Anwendungen, bis hin zum Recycling beschreibt. Als Eingangsgrößen dienen Technologie- und Marktprognosen sowie Annahmen zu Anwendungs- und Batterielebensdauer und Handelsströmen.

2.1. Batterienachfrage in Europa

Zur Beschreibung des Markthochlaufs von Elektrofahrzeugen wurde ein Modell des Fraunhofer ISI genutzt. Das Fraunhofer ISI xEV-Modell ist ein regional (Länderebene) konfigurierbares Markthochlaufmodell für elektrische Antriebstechnologien, welches auf der Fortschreibung bisheriger Neuzulassungszahlen von Fahrzeugen beruht. Das Modell unterscheidet zwischen drei verschiedenen PKW- (Personenkraftwagen) und drei verschiedenen NFZ- (Nutzfahrzeuge) Kategorien sowie zwischen den Antriebstechnologien BEV (batterieelektrisch), PHEV (Plug-in-Hybrid), HEV (Hybrid) und ICE (Verbrenner). Die dahinterstehende Datenbank umfasst Informationen des Portals Marklines [Marklines2021], der European Automobile Manufacturers Association [ACEA2021], des European Alternative Fuels Observatory [EAFO2021] und vieler weiterer Markt- und Technologiestudien.

Unter Anwendung von Bass-Diffusions-Kurven für die Marktentwicklung von PKW ergibt sich im Jahr 2040 im Rahmen eines Minimal- und Maximal-Szenarios für die Marktanteile batterieelektrischer Fahrzeuge eine Spannweite von 45 bis 80% an den Neuzulassungen in Europa. Für Plug-in-Hybride beträgt das Ergebnis in beiden Szenarien <10%. Die aktuelle Studie „Antrieb im Wandel“ des VDMA [AiW2021] kommt hier auf ähnliche Zahlen.¹

Auf Basis heutiger Zulassungszahlen [EAFO2021, Marklines2021] ist für elektrische Nutzfahrzeuge (BEV, PHEV) mit einer gegenüber PKW verzögerten Marktdiffusion zu rechnen. Die Neuzulassungszahlen für elektrische leichte Nutzfahrzeuge (LCV) lagen 2020 im europäischen Betrachtungsraum bei über 30.000 Stück (Gesamtmarkt inkl. Verbrenner vor Corona 1,8 Mio. Stück). Aufgrund wachsender Angebote (Modelle) ist in den nächsten Jahren jedoch mit einem deutlichen Marktwachstum elektrifizierter Fahrzeuge zu rechnen. Batterieelektrische schwere Nutzfahrzeuge

¹ Die „Antrieb im Wandel“-Studie prognostiziert für das Jahr 2040 in Europa Marktanteile von 40 – 74% für batterieelektrische Fahrzeuge und 0 – 11% für Plug-in-Hybride. [AiW2021]

(z. B. LKW) haben heute noch keine signifikanten Marktanteile. Unter den im Jahr 2020 über 200.000 neu zugelassenen schweren Nutzfahrzeugen waren lediglich etwa 400 Fahrzeuge batterieelektrisch angetrieben. Elektrobuss-Neuzulassungen sind global gesehen nach wie vor stark an den chinesischen Markt gekoppelt. Die Zulassungszahlen in Europa steigen jedoch deutlich an (von etwa 500 Stück im Jahr 2017 auf etwa 2.000 Stück im Jahr 2020), sodass zukünftig mit einer signifikanten Marktdurchdringung zu rechnen ist. Die gesamte Marktgröße (inkl. Verbrenner) in 2020 lag bei 27.000 Stück.

Die Modellierungsergebnisse für schwere NFZ prognostizieren einen Marktanteil von 5 bis 20% im Jahr 2040. Leichte NFZ könnten Marktanteile zwischen 20 und 50% erreichen, für elektrische Busse belaufen sich die Prognosen aufgrund bereits heute guter Modellverfügbarkeit und Absatzzahlen auf 60 bis 85%. Die große Spannbreite der Prognoseergebnisse für leichte und schwere Nutzfahrzeuge und die damit verbundene Unsicherheit sind Ergebnis des heute sehr kleinen Marktvolumens und somit der Schwierigkeit, die zukünftige Marktdynamik einzuschätzen.

Neben elektrischen Fahrzeugen gibt es vielfältige andere Batterieanwendungen, mit denen bereits in der Vergangenheit nennenswerte Mengen an LIB in den europäischen Verkehr gekommen sind. Diese können aufgrund ihrer Vielzahl jedoch nicht durch zu den Fahrzeugen vergleichbare Modelle beschrieben werden. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden daher globale Prognosen verschiedener Marktanalysten [Avicenne2020, B32020, Frost2020, Roskill2020] auf den vermuteten Anteil für Europa heruntergerechnet [Markt2020]. Im Ergebnis wird für alle LIB-Anwendungen von einem deutlichen Marktwachstum ausgegangen. Während die Dynamik im Bereich bereits etablierter Elektronikanwendungen wie Smartphones und Laptops eher abflacht, deuten die Prognosen auf hohe Wachstumsraten in den Bereichen Haushalts- und Power-Anwendungen, stationäre Energiespeicher und Mikromobilität wie e-Bikes und e-Scooter hin.

Für den europäischen LIB-Gesamtmarkt kann bis 2030 von einem Marktvolumen von 400 bis 900 GWh ausgegangen werden (Abbildung 3; siehe auch [Michaelis2020] für das Minimal- und Maximalszenario des Fahrzeugbatteriemarkts). Bis 2040 könnte dieses nochmals auf 800 bis 1.300 GWh ansteigen. Insbesondere der Zeitraum um 2030 ist dabei mit größeren Unsicherheiten behaftet, da hier von der größten Dynamik der Marktdiffusion von Elektrofahrzeugen ausgegangen werden kann.

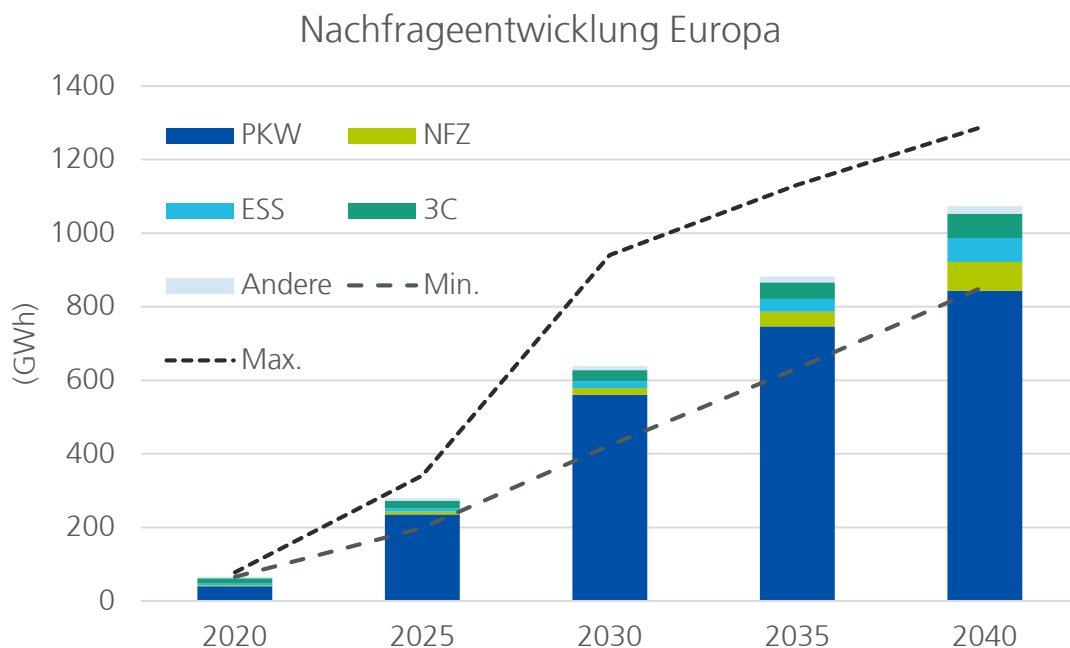


Abbildung 3: Prognose zur Nachfrageentwicklung von LIB in Europa bis 2040 in den Segmenten PKW, Nutzfahrzeuge (NFZ), Stationäre Speicher (ESS), „Computing, consumer, communication“ (3C) und anderen im Min.-, Max.- und Basis-Szenario (die Balken stellen das Basis-Szenario dar).

2.2. Batterienutzung und Lebensende

Für die meisten der betrachteten LIB-Anwendungen, insbesondere aber für Elektrofahrzeuge, liegen heute noch keine statistischen Daten zur Batterielebensdauer vor. Neben der Beschreibung des Markthochlaufes selbst ist dieser Parameter aber für die Beschreibung einer möglichen Entwicklung der Recyclingindustrie von höchster Bedeutung. Typische Garantieangaben auf die Batterie von Elektroautos lauten etwa auf 10 Jahre Nutzungsdauer und 100.000 bis 200.000 km Laufleistung. Die Nutzung von LIB auch weit über 10 Jahre hinaus wurde in anderen Anwendungen bereits demonstriert. Wie hoch die tatsächliche Lebensdauer von Fahrzeugbatterien und auch von Batterien in anderen LIB-Anwendungen sein wird, dürfte stark durch das individuelle Lade- und Nutzungsverhalten beeinflusst sein, weshalb von einer breiten Streuung auszugehen ist. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde für Elektrofahrzeugbatterien von einer Mindestlebensdauer von 10 Jahren, bzw. einer mittleren Lebensdauer von 13 bis 15 Jahren ausgegangen (ebenso für stationäre

Speicher). Die Nutzung in einer Zweitanwendung (2nd-life) wurde für 10 bis 20% der Fahrzeuge mit einer mittleren Dauer von 6 Jahren berücksichtigt.

Auch für die enorme Vielfalt der LIB-Kleinanwendungen aus den Elektronik-Unterhaltungs-, Haushalts- und weiteren Anwendungen lässt sich keine einheitliche Lebensdauer angeben. Relevant für die Beschreibung von Recyclingvolumina ist zudem nicht nur die tatsächliche Lebensdauer, sondern der Zeitraum zwischen Inverkehrbringung und Zuführung zu einem LIB-Sammelsystem, welcher, besonders im Fall kleiner Anwendungen, deutlich länger sein kann. Entsprechend wurde eine mittlere effektive Lebensdauer von 8 Jahren für diese Anwendungen angenommen.

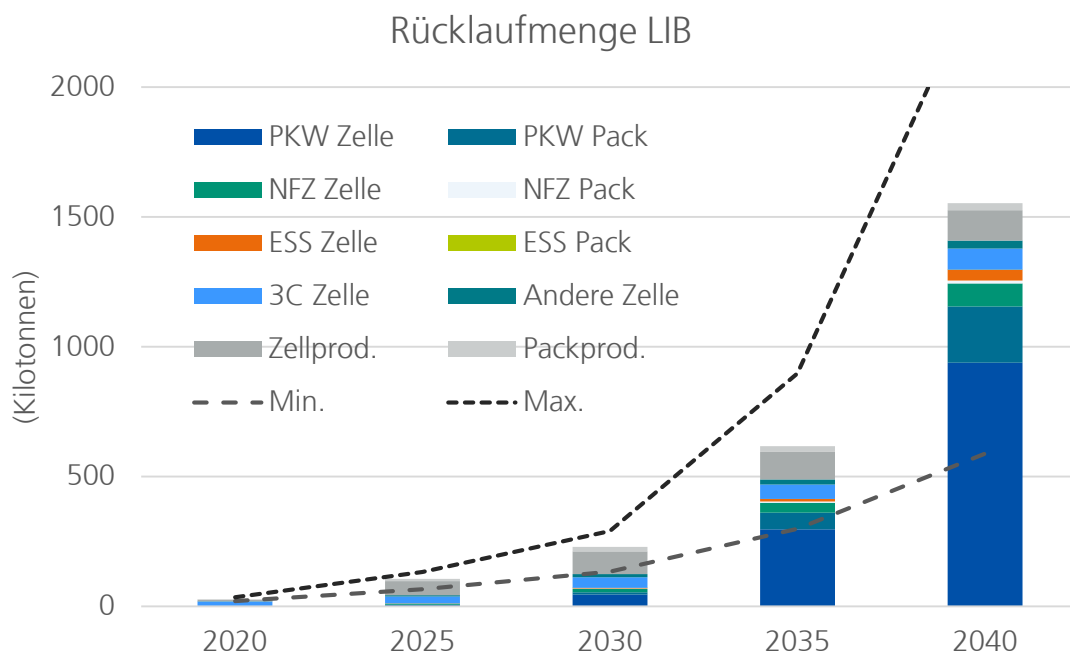


Abbildung 4: Prognose zur Rücklaufmenge gebrauchter LIB aus unterschiedlichen Anwendungen (PKW, Nutzfahrzeuge: NFZ, stationäre Speicher: ESS, „Computing, consumer, communication“: 3C) und von Zellproduktionsschrotten in ein europäisches Recycling. Die Balken bilden das Basis-Szenario ab.

Damit ergibt sich eine zeitliche Entwicklung für den Rücklauf gebrauchter Batterien in Sammelsysteme. Gerade im Fahrzeugbereich kann Europa jedoch nicht als abgeschlossener Wirtschaftsraum betrachtet werden, da zumindest Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor häufig nach einer ersten Nutzung exportiert werden. Wie sich dieser Gebrauchtmärkte für Elektrofahrzeuge entwickeln wird, ist heute noch unklar, da neben den Fahrzeugen selbst auch die Abdeckung durch

Ladeinfrastruktur in möglichen Zielländern entscheidend ist. Um Exporteffekte sowohl für Fahrzeuge als auch für Batterieschrotte insgesamt zu berücksichtigen, wurden die in [NPM2021a] näher erläuterten Annahmen genutzt.

Das Ergebnis aus Nachfrageentwicklung, Nutzungsdauern und Exporteffekten ist in Abbildung 4 in einem Minimal- bzw. Maximal- sowie dem Basis-Szenario gezeigt. Demnach könnten dem europäischen Recycling bis 2040 jährlich etwa 1.500 Kilotonnen (Szenarienbreite 600 bis 2.500 Kilotonnen) gebrauchte LIB (inkl. den Komponenten der Batteriepacks) zugeführt werden. Einen großen Anteil daran nehmen Fahrzeugbatterien ein. Gerade in den kommenden Jahren bis etwa 2025 dürften gebrauchte LIB aus Kleinanwendungen, insbesondere Elektronik, jedoch noch dominierend sein.

Ein wesentlicher Anteil der Recyclingmengen der kommenden Jahre sind Produktionsausschüsse aus der LIB-Zellfertigung.

2.3. Zellproduktion und Ausschuss

Neben den bestehenden Zellfertigungen europäischer und asiatischer Akteure in Europa haben zahlreiche weitere Unternehmen angekündigt Kapazitäten aufzubauen. Teilweise handelt es sich dabei um bereits laufende Projekte im Aufbau, teilweise auch um Ankündigungen ohne Nennung eines konkreten Standorts. Aktuelle Hochrechnungen belaufen sich bis 2030 auf mindestens 380 GWh, bzw. unter Berücksichtigung von optionalen Ankündigungen und Akteuren ohne vorhandene Produktionserfahrung auf bis zu 700 GWh. Durch Extrapolation dieser Trends könnten bis 2040 auf europäischem Boden 700 bis 1.200 GWh Produktionskapazität in Betrieb sein [NPM2021a, NPM2021b].

Es ist davon auszugehen, dass die Ausschussraten in der Hochlaufphase neuer Zellfabriken noch deutlich über denen einer optimierten und eingefahrenen Produktion liegen dürften [Michaelis2020, Bernhart2020]. Dies betrifft insbesondere die Jahre bis 2030, in denen einige Projekte von Herstellern umgesetzt werden könnten, die heute noch über wenig Erfahrungen in der industriellen Zellproduktion verfügen. Ursache ist die komplexe und mehrstufige Prozesskette bei der LIB-Fertigung, in welcher sich Ausschussraten der Einzelschritte multiplizieren. Der Großteil des Materialeinsatzes findet bereits zu Beginn der Fertigung, beim Mischen und Elektrodenbeschichten, statt. Fehler in diesem oder späteren Produktionsschritten können in Bezug auf das eingesetzte Material zu zweistelligen Ausschussraten führen. Für die Jahre nach 2030 wird von einem Übergang zu einer hocheffizienten Produktion ausgegangen, wobei

prozessinhärente Abfälle, wie Abschnitte, stets zu einem gewissen Schrottaufkommen führen werden, auch wenn dieses nicht als Ausschuss im engeren Sinne bezeichnet werden kann.

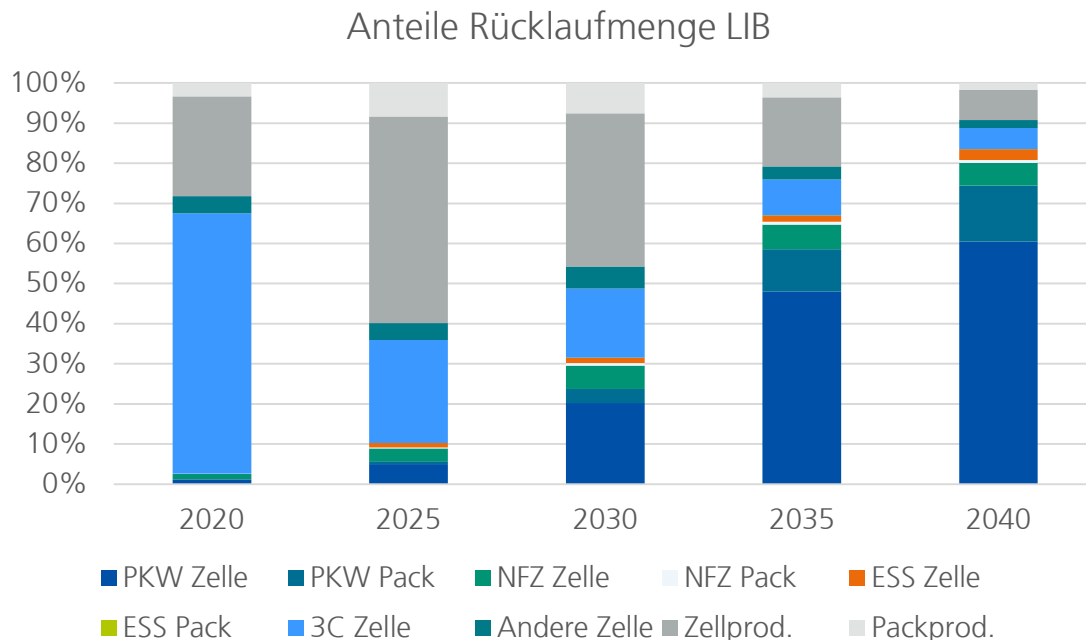


Abbildung 5: Prognose zu den Anteilen der Rücklaufmenge gebrauchter LIB aus unterschiedlichen Anwendungen (PKW, Nutzfahrzeuge: NFZ, stationäre Speicher: ESS, „Computing, consumer, communication“: 3C) und von Zellproduktionsschrotten im Basis-Szenario.

Im Gegensatz zu gebrauchten Batterien aus Anwendungen fallen diese Neuschrotte an definierten Orten an und könnten leicht einem lokalen Recycling zugeführt werden, weshalb nicht von nennenswerten Exporten aus Europa heraus ausgegangen wird.

Es ist davon auszugehen, dass Produktionsschrotte bis etwa 2030 mehr als 50% der dem europäischen Recycling zugeführten LIB-Materialien ausmachen werden (Abbildung 5). Mit dem vermehrten Erreichen des Lebensendes heute und in den nächsten Jahren zugelassener Elektrofahrzeuge wird sich der relative Anteil der Produktionsschrotte deutlich verringern.

2.4. Rezyklate und Materialwert

Mit den in Abschnitt 3.1 beschriebenen Recyclingverfahren lassen sich für einige Metalle teils hohe Rückgewinnungsquoten erreichen. Unter Annahme entsprechender Effizienzen² übersetzen sich die in Abbildung 4 gezeigten Rücklaufmengen für gebrauchte Batterien und Ausschüsse der Batterieproduktionen in Europa in hohe Rezyklatmengen (Abbildung 6).

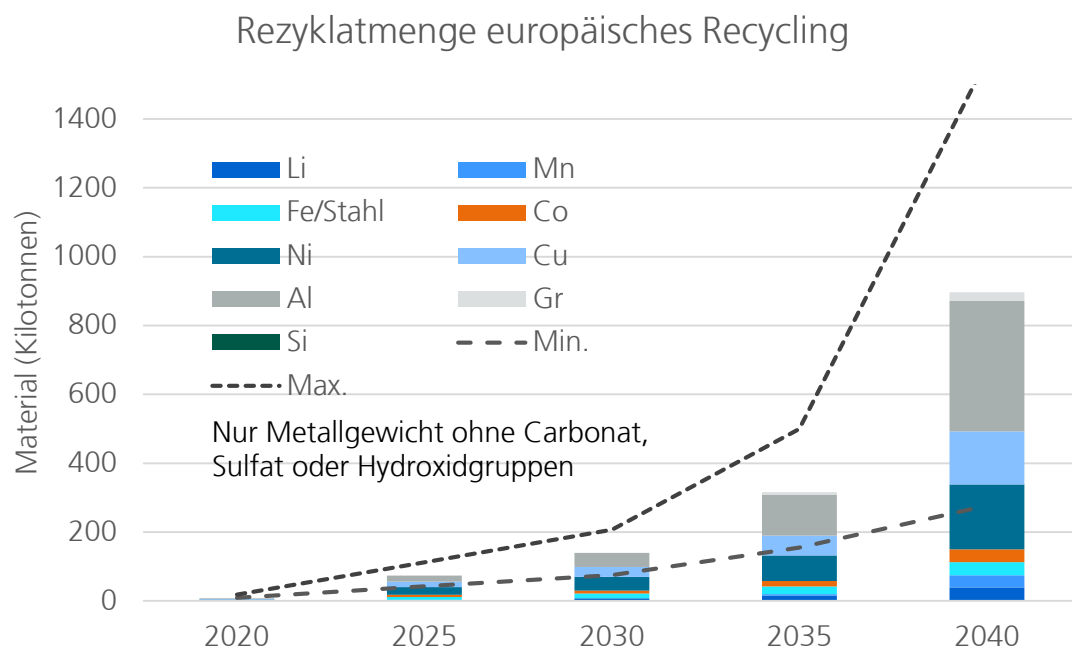


Abbildung 6: Entwicklung von Rezyklatmengen aufgeteilt nach unterschiedlichen Metallen und Rohstoffen bis 2040. Die Balken bilden das Basis-Szenario ab.

Im Jahr 2030 dürften jährlich zwischen 100 und 200 Kilotonnen getrennte und aufbereitete Metalle, insbesondere Kobalt, Nickel, Kupfer und Aluminium, aus einem europäischen Recycling in die Industrie zurückfließen. Im Jahr 2040 dürfte die Menge auf jährlich etwa 900 Kilotonnen (Szenarienbreite 300 bis 1.500

² Anstieg typischer Recyclingeffizienzen von heute 75 bis 90% für Kobalt, Nickel und Kupfer sowie 66% für Aluminium auf 85 bis 90% für Lithium, 90 bis 95% für Kobalt, Nickel, Kupfer und 90% für Aluminium im Jahr 2040. Das Recycling von Graphiten und Kohlenstoffen ist perspektivisch für Zellproduktionsausschüsse denkbar und wird bis 2040 mit 10 bis 50% Effizienz angenommen.

Kilotonnen) anwachsen und in Anbetracht der Regulierungsvorhaben und der zur Verfügung stehenden Verfahren ebenso Lithium und weitere Komponenten betreffen.

Verglichen mit dem Bedarf der europäischen Zellproduktionen könnte bis 2040 über 40% des Kobaltbedarfs und über 15% des Bedarfs an Lithium, Nickel und Kupfer für neue Batteriezellen gedeckt werden.

Der Wert der recycelten Materialien ist schwer zu prognostizieren, da viele der Rohstoffpreise starken Schwankungen unterworfen sind. Unter Annahme eines konstanten Preisniveaus, welches den mittleren Rohstoffpreisen im Jahr 2020 entspricht, kann von einer Rezyklatmarktgröße von 5,5 Mrd. € (Szenarienbreite 2 bis 10 Mrd. €) im Jahr 2040 ausgegangen werden (Abbildung 7). Können die Materialien aus den Recyclingverfahren sogar in Batteriequalität bereitgestellt werden, so sind ggf. noch höhere Erlöse aus den Rezyklaten erzielbar.

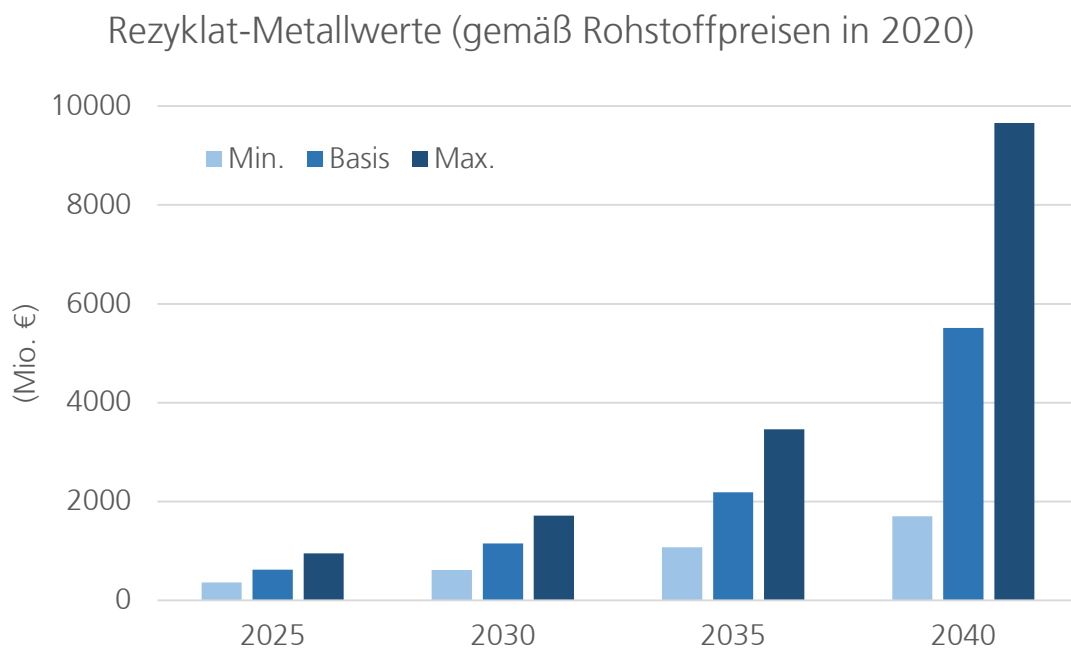


Abbildung 7: Materialwert der Rezyklate im Min.-, Max.- und Basis-Szenario unter Annahme mittlerer Rohstoffkosten des Jahres 2020.

3. Recyclingtechnologien und Marktentwicklung für den Maschinen- und Anlagenbau

3.1. Recyclingprozesse

Zahlreiche unterschiedliche Prozessrouten zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien existieren (Abbildung 8) [Doose2021]. Dabei können unterschiedliche Schritte wie Demontage, mechanische Zerkleinerung und Trennung, thermische Behandlung, Pyrometallurgie und Hydrometallurgie auf vielfältige Weise kombiniert werden [Buchert2020].

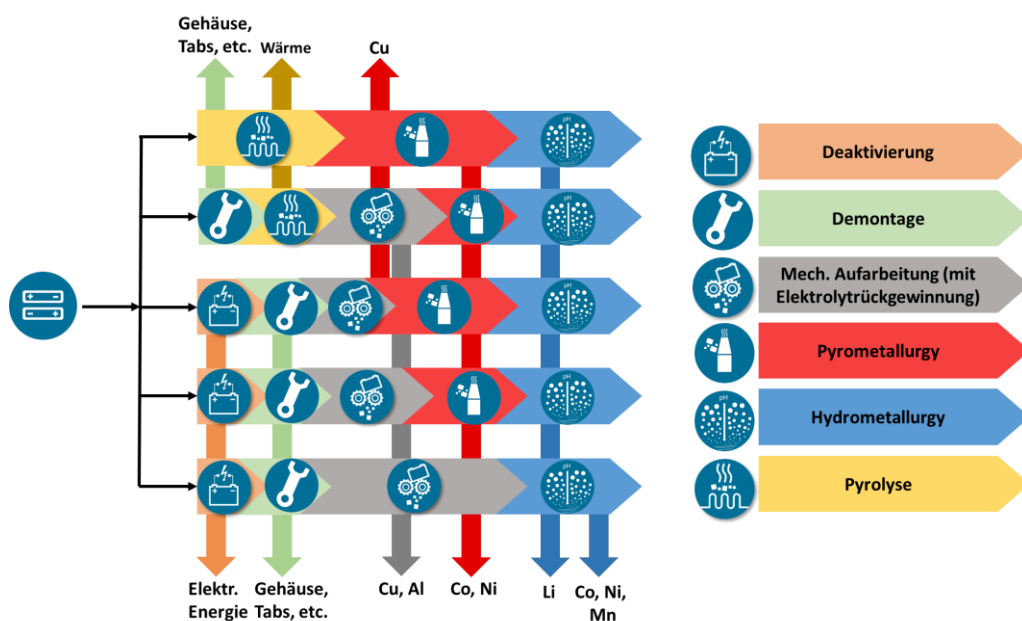


Abbildung 8: Mögliche Prozessrouten des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien. [Doose2021]

Über diese Prozessschritte des Recyclings hinaus sind Aspekte bezüglich Sammlung, Transport, Lagerung, Testung, Second-Life, Second-Use und Entladung hochrelevant. In dieser Kurzstudie werden jedoch lediglich die Recyclingtechnologien selbst, beginnend mit der Batteriepack-Demontage, betrachtet. Im Folgenden werden die relevanten Prozessschritte kurz beschrieben und die benötigten Anlagen aufgezählt. Die Darstellung ist dabei als beispielhaft zu erachten, da je nach konkretem Prozessablauf unterschiedliche Anlagen benötigt werden. Für ausführlichere Beschreibungen und Diskussionen zu den Technologien und Prozessrouten wird auf die entsprechende Literatur verwiesen [Martinez2019, Fan2020, Sommerville2021].

3.1.1. Demontage

Demontage-Prozess

Für Batterien aus Elektroautos ist bei allen gängigen Prozessrouten der erste Recyclingschritt die Demontage der Batteriepacks zu Batteriemodulen oder -zellen. Diese Demontage kann händisch, halb-automatisiert oder automatisiert erfolgen. Aktuell erfolgt die Demontage in der Regel noch manuell, da die Anzahl der Recyclingbatteriepacks noch relativ gering ist und die unterschiedlichen Bauformen eine Automatisierung erschweren. Im Rahmen des zunehmenden Aufkommens von Recyclingbatterien kann angenommen werden, dass eine ausschließlich manuelle Demontage mittel- und langfristig eine untergeordnete Rolle spielen wird.

Aktuell befinden sich automatisierte Demontageanlagen noch im Pilotstatus und es gilt noch zahlreiche Fragen zu klären: Wird eine (teil-)automatisierte Demontage speziell für Batteriepacks gewisser Bauformen (oder Hersteller) entwickelt, oder eher generalisierte Demontageroboter? Wie tief soll demontiert werden, was geht in die nächsten Recyclingschritte (z. B. mechanische Zerkleinerung)? Was ist wirtschaftlich sinnvoll? Wie ist der Zustand der gebrauchten Module?

Arbeitsschritte bestehen dann in der Erkennung (Scannen) des Packs, ggf. einem Entladungsschritt, Ablösen des Deckels (dabei sind Verschraubungen einem verschweißten Deckel zu bevorzugen, da das Laserschneiden eines verschweißten Deckels mit Sicherheitsrisiken einhergeht), Entfernen der Elektronik, Ableiter, Kühlelemente, Isolationen, etc. und schließlich das Lösen der Module/Zellen. Bei allen Prozessschritten liegt ein Fokus auf Sorgfalt und Risikominimierung, da die Beschädigung der Zellen große Sicherheitsrisiken nach sich ziehen kann. [Buchert2020, LithoRec2012, LithoRec2016]

Benötigte Anlagen zur Demontage

- Kamerasystem zur Erkennung und Identifizierung des Batteriepacks
- Demontageroboter, der das Batteriepack öffnet (schrauben, schneiden, fräsen), die unterschiedlichen Komponenten (Zellen, BMS) entnimmt und nach Material getrennt zum nächsten Schritt (oder in einen Container) bringt
- Förderbänder, die die Komponenten zum nächsten Schritt (Zellen) oder in die entsprechenden Container (Stahl-, Aluminium-Gehäuse, Kunststoffe aus Pack, BMS) bringen
- Ggf. Abluftreinigung, die austretende Gase und Stäube absaugt und reinigt.

3.1.2. Mechanischer Prozess

Mechanischer Prozess

Bei der mechanischen Prozessroute werden die demontierten Zellen (oder Module) zunächst mechanisch in einem Schredderprozess zerkleinert. Aufgrund der hohen Reaktivität der enthaltenen Komponenten muss dieser Prozess unter Vakuum, Schutzgasatmosphäre (Ar/N₂/CO₂), in flüssigem Stickstoff oder in Wasser/Salzlösung stattfinden, um zu stark exotherme Reaktionen zu verhindern. Außerdem müssen die entstehenden Gase gereinigt werden, da bei diesem Prozess giftige und ätzende Gase entstehen können.

Anschließend wird in der Regel eine Vakuum-Destillation leichtsiedender Bestandteile der Elektrolyten durchgeführt, die dann potenziell einer Weiter- oder Wiederverwendung zugeführt werden können. Um die restlichen Elektrolytbestandteile zu entfernen ist ein weiterer Trockenschritt notwendig. Darauf folgt die mechanische Auftrennung von Stahl, Aluminium und Kupferbestandteilen, sowie einem Gemisch aus Elektrodenmaterialien, Bindern, Additiven und Restbestandteilen des Elektrolyts (aufgrund seiner Graphitbedingten Farbe Schwarzmasse genannt). Die Trennung der Elektrodenmaterialien von den Elektrodenfolien ist in einem rein mechanischen Prozess nicht trivial, da der Binder für eine gute Haftwirkung der Elektrodenmaterialien an den Folien sorgt. Der Binder kann mit Lösungsmittel (z. B. NMP) aus der Masse herausgelöst und ggf. wiederverwendet werden. Dies ist prozesstechnisch aufwendig, führt aber zu einer besseren mechanischen Trennung der Elektrodenmaterialien von den Elektrodenfolien.

Optional kann eine thermische Behandlung der Batteriezellen durchgeführt werden, um die organischen Bestandteile pyrolytisch zu spalten. Dieser Schritt kann vor dem Zerkleinerungsprozess stattfinden, um die Zelle zu deaktivieren. In diesem Fall kann der Schredderprozess auch unter Umgebungsbedingungen durchgeführt werden. Alternativ kann die thermische Behandlung auch nach dem Schredderprozess stattfinden, um Elektrolyte und den Binder zu entfernen, wodurch die Ablösung der Schwarzmasse von den Elektrodenfolien erleichtert wird.

Aus ökologischer Sicht sind die hier beschriebenen mechanischen Prozessschritte als weniger kritisch anzusehen als die im folgenden beschriebenen Recyclingprozesse. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die beim Zerkleinerungsprozess austretenden Gase und Stäube entsprechend aus der Abluft gefiltert werden. Darüber hinaus hängt der ökologische Fußabdruck stark vom Einsatz bestimmter Prozessschritte ab. So sind optionale thermische Behandlungsschritte generell

energieintensiv und vergrößern den CO₂-Fußabdruck deutlich. Darüber hinaus tragen alle organischen Bestandteile (Elektrolytlösungsmittel, Kunststoffe), sowie der Graphit, die nicht stofflich recycelt werden und folglich thermisch verwertet (verbrannt) werden, zu einer Erhöhung des CO₂-Fußabdrucks bei. Allerdings ist ein stoffliches Recycling von organischen Bestandteilen meist wirtschaftlich uninteressant, so dass ökologische und ökonomische Interessen schwer in Einklang zu bringen sind, bzw. regulatorische Anreize erfordern.

Insgesamt hängt die ökologische Bilanz folglich stark von den eingesetzten Prozessschritten und dem Anteil der stofflich recycelten Bestandteile ab.

Benötigte Anlagen zum mechanischen Prozess

- Mechanische Zerkleinerungsanlagen (Schredder), die unter Vakuum, Schutzgasatmosphäre (Ar/N₂/CO₂), in flüssigem Stickstoff oder in Wasser/Salzlösung arbeiten
- Förderbänder
- Ggf. Vakuum-Destillieranlage zur Abtrennung niedrigsiedender Elektrolytbestandteile
- Ggf. Extrahieranlagen zur Flüssigphasenextraktion des Binders und der Elektrolyten
- Trocknungsanlagen
- Mechanische Trenn-/Sortieranlagen, z. B. Rütteltische, etc.
- Optional: Pyrolyseofen (Drehrohrofen)
- Abgasreinigungsanlage (für Pyrolyseschritt und/oder Schredderprozess)

3.1.3. Pyrometallurgischer Prozess

Pyrometallurgie-Prozess

Beim pyrometallurgischen Recyclingprozess werden die Batteriezellen/-module in einen Schachtofen gegeben. Die Zellen durchlaufen dabei verschiedene Temperaturbereiche in denen zunächst die organischen Bestandteile (Polymere, Binder, Elektrolyt) verdampft, pyrolysiert und energetisch genutzt werden [PEM2021].

Bei höheren Temperaturen werden dann die Metallverbindungen aufgeschmolzen und die Kobalt-, Nickel- und Eisen-Verbindungen zu Metallen reduziert. Aluminium und Graphit aus den Batterien dienen hierbei als Reduktionsmittel. Die aufgeschmolzenen Metalle (Co, Ni, Cu, Fe) bilden eine Legierung, die in einem nachgelagerten Schritt hydrometallurgisch aufgetrennt wird. Alle organischen

Bestandteile und das Graphit werden oxidiert und liefern einen Teil der benötigten thermischen Energie für den Prozess, gehen dabei aber wertstofflich verloren. Weitere Bestandteile, wie Aluminium und Manganverbindungen enden zusammen mit dem Lithium in der Schlacke. Das Lithium kann zu einem gewissen Anteil hydrometallurgisch aus der Schlacke zurückgewonnen werden [Dai2019]. Aktuell werden mögliche Rückgewinnungsquoten von 40 – 50% angegeben, die sich aber laut Experteneinschätzung potenziell auf 70 – 80% steigern lassen sollten.

Aus ökologischer Sicht sind die hier beschriebenen pyrometallurgischen Prozessschritte als eher kritisch anzusehen [Ciez2019]. Die hohen benötigten Temperaturen und die vollständige Verbrennung aller organischen Bestandteile, sowie des Graphits [Sommerville2021] führen zu einem hohen CO₂-Fußabdruck. Darüber hinaus geht auch das Aluminium, ein in der Herstellung sehr energieaufwändiges Metall, in die Schlacke über. Die Emission weiterer kritischer Stoffe kann durch entsprechende Abluftfilter unterbunden werden. Hier sind die gesetzlichen Anforderungen in der EU hoch, in anderen Teilen der Welt ist dies aber nicht zwingend der Fall, so dass im Falle schlechter oder fehlender Abgasreinigung die pyrometallurgische Prozessroute als noch deutlich kritischer eingestuft werden müsste.

Benötigte Anlagen zum Pyrometallurgie-Prozess

- Hochofen
- Förderbänder
- Abgasreinigungsanlagen
- Mechanische Zerkleinerungsanlage der Schlacke

3.1.4. Hydrometallurgie

Hydrometallurgie-Prozesse

Anschließend an die mechanischen und pyrometallurgischen Prozesse ist ein hydrometallurgischer Prozess notwendig, um die Aktivmaterialien in ausreichender Qualität aufzutrennen. Je nach Recyclingroute werden unterschiedliche Materialien hydrometallurgisch aufbereitet:

1. Hydrometallurgische Trennung von Co, Ni und Cu nach Pyrometallurgie:

Das Produkt des pyrometallurgischen Recyclingprozesses ist eine Legierung aus Co, Ni, Cu und Fe. Um diese Metalle zu trennen, werden sie in der Regel in Säure gelöst und durch Ausfäll-, Filter-, oder Lösungsmittel-extraktionsverfahren voneinander getrennt. Produkt sind Salze der Metalle mit hoher Reinheit.

2. Hydrometallurgische Aufbereitung der Schwarzmasse:

Die Schwarze Masse aus den mechanischen Verfahren besteht aus Co-, Ni-, Mn-, Fe- und Li-Verbindungen, sowie Graphit und ggf. (PVDF-)Binder. In der Regel werden in einem ersten Schritt die Metallverbindungen chemisch sauer gelöst und die nicht löslichen Bestandteile (Graphit und ggf. Binder) abfiltriert. Durch verschiedene Ausfäll-, Filter-, oder Lösungsmittlextraktionsverfahren werden anschließend die Metallsalze voneinander getrennt [LithoRec2012, LithoRec2016, PEM2021].

Aus ökologischer Sicht sind die hier beschriebenen hydrometallurgischen Verfahren als unkritischer einzuschätzen als pyrometallurgische Prozesse [Zhang2018]. Dies liegt unter anderem daran, dass keine hohen Temperaturen benötigt werden. Nicht unkritisch bei hydrometallurgischen Verfahren ist hingegen die Aufbereitung des Abwassers. Insgesamt hängt der ökologische Fußabdruck stark von den eingesetzten Verfahren ab.

Benötigte Anlagen zum Hydrometallurgie-Prozess

- Förderbänder
- Reaktionstanks zum chemischen Lösen und zum Ausfällen
- Filteranlagen
- Lösungsmittlextraktionsanlage
- Anlage für Membranelektrolyse (EMP)
- Anlage zur Elektrodialyse mit bipolarer Membran (EDBM)
- Rohrleitungen zur Verbindung der einzelnen Anlagen
- Pumpen
- Wasseraufbereitungsanlage

3.1.5. Weitere Anlagen und Komponenten

Über die eigentlichen Recyclinganlagen hinaus spielen weitere unterstützenden Technologien eine große Rolle. Beispielhaft kann hier die Abluftreinigung und die Automatisierung genannt werden. Beim Recycling der Batterien fallen z. B. bei thermischen Pyrolyseschritten, oder auch beim mechanischen Schreddern giftige und ätzende (teils fluorhaltige) Gase sowie Stäube an, die aus der Abluft gefiltert werden müssen. Die Abgasaufbereitung spielt entsprechend eine zentrale Rolle beim Recycling, um die in der EU geltenden Abgasregularien zu erfüllen.

Darüber hinaus spielen die Automatisierung und Digitalisierung von industriellen Prozessen allgemein und auch im Bereich des Recyclings eine zunehmende Rolle. Insbesondere bei den Bereichen Sortieren, Demontage und Entladen gibt es hier ein

großes Potenzial. Darüber hinaus ist die Digitalisierung im Bereich der Logistik (Tracking der Batterien) von großer Bedeutung, besonders wenn die Prozesse skaliert werden. Aber auch die Vernetzung der eigentlichen Recyclingprozesse birgt ein nicht unerhebliches Potenzial, um die Prozesse effizienter zu gestalten.

3.1.6. Exkurs: Anforderungen zukünftiger Zelltechnologien

Feststoffbatterien und weitere alternative Batterietechnologien befinden sich aktuell in der Entwicklung und Erprobung, um mittelfristig ergänzend zu konventionellen LIB die Nachfrage nach Speicherkapazität unterschiedlichster Anwendungen decken zu können [Michaelis2021, Thielmann2017]. Unter der Vielzahl aktuell beforschter Technologien finden sich sowohl Li-basierte Systeme als auch Batterien, welche z. B. Na-, Mg- oder andere Ionen zum Ladungstransport nutzbar machen. Eine mögliche Etablierung solcher Batterietechnologien im Markt würde somit gegenüber konventionellen LIB deutlich veränderte Anforderungen an Recyclingprozesse stellen, da sich neben den Aktivmaterialien selbst auch der Aufbau von Zellen, Modulen und Packs verändern könnte. Was deren Kommerzialisierung und Einsatz in Elektrofahrzeugen angeht, so könnten aus der Gruppe alternativer Batterietechnologien insbesondere Feststoffbatterien in den nächsten 10 Jahren eine Rolle spielen.

Für ein mögliches Recycling unterscheiden sich diese Zellen insbesondere durch die Abwesenheit eines Flüssigelektrolyten sowie durch einen möglichen Wechsel der Anode von bisherigen LIB. Die Zusammensetzung der Kathoden und damit der Träger der Ni- und Co-haltigen Wertstoffe dürfte demgegenüber ähnlich zu heutigen und zukünftigen LIB bleiben. Zurzeit werden verschiedene Recyclingstrategien für Feststoffbatterien diskutiert [Schwich2020, Tan2020], welche zu den im vorangegangenen Abschnitt diskutierten Prozessen vergleichbar sind und somit eine ähnliche Anlagentechnik voraussetzen. Dennoch bestehen Unterschiede, welche eine abweichende Prozessführung und chemische Auftrennung erfordern könnten. So könnte eine thermische Deaktivierung der Zellen im Falle von hochtemperaturfesten keramischen Elektrolyten nicht mehr möglich sein. Gleichzeitig dürften sich die von brennbaren Komponenten ausgehenden Risiken bei der mechanischen Behandlung deutlich reduzieren. Gerade bei der Verwendung von Festelektrolyten mit hohem Li-Anteil und weiteren wertvollen Metallen [Dera2021] könnten diese stärker in den Fokus von Recyclingprozessen rücken. Je nach Materialzusammensetzung müssten dazu insbesondere die hydrometallurgischen Schritte angepasst werden [Schwich2020].

Für das Recycling von Feststoffbatterien ist insgesamt mit zu LIB vergleichbaren Verfahren und Anlagen auszugehen. Wie hoch die Kompatibilität von (ggf. bestehenden) LIB-Recyclinganlagen mit zukünftigen Feststoffbatterien ist, wird maßgeblich von den noch zu entwickelnden Feststoffzellkonzepten abhängen. Ob somit die Nutzung einer Anlage für beide Technologien möglich ist, kann auf Grundlage heutigen Wissens nicht beantwortet werden.

3.2. Quantifizierung der Investitionsvolumina in Anlagentechnik

In diesem Kapitel werden die Investitionskosten für die Anlagen zum Recycling von Fahrzeugbatterien diskutiert. Weiterhin wird anhand dieser Zahlen und der prognostizierten Rücklaufmengen von Recyclingbatterien ein Investitionsmodell entwickelt, um die aufkommenden Investitionen abschätzen zu können. Darüber hinaus werden auch die anfallenden Serviceleistungen und Arbeitsplatzeffekte prognostiziert.

Die genannten Mengenangaben beziehen sich dabei - sofern nicht anders angegeben - immer auf Batteriepacks. Die Informationen basieren auf Literaturdaten aus unterschiedlichen Studien [LithoRec2012, Hoyer2015], sowie maßgeblich auf Erkenntnissen aus Experten-Interviews, die im Rahmen dieser Kurzstudie mit Vertretern des Maschinen- und Anlagenbaus durchgeführt wurden. Zur Abschätzung der Kosten wurden Anlagen mit einem Durchsatz im Bereich mittlerer zweistelliger Kilotonnen pro Jahr betrachtet, was eine typische Anlagengröße der kommenden Jahre sein könnte. Nachfolgend werden die Investitionskosten bezogen auf die Einheit 1 Kilotonne pro Jahr diskutiert.

3.2.1. Investitionskosten für Recyclinganlagen und -komponenten der einzelnen Prozesse

Anlagen für die Demontage

Die Investitionskosten für automatisierte Demontageanlagen hängen stark von den Anforderungen an die Anlage, sowie vom Aufbau der zu recycelnden Batteriepacks ab. Sollen Batteriepacks auch unterschiedlicher Hersteller demontiert werden können? Wie sind die Batteriepacks aufgebaut (sind z. B. Zellen verklebt)? Wie weit soll demontiert werden, bis zum Modul oder bis zur Zelle?

Entsprechend dieser aktuell bestehenden Unsicherheiten bzgl. der Anforderungen an die Demontageanlagen sind genaue Angaben zu den Investitionskosten schwierig. Es kann nach aktuellem Stand aber davon ausgegangen werden, dass die

Investitionskosten für automatisierte Demontageanlagen mit einer Demontagekapazität von 1.000 Tonnen Recyclingbatterien pro Jahr etwa 195 Tsd. € (Szenarienbreite 140 bis 320 Tsd. €) liegen.

Anlagen für mechanische Recyclingschritte

Größere Erfahrungswerte bestehen im Bereich der mechanischen Zerkleinerung und Trennung von Recyclingbatterien, da hier bereits einige Pilotanlagen existieren. Aber auch hier hängt es von dem jeweiligen Prozess und dessen Prozessschritten (z. B. Schreddern im Vakuum, unter Schutzgas, oder im Wasser) ab, wie hoch die Investitionskosten konkret sind.

Die Investitionskosten für eine Recyclingkapazität von 1.000 Tonnen Batterien pro Jahr liegen bei etwa 265 Tsd. € (Szenarienbreite 240 bis 345 Tsd. €).

Anlagen für hydrometallurgische Recyclingschritte

Deutlich teurer sind die Anlagen für das hydrometallurgische Recycling der Schwarzmasse. Auch hier hängen die konkreten Kosten von den zu recycelnden und vorliegenden chemischen Verbindungen in der Schwarzmasse und somit von den Batteriechemien der Recyclingbatterien ab. Die Investitionskosten für eine Recyclingkapazität von 1.000 Tonnen Batterien pro Jahr liegen bei etwa 2,9 Mio. € (Szenarienbreite 2,5 bis 3,4 Mio. €).

Anlagen für pyrometallurgische Recyclingschritte

Die Anlagen für die pyrometallurgische Hochofenroute zum Recycling von Batterien sind aktuell für Recyclingmengen von weniger als 10 Kilotonnen pro Jahr ausgelegt. Für ein größer angelegtes Recycling von Fahrzeugbatterien wären voraussichtlich deutlich größere Anlagen notwendig, die dann – bezogen auf die Recyclingmenge pro Jahr – deutlich günstiger sein könnten. Entsprechend ist die Spanne für die Investitionskosten recht groß und wird für eine Recyclingkapazität von 1.000 Tonnen Batterien pro Jahr im Mittel bei etwa 2,3 Mio. € (Szenarienbreite 1,0 bis 3,6 Mio. €) liegen.

Weitere Anlagen und Komponenten

Insbesondere bei thermischen Schritten, aber auch bei den Schredderprozessen, treten giftige oder ätzende Gase sowie Stäube aus, die abgetrennt werden müssen. Eine Abluftreinigung ist somit bei zahlreichen Prozessrouten unerlässlich. Für die mechanische Route fallen dabei Investitionskosten für eine Recyclingkapazität von 1.000 Tonnen Batterien pro Jahr etwa 40 Tsd. € an (Szenarienbreite 30 bis 50 Tsd. €).

Über die Recyclinganlagen hinaus spielen deren Automatisierung und Digitalisierung eine zunehmend große Rolle. Insbesondere für die mechanisch-hydrometallurgische Prozessroute wird das Potenzial hierfür als groß erachtet. Investitionskosten für die Automatisierung und Digitalisierung einer Recyclingkapazität von 1.000 Tonnen Batterien pro Jahr liegen bei etwa 30 Tsd. € (Szenarienbreite 20 bis 40 Tsd. €).

3.2.2. Gesamt-Investitionskosten für Recyclinganlagen

Da eine Vielzahl möglicher Recyclingrouten existieren, werden hier beispielhaft die Gesamtinvestitionskosten zweier Prozessrouten diskutiert. Die erste exemplarische *Prozessroute 1* besteht aus einer Kombination von mechanischen Aufbereitungs- und Trennverfahren, mit nachgelagerter hydrometallurgischer Aufbereitung der im ersten Schritt extrahierten Schwarzmasse und vorangeschalteter Demontage. Die Gesamtinvestitionskosten für diese *Prozessroute 1* (pro 1.000 Tonnen Recyclingbatterien pro Jahr) betragen ungefähr 3,4 Mio. € (Szenarienbreite 2,9 bis 4,0 Mio. €, Tabelle 1). Zahlreiche Recyclingunternehmen verfolgen aktuell ähnliche Prozessrouten. Wahlweise können thermische Behandlungsschritte zwischengeschaltet werden, um z. B. den Binder zu pyrolisieren und eine Ablösung der Schwarzmasse von den Elektrodenfolien zu erleichtern. Dieser zusätzliche Schritt würde entsprechend zu einer gewissen Erhöhung der Investitionen führen.

Tabelle 1: Gesamtinvestitionskosten der exemplarischen Prozessroute 1 des Batterierecyclings:

Prozessschritt	Investitionskosten pro 1kt/Jahr in Euro		
	<i>Minimal-Annahme</i>	<i>Mittlere Annahme</i>	<i>Maximal-Annahme</i>
Demontage	140.000	195.000	320.000
Mechanische Aufbereitung	240.000	265.000	345.000
Hydrometallurgie	2.520.000	2.940.000	3.360.000
Summe	2.900.000	3.400.000	4.025.000

Die zweite exemplarische *Prozessroute 2* besteht aus einer Demontage, einem pyrometallurgischen Hochofenprozess und nachgeschalteter hydrometallurgischer Aufbereitung. In einem solchen Hochofenprozess entsteht eine Legierung aus

Kobalt, Kupfer, Nickel und Eisen, die anschließend hydrometallurgisch in die einzelnen Metalle aufgetrennt werden muss. Es wird angenommen, dass dieser Schritt weniger aufwändig ist als die hydrometallurgische Aufbereitung der Schwarzmasse in *Prozessroute 1*. Entsprechend wurden hier 50 % geringere Investitionskosten angenommen. Diese können sich natürlich erhöhen, wenn z. B. große Anteile des Lithiums aus der Schlacke hydrometallurgisch rückgewonnen werden sollen. Die Gesamtinvestitionskosten für diese *Prozessroute 2* (pro 1.000 Tonnen Recyclingbatterien pro Jahr) betragen ungefähr 3,9 Mio. € (Szenarienbreite 2,4 bis 5,6 Mio. €, Tabelle 2).

Tabelle 2: Gesamtinvestitionskosten einer exemplarischen Prozessroute 2 des Batterierecyclings:

Prozessschritt	Investitionskosten pro 1kt/Jahr in Euro		
	<i>Minimal-Annahme</i>	<i>Mittlere Annahme</i>	<i>Maximal-Annahme</i>
Demontage	140.000	195.000	320.000
Pyrometallurgie	1.000.000	2.285.000	3.570.000
Hydrometallurgie	1.260.000	1.470.000	1.680.000
Summe	2.400.000	3.950.000	5.570.000

Einschränkend muss erwähnt werden, dass alle Prozessrouten – zumindest in der zukünftig nötigen Größenordnung – bisher lediglich im Pilotmaßstab existieren. Eine Hochskalierung der Anlagen ist zwar geplant. Wie sich die Hochskalierung aber mittel- und langfristig auf die Kosten der Anlagen auswirken wird, ist zum Zeitpunkt der Studiererstellung noch nicht absehbar. Gewisse Skaleneffekte sind aber zu erwarten. Weiterhin hängen die Anlageninvestitionskosten für alle Recyclingprozesse stark von der zu erzielenden Recyclingquote und den Recyclingraten der einzelnen Komponenten ab. Je höher diese sind, desto aufwändiger und teurer wird das Recycling.

Darüber hinaus ist noch offen, welche Prozessrouten mittel- und langfristig zu welchen Anteilen Anwendung finden werden. Aktuell deutet der Trend in Richtung mechanischer Trennverfahren mit nachgelagerter hydrometallurgischer Aufbereitung der Schwarzmasse (*Prozessroute 1*). Da die Anteile der verschiedenen Recyclingrouten aber von rechtlichen Rahmenbedingungen, deren technologischer

Weiterentwicklung sowie deren Verfügbarkeit abhängig sind und diese über die nächsten 20 Jahre nicht genau vorhersehbar sind, werden für die folgenden Modellrechnungen zum Gesamtinvestment in Recyclinganlagen Werte von 3 Mio. € (Minimal-Annahme), 3,5 Mio. € (mittlere Annahme), bzw. 4 Mio. € (Maximal-Annahme) angenommen.

3.2.3. Hochrechnung Gesamt-Investitionskosten für Recyclinganlagen und resultierende Serviceleistungen

Um die zunehmende Menge an Lithium-Ionen-Batterien recyceln zu können, müssen in den kommenden Jahren neue Recyclinganlagen errichtet werden. Um die gesamten Investitionen abzuschätzen, wurde ein Modell erstellt. Ausgangspunkt sind die prognostizierten Rücklaufmengen entsprechend der drei Szenarien (Maximal, Minimal, Basis; siehe Kapitel 2.2) und die Anlagenkosten für das Recycling (siehe Kapitel 3.2.1 und 3.2.2). Unter Berücksichtigung weiterer allgemeiner Annahmen³ wurden die Investitionskosten für die neu benötigten Recyclinganlagen in den nächsten Jahren bis 2040 berechnet (Abbildung 9).

Zur Erreichung des prognostizierten Mengengerüsts müssen die jährlichen Investitionen in neue Recyclinganlagen, sowie das Upgrade von Altanlagen, in den nächsten Jahren stetig zunehmen und würden im Jahr 2030 ein Volumen von etwa 110 Mio. € erreichen (Szenarienbreite 70 bis 130 Mio. €).

³ Allgemeine Annahmen: 1 Batteriepack hat eine Masse von 0,4 t; 1 t Batteriepack enthält 0,7 t Batteriemodule/-zellen; 1 t Batteriemodule/-zellen enthält 0,6 t Schwarzmasse; Recyclinganlage arbeiten im 24 h-Betrieb für 300 Tage im Jahr; 3,5% der Investitionskosten fallen für die nächsten 15 Jahre für Servicekosten an; nach 15 Jahren erhalten die Anlagen ein Upgrade für 50% der Neukosten; Lohnkostenanteile belaufen sich auf 30% (2021) und verringern sich linear auf 25% (2040); Im Service belaufen sich die Lohnkostenanteile auf 50%; das gemittelte Lohnniveau wird mit 78.000 € pro Jahr inkl. Lohnnebenkosten angenommen; Lohnsteigerungen werden durch eine (durch die fortschreitende Maturität bedingte) Verschiebung der benötigten Arbeitskräfte, von Entwicklungstätigkeiten hin zu geringer bezahlten Montagetätigkeiten, ausgeglichen; Kostenreduzierung durch die fortschreitenden Entwicklungen und den zunehmenden Ausbau der Recyclinganlagen und inflationsbedingte Kostensteigerungen gleichen sich aus; kein Corona-Effekt berücksichtigt, da Elektromobilität nicht/wenig betroffen.

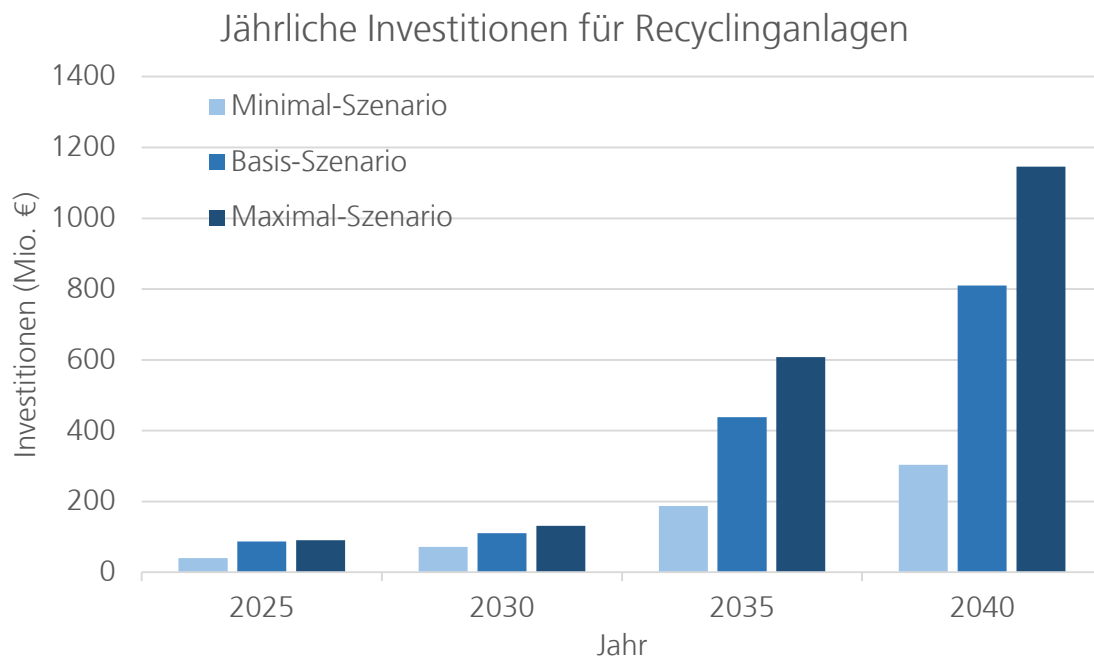


Abbildung 9: Jährliche Investitionen in neue Recyclinganlagentechnik, sowie in das Upgrade von Altanlagen, für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien bis 2040.

Nach 2030 steigen die Zahlen dann voraussichtlich deutlich steiler an und es sind 2035 Investitionskosten von etwa 440 Mio. € (Szenarienbreite 190 bis 610 Mio. €) und 2040 sogar von etwa 810 Mio. € (Szenarienbreite 300 bis 1,1 Mrd. €) zu erwarten.⁴

Über die Investitionen hinaus fällt ein Serviceaufwand für die Wartung der Anlagen an. Dieser ist zwar deutlich geringer als der Investitionsumfang für die Anlagen selbst, aber mit zunehmendem Ausbau der Recyclinginfrastruktur gewinnen die Serviceleistungen an Bedeutung (Abbildung 10). Im Jahr 2030 werden die jährlich

⁴ Für die Quantifizierung von Investitionen in Maschinen- und Anlagentechnik wurden die Marktszenarien wie folgt mit den Annahmen zu Investitionskosten verrechnet:

Minimal-Szenario: Verrechnung des Minimal-Szenarios der Rücklaufmenge mit der Maximal-Annahme zu den Anlagenkosten

Maximal-Szenario: Verrechnung des Maximal-Szenarios der Rücklaufmenge mit der Minimal-Annahme zu den Anlagenkosten

Basis-Szenario: Verrechnung des Basis-Szenarios der Rücklaufmenge mit der mittleren Annahme zu den Anlagenkosten

Dies entspricht der Annahme niedriger Investitionskosten in Folge eines schnellen Markthochlaufs und damit der Erreichung hoher Skaleneffekte in der Bereitstellung von Anlagentechnik.

anfallenden Serviceleistungen an Recyclinganlagen noch etwa 28 Mio. € (Szenarienbreite 20 bis 30 Mio. €) betragen. Im Jahr 2040 könnten diese dann aber auf etwa 180 Mio. € (Szenarienbreite 80 bis 250 Mio. €) anwachsen.

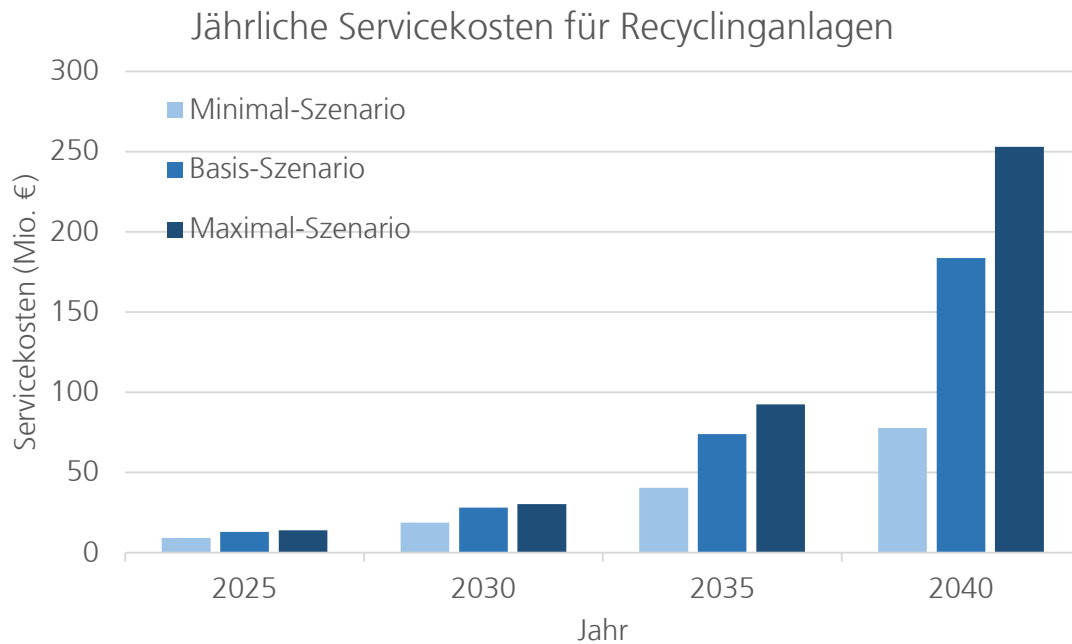


Abbildung 10: Jährliche Serviceleistungen für die Batterie-Recyclinganlagen bis 2040.

Gemäß der aufgestellten Marktszenarien würden bis 2040 in Europa kumulierte Investitionen für LIB-Recyclinganlagen von 5,5 Mrd. € (Szenarienbreite 2,4 bis 7,5 Mrd. €), sowie 1,1 Mrd. € (Szenarienbreite 560 Mio. bis 1,4 Mrd. €) kumulierte Servicekosten anfallen (Abbildung 11). Die Ergebnisspanne von insgesamt 3,0 bis 8,9 Mrd. € gibt die Unsicherheiten wieder, welche einerseits aus der Bandbreite der Elektromobilitätsmarktprognosen, andererseits aus dem Verbleib der Fahrzeuge in Europa und damit dem Anteil des Recyclings vor Ort resultieren.

Weiter sind die Werte als Marktpotenzial für den deutschen und europäischen Maschinen- und Anlagenbau in Europa zu verstehen, beziehen sich jedoch selbstverständlich auf Aufträge, die auch an internationale Zulieferer vergeben werden könnten.

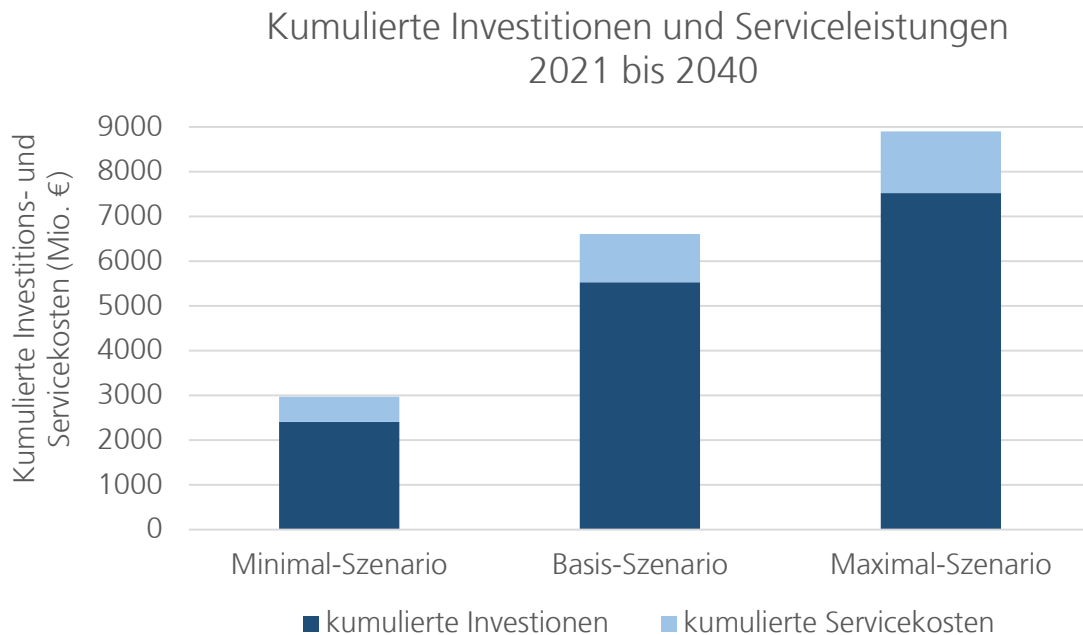


Abbildung 11: Kumulierte Investitionen und Serviceleistungen für Batterie-Recyclinganlagen in Europa bis 2040.

3.3. Beschäftigungspotenziale für den Maschinen- und Anlagenbau

Die Investitionen und Serviceleistungen für Recyclinganlagen von Lithium-Ionen-Batterien wirken sich auf die Beschäftigung im Maschinen- und Anlagenbau aus. Dies betrifft in den nächsten Jahren insbesondere Arbeitsplätze im Bereich des Engineerings und der Entwicklung, vermehrt aber auch bei der Anlagenherstellung, Montage und Inbetriebnahme vor Ort.

Entsprechend der zunehmenden jährlichen Investitionen in Anlagen in den nächsten Jahren, wird auch die Anzahl der benötigten Arbeitskräfte zunehmen (Abbildung 12). Die benötigten Arbeitskräfte belaufen sich 2030 voraussichtlich auf 570 (Szenarienbreite 370 bis 660), steigen bis zum Jahr 2040 aber auf etwa 3.800 (Szenarienbreite 1.500 bis 5.300) an. Der Anteil der benötigten Arbeitsplätze für Serviceleistungen liegt in den nächsten Jahren noch bei circa 20%, wird sich aber bis 2040 auf über 30% erhöhen⁵.

⁵ Errechnet entsprechend der prognostizierten Investitionen und Serviceleistungen (laut Modell), sowie der allgemeinen Annahmen (Abschnitt 3.2.3).

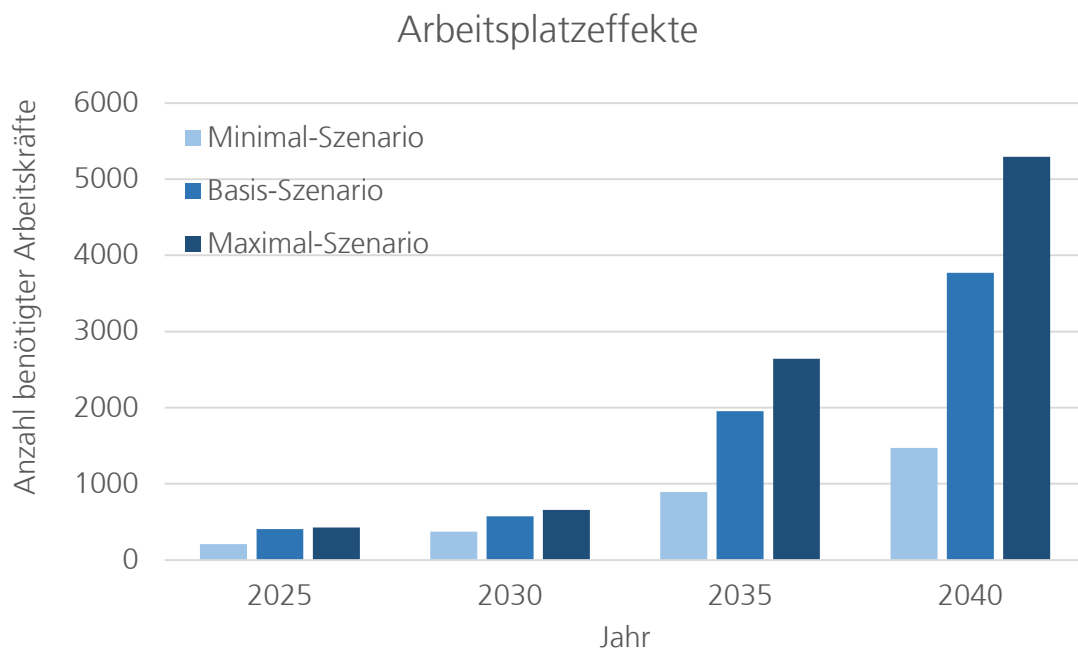


Abbildung 12: Anzahl benötigter Arbeitsplätze im Maschinen- und Anlagenbau zur Bewältigung der prognostizierten Recyclingkapazitätswachse und entsprechendem Service für Batterie-Recyclinganlagen.

4. Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau

Die Recyclingindustrie für Lithium-Ionen-Batterien befindet sich in einer frühen Phase mit hohen Wachstumsraten und zahlreichen Einstiegsmöglichkeiten für Betreiber und Zulieferer. Dies drückt sich unter anderem in den zahlreichen angekündigten und in den nächsten Jahren weiter zu erwartenden Projekten aus.

Bislang existieren für die meisten Prozesse und Anlagen keine etablierten Leit-Technologien. In der momentanen Lern- und Hochlaufphase scheint die Industrie besonders offen für neue technologische Ansätze, so konnte in einigen im Aufbau befindlichen Projekten der Transfer von Ergebnissen aus der Forschung beobachtet werden. Gleichzeitig besteht bereits in diesem frühen Stadium der Industrie eine hohe Sensitivität gegenüber Investitions- und Betriebskosten, da das Recycling von Batterien und die Materialrückgewinnung in direkter Konkurrenz zur Gewinnung von Primärrohstoffen steht.

Insbesondere für ein Recycling auf europäischem Boden könnte die passende Maschinen- und Anlagentechnik zum entscheidenden Enabler werden.

Die folgenden Kapitel fassen die Kernergebnisse der Quantifizierung sowie die Kernaussagen der Experteninterviews und daraus abgeleitete Handlungsempfehlungen zusammen.

4.1. Rahmenbedingungen

Die aktuell diskutierten politischen Strategien auf nationaler und europäischer Ebene zielen auf die Schließung des Batteriekreislaufs innerhalb Europas ab und begünstigen somit das Entstehen von Märkten für Recyclinganlagen „vor Ort“. Zwar existiert bislang keine Regulierung, welche klare Standortvorgaben für ein zukünftiges Batterierecycling geben würde, jedoch ist davon auszugehen, dass die europäische Recyclingindustrie auch durch Maßnahmen jenseits von Regulierungen, z. B. der Förderung von Entwicklungsprogrammen, unterstützt werden könnte.

Im neuen europäischen Regulierungsrahmen zu Batterien begünstigen insbesondere die Betrachtung von Recyclingeffizienzen und des ökologischen Fußabdrucks über das gesamte Batterieleben die Entwicklung und Kommerzialisierung von neuen Verfahren und Anlagen. Daraus ergeben sich große Chancen für die Vermarktung von Anlagentechnik, die den CO₂-Fußabdruck bei der Produktion neuer Batterien verringern kann, so z. B. durch die Bereitstellung

besonders energie- und ressourceneffizient hergestellter Rezyklate. Aus Sicht des vorgeschlagenen Regulierungsrahmens ist bisher noch nicht klar, ob eine „grüne Optimierung“ in besonders hohen Rückgewinnungsquoten oder in besonders energie- und ressourceneffizienten Verfahren liegt.

Die Forderung nach dem Recycling wesentlicher Batteriekomponenten von in Europa in Verkehr gebrachten Fahrzeugbatterien dürfte insgesamt zum Wachstum des Markts für Anlagentechnik beitragen, auch wenn dieser Markt zur Erfüllung der Forderung nicht unbedingt in Europa selbst entstehen müsste.

Aus Sicht des Maschinen- und Anlagenbaus wären möglichst einheitliche Rahmenbedingungen innerhalb Europas zu begrüßen. Auf diese Art ließen sich Technologie- und Anlagenentwicklungen an unterschiedlichen Standorten nutzen und somit der Entwicklungsaufwand individueller Anlagen reduzieren. Dies gilt auch für die Zertifizierung der Anlagen oder von Anlagenteilen, welche sonst standortabhängig wiederholt werden müsste. Abseits von regulatorischen Rahmenbedingungen könnte die Politik die europäische Industrie bei der Formulierung von Standards zur Messung ökologischer sowie gesundheitsrelevanter Parameter des Recyclings und von Recyclingeffizienz unterstützen, z. B. auch im Rahmen von Fördermaßnahmen. Die Industrie auf der anderen Seite sollte sich in Normungs- und Standardisierungsgremien einbringen, um entsprechende, ggf. international wirksame Standards aus europäischer Perspektive mitformulieren zu können.

Die Aktivitäten rund um die „eco“ Kennzeichnung von Batteriezellen und der Batterieproduktion könnten genutzt werden und z. B. auf die Kennzeichnung von Recyclingprozessen und Anlagentechnik, welche die Übereinstimmung mit EU-Regularien und Effizienzvorgaben ausdrücken, erweitert werden. Dies könnte die Qualität entsprechender Anlagen auch nach außen wirksam darstellen.

4.2. Technologisches Angebot und Innovationen

Angebot europäischer Hersteller

Obwohl die Marktgröße für Recycling von LIB aktuell noch klein ist, besteht dennoch ein umfassendes Angebot an Batterierecyclinganlagen in Europa für alle diskutierten Prozessrouten und -schritte. Die Anlagen sind aktuell noch durch einen hohen Anteil an Eigenentwicklungen und Anpassungen geprägt, meist in enger Kooperation zwischen Recyclern und Anlagenbauern, und befinden sich im Pilotstatus. Darüber hinaus entstehen jedoch auch Angebote für Gesamtsysteme

(aktuell 3 bis 4 europäische Hersteller am Markt). Für diese kann vollständig auf europäische Technologie zurückgegriffen werden.

Technologische Entwicklungen und Innovationen

Die Technologien zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien sind bisher noch relativ jung und haben somit noch viel Entwicklungs- und Optimierungspotenzial. Es ist absehbar, dass die Anlagen in den nächsten Jahren noch viele technische Korrekturen und Verbesserungen erfahren werden. Ein Entwicklungsbedarf besteht z. B. hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit von Verfahren bei hohen Rückgewinnungsanforderungen oder der Automatisierung, insbesondere bei der Demontage von Batteriepacks.

Zudem sind heutige Technologien meist auf ein Gemisch verschiedener Zellchemien (NMC, LFP, etc.) ausgelegt. Es ist denkbar, dass gewisse Recyclingtechnologien spezifisch für das Recycling bestimmter Zellchemien optimiert werden, während andere sich auf Mischchemien spezialisieren oder sogar einen Fokus auf Produktionsausschuss legen. Bei sortenreinem Recycling könnten die Recycling-Parameter angepasst werden (z. B. Drücke im Vakuumtrockner, Separationsschritte, etc.), wodurch der Output für die nachgelagerten Schritte (Hydrometallurgie) optimiert werden kann. Somit sind insgesamt höhere Recyclingeffizienzen denkbar.

Darüber hinaus ist die Weiterentwicklung neuer Technologien wie z. B. durch das Direkt-Recycling oder elektrohydraulische Verfahren sehr wahrscheinlich. Inwieweit diese das Potenzial haben die aktuellen und aufkommenden Technologien zu verdrängen, ist aktuell nicht absehbar. Weiterhin besteht ein großes Potenzial in der Digitalisierung und Automatisierung der Recyclingprozesse, insbesondere für Sortierung (auch KI-Einsatz denkbar), Entladen, die Demontage und die allgemeine Logistik.

Nicht zuletzt werden einige Innovationen notwendig sein, um die aktuellen Pilotanlagen auf die Masse hochzuskalieren.

Allgemeine Trends

Die Relevanz des CO₂-Fußabdrucks aller industriellen Technologien wird voraussichtlich in den nächsten Jahren stark zunehmen. Dazu gehören natürlich auch Recyclingtechnologien. Entsprechend wird auch anhand dieses Kriteriums entschieden werden müssen, welcher Ansatz und welche Recyclingroute sinnvoll erscheint.

Aktuell zeichnet sich ein Trend in Richtung mechanisch-hydrometallurgischer Recycling-Prozesse ab. Dabei werden die (themo-)mechanischen Prozessschritte voraussichtlich dezentral in kleineren Anlagen durchgeführt werden, um den Logistikaufwand der Recyclingbatterien (Gefahrguttransport) gering zu halten. Das hydrometallurgische Recycling der Schwarzmasse könnte demgegenüber deutlich zentraler ausgeführt werden, da für die Schwarzmassen keine Gefahrguttransporte nötig sind und bei den Anlagen große Skalierungseffekte zu erwarten sind.

Für das Recycling wäre ein „Design for Recycling“ der Batterien durchaus hilfreich, um hohe Recyclingquoten und -effizienzen zu erzielen. Ob und wie weit dies von den Batterieherstellern umgesetzt wird ist allerdings unklar. Insbesondere für die automatisierte Demontage vom Batteriepacks wäre eine Zusammenarbeit von Batteriepackherstellern/OEMs und Demontageanlagenherstellern zielführend. Dies betrifft ebenso neue oder zukünftige Batterietechnologien wie den Umgang mit „cell-to-pack“- oder Feststoffbatterien, welche heute noch Gegenstand der Forschung und Entwicklung sind und ggf. außerhalb Europas kommerzialisiert werden. Um ein kontinuierlich aktualisiertes Angebot zu sich verändernden Batterien bieten zu können, sollte der deutsche und europäische Maschinen- und Anlagenbau im Recyclingbereich die Zusammenarbeit mit weit vorgelagerten Wertschöpfungsstufen, nämlich den Zell- und Packherstellern suchen. Forschungsverbünde können ein geeignetes Mittel darstellen, um bereits in der vorwettbewerblichen Phase Kompetenzen für zukünftige Technologien aufzubauen.

Produktionsabfälle

Neben den „End-of-Life“ Batterien kommen auch in nicht unerheblichem Maße Produktionsabfälle ins Recycling. Insbesondere beim Hochlauf von Produktionsstätten liegen die Ausschüsse sehr hoch. Aktuell macht das bei einigen Recyclern einen großen Teil des Recyclings aus. Mittel- und langfristig wird das Recycling der Produktionsausschüsse wohl bei den Zellherstellern vor Ort stattfinden.

Lebensdauer der Anlagen

Da die Technologien zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien noch jung sind, fehlen größtenteils Erfahrungswerte zur Lebensdauer der Anlagen. Bei einigen Anlagen kann auf Erfahrungswerte vergleichbarer Anlagen zurückgegriffen werden. Je nach Anlage bewegen sich die Zahlen hier im Bereich 10 bis 30 Jahre. Kleinere Verschleißteile müssen dabei gelegentlich gewechselt werden.

Insgesamt scheint die technische Lebensdauer der Anlagen nicht der für deren eventuellen Austausch entscheidende Parameter zu sein. Es wird davon ausgegangen, dass eher der technische Fortschritt Erneuerungen an den Anlagen erforderlich machen wird und nicht deren Verschleiß.

Allgemeine Herausforderungen

Für die Anlagenhersteller und die Recyclingunternehmen ist die Einhaltung der Umwelt-, Abgas- und Arbeitsschutzrichtlinien, die insbesondere in Europa streng sind, eine nicht unerhebliche Herausforderung. In besonderem Maße ist dies auch für die Wartung der Anlagen gegeben. Auch die noch unbekanntere Weiterentwicklung dieser und weiterer Rahmenbedingungen, z. B. bzgl. Recyclingquoten, ist eine Herausforderung. Je schneller die Rahmenbedingungen durch die Politik vorgegeben werden, desto einfacher könnte man darauf hinarbeiten.

Darüber hinaus ist das Schritthalten mit technologischen Entwicklungen zwar das Tagesgeschäft der Unternehmen, aber trotzdem eine konstante Herausforderung. Dabei wird es zunehmend wichtig, auch die Möglichkeiten der Automatisierung und Digitalisierung zu nutzen und einzusetzen, wo es sinnvoll ist.

4.3. Wettbewerbssituation

Europäische Zusammenarbeit

Europäische Anlagenhersteller sind im internationalen Vergleich (zumindest aktuell) gut im Umsetzen der europäischen Regularien (z. B. Abgas- und Arbeitsschutzrichtlinien, auch bei der Wartung der Anlagen) und beim Durchlauf von Genehmigungsverfahren aufgestellt, da sie in diesen Bereichen langjährige Erfahrungen gesammelt haben. Insbesondere gilt dies auch für den Bau von Pilotanlagen. Hierbei ist auch die räumliche Nähe zwischen Anlagenhersteller und Recycler von Vorteil, da ein schneller Austausch deutlich effizienter gestaltet werden kann.

Entsprechend wird insbesondere in der Hochlaufphase des Batterierecyclings eine Zusammenarbeit zwischen europäischen Anlagenherstellern und Recyclern als sinnvoll erachtet. Referenzen in Europa sind dabei sehr hilfreich, da sie belegen, dass die Regularien eingehalten werden können.

Marktentwicklung

Der europäische Recyclinganlagenmarkt ist heute noch vergleichsweise klein, europäische Anlagenhersteller dürften aktuell sehr hohe Marktanteile in Europa besitzen. Die Prognosen zur Entwicklung des europäischen LIB-Recyclingmarktes zeigen einen klaren Wachstumstrend mit einer Vervielfachung des Recycling- und damit auch Recyclinganlagenmarktes in den nächsten 20 Jahren.

Für Anlagenhersteller ergeben sich damit klare Möglichkeiten, an der Marktvergrößerung teilzuhaben. Gegenüber der heutigen Dynamik, welche durch das Auftreten vieler unterschiedlicher Akteure geprägt ist, könnte jedoch eine mittelfristige Konsolidierung stattfinden, welche in die Entstehung größerer Recyclinganlagen und Unternehmen mündet. Dieser Effekt kann sich ebenso auf die Zulieferindustrie übertragen. Zur Sicherung von Marktanteilen sollte bereits heute die Vernetzung des Maschinen- und Anlagenbaus mit der Betreiber- und ggf. Automobilbranche angestrebt werden. In Deutschland scheint diese aktuell stark am Wachsen zu sein, Kooperationen mit außereuropäischen OEM sind jedoch noch selten.

Mittelfristig ist davon auszugehen, dass z. B. asiatische Zellhersteller, welche ihre Produktionsausschüsse vor Ort verwerten wollen, ihre Anlagenzulieferer aus den Mutterstandorten mitbringen könnten. Dies betrifft insbesondere diejenigen Hersteller, welche bereits in größerem Umfang Recyclingkapazitäten in Asien aufgebaut haben, oder an Joint-Ventures mit Recyclingfirmen beteiligt sind. Ebenso könnten entsprechende Konstellationen den Export von Schwarzmasse an die Mutterstandorte begünstigen und damit den Umfang des lokalen Recyclings mindern.

Auch wenn der europäische Markt als international angesehen wird, können die Chancen für hohe Marktanteile des deutschen und europäischen Maschinen- und Anlagenbaus in Europa als hoch eingeschätzt werden. So haben die Anlagenhersteller bereits hohe und international konkurrenzfähige Recyclingeffizienzen ihrer Anlagen demonstriert. Aufgrund der hohen Recyclingtiefe in unterschiedlichen Wertstoffströmen in Europa und des starken Beitrags europäischer Maschinen- und Anlagentechnik kann die Rolle Europas sogar als führend eingeschätzt werden.

Die prognostizierte europäische Marktgröße von etwa 810 Mio. € (Szenarienbreite 300 Mio. € bis 1,1 Mrd. €) im Jahr 2040, ebenso wie die Arbeitsplatzeffekte im vierstelligen Bereich, sind diesbezüglich als Potenzial für den europäischen

Maschinen- und Anlagenbau in Europa zu verstehen, würden jedoch einem nicht realistischen hiesigen Marktanteil von 100% entsprechen.

Auch außerhalb Europas ist „Made in Germany / Europe“ anerkannt und somit besteht neben der beschriebenen Gefahr einer Mitnahme außereuropäischer Zulieferer durch Zellhersteller auch eine klare Erwartung, mittelfristig europäische Anlagentechnik in andere Teile der Welt zu exportieren. Der große Bedarf an Recyclinganlagen in China wird zurzeit überwiegend durch lokale Anlagenhersteller gedeckt und es bestehen großer Herausforderungen bei der Erschließung dieses Marktes durch außerchinesische Akteure. Neben den in China bereits bestehenden engen Zulieferverflechtungen resultieren die Herausforderungen aus teilweise noch nicht definierten (regulatorischen) Anforderungen an den Recyclingprozess oder die Systemgrenze, welche die Bewertung des ökologischen und wirtschaftlichen Fußabdrucks europäischer Technologie für den chinesischen Markt erschwert. Zwar ist zu erwarten, dass die Anforderungen in den kommenden Jahren durch die chinesische Regierung weiter spezifiziert werden, jedoch könnten sich diese, wie auch im Fall der Zellherstellung geschehen, nah an den bereits erreichten Zielen heimischer Leitanbieter bewegen, sodass nicht notwendigerweise eine Nachfrage nach innovativen Technologien aus dem Ausland entsteht.

Auch in anderen Regionen der Welt wird sich, dem Absatz von Elektrofahrzeugen folgend, eine Nachfrage nach Recyclinginfrastruktur entwickeln. Die Aufstellung eines regulatorischen Rahmens kann ortsunabhängig als initialer Treiber für die Industrie betrachtet werden. Bleibt diese in manchen Regionen aus, so bieten sich insbesondere Absatzmöglichkeiten für kosteneffiziente Prozesse, welche auf ein hochwirtschaftliches Recycling zielen, ggf. aber nicht den Umweltstandards in der EU entsprechen müssen, auf welche die Anlagentechnik derzeit in Europa entwickelt wird. Die Entwicklung ausschließlich kostengetriebener Märkte dürfte jedoch mit zeitlichem Versatz zu ökologisch regulierten Märkten erfolgen, weshalb die Ausrichtung des europäischen Maschinen- und Anlagenbaus auf sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Technologien für den Markteinstieg sinnvoll erscheint.

4.4. Zusammenfassung und Ausblick

Der deutsche und europäische Maschinen- und Anlagenbau verfügt über ein technologisches Angebot, welches alle Prozessschritte entlang unterschiedlicher Recyclingrouten adressiert, auch wenn sich in der Industrie noch kein standardisiertes Verfahren herausgebildet hat. Aufgrund der hohen Anlagenqualität und der Erfahrung mit dem Umgang verschiedener Wertstoffströme und Compliance mit entsprechenden Auflagen besitzt der deutsche und europäische Maschinen- und Anlagenbau somit eine gute Ausgangsposition zur Bedienung globaler Recyclingmärkte.

Um die Gegebenheiten für den Aufbau einer europäischen Recyclingindustrie und folgend für Märkte des Maschinen- und Anlagenbaus zu schaffen, sollte seitens der europäischen Gesetzgeber möglichst schnell Planungssicherheit durch die Umsetzung eines einheitlichen Regulierungsrahmens geschaffen werden, welcher die Tragfähigkeit von Recyclinggeschäftsmodellen am Standort Europa sicherstellt. Der Aufbau von Recyclingkapazitäten sollte dabei beobachtet werden und ggf. durch Fördermaßnahmen unterstützt werden, um die für Europa erwarteten Batterievolumina vor Ort behandeln zu können. Auch wenn erste Recyclingverfahren industriell zur Verfügung stehen, sollten weitere F&E-Anstrengungen zur Optimierung der Verfahren, besonders in den Bereichen Wirtschaftlichkeit, Skalierung und Automatisierung durch Industrie und Forschung initiiert und ggf. durch die Politik gefördert werden.

Der deutsche und europäische Maschinen- und Anlagenbau sollte die innerhalb Europas angestoßene Zusammenarbeit mit Zell- und Automobilherstellern nach Möglichkeit früh auch auf andere Regionen ausweiten, bevor sich dort feste Zulieferbeziehungen etabliert haben. Die in Europa geschaffenen Referenzen können dafür Ausgangspunkt sein, insbesondere, wenn es der Politik und Industrie gelingt, durch die Etablierung gemeinsamer Kennzeichnungs-, Verarbeitungs- und Erfassungsregeln (auch ökologischer Parameter) des Batterierecyclings internationale Standards zu setzen, welche als Aushängeschild für europäische Maschinen- und Anlagentechnik wirken.

5. Literaturverzeichnis

ACEA2021	European Automobile Manufacturers' Association: ACEA https://www.acea.auto/
AiW2021	Michael Wittler, Kai Krüger (FEW Consulting), Hartmut Rauen, Alexander Raßmann (VDMA); Antrieb im Wandel: Elektrifizierung des Antriebstrangs und deren Auswirkung auf die Industrie, 2021
AlBarazi2019	Al Barazi, Siyamend (2019): Verfügbarkeit von Batterierohstoffen. Monitoring für eine sichere Rohstoffversorgung. GDCh Wissenschaftsforum Chemie. Aachen. Online verfügbar unter https://www.gdch.de/fileadmin/downloads/Netzwerk_und_Strukturen/Fachgruppen/Chemie_und_Energie/2019-09-17_Verfuegbarkeit_von_Batterierohstoffen_SAI.pdf
Ambrose2020	Ambrose, Hanjiro; Kendall, Alissa (2020): Understanding the future of lithium: Part 2, temporally and spatially resolved life-cycle assessment modeling. In: Journal of Industrial Ecology 24 (1), S. 90–100. DOI: 10.1111/jiec.12942.
Avicenne2020	Avicenne Energy Michael Sanders, The Rechargeable Battery Market_Value Chain and Main Trends 2019 to 2030; Christophe Pillot, The Worldwide rechargeable Battery Market 2019 – 2030, 28th Edition, 2020
B32020	B3 Corporation, Chapter 11 LIB Materials Market Bulletin (21Q1), Chapter 11 LIB Materials Market Bulletin (20Q1), Chapter 11 LIB Materials Market Bulletin (19Q1), Chapter 7 LIB Market Bulletin (20Q4)
Becker2020	Becker, Fiona; Scholl, Christine; Rüttinger, Lukas; Pia van Ackern; Aissa Rechlin; Michael Priester et al. (2020): Comparative analysis of case studies for mining sites worldwide. OekoRess II Working Report on environmental hazards and impacts, governance challenges and indicators. Hg. v. Umweltbundesamt (Texte, 81/2020). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-17_texte_81-2020_oekoressii-analysiscasestudies.pdf
Bernhart2020	W. Bernhart, D. Gabaldon, R. Zheng, P. Schmitt, T. Hotz, S. Braun, A. Kampker, C. Offermanns, S. Krämer, Roland Berger Report: Rising opportunities for battery equipment manufacturers, 2020
BGR2019	BGR (2019): Mapping of the Artisanal Copper-Cobalt Mining Sector in the Provinces of Haut-Katanga and Lualaba in the Democratic Republic of the Congo. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, zuletzt geprüft am 17.12.2020. ISBN 978-3-943566-68-0 https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/studie_BGR_kupfer_kobalt_kongo_2019_en.pdf?__blob=publicationFile&v=3
BlmSchG2021	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG) https://www.gesetze-im-internet.de/bimSchG/BImSchG.pdf
Brunp2021	Guangdong Brunp Recycling Technology Co., Ltd Unternehmenswebseite, abgerufen am 16.08.2021 http://en.brunp.com.cn/products_list/i=48&comContentId=48.html
Buchert2016	Buchert, Matthias; Sutter, Jürgen (2016b): Aktualisierte Ökobilanzen zum Recyclingverfahren LithoRec II für Lithium-Ionen-Batterien. Hg. v. Öko-Institut e.V. Online verfügbar unter https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2017-01/LithoRec%20II-LCA-Update%202016.pdf
Buchert2017	Matthias Buchert, Stefanie Degreif, Peter Dolega, Öko-Institut (2017): Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität. Synthesepapier zum

	Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen. Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende.
Buchert2020	Buchert, Matthias; Sutter, Jürgen (2020): Stand und Perspektiven des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus der Elektromobilität. Hg. v. Öko-Institut e.V. Darmstadt. https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Strategiepapier-Mercator-Recycling-Batterien.pdf
CATL2021	Contemporary Amperex Technology Co., Ltd Unternehmenswebseite, abgerufen am 16.08.2021 https://www.catl.com/en/solution/recycling/
Ciez2019	Ciez, R.E., Whitacre, J.F. Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. <i>Nat Sustain</i> 2, 148–156 (2019). https://doi.org/10.1038/s41893-019-0222-5
CN2019	Chinese Ministry of Industry and Information Technology, Interim Measures for the Management of Recovery and Utilization of New Energy Vehicle Power Battery, 2019 http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/chn173695.pdf
Dai2018	Q. Dai, J. C. Kelly, J. Dunn, and P.T. Benavides, Update of Bill-of-materials and Cathode Materials Production for Lithium-ion Batteries in the GREET Model, Argonne National Laboratory, October 2018
Dai2019	Qiang Dai, Jeffrey Spangenberg, Shabbir Ahmed, Linda Gaines, Jarod C. Kelly, and Michael Wang, 2019. EverBatt: A Closed-loop Battery Recycling Cost and Environmental Impacts Model. https://publications.anl.gov/anlpubs/2019/07/153050.pdf
Dera2021	Marscheider-Weidemann, F.; Langkau, S.; Eberling, E.; Erdmann, L.; Haendel, M.; Krail, M.; Loibl, A.; Neef, C.; Neuwirth, M.; Rostek, L.; Shirinzadeh, S.; Stijepic, D.; Tercero Espinoza, L.; Baur, S.-J.; Billaud, M.; Deubzer, O.; Maisel, F.; Marwede, M.; Rückschloss, J.; Tippner, M.; Rohstoffe fürZukunftstechnologien 2021, DERA Rohstoffinformationen 50; Deutsche Rohstoffagentur DERA; (2021)
Doose2021	Doose, S.; Mayer, J.K.; Michalowski, P.; Kwade, A. Challenges in Ecofriendly Battery Recycling and Closed Material Cycles: A Perspective on Future Lithium Battery Generations. <i>Metals</i> 2021, 11, 291. https://doi.org/10.3390/met11020291
EAFO2021	European Alternative Fuels Observatory https://www.eafo.eu/
EU2020a	Circular Economy Action Plan, For a cleaner and more competitive Europe https://ec.europa.eu/environment/pdf/circular-economy/new_circular_economy_action_plan.pdf European Union 2020
EU2020b	Europäische Kommission (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. Link: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/4b5d88a6-3ad8-11eb-b27b-01aa75ed71a1/language-en
EU2021	Questions and Answers on Sustainable Batteries Regulation https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_20_2311
Faber2017	Faber, Benjamin; Benjamin, Krause; La Sierra, Raúl Sánchez de (2017): Artisanal Mining, Livelihoods, and Child Labor in the Cobalt Supply Chain of the Democratic Republic of Congo. Center for Effective Global Action (CEGA)
Fan2020	Ersha Fan, Li Li, Zhenpo Wang, Jiao Lin, Yongxin Huang, Ying Yao, Renjie Chen, and Feng Wu. <i>Chemical Reviews</i> 2020 120 (14), 7020-7063, DOI: 10.1021/acs.chemrev.9b00535
Frost2020	Frost & Sullivan, Global Li-ion Battery Materials Market, Forecast to 2026, 2020
Henckens2020	Henckens, M.L.C.M.; Worrell, E. (2020): Reviewing the availability of copper and nickel for future generations. The balance between production growth, sustainability and

	recycling rates. In: Journal of Cleaner Production 264, S. 121460. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121460.
Highpower2021	Shenzhen Highpower Technology Unternehmenswebseite, abgerufen am 16.08.2021 https://www.highpowertech.com/products-recycling
Home2019	Home, Andy (2019): Why the cobalt market needs Congo's 'illegal' miners. Reuters. Online verfügbar unter https://www.reuters.com/article/us-congo-cobalt-ahome/why-the-cobalt-market-needs-congos-illegal-miners-andy-home-idUSKCN1U71VS .
Hoyer2015	Hoyer, C., Kieckhäfer, K. & Spengler, T.S. Technology and capacity planning for the recycling of lithium-ion electric vehicle batteries in Germany. J Bus Econ 85, 505–544 (2015). https://doi.org/10.1007/s11573-014-0744-2
ICCT2021	P. Mock, S. Diaz, PATHWAYS TO DECARBONIZATION: THE EUROPEAN PASSENGER CAR MARKET IN THE YEARS 2021–2035, 2021, The international Council on clean transportation ICCT
IEA2021	International Energy Agency IEA, Global EV Outlook 2021 Accelerating ambitions despite the pandemic https://iea.blob.core.windows.net/assets/ed5f4484-f556-4110-8c5c-4ede8bcba637/GlobalEVOutlook2021.pdf
KBA2021	Kraftfahrt Bundesamt https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/Fahrzeugzulassungen/pm29_2021_n_06_21_pm_komplett.html
Li2020	Li, W., Yang, M., Long, R., Mamaril, K., & Chi, Y. (2021). Treatment of electric vehicle battery waste in China: A review of existing policies. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 29(2), 111-122. https://doi.org/10.3846/jeelm.2021.14220
LithoRec2012	Recycling von Lithium-Ionen-Batterien _LithoRec I (Abschlussbericht abrufbar unter https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-lithorec.pdf), gefördert durch das BMU, Berlin 2012.
LithoRec2016	Recycling von Lithium-Ionen-Batterien – LithoRec II (Abschlussbericht abrufbar unter http://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2017-01/abschlussbericht_LithoRec_II_20170116.pdf), gefördert durch das BMU, Berlin 2016.
Luft2002	Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Luft/taluft.pdf
Mancini2020	Mancini, L.; Eslava, N. A.; Traverso, M.; Mathieux, F. (2020): Responsible and sustainable sourcing of battery raw materials. Insights from hotspot analysis, company disclosures and field research. Hg. v. Publications Office of the European Union (JRC Technical Report, EUR 30174 EN)
Marklines2021	Marklines Co L Automotive Industry Portal http://www.marklines.com
Markt2020	Der Anteil des europäischen Smartphonemarktes entspricht z. B. etwa 25% des Weltmarkts. Statista, Consumer Electronics Report 2020, https://www.statista.com/study/55488/consumer-electronics-market-report/ Statista, Consumer Electronics, https://www.statista.com/outlook/cmo/consumer-electronics/Europe Im Bereich eBikes dürften Verkäufe in Europa etwa ein Drittel des globalen Marktes ausmachen. Mordorintelligence: https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/europe-e-bike-market https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/e-bike-market

Martinez2019	Velázquez-Martínez O, Valio J, Santasalo-Aarnio A, Reuter M, Serna-Guerrero R. A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective. <i>Batteries</i> . 2019; 5(4):68. https://doi.org/10.3390/batteries5040068
Melin2021	H. E. Melin, M. A. Rajaeifar, A. Y. Ku, A. Kendall, G. Harper, O. Heidrich, Global Implications of the EU battery regulation, <i>Science</i> 373, 6553, 384-387, 2021
Michaelis2020	VDMA: Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau, Michaelis et al., Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030 – Update 2020
NPM2021a	Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Arbeitsgruppe 4 (NPM AG 4), Batterierecyclingmarkt Europa: Chance für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft, 2021
NPM2021b	Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Arbeitsgruppe 4 (NPM AG4), Batterieproduktion für Deutschland und Europa, 2021
OECD2019	OECD (2019a): Global Material Resources Outlook to 2060. Economic Drivers and Environmental Consequences: OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/9789264307452-en .
PEM2021	Recycling von Lithium-Ionen-Batterien, VDMA und PEM, 2021, https://www.vdma.org/viewer/-/v2article/render/31877343
Peters2018	Peters, Jens F.; Weil, Marcel (2018): Providing a common base for life cycle assessments of Li-Ion batteries. In: <i>Journal of Cleaner Production</i> 171, S. 704–713. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.016.
Pettinger2017	Pettinger, Karl-Heinz; Dong, Winny (2017): When Does the Operation of a Battery Become Environmentally Positive? In: <i>J. Electrochem. Soc.</i> 164 (1), A6274-A6277. DOI: 10.1149/2.0401701jes.
Presse2019	Yin, D., China's New NEV Battery Recycling Mandate Puts the Onus on Struggling Carmakers , CX Tech, 2019, https://www.caixinglobal.com/2019-11-09/chinas-new-nev-battery-recycling-mandate-puts-the-onus-on-struggling-carmakers-101480994.html
Presse2020a	Sebastian Schaal, Tesla unterzeichnet angeblich Liefervertrag mit LG Chem für Model Y, 2020, https://www.electrive.net/2020/11/23/tesla-unterzeichnet-angeblich-liefervertrag-mit-lg-chem-fuer-model-y/
Presse2020b	Zachary Shahan, LG Chem Has Begun Mass Production Of NCM712 Batteries In Poland, 2020, https://cleantechnica.com/2020/06/11/lg-chem-began-mass-production-of-ncm712-batteries-in-poland-in-q1/ Sebastian Schaal, SK Innovation kündigt neue schnellladefähige Zellen für 2021 an, 2020, https://www.electrive.net/2020/10/26/sk-innovation-kuendigt-neue-schnelllade-faehigen-zellen-fuer-2021-an/
Presse2020c	Joshua Hill, China's Svolt says cobalt-free car batteries coming in 2021, 2020, https://thedriven.io/2020/05/22/chinas-svolt-says-cobalt-free-car-batteries-coming-in-2021/
Presse2020d	Xinghua Meng, Eric Zheng, The Next-Generation Battery Pack Design: from the BYD Blade Cell to Module-Free Battery Pack, 2020, https://medium.com/batterybits/the-next-generation-battery-pack-design-from-the-byd-blade-cell-to-module-free-battery-pack-2b507d4746d1 Pedro Lima, BYD Blade prismatic battery cell specs and possibilities (update), 2020, https://pushevs.com/2020/05/26/byd-blade-prismatic-battery-cell-specs-possibilities/
Presse2020e	China launches NEV battery recycling regulations , 2020, https://www.argusmedia.com/en/news/2045403-china-launches-nev-battery-recycling-regulations
Presse2021a	Sebastian Schaal, Renault erwägt LFP-Batterien für den Renault 5, 2021, https://www.electrive.net/2021/02/17/renault-erwaegt-lfp-batterien-fuer-den-renault-5/ Holger Manz Volkswagen AG, AABC conference 2020

Presse2021b	Jason Deign, How China Is Cornering the Lithium-Ion Cell Recycling Market, 2019, https://www.greentechmedia.com/articles/read/how-china-is-cornering-the-lithium-ion-cell-recycling-market Jean Kumagai, Lithium-Ion Battery Recycling Finally Takes Off in North America and Europe, 2021, https://spectrum.ieee.org/energy/batteries-storage/lithiumion-battery-recycling-finally-takes-off-in-north-america-and-europe
Presse2021c	Liu, P., Ren, D., China's EV makers to incorporate battery recycling as Beijing looks to tackle growing waste, South China Morning Post, 2021, https://www.scmp.com/business/china-business/article/3126037/chinas-electric-vehicle-makers-incorporate-battery
Qiao2020	Qiao, D., Wang, G., Gao, T., Wen, B., & Dai, T. (2020). Potential impact of the end-of-life batteries recycling of electric vehicles on lithium demand in China: 2010–2050. <i>Science of The Total Environment</i> , 142835. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.142835
Regett2018	Regett, Anika; Mauch, Wolfgang; Wagner, Ulrich (2018): Carbon footprint of electric vehicles - a plea for more objectivity. Online verfügbar unter https://www.ffe.de/attachments/article/856/Carbon_footprint_EV_FfE.pdf
Romare2017	Romare, Mia; Dahllöf, Lisbeth (2017): The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries. A Study with Focus on Current Technology and Batteries for light-duty vehicles. Swedish Environmental Research Institute. Stockholm. Online verfügbar unter http://www.energimyndigheten.se/globalassets/forskning--innovation/transporter/c243-the-life-cycle-energy-consumption-and-co2-emissions-from-lithium-ion-batteries-.pdf
Roskill2020	Roskill Li-ion batteries 4th Edition Update 1 – August 2020
Schmidt2016	Schmidt, Tobias; Buchert, Matthias; Schebek, Liselotte (2016): Investigation of the primary production routes of nickel and cobalt products used for Li-ion batteries. In: <i>Resources, Conservation and Recycling</i> 112, S. 107–122. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.04.017 2016
Schwich2020	Schwich, L., Küpers, M., Finsterbusch, M., Schreiber, A., Fattakhova-Rohlfing, D. Guillon, O., Friedrich, B., Recycling Strategies for Ceramic All-Solid-State Batteries—Part I: Study on Possible Treatments in Contrast to Li-Ion Battery Recycling, <i>Metals</i> 2020,10, 1523; doi:10.3390/met10111523
Sommerville2021	Roberto Sommerville, Pengcheng Zhu, Mohammad Ali Rajaeifar, Oliver Heidrich, Vannessa Goodship, Emma Kendrick. A qualitative assessment of lithium ion battery recycling processes. <i>Resources, Conservation and Recycling</i> . 2021; 165. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105219
Tan2020	D. H. S. Tan, P. Xu, H. Yang, M.-C. Kim, H. Nguyen, E. A. Wu, J.-M. Doux, A. Banerjee, Y. S. Meng, Z. Chen, Sustainable design of fully recyclable all solid-state batteries, <i>MRS Energy & Sustainability</i> 7, 23, 2020 10doi:10.1557/mre.2020.25
Thielmann2017	Thielmann, A., Neef, C., Hetteshheimer, T., Döscher, H., Wietschel, M., Tübke, J.; Energy storage Roadmap (Update 2017) [Energiespeicher-Roadmap (Update 2017)]; Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI; (2017)
Wang2020	Wang, Z., Analysis of Lithium Battery Recycling System of New Energy Vehicles under Low Carbon Background, <i>IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.</i> 514 032008, 2020, doi:10.1088/1755-1315/514/3/032008
Zhang2018	Xiaoxiao Zhang, Li Li, Ersha Fan, Qing Xue, Yifan Bian, Feng Wu and Renjie Chen, <i>Chem. Soc. Rev.</i> , 2018,47, 7239-7302, https://doi.org/10.1039/C8CS00297E

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei allen Interviewpartnerinnen und Interviewpartnern für ihre Zeit und die hilfreichen Experteneinschätzungen, sowie bei Marianne Kronsbein, Dennis Gründel und beim Team des VDMA und dessen IMPULS-Stiftung für die inhaltliche und koordinatorische Unterstützung.

IMPULS -
STIFTUNG

Dr. Johannes Gernandt
Geschäftsführender Vorstand

Stefan Röger
Geschäftsführender Vorstand

IMPULS-Stiftung
für den Maschinenbau,
den Anlagenbau und
die Informationstechnik

Lyoner Straße 18
60528 Frankfurt

Telefon +49 69 6603 1462

Fax +49 69 6603 2462

Internet www.impuls-stiftung.de

E-Mail info@impuls-stiftung.de