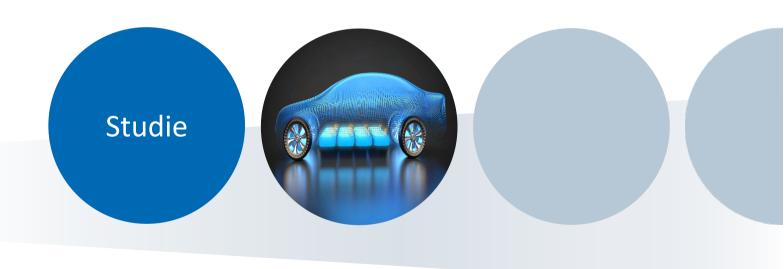
IWCONSULT



Begleitforschung des Expertenkreises Transformation der Automobilwirtschaft zum Thema Resilienz der automobilen Wertschöpfungs- und Liefernetzwerke Thema "Innovationen"

Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

19.01.2024



Institut der deutschen Wirtschaft Köln Consult GmbH · Konrad-Adenauer-Ufer 21 · 50668 Köln Postanschrift: Postfach 10 19 42 50459 Köln · Eingetragen im Handelsregister Köln HRB 30889 Geschäftsführer: Dr. Henry Goecke, Hanno Kempermann · Sitz der Gesellschaft ist Köln



Impressum

© 2024

IW Consult GmbH Konrad-Adenauer-Ufer 21 50668 Köln

Tel.: +49 221 49 81-758 www.iwconsult.de

Autoren

Cornelius Bähr Hanno Kempermann Felicitas Kuttler Emma Brauckhoff

Bildnachweise

Titelseite: Shutterstock

Inhalt

1	Exec	utive Su	ımmary	1		
2	Fahi	zeugdes	ign und Bedarf an kritischen Rohstoffen	5		
	2.1	Status Quo				
	2.2	Ausblicl	k	6		
3	Sub	stitution	soptionen bei kritischen Rohstoffen	8		
	3.1	Status Quo				
		3.1.1	Kritische Rohstoffe in Batterien	8		
		3.1.2	Charakteristiken der Batterietypen	10		
		3.1.3	Substitutionsmöglichkeiten und damit verbundene Zielkonflikte	13		
	3.2	Ausblicl	k	14		
4	Innovative Verfahren bei Recycling von Rohstoffen					
	4.1	Status (Quo	18		
		4.1.1	Überblick über existierende Recyclingverfahren	19		
		4.1.2	Vergleich der existierenden Recyclingverfahren	20		
	4.2	Ausblick				
5	Inno	vative V	erfahren beim Abbau von Rohstoffen	28		
	5.1	Status (Quo	28		
	5.2	Ausblicl	k	31		
6	Han	ndlungsempfehlungen				
7	Lite	Literaturverzeichnis40				
8	Anhang					
	8.1	1 Methodisches Vorgehen				
	8.2	Abbildu	ingen. Tabellen und ergänzende Erläuterungen	52		

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Problemaufriss	1
Abbildung 3-1: Szenario-Vergleich Batterietechnologien	13
Abbildung 3-2: Entwicklung Ladeinfrastruktur	17
Abbildung 4-1: Recyclingverfahren von EoL-Batterien	20
Abbildung 4-2: Überblick zur EU-Batterieverordnung	25
Abbildung 6-1: Systeme von Handlungsbereichen	35
Abbildung 6-2: Komplexität und Interdependenz	35
Abbildung 8-1: Nennung von Batterietypen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften	
Abbildung 8-2: Anthropogenes Metalllager in Deutschland	52
Tabellenverzeichnis	
Tabelle 4-1: Überblick der Vor- und Nachteile verschiedener Recyclingverfahren	24
Tabelle 8-1: Teilnehmer an Interviews	49

1 Executive Summary

Innovation für Resilienz

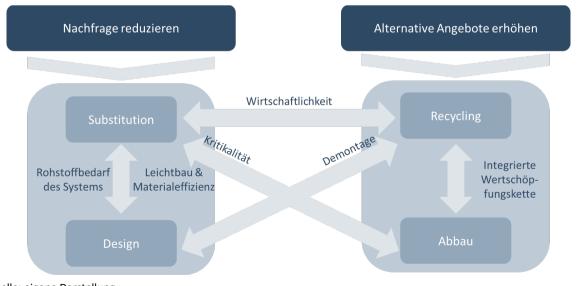
Eine erhöhte Resilienz setzt die Erzeugung von Redundanzen voraus. Die Möglichkeit, Beschränkungen durch das Auftreten plötzlicher Knappheiten zu entgehen, besteht nur dann, wenn sonst ungenutzte Kapazitäten zur Verfügung stehen. Das Vorhalten solcher Redundanzen als Absicherung gegen Lieferausfälle ist mit Kosten verbunden. Im Sinne einer effizienten Risikoabwägung stellen Unternehmen die individuellen Kosten der Redundanzen zur Risikoabsicherung gegen die individuellen Kosten des Schadensfalles bei Eintritt des Risikos einander gegenüber.

Zwei Überlegungen können eine unzureichende individuelle Risikoabsicherung begründen. Einerseits entstehen in der Transformation der Automobilwirtschaft neue Lieferrisiken durch die zunehmende Nachfrage nach bisher wenig genutzten Rohstoffen mit hohen Versorgungsrisiken. Es ist nicht a priori klar, ob die Unternehmen diese Risiken schon vollständig einschätzen können. Andererseits besteht durch die Verknüpfung der Wertschöpfungsketten ein systemisches Risiko von Lieferausfällen, das mit der Komplexität der Produkte steigt. Durch Rohstoffknappheiten bedingte Produktionsausfälle eines Unternehmens können sich in der Wertschöpfungskette fortpflanzen. Diese Spill-over-Effekte sind in der individuellen Risikoabwägung der einzelnen Unternehmen nicht zwingend berücksichtigt. Im Falle eines solchen Marktversagens kann eine temporäre oder dauerhafte zumindest partielle Unterstützung der Etablierung redundanter Systeme als Aufgabe staatlicher Institutionen angesehen werden.

Die Resilienz der Wertschöpfungsketten in der Automobilindustrie ist in Hinblick auf die Versorgung mit Rohstoffen durch die hohe Abhängigkeit vom ausländischen Primärrohstoffangebot gefährdet (EY, IW Consult, 2023). Ein Beitrag zur Reduzierung der Abhängigkeit von ausländischen Primärrohstoffangebot kann auf zwei Wegen erbracht werden: Reduzierung der Nachfrage sowie Schaffung alternativer Angebote (Abbildung 1-1).

Abbildung 1-1: Problemaufriss

Übersicht von Bereichen und Wechselwirkungen



Quelle: eigene Darstellung.

Die Reduzierung der Nachfrage kann durch Substitution und Design erfolgen, die gemeinsam den Rohstoffbedarf des Systems beeinflussen. Eine wesentliche Rolle kommt hierbei dem Leichtbau zu, um eine Verringerung des Materialeinsatzes, etwa durch neuartige Konstruktionsweisen und Fertigungstechnologien, zu realisieren. Hierbei ist ein holistischer Ansatz zur gleichzeitigen Erreichung von ökologischen Aspekten als auch ökonomischen Zielen notwendig. Die Bereitstellung von mehr Primär- und Sekundärmaterial durch Abbau und Recycling vergrößert alternative Angebote zum ausländischen Primärangebot von Rohstoffen.¹

Dabei sind Interdependenzen zwischen vier Bereichen zu beobachten. Substitutionsmöglichkeiten und Fahrzeugdesign bestimmen gemeinsam den Rohstoffbedarf im System Automobil. Recycling und Rohstoffabbau sind über die Wertschöpfungskette in der Bereitstellung von Rohstoffen verknüpft. Substitution von Rohstoffen beeinflusst die Wirtschaftlichkeit von Recyclingmaßnahmen, in dem der Rohstoffinhalt der Produkte sich ändert. Das Fahrzeugdesign beeinflusst die Möglichkeiten der Demontage und somit auch die Möglichkeit und Wirtschaftlichkeit des Recyclings. Die Kritikalität von Rohstoffen hängt von der Nachfrage und den Substitutionsmöglichkeiten ebenso ab wie vom Rohstoffabbau.

Handlungsempfehlungen müssen diese Interdependenzen und die dadurch entstehende Komplexität berücksichtigen.

Fahrzeugdesign

Fahrzeugdesign ist in erster Linie Aufgabe der OEMs. In Hinblick auf die Rohstoffversorgung gilt es, ein optimales ressourcensparendes Design zu entwickeln unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen innerhalb des Fahrzeugs, beispielsweise zwischen der Batteriegröße, der Motorstärke und -effizienz und dem Gewicht des Fahrzeugs, das auch von der konsequenten Anwendung von Leichtbau abhängt. Die Digitalisierung zur Optimierung des Gesamtsystems und der Batterieleistung bietet weitere Möglichkeiten.

Das Fahrzeugdesign sollte unter Rohstoff- und Ressourcenerwägungen das spätere Recycling mitberücksichtigen. Der Einsatz von weniger unterschiedlichen Materialien und einheitlicheren Legierungen sowie die Berücksichtigung der zukünftigen Demontage sind dabei essenziell. Fahrzeugdesign ist dadurch eng mit den Themen Substitution und Recycling verbunden. Entsprechende Rohstoffkompetenzen sollten in den Unternehmen gestärkt werden.

Fahrzeuge sind gleichzeitig Teil des größeren Mobilitätssystems. Technische Optionen – z.B. Optimierung der Lademöglichkeiten für E-Fahrzeuge, Akkutausch, modulares Design von Batterien oder Fahrzeugen – oder Verhaltensänderungen der Nutzer – Nutzung von Car/Ride-Sharing-Angeboten, Änderung des Modal Split, Nutzung des ÖPNV und dessen bessere Verzahnung mit dem Individualverkehr – können zu weiteren Ressourceneinsparungen beitragen. Dabei können Synergien zwischen den technischen Optionen und Verhaltensänderungen genutzt werden.

Substitution

Die heutigen Substitutionsmöglichkeiten bauen auf der Grundlagenforschung der Vergangenheit auf. Neuere Batterietypen beispielsweise stellen Produktinnovationen auf Basis früherer Grundlagenforschung dar, in denen bezogen auf die Leistung kritische Rohstoffe in geringerem Umfang vorkommen.

2 WCONSULT

¹ Dies ist auch in der Rohstoffstrategie der Bundesregierung, dem Eckpunktepapier des BMWK zur Rohstoffversorgung und im Entwurf des Critical Raw Materials Act der Europäischen Kommission so angelegt.

Teilweise handelt es sich um Optimierungen schon genutzter Zellchemien. Teilweise werden neue Zellchemien eingesetzt.

Grundlagenforschung erschließt so Potenziale für unvorhergesehene disruptive Änderungen. Technologieoffenheit ist hier von besonderer Bedeutung. Kurz- und mittelfristige Lösungen sind eher nicht zu erwarten. Die effiziente Verknüpfung von Grundlagenforschung, Anwendungsforschung und Industrie ist wesentlich für die Transformation von Forschungsergebnissen zu Produkten.

Bei der Substitution von Rohstoffen – also dem direkten Ersatz von einem Rohstoff durch einen anderen – ist zu beachten, dass dadurch neue Kritikalitäten geschaffen werden können. Bezogen auf die vorgeschlagene Priorisierung von Batterietypen mit derzeit geringerem Einsatz von kritischen Rohstoffen – kobaltarme NMC-Batterien, kobaltfreie LFP-Batterien oder perspektivisch lithiumfreie Natriumlonen-Batterien – scheint dieses Problem gering zu sein. Dies gilt aus heutiger Sicht sowohl für den Ersatz von Kobalt und Mangan durch Nickel als auch für die Substitution von Lithium durch Natrium.

Substitution von Rohstoffen im Sinne einer Bedarfsreduktion kann auch durch Optimierung am System entstehen. Effizientere Motoren, Leichtbau oder eine verbesserte Ladeinfrastruktur ermöglichen den Einsatz kleinerer Batterien. Leichtbau aktiviert zudem auch weitere Einsparpotentiale des Rohstoffverbrauchs, sowohl in der Fertigung als auch in der Nutzungsphase der Fahrzeuge. Auch hier kann die Bedarfsreduktion bei einem Rohstoff zur Bedarfszunahme bei einem anderen Rohstoff führen.

Recycling

Recycling kann einen substanziellen Beitrag für die Versorgung mit einigen kritischen Rohstoffen leisten. Dies gilt schon heute für die Basismetalle Stahl, Aluminium, Kupfer, Nickel und darüber hinaus in zunehmendem Maße für die Batterierohstoffe Lithium, Kobalt oder Mangan. Recycling von Seltenen Erden ist noch weiter von der Marktreife entfernt.

Der mögliche Beitrag des Recyclings hängt unter anderem von der Menge des rückläufigen Materials ab. Große Mengen an Batteriematerialien werden zwar erst dann erwartet, wenn die Nutzungszeit der im Hochlauf der E-Mobilität verbauten Batterien ihr Ende erreicht. Investitionen in den Aufbau von Recyclinganlagen sollten aber schon jetzt erfolgen. Die derzeit außer Dienst gestellten Autobatterien sind besonders kobaltreich. Ausschuss aus der Batterieproduktion kann ebenfalls dem Recycling zugeführt werden. Außerdem handelt es sich auch bei den Recyclinganlagen um große Investitionen, die wegen der langen Planungs- und Genehmigungszeiten einen entsprechenden Vorlauf benötigen.

Verschiedene Recyclingverfahren für Batterien unterscheiden sich im Potenzial, spezifische Rohstoffe in hoher Qualität zurückzugewinnen. Auch die Voraussetzungen an Sammlung, Trennung und Vorbereitung der Alt-Batterien sowie in den Möglichkeiten der Automatisierung und der Wirtschaftlichkeit sind verschieden. Dadurch eignen sich die einzelnen Verfahren unterschiedlich gut für unterschiedliche Batterietypen. Dadurch entsteht die Notwendigkeit das Themenfeld Recycling gemeinsam mit dem Themenfeld Substitution zu denken und die Verknüpfung der Wertschöpfungsketten zu unterstützen.

Recycling ist Teil der Circular Economy und darf nicht losgelöst von der Primärrohstofferzeugung betrachtet werden. Die Automobilindustrie fragt nicht Rohstoffe, sondern Vorprodukte mit bestimmten Eigenschaften nach. Rohstoffe aus dem Recycling müssen daher bei den Primärerzeugern in den Kreislauf eingeschleust werden. Rohstoffverarbeitung und Primärerzeugung von Rohstoffen im Inland gehören daher zu den Voraussetzungen einer Kreislaufführung im Inland.

Die Sammlung und Rückführung der Rohstoffe sollten – nach Möglichkeit – alle alten Batterien erfassen. Stoffspezifische Recyclingraten und Materialeinsatzraten sind essenziell, wenn das Recycling



kleiner Rohstofffraktionen überwacht und umgesetzt werden soll. Die Batterieverordnung der EU wird vor diesem Hintergrund allgemein positiv bewertet. Die für die Recyclingunternehmen wichtigen Informationen über die Produkte können mittels eines digitalen Produktpasses transportiert werden. Inwiefern der Gesamtprozess der Circular Economy darüber hinaus institutionell gestützt werden kann – etwa in Aufbau neuer IPCEIs oder Erweiterung bestehender IPCEIs – sollte geprüft werden.

Abbau

Der Abbau von metallischen Rohstoffen findet in Deutschland und Europa derzeit nur in geringem Umfang statt. Projekte wurden in der Vergangenheit vor allem auf Basis der Wirtschaftlichkeit, weniger vor dem Hintergrund der Resilienz der Versorgung beurteilt. Die mangelnde Wirtschaftlichkeit resultiert aus höheren Kosten des Abbaus wegen ungünstiger zu erschließenden Rohstoffvorkommen, strengeren Umweltauflagen und höheren Kosten für Arbeit und Energie.

Eine erfolgreiche Wiederaufnahme von Bergbautätigkeiten in Europa ist nur dann sinnvoll, wenn es gleichzeitig gelingt, die Aufbereitung und Weiterverarbeitung von Rohstoffen in Europa zu etablieren. Europäischer Bergbau zum Export der Erze zahlt nicht auf das Ziel einer erhöhten Resilienz ein. Auch diese Prozesse sind energieintensiv und können sich wegen möglicher Umweltbelastungen einer geringen Akzeptanz in der Bevölkerung gegenübersehen.

Innovationen sollten daher auf mehrere Perspektiven gerichtet sein und umfassen Prozesse ebenso wie Institutionen. Einerseits gilt es, die Effizienz bei der Erschließung der Rohstoffvorkommen und der Erfüllung von Umweltauflagen zu erhöhen. Andererseits müssen Hindernisse im Bereich der Finanzierung und der Akzeptanz der Bevölkerung überwunden werden. Folgende Punkte erscheinen besonders relevant.

- ▶ Digitalisierung des Bergbaus (Smart Mining) in Verbindung mit innovativen Gewinnungstechniken (In-Situ-Recovery, verbesserte hydrometallurgische oder biohydrometallurgische Verfahren, Phytoming) trägt zu einer gezielteren Auffindung der Rohstoffvorkommen und einem Bergbau mit geringeren Umweltauswirkungen (z.B. Abraum, Wassermanagement) bei.
- Zur Innovation zählt auch die Erschließung neuer Lagerstätten wie die Ausbeutung von geothermalen Tiefenwässern (vor allem für Lithium) oder durch Tiefseebergbau (vor allem für Mangan, Kupfer, Nickel und Kobalt). Beide Verfahren werden derzeit in Pilotprojekten erprobt.
- ▶ Für die Etablierung innovativer Maßnahmen im Bergbau sind die angewandte Forschung an Lagerstätten und die Fachkräfteversorgung wichtige Voraussetzungen. An beidem mangelt es derzeit in Deutschland und Europa.
- ▶ Die Finanzierung von Rohstoffprojekten verlangt im Vergleich zu Investitionen in der Industrie die Tolerierung höherer Risiken und langfristigere Kapitalbindung. Sie setzt dadurch ein strategisches langfristiges Engagement in einzelne Projekte voraus. Für die Realisierung solcher Projekte bedarfs daher eines Strategiewechsels bei den privaten Akteuren oder einer stärkeren staatlichen Flankierung der Projekte.
- ▶ Politische und gesellschaftliche Widerstände gegenüber dem Bergbau werden häufig mit erwarteten Umweltauswirkungen motiviert. Sie können reduziert werden, wenn eine verbesserte Nachhaltigkeit des Bergbaus auch im Vergleich zu Bergbaupraktiken in Drittländern verdeutlicht wird. Auch die Zielkonflikte zwischen einer geringeren Förderung in Deutschland und Europa und den weltweiten Umweltauswirkungen des Bergbaus sollten stärker in den Vordergrund gerückt werden.

4 iwconsult

2 Fahrzeugdesign und Bedarf an kritischen Rohstoffen

2.1 Status Quo

Das Fahrzeugdesign kann in Verbindung mit verschiedenen Ebenen der Mobilitätsnachfrage gesehen werden. Neben der Interaktion von Fahrzeugen im gesamten Mobilitätssystem kann sich das Design auf das Fahrzeug insgesamt oder auf einzelne Bauteile wie etwa die Batterie erstrecken.²

In Fahrzeugen sind neben jenen Metallen, die durch die Transformation der Automobilindustrie besonders in den Vordergrund gerückt sind – die Batterierohstoffe und die Seltenen Erden –, eine Reihe weiterer Metalle verbaut. Dazu zählen neben Stahl mit Aluminium und Kupfer weitere Basismetalle, die von der EU-Kommission ebenfalls als kritische Rohstoffe eingestuft werden. Betrachtet man das gesamte Fahrzeug als System, ermöglichen Änderungen an einem Subsystem Änderungen an anderen Komponenten. Effizienzsteigerungen der Fahrzeuge durch Leichtbau können beispielsweise einen höheren Bedarf an Aluminium nach sich ziehen. Mögliche Einsparungen in der notwendigen Leistungsfähigkeit von Batterien, die dadurch erreicht werden, führen so zu einer Verschiebung des Rohstoffbedarfs.

Das Design von Elektroautos und der darin verbauten Batterien orientierte sich in der Vergangenheit und auch am aktuellen Rand noch stark an der Reichweite der Fahrzeuge und damit an der Leistungsfähigkeit und Größe der Batterie. In Reaktion auf das Phänomen "Reichweitenangst" ist die Größe und Leistungsfähigkeit der Batterie und die damit verbundene erreichbare Reichweite ein zentrales Wettbewerbselement auf dem Markt für Elektroautos. Das resultierende Wettbewerbsergebnis ist, dass in E-Fahrzeugen derzeit relativ große Batterien mit einem entsprechend hohen Rohstoffbedarf verbaut werden. Gleichzeitig zeigen Mobilitätsuntersuchungen, dass in den meisten Fällen tägliche Fahrstrecken – etwa bei Berufspendlern – deutlich kürzer ausfallen als die Reichweiten der E-Fahrzeuge. Bei täglichen Lademöglichkeiten wäre es also häufig ausreichend kleinere Batterien mit geringerem Ressourcenverbrauch einzusetzen. Ein weiterer Ansatz ist die effizientere Nutzung der eingesetzten Rohstoffe bei konstanter Performanz, um die Fahrzeuge leichter und somit die Notwendigkeit großer und schwerer Batteriesysteme zu verringern. Hierbei sollten neben den elektrischen Komponenten auch die passiven Elemente wie die Batteriegehäuse und deren Gewichtseinsparpotentiale mitgedacht werden.

Innovatives Fahrzeugdesign, das auf eine Verringerung der Nachfrage nach Batterierohstoffen zielt, kann daher an mehreren Stellschrauben ansetzen:

- ► Kleinere Fahrzeuge bzw. leichtere Fahrzeuge benötigen für gleiche Reichweiten geringere Batteriegrößen.
- ▶ Geringere Reichweiten ermöglichen bei gleichem Fahrzeugdesign geringere Batteriegrößen.

² Es ist offenkundig, dass eine Umlenkung der Mobilitätsnachfrage weg vom Automobil gleichzeitig mit der Senkung der Nachfrage nach Automobilen auch die Rohstoffnachfrage aus der Automobilindustrie verringert. Innovationen, die zu dieser Entwicklung beitragen, können den Bedarf an Rohstoffen senken, tragen aber wenig zu einer erfolgreichen Transformation der Automobilindustrie bei. Auch die Änderung des Nutzungsverhaltens durch Car Sharing oder einer höheren Priorisierung von kürzeren Strecken kann Auswirkungen auf die Leistungsanforderungen an die Fahrzeuge haben.

- ▶ Eine Verbesserung der Schnellladefähigkeit verringert den Zeitverlust bei häufigerem Laden und erhöht die Attraktivität von Batterien mit geringeren Reichweiten.
- Modulares Batteriedesign erhöht die Flexibilität der verwendeten Batterien und ermöglicht im Durchschnitt geringere Batteriegrößen.
- ▶ Wechseln der Batterie kann schneller erfolgen als das Laden der Batterie. Es ermöglicht zudem den flexibleren Einsatz unterschiedlicher Batteriegrößen und kann dadurch die durchschnittliche Batteriegrößen verringern.
- ► Eine stärkere Verknüpfung des Automobils mit anderen Verkehrsträgern und eine Änderung des Nutzungsverhaltens kann zu einer geringeren Nachfrage nach Batteriekapazität führen.
- ▶ Die Verbesserung der Ladeinfrastruktur erhöht die Flexibilität des Ladens und erhöht die Attraktivität von Batterien mit geringeren Reichweiten.

Die ersten drei genannten Möglichkeiten zielen direkt auf das Design des Fahrzeugs und der Batterie. Inwieweit sich Lösungen mit kleineren Fahrzeugen oder geringeren Reichweiten am Markt durchsetzen, hängt letztlich von den Präferenzen der Kunden und dem Angebot an Elektroautos ab. Die Verbesserung der Schnellladefähigkeit einer Batterie kann als Verbesserung der Nutzbarkeit der Elektroautos als Wettbewerbsmerkmal positiv vermarktet werden.

Modulares Batteriedesign, das relativ einfach Änderungen am eingesetzten Batteriesystem ermöglicht oder das Wechseln statt Laden von Batterien setzen ebenfalls am Design des Fahrzeugs an. Sie greifen aber tiefer in das System ein und würden größere Änderungen gegenüber den jetzt in Deutschland produzierten Fahrzeugen erfordern.

Der Ausbau der Ladeinfrastruktur ist auf der Ebene des Mobilitätssystems anzusiedeln. Er ist gleichzeitig eine Voraussetzung dafür, dass die Verbesserung der Schnellladefähigkeit von Batterien positive Effekte zeigen kann. Die Verbindung von Schnellladefähigkeit und verbessertem Angebot an Lademöglichkeiten können als Voraussetzungen angesehen werden, dass Kunden von Elektroautos geringere Reichweiten akzeptieren.³

Darüber hinaus spielt die Frage des Fahrzeugdesigns auch eine Rolle in Hinblick auf die Recyclingfähigkeit der verbauten Materialien (vgl. Kapitel 4.2 unten, "Design for Circularity"). Es beinhaltet auch, dass idealerweise möglichst wenig verschiedene Materialien eingesetzt werden sollte – etwa in Hinblick auf unterschiedliche Metalllegierungen in der Karosserie eines Automobils.

2.2 Ausblick

6

Reichweite und Batteriekapazität

In einer Studie von Transport & Environment (2023) wird in einer Modellrechnung dargestellt, wie groß die Rohstoffeinsparungen bei Elektroautos sein können, wenn neben dem Einsatz innovativer Zellchemien auch die Fahrzeuggröße und die gefahrenen Kilometer der Fahrzeuge verringert werden. Zusammengenommen werden substanzielle Einsparungen von rund 40 Prozent bei den Rohstoffen Lithium,

™CONSULT

³ Wenn man die Herausforderung auf der Systemebene betrachtet, bestehen Wechselwirkungen zur Frage der Substitution von kritischen Rohstoffen in Batterien. So beeinflusst die Wahl der Rohstoffe die hier zu diskutierenden Charakteristiken der Batterien, wie z.B. die potenziellen Energiedichten und daraus abgeleitet die Reichweite oder die Schnellladefähigkeit der Batterien.

Kobalt, Mangan und Nickel errechnet. Rund die Hälfte geht auf innovative Zellchemien zurück. In ähnlicher Weise ermitteln Riofrancos et al. (2023) ähnliche Ergebnisse für die USA.

Eine Voraussetzung dieser Ansätze ist neben der technologischen Substitution von Rohstoffen auch eine Verhaltensanpassung der Mobilitätsnachfrager – einerseits in Hinblick auf die Größe des nachgefragten Autos (Zusatznutzen von Autos über den Mobilitätszweck hinaus), andererseits in Hinblick auf den Modal Split der eigenen Mobilitätsnachfrage (weniger mit dem Automobil gefahrene Kilometer). Gegebenenfalls setzt diese Verhaltensanpassung weitere Änderungen an der gesamten Mobilitätsinfrastruktur voraus.

Rackley et al. (2022) verweisen auf die Ressourceneinsparung bezogen auf den gesamten Lebenszyklus der Batterie beim Einsatz kleinerer Batterien. Die Autoren verweisen darauf, dass die aus kleineren Batterien resultierenden geringeren Reichweiten kombiniert mit Schnelllademöglichkeiten, Batterietausch oder Range Extendern in Fahrzeugen für die Konsumenten akzeptabel ausgestaltet werden können. Während Batterietausch und Range Extender das eigentliche Fahrzeugdesign betreffen, verweist die Rückkopplung zu den Schnelllademöglichkeiten auf die Abhängigkeit innovativen Fahrzeugdesigns vom Gesamtdesign des Mobilitätsmarkts. Die Schnelllademöglichkeiten sind Teil der Verkehrsinfrastruktur. Simulationsergebnisse von Spaven et al. (2022) zeigen, dass eine höhere Anzahl verlässlicher Schnellladepunkte die benötigte Reichweite von Elektroautos auch auf Langstrecken reduziert.

Zusammenfassend zeigen diese Überlegungen, dass Fahrzeugdesign zur Reduzierung der Rohstoffnachfrage auch von den infrastrukturellen Rahmenbedingungen und den Nutzungsanforderungen der Kunden abhängt.

Eine Umfrage des BDEW unter neuen Nutzern von Elektroautos zeigt, dass die Einschätzungen zur Reichweite und zur Praktikabilität des Ladens zuhause, an öffentlichen Ladesäulen und auf langen Strecken nach Erwerb des Fahrzeugs in der Nutzungsphase besser ausfallen als vor der Kaufentscheidung (BDEW, 2023). Dies könnte man dahingehend interpretieren, dass höhere Reichweiten in Zukunft für das Fahrzeugdesign eine geringere Rolle spielen.

Modulares Batteriedesign und Akkutausch statt Laden

Der chinesische Hersteller Nio setzt auf den Austausch von Autobatterien statt auf das Laden. Er betreibt Stationen, in denen die Batterien der Autos ausgetauscht werden, wenn sie entladen sind. Entsprechend sind Batteriedesign und Fahrzeugdesign auf diesen schnellen Austausch abgestimmt. Dadurch besteht die Möglichkeit, das gleiche Auto mit je nach aktueller Nutzung unterschiedlich abgestimmter Batterie auszustatten. In vielen Fällen wird daher nur eine relativ kleine Batterie mit geringer Reichweite benötigt werden. Für längere Fahrten könnten dann Batterien mit höherer Reichweite eingesetzt werden. Durch den schnellen Austausch der Batterie entfallen auch lange Ladezeiten bei größeren Batterien und damit ein weiteres Argument für Batterien mit besonders großer Reichweite. Zumindest im Durchschnitt ist mit diesem Konzept die Nutzung kleinerer rohstoffärmerer Batterien möglich.

Das Konzept von Nio bietet wiederum Anschluss an die Diskussion der Recyclingfähigkeit und der Verantwortlichkeit für ausgenutzte Batterien. In dem Batterieaustauschkonzept sind die Batterien Eigentum des OEM und werden vom Fahrzeugeigentümer lediglich genutzt. Die Sammlung der ausgedienten Batterien kann direkt beim OEM stattfinden. Zudem wäre es möglich, die Batterien zu einem relativ genau definierten Nutzungszustand dem Recycling zuzuführen, da der OEM in kurzen Intervallen Zugriff auf jede Batterie hat.



Schmidt et al. (2022) stellen einen modularen Ansatz für die Batteriefertigung vor, der ein flexibles Anpassen der Batteriegröße im Auto je nach aktuellem Bedarf ermöglicht. Hier wird nicht die ganze Batterie regelmäßig statt des Ladens getauscht. Dagegen könnte die Batterie in Elektroautos in größeren Intervallen für den jeweilig absehbaren Bedarf angepasst werden. Für den Alltagsbedarf könnten Batterien kleiner ausgelegt werden. Für längere Fahrten, für die eine größere Reichweite erforderlich oder gewünscht ist, kann die Batterie modular aufgerüstet werden. Auch bei größeren Flotten wäre es möglich, die Batterien jedes Fahrzeugs in der Gebrauchsphase passend auf den speziellen Anwendungsfall hin zu optimieren, ohne für die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs auf genau diese Batteriekapazität festgelegt zu sein.

Design for Circularity

Design for Circularity und Entwicklung der Recycling-Technologie auf industriellem Maßstab sind voneinander abhängig. Batterieproduzenten können erst dann das Batteriedesign auf bestimmte Recycling-Technologien anpassen, wenn diese bekannt sind. Umgekehrt hängt die Entwicklung der Recycling-Technologien davon ab, welche Batterie-Typen im Markt dominant werden. Generelle Überlegungen für das Design, wie Verzicht auf schwer lösliche Verklebungen oder klare Dokumentation des Aufbaus sind davon nicht betroffen. Ähnliches gilt für den Einsatz von Rezyklaten, mit denen die Batterieindustrie erst dann verlässlich planen kann, wenn deren Qualität konsistent eingeschätzt werden kann (Picatoste et al., 2022). Auch Lampon (2022) diskutiert die Möglichkeiten eines modularen, auf Recyclingfähigkeit abgestimmten Designs unter dem Begriff der Modular Electric Vehicles platforms (MEVP).

3 Substitutionsoptionen bei kritischen Rohstoffen

3.1 Status Quo

3.1.1 Kritische Rohstoffe in Batterien

Der Endbericht zum Thema Resilienz der automobilen Wertschöpfungs- und Liefernetzwerke (EY, IW Consult GmbH 2023) zeigt, dass die deutsche Automobilwirtschaft auf eine gesicherte Versorgung mit mineralischen Rohstoffen angewiesen ist. Die Dekarbonisierung des Verkehrs erfordert die Nutzung von Elektrofahrzeugen für den Individualverkehr. Für die Produktion dieser Fahrzeuge werden bedeutende Mengen an Rohstoffen benötigt, die Angebots- und Versorgungsrisiken bergen. Neben seltenen Erden für Elektromotoren werden für die Traktionsbatterien insbesondere Graphit, Kobalt, Mangan, Nickel und Lithium stark nachgefragt.

Die notwendigen Rohstoffe für die Produktion einer Batterie variieren mit der angewandten Batterietechnologie. Derzeit sind Lithium-Ionen-Batterien die dominierende Technologie für Elektrofahrzeuge (Iqbal et al. 2023; Shahjalal et al. 2022; Zhang et al. 2021; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI 2023b). Darin kommen verschiedene Rohstoffe mit unterschiedlicher Kritikalität zum Einsatz:

8 WCONSULT

- ▶ Als Bestandteil des Elektrolyten kommt als kritischer Rohstoff Lithium zum Einsatz. Die Kritikalität erscheint hier wegen der breiten gestreuten Vorkommen und den Investitionen in die Förderung in jüngster Zeit am ehesten als beherrschbar (EY, IW Consult GmbH 2023).
- ▶ Graphit wird für die Produktion des Großteils der in Batterien verbauten Anoden benötigt (Zhang et al. 2021; IEA 2023). Man kann unterscheiden zwischen Anoden, die rein auf Graphit basieren, und Anoden, die Graphit und Silizium enthalten. Silizium-Graphit Anoden benötigen etwa die Hälfte an Graphit (0,4 kg pro kWh) verglichen mit Anoden, die nur aus Graphit bestehen (IEA 2023).
- Beim Aktivmaterial für Kathoden sind aktuell zwei dominierenden chemischen Verbindungen zu beobachten: Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt (NMC) und Lithium-Eisenphosphat (LFP). Zudem werden Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium (NCA) Batterien hergestellt.

Der zukünftige Rohstoffbedarf wird so einerseits von der absoluten Höhe der nachgefragten Batteriekapazität abhängen, andererseits wird er vom Einsatzverhältnis der unterschiedlichen Batterietechnologien bestimmt. Durch die Änderung des Einsatzverhältnisses der verschiedenen Batterietypen vollzieht sich daher schon jetzt im Markt eine Substitution von Kobalt und Mangan durch andere Rohstoffe.⁴

Die Innovationsbemühungen der Batteriehersteller in den vergangenen Jahren zielten auf die Entwicklung kobaltärmerer Batterietypen, da Kobalt als besonders kritisch und teuer eingestuft wurde. Für die NMC-Batteriezellen existieren so verschiedene Zusammensetzungen in Bezug auf die Anteile von Nickel, Mangan und Kobalt am Aktivmaterial der Kathode. Zurzeit dominieren die chemischen Zusammensetzungen NMC 622 (Verhältnis 6:2:2) und NMC 811 (Verhältnis 8:1:1) (IEA 2023) zeigt. Die modernere NMC 811-Technologie benötigt im Vergleich zur NMC 622-Technologie über 50 Prozent weniger Kobalt für die gleiche Batteriekapazität. Gleichzeitig wurde die spezifische Lithiummenge je Batteriekapazität um 8-15 Prozent verringert. Dagegen stieg der Einsatz von Nickel um rund 25 Prozent (DERA 2021, IEA 2018).

Auf dem Batteriemarkt für Elektrofahrzeuge dominierte 2023 die NMC-Batterietechnologie mit einem Marktanteil von 60 Prozent gefolgt von LFP-Batterien (nahezu 30 Prozent) und NCA-Batterien (8 Prozent) (IEA 2023). In der Entwicklung der letzten Jahre zeigt sich ein Anstieg des Marktanteils von LFP-Batterien (2022: 15 Prozent; 2021: 7 Prozent). Die drei häufigsten verbauten chemischen Zusammensetzungen der NMC-Kathode waren im gesamten Jahr 2022 und im zweiten Halbjahr von 2022 NMC 811, NMC 622 und NMC 532 (IEA 2023; Adamas Intelligence 2023). Zudem haben sich von 2017 zu 2021 die Marktanteile der verschiedenen Batteriezellchemien an der verkauften Batteriekapazität insgesamt verschoben: es ist ein Rückgang des Markanteils von NMC-Batterien mit niedrigem Nickelanteil⁶ von etwa 25 Prozent auf 5 Prozent und zugleich ein Anstieg des Marktanteils der NMC-Batterien mit hohem Nickelanteil⁷ von etwa 55 Prozent auf 80 Prozent zu beobachten (IEA 2022).

LFP-Batterien werden derzeit nahezu ausschließlich in China produziert. 95 Prozent der LFP-Batterien, die in leichte elektrische Nutzfahrzeuge (LDV) verbaut wurden, stammten 2022 aus China und 50 Prozent der Nachfrage wurden von dem chinesischen Batteriehersteller BYD bedient (IEA 2023). Jedoch

_

⁴ Eine Deckung des Rohstoffbedarfs über das Recycling alter Batterien ist bisher nicht möglich, da die Recyclingraten innerhalb der EU bei unter 5 Prozent für mehr als die Hälfte der kritischen Rohstoffe liegen (EY, IW Consult GmbH 2023). Die möglichen Recyclingverfahren und deren Ausbau, die zu einer Steigerung der Rate und somit zu einer Reduzierung der Kritikalität der benötigten Rohstoffe führen, werden in Kapitel 3 näher beleuchtet.

⁵ vgl. die Daten in Tabelle 2-1 im Anhang auch für weitere Batteriezellchemien

 $^{^{6}}$ NMC 333 bzw. NMC 111

⁷ NMC 532, NMC 622, NMC 721, NMC 811, NCA und NMCA

wird prognostiziert, dass der europäische Anteil an der Produktion von LFP-Kathodenmaterialien bis 2023 auf 20 Prozent ansteigen wird (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI 2023b). Somit werden 2030 über 90 Prozent der LFP-Kathodenmaterialien in Europa und China produziert. Zudem wird erwartet, dass der in Europa produzierte Marktanteil von NMC-Kathodenmaterialien von etwa 18 Prozent (2022) auf 38 Prozent steigen wird. So plant beispielsweise der schwedische Batteriehersteller Northvolt, welcher auf die Herstellung von NMC-Batteriezellen spezialisiert ist, in Heide (Schleswig-Holstein) eine Gigafactory zu bauen, die eine jährliche Batteriekapazität von 60 GWh und somit die Batterieversorgung von einer Millionen Elektrofahrzeuge verspricht (Northvolt 2023). Zu der Kundschaft von Northvolt zählen unter anderem BMW, Volvo Cars und die Volkwagen-Gruppe. In den USA dominiert die Produktion von Batteriezellen mit NCA- und NMC-Kathoden. Es wird erwartet, dass bis 2030 rund 20 Prozent der weltweiten NMC-Kathodenmaterialien in den USA produziert werden. Zudem wird geschätzt, dass der chinesische Anteil an der Weltproduktion von NMC-Kathodenmaterialien von über 60 Prozent auf etwa 25 Prozent sinken wird (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI 2023b).

3.1.2 Charakteristiken der Batterietypen

Die Batterietechnologien unterscheiden sich in den Kriterien der Energiedichte, Reichweite, Schnellladefähigkeit, Zyklenfestigkeit, Sicherheit, Materialverfügbarkeit und Herstellungskosten. Keiner der Batterietypen ist bei allen Kriterien überlegen. Zusammenfassend bieten sowohl NMC- und NCA-Batterien gegenüber LFP-Batterien Leistungsvorteile vor allem bei der Energiedichte. LFP-Batterien sind dagegen günstiger in der Herstellung, benötigen weniger kritische Rohstoffe und sind zyklenfester. Eine Zusammenfassung der einzelnen Vor- und Nachteile der Batteriezellchemien wird durch Tabelle 2-2 abgebildet.

NMC-und NCA-Batterien verfügen über relativ hohe Energiedichten auf der Zellebene. NMC-Batterien erreichen eine gravimetrische Energiedichte von bis zu 260 Wh/kg (Vekić 2020; DERA 2021) bzw. bis zu 270 Wh/kg (DERA 2021) und NCA-Batterien von mehr als 250 Wh/kg (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI 2023a; DERA 2021; Durmus et al. 2020) und bis zu 320 Wh/kg wie die von uns befragten Experten angaben. Die Energiedichte auf Zellebene der NMC-Zellchemie ist höher, desto größer der Nickelanteil (Gutsch und Leker 2022). LFP-Batterien erreichen geringere Energiedichten (Iqbal et al. 2023; Marthaler et al. 2023; Vekić 2020). Dadurch sind LFP-Batterien bei gleigrößer Batteriekapazität schwerer und (Fraunhofer-Institut System-Innovationsforschung ISI 2023b). So wird beispielsweise bei der LFP-Qilin-Batterie von CATL eine Energiedichte von lediglich 160 Wh/kg (CATL 2022) gemessen. Die IEA geht bei LFP-Batterien von 85 Prozent der Energiedichte von konventionellen NMC 811 (IEA 2022) aus. Aus den Expertengespräche ergibt sich die Einschätzung, dass sich die Energiedichte der LFP-Batterien über die letzten Jahre durch Innovationen des Zelldesigns deutlich verbessert hat. Das Cell-to-Pack (CTP) Zelldesign ermöglicht eine Erhöhung des Anteils von Aktivmaterial – dem Speichermaterial – innerhalb der Batterie, indem auf den Einsatz von Batteriemodulen verzichtet wird und die Batteriezellen stattdessen direkt in das Batteriegehäuse integriert werden.

Eine hohe Energiedichte ist ein entscheidender Faktor für das Erreichen langer Reichweiten (Yang 2022). Die Erhöhung der volumetrischen Energiedichte führt bei konstantem Platzangebot der Batterie zu einer erhöhten Reichweite des Fahrzeuges (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI 2020) und eine hohe gravimetrische Energiedichte führt dazu, dass die Batterie leichter wird und das Fahrzeug somit an Reichweite gewinnt. Daher erzielen vor allem Elektrofahrzeuge mit NMC- und NCA-Batterietechnologie lange Strecken mit einer Vollladung (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI 2023b). Da die Batterieentwicklung rasant

voranschreitet, hinken die Ergebnisse von Forschungspapieren, die den aktuellen Wissensstand zusammenfassen, teilweise den Durchbrüchen und Ankündigungen der einzelnen Autoherstellern hinterher.⁸

Auch die Schnellladefähigkeit stellt ein wichtiges Leistungskriterium einer Batterie dar. Kurze Ladezeiten führen zu einer geringeren Bedeutung der Reichweite. Dies gilt in Expertenkreisen als Möglichkeit die Batteriegröße und den damit verbundenen Rohstoffeinsatz zu reduzieren (mdr 2023). Die Schnellladefähigkeit kann durch das Batterielademanagement verbessert werden, etwa durch effizienten Einsatz von Kühl- und Heizsysteme des Batteriemanagements. Bei Minusgraden müssen beispielsweise LFP-Batterien für die Ladung beheizt werden (heise Autos 2023). Zudem muss eine entsprechende Ladeinfrastruktur gegeben sein.

Das Bewertungskriterium der **Zyklenfestigkeit** stellt auf die Lebensdauer des Batteriesystems ab. Im Bereich der Elektromobilität wird das Ende der Lebensdauer eines Batteriesystems in der Regel durch einen Kapazitätsabfall auf 80 Prozent definiert. Hier schneidet die LFP-Batterietechnologie verglichen mit NMC- und NCA-Batterien überdurchschnittlich gut ab (Vekić 2020; Efore 2020). Die LFP-Batterie hält zwischen 2.000-9.000 Zyklen (Iqbal et al. 2023; Preger et al. 2020). NMC-Batterien haben hingegen eine Lebensdauer von bis zu 2.000 (Duan et al. 2020) bzw. 2.500 (Iqbal et al. 2023; Preger et al. 2020) und NCA von bis zu 1.500 (Preger et al. 2020) bzw. 2.000 (Duan et al. 2020) Zyklen. Der hohe Nickelanteil der Kathode führt zu einer geringeren Lebensdauer (Vekić 2020; Houache et al. 2022). So hat beispielsweise eine NMC 111 eine höhere Lebensdauer als eine NMC 811-Batterie (Armand et al. 2020).

Höhere Nickelanteile der NMC- und NCA-Technologie führen zu einer geringeren Thermostabilität des Batteriesystems (Vekić 2020; Houache et al. 2022). Das bedeutet unter anderem, dass diese Batterien unter bestimmten Bedingungen, wie Überhitzung schneller dazu neigen können, in Brand zu geraten oder zu explodieren. Batterien mit einer NCA-Kathode weisen verglichen mit der NMC- und LFP-Technologie die geringste Sicherheit auf (Houache et al. 2022; Liu et al. 2022). LFP-Batterien hingegen sind widerstandsfähiger gegen hohe Temperaturen und schwerer entflammbar (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI 2023b). LFP-Batterien erwiesen sich zudem als sicherer bei hohen Temperaturen und mechanischen Einwirkungen als NCA- und NMC-Battereien (Ohneseit et al. 2023). Es besteht also ein Trade-off zwischen der hohen Energiedichte und der Langlebigkeit sowie Sicherheit einer Batterie.

Im Hinblick auf die **Materialverfügbarkeit** der einzelnen Kathodenmaterialien sind insbesondere Kobalt sowie Nickel und Mangan kritisch (EY, IW Consult GmbH 2023). Kobalt und Nickel sind Bestandteile des Kathodenmaterials der NCA-Batterietechnologie. Bei der NMC-Batterietechnologie kommt Mangan hinzu. Diese kritischen Rohstoffe werden nicht für die Herstellung der LFP-Kathoden benötigt, was die Materialverfügbarkeit verbessert.

Die Herstellungskosten von Batteriezellen entfallen zu großen Teilen auf die verwendeten Materialien, insbesondere auf die Kathodenmaterialien. Dementsprechend punkten LFP-Batteriezellen niedrigen Herstellungskosten im Vergleich mit NCA- und NMC-Batterien (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI 2023b; IEA 2022). In den letzten zwei Jahren unterlagen vor allem die

_

^{8 .} Zur Veranschaulichung der derzeit zu erreichenden Reichweiten ein Beispiel einer Batterie mit nickelhaltiger Kathode: die Mercedes EQS Limousine hat eine Reichweite von 780 km (Mercedes-Benz). Die LFP-Batterie von CATL (CTP 3.0 technology) hingegen ermöglicht mit einer Vollladung eine Reichweite von 700 km (CATL 2023). Der Antrieb des Modells Dolphin von BYD, der am zweit häufigsten verkaufte Wagen in China 2022 (IEA 2023), basiert ebenfalls auf der LFP-Technologie und erreicht eine Reichweite von 427 km (BYD 2023). Doch dies repräsentiert Höchstwerte: 2022 betrug die durchschnittliche Reichweite der 2022 verkauften kleinen Elektrofahrzeuge etwa 300 km und die der großen Elektrofahrzeuge knapp 500 km in Europa (IEA 2023).

Rohstoffe Lithiumcarbonat, Lithiumhydroxid, Nickel und Kobalt erheblichen Preisschwankungen. Eine Analyse des Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI zeigt, dass die Zellkosten für LFP-Batterie in allen Annahmen unterschiedlicher Einkaufskonditionen für Ausgangsmaterialien unterhalb der von NMC 811-Batterien lag (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI 2023c). Die Schätzungen ergeben ein aktuelles Preisniveau von 120 USD/kWh für die NMC 811-Zelle und von etwa 95 USD/ kWh für die LFP-Zelle.

Durch die unterschiedlichen Eigenschaften der Batterien ergeben sich unterschiedliche Einsatzgebiete der Batterietypen. Zusammenfassend eignen sich LFP-Batterien aufgrund ihrer geringeren Energiedichte derzeit vor allem für den Einsatz in Kleinfahrzeugen und in Fahrzeugen, die vor allem in der Stadt benutzt werden und daher keine hohen Reichweiten erreichen müssen. Liegt der Fokus auf dem Erzielen maximaler Reichweiten greifen die Hersteller eher auf NMC- oder NCA-Batterien zurück. Diese sind gleichzeitig häufig Teil des Premiumsegments. So können die höheren Herstellungskosten im Fahrzeugpreis getragen werden.

Diese Verteilung lässt sich an Teslas "Diversified Cathode Approach" illustrieren. Der Hersteller unterteilt die Elektrofahrzeuge in drei Kategorien in Abhängigkeit von dem verwendeten Kathodenmaterial und den damit verbundenen Leistungen. So bedienen Fahrzeuge mit LFP-Batterie den Entry Market, Fahrzeuge mit Nickel und Mangan die Zielgruppe Medium+ und Kathoden mit hohem Nickelanteil das Premiumsegment (P3 Automotive GmbH 2020). Auch die von uns befragten Experten geben an, dass LFP-Batterien den Entry Market und NMC- und NCA-Batterien die nachgefragten Technologien des Premiumsegment abbilden.

Tabelle 2-2: Eigenschaften verschiedener Batterietypen im Vergleich

Voller Kreis entspricht der besten Bewertung, leerer Kreis entspricht der schlechtesten Bewertung

Kategorien		LFP	NMC	NCA
Energiedichte	4	0	•	
Reichweite	9 5 *	0		
Zyklenfestigkeit	x-mal			
Sicherheit				\bigcirc
Herstellungskosten			\bigcirc	\bigcirc
Materialverfügbarkeit	$\bigcirc \bigcirc \bigcirc$		\circ	\circ

Quelle: eigene Darstellung.

3.1.3 Substitutionsmöglichkeiten und damit verbundene Zielkonflikte

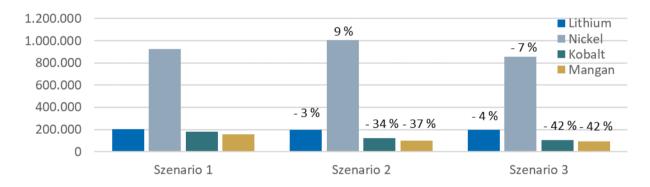
Die Substitution von Rohstoffen durch den Einsatz unterschiedlicher Batterietechnologien lässt sich anhand einer Beispielrechnung veranschaulichen. Bei einer für 2030 prognostizierten Nachfrage nach einer Batteriekapazität von 2.168 GWh für Hybrid- und Elektrofahrzeuge (Roland Berger 2022) unterschiedet sich die Rohstoffnachfrage je nach Einsatz verschiedener Kathodenmaterialien erheblich. In der Abbildung 3-1 werden drei Szenarien mit unterschiedlichen Einsatzquoten von Batterietechnologien verglichen.⁹

- Szenario 1: jeweils 30 Prozent LFP-, NMC 622- und NMC 811-Batterien sowie 10 Prozent NCA 5-Batterien,
- Szenario 2: 60 Prozent NMC 811-, 30 Prozent LFP- und 10 Prozent NCA 5-Batterien und
- Szenario 3: 55 Prozent NMC 811-, 40 Prozent LFP- und 5 Prozent NCA 5-Batterien.

Bei gleicher Nachfrage nach Batteriekapazität sinken die Einsatzmengen von Kobalt und Mangan durch die Unterschiede im Technologiemix zwischen den Szenarien um 34 Prozent (Kobalt) und 37 Prozent (Mangan) im Übergang zu Szenario 2 und um je 42 Prozent (Kobalt und Mangan) im Übergang zu Szenario 3.¹⁰ Auch der Lithiumbedarf geht leicht zurück. Der Nickelbedarf steigt mit der Substitution von NMC6- durch NMC8-Batterien, sinkt aber bei zunehmendem Einsatz von LFP-Batterien.

Abbildung 3-1: Szenario-Vergleich Batterietechnologien

Annahme: Batteriekapazität von 2.168 GWh für Elektro-Pkw Rohstoffeinsatz für Batterien in Tonnen (linke Skala), Veränderung gegenüber Szenario 1 in Prozent



Szenario 1: 30% LFP, 60% NMC (30% NMC8, 30% NMC6), 10% NCA

Szenario 2: 30% LFP, 60% NMC8, 10% NCA Szenario 3: 40% LFP, 55% NMC8, 5% NCA

Quelle: Roland Berger (2022); DERA (2021); eigene Darstellung.

Die Beispielsrechnung veranschaulicht, dass Substitution von Rohstoffen durch die Auswahl und Optimierung schon vorhandener Batteriezelltechnologien erreicht werden kann. Dies gilt allerdings in erster Linie für die Rohstoffe Kobalt und Mangan. Die kapazitätsspezifische Nachfrage nach Lithium und

_

⁹ Die Aufteilung des Szenario 1 entspricht in etwa der derzeitigen Aufteilung, wobei NMC-Batterien in Summe einen Marktanteil von 60 Prozent haben IEA 2023. Aus Angaben in den Experteninterviews wurde der Trend zu kobaltärmeren NMC-Technologien abgeleitet. Die spezifischen Rohstoffinhalte wurden aus einer DERA-Studie übernommen (DERA 2021).

¹⁰ Hier ist die Veränderung der Nachfrage, die durch die Produktion von Elektrofahrzeugen entsteht und nicht die globale Rohstoffnachfrage, gemeint.

Nickel verändert sich dagegen relativ wenig. Neuere Batterietechnologien wie die Natrium-Batterie und weitere Leistungsoptimierungen können hier einen weiteren Beitrag leisten.

Der Bericht von EY und IW Consult GmbH (2023) stuft zudem Graphit und Silizium als weitere Rohstoffe mit hoher Kritikalität ein. Insbesondere Graphit ist Bestandteil in einem Großteil der verbauten Anoden (Zhang et al. 2021). Derzeitig basieren etwa 70 Prozent des Anodenaktivmaterials rein auf Graphit und etwa 30 Prozent auf Graphit und Silizium. So führt die Substitution von Graphit- durch Silizium-Graphit-Anoden bei gleicher Batteriekapazität zwar zu einer Halbierung des Graphitbedarfs, aber zugleich zu einem Anstieg der Siliziumnachfrage ceteris paribus (IEA 2023).

Die zu erwartende steigende Rohstoffnachfrage könnte neben einem Hochlauf der Elektromobilität zusätzlich durch den Rebound-Effekt verstärkt werden. Produktinnovationen wie z.B. das Cell-to-Pack Zelldesign führten bereits in den letzten Jahren nicht allein zu einem Rückgang des Materialbedarfs pro Batterie, sondern auch zu Leistungssteigerungen wie die Erhöhung der Batteriekapazität pro Fahrzeug.

Die bestehenden Zielkonflikte der Substitutionsmöglichkeiten zeigen, dass eine breite und ausgewogene Streuung der Marktanteile auf verschiedene Batterietechnologien empfehlenswert ist. Eine weitere Möglichkeit die Resilienz der automobilen Wertschöpfungskette zu stärken, ist die Verbesserung und der Ausbau der Recyclingverfahren sowie Produktinnovationen bestehender Batterietechnologien wie Verbesserungen des Batteriezelldesigns, des Batteriemanagementsystems und des Fahrzeugdesigns.

3.2 Ausblick

Aus der Darstellung des Status quo ergeben sich drei Ansatzpunkte, wie Innovation durch die Substitution von Rohstoffen zu einer geringeren Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen führen kann:

- Die Substitution von kritischen Rohstoffen in der Batterie setzt direkt an diesem System an.
- ▶ Die Betrachtung des Autos als System weitet die Perspektive auf die wechselseitigen Abhängigkeiten des Rohstoffbedarfs in den verschiedenen Systemen des Automobils.
- Darüber hinaus ist die Nutzung des Automobils in ein Gesamtsystem eingebunden. Umgebungsparameter, wie die Ladeinfrastruktur können den Rohstoffbedarf im Auto beeinflussen.

Neue Batterietypen

Stetige Innovation gehört in diesem relativ jungen Marktsegment zu den prägenden Charakteristika der Entwicklung. Neue Batterietypen können das Wachstum des zukünftigen Rohstoffbedarf bei kritischen Rohstoffen bremsen, in dem andere, weniger kritische Rohstoffe eingesetzt werden. Insgesamt ist dennoch weiter von einem steigenden Rohstoffbedarf insgesamt auszugehen.

Die Entwicklung der vergangenen Jahre (vgl. oben) zeigt schon eine Verringerung des auf die Kapazität bezogenen Bedarfs kritischer Rohstoffe in Traktionsbatterien. Dies trifft vor allem auf Kobalt zu, das schon länger als kritischer Rohstoff gilt und – auch deswegen – relativ hohe Kosten verursacht. Dies machte eine Substitution dieses Elements besonders Johnend.

In den Expertengesprächen wurden vor allem zwei Batterietypen identifiziert, die eine Verringerung des spezifischen Rohstoffbedarfs in den kommenden Jahren verursachen werden:

- ▶ Lithium-Eisen-Phosphat-Batterien werden in Zukunft weiter steigende Marktanteile verzeichnen. Mit ihnen wird vor allem auf den Einsatz von Kobalt verzichtet. Auch die benötigte Menge an Lithium ist etwas geringer (vgl. Tabelle 8-2). Dieser Batterietyp hat gegenüber kobalthaltigen Batterien eine geringere Energiedichte, ist aber auch günstiger in der Herstellung. Batterien dieses Typs werden daher auch in Zukunft vor allem in Autos mit weniger hohen Leistungsanforderungen hinsichtlich des Energiegehalts oder der Reichweite eingesetzt werden.
- Natrium-Ionen-Batterien gelten als marktnah. Sie werden schon jetzt in der Hybridisierung von Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt. Der Einsatz in zwei- und dreirädrigen Fahrzeugen sowie in kleinen Automobilen wird in naher Zukunft erwartet (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung-ISI, 2023c). Experten verweisen auf Modelankündigungen chinesischer Hersteller für Ende 2023, in denen Natrium-Ionen-Batterien eingesetzt werden sollen. Die Innovation dieser Zellchemie besteht gerade im Unterschied zu Verbesserungen der NMC- oder LFP-Batterien im Verzicht auf Lithium. Positiv ist zudem anzumerken, dass die Technologie von den Experten als "Drop-in"-Technologie eingestuft wird. Das bedeutet, dass nur geringfügige Prozessänderungen im Vergleich zur Lithium-Ionen-Technologie nötig sind.

Für die Bereitstellung von Substitutionsmöglichkeiten während des jetzt anstehenden Markthochlaufs der Elektromobilität bilden diese zwei Batterietypen auch in der Einschätzung aus den Expertengesprächen die momentan vielversprechendsten Möglichkeiten. Von ihnen ist demnach in den kommenden Jahren der größte Beitrag zu einer Substitution kritischer Rohstoffe in Zellchemien zu erwarten. Wichtig ist hier vor allem, dass die Technologien schon eine hinreichende Skalierungsreife aufweisen, um relativ kurzfristig in die Produktion gehen zu können.

Darüber bestehen weiterhin verschiedene Optionen auf andere Batterietypen, die allerdings noch weiter von der industriellen Reife entfernt sind. Dazu zählen:

- ▶ Feststoffbatterien: sie stellen eine Querschnittstechnologie für verschiedene Varianten von Zellchemien dar. Sie unterscheiden sich generell von anderen Batterietypen dadurch, dass der Elektrolyt aus einem Feststoff besteht. Dadurch soll in der Konstruktion die Energiedichte erhöht und der sonstige Rohstoffeinsatz verringert werden. In den Expertengesprächen wurde dieser Option keine große Marktnähe zugeschrieben.
- Von den weiteren Zellchemien wurde der Magnesium-Ionen-Batterie die größte Marktnähe zugeordnet. Auch sie befindet sich aber noch im Forschungsstadium. Vorteilhaft ist, dass sie ein Potenzial zur Verringerung des Lithiumbedarfs bietet.
- ▶ Eine ganze Reihe weiterer Zellchemien (z.B. Lithium-Schwefel, Lithium-Luft) befindet sich im Forschungsstadium. Sie zeichnen sich in der Regel durch höhere Energiedichten und einen reduzierten Bedarf kritischer Rohstoffe im Vergleich zu den heute dominierenden Batterietypen aus. Meistens basieren aber auch diese Zellchemien auf dem Einsatz von Lithium. Allerdings liegen noch keine Erfahrungen für eine industrielle Produktion vor. Ihr Einsatz wird in der Regel in anderen Bereichen als dem Automotive-Sektor und nicht in naher Zukunft erwartet (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2023c).

In den Expertengesprächen wurde die hohe Bedeutung der Grundlagenforschung betont. Von ihr solle aber keine kurzfristige Lösung von Problemen erwartet werden. Die Technologieoffenheit ist gerade bei der Grundlagenforschung von hoher Bedeutung, weil hier unbekannte Wirkungsmechanismen erforscht werden, ohne dass schon eine spezifische Anwendung im Zentrum des Forschungsinteresses steht. Nur die Grundlagenforschung eröffnet aber den Chancenbereich in der langen Frist zu bisher nicht gekannten Alternativen zu kommen. Die heute kurzfristig zur Verfügung stehenden Alternativen haben ihre Wurzeln in einer technologieoffenen Grundlagenforschung.



Für die Steigerung der Resilienz ist neben der Substitution einzelner kritischer Materialien in den Batterien auch schon bedeutend, dass unterschiedliche Batteriesysteme zur Verfügung stehen. Dadurch erweitern sich die Auswahl- und Differenzierungsspielräume der Automobilhersteller.

Effizienzsteigerung im System Auto

Eine Leistungssteigerung bei bereits etablierten Batterietypen kann den spezifischen Rohstoffbedarf je kWh Batteriekapazität senken. Solche Leistungssteigerungen können über eine weitere Optimierung der bekannten Zellchemien oder durch eine Verbesserung der Batteriesteuerung erreicht werden. In der Vergangenheit wurden Effizienzverbesserungen allerdings in der Regel eher für die Steigerung der Batterieleistung eingesetzt als für die Reduzierung des Rohstoffbedarfs. Mit den heute schon sehr leistungsfähigen Batterien besteht nun eher die Möglichkeit, auf eine Ressourcenschonung abzuzielen. Wichtig bei der Leistungssteigerung der etablierten Batterietypen ist es, die Batterie als System zu betrachten. Thermomanagement (als Ingenieursaufgabe) und die Kontrolle weiterer Umfeldparameter kann die Leistungsparameter der Batterie verbessern. Eine verbesserte Schnellladefähigkeit kann so beispielsweise den Ladevorgang erleichtern und damit die gewünschte Reichweite sowie den Ressourcenbedarf verringern.

Begreift man das Auto als Gesamtsystem, kann eine Einsparung an Batteriematerialien auch durch andere Effizienzsteigerungen des Systems erzielt werden. Leichtbau und die Verwendung effizienter Motoren reduzieren den Energiebedarf des Autos und ermöglichen die Verwendung kleinerer Batterien bei gleicher Leistung. Gleichzeitig erhöht sich dadurch eventuell der Bedarf an anderen kritischen Rohstoffen, wie Seltenen Erden für die Permanentmagnete in Motoren. Für Leichtbau ist der verstärkte Einsatz von Aluminium oder Karbon notwendig. Im Umkehrschluss bedeutet dies aber auch, dass eine höhere Kritikalität von anderen Rohstoffen – etwa Seltenen Erden für Motoren – die Optimierung des Gesamtsystems hin zu einem höheren Ressourceneinsatz in der Batterie treiben kann.

Verbesserung der Lademöglichkeiten

Der Ausbau der Lademöglichkeiten erhöht die Flexibilität der Autonutzer und kann zu einer Verringerung der nachgefragten Batteriekapazität je Auto führen. Dies trägt in Summe zu einer Verringerung des Rohstoffbedarfs über eine reduzierte Batterieproduktion bei.

In erster Linie ist hier an den Ausbau und die Optimierung der Ladeinfrastruktur zu denken. In Abbildung 3-2 sind Ziel und Entwicklung der Ladeinfrastruktur in Deutschland dargestellt. Diesem Gedanken entsprechen auch die Forschungsbemühungen des Batterieherstellers CATL durch eine Optimierung des Ladevorgangs die Kapazität und damit den Rohstoffbedarf einer Batterie zu verringern.

IWCONSULT

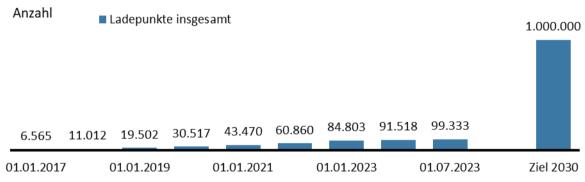
Abbildung 3-2: Entwicklung Ladeinfrastruktur

Entwicklung 2017-2023 und Ziel der Bundesregierung 2030



 $01.01.2017\ 01.01.2018\ 01.01.2019\ 01.01.2020\ 01.01.2021\ 01.01.2022\ 01.01.2023\ 01.04.2023\ 01.07.2023$

Entwicklung der Ladepunkte in Deutschland 01.01.2017 - 01.07.2023 und Ziel 2020



Quelle: Bundesnetzagentur; eigene Darstellung.

Neben der stationären Ladeinfrastruktur werden zwei weitere Möglichkeiten zur Verbesserung der Lademöglichkeiten für Elektroautos diskutiert, die auf innovativen Konzepten beruhen und Verbindungen zum Bereich Fahrzeugdesign aufweisen:

- ▶ Beim induktiven Laden können die Batterien von Elektroautos während der Fahrt über in der Straße verbaute Induktionsfelder geladen werden und die stationäre Ladeinfrastruktur entlasten. Pilotprojekte auf öffentlichen Straßen bestehen schon im Ausland. In Bayern ist für 2025 ein Pilotprojekt geplant. Herausforderungen bestehen in der Skalierung der Technik, in der Standardisierung zwischen den verschiedenen Herstellern und den Genehmigungsverfahren. Die Wirtschaftlichkeit ist noch unsicher (Universität Stuttgart 2022; Gomoll 2023).
- ▶ Daneben besteht die Möglichkeit, Automobile mit Fahrzeugintegrierter Photovoltaik (VIPV)¹¹ auszustatten. Dabei werden die Batterien direkt über in der Karosserie verbaute Solarmodule mit Elektrizität versorgt.

_

¹¹ https://www.ise.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/photovoltaik/photovoltaische-module-und-kraftwerke/integrierte-pv/fahrzeugintegrierte-photovoltaik/fahrzeugintegration-pkw.html

4 Innovative Verfahren bei Recycling von Rohstoffen

4.1 Status Quo

Es ist davon auszugehen, dass die Zahl der Elektroautos sowohl in Deutschland als auch der EU in Zukunft weiter rasant steigen wird und mit ihr mit einer gewissen Verzögerung auch die Anzahl an Altbatterien aus E-Autos¹². Laut einer Prognose des Fraunhofer ISI wird die jährliche Menge zu recycelnder LIBs bis 2030 in Europa auf rund 420 Kilotonnen ansteigen und 2040 bei rund 2.100 Kilotonnen liegen. Während kurz- und mittelfristig der Produktionsüberschuss der Batterieproduktion die Menge an zu recycelndem Material dominieren wird, werden laut der Szenerioanalysen ab 2035 viele Batterien aus E-Autos das Ende ihres Lebenszyklus erreichen und den Recyclingmarkt dominieren (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI 2023d).

Recycling-Verfahren von E-Autobatterien werden somit in vielerlei Hinsicht eine wichtige Rolle spielen:

- ▶ Recyclingverfahren und Recycling-Infrastruktur stellen sicher, dass Batterien korrekt entsorgt werden und nicht durch unsachgemäße Entsorgung zur Umweltverschmutzung beitragen und ein Sicherheitsrisiko darstellen (Fallah et al. 2021; Harper et al. 2019).
- Effiziente Recyclingverfahren und die Kreislaufwirtschaft bieten eine Möglichkeit, wertvolle kritische Rohstoffe zurückzugewinnen.
 - Dunn et al. (2021) prognostizieren zum Beispiel, dass im Jahr 2040 rund 60 Prozent der weltweiten Kobaltnachfrage, 53 Prozent der Lithium-Nachfrage, 57 Prozent der Mangannachfrage und 53 Prozent der Nickelnachfrage durch Batterierecycling gedeckt werden könnten.
 - ▶ Bormann et al. (2023) deuten darauf hin, dass recycelte Rohstoffe auch einen erheblichen Beitrag zur Sicherung der Rohstoffversorgung der Automobilwirtschaft in Europa leisten werden. Laut den Prognosen könnten für die geplanten Produktionskapazitäten für Traktionsbatterien in Europa bis 2030 etwa 7 bis 10 Prozent des Bedarfs an Lithium, 8 bis 12 Prozent an Nickel, 3 bis 5 Prozent an Mangan, 13 bis 19 Prozent an Kobalt und 1 bis 2 Prozent an Graphit durch Recycling gedeckt werden. Bis 2035 werden diese Anteile jeweils um rund fünf Prozentpunkte anteigen.
 - Eine Studie der RWTH Aachen und PwC prognostiziert sogar, dass im Jahr 2035 bis zu 30 Prozent des Bedarfs an Lithium, Nickel und Kobalt in der europäischen Batteriezellproduktion durch Recycling gedeckt werden kann (Strategy & und PEM 2023).

Diese Prognosen decken sich mit den Einschätzungen aus den Expertengesprächen. Die Anforderungen der EU-Batterieverordnung zum Rezyklateinsatz in Batterien seien ambitioniert, aber darstellbar. Batterie-Recycling stellt so, neben Substitution und Reduktion des Einsatzes kritischer Rohstoffe in

18 WCONSULT



¹² In den vergangenen Jahren ist die Anzahl von Elektrofahrzeugen in Deutschland stark gestiegen – von 2.956 neu zugelassenen E-Fahrzeuge (BEV) im Jahr 2012 auf 470.559 im Jahr 2022 (Kraftfahrbundesamt 2023). Die Bundesregierung hat sich das Ziel gesetzt, bis 2030 15 Millionen Elektrofahrzeuge (BEV) im deutschen Bestand zu erreichen (Koalitionsvertrag 2021 (bundesregierung.de)). Ab dem Jahr 2035 sollen in der EU keine Pkw mit herkömmlichen Verbrennungsmotoren neu zugelassen werden.

Batterien, einen weiteren Weg dar, um den Bedarf an kritischen Rohstoffen zu reduzieren und die Abhängigkeit Deutschlands von Importen kritischer Rohstoffe zu verringern.

4.1.1 Überblick über existierende Recyclingverfahren

Die derzeit existierenden Verfahren zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien lassen sich in drei Kategorien unterteilen: Pyrometallurgie, Hydrometallurgie und direktes Recycling (Dolotko et al. 2023b; Chen et al. 2019).

- ▶ Bei der Pyrometallurgie handelt es sich um ein Hochtemperaturverfahren, bei dem durch das "Schmelzen" der Batterie im Hochofen die in der Batterie enthaltenen Metalloxide zu einer Legierung aus Kobalt, Kupfer, Eisen und Nickel reduziert werden (Harper et al. 2019; Dolotko et al. 2023b).
- ▶ Beim hydrometallurgischen Recyclingverfahren werden wässrige Lösungen (meist anorganische Säuren) eingesetzt, um die Metalle aus den Batterien zu extrahieren und abzutrennen (Dolotko et al. 2023b; Baum et al. 2022).
- ▶ Das Hauptziel des direkten Recyclings ist die Rückgewinnung der aktiven Batteriebestandteile, ohne deren chemische Struktur zu zerstören (Gaines und Wang 2021; Baum et al. 2022). Zur Trennung der Batteriebestandteile kommen hauptsächlich physikalische Trennungsmethoden, magnetische Trennungsverfahren oder moderate thermische Trennungsverfahren zum Einsatz (Baum et al. 2022). Im Gegensatz zu den metallurgischen Verfahren handelt es sich daher um ein nichtdestruktives Recyclingverfahren, das weder auf das Schmelzen noch auf die Auslaugung der Batterie angewiesen ist. Das durch das direkte Recycling zurückgewonnene aktive Batteriematerial kann direkt wieder in neue Batterien eingesetzt werden.

Pyro- und hydrometallurgische Recyclingverfahren werden bereits heute auf industrieller Ebene angewendet, während direkte Recyclingverfahren bisher hingegen nur in Pilotprojekten oder im Labor Anwendung finden (Chen et al. 2019; Yu et al. 2022; Beaudet et al. 2020; Kaya 2022). Direktes Recycling wird derzeit v.a. für Recycling von Produktionsabfällen verwendet, die im Rahmen der LCO- und LFP-Kathodenherstellung¹³ anfallen. Bei EoL-Batterien kommt direktes Recycling z.Zt. aber noch kaum in Betracht. Grund hierfür ist der geringe Automatisierungsgrad der Elektrodentrennung, die geringe Gewinnung von Elektrodenmaterialien und deren Regeneration (Dolotko et al. 2023b).

Die hohe technologische Reife der pyro- und hydrometallurgischen Verfahren im Vergleich zum direkten Recycling spiegelt sich auch in den Recyclingkapazitäten wider: Die Recyclingkapazitäten des Pyrometallurgie belaufen sich Schätzungen von Wagner-Wenz et al. (2023) zufolge auf 157.500- 162.000 Tonnen pro Jahr, während die geschätzte weltweite Kapazität bei Hydrometallurgie bei ca. 29.010-45.600 Tonnen pro Jahr liegt. Im Vergleich dazu fällt die Recyclingkapazität für direktes Recycling sehr viel geringer aus (7.800-8.850 Tonnen pro Jahr). Laut Angaben des Circular Energy Storage befinden sich über 70 Prozent der gesamten LIB-Recyclingkapazitäten in China, gefolgt von Nordamerika (8,4 Prozent) und Europa (4,97 Prozent) (Moïsé und Rubínová 2023). Pyrometallurgisches Recycling wird v.a. in Europa, den USA und Japan kommerziell angewendet, während in China hydrometallurgische Verfahren dominieren (Mayyas et al. 2019). China verfügt so gesehen heute über die modernere Recyclinganlagen für Batterien.

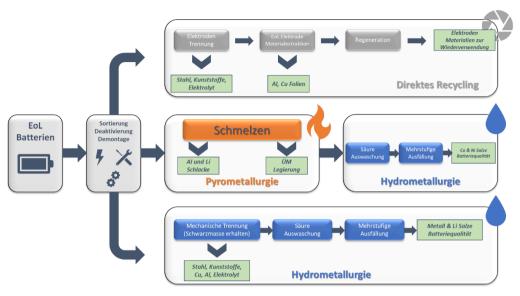
_



¹³ LCO: Lithium-Cobalt-Oxid; LFP: Lithium-Eisen-Phosphat.

Abbildung 4-1: Recyclingverfahren von EoL-Batterien

Vereinfachtes Flussdiagramm



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Dolotko et al., 2023b.

Auch in Deutschland sind bereits Unternehmen ansässig, die LIB in unterschiedlichen Verfahren und Verfahrenskombinationen recyceln. ¹⁴ Beispiele dafür sind:

- ▶ Die Firma Redux führt pyrometallurgisches Recycling von LIBs in ihrer Anlage in Bremerhaven (Kapazität Anfang 2023: 10.000 Tonnen pro Jahr) durch.
- ▶ Die Firma Accurec (Krefeld) setzt auf eine Kombination aus pyro- und hydrometallurgischen Verfahren (Kapazität Anfang 2023: 3.250 Tonnen pro Jahr) (Sojka et al. 2020; Rudschies 2023).
- ▶ Primobius (Hilchenbach, Kapazität Anfang 2023: 20.000 Tonnen pro Jahr) und Duesenfeld (Wendeburg, Kapazität Anfang 2023: 2.900 Tonnen pro Jahr) verfolgen hingegen einen mechanischhydrometallurgischen Ansatz (Primobius 2023; Rudschies 2023; Sojka et al. 2020).
- ▶ Mercedes-Benz plant, im Dezember 2023 eine Batterierecycling-Pilotanlage mit einer Jahreskapazität von 2.500 Tonnen in Kuppenheim in Betrieb zu nehmen. Sie wird Lithium-Ionen-Batterien auf der mechanisch-hydrometallurgsichen Prozessroute recyceln (Mercedes-Benz Group 2023).

4.1.2 Vergleich der existierenden Recyclingverfahren

Rückgewinnung: Output

Bei pyrometallurgischen Verfahren entstehen Metalllegierungen, Schlacke und Gase (Harper et al. 2019). Nickel, Kobalt, Eisen und Kupfer werden als Metalllegierungen und nach hydrometallurgischer Nachbehandlung als Salze der Metalle in hoher Reinheit wiedergewonnen (Neef et al. 2021; Dolotko et al. 2023b; Harper et al. 2019). Aluminium, Mangan, Lithium und andere Stoffe gehen in die Schlacke über und sind somit in der Regel wertstofflich verloren (Bae und Kim 2021; Dai et al. 2019; Dolotko et

20 WCONSULT

¹⁴ Eine Übersicht über in Betrieb genommene und geplante Recyclinganlagen in Deutschland findet sich in Ruschdies (2023). https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-akku-recycling/

al. 2023b; Harper et al. 2019; Neef et al. 2021; PEM et al. 2021; Windisch-Kern et al. 2021b). Elektrolyte und Kunststoffe, die rund 40 bis 50 Prozent des Batteriegewichts ausmachen, werden im pyrometallurgischen Verfahren verbrannt. Die exotherm Reaktion reduziert sich dadurch zwar der Energieaufwand des Prozesses, jedoch gehen die Stoffe wertstofflich verloren (Harper et al. 2019). Neben allen organischen Bestandteilen (Polymere, Binder, Elektrolyt) wird auch das Graphit oxidiert und geht wertstofflich verloren (Neef et al. 2021).

Bei hydrometallurgischen Verfahren werden Salze der Übergangsmetalle (Nickel, Mangan, Kobalt) und potenziell auch Lithiumsalze in Batteriequalität zurückgewonnen (Dolotko et al. 2023b). Die Rückgewinnung von Bindemittel und Elektrolyt ist abhängig von den vorausgehenden Verarbeitungsschritten (Wagner-Wenz et al. 2023; Dai et al. 2019). In den vorgelagerten physikalischen Trennverfahren werden Aluminium, Kupfer und Stahl sowie Kunststoff abgetrennt (Dai et al. 2019). Graphit wird mit einigen Verunreinigungen von der Schwarzen Masse abgetrennt, und kann zur weiteren Anwendung weiter gereinigt werden, wobei die Reinheit des zurückgewonnen Grafits stark vom konkreten hydrometallurgischen Verfahren abhängt (Abdollahifar et al. 2023). Anodenmaterial (z.B. Graphit) wird daher z.Zt. häufig nicht zurückgewonnen (Beaudet et al. 2020). Eine vereinfachte Rückgewinnung von reinem Graphit stellt daher eine Verbesserungsmöglichkeit für das hydrometallurgische Verfahren da (PEM et al. 2021).

Beim direkten Recycling können mit Ausnahme der Separatoren theoretisch fast alle Batteriekomponenten zurückgewonnen werden (Rallo et al. 2022; Beaudet et al. 2020; Gaines 2014). Die Menge an recyceltem Lithium und an Übergangsmetallen ist maximal (Dolotko et al. 2023b). Die Struktur und Eigenschaften der Elektroden bleiben Großteil intakt und werden – im Gegensatz zu Hydro- und Pyrometallurgie – nicht zerstört. Das zurückgewonnene aktive Elektrodenmaterial kann direkt wieder in Batterien eingesetzt werden. Da sich die Batterietypen und -arten sich schnell weiterentwickeln (siehe Kapitel 2), ist das zurückgewonnene aktive Elektrodenmaterial jedoch unter Umständen überholt und kann nicht mehr in Batterien auf dem neusten Stand der Technik eingesetzt werden (Gaines und Wang 2021; Zheng et al. 2023; Neumann et al. 2022).

Menge an zurückgewonnenem Material

Quantitative Schätzungen zu den Recyclingeffizienzen unterschiedlicher Verfahren sowie den Rückgewinnungsraten einzelner Materialien sind rar. Herausforderungen bestehen in uneinheitlichen Definitionen und mangelnder Transparenz der Berechnungsmethoden, insbesondere bei der Kombination unterschiedlicher Verfahrensschritte im Recyclingprozess. Dies erschwert eine konkrete vergleichende Quantifizierung für die verschiedenen Recyclingverfahren (PEM et al. 2021; Wagner-Wenz et al. 2023). In der akademischen Forschung herrscht Konsens, dass unter den drei Recyclingverfahren die potenzielle Menge an zurückgewonnenem Material bei direktem Recycling am größten ist (Harper et al. 2019; Kaya 2022; Rallo et al. 2022):

- Mit Ausnahme der Separatoren können beim direkten Recycling theoretisch fast alle Batteriekomponenten zurückgewonnen werden, auch die Anode, das Elektrolyt und die Folien (Rallo et al. 2022; Gaines 2014; Beaudet et al. 2020). Zudem ist sowohl die Lithium- als auch die Metall-Extraktion beim direkten Recycling maximal (Dolotko et al. 2023b).
- ▶ Hydrometallurgische Verfahren weisen ebenfalls hohe Rückgewinnungsraten auf (vgl. Yu et al., 2022, Kaya 2022). Bei Kobalt, Nickel und Mangan liegen die Rückgewinnungsquoten bei bis zu über 99 Prozent (Neumann et al. 2022). Zudem werden hohe Rückgewinnungsraten von Lithium erreicht in Kombination mit mechanischer Aufbereitung zwischen 85 und 95 Prozent. (Doose et al. 2021; Yu et al. 2022; Kaya 2022; Harper et al. 2019; Beaudet et al. 2020). Bei einem 70:30-Verhältnis von NMC- und LFP-Batterien lassen sich laut einer Berechnung von Strategy & und PEM (2023) mithilfe von aktuell verfügbaren hydrometallurgischen Verfahren rund 19 Prozent der

IWCONSULT 21

Gesamtmasse der Batterie als Kobalt, Nickel, Mangan und Lithium zurückgewinnen und über den gesamten Recyclingpfad eine Recycling-Effizienz von 90 Prozent erzielen. Allerdings wird Anodenmaterial wie Graphit im Rahmen von hydrometallurgischen Verfahren oft nicht zurückgewonnen (Beaudet et al. 2020).

Pyrometallurgische Recyclingverfahren schneiden in Bezug auf die Recyclingeffizienz am schlechtesten ab (Harper et al. 2019; Kaya 2022; Doose et al. 2021). Bei rein pyrometallurgischen Verfahren werden nur rund 30 Prozent der Wertstoffe in den Kreislauf zurückgeführt, vor allem weil organische Stoffe und Grafit sowie Aluminium und Mangan wertstofflich verloren gehen. Die Rückgewinnung von Lithium in den nachgelagerten hydrometallurgischen Prozessschritten ist gering – falls sie überhaupt stattfindet. Dafür fallen die Rückgewinnungsraten für Nickel, Kobalt und Kupfer sehr hoch aus (Neef et al. 2021; Windisch-Kern et al. 2021a; PEM et al. 2021).

Eine Studie von Wagner-Wenz et al. (2023) kommt für die Recyclingeffizienzen¹⁵ verschiedener kommerzieller Recycling-Unternehmen zu ähnlichen Ergebnissen:

- Das Verfahren der Duesenfeld GmbH (Hydrometallurgie in Kombination mit mechanischen Verfahren) erreicht dabei eine Recyclingeffizienz von rund 91 Prozent auf Batteriezellebene.
- Das Verfahren von Umicore (Pyrometallurgie mit nachgelagerten hydrometallurgischen Prozessschritten) erzielt Recyclingeffizienzen zwischen 50 und 61 Prozent.

Die Zahlen sind allerdings mit Vorsicht zu interpretieren, da sie von Firmen direkt stammen.

Einfachheit und Robustheit des Verfahrens

Pyrometallurgische Verfahren sind in der Anwendung deutlich einfacher im Vergleich zu direktem Recycling und hydrometallurgischen Verfahren. Sie können ohne ersten Passivier- oder Sortierschritt auf ganze Zellen oder Module angewendet werden und eignen sich daher besonders bei unsortiertem Eingangsmaterial (Harper et al. 2019; Dolotko et al. 2023b). Zudem können pyrometallurgische Verfahren eine Vielzahl an Batterieeingangsstoffe recyclen. Das pyrometallurgische Umicore-Verfahren wird z.B. sowohl bei Lithium-Ionen-Batterien als auch Nickel-Metallhybrid-Batterien angewendet (Doose et al. 2021; Baum et al. 2022).

Hydrometallurgische Verfahren lassen sich zwar gut auf unterschiedlichste Elektrodenmaterialien anwenden. Allerdings ist eine Vorsortierung und Vorbehandlung der Materialien zwingend notwendig (Dolotko et al. 2023b; Beaudet et al. 2020). Zudem sind hydrometallurgische Verfahren anfällig für Kreuzkontaminationen¹⁶, die die Qualität und Ausbeute des recycelten Materials beeinflussen (PEM et al. 2021).

Da beim direkten Recycling das zurückgewonnene aktive Material sofort wieder in Batterien eingesetzt werden kann, können aufwändige Aufbereitungsschritte (Purification Steps) vermieden werden (Harper et al. 2019). Es bestehen bei dem relativ neuen Verfahren noch einige Herausforderungen:



¹⁵ Definiert als Quotient der Massen der zurückgewonnenen Sekundärrohstoffe (Outputfraktionen) und der Altbatterien und Akkumulatoren (Inputfraktionen).

¹⁶ Kreuzkontaminationen mit Aluminium, Eisen und Kupfer sind während der mechanischen Trennung zur Gewinnung der Schwarzmasse möglich (vgl. Abbildung 4-1).

- ▶ Direktes Recycling erfordert heute die manuelle Demontage der LIB (Baum et al. 2022) und eine aufwändige Vorsortierung mit mehr Trennungsschritten, was die Hochskalierung des Verfahrens aktuell erschwert (Yu et al. 2022; Beaudet et al. 2020).
- ▶ Je nach Batterietyp und -art sind unterschiedliche Methoden des direkten Recyclings erforderlich (Recycle spent batteries 2019; Baum et al. 2022). Wenn sich die chemische Zusammensetzung der in E-Autos eingesetzten Batterien verändert (siehe Kapitel 2), stellt dies eine Herausforderung dar. Beim direkten Recycling muss daher der Batterietyp bekannt sein, unsortiertes bzw. unbekanntes Eingangsmaterial kann hingegen weniger effizient bzw. gar nicht verwertet werden (Harper et al. 2019).
- ▶ Wenn direkte Recyclingmethoden nicht auf unterschiedliche Batterietypen- und arten angewendet werden können, werden Recyclingunternehmen entweder nur eine begrenzte Anzahl an Batterietypen und arten akzeptieren können oder deutlich größere Anlagen und Arbeitskräfte zur Verfügung stellen müssen (Baum et al. 2022).
- ▶ Direktes Recycling von Kathodenmaterial ist außerdem anfällig für Kontamination durch andere Metalle, wie Aluminium, was sich wiederum auf die Qualität des zurückgewonnenen Outputs auswirkt (Li et al. 2017).
- ▶ Die Effizienz des direkten Recyclings ist abhängig vom Gesundheitszustand der Batterie. Insbesondere ein niedriger Ladestand kann sich negativ auf das direkte Recycling auswirken (Recycle spent batteries 2019). Direktes Recycling erfordert daher aktuell Informationen zum Ladestand sowie zur Batteriekapazität.

Energieverbrauch, THG-Emissionen und Abfallerzeugung

Direkte Recyclingverfahren sind aus ökologischen Gesichtspunkten (Energieverbrauch, THG-Emissionen, Abfallerzeugung) vorteilhafter als pyro- und hydrometallurgische Verfahren (Ciez und Whitacre 2019). Vergleicht man die entstehenden Treibhausgasemissionen (THG) sowie die während des Recyclingprozesses benötigte Energie, schneiden hydrometallurgische Verfahren besser ab als pyrometallurgische Verfahren (Xu et al. 2020; Xu et al. 2021; Kaya 2022; Harper et al. 2019). Wird hingegen die Energie, die für die Herstellung der im Prozess verwendeten Inputs in der Life Cycle Analyse zusätzlich berücksichtigt, erzielen pyrometallurgische Verfahren einen niedrigere kumulierten Energieverbrauch als hydrometallurgische Verfahren (Xu et al. 2021; Xu et al. 2020).¹⁷

Kosten, Erlös und Wirtschaftlichkeit der Verfahren

Die Wirtschaftlichkeit der Verfahren hängt stark vom Wert der zurückgewonnenen Rohstoffe ab. Während pyro- und hydrometallurgische Verfahren sich derzeit wirtschaftlich vor allem für Batterietypen lohnen, die Kobalt und Nickel enthalten (z.B. LCO, NCA, NMC), ist direktes Recycling auch für Batterietypen ohne Kobalt und Nickel, wie LFP-Batterien oder LMO-Batterien, wirtschaftlich (Rallo et al. 2022; Lander et al. 2021; Baum et al. 2022; Xu et al. 2020). Allgemein gilt: Je höher der Kobalt-Anteil, desto höher der Erlös (Lander et al. 2021). Daher fällt bei kobaltfreien Batterien wie LFP-Batterien, die den Modellierungen von Xu et al. (2020) zugrunde liegen, der Erlös deutlich geringer aus als beim Recycling von den ebenfalls weit verbreiteten NMC-Batterien. Im Hinblick auf den Trend hin zu kobaltarmen Batterien oder Batterietypen ohne Kobalt und Nickel gewinnt diese Beobachtung von Bedeutung. Monetäre Werte für Kosten und Erlöse, die sich aus verschiedenen Studien ergeben finden sich im Anhang (ab S. 52).



 $^{^{\}rm 17}$ Genauere Erläuterungen und Studienergebnisse finden sich im Anhang.

Tabelle 4-1: Überblick der Vor- und Nachteile verschiedener Recyclingverfahren

Voller Kreis entspricht der besten Bewertung, leerer Kreis entspricht der schlechtesten Bewertung

	Pyrometallurgie	Hydrometallurgie	Direktes Recycling
Technologische Reife			0
Menge an zurückgewonnenem Material	0		
Rückgewinnung von aktivem Batteriematerial	nein	nein	
Keine Vorsortierung der Batterien erforderlich			0
Energieverbrauch	0	•	
THG-Emissionen	0		
Wirtschaftlichkeit bei nickel- und kobaltfreien Batterien wie LFP	0	0	

Quelle: eigene Darstellung.

4.2 Ausblick

Da die existierenden Batterierecyclingtechnologien vergleichsweise neu sind, besteht in Zukunft viel **Potenzial für Innovation und Optimierung** (Neef et al. 2021; Dolotko et al. 2023b). Zum jetzigen Zeitpunkt ist offen, welche der drei oben diskutierten Recyclingtechnologien sich in Zukunft auf industrieller Ebene durchsetzen oder ob eine neue Recyclingtechnologie die bestehenden Technologien verdrängen wird (Neef et al. 2021).

In den im Rahmen dieser Studie geführten Expertengesprächen herrschte größtenteils Konsens darüber, dass sich pyrometallurgische Verfahren voraussichtlich nicht langfristig durchsetzen werden, unter anderem aufgrund der negativen Umweltauswirkungen und geringen Lithiumrückgewinnungsraten. Das deckt sich auch mit den Einschätzungen in der Literatur (vgl. z.B.Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) 2021; Giza et al. 2023; Strategy & und PEM 2023). Allerdings sind sich die befragten Experten uneins, inwieweit direktes Recycling in Zukunft das Potenzial hat, auf industrieller Ebene angewendet zu werden und das vorherrschende Recyclingverfahren zu werden: Während einige der befragten Experten in hydrometallurgischen Verfahren die Zukunft des Batterierecyclings sehen, sind andere Experten der Überzeugung, dass sich — vor allem vor dem Hintergrund der Zunahme der Batterien mit geringerem Materialwert — das direkte Recycling langfristig aufgrund der höheren Wirtschaftlichkeit gegenüber der Hydrometallurgie durchsetzen wird. Am wahrscheinlichsten ist nach Experteneinschätzung, wie aktuell bereits häufig angewendet, eine Kombination verschiedener Recyclingtechnologien. Aktuell zeigt sich ein Trend hin zu mechanisch-hydrometallurgischen Verfahren (Neef et al. 2021). In Zukunft ist aus Sicht einiger Experten außerdem eine Kombination aus direktem Recycling mit nachgelagerten hydrometallurgischen Prozessschritten vielversprechend.

Der Recyclingmarkt für E-Auto-Batterien in Deutschland und der EU ist derzeit im Aufbau. Unterschiedliche Akteure entlang der Wertschöpfungskette bauen aktuell Kapazitäten auf. Dazu zählen Automotive-OEMs wie VW oder Tesla, Lithium-Ionen-Zellhersteller wie Northvolt, Zellkomponentenhersteller

wie Umicore und Recyclingunternehmen wie Accurec, Li-Cycle oder Duesenfeld (vgl, z.B., Niese et al. 2020; Borrmann et al. 2023). Um die steigende Menge an EoL-Batterien zu recyclen, werden in den kommenden Jahren große Investitionen in die europäischen Recyclingkapazitäten nötig sein. Schätzungen gehen davon aus, dass bis 2035 Investitionen in Höhe von 9,6 Milliarden Euro nötig sein werden (Strategy & und PEM 2023).

Die Investitionen, die Weiterentwicklung des Batterierecyclings sowie das Erreichen hoher Recyclingquoten werden zukünftig vor allem durch den institutionellen Rahmen, die Entwicklung des Batteriedesigns sowie die Rücklaufmenge geprägt sein. Diese drei Faktoren werden im Folgenden näher beleuchtet.

Institutioneller Rahmen

Die seit August 2023 in Kraft getretenen EU-Batterieverordnung sieht eine schrittweise Erhöhung der Zielvorgaben für das Batterierecycling in der Automobilwirtschaft vor (siehe Abbildung 4-2). Konkret enthält die Batterieverordnung Zielvorgaben zu Recyclingeffizienz, rohstoffspezifische Materialverwertungsquoten (Rückgewinnungsquoten) beim Batterierecycling sowie dem Mindestrezyklateinsatz für neue Elektrofahrzeugbatterien.

2025
2030
2035

Recovery targets

Solve Li 95% Co, Ni, Cu

Recovery target for Li

Increase by 5 pp in recycling efficiency

Solve Li 15% Ni 15% Ni 15% Ni 16% Co

Min. recycled material

Abbildung 4-2: Überblick zur EU-Batterieverordnung

Quelle: Strategy& und PEM, 2023.

Die EU definiert die Recyclingeffizienz als Quotient der Masse der zurückgewonnenen Sekundärrohstoffe (Outputfraktionen) und der Masse der aus Altbatterien und Akkumulatoren bestehenden Inputfraktionen. Aktuell müssen in der EU lediglich 50 Prozent des durchschnittlichen Gewichts von Lithium-Batterien recycelt werden. Dieser Anteil wird 2025 auf 65 Prozent erhöht, und bis 2030 auf 70 Prozent ansteigen. Substanzielle Neuerungen in der Batterieverordnung sind:

▶ Rohstoffspezifische Rückgewinnungsquoten: Bei Kobalt, Nickel und Kupfer, für die heute schon funktionierende Recyclingsysteme bestehen, liegen die Quoten (2027: 90 Prozent; 2031: 95 Prozent) deutlich höher als bei Lithium (2027: 50 Prozent; 2031: 80 Prozent), bei dem die Rückgewinnung auf industriellem Niveau noch weiterentwickelt werden muss (vgl. Kapitel 4.1).

▶ Mindestanteile an recyceltem Material in neuen Elektrofahrzeugbatterien: Ab August 2031 müssen mindestens 16 Prozent des im Aktivmaterial der Batterie verwendeten Kobalts sowie jeweils 6 Prozent des Lithiums und Nickels aus dem Recycling stammen. Im August 2036 steigen die Mindestrezyklateinsatzquoten auf 26 Prozent für Kobalt, 12 Prozent für Lithium und 15 Prozent für Nickel.

Die EU-Batterieverordnung wird von den befragten Experten als positiver Schritt in Richtung Kreislaufwirtschaft bewertet, da sie die notwendigen Rahmenbedingungen für Investitionen ins Recycling schaffen. Die rohstoffspezifischen Rückgewinnungsquoten werden positiv eingeschätzt:

- ▶ Sie stellen konkrete Anreize für Recyclingunternehmen dar, die Rückgewinnungsraten für kritische Rohstoffe durch Innovationen und Verbesserungen bestehender Technologien zu steigern.
- ▶ Besonders wichtig ist die verbindliche Rückgewinnungsrate für Lithium, da Lithium in den bisherigen pyrometallurgischen Recyclingverfahren entweder gar nicht oder nur unter hohem Kostenaufwand aus der Schlacke zurückgewonnen wird (siehe Kapitel 4.1). Auch hydrometallurgische Verfahren weisen derzeit einen hoher Verlust des Lithiums auf (Dolotko et al. 2023a; Borrmann et al. 2023).
- ➤ Zudem gewährleisten die Recyclingquoten **Technologieoffenheit**, sodass sich am Ende die effizientesten Technologien durchsetzen werden, und kreieren ein EU-weites Level Playing Field.
- ▶ Die Höhe der Rückgewinnungsquoten wird von den Experten generell als ambitioniert, aber realistisch bewertet. Einer der befragten Experten geht sogar davon aus, dass die EU-Quoten für 2027 bereits heute durch einige Recyclingunternehmen, wie Umicore, erfüllt werden können.
- ▶ Für einen dynamisch wirksamen Innovationsanreiz, sollte sichergestellt werden, dass die Quoten u.U. den technischen Entwicklungen der kommenden Jahre angepasst werden. Eine Anpassungsmöglichkeit ist in der EU-Batterieverordnung bereits enthalten.
- ► Kontrollen und geeignete Berechnungsmethoden für die Rückgewinnungsraten sind für den Erfolg der Quoten zentral. Einige Experten geben zu bedenken, dass das effektive "Downcycling" von Rohstoffen nicht in die Rückgewinnungsraten miteinberechnet werden sollte (z.B. Aluminium in pyrometallurgischen Verfahren, vgl. Kapitel 4.1.2).

Positiv eingestuft werden auch die in der Batterieverordnung festgelegten Mindestrezyklateinsatzquoten:

- Mindesteinsatzquoten sind in der Einschätzung der befragten Experten entscheidend zur Etablierung einer Nachfrage nach Sekundärmaterial. Die induzierte Nachfrage nach Rezyklat gibt Recyclingunternehmen und Investoren ein gewisses Maß an Planungs- und Investitionssicherheit für Investitionen in Forschung und Entwicklung von Batterierecyclingtechnologien sowie in den Aufbau ausreichender Recyclingkapazitäten.
- ▶ Von der Geltung der Mindestrezyklateinsatzquoten auch für alle neuen importierten Batterien wird eine Wirkung auch auf die globale Innovationstätigkeit und Recyclingwirtschaft erwartet.
- ▶ Auch für den Erfolg der Mindestrezyklateinsatzquoten wird entscheidend sein, dass diese je nach Marktentwicklung angepasst werden und die geltenden Quoten von den Batterieherstellern tatsächlich eingehalten werden.

Die Batterieverordnung regelt auch die Einführung eines verpflichtenden Batteriepasses ab Februar 2027. Der digitale Batteriepass soll u.a. Informationen zur Zellchemie, dem Ladezustand, dem State of Health sowie eine Anleitung zur Demontage und Zerlegung des Akkupacks enthalten. Er soll durch höhere Transparenz die Kreislaufwirtschaft stärken. Mittel dafür sind einerseits die Reduzierung hoher Transaktionskosten bei Demontage und Vorsortierung der Batterien. Andererseits sollen die Informationen eine verbesserte Prozesskontrolle während des Recyclings ermöglichen (Battery Pass Consortium 2023). Diese institutionelle Innovation stellt in Aussicht, die Wirtschaftlichkeit der

Recyclingverfahren entscheidend zu verbessern. Potenziale bestehen vor allem bei Automatisierung und Skalierung der heute häufig manuellen Prozesse der Demontage- und Vorsortierungsprozesse.

Design for Circularity

Nach Einschätzung der befragten Experten ist das Design der Batterie entscheidend dafür, existierende Recyclingverfahren effizienter zu gestalten und innovative Verfahren zu skalieren (Design for Circularity). Aus dem derzeitigen Design entstehen zwei wesentliche Hemmnisse für stärkeres Recycling:

- ▶ Unterschiedliche Bauformen von Batterien erschweren aus Sicht der Experten aktuell die Automatisierung des Batterierecyclings.
- ▶ Für Recycling (und Zweitnutzung und Reparatur der Batterien) ist einfache Trennbarkeit der Batteriebestandteile wichtig. Konkret bedeutet das, dass die Verbindungen der Batterieeinzelteile modular erfolgen, die Verbindungen schraubbar sind und unnötiges Füllmaterial vermieden werden wird, um die manuelle Demontage, ein Bottleneck des Recyclings, essenziell zu vereinfachen.
- ▶ Das Konzept "Design for Circularity" zielt unter anderem darauf ab, Schraubverbindungen zwischen Modulen oder Zellen zu standardisieren, um eine automatisierte Demontage der Zellen zu erleichtern. Das würde die Kosten des Batterierecyclings allgemein reduzieren und damit die Wirtschaftlichkeit der Recyclingverfahren steigern (vgl. z.B. Lander et al. 2023, Neumann et al. 2022).

Eine höhere Wirtschaftlichkeit von Recyclingprozessen ist in Hinblick auf Trend zu Batterien mit geringerem Materialwert (weniger Kobalt in NMC-Batterien, Vormarsch der LFP-Batterien ggü. NMC-Batterien in China) wichtig. Sie kann zu einer Steigerung der Investitionen in das Batterierecycling führen. Höhere Wirtschaftlichkeit durch Design kann auch innovative Verfahren wie die Etablierung des direkten Recyclings auf industrieller Ebene befördern. Stärkerer Wettbewerb zwischen unterschiedlichen Recyclingverfahren könnte wiederum zu höheren Innovationsaktivitäten führen.

Verantwortlickeiten bei Sammlung und Export von Altautos

Die möglichst vollständige Sammlung von End-of-Life (EoL)-Batterien und deren Einspeisung in den Recyclingkreislauf ist eine wesentliche Voraussetzung für einen signifikanten Beitrag des Batterierecyclings zur Versorgung mit kritischen Rohstoffen. Der Export von gebrauchten Autos und der darin enthaltenen Rohstoffe stellt eine Herausforderung dar.

- Zwischen 2017 und 2020 wurden insgesamt 42.634 gebrauchte E-Autos (Hybrid-Autos und BEV) aus der EU in Drittländer exportiert (Moïsé und Rubínová 2023).
- ▶ Würden sich bei E-Autos die gleichen Anteile ergeben wie für die Autos heute, dann werden nur rund 15 Prozent der E-Autos in Deutschland verbleiben. Die Rohstoffe in exportierten E-Autos würden dem deutschen und europäischen Rohstoffmarkt entzogen. Der Rücktransporte von Gebrauchtfahrzeugen fürs Recycling wird (ökonomisch) nicht effizient sein.
- ► Ein Lösungsansatz bestünde auch aus Sicht der befragten Experten im Aufbau von Recyclingstrukturen in Drittländern, die Exportziele für deutschen E-Autos sind.
- ▶ Die EU-Kommission hat in ihrem Entwurf einer neuen Altfahrzeug-Verordnung ein Exportverbot für nicht verkehrstüchtige Altfahrzeuge vorgesehen. Weitere Maßnahme zur Stärkung der Sammlung von Altfahrzeugen und Kreislaufwirtschaft sind eine bessere Durchsetzung geltender Regeln und eine digitale Verfolgung von Altfahrzeugen innerhalb der EU vor (European Commission 2023).

Eine Alternative zur Sammlung von Altbatterien aus stillgelegten Fahrzeugen stellt das Geschäftsmodell **Battery as a Service** dar. Grundidee ist es, Batterien als Dienstleistung anzubieten (Helander und Ljunggren 2023). Die Batterien gehören nicht mehr dem Autobesitzer. Der Zugriff auf die Batterien und

WCONSULT 27

die darin enthaltenen kritischen Rohstoffe sowie die Verantwortung für die Sammlung und das Recyceln der Batterie läge somit klar bei den Unternehmen, welche die Batterien vermieten.

In Frankreich und dem Vereinigten Königreich fanden derartige Batterie-Leasing-Konzepte beispielsweise zu Beginn der E-Mobilität Anwendung. Nissan hat 2022 zudem angekündigt, zur Sicherung der Rohstoffversorgung Batterie-Leasing in E-Autos in Japan einzuführen. Die befragten Experten bezweifeln jedoch, dass das Batterie-Leasing-Modell in Deutschland erfolgreich sein könnte, da deutsche Kunden dies wahrscheinlich nicht annehmen würden. Dies deckt sich mit Einschätzungen anderer Studien. So argumentieren beispielsweise Borrmann et al. (2023), dass bei hochpreisigen Produkten wie E-Autos Verbraucher das Produkt typischerweise vollständig besitzen wollen und Mietzahlungen für Traktionsbatterien aus Verbraucherperspektive daher nicht attraktiv sind.

5 Innovative Verfahren beim Abbau von Rohstoffen

5.1 Status Quo

In Deutschland oder Ländern der Europäischen Union findet zurzeit kaum Bergbau statt, der auf die Gewinnung von Metallen abzielt. So werden etwa in Deutschland kleinere Mengen von Eisenerz abgebaut. Weitere Beispiele sind die Förderung von Bauxit in Griechenland, von Blei und Eisenerz in Schweden, von Chrom, Nickel, Kobalt und Zink in Finnland oder von Kupfer, Platin und Silber in Polen. Diese Aktivitäten tragen allerdings jeweils zu deutlich weniger als 5 Prozent zur Weltbergbauförderung bei.

In Europa stünden weitere Vorkommen auch anderer, kritischer Rohstoffe für eine Förderung grundsätzlich zur Verfügung. Beispiele dafür sind unter anderem Lithium (Zinnwald, Oberrheingraben, Österreich, Serbien), Seltene Erden und Graphit (Schweden), Gallium (Griechenland), Germanium (ggfs. Belgien) und Phosphat (Norwegen).¹⁹ Auch in der ersten Studie zum Thema Rohstoffe (EY, IW Consult 2023) wurden einige Lagerstätten für kritische Rohstoffe benannt.

Bisher wurden diese Vorkommen in erster Linie wegen der mangelnden Wirtschaftlichkeit des Abbaus nicht genutzt. Resilienz oder Sicherung der Rohstoffversorgung spielten bei diesen Entscheidungen eine untergeordnete Rolle. Der Entwurf des *European Raw Materials Act* sieht nun ab 2030 rohstoffspezifische Mindestquoten von mindestens 10 Prozent des Jahresverbrauchs in der EU für den zukünftigen europäischen Rohstoffabbau vor. Zudem sollen 40 Prozent des Jahresverbrauchs durch eigene Verarbeitung gedeckt sein sowie 15 Prozent des Jahresverbrauchs aus dem Recycling stammen.

Die Rahmenbedingungen für eine stärkere Nutzung von Rohstoffvorkommen oder alternativen Rohstoffquellen in Europa lassen sich anhand verschiedener Kategorien diskutieren.

28 WCONSULT

¹⁸ https://www.ft.com/content/837a53fb-2c53-4f28-8483-4081f885457d

¹⁹ Handelsblatt, 2023, Die Renaissance des Bergbaus in Europa, Nr. 168, S. 12-13, vom 31.08.2023; Handelsblatt, 2023, EU-Rohstoffallianz will Mine in Norwegen mit Milliarden-Zuschüssen fördern, 07.02.2023

Kosten des Bergbaus

Der Abbau der Rohstoffvorkommen in Europa ist häufig teurer als in anderen Ländern. Zum einen sind die europäischen Rohstoffvorkommen oft aus geologischen Gründen schwerer zugänglich und damit teurer in der Erschließung. Zum anderen gelten in der Europäischen Union und benachbarten Ländern häufig strengere Umweltauflagen, die in der Regel auch strenger durchgesetzt werden. Dies trägt zu höheren Abbaukosten in Europa bei. Einschlägige global vergleichende Indizes zu Umweltschutz (EPI, 2023) und Rechtsdurchsetzung (Weltbank, 2023) liefern empirische Belege für beide Beobachtungen.

Die derzeitige weltweite Verteilung der Bergwerksförderung bei kritischen Rohstoffen zeigt, dass Erschließung und Abbau neuer Rohstoffvorkommen in Europa insbesondere im Wettbewerb zu China erfolgen müssten. Dort war in der Vergangenheit häufig die Bereitschaft zu beobachten, Rohstoffförderung, Rohstoffexporte sowie die damit einhergehende Preisbildung strategisch einzusetzen. Es besteht die Gefahr, dass neue Rohstoffprojekte in Europa auch in Zukunft aus dieser Richtung gezielt einem höheren Kostendruck ausgesetzt werden.

Zu den höheren Kosten des Bergbaus in Deutschland und Europa tragen auch die höheren Energiekosten bei. Der Bergbau gehört traditionell zu den energieintensiven Wirtschaftszweigen und ist so von Energiekostenunterschieden zwischen den Weltregionen besonders betroffen.

Politischer und gesellschaftlicher Widerstand

Vor allem direkt vor Ort vom Bergbau Betroffene wenden sich gegen die Projekte und erschweren die Erschließung und den Abbau von Rohstoffvorkommen. Aktuelle Beispiele sind die Rücknahme der Betriebsgenehmigung für den Lithiumbergbau in Jadar/Serbien,²⁰ die Konflikte um die Erschließung der Tiefenwässer für die Lithiumgewinnung im Oberrheingraben oder die weitere Verzögerung im Verfahren zur Genehmigung eines Kupferbergbaus in der Lausitz.²¹

Auch in den Expertengesprächen wurde die fehlende Akzeptanz in der Bevölkerung als eines der zentralen Probleme für die Ausweitung des Bergbaus in Deutschland benannt. Als ein möglicher Hebel wurde eine bessere Kommunikation über Kosten und Nutzen des Bergbaus angesehen und Skandinavien als Best-Practice-Beispiel für die Kommunikation hervorgehoben. Insbesondere scheint es notwendig, auf die Zielkonflikte zwischen einer Begrenzung der Rohstoffförderung und der Resilienz der Rohstoffversorgung hinzuweisen.

Die Verringerung der Umweltauswirkungen des Bergbaus kann ebenso zur Verbesserung der Akzeptanz des Bergbaus beitragen. Verschiedene Ansätze zur Minimierung der Umweltauswirkungen befinden sich in der Entwicklung (Smart Mining, In-situ-Recovery) und können sich gegenseitig ergänzen. Innovative Verfahren können gleichzeitig die Kosten für die Einhaltung von Umweltschutzvorgaben senken. Verbesserte Verfahren zum Auffinden von Rohstoffvorkommen ermöglichen gezielteren Bergbau und helfen so, die Eingriffe in die Umwelt durch Bergbauaktivitäten zu verringern.



²⁰ https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/bergbaukonzern-rio-tinto-umweltproteste-verhindern-lithium-abbau-in-ser-bien/27997830.html [23.06.2023]

²¹ rbb24, Geplanter Kupferabbau in Spremberg vorerst gescheitert, 18.09.2023 [https://www.rbb24.de/studiocottbus/wirt-schaft/2023/09/brandenburg-spremberg-kupfer-abbau-raumordnungsverfahren-negativ.html]

Mangelnde Finanzierung des Bergbaus

Bergbauvorhaben sind in der Regel große Projekte mit hohen Kosten, langen Laufzeiten und höherem Ertragsrisiko im Vergleich zu anderen Investitionsvorhaben. Dies erschwert die Finanzierung.

Die langen Laufzeiten ergeben sich sowohl aus den relativ langwierigen Erschließungsvorhaben einschließlich der Genehmigungszeiten als auch aus der langen Nutzung von erschlossenen Bergwerken. Das höhere Risiko setzt sich aus volatilen Rohstoffpreisen, der Unsicherheit über die Menge und Qualität der Rohstoffvorkommen sowie der hohen Komplexität des Marktes zusammen. Ein hoher Kapitalaufwand ergibt sich aus der Kapitalintensität der Rohstoffförderung gepaart mit langen Investitionszeiten. Die politischen Widerstände und damit einhergehend langwierige Genehmigungsverfahren erhöhen die Finanzierungsrisiken darüber hinaus.

Zur Verbesserung dieser Bedingungen wurde von Experten neben der Bereitstellung von Wagniskapital für Bergbauvorhaben auf die Kompetenzen für die Erstellung von *bankable feasibility studies* verwiesen²². Zudem wurde die Notwendigkeit betont, in der Finanzierung eine strategische Langfristperspektive einzunehmen.

Das Know-how über solche Methoden sei in Deutschland vor allem in der Bergbau- und der Bergbau- ausstattungsindustrie vorhanden, könne aber in Orientierung an den Best-Practice-Methoden – vorrangig in Kanada, Australien und China – verbessert werden. Dafür sei angewandte Forschungsförderung in Deutschland notwendig, die an der Lagerstätte vor Ort (nicht im Labor) durchgeführt werden müsse. In Ermangelung an Lagerstätten vor Ort in Deutschland muss hier auch die internationale Kooperation gestärkt werden. Nach Einschätzung der Experten findet Forschung aktuell häufig nicht statt wegen der hohen Kosten und dem Nicht-Vorhandensein von Lagerstätten vor Ort.

In den Expertengesprächen wurde auch bemängelt, dass die staatliche Unterstützung für Bergbauvorhaben in Deutschland und Europa weniger ausgeprägt als in anderen Ländern wie den USA (Inflation Reduction Act) oder China (Staatsunternehmen). Als Teil einer Lösung wird die verstärkte Unterstützung durch einen europäischen oder deutschen Rohstofffonds diskutiert.

Fehlende Verzahnung mit der weiterverarbeitenden Industrie

Die Förderung von heimischen Rohstoffen in Deutschland und Europa wird nur Erfolg haben, wenn sie in einer integrierten Wertschöpfungskette mit der Weiterverarbeitung zu Werkstoffen stattfindet, die in der Industrie verwendet werden können. Rohstoffabbau in Europa mit der Konsequenz, dass die Rohstoffe zur Weiterverarbeitung exportiert werden müssen, wird keine Früchte tragen. Viele der Weiterverarbeitungsschritte finden derzeit im nicht-europäischen Ausland statt – aus ähnlichen Gründen wie der Bergbau selbst.

Auch bei diesen Industrien handelt es sich um kapital- und energieintensive Fertigungsstätten. In der Vergangenheit in Europa ansässige Produktionsstätten wurden vielfach aus Kostengründen und



²² Eine bankable feasibility study (bankfähige Durchführbarkeitsstudie) ist eine umfassende Studie eines Mineralvorkommens, in der alle geologischen, technischen, rechtlichen, betrieblichen, wirtschaftlichen, sozialen, umweltrelevanten und sonstigen relevanten Faktoren so detailliert berücksichtigt werden, dass sie vernünftigerweise als Grundlage für eine endgültige Entscheidung eines Finanzinstituts über die Finanzierung der Erschließung des Vorkommens für die Mineralgewinnung dienen könnte. Dazu gehören also Informationen wie die Quantität und die Qualität eines Rohstoffvorkommens, Methoden für Abbau und Weiterverarbeitung, Prognosen für die Absatzmöglichkeiten und Preisentwicklung der Rohstoffe, eine Abschätzung der Kapital- und Betriebskosten in der Erschließungs- und Abbauphase des Projekts, Umweltverträglichkeitsprüfungen und Informationen zu Sanierungspflichten nach Abschluss des Bergbauprojekts. Experten bezeichneten verbesserte Methoden zur Durchführung solcher Studie als das "Nadelöhr für den Erfolg von Rohstoffprojekten".

Umweltaspekten geschlossen. Geringere Kosten der Auslandsproduktion wurzeln auch hier neben geringeren Energiekosten in niedrigeren Umweltstandards.

Innovative metallurgische Verfahren zur Aufbereitung der Erze lassen sich in Zusammenarbeit mit der weiterverarbeitenden Industrie etablieren. Für die Verzahnung mit der weiterverarbeitenden Industrie ist auch die Berücksichtigung von Recyclingverfahren von Bedeutung. Die Versorgung kann sowohl über Rohstoffe aus der primären Gewinnung als auch durch Sekundärrohstoffe erfolgen.

Da momentan nur wenige Rohstoffe in Deutschland gefördert und weiterverarbeitet werden, fehlt es für die anwendungsbezogene Forschung und die Entwicklung von Fachkräften an Anwendungsfällen für die Skalierung von innovativen Verfahren.

Alternativen zur Primärrohstoffförderung

Als Alternativen zur Primärrohstoffförderung mittels Bergbau stehen derzeit im Wesentlichen zwei Handlungsstränge zur Verfügung.

- ▶ Die Nutzung des anthropogenen Rohstofflagers mittels Urban Mining und Recycling. Häufig befinden sich zudem wertvolle Rohstoffe in nicht mehr genutzten Gütern, die wegen der geringen Lagerkosten nicht der Abfallverwertung und dem Recycling zugeführt wurden. Ein prominentes Beispiel sind die in Haushalten aufbewahrten nicht mehr genutzten Smartphones oder IKT-Geräte (vgl. Abbildung 8-2 im Anhang).
- Ausbeutung von Minenabfällen (sogenannten Tailings), die häufig noch Rohstoffe enthalten, die zum Zeitpunkt des Abbaus nicht interessant waren. Durch die metallurgische Behandlung von Abraummaterial können hier Rohstoffe gewonnen werden. Sie liegen in den Tailings teilweise in höheren Konzentrationen vor als in neu erschlossenen Minen.

5.2 Ausblick

Für eine Weiterentwicklung der Rohstoffabbaus in Deutschland lassen sich verschiedene Ansätze anhand der Themenfelder Kompetenzen, Finanzierung und integrierte Wertschöpfungsketten ordnen.

Kompetenzen

- Innovative Verfahren
 - Smart Mining/Digitalisierung des Bergbaus: Die Digitalisierung im Bergbau umfasst Prozesse wie zum Beispiel die Automatisierung, integrierte Plattformen, industrielles Internet der Dinge (IIoT), Simulations- und Visualisierungstools, fortschrittliche Analytik, dezentrale Betriebszentren, vernetzte Mitarbeiter und Cybersicherheit. Neben der Verbesserung der Sicherheit und einer höheren ökonomischen Effizienz werden damit auch ökologische Ziele wie ein reduzierter Material- und Ressourcenverbrauch, eine geringerer Wasser- und Energieverbrauch und die Verringerung von Lärm- und Luftemissionen verfolgt (Clausen et al. 2020, 2020a; Sörensen et al. 2020). Technologien, die sich diesen Verfahren zuordnen lassen, verbessern die Chancen, Bergbau in Deutschland und Europa möglich zu machen, da sie einerseits die Erschließung neuer Vorkommen zu rentableren Konditionen ermöglichen und andererseits durch die Verringerung der Umweltauswirkungen des Bergbaus die Akzeptanz von Bergbau in Deutschland und Europa erleichtern. Die Zukunftsvision dahinter lässt sich mit dem Schlagwort des "human centered climate smart mining" (Clausen und Sörensen, 2022, Clausen und Sörensen, 2021)

IWCONSULT 31

- zusammenfassen. Sie bildet eine Grundlage für die Entwicklung eines nachhaltigen Bergbaus in Deutschland und Europa (Tost et al., 2022).
- Phytomining: Hier werden Pflanzen genutzt, die während ihres Wachstums bestimmte Elemente einlagern. Diese Elemente sind dann in den Pflanzen in höherer Konzentration vorhanden als in den Böden, auf denen sie wachsen. Verfahren, die Mineralien aus den Pflanzen zu extrahieren, werden entwickelt. Die Wirtschaftlichkeit des Ansatzes ist noch nicht belegt.²⁵
- □ In Situ-Recovery: Dabei wird der hydrometallurgische Schritt der Rohstoffgewinnung in den Untergrund des Minenvorhabens verlegt. Die erzhaltigen Gesteine werden also nicht an die Oberfläche befördert, sondern die gewünschten Rohstoffe werden im Untergrund aus dem Gestein gelöst und an die Oberfläche befördert. Dies reduziert den Umwelteinfluss des Abbaus an der Oberfläche und die Menge des Taubgesteins. Gleichzeitig können Ressourcen mit geringeren Rohstoffkonzentrationen ausgebeutet werden (Seredkin et al. 2016).

Erschließung alternativer Rohstoffquellen

- Deothermie / Tiefenwässer: Aktuell arbeiten verschiedene Unternehmen an der Erschließung der Lithiumvorkommen in den geothermalen Tiefenwässern des Oberrheingrabens. Im Rahmen eines vom BMWK geförderten Projekts ("UnLimited") wird in Bruchsal eine Pilot-Geothermieanlage betrieben, in der Lithium aus salzhaltigem Thermalwasser gefiltert wird. Nach Angaben der Projektbetreiber könnte hier genug Lithium gewonnen werden, um rund 20.000 Auto-Batterien pro Jahr zu versorgen. In den Expertengesprächen wurde die Nutzung solcher Vorkommen als wünschenswerte, aber bislang untererforschte Innovation eingeordnet.
- Deep Sea Mining / Marine Rohstoffe: Die Exploration von Tiefseegebieten zielt auf die Gewinnung von polymetallischen Knollen (sog. Manganknollen). Sie enthalten neben Mangan auch Kupfer, Nickel und Kobalt sowie in Spuren Titan, Molybdän, Lithium und Neodym. Deutschland verfügt hier beispielsweise über ein Lizenzgebiet im Nordostpazifik (BGR, 2022).²⁷ Die rechtliche Möglichkeit, diese Ressourcen zu gewinnen, hängt von der Weiterentwicklung des internationalen Rechtsrahmens ab. Dieser ist notwendig, da viele Abbauregionen am Boden internationaler Gewässer liegen. Gleichzeitig ist die Bewertung, ob die Gewinnung dieser Rohstoffe angestrebt werden soll, vor allem aus ökologischen Erwägungen umstritten (Gilbert, 2023).

_



²³ Es werden drei technische Prozesse unterschieden: Haufen- oder Haldenbiolaugung zur Ausbeutung von Bergbauhalden (Mine tailings), Tankbiolaugung zur Ausbeutung von Lösungen aus Bergbauabwässern, In situ- oder in-place-Biolaugung zur direkten Ausbeutung von Erzvorkommen.

²⁴ https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Biomining/biomining_node.html;jsessio-nid=0D2DB604C8CCC7630FAF022B41E9B356.internet981

²⁵ Vgl. https://www.vdi-nachrichten.com/wirtschaft/rohstoffe/seltene-erden-wenn-pflanzen-strategisch-wichtige-elemente-aus-dem-boden-ziehen/ [1.10.2023]

²⁶ https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/lithium-umweltfreundlich-gewinnen.html [2.10.2023]

²⁷ Vgl. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/MarineRohstoffforschung/Meeresforschung/Projekte/Mineralische-Rohstoffe/Laufend/manganknollen-exploration.html; jsessionid=2AD400ACB6DFC4D9A54FC17A726D0259.internet002?nn=1547804 [1.10.2023]

Sollte eine Gewinnung der Ressourcen angestrebt werden, ist auch ein Aufbau entsprechender Aufbereitungskapazitäten an Land nötig.²⁸ Die deutsche Bundesregierung spricht sich gegen eine Nutzung der Ressourcen aus, solange nicht sichergestellt werden kann, dass der Abbau keine schwerwiegenden ökologischen Folgen nach sich zieht.²⁹

Institutionelle Innovationen

Ein Hindernis für mehr Bergbau in Deutschland und Europa sind langwierige Planungs- und Genehmigungsverfahren sowie häufig mangelnde Akzeptanz der Bevölkerung vor Ort. Hier sind Verbesserungen und Neuerungen in den Verfahren und den Institutionen notwendig. Der Vorschlag eines Kompetenzzentrums Rohstoffsicherung und Rohstoffgewinnung beim Bund (vgl. EY 2022), das Landes- und Kommunalbehörden in den Genehmigungsverfahren in Deutschland unterstützt zielt auf eine Neugestaltung von Institutionen. In Hinblick auf die Akzeptanz in der Bevölkerung können Maßnahmen zum regionalen Nachteilsausgleich mit dem Verweis auf die übergeordnete Bedeutung des Bergbaus kombiniert werden. Proaktive und frühzeitige Kommunikation und Dialogprozesse müssten dies unterstützen (IN4climate.NRW 2022). Die mögliche Minimierung genehmigungsrechtlicher Risiken erleichtert auch Finanzierung der Projekte.

Finanzierung

Die Etablierung neuer Förderungsstätten in Deutschland und Europa setzt langfristig gebundene Investitionen voraus. Die Herausforderungen durch höhere Risiken und komplexe Investitionsvorhaben wurden im Status quo beschrieben. Die Entwicklung entsprechender Kompetenzen in Unternehmen (Bankable Feasiblity) und die Etablierung des nötigen Langfristdenkens auf Seiten der Investoren sind dafür notwendig.

Zur Verbesserung der Finanzierung müsste verstärkt Wagniskapital in den Bergbau gelenkt werden. In Hinblick auf die staatliche Förderung könnte die Öffnung der Förderinstrumente für Bergbau im Ausland für den inländischen Bergbau ein Weg sein.

Integrierte Wertschöpfungsketten

Der Ausbau der Rohstoffgewinnung in Europa muss mit dem Ausbau von Aufbereitung und Weiterverarbeitung kombiniert werden, um einen Beitrag zur Resilienz der Rohstoffversorgung leisten zu können. Dabei muss letztlich die gesamte Wertschöpfungskette zwischen dem Bergbau, der verarbeitenden Industrie und der Automobilwirtschaft in Europa geschlossen werden, wenn das Ziel ist, Abhängigkeiten zu vermeiden.

Zur Wertschöpfungskette der Rohstoffwirtschaft zählt in diesem Sinne auch die Sekundärrohstoffwirtschaft. Sie sollte in die Planungen mit einbezogen werden. Innerhalb einer Kreislaufwirtschaft fließen die aus dem Recycling resultierenden Produkte in die Prozessschritte der Primärerzeugung ein. Der Auf- und Ausbau von Auf- und Weiterverarbeitungsanlagen für primäre Rohstoffe kann mit der Weiterverarbeitung von Recyclingprodukten kombiniert werden.



²⁸ Vgl. https://www.handelsblatt.com/politik/international/manganknollen-rohstoffvorkommen-in-internationalen-gewaessern-wer-um-dentiefseebergbau-ringt/29111118.html [1.10.2023]

²⁹ Vgl. https://www.bmuv.de/pressemitteilung/schutz-der-meere-deutschland-unterstuetzt-bis-auf-weiteres-keinen-tiefseebergbau [1.10.2023]

6 Handlungsempfehlungen

Ziel dieser Studie ist die Analyse, wie Innovationen genutzt und gefördert werden können, um die Resilienz der Rohstoffversorgung in der Automobilwirtschaft zu stärken. Dabei stehen schnell verfügbare Innovationen im Vordergrund, da viele Risiken für die Rohstoffversorgung schon bestehen und drohen, sich in den kommenden Jahren zu verschärfen. Die Resilienz kann über zwei Kanäle gestärkt werden:

- ▶ Die Nachfrage nach kritischen Rohstoffen sinkt (oder steigt weniger schnell) und verteilt sich über mehrere Rohstoffe (Diversifizierung).
- Das verfügbare Angebot von Primär- und Sekundärrohstoffen steigt.

In den vorigen Ausführungen wurde ausgearbeitet, auf welche Weise neue Produkte oder neue Prozesse zur Verringerung der Rohstoffnachfrage oder zur Erweiterung des Rohstoffangebots beitragen können. Die Analyse beleuchtete vier Handlungsfelder: Fahrzeug-Design, Substitution von Rohstoffen – wobei beide Bereiche durch Maßnahmen des Leichtbaus und der effizienten Materialnutzung flankiert werden –, Recycling von Rohstoffen und Rohstoff-Abbau.

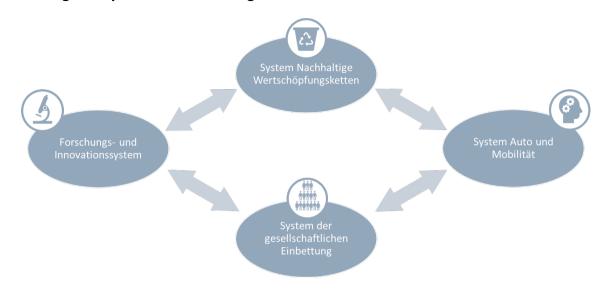
Dabei wurden die Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen in verschiedenen Handlungsfeldern deutlich. So hat die Verwendung alternativer Batterierohstoffe Auswirkungen auf die optimale Recyclingtechnik. Das Fahrzeug-Design beeinflusst die Wahl der optimalen Batterietechnik und hat Rückwirkungen auf das Recyclingpotenzial. Die Ausweitung des Abbaus von Rohstoffen verändert Kritikalitätseinschätzungen und damit möglicherweise das Kalkül für Substitution von Rohstoffen in den Produkten.

Die Strukturierung des Problemfelds erfolgt in einer Abgrenzung von vier Systemen (Abbildung 6-1).

- Im System Nachhaltige Wertschöpfungsketten steht die Etablierung von integrierten Wertschöpfungsketten von Mine und Recycling bis zur Nutzung in der Produktion im Vordergrund.
- Das System Auto und Mobilität bezieht sich auf den Zusammenhang zwischen der aus der E-Mobilität abgeleiteten Nachfrage nach Rohstoffen und deren Verhältnis zur individuellen Mobilitätsnachfrage.
- Im System Gesellschaftliche Einbettung werden die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen für Rohstoffförderung und -verarbeitung diskutiert.
- ▶ Das Forschungs- und Innovationssystem rundet den Fokus der Betrachtung ab. Auch zwischen diesen Systemen bestehen Wechselwirkungen.

Den einzelnen Systemen lassen sich dann Handlungsempfehlungen zuordnen, die in unterschiedlichem Detailgrad erläutert werden sollen. Je nach System und Handlungsempfehlung ist den Unternehmen oder dem Staat ein größerer oder kleinerer Verantwortungsanteil zuzuordnen. Eine Übersicht der Handlungsempfehlungen ist ein Abbildung 6-2 gegeben.

Abbildung 6-1: Systeme von Handlungsbereichen



Quelle: eigene Darstellung.

Abbildung 6-2: Komplexität und Interdependenz



Nachhaltige Wertschöpfungsketten

Mine to Car

Design for Recycling

Verknüpfung Recycling und Primärerzeugung

Innovationen verknüpfen (z.B. neue Batterietypen und Recycling)

IPCEI oder Reallabore für neue Wertschöpfungsketten

Quelle: eigene Darstellung.



Auto und Mobilität

Optimierung des Rohstoffbedarfs im System Auto Ladeinfrastruktur ausbauen und nutzbar machen Design und Nutzerverhalten

Integration ins Verkehrssystem



Gesellschaftliche Einbettung

Kompetenz und Akzeptanz für Bergbau, Aufbereitung, Weiterverarbeitung

Leichtbau und Materialeffizienz

Rahmenbedingungen für Sammlung und Trennung

Risikofinanzierung

Langfristorientierung

Forschungs- und Innovationssystem

Grundlagenforschung Anwendungsforschung

Reallabore

Exzellenz-Initiative

Zwar ist es im Umfang dieses Vorhabens nur schwer möglich, Handlungsempfehlungen in Hinblick auf einzelne technologische Entwicklungen oder Verfahren zu geben oder gar fundiert zu priorisieren. Drei zentrale Handlungsfelder für die Stärkung der Resilienz lassen sich aber hervorheben, bevor auf die einzelnen Systeme in größerem Detail eingegangen wird.

Priorisierung von Batterien mit geringem Einsatz kritischer Rohstoffe: kobaltarme NMC-Batterien, kobaltfreie LFP-Batterien und perspektivisch lithiumfreie Natrium-Ionen-Batterien. Über den Einsatz der verschiedenen Batterietypen in Autos entscheiden derzeit die OEMs in Hinblick auf die unterschiedlichen Eigenschaften der Batterien und die Kundenpräferenzen.

Staatliche Eingriffe in Form von Normierungen in diese Entscheidungen erscheinen zu weitgehend. Ob finanzielle Anreize die Kundenentscheidung maßgeblich beeinflussen, ist mindestens fraglich.

Der Einsatz unterschiedlicher Batterietechnologien hat aber über die Verknüpfung entlang der Wertschöpfungskette Einfluss auf die sich entwickelnde Recyclingwirtschaft. Für die Förderung noch nicht marktreifer Verfahren, sollte die Marktentwicklung bei den Batterietechnologien ein wichtiges Kriterium sein. Umgekehrt kann die Entwicklung wirtschaftlicher Recyclingtechnologien für LFP-Batterien, Hemmnisse für deren Einsatz in Fahrzeugen beseitigen, die möglicherweise sonst aus hohen regulatorischen Recyclinganforderungen entstehen könnten.

- ▶ Aufbau und Optimierung der Ladeinfrastruktur. Staatlicherseits setzt die Förderung des Aufbaus und der Optimierung der Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität den Rahmen, in dem sich eine Nachfrage nach geringeren Batteriekapazitäten und damit einem geringeren Rohstoffbedarf entwickeln kann. Wie die verschiedenen Elemente der Ladeinfrastruktur kombiniert werden z. B. Batteriespeicher zur Netzentlastung, dezentrale Energieerzeugung, induktives Laden muss dezentral entschieden werden.
- ▶ Förderung der Grundlagenforschung und des Transfers in die Anwendungsforschung. Eine breit aufgestellte und geförderte Grundlagenforschung von heute öffnet den Raum für innovative Anwendungen in der Zukunft. Von der Grundlagenforschung können dabei nur langfristig Beiträge zu spezifischen Problemstellungen erwartet werden. Wichtig ist es den Transfer von Ergebnissen der Grundlagenforschung über anwendungsbezogene Forschung hin zur Industrie zu fördern und zu gestalten. Dabei spielt nicht nur die Forschungsfinanzierung, sondern auch die institutionelle Verknüpfung der verschiedenen Akteure eine wichtige Rolle. Dabei sollte in erster Linie auf bestehende erfolgreiche Förderinstrumente, wie z.B. der Initiative Leichtbau aufgebaut werden, um die ganzheitliche Betrachtung von Produkten und Prozessen zu stärken und zu forcieren.

System Nachhaltige Wertschöpfungskette

In diesem System werden Rohstoffnachfrage und Rohstoffangebot adressiert. Für den Aufbau resilienter Wertschöpfungsketten muss die Industrie die gesamte vorgelagerte Kette der Rohstoffversorgung im Blick haben. Dazu zählen Primärrohstoffe aus Minen ebenso wie Sekundärmaterial. An vielen verschiedenen Stellen innerhalb der Wirtschaft ist die Entwicklung von Produkt- und Prozessinnovationen schon zu beobachten, die auf eine verringerte Primärrohstoffnachfrage und eine verbesserte Bereitstellung von Primär- und Sekundärrohstoffen für die Wertschöpfungskette Automobil zielen. Um diese Innovationen bestmöglich nutzen zu können, lässt sich eine Reihe von Ansatzpunkten benennen.

- ▶ Rohstoffkompetenz in Unternehmen für geschlossene Wertschöpfungsketten. In der verarbeitenden Industrie ist der Aufbau oder die Stärkung der Rohstoffkompetenz wichtig. Die Beteiligung an oder Integration von entsprechenden Unternehmen kann dies unterstützen. Für tatsächlich geschlossene Wertschöpfungsketten innerhalb Europas muss das Know-how für alle Weiterverarbeitungsschritte zwischen Mine oder Recyclingprozess und Produkt vorhanden sein. Wo dies heute fehlt, müsste sowohl an der Forschung und Entwicklung als auch an der entsprechenden Fachkräftekompetenz angesetzt werden.
- ▶ Zusammenarbeit zwischen Recyclingunternehmen und Unternehmen der Primärrohstofferzeugung. Die Erfahrung der beiden Unternehmenstypen sollte gebündelt werden, um der Industrie passende Rohstoffe anbieten zu können. Eine Standardisierung der entsprechenden Produkte kann die Koordination von Nachfrage und Angebot unterstützen.
- ▶ Entwicklung von Recyclingverfahren für die Materialien der Zukunft. Die in der Elektromobilität eingesetzten Materialien unterliegen derzeit noch einer dynamischen Weiterentwicklung. Heutige Recyclingverfahren sind für neue Materialien und die zukünftigen Recyclinganforderungen nicht automatisch geeignet. Für das Recycling der Zukunft ist eine enge Koordination und Zusammenarbeit zwischen Batterie- und Recyclingentwicklung ist nötig und eine frühe Abstimmung in

- der Wertschöpfungskette ratsam. Findet zukünftig ohne wertvollen Rohstoffinhalt kein wirtschaftliches Recycling statt, ist zu prüfen, ob Umweltnutzen und Erhöhung der Versorgungssicherheit staatliche Regulierung oder finanzielle Unterstützung rechtfertigen.
- Verbesserung des Recyclingprozesses. Um die Möglichkeiten des Recyclings zu optimieren, sollten die Möglichkeiten für Sammlung und Trennung der Materialien im Produktdesign mitgedacht werden. Recyclingunternehmen benötigen zudem für die Rückgewinnung von verschiedenen Rohstoffen in hohen Reinheitsgraden möglichst genaue Kenntnisse über die anfallenden Produkte. So spielt beispielsweise bei Batterien die Nutzung über den Lebenszyklus (Life Cycle Management) und der Ladezustand eine wichtige Rolle für die Bearbeitung. Der Battery Pass speziell für Batterien oder allgemeiner der digitale Produktpass sind innovative Ansätze zur Informationsbereitstellung.
- ▶ Institutioneller Rahmen. Institutionell sollte geprüft werden, ob für die Integration dieser Maßnahmen entlang der Wertschöpfungskette neue IPCEIs geschaffen oder bestehende IPCEIs für neue Akteure geöffnet werden können.

System Auto und Mobilität

Maßnahmen in diesem System wirken sich in erster Linie auf die Rohstoffnachfrage aus. Die Optimierung des Systems Auto in Hinblick auf die Wünsche der Kunden, den Rohstoffbedarf und die Resilienz der eigenen Wertschöpfungskette ist in erster Linie eine Aufgabe der Automobilhersteller selbst. Hier ist generell auch die größte Kompetenz für das Zusammenspiel dieser Faktoren zu vermuten. Zu diesen Maßnahmen zählen unter anderem:

- ▶ Optimierung des Zusammenspiels von rohstoffintensiven Systemen im Auto. Systeme innerhalb des Automobils stehen in Wechselwirkung zueinander. So können effizientere Motoren helfen, die notwendige Batterieleistung und deren Rohstoffbedarf zu verringern. Effizientere Motoren setzen aber oft einen erhöhten Einsatz anderer ebenfalls kritischer Rohstoffe voraus. Die optimale Lösung der entstehenden Zielkonflikte bleibt eine Unternehmensaufgabe.
- ▶ Optimierung der Batterieleistung durch die digitale Steuerung von Batterie und Leistungselektronik. Die intelligente Steuerung von Lade- und Entladevorgängen der Batterie erhöht deren Kapazität und damit die Reichweite. Dies kann helfen, zusätzliche Leistungsanforderungen bei gleichem Rohstoffeinsatz auszubalancieren oder den Rohstoffeinsatz zu reduzieren.
- ▶ Fragen des Fahrzeugdesigns. Bei der Abstimmung des Fahrzeugdesigns auf die Kundenwünsche sollten mögliche Effizienzgewinne im Rohstoffeinsatz berücksichtigt werden. Battery as a Service, Akkutausch, der Einsatz von modularen Batterien oder konsequenter Leichtbau sind Stichworte in diesem Bereich.

Die Entwicklung der Elektromobilität und ihres Rohstoffbedarfs hängt als Mobilitätsnachfrage von der gesamten Verkehrsinfrastruktur und dem Mobilitätsverhalten der Bevölkerung ab. Das Nachfrageverhalten ist in Hinblick auf E-Mobilität und ihren Rohstoffbedarf stark von der Reichweitenangst der Autokäufer geprägt. Große Batteriekapazitäten für hohe Reichweiten und damit eine hoher Rohstoffbedarf je Fahrzeug bestimmen derzeit das Nachfrageverhalten.

- Verringerung der Reichweitenangst. Befragungen zeigen, dass die Befürchtungen der Autokäufer hinsichtlich zu kurzer Reichweiten sich nach dem Autokauf verringern. Geringere Reichweiten und kleinere Batteriekapazitäten werden attraktiver, wenn Ausbau und Verbesserung der Ladeinfrastruktur eine Absicherung gegen die Reichweitenangst bieten. Eine höhere Nachfrage nach kleineren Batteriekapazitäten kann das Wachstum des Rohstoffbedarfs bremsen.
- ► Angebot und Förderung rohstoffsparender Varianten. In Metropolregionen, in denen die nötigen Reichweiten zwischen Ladevorgängen tendenziell geringer sind, sowie in Hinblick auf den Export in einkommensschwächere Länder kann auch eine Priorisierung von kleineren bzw. leichteren

Autos die Attraktivität von Elektromobilität steigern und gleichzeitig das Wachstums des Rohstoffbedarfs reduzieren.

- ▶ Effizienter Aufbau der Ladeinfrastruktur. Der Rohstoffeinsatz für die Ladeinfrastruktur beispielsweise in Form von Kupfer für die Elektrizitätsnetze kann durch eine intelligente Kombination von verschiedenen Elementen der Ladeinfrastruktur geringgehalten werden. Dazu zählen die Einbindung von Ladesäulen in dezentrale Erzeugungsstrukturen oder Pufferspeicher für Ladesäulen. Inwiefern die technologische Entwicklung bei den Batterien in der Ladeinfrastruktur noch Raum für weitere technische Innovationspotenziale bieten z.B. induktives Laden während der Fahrt oder Solarmodule in der Fahrzeughülle wird maßgeblich von den Kosten dieser Systeme abhängen.
- ▶ Integration der verschiedenen Verkehrsträger. Die engere Verknüpfung verschiedener Verkehrsträger kann dazu beitragen, die nachgefragte Reichweite bei E-Fahrzeugen und damit deren Rohstoffbedarf zu verringern Die Nutzung digitaler Informations- und Buchungssysteme kann den Wechsel zwischen den Verkehrsträgern erleichtern und dazu beitragen, vorhandene Kapazitäten besser zu nutzen.

System Gesellschaftliche Einbettung

Innovative Maßnahmen in den gesellschaftlichen Systemen zielen hier auf die Erhöhung der Rohstoffangebots, die durch die Ausweitung der Primärförderung und Aufbereitung sowie durch den Ausbau der Sekundärrohstoffwirtschaft erfolgen kann. An Beides müssen sich die Prozesse der Weiterverarbeitung anschließen bis hin zu dem Punkt, an dem die Automobilwirtschaft für sie nützliche Vorprodukte übernehmen kann. Die notwendigen Prozesse sind in der Regel energieintensiv. Umweltbelastungen sind nicht a priori auszuschließen. Innovation in diesem Bereich sollte an fünf Punkten ansetzen:

- ▶ Gesellschaftliche Akzeptanz von Bergbau, Aufbereitung, Weiterverarbeitung. Für eine größere gesellschaftliche Akzeptanz für Rohstoffgewinnung und Aufbereitung muss einerseits das Bewusstsein für den steigendem Rohstoffbedarf im Zuge Dekarbonisierung und Digitalisierung sowie andererseits die Bedeutung einer europäischen Rohstoffwirtschaft für die Einhaltung von ESG-Kriterien und die Resilienz der Wirtschaft geschärft werden. Auch die Begleitung der Maßnahmen bei der vor Ort betroffenen Bevölkerung ist von Bedeutung. Entscheidend für den Erfolg solcher Maßnahmen ist die Demonstration, dass Bergbau und die Weiterverarbeitung in nachgelagerten Wertschöpfungsstufen in Europa tatsächlich mit minimalen Umweltbeeinträchtigungen möglich sind. Die Anwendung neuester Bergbaustandards und deren kontinuierliche Fortentwicklung (Smart Mining) ist dabei ein wesentlicher Faktor.
- ▶ Kompetenz in Unternehmen und Verwaltung. Für die Zielerreichung ist der Aufbau von Kompetenzen in Unternehmen für die die Durchführung der Projekte und in der Verwaltung für die Genehmigungsprozesse und die Begleitung der Projekte notwendig. Vorhaben von überragendem gesellschaftlichem Interesse könnten zudem ähnlich wie beim Ausbau erneuerbarer Energien geplant privilegiert genehmigt werden.
- ▶ Langfristorientierung für Investitionen und Risikofinanzierung im Bergbau. Bergbauprojekte und energieintensive Weiterverarbeitung setzen langfristige und risikobehaftete Investitionen voraus. Die Bereitstellung von Wagniskapital sollte gegebenenfalls auch staatlich unterstützt werden. Denkbar ist die Bereitstellung staatlicher Garantien auch im Inland etwa durch die Integration in den geplanten Rohstofffonds der Bundesregierung. Zügige und verlässliche Genehmigungsverfahren reduzieren die Risiken der Vorhaben.
- ▶ Rahmenbedingungen für Sammlung und Trennung von Recyclingmaterialien. Innovationen sind auch für die Verbesserung der Rahmenbedingungen für Sammlung und Trennung von Recyclingmaterialien notwendig. Standards für die Informationsübermittlung zwischen Herstellern und Recyclingunternehmen wie im Vorschlag für den Battery Pass angelegt sind ein erster Schritt.

▶ Weitere Förderung und Ausbau der Kompetenzen im Bereich Leichtbau und Steigerung der effizienten Materialnutzung von Primärrohstoffen. Das Konzept Leichtbau muss verstärkt genutzt werden, um die Primärrohstoffverbräuche zu reduzieren. Dazu bedarf es eines holistischen Ansatzes. Produkte und Prozesse müssen hierbei vom Ende her gedacht werden, um Einsparpotenziale bereits ab den ersten Wertschöpfungsstufen der eingesetzten Rohstoffe im Sinne einer Circular Economy zu realisieren.

Forschungs- und Innovationssystem

Die Ausschöpfung der Forschungspotenziale kann im Ergebnis sowohl das Rohstoffangebot erhöhen als auch die Rohstoffnachfrage verringern. Ein wesentliches Ergebnis der Expertengespräche war die Einschätzung, dass der wissenschaftliche Raum in Deutschland und Europa nicht vollständig ausgeschöpft wird. Zu Maßnahmen in diesem Bereich zählen:

- ▶ Stärkung der Grundlagenforschung. Aktuell wird der Grundlagenforschung zu wenig Bedeutung beigemessen. Dadurch wird zu wenig Potenzial für zukünftiges Wissen geschaffen. Eine wichtige Voraussetzung für eine adäquate Förderung der Grundlagenforschung ist das Verständnis für die Langfristorientierung und Ergebnisoffenheit der Grundlagenforschung. Ob sich ein Anwendungsfall aus bestimmten Forschungsansätzen ergibt, und welcher dies ist, ist im Prozess der Grundlagenforschung a priori offen. Die heutigen technologischen Möglichkeiten sind ohne eine offene Grundlagenforschung allerdings nicht denkbar. Für eine Stärkung der Grundlagenforschung wurden zwei Ansätze als wesentlich herausgestellt:
 - Die Vernetzung zwischen exzellenten Forschungseinrichtungen ermöglicht das Lernen der Besten von den Besten.
 - Eine stärkere internationale Vernetzung der deutschen und europäischen Forschungslandschaft wird als Anknüpfung in Forschungsbereichen als notwendig erachtet, in denen andere Länder schon einen Vorsprung erarbeitet haben.
- ▶ Verknüpfung von Grundlagenforschung mit Anwendungsforschung. Der Transfer der Ergebnisse der Grundlagenforschung in die Anwendungsforschung ist für deren Nutzbarkeit ebenso zentral. Forschungsförderung kann hier spezifischer agieren, da der Anwendungsfall bekannt ist. Vernetzung zwischen Forschungsinstitutionen und Industrie stärkt die Zielorientierung. Reallabore ermöglichen eine zeitlich und örtlich begrenzte Erprobung von Innovationen in einem gelockerten Rechtsrahmen.

39



7 Literaturverzeichnis

Abdollahifar, Mozaffar; Doose, Stefan; Cavers, Heather; Kwade, Arno (2023): Graphite Recycling from End-of-Life Lithium-Ion Batteries: Processes and Applications. In: Adv Materials Technologies 8 (2), Artikel 2200368, S. 2200368. DOI: 10.1002/admt.202200368.

Adamas Intelligence (2023): State of Charge: EVs, Batteries and Battery Materials. 8th Biannual, 2022 H2. Online verfügbar unter https://www.adamasintel.com/wp-content/uploads/2022/10/Adamas-Intelligence-State-of-Charge-EVs-Batteries-and-Battery-Materials-2022-H2.pdf.

Armand, Michel; Axmann, Peter; Bresser, Dominic; Copley, Mark; Edström, Kristina; Ekberg, Christian et al. (2020): Lithium-ion batteries – Current state of the art and anticipated developments. In: Journal of Power Sources 479, S. 228708. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.228708.

Bae, Hyuntae; Kim, Youngsik (2021): Technologies of lithium recycling from waste lithium ion batteries: a review. In: Mater. Adv. 2 (10), S. 3234–3250. DOI: 10.1039/D1MA00216C.

Battery Pass Consortium (2023): Battery Passport Content Guidance – Executive Summary. Achieving compliance with the EU Battery Regulation and increasing sustainability and circularity. Version 1.0 / April 2023. Online verfügbar unter https://thebatterypass.eu/assets/images/content-guidance/pdf/2023_Battery_Passport_Content_Guidance_Executive_Summary.pdf, zuletzt geprüft am 26.09.2023.

Baum, Zachary J.; Bird, Robert E.; Yu, Xiang; Ma, Jia (2022): Lithium-Ion Battery Recycling—Overview of Techniques and Trends. In: ACS Energy Lett. 7 (2), S. 712—719. DOI: 10.1021/acsenergylett.1c02602.

Beaudet, Alexandre; Larouche, François; Amouzegar, Kamyab; Bouchard, Patrick; Zaghib, Karim (2020): Key Challenges and Opportunities for Recycling Electric Vehicle Battery Materials. In: Sustainability 12 (14), S. 5837. DOI: 10.3390/su12145837.

BDEW, 2023, Zweite BDEW Umfrage: Elektromobilität und Laden aus Nutzersicht, Berlin, September 2023.

BGR, 2022, Marine Rohstoffe NewsLetter 2022. Marine Mineralische Rohstoffe an der BGR, https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Marine Rohstoffe Newsletter/Rohstoffwirtschaft/marine mineralische rohstoffe 2022.pdf? blob=publicationFile&v=3 [1.10.2023]

Borrmann, Daniel; Herrmann, Florian; Stegmüller, Sebastian; Block, Lukas; Keicher, Lukas (2023): Wertstoffkreislauf von Traktionsbatterien aus Europa. Hg. V. Cluster Elektromobilität Süd-West c/o e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue Mobilitätslö-sungen und Automotive Baden-Württemberg. Online verfügbar unter https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Cluster_ESW_Themenpapier_Kreislaufwirtschaft.pdf, zuletzt ge-prüft am 25.09.2023.

BYD (2023): BYD Dolphin: Agile and Versatile. Online verfügbar unter Another unique selling point of the blade battery – which actually looks like a blade – is that it uses lithium iron-phosphate (LFP) as the cathode material, which offers a much higher level of safety than conventional lithium-ion batteries. LFP naturally has excellent thermal stability and is substantially cobalt free. LFP is also a very durable material., zuletzt geprüft am 05.10.2023.

CATL (2022): CATL launches CTP 3.0 battery "Qilin," achieves the highest integration level in the world. Online verfügbar unter https://www.catl.com/en/news/958.html, zuletzt geprüft am 05.10.2023.

CATL (2023): CATL Launches Superfast Charging Battery Shenxing, Opens Up Era of EV Superfast Charging. Online verfügbar unter https://www.catl.com/en/news/6091.html, zuletzt geprüft am 05.10.2023.

Chen, Mengyuan; Ma, Xiaotu; Chen, Bin; Arsenault, Renata; Karlson, Peter; Simon, Nakia; Wang, Yan (2019): Recycling End-of-Life Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries. In: Joule 3 (11), S. 2622–2646. DOI: 10.1016/j.joule.2019.09.014.

Ciez, Rebecca E.; Whitacre, J. F. (2019): Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. In: Nat Sustain 2 (2), S. 148–156. DOI: 10.1038/s41893-019-0222-5.

Clausen, Elisabeth / Sörensen, Aarti / Uth, Fabian / Mitra, Rudrajit / Lehnen, Felix / Schwarze, Berit, 2020, Assessment of the Effects of Global Digitalization Trends on Sustainability in Mining, Part I: Digitalization Processes in the Mining Industry in the Context of Sustainability, Studie im Auftrag der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). https://www.bgr.bund.de/EN/The-men/Min_rohstoffe/Downloads/digitalization_mining_dustainability_part_l_en.pdf?_blob=publicationFile&v=4">https://www.bgr.bund.de/EN/The-men/Min_rohstoffe/Downloads/digitalization_mining_dustainability_part_l_en.pdf?_blob=publicationFile&v=4">https://www.bgr.bund.de/EN/The-men/Min_rohstoffe/Downloads/digitalization_mining_dustainability_part_l_en.pdf?_blob=publicationFile&v=4">https://www.bgr.bund.de/EN/The-men/Min_rohstoffe/Downloads/digitalization_mining_dustainability_part_l_en.pdf?_blob=publicationFile&v=4">https://www.bgr.bund.de/EN/The-men/Min_rohstoffe/Downloads/digitalization_mining_dustainability_part_l_en.pdf?_blob=publicationFile&v=4">https://www.bgr.bund.de/EN/The-men/Min_rohstoffe/Downloads/digitalization_mining_dustainability_part_l_en.pdf?_blob=publicationFile&v=4">https://www.bgr.bund.de/EN/The-men/Min_rohstoffe/Downloads/digitalization_mining_dustainability_part_l_en.pdf?_blob=publicationFile&v=4">https://www.bgr.bund.de/EN/The-men/Min_rohstoffe/Downloads/digitalization_mining_dustainability_part_l_en.pdf?_blob=publicationFile&v=4">https://www.bgr.bund.de/EN/The-men/Min_rohstoffe/Downloads/digitalization_mining_dustainability_part_l_en.pdf?_blob=publicationFile&v=4">https://www.bgr.bund.de/EN/The-men/Min_rohstoffe/Downloads/digitalization_mining_dustainability_part_l_en.pdf?_blob=publication_mining_dustainability_part_l_en.pdf?_blob=publication_mining_dustainability_part_l_en.pdf?_blob=publication_mining_dustainability_part_l_en.pdf?_blob=publication_mining_dust

Clausen, Elisabeth / Sörensen, Aarti / Uth, Fabian / Mitra, Rudrajit / Lehnen, Felix / Schwarze, Berit, 2020a, Assessment of the Effects of Global Digitalization Trends on Sustainability in Mining, Part II: Evaluation of Digitalization Trends and their Effects on Sustainability in the Global Mining Sector, Studie im Auftrag der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Min rohstoffe/Downloads/digitalization trends mining sustainability part II en.pdf? blob=publicationFile&v=3 [1.10.2023]

Clausen, Elisabeth / Sörensen, Aarti, 2021, Op-ed: Smart mining won't leave humans behind. Edited by Mining Magazine. https://www.miningmagazine.com/innovation/opinion/1421074/op-ed-smart-mining-wonProzentE2Prozent80Prozent99t-leave-humans-behind, updated on 11/8/2021 [1.10.2023]

Dai, Qiang; Spangenberger, Jeffrey; Ahmed, Shabbir; Gaines, Linda; Kelly, Jarod C.; Wang, Michael (2019): EverBatt: A Closed-loop Battery Recycling Cost and Environmental Impacts Model: Office of Scientific and Technical Information (OSTI).

DERA (2021): DERA Rohstoffinformation. Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021. Online verfügbar unter https://www.deutsche-rohstoffagen-tur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-50.pdf;jsessionid=EFE5501B2AFE1A57A12E4E60D883796C.internet002?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 02.10.2023.

Dolotko, Oleksandr; Gehrke, Niclas; Malliaridou, Triantafillia; Sieweck, Raphael; Herrmann, Laura; Hunzinger, Bettina et al. (2023a): Universal and efficient extraction of lithium for lithium-ion battery recycling using mechanochemistry. In: Commun Chem 6 (1), S. 49. DOI: 10.1038/s42004-023-00844-2.

Dolotko, Oleksandr; Knapp, Michael; Ehrenberg, Helmut (2023b): Batterierecycling–Technologien im Überblick. In: CITplus 26 (3), S. 16–19. DOI: 10.1002/citp.202300311.

41



Doose, Stefan; Mayer, Julian K.; Michalowski, Peter; Kwade, Arno (2021): Challenges in Ecofriendly Battery Recycling and Closed Material Cycles: A Perspective on Future Lithium Battery Generations. In: Metals 11 (2), S. 291. DOI: 10.3390/met11020291.

Duan, Jian; Tang, Xuan; Dai, Haifeng; Yang, Ying; Wu, Wangyan; Wei, Xuezhe; Huang, Yunhui (2020): Building Safe Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles: A Review. In: Electrochem. Energ. Rev. 3 (1), S. 1–42. DOI: 10.1007/s41918-019-00060-4.

Dunn, Jessica; Slattery, Margaret; Kendall, Alissa; Ambrose, Hanjiro; Shen, Shuhan (2021): Circularity of Lithium-Ion Battery Materials in Electric Vehicles. In: Environmental Science & Technology 55 (8), S. 5189–5198. DOI: 10.1021/acs.est.0c07030.

Durmus, Yasin Emre; Zhang, Huang; Baakes, Florian; Desmaizieres, Gauthier; Hayun, Hagay; Yang, Liangtao et al. (2020): Side by Side Battery Technologies with Lithium-Ion Based Batteries. In: Advanced Energy Materials 10 (24), Artikel 2000089. DOI: 10.1002/aenm.202000089.

Efore (2020): Comparison of Lithiumion batteries. Online verfügbar unter https://www.efore.com/content/uploads/2020/12/Comparison_of_lithium_batteries_20201209.pdf, zuletzt geprüft am 05.10.2023.

EPI, 2023, Environmental Performance Index, online verfügbar unter https://epi.yale.edu/

European Commission (2023): Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on circularity requirements for vehicle design and on management of end-of-life vehicles, amending Regulations (EU) 2018/858 and 2019/1020 and repealing Directives 2000/53/EC and 2005/64/EC, vom 13.07.2023. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2023%3A451%3AFIN&qid=1689318552193, zuletzt geprüft am 27.09.2023.

EY, 2022, Genehmigungsverfahren zum Rohstoffabbau in Deutschland, Endbericht, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publi-kationen/Industrie/ey-gutachten-genehmigungsverfahren-zum-rohstoffabbau-in-deutschland.pdf? blob=publicationFile&v=8 [30.09.2023]

EY, IW Consult GmbH (2023): Endbericht der Begleitforschung: Resilienz der automobilen Wertschöpfungs- und Liefernetzwerke. Online verfügbar unter https://expertenkreis-automobilwirt-schaft.de/media/pages/home/967973a50a-1695209525/endbericht-der-begleitforschung_resilienz-der-automobilen-wertschopfungs-und-liefernetzwerke.pdf, zuletzt ge-prüft am 02.10.2023.

Fallah, Narjes; Fitzpatrick, Colin; Killian, Sheila; Johnson, Michael (2021): End-of-Life Electric Vehicle Battery Stock Estimation in Ireland through Integrated Energy and Circular Economy Modelling. In: Resources, Conservation and Recycling 174, S. 105753. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105753.

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2020): Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf. Online verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2020/Faktencheck-Batterien-fuer-E-Autos.pdf, zuletzt geprüft am 05.10.2023.

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2023a): Alternative Battery Technologies Roadmap 2030+. Online verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2023/abt-roadmap.pdf, zuletzt geprüft am 04.10.2023.

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2023b): Analysis of global battery production: production locations and quantities of cells with LFP and NMC/NCA cathode material. Online verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/en/blog/themen/batterie-update/globale-batterie-produktion-analyse-standorte-mengen-zellen-lfp-nmc-nca-kathoden.html, zuletzt geprüft am 20.09.2023.

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2023c): Preisschwankungen bei Batterie-Rohstoffen: Wie die Automobilindustrie reagiert und welche Auswirkungen sie auf die Zellkosten haben. Online verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update/batterie-rohstoffe-preis-schwankungen-wie-reagiert-automobil-industrie-auswirkungen-zellkosten.html, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2023d): Recycling of lithium-ion batteries will increase strongly in Europe. Online verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/en/blog/themen/batterie-update/recycling-lithium-ionen-batterien-europa-starke-zunahme-2030-2040.html, zuletzt aktualisiert am 06.09.2023, zuletzt ge-prüft am 06.09.2023.

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2023c, Alternative Battery Technologies Roadmap 2030+, Karlsruhe, September 2023

Gaines, Linda (2014): The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course. In: Sustainable Materials and Technologies 1-2, S. 2–7. DOI: 10.1016/j.susmat.2014.10.001.

Gaines, Linda; Dai, Qiang; Vaughey, John T.; Gillard, Samuel (2021): Direct Recycling R&D at the ReCell Center. In: Recycling 6 (2), S. 31. DOI: 10.3390/recycling6020031.

Gaines, Linda; Wang, Yan (2021): How to Maximize the Value Recovered from Li-Ion Batteries: Hydrometallurgical or Direct Recycling? In: Electrochem. Soc. Interface 30 (3), S. 51–54. DOI: 10.1149/2.F07213F.

Gilbert, Natasha, 2023, Deep-sea mining could soon be approved – how bad is it?, Nature, 619, 27 July 2023, S. 684.

Giza, Krystyna; Pospiech, Beata; Gęga, Jerzy (2023): Future Technologies for Recycling Spent Lithium-Ion Batteries (LIBs) from Electric Vehicles—Overview of Latest Trends and Challenges. In: Ener-gies 16 (15), S. 5777. DOI: 10.3390/en16155777.

Gomoll, Wolfgang, (2023), Betrachtung: So unrealistisch ist induktives Laden während der Fahrt, in: Elektroauto-News, 5.April 2023, https://www.elektroauto-news.net/news/induktives-laden-fahren

Gutsch, Moritz; Leker, Jens (2022): Global warming potential of lithium-ion battery energy storage systems: A review. In: Journal of Energy Storage 52, S. 105030. DOI: 10.1016/j.est.2022.105030.

Harper, Gavin; Sommerville, Roberto; Kendrick, Emma; Driscoll, Laura; Slater, Peter; Stolkin, Rustam et al. (2019): Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. In: Nature 575 (7781), S. 75–86. DOI: 10.1038/s41586-019-1682-5.

Heise Autos (2023): Artikelserie Elektroauto-Batterien: Der aktuelle Stand bei den Batterien. Mischungen für Batteriezellen: NMC und LFP. Online verfügbar unter https://www.heise.de/hintergrund/Batterien-fuer-Elektroautos-Teil-1-Wo-wir-heute-bei-der-Zellchemie-stehen-7456522.html?seite=2, zuletzt geprüft am 19.10.2023.



Helander, Harald; Ljunggren, Maria (2023): Battery as a service: Analysing multiple reuse and recycling loops. In: 0921-3449 197, S. 107091. DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.107091.

Houache, Mohamed; Yim, Chae-Ho; Karkar, Zouina; Abu-Lebdeh, Yaser (2022): On the Current and Future Outlook of Battery Chemistries for Electric Vehicles—Mini Review. In: Batteries 8 (7), S. 70. DOI: 10.3390/batteries8070070.

IEA (2018): Global EV Outlook 2018. Towards cross-modal electrification. Online verfügbar unter https://iea.blob.core.windows.net/assets/387e4191-acab-4665-9742-073499e3fa9d/Global_EV_Outlook 2018.pdf, zuletzt geprüft am 02.10.2023.

IEA (2022): Global EV Outlook 2022. Securing supplies for an electric future. Online verfügbar unter https://iea.blob.core.windows.net/assets/ad8fb04c-4f75-42fc-973a-6e54c8a4449a/GlobalElectricVehicleOutlook2022.pdf, zuletzt geprüft am 02.10.2023.

IEA (2023): Global EV Outlook 2023: Catching up with Climate Ambitions. Online verfügbar unter https://iea.blob.core.windows.net/assets/dacf14d2-eabc-498a-8263-9f97fd5dc327/GEVO2023.pdf.

IN4climate.NRW, 2022, 9 Eckpunkte zur Beschleunigung von Genehmigungsverfahren in der energieintensiven Grundstoffindustrie, Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Genehmigungsverfahren.

Iqbal, Mehroze; Benmouna, Amel; Becherif, Mohamed; Mekhilef, Saad (2023): Survey on Battery Technologies and Modeling Methods for Electric Vehicles. In: Batteries 9 (3). DOI: 10.3390/batteries9030185.

Kaksonen, Anna H. / Deng, Xiao / Bohu, Tsing / Zea, Luis / Khaleque, Himel Nahreen / Gumulya, Yosephine / Boxall, Naomi J. / Morris, Christina / Cheng, Ka Yu, 2020, Prospective directions for biohydrometallurgy, Hydrometallurgy, 195, 2020, S. 105376, https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105376 [2.10.2023].

Kaya, Muammer (2022): State-of-the-art lithium-ion battery recycling technologies. In: Circular Economy 1 (2), S. 100015. DOI: 10.1016/j.cec.2022.100015.

Kraftfahrbundesamt (2023): Neuzulassungen nach Umwelt-Merkmalen. Online verfügbar unter https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz14_n_uebersicht.html?nn=3514348, zuletzt aktualisiert am 06.09.2023, zuletzt geprüft am 06.09.2023.

Lampon, Jesus F., 2022, Efficiency in design and production to achieve sustainable development challenges in the automobile industry: Modular electric vehicle platforms, Sustainable Development. 2023 (31), S. 26–38, DOI: 10.1002/sd.2370

Lander, Laura; Cleaver, Tom; Rajaeifar, Mohammad Ali; Nguyen-Tien, Viet; Elliott, Robert J. R.; Heidrich, Oliver et al. (2021): Financial viability of electric vehicle lithium-ion battery recycling. In: Science 24 (7), S. 102787. DOI: 10.1016/j.isci.2021.102787.

Lander, Laura; Tagnon, Chris; Nguyen-Tien, Viet; Kendrick, Emma; Elliott, Robert J.R.; Abbott, An-drew P. et al. (2023): Breaking it down: A techno-economic assessment of the impact of battery pack design on disassembly costs. In: Applied Energy 331, S. 120437. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.120437.

Li, Xuelei; Zhang, Jin; Song, Dawei; Song, Jishun; Zhang, Lianqi (2017): Direct regeneration of recycled cathode material mixture from scrapped LiFePO 4 batteries. In: Journal of Power Sources 345, S. 78–84. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.01.118.

Liu, Wei; Placke, Tobias; Chau, K. T. (2022): Overview of batteries and battery management for electric vehicles. In: Energy Reports 8, S. 4058–4084. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.03.016.

Marthaler, Lukas; Grudizien, Piotr; Ierides, Marcos; Mccready, Amy; Bax & Company (2023): Market Intelligence Report. Cathode Materials Market. Online verfügbar unter https://euagenda.eu/up-load/publications/cobra-market-intelligence-report-on-the-cathode-materials-market.pdf, zuletzt geprüft am 04.10.2023.

Mayyas, Ahmad; Steward, Darlene; Mann, Margaret (2019): The case for recycling: Overview and challenges in the material supply chain for automotive li-ion batteries. In: Sustainable Materials and Technologies 19, e00087. DOI: 10.1016/j.susmat.2018.e00087.

mdr (2023): E-Mobilität. Ladezeiten, Infrastruktur, Rohstoffe: So wird das Elektroauto massentauglich. Online verfügbar unter https://www.mdr.de/wissen/elektroauto-probleme-loesungen-batterien-laden-infrastruktur-rohstoffe-100.html, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Mercedes-Benz: EQS Limousine. Online verfügbar unter https://www.mercedes-benz.de/passenger-cars/models/saloon/eqs/over-

view.html?gagcmid=GA_399350382_1168781604327229_&gclid=07832e0caeb11c558e1f4b122ad14 32a&gclsrc=3p.ds, zuletzt geprüft am 05.10.2023.

Mercedes-Benz Group (2023): Mercedes-Benz legt Grundstein für nachhaltige Batterie-Recyclingfabrik im süddeutschen Kuppenheim | Mercedes-Benz Group. Online verfügbar unter https://group.mercedes-benz.com/unternehmen/news/recyclingfabrik-kuppenheim.html, zuletzt aktualisiert am 17.09.2023, zuletzt geprüft am 27.09.2023.

Moïsé, E.; Rubínová, S. (2023): Trade policies to promote the circular economy: A case study of lithiumion batteries. Hg. V. OECD Publishing. Paris (OECD Trade and Environment Working Papers, No. 2023/01).

Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) (2021): Batterierecyclingmarkt Europa: Chance für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft. AG 4 – ZWISCHENBERICHT. Online verfügbar unter https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/10/NPM_AG4_Batterierecycling.pdf, zuletzt geprüft am 22.09.2023.

Neef, Christoph; Schmaltz, Thomas; Thielmann, Axel (2021): Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau: IMPULS-Stiftung. Online verfügbar unter https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/0c148c12-7da6-4db5-87ea-344b24adbd8b/details.

Neumann, Jonas; Petranikova, Martina; Meeus, Marcel; Gamarra, Jorge D.; Younesi, Reza; Winter, Martin; Nowak, Sascha (2022): Recycling of Lithium-Ion Batteries—Current State of the Art, Circular Economy, and Next Generation Recycling. In: Advanced Energy Materials 12 (17), Artikel 2102917. DOI: 10.1002/aenm.202102917.

Niese, Nathan; Pieper, Cornelius; Arora, Aakash; Xie, Alex (2020): The Case for a Circular Economy in Electric Vehicle Batteries. In: BCG Global, 14.09.2020. Online verfügbar unter



https://www.bcg.com/publications/2020/case-for-circular-economy-in-electric-vehicle-batteries, zuletzt geprüft am 26.09.2023.

Northvolt (2023): Northvolt Drei, Heide. Online verfügbar unter https://northvolt.com/career/locations/heide/, zuletzt geprüft am 02.10.2023.

Ohneseit, Sebastian; Finster, Philipp; Floras, Claire; Lubenau, Niklas; Uhlmann, Nils; Seifert, Hans Jürgen; Ziebert, Carlos (2023): Thermal and Mechanical Safety Assessment of Type 21700 Lithium-Ion Batteries with NMC, NCA and LFP Cathodes—Investigation of Cell Abuse by Means of Accelerating Rate Calorimetry (ARC). In: Batteries 9 (5), S. 237. DOI: 10.3390/batteries9050237.

P3 Automotive GmbH (2020): TESLA BATTERY DAY 2020 – TECHNOLOGY ANNOUNCEMENT ANALY-SIS. P3 technology report. Online verfügbar unter https://media.electrive.net/2020/09/200923_Tesla_Battery-Day_P3-Assessment-published.pdf, zuletzt geprüft am 02.10.2023.

PEM; VDMA; TU Braunschweig (2021): RECYCLING VON LITHIUMIONEN-BATTERIEN. Online verfüg-bar unter https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaabdqfase.

Picatoste, Aitor / Justel, Daniel / Medoza, Juan Manuel F., 2022, Exploring the applicability of circular design criteria for electric vehicle batteries, Procedia CIRP, 109, S. 107-112. https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.222 [4.10.2023]

Preger, Yuliya; Barkholtz, Heather M.; Fresquez, Armando; Campbell, Daniel L.; Juba, Benjamin W.; Romàn-Kustas, Jessica et al. (2020): Degradation of Commercial Lithium-Ion Cells as a Function of Chemistry and Cycling Conditions. In: J. Electrochem. Soc. 167 (12), S. 120532. DOI: 10.1149/1945-7111/abae37.

Priem, Jason; Piwowar, Heather; Orr, Richard (2022): OpenAlex: A fully-open index of scholarly works, authors, venues, institutions, and concepts. Online verfügbar unter https://ar-xiv.org/pdf/2205.01833.pdf.

Primobius (2023): Batterie-Recycling ohne Grenzen. Online verfügbar unter https://www.primobius.com/de-de/ueber-uns/das-unternehmen, zuletzt aktualisiert am 26.09.2023, zuletzt geprüft am 26.09.2023.

Rackley, Edward / Wade, Aaron / Santos, Elijah / Kohler, Catherine / Lindsay, Jordan / Pell, Robert, 2022, Size Matters: The Economic and Environmental Impact of Smaller EV Batteries. https://uploads-ssl.webflow.com/6008a2327223f98143f46e18/62e265d249364e247acd1242 Half-Size%20Battery%20LCA.pdf [04.10.2023]

Rallo, H.; Sánchez, A.; Canals, Ll.; Amante, B. (2022): Battery dismantling centre in Europe: A centralized vs decentralized analysis. In: Resources, Conservation & Recycling Advances 15, S. 200087. DOI: 10.1016/j.rcradv.2022.200087.

Recycle spent batteries (2019). In: Nat Energy 4 (4), S. 253. Online verfügbar unter https://www.nature.com/articles/s41560-019-0376-4.

Riofrancos, Thea / Kendall, Alissa / Dayemo, Kristi K. / Haugen, Matthew / McDonald, Kira / Hassan, Batul / Slattery, Margaret / Lillehei, Xan, 2023, Achieving Zero Emissions with More Mobility and Less

Mining, Climate and Community Project, https://www.climateandcommunity.org/_files/ugd/d6378b_3b79520a747948618034a2b19b9481a0.pdf [04.10.2023]

Roland Berger (2022): The Lithium-Ion (EV) battery market and supply chain. Market drivers and emerging supply chain risks. Online verfügbar unter https://content.roland-berger.com/hubfs/07_presse/Roland%20Berger_The%20Lithium-Ion%20Battery%20Mar-ket%20and%20Supply%20Chain_2022_final.pdf, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Rudschies, Wolfgang (2023): Elektroauto-Akkus: So funktioniert das Recycling. In: ADAC, 22.08.2023. Online verfügbar unter https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-akku-recycling/, zuletzt geprüft am 26.09.2023.

Schmidt, Simon / Clausen, Jan / van der Auwera, Robin / Klapp, Oliver / Schmerler, Rico / Löffler, David / Werner, Maximilian Jakob / Block, Lukas, 2022, Novel Battery Module Design for Increased Resource Efficiency. World Electric Vehicle Journal, 13, 177. https://doi.org/10.3390/wevj13100177

Seredkin, Maxim / Zabolotsky, Alexander / Jeffress, Graham, 2016, In situ recovery, an alternative to conventional methods of mining: Exploration, resource estimation, environmental issues, project evaluation and economics, in: Ore Geology Reviews, 79, 500-514, December 2016

Shahjalal, Mohammad; Roy, Probir Kumar; Shams, Tamanna; Fly, Ashley; Chowdhury, Jahedul Is-lam; Ahmed, Md. Rishad; Liu, Kailong (2022): A review on second-life of Li-ion batteries: prospects, challenges, and issues. In: Energy 241, S. 122881. DOI: 10.1016/j.energy.2021.122881.

Sörensen, Aarti / Nienhaus, Karl / Clausen, Elisabeth, 2020, Smart Mining – heute und morgen, Mining Report Glückauf, 156, 3, 210 – 221.

Sojka, R.; Pan, Q.; Billmann, L. (2020): Comparative study of Li-ion battery recycling processes. AC-CUREC Recycling GmbH. Online verfügbar unter https://accurec.de/wp-content/uploads/2021/04/Accurec-Comparative-study.pdf.

Spaven, Frederick / Liu, Yuanchang / Baghdadi, Mehdi, 2022, Going further with smaller Evs: System-level battery range, emissions and charging infrastructure analysis, Journal of Cleaner Production, 369, 133349, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133349 [04.10.2023]

Strategy &; PEM (2023): The EU recycling market –a viable and sustainable business.

Tost, Michael / Streit, Stefanie / Endl, Andreas / Gugerell, Katharina, 2022, Nachhaltiger Bergbau 2050, Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 167 (4), 151-157, https://doi.org/10.1007/s00501-022-01214-6 [1.10.2023]

Transport & Environment. (2023). Clean and lean: Battery metals demand from electrifying passenger transport. https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2023/07/Battery-metals-demand-from-electrifying-passenger-transport-1.pdf [4.10.2023]

Vekić, Nicola (2020): Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität: Status, Zukunftsperspektiven, Recycling. Online verfügbar unter https://egg.agw.kit.edu/img/Lithium-Ionen-Batterien%20f%C3%BCr%20die%20Elektrom.pdf, zuletzt geprüft am 04.10.2023.

Universität Stuttgart (2023), E-Fahrzeuge induktiv so effizient aufladen wie mit einem Kabel, Meldungen 2023, Nr. 3, 25.01.2023, https://www.uni-stuttgart.de/universitaet/aktuelles/meldungen/E-Fahrzeuge-induktiv-so-effizient-aufladen-wie-mit-einem-Kabel/

Wagner-Wenz, Ronja; van Zuilichem, Albert-Jan; Göllner-Völker, Laura; Berberich, Katrin; Wei-denkaff, Anke; Schebek, Liselotte (2023): Recycling routes of lithium-ion batteries: A critical review of the development status, the process performance, and life-cycle environmental impacts. In: MRS Energy & Sustainability 10 (1), S. 1–34. DOI: 10.1557/s43581-022-00053-9.

Weltbank, 2023, Worldwide Governance Indicators, online verfügbar unter https://info.world-bank.org/governance/wgi/.

Windisch-Kern, Stefan; Holzer, Alexandra; Ponak, Christoph; Nagovnak, Peter; Raupenstrauch, Harald (2021a): Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Herausforderungen und aktuelle Forschungsergebnisse. In: Berg Huettenmaenn Monatsh 166 (3), S. 150–156. DOI: 10.1007/s00501-021-01091-5.

Windisch-Kern, Stefan; Holzer, Alexandra; Ponak, Christoph; Raupenstrauch, Harald (2021b): Pyrometallurgical Lithium-Ion-Battery Recycling: Approach to Limiting Lithium Slagging with the In-duRed Reactor Concept. In: Processes 9 (1), S. 84. DOI: 10.3390/pr9010084.

Xu, Panpan; Dai, Qiang; Gao, Hongpeng; Liu, Haodong; Zhang, Minghao; Li, Mingqian et al. (2020): Efficient Direct Recycling of Lithium-Ion Battery Cathodes by Targeted Healing. In: Joule 4 (12), S. 2609–2626. DOI: 10.1016/j.joule.2020.10.008.

Xu, Panpan; Yang, Zhenzhen; Yu, Xiaolu; Holoubek, John; Gao, Hongpeng; Li, Mingqian et al. (2021): Design and Optimization of the Direct Recycling of Spent Li-lon Battery Cathode Materials. In: ACS Sustainable Chem. Eng. 9 (12), S. 4543–4553. DOI: 10.1021/acssuschemeng.0c09017.

Yang, Chen (2022): Running battery electric vehicles with extended range: Coupling cost and energy analysis. In: Applied Energy 306, S. 118116. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.118116.

Yu, Xiaolu; Li, Weikang; Gupta, Varun; Gao, Hongpeng; Tran, Duc; Sarwar, Shatila; Chen, Zheng (2022): Current Challenges in Efficient Lithium-Ion Batteries' Recycling: A Perspective. In: Global challenges (Hoboken, NJ) 6 (12), S. 2200099. DOI: 10.1002/gch2.202200099.

Zhang, Hao; Yang, Yang; Ren, Dongsheng; Wang, Li; He, Xiangming (2021): Graphite as anode materials: Fundamental mechanism, recent progress and advances. In: Energy Storage Materials 36, S. 147–170. DOI: 10.1016/j.ensm.2020.12.027.

Zheng, Panni; Young, David; Yang, Tairan; Xiao, Yunhao; Li, Zheng (2023): Powering battery sustainability: a review of the recent progress and evolving challenges in recycling lithium-ion batteries. In: Front. Sustain. Resour. Manag. 2, Artikel 1127001, S. 1127001. DOI: 10.3389/fsrma.2023.1127001.

8 Anhang

8.1 Methodisches Vorgehen

- ► Leitfadengestützte Experteninterviews
- Systematische Literaturrecherche basierend auf OpenAlex-Datensatz
- Metaanalyse der Entwicklungen in der Batterietypenforschung basierend auf OpenAlex-Datensatz

Leitfadengestütze Experteninterviews

▶ Die Interviews fanden als rund einstündige leitfadengestützte Gespräche per Videokonferenz im Zeitraum zwischen dem 26.06.2023 und dem 28.09.2023 statt.

Tabelle 8-1: Teilnehmer an Interviews

Organisation	Typ der Organisation Interviewpartner		
Fraunhofer IAO	Forschungsinstitut	Dr. Daniel Borrmann	
Fraunhofer ISI	Forschungsinstitut	Dr. Luis Alberto Tercero Espinoza	
Fraunhofer ISC und European	Forschungsinstitut	Dr. Andreas Bittner	
Lithium Institute			
Westfälische Hochschule für	Hochschule	Prof. Dr. Ralf Holzhauer	
Wirtschaft			
TU Bergakademie Freiberg	Hochschule	Prof. Dr. Urs Peuker	
NorthVolt	Unternehmen	Nicolas Steinbacher	
Universität zu Köln	Hochschule	Prof. Dr. Matthias Wickleder	
MEET	Forschungsinstitut	Prof. Dr. Martin Winter	
KIT	Forschungsinstitut	Prof. Dr. Maximilian Fichtner	

Quelle: eigene Zusammenstellung

Systematische Literaturrecherche

Ergänzend zu den leitfadengestützen Interviews wurde eine systematische Literaraturrecherche durchgeführt. Zur Identifizierung für die Forschungsfrage relevanter Fachartikel wurde als Startpunkt basierend auf einer API-Abfrage über OpenAlex ein Datensatz mit seit 2022 erschienen wissenschaftlichen Artikeln aus zehn ausgewählten, renommierten Fachjournal erstellt. OpenAlex ist ein im Januar 2022 gelaunchter, frei zugänglicher Open-Source-Katalog von wissenschaftlichen Artikeln und Zeittschiften. OpenAlex wird vom gemeinnützigen Unternehmen OurResearch entwickelt und verwaltet. In OpenAlex finden sich Informationen zu über 209 Millionen wissenschaftlichen Arbeiten, die über die REST-API abgerufen werden können (Priem et al. 2022).

Über die API wurden alle Artikel in OpenAlex abgefragt, die seit Januar 2022 in den folgenden zehn Fachzeitschriften veröffentlicht wurden:

- Journal of Power Sources (Elsevier)
- Advanced Energy Materials (Wiley)
- ► Energy & Environmental Science (Royal Society of Chemistry)
- Nano Energy (Elsevier)
- ACS Energy Letters (American Chemical Society)
- ▶ Journal of Materials Chemistry A (Royal Society of Chemistry)
- Advanced Materials (Wiley)
- ChemSusChem (Wiley)
- Electrochimica Acta (Elsevier)
- ▶ Journal of The Electrochemical Society (The Electrochemical Society)

Bei den zehn Fachzeitschriften handelt es sich renommierte (Peer-reviewed) Fachzeitschriften, die durch eine einen hohen Impact-Faktor charakterisiert sind und unter anderem Artikel zu den für die Forschungsfragen relevanten Themenkomplexen (insbesondere zu Substitutionsoptionen von Rohstoffen, Recyclingverfahren, Batterietechnologien) veröffentlichen.

Basierend auf API-Abfrage über OpenAlex wurde ein Datensatz erstellt mit N=19.377 Journal-Artikeln als Beobachtungen. Zu jedem Artikel finden sich im Datensatz verschiedene Informationen (z.B. Autoren, Titel, DOI, Zitationen) sowie der Abstract des Artikels.

Das Projektteam erstellte eine Liste für die Forschungsfragen relevanter Schlüsselbegriffe. Insgesamt umfasste die Liste 78 Begriffe aus den Themenkomplexen Batterie, Innovation, Kreislaufwirtschaft und Fahrzeugbau. Die Liste mit den Schlüsselbegriffen und der OpenAlex-Datensatz wurden in die Statistiksoftware R eingelesen. Für jeden, der im Datensatz enthaltenen 19.377 Journal-Artikel wurde eine Relevanz-Score gebildet. Der Relevanz-Score entspricht der Summe der Nennungen der Schlüsselbegriffe im Abstract. Im gesamten Datensatz war der Minimalwert des Relevanzscores 0, der Maximalwert lag bei 125³⁰.

Fürs manuelle Screening der Artikel war es das Ziel, 100 Artikeln mit den höchsten Relevanzscores aus dem Datensatz zu filtern. Da einige Artikel die gleichen Relevanzscores hatten (Rang 96 bis 146: jeweils 15 Punkte) wurden insgesamt 145 Artikel manuell durch das Forschungsteam gescreent. Dafür wurde der Abstract jedes TOP145-Artikels gelesen und kategorisert in relevant, unklar oder nicht relevant für die Forschungsfragen, sowie einem der vier Forschungsfelder (Substitutionoptionen, Recycling, Fahrzeugdesign, Abbau von Rohstoffen) zugeordnet.

Von den 145 Artikeln waren **71 relevant, 48 unklar und 26 nicht-relevant.** Diese Artikel und die darin wiederum referenzierten Artikel bildeten Ausgangspunkte für die weitere vertiefte Literaturrecherche.

Metaanalyse der Entwicklungen der Batterietypenforschung

Um die Entwicklung der Batterietypenforschung über einen längeren Zeitraum abzubilden, wurde über die OpenAlex-API eine Abfrage nach allen Artikeln durchgeführt, die im Titel, Abstract oder Volltext mindestens einen der folgenden Batterietypen enthalten:

³⁰ Die 125 sind darauf zurückzuführen, dass es sich bei diesem Artikel um ein Editorial Letter handelt, bei der Abtsract dem Vollext entspricht.

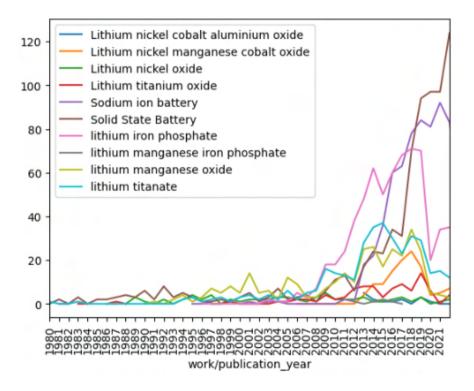
- Lithium-Mangan-Eisenphosphat
- Lithium-Manganoxid-Spinell
- Lithium-Nickeloxid
- Lithium-Titanoxid
- ► Lithium-Titanat
- ► Magnesium-Schwefel Batterie
- ► Natrium-Ionen-Batterie
- Lithium manganese iron phosphate
- Lithium manganese oxide
- Lithium nickel oxide
- Lithium titanium oxide

- Lithium titanate
- Lithium iron phosphate
- Magnesium sulphur battery
- Sodium ion battery
- Natrium-Ionen-Batterie
- ▶ Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxie
- ▶ Lithium nickel cobalt aluminium oxide
- Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxi
- Lithium nickel manganese cobalt oxide
- ► Lithium-Eisenphosphat
- ► Solid State Battery

Im Ergebnis bestätigte das Bild der in der Forschung dominierenden Batterietypen die weiteren Ergebnisse aus der Literatur und den Expertengesprächen hinsichtlich der für die Automobilwirtschaft wesentlich Zellchemien. Exemplarisch ist die Entwicklung der Nennung von Batterietypen in Publikationen mit Unternehmensbeteiligung in wissenschaftlichen Fachzeitschriften in Abbildung 8-1 dargestellt.

Abbildung 8-1: Nennung von Batterietypen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften

Veröffentlichungen mit Unternehmensbeteiligung, Anzahl



Quelle: eigene Darstellung.

8.2 Abbildungen, Tabellen und ergänzende Erläuterungen

Tabelle 8-2: Rohstoffe in Batterien: Vergleich unterschiedlicher Zellchemien

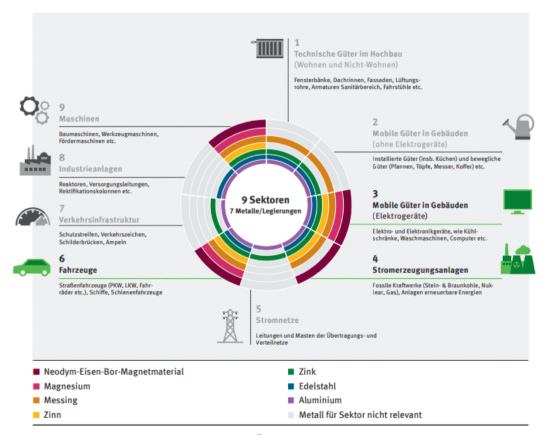
Metallinhalt je GWh Batteriekapazität in Tonnen.

	NMC 111	NMC 433	NMC 532	NMC 622	NMC 811	LFP	NCA 5
Lithium	120-150	117-140	121-140	104-130	96-110	84-100	95
Nickel	333-400	395-470	512-590	525-610	653-750	-	725
Mangan	312-370	278-350	191-350	164-200	76-90	-	-
Kobalt	333-400	298-350	205-230	176-190	82-90	-	65
Aluminium	-	-	-	-	-	-	11

Quelle: (DERA 2021); (IEA 2018); eigene Berechnungen.

Abbildung 8-2: Anthropogenes Metalllager in Deutschland

Quellen für metallische Rohstoffe



Quelle: Umweltbundesamt (2021); Darstellung des Ökoinstituts e.V.

Ergänzungen zu Kapitel 3.1.2 Energieverbrauch, THG-Emissionen und Abfallerzeugung der Recyclingverfahren

Durch die hohen Prozesstemperaturen ist das pyrometallurgische Verfahren durch einen sehr hohen Energieverbrauch charakterisiert (Dolotko et al. 2023b; Harper et al. 2019). Im Gegensatz dazu ist bei hydrometallurgischen Verfahren der Energieverbrauch während des Recyclingprozesses deutlich niedriger aufgrund der geringeren Prozesstemperaturen (Dolotko et al. 2023b; Xu et al. 2021). Allerdings wandelt sich das Bild beim Vergleich des kumulativen Energieverbrauch, d.h. wenn auch der Energieverbrauch berücksichtigt wird, der für die Herstellung der Chemikalien und andere Inputfaktoren notwendig ist: Hier erreichen pyrometallurgische Verfahren einen niedrigeren kumulierten Energieverbrauch als hydrometallurgische Verfahren (Xu et al. 2020; Xu et al. 2021).

Direktes Recycling ist im Gegensatz zu den metallurgischen Verfahren weder auf hohe Temperaturen noch auf viele Chemikalien angewiesen, die energieintensiv hergestellt werden. Folglich zeigen Studien, dass direktes Recycling den geringsten Energieverbrauch während des Recyclingvorgangs aufweist und auch der kumulierte Energieverbrauch deutlich niedriger ist als bei metallurgischen Recyclingverfahren (Xu et al. 2020; Xu et al. 2021; Gaines et al. 2021).

Xu et al. (2021) modellieren beispielsweise mithilfe des EverBatt-Modells, dass bei direktem Recycling von 1 kg LIB-Zellen lediglich 4,5 MJ Energie kumuliert verbraucht werden, was nur 15 Prozent des kumulierten Energieverbrauchs der Hydrometallurgie entspricht (30 MJ) und 28 Prozent des kumulierten Energieverbrauchs der Pyrometallurgie (16,2 MJ). In der Modellierung von Xu et al. (2021) wird nicht berücksichtigt, dass beim direkten Recycling die energieintensiven Weiterverarbeitungsschritte vermieden werden können, da Struktur und Eigenschaften der Elektroden intakt bleiben (Dolotko et al. 2023b). Das heißt die Ersparnis fällt sogar noch größer aus als in den EverBatt-Modellierungen.

Die Studie von Xu et al. (2021) untersucht auch die kumulierten THG-Emissionen der drei Recyclingverfahren. Die Analyse zeigt, dass direktes Recycling durch die geringsten THG-Emissionen (0,6 kg THG pro 1 kg LIB-Zellen) charakterisiert ist. Bei pyrometallurgischen Verfahren (2,16 kg THG pro 1 kg LIB-Zellen) entstehen Treibhausgase hauptsächlich bei der Verhüttung, während bei hydrometallurgischen Verfahren (2,27 kg pro 1 kg LIB-Zellen) die kumulierten THG-Emissionen hauptsächlich auf die vorgelagerte Herstellung von Chemikalien zurückzuführen ist. Die Modellierung von Xu et al. (2020) kommt zu ähnlichen Ergebnissen. Durch im Rahmen des Hochtemperaturverfahrens entstehende Abgase muss beim pyrometallurgischen Recycling eine Abgasreinigung durchgeführt werden. Beim hydrometallurgischen Verfahren stellt hingegen der Umgang mit dem durch die eingesetzten Chemikalien verunreinigten Abwasser eine Herausforderung dar, das aufbereitet und gereinigt werden muss (Neef et al. 2021). Abgasreinigungen und Abwasserreinigungen spielen beim direkten Recycling kaum eine Rolle, da hier auf Hochtemperaturprozesse und Chemikalieneinsatz verzichtet wird.

Ergänzungen zu Kapitel 3.1.2 Kosten, Erlös und Wirtschaftlichkeit der Recyclingverfahren

Bei Recycling von LFP-Batterien ist das pyrometallurgische Verfahren ist unter allen drei Recyclingtechnologien das teuerste Verfahren (Gaines et al. 2021; Harper et al. 2019; Kaya 2022; Xu et al. 2020).

▶ Die Studie von Xu et al. (2020) vergleicht beispielsweise die Kosten der drei Technologien für das Recycling von LFP-Batteriezellen. Laut der Modellierung kostet das pyrometallurgische Verfahren rund 3,40 US-Dollar pro kg gebrauchter LFP-Zellen, wobei dabei vor allem die hohen Fixkosten und Gemeinkosten der Anlage eine Rolle spielen. Als zweitteuerstes Verfahren folgt in der Studie die Hydrometallurgie (2,40 US-Dollar pro kg gebrauchter LFP-Zellen), wohingegen das direkte Recycling das kostengünstigste Verfahren mit rund 2,10 US-Dollar pro kg gebrauchter LFP-Zellen ist.



- ▶ Direkte Recyclingverfahren sind tendenziell durch geringere Anlagekosten charakterisiert als metallurgische Verfahren. Zudem sind beim direkten Recycling weniger Reagenzien und Lösungsmittel als bei der Hydrometallurgie erforderlich sind (Baum et al. 2022). Allerdings existieren auch Studien, die das hydrometallurgisches Verfahren und das direkte Recycling auf einer Kostenstufe einschätzen (Kaya 2022; Harper et al. 2019).
- ▶ Im Vergleich zu pyro- und hydrometallurgischen Verfahren ist der Erlös bei direktem Recycling deutlich höher, da mehr Material zurückgewonnen werden kann. Xu et al. (2020) schätzen beispielsweise den Erlös bei direktem Recycling auf 3,20 US-Dollar pro kg gebrauchter LFP-Zellen. Bei pyrometallurgischem Recycling liegt dieser bei 0,80 US-Dollar pro kg gebrauchter LFP-Zellen, bei hydrometallurgischem Recycling bei 1,00 US-Dollar pro kg gebrauchter LFP-Zellen (Xu et al. 2020).
- ➤ Xu et al. (2020) modellieren auf Basis des EverBatt-Modells beispielsweise, dass durch direktes Recycling ein Gewinn von rund 1,10 US-Dollar pro kg gebrauchter LFP-Zellen erzielt werden kann. Beim hydro- bzw. pyrometallurgischen Recycling würden gemäß der Modellierung hingegen Verluste in Höhe von rund 1,40 bzw. 2,60 US-Dollar pro kg gebrauchter LFP-Zellen realisiert werden.

