



STUDIE

Stoffkreisläufe für Antriebsbatterien

Rohstoffpotenziale des Batterierecyclings in der Automobilindustrie und Optionen zur Erfüllung der erweiterten Herstellerverantwortung in Europa



Stiftung
GRS Batterien



Öko-Institut
Consult GmbH

Impressum

Stoffkreisläufe für Antriebsbatterien

Rohstoffpotenziale des Batterierecyclings in der Automobilindustrie und Optionen zur Erfüllung der erweiterten Herstellerverantwortung in Europa

STUDIE

ERSTELLT VON

Öko-Institut Consult GmbH

Merzhauser Straße 173 | 179100 Freiburg

www.oeko.de

info@oeko.de

GEFÖRDERT VON

Die Studie wurde finanziert von der Stiftung GRS Batterien. Agora Verkehrswende hat in diesem Projekt die Rolle der unabhängigen wissenschaftlichen Begleitung eingenommen

Stiftung GRS Batterien

Gotenstraße 14 | 20097 Hamburg

www.stiftung-grs.de

info@stiftung-grs.de

PROJEKTLITUNG

Kerstin Meyer

Kerstin.meyer@agora-verkehrswende.de

Dr.-Ing. Nils Wieczorek

wieczorek@stiftung-grs.de

DANKSAGUNG

Im Rahmen des Projekts veranstaltete Agora Verkehrswende gemeinsam mit der Gemeinsamen Rücknahmesystem Servicegesellschaft mbH sowie der Stiftung GRS Batterien zwei Fachworkshops zu dieser Studie. Dort diskutierten wir zentrale Annahmen und erste Ergebnisse mit etwa 20 Fachleuten. Wir danken allen Teilnehmenden herzlich für ihre fachliche Expertise und die konstruktive Diskussion. Die Schlussfolgerungen und Ergebnisse dieser Veröffentlichung spiegeln jedoch nicht notwendigerweise die Meinungen der teilnehmenden Personen wider. Die Verantwortung für den Inhalt liegt ausschließlich bei Agora Verkehrswende.

DURCHFÜHRUNG

Autor:innen: Dr. Matthias Buchert, Dr. Edda Winter, Yifaat Baron, Dr. Johannes Klinge, Firyal Febrilia Rasyid, Dr. Nino Schön-Blume

Lektorat (Kapitel 4+5): Planet Neun

Titelbild: Batteriepulver (Schwarzmasse) aus Lithium-Ionen-Batterien in einem Recyclingwerk in Südkorea. Quelle: Bloomberg/Getty Images

Veröffentlichung: September 2025, Version: 1.2

131-2025-DE

Agora Verkehrswende

Agora Transport Transformation gGmbH

Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 | 10178 Berlin

www.agora-verkehrswende.de

info@agora-verkehrswende.de

Bitte zitieren als:

Agora Verkehrswende (2025): Stoffkreisläufe für Antriebsbatterien. *Rohstoffpotenziale des Batterierecyclings in der Automobilindustrie und Optionen zur Erfüllung der erweiterten Herstellerverantwortung in Europa*. Studie gefördert durch Stiftung GRS Batterien.

www.agora-verkehrswende.de

Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

die industrielle Transformation mit dem Ziel der Klimaneutralität ist in vollem Gange. Neue Technologien und Produkte bauen auf anderen Rohstoffen und Wertschöpfungsketten auf als bisher. In der Automobilindustrie geht es beispielsweise um Rohstoffe und Zwischenprodukte für die Produktion von Antriebsbatterien für Elektrofahrzeuge, also etwa Lithium, Kobalt, Nickel und Graphit. Der weltweite Wettbewerb um den Zugang zur Primärförderung dieser Rohstoffe nimmt seit Jahren zu. Umso wichtiger wird es, Sekundärrohstoffe aus dem Recycling gebrauchter Antriebsbatterien wiederzuverwerten.

Die EU hat bereits wichtige Initiativen gestartet, um die Lücken in der europäischen Rohstoffversorgung zu schließen. Von besonderer Bedeutung ist hierbei, den Aufbau einer europäischen Batterie- und Recyclingindustrie zu forcieren, etwa über Recyclingziele für in Europa auf den Markt gebrachte Batterien (Batterieregulierung), Ziele für die Versorgung mit kritischen Rohstoffen (*Critical Raw Materials Act*) und die Industriestrategie für den Automobilsektor. Deutschland ist dabei, sein nationales Batterierecht dementsprechend anzupassen. Dabei wird unter anderem die Rücknahme von Antriebsbatterien von Elektrofahrzeugen geregelt werden. Die bisherige Gesetzgebung ist nicht auf die Elektromobilität ausgerichtet. Sie erfasst vielfältige Produktgruppen – von der elektrischen Einwegzigarette bis zur Antriebsbatterie eines SUV.

Beim Recycling von Antriebsbatterien geht es um weit mehr als Abfall- und Umweltpolitik; es geht auch und vor allem um die strategische Rohstoffversorgung von Wirtschaft und Industrie. Denn die Antriebsbatterie ist das Herzstück der elektromobilen Wertschöpfung. Das Recycling der Batterierohstoffe stärkt die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Automobilindustrie, die Unabhängigkeit des europäischen Marktes und den Klimaschutz im Straßenverkehr. Deutschland kann im Bereich des Recyclings auf langjährigen Erfahrungen aufbauen. Mit dem Recycling von Antriebsbatterien im industriellen Maßstab besteht die Chance, eine neue, weltweit führende Hightech-Branche für Europa aufzubauen.

Vor dem Hintergrund dieser Entwicklungen haben wir in der vorliegenden Studie zusammen mit dem Öko-Institut und mit Förderung der Stiftung GRS Batterien

untersucht, wie sich die Wertschöpfungsketten und Stoffkreisläufe für Lithium-Ionen-Batterien im Automobilsektor wahrscheinlich entwickeln werden und wie verschiedene Geschäftsmodelle für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien in der EU aussehen könnten. Denn nach der 2023 verabschiedeten EU-Batterieverordnung sind Fahrzeughersteller als Inverkehrbringer von Antriebsbatterien juristisch verpflichtet, ihre Batterien zurückzunehmen und Recyclingquoten für Lithium, Kobalt und Nickel einzuhalten. Ab 2031 gelten auch Quoten für die Verwendung von recyceltem Material bei der Herstellung neuer Batterien. Um diese Pflichten zu erfüllen, können Fahrzeughersteller das Recycling entweder selbst organisieren, mitunter mit eigenen Recyclinganlagen, oder eine Organisation für Herstellerverantwortung damit beauftragen.

Die Herausforderungen sind erheblich. Die Investitionen erfordern einen langen Planungshorizont. Wenn 2040 ausreichende Mengen an in Europa recycelten Batteriematerialien zur Verfügung stehen sollen, müssen jetzt die Weichen dafür gestellt werden. Gleichzeitig wird der technologische Wandel, zum Beispiel bei der chemischen Zusammensetzung von Antriebsbatterien, immer wieder für neue Anforderungen sorgen. Um den Umgang mit diesen und weiteren Fragen zu klären, sollten der Dialog und die Zusammenarbeit unter den verschiedenen Akteuren weiter verstärkt werden.

Unsere Studie ist ein Anfang. Sie kann es erleichtern, die jetzt anstehenden Entscheidungen in Politik und Wirtschaft zum Recycling von Antriebsbatterien zu treffen und den Dialog über die noch offenen Fragen fortzusetzen. Wir freuen uns auf die weitere Debatte und wünschen eine anregende Lektüre.

Christian Hochfeld

für das Team von Agora Verkehrswende
Berlin, im September 2025

Ergebnisse und Empfehlungen

1

Das Recycling von Antriebsbatterien in der EU kann zu einem erheblichen Teil zur Deckung der strategischen Rohstoffversorgung der Automobilindustrie beitragen. In den nächsten zehn Jahren wird sich der Bedarf an Antriebsbatterien in der EU voraussichtlich versechsachen – auf dann konstant rund 1.200 Gigawattstunden pro Jahr. Aus den wachsenden Mengen an gebrauchten Antriebsbatterien lassen sich Wertstoffe für die Produktion von neuen Antriebsbatterien gewinnen. Mit einer effizienten Kreislaufführung ließe sich der Bedarf an Lithium bis 2040 bis zu 25 Prozent aus Recyclingmaterial decken, und der Bedarf an Nickel bis zu 50 Prozent. Bei Kobalt liegt das Sekundärrohstoffpotenzial sogar bei über 60 Prozent. Das Recycling von Antriebsbatterien ist damit nicht nur eine Aufgabe der Umwelt- und Kreislaufwirtschaftspolitik, sondern auch der Wirtschafts- und Industriepolitik.

2

Die Lücken in den Rohstoffkreisläufen für Lithium-Ionen-Batterien in der EU sind erheblich und müssen zeitnah geschlossen werden. Handlungsbedarf gibt es an vielen Stellen: bei der Rohstoffgewinnung, der Produktion von Kathoden- und Anodenmaterial, der Zellfertigung sowie beim Recycling von Schwarzmasse zur Rückgewinnung der Batteriematerialien und damit der Bereitstellung batterie-tauglicher Werkstoffe aus Europa. Der Bedarf an Schlüsselrohstoffen wird bis zum Jahr 2035 deutlich ansteigen. Gleichzeitig wird sich die Zusammensetzung von Antriebsbatterien verändern. Absehbar ist zum Beispiel ein Trend zu Lithium-Ionen-Batterien mit Lithium-Eisen-Phosphat als Kathodenmaterial. Diese kommen ohne Nickel und Kobalt aus.

3

Die EU begleitet im Rahmen der Umsetzung des Critical Raw Materials Act die Schließung der Stoffkreisläufe für Antriebsbatterien fortlaufend und steuert bei Bedarf nach. Dazu gehören robuste Maßnahmen zur Förderung der Recyclingwirtschaft innerhalb der EU entlang der ganzen Wertschöpfungskette sowie Maßnahmen, die den Abfluss von Zwischenprodukten wie Schwarzmasse oder zurückgewonnenen Rohstoffen in Nicht-EU-Länder unterbinden. Gleichzeitig gilt, dass die Marktteilnehmer ihre gesetzlichen Verpflichtungen nur schwer erfüllen können, wenn nicht genügend Kapazitäten für die Gewinnung und Verarbeitung von Recyclingmaterial in der EU vorhanden sind. Entsprechend sollte die EU die Stoffkreisläufe genau beobachten (Monitoring) und die Maßnahmen zeitlich staffeln.

4

Die EU strebt an, die Recyclingsysteme für Antriebsbatterien in der EU weiter zu harmonisieren, um Skaleneffekte zu ermöglichen und die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen. Im Rahmen der aktuellen Batterieverordnung sind verschiedene Geschäftsmodelle möglich. Die Fahrzeughersteller können die Rücknahme eigenverantwortlich gestalten oder eine Organisation für Herstellerverantwortung damit beauftragen. Der Rechtsrahmen ist von Mitgliedstaat zu Mitgliedstaat unterschiedlich. Alle Varianten für Recyclingsysteme sind in der Lage, ambitionierte Umwelt- und Sozialstandards zu gewährleisten, doch die größten Skaleneffekte lassen sich erzielen, wenn möglichst große Batteriemengen von verschiedenen Fahrzeugherstellern unter gleichen Rahmenbedingungen verarbeitet werden können.

5

Die EU, die Mitgliedstaaten, die Fahrzeughersteller und die Organisationen für Herstellerverantwortung arbeiten gemeinsam daran, weiterführende Herausforderungen zu lösen. Zu den drängenden Fragen für das Recycling von Antriebsbatterien in der EU gehören unter anderem: Wie realistisch ist es, alle in der EU produzierten Fahrzeuge bis zum Ende ihrer Nutzungsphase in der EU zu halten? Welches Potenzial steckt in grenzübergreifenden Kooperationen, eventuell auch mit außereuropäischen Märkten? Wie können Recyclingsysteme für Antriebsbatterien zukunftssicher gestaltet werden, wenn gleichzeitig der technologische Wandel, etwa im Bereich der Batteriechemie, die Geschäftsmodelle grundlegend verändert? Zur Klärung dieser Fragen ist ein intensiver Dialog entlang der gesamten Wertschöpfungskette notwendig.

Inhalt

Vorwort	3
Ergebnisse und Empfehlungen	4
Abkürzungsverzeichnis	6
1 Hintergrund und Projektziele	7
2 Allgemeine Übersicht des globalen Marktes für Lithium-Ionen-Batterien	9
2.1 Einführung zum globalen Kathodenmarkt	10
2.2 Einführung zum globalen Anodenmarkt	11
3 Wertschöpfungsketten von Lithium-Ionen-Batterien für den EU-Markt	13
3.1 Übersicht der Wertschöpfungskette für LIB aus Primärrohstoffen	13
3.2 Übersicht der Wertschöpfungskette für LIB aus Sekundärrohstoffen	20
3.3 Definition der Szenarien für Antriebsbatterien in der EU-27	28
3.4 Ergebnisse der Szenarien für Antriebsbatterien in der EU-27	31
3.5 Schlussfolgerungen der Analyse zu den Wertschöpfungsketten für den EU-Markt	38
4 Perspektiven für einen optimierten Lithium-Ionen-Batterie-Kreislauf in der EU	40
4.1 Recycling-Aktivitäten von Fahrzeugherstellern	41
4.2 Geschäftsmodelle für das Sammeln und das Recycling von LIB	43
4.3 Zusätzliche relevante Aspekte	53
5 Schlussfolgerungen	56
5.1 Marktübersicht und Wertschöpfungsketten	56
5.2 Kreislaufführung von LIB	56
5.3. Diskussion und weitergehende Betrachtungen	58
6 Literaturverzeichnis	60
Abbildungsverzeichnis	69
Tabellenverzeichnis	71
7 Anhang	72

Abkürzungsverzeichnis

AAM	Anodenaktivmaterial
Al	Aluminium
ATF	<i>Authorised treatment facility</i> (zugelassene Demontageanlage, Zerleger)
BESS	<i>Battery energy storage system</i> (Batteriebasierte Energiespeichersysteme)
BEV	<i>Battery electric vehicle</i> (batterieelektrisches Fahrzeug, vollelektrisch)
CRMA	<i>Critical Raw Materials Act</i> (EU-Verordnung zur Schaffung eines Rahmens zur Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen)
Co	Kobalt
CoSO₄	Kobaltsulfat
Cu	Kupfer
EC	Europäische Kommission
EoL-LIB	<i>End-of-Life</i> Lithium-Ionen-Batterie (Batterie, die in der ursprünglichen Anwendung ihr „Lebensende“ erreicht hat und ausgetauscht werden muss)
EPR	<i>Extended producer responsibility</i> (erweiterte Herstellerverantwortung im Rahmen der EU-Batterieverordnung)
EU-BattVO	EU-Batterieverordnung
EV	<i>Electric vehicle</i> (Elektrofahrzeug)
Fe	Eisen
FePO₄	Eisenphosphat
HEV	<i>Hybrid electric vehicle</i> (hybridelektrisches Fahrzeug, ohne Ladestecker)
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge (< 3,5 t)
LIB	Lithium-Ionen-Batterie
Li₂CO₃	Lithiumcarbonat
LiOH*H₂O	Lithiumhydroxid-Hydrat
LMO	Lithium-Mangan-Oxid
LTO	Lithium-Titan-Oxid
Mn	Mangan
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid
Ni	Nickel
NiSO₄	Nickelsulfat
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid
OEM	<i>Original equipment manufacturer</i> (Originalausrüstungshersteller, in dieser Studie im Sinne von Fahrzeughersteller) ¹
P	Phosphor
PHEV	<i>Plug-in hybrid electric vehicle</i> (hybridelektrisches Fahrzeug, mit Ladestecker)
PRO	<i>Producer responsibility organisation</i> (Organisation für Herstellerverantwortung)
SIB	<i>Sodium-ion battery</i> (Natrium-Ionen-Batterie)
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge (> 3,5 t)
SSB	<i>Solid-state battery</i> (Lithium-Festkörperbatterie)
SWOT	<i>Strengths, weaknesses, opportunities, threats</i> (Methode zur Analyse von Stärken, Schwächen, Chancen, Gefahren)
TWh	Terawattstunden

¹ Die Abkürzung OEM bezieht sich in der europäischen Regulierung (EU-Batterieverordnung) sowohl auf Hersteller von Antriebsbatterien als auch auf Fahrzeughersteller als Inverkehrbringer von Antriebsbatterien. In der Automobilindustrie wird OEM als Synonym für Fahrzeughersteller verwendet. Der Fokus in dieser Studie liegt auf der Rolle der Fahrzeughersteller. Deshalb bezieht sich die Abkürzung auch hier nur auf Fahrzeughersteller.

1 | Hintergrund und Projektziele

Der Markthochlauf der Elektromobilität in der Europäischen Union (EU) und weltweit führt zu weiterhin signifikant steigenden Rohstoffbedarfen sowie zu erheblichen Herausforderungen bei den global vernetzten Lieferketten für Lithium-Ionen-Batterien (LIB) [SKN 2023, BMWK 2023]. Für die europäischen Hersteller/Inverkehrbringer von Antriebsbatterien für Fahrzeuge stellt sich nicht zuletzt die Frage, wie sie in Zukunft im ausreichenden Maße Zugriff auf die notwendigen Mengen an relevanten Schlüsselrohstoffen und -komponenten erhalten, dabei ihre Wettbewerbsfähigkeit sichern und in diesem Zusammenhang die Stoffkreisläufe effizient schließen können. Die in den letzten Jahren zunehmenden geopolitischen beziehungsweise geoökonomischen Spannungen und deren Folgen (Handelshemmnisse wie Zölle, Ausfuhrbeschränkungen etc.) erfordern verstärkt strategische Aktivitäten der Fahrzeughhersteller als Inverkehrbringer von Antriebsbatterien ihre Wertschöpfungsketten dauerhaft und resilient aufzustellen. Weiterhin wichtig ist in diesem Zusammenhang nicht zuletzt auch die im Jahr 2023 neu verabschiedete EU-Batterieverordnung, die für neue Batterien zukünftig Rezyklateinsatzquoten für Schlüsselrohstoffe wie Lithium, Kobalt und Nickel vorschreibt [BatReg 2023].

Vor diesem Hintergrund hat die Stiftung GRS Batterien in Zusammenarbeit mit Agora Verkehrswende das Öko-Institut im Juli 2024 beauftragt, eine umfassende Studie zu erstellen. Die Studie bearbeitet folgende Themen:

- Eine Untersuchung der Entwicklung der Wertschöpfungsketten und Stoffkreisläufe für Antriebsbatterien von Elektrofahrzeugen, sowohl global als auch mit Fokus auf die EU.
- Die Herausforderung von europäischen Herstellern/Inverkehrbringern von Antriebsbatterien, im globalen Wettbewerb Stoffkreisläufe zu schließen und zu wettbewerbsfähigen Kosten Zugriff auf die Wertschöpfungskette von relevanten Batterierohstoffen zu erhalten.
- Eine Analyse der optionalen Geschäftsmodelle/ Systemstrukturen für Fahrzeughhersteller (*original equipment manufacturers, OEMs*) beziehungsweise Organisationen für Herstellerverantwortung (*producer responsibility organisations, PROs*) für die Sammlung und das Recycling von Antriebsbatterien und eine Bewertung dieser Modelle.

- Die Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für betroffene Hersteller und Verbände sowie für die Politik und die gesetzlichen Normengeber auf Basis der Untersuchungen.

In Kapitel 2 wird zunächst eine allgemeine Übersicht über den aktuellen globalen Batteriemarkt und absehbare Entwicklungen geboten. In Kapitel 3 folgt vertieft mit Fokus auf die EU eine Analyse der Wertschöpfungsketten für primäre und sekundäre Rohstoffe. Zur Unterstützung der Einschätzungen über die wahrscheinlichen Entwicklungen – nicht zuletzt bezüglich des Potenzials an Sekundärrohstoffen in der EU – hat das Öko-Institut aktuelle Szenarien zum Hochlauf der Elektromobilität in der EU aufgestellt und zu erwartende Effekte auf die Stoffströme berechnet. Hierbei ist zu beachten, dass sich die Wertschöpfungsketten von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) je nach verwendetem Kathodenmaterial unterscheiden. Batterien mit Lithium-Eisen-Phosphat-Kathoden (LFP-Kathoden) enthalten von den in diesem Projekt von Interesse eingestuften Rohstoffen lediglich Lithium und Graphit. Der Abbau und die Weiterverarbeitung der weiteren Kathodenbestandteile (Eisen und Phosphor) werden daher im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet. In Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid-Kathoden (NMC-Kathoden) sind unter anderem zusätzlich zu Lithium und Graphit die kritischen Rohstoffe Kobalt und Nickel enthalten, sodass deren Abbau und Weiterverarbeitung zu Materialien in Batteriequalität einen weiteren zu untersuchenden Bereich in der Wertschöpfungskette darstellt.

In Kapitel 4 werden die Perspektiven für einen optimierten LIB-Kreislauf in der EU anhand verschiedener Optionen für identifizierte mögliche Geschäftsmodelle zur Rücknahme von Antriebsbatterien aus dem Fahrzeugbereich in der EU im Detail erarbeitet. Hierzu zählt eine Stärken-Schwächen-Analyse der unterschiedlichen Geschäftsmodelle. In Kapitel 5 werden schließlich unter Berücksichtigung sämtlicher Projektbefunde strategische Handlungsoptionen und Empfehlungen für betroffene Hersteller und Verbände sowie für die Politik formuliert.

Das vom Öko-Institut durchgeführte und von der GRS beauftragte Projekt wurde von Agora Verkehrswende wissenschaftlich begleitet. Agora Verkehrswende fungierte hier unter anderem als Gastgeberin in Berlin für zwei physische Treffen des Begleitkreises zum Projekt.

Dieser Begleitkreis setzte sich aus ausgewählten Vertreter:innen von OEMs, Recyclingunternehmen, Nicht-regierungsorganisationen, Beratern/Consultants und Behörden zusammen. Thematische Schwerpunkte dieser Treffen mit dem Begleitkreis waren:

- Szenarien für den Personen- und Nutzfahrzeugsektor in der EU-27 bis 2040 (am 28. November 2024),
- Wertschöpfungsketten für LIB (primär und sekundär) sowie Systemstrukturen und Geschäftsmodelle zur optimieren Kreislaufführung von LIB (am 15. April 2025).

Der intensive inhaltliche Austausch mit den Begleitkreismitgliedern, der vor, während und im Nachgang der Treffen stattfand, war eine wichtige Komponente zur Diskussion vorläufiger Einschätzungen und Ergebnisse während der Projektlaufzeit und hat die Validität der Projektergebnisse maßgeblich unterstützt.

2 | Allgemeine Übersicht des globalen Marktes für Lithium-Ionen-Batterien

Die weltweite Nachfrage nach Batterien² steigt in den letzten Jahren beständig an. Während 2020 über alle Sektoren hinweg noch circa 0,3 Terawattstunden (TWh) an Batterien in den Markt gebracht wurden, waren es 2024 schon etwa 1,2 TWh. Die Prognose für 2030 über alle Sektoren hinweg lag Ende 2024 nach Benchmark Minerals bei 3,8 TWh und würde sich demnach mehr als verzehnfachen [Benchmark Minerals 2025d]. Eine andere Quelle geht global von 6,3 TWh an Batterieproduktionskapazität im Jahr 2030 aus [Renard 2024]. Diese Zahlen müssen sich aufgrund der teils sehr niedrigen Auslastung der Batteriefabriken jedoch nicht widersprechen.

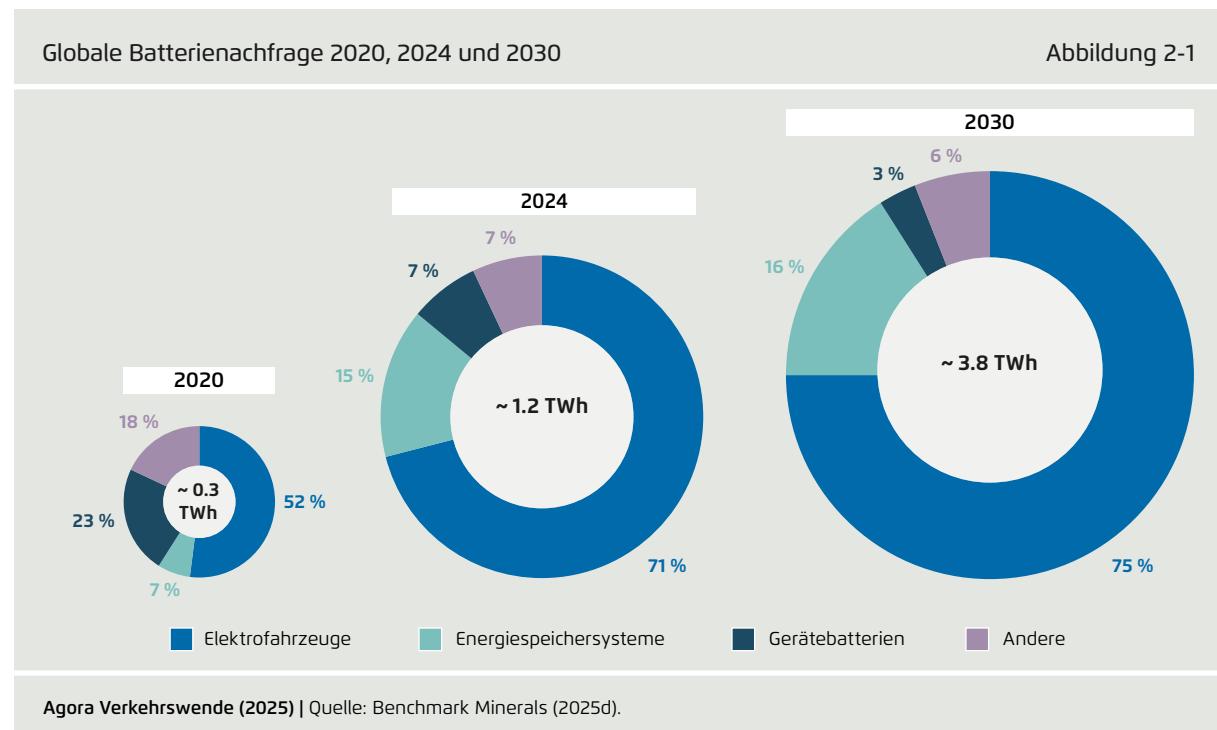
Der Batteriemarkt wird, was den Energieinhalt angeht, von elektrischen Fahrzeugen dominiert, wobei dieser Anteil noch ansteigt. Im Jahr 2020 noch bei über die Hälfte, lag der Bedarf der Fahrzeuge am Gesamtbatteriemarkt 2024 schon bei über 70 Prozent, wobei stationäre

Energiespeicher mit 15 Prozent im Jahr 2024 auf dem zweiten Platz lagen, gefolgt von portablen Geräten mit 7 Prozent (Handys, Laptops etc.).

Größter Produzent und gleichzeitig Abnehmer von Batterien ist die Volksrepublik China³, welche den Markt in den meisten Schritten der Wertschöpfungskette 2024 dominierte. Allein in den ersten beiden Monaten im Jahr 2025 wurden in China 1,4 Millionen elektrische Fahrzeuge (*battery electric vehicle, BEV*, und *plug-in hybrid electric vehicle, PHEV*) verkauft, womit es weit über die Hälfte des Weltmarkts (58 Prozent) darstellt. Im selben Zeitraum kommt Europa gerade einmal auf circa 0,5 Millionen verkaufte E-Fahrzeuge (21 Prozent) und Nordamerika auf circa 0,3 Millionen E-Fahrzeuge (13 Prozent) [Benchmark Minerals 2025e].

2 Wenn im weiteren Verlauf dieses Berichts der Begriff Batterien beziehungsweise Batteriemarkt verwendet wird, bezieht sich dies in erster Linie auf Lithium-Ionen-Batterien (LIB) – ebenfalls sind hiermit subsummiert Natrium-Ionen-Batterien (*sodium-ion batteries, SIB*) sowie Lithium-Festkörperbatterien (*solid-state batteries, SSB*).

3 Im weiteren Verlauf ist ausschließlich die Volksrepublik China gemeint, wenn von China die Rede ist.



2.1 Einführung zum globalen Kathodenmarkt

Der Trend zu nickel- und kobaltfreien Batterien beziehungsweise zu LFP (Lithium-Eisen-Phosphat) als Kathodenmaterial ist auf globaler Ebene deutlich stärker als auf dem deutschen oder dem europäischen Batteriemarkt. Während 2020 nur 13 Prozent des gesamten globalen Batteriemarkts LFP Zellen ausmachten, waren es 2024 schon schätzungsweise 49 Prozent. Dies ist vor allem an der Dominanz des Materials in China begründet, wo der Marktanteil 2024 bei etwa 70 Prozent lag, während im Rest der Welt nur 28 Prozent der Zellen eine LFP-Kathode enthielten. Außerhalb Chinas dominierte noch immer NMC (Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid) als Kathodenmaterial [Benchmark Minerals 2025f]. Eine andere Quelle geht davon aus, dass China im Jahr 2030 immer noch 66 Prozent der Batterieproduktionskapazität auf sich vereinen kann [Renard 2024].

Traditionell hat LFP im Fahrzeugmarkt aufgrund der höheren Anforderungen bezüglich Energiedichte einen niedrigeren Anteil im Vergleich zu NMC. Allerdings steigt er auch dort rasant an. Global lag der LFP-Anteil im Fahrzeugsektor 2020 noch bei circa 18 Prozent, 2024 hatte er schon circa 46 Prozent erreicht und ist damit ähnlich hoch wie der Gesamtmarktanteil.

Dies ist, neben dem steigenden Marktanteil Chinas, durch Innovationen in der Technologie und den (auch damit) niedrigeren Kosten für LFP gegenüber NMC begründet. Die Innovationen wurden vor allem auf Batteriepack-Ebene erreicht. LFP ermöglicht dort das Verbauen von größeren Batteriezellen mit weniger Kühlbedarf, welche die Energiedichte dieser Zellchemie für das Gesamtfahrzeug deutlich verbessern und näher an NMC heranbringen. Daher ist abzusehen, dass der LFP-Anteil zumindest kurz- und mittelfristig weiter steigen wird [Benchmark Minerals 2025f]. Vorteile der NMC-Technologie sind vor allem die höhere Energiedichte und die gute (praktische) Recyclingfähigkeit. Darüber hinaus gibt es neue Innovationen bei NMC mit mittlerem Nickelgehalt, die die Wettbewerbsfähigkeit bezüglich des Nachteils bei den Kosten gegenüber LFP etwas ausgleichen [Benchmark Minerals 2025a]. Dies und die bereits erzielte technologische Reife führen dazu, dass NMC mittelfristig nicht komplett vom Markt verschwinden wird.

Der absolute Bedarf an NMC-Kathodenmaterial 2024 war in China, Europa und Nordamerika jeweils sehr ähnlich (je zwischen 133 und 152 Megawattstunden (MWh)). Obwohl China die Nachfrage nach Kathodenmaterialien dominiert, ist der NMC-Anteil wie beschrieben deutlich kleiner, was zu diesem ähnlichen Bedarf an NMC führt [Benchmark Minerals 2025a].

Bezüglich der Herkunft des Kathodenmaterials ist China mit Abstand der größte Produzent über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg. Auch wenn Lithium selbst 2023 nur zu circa 17,5 Prozent in China gefördert wurde, erreicht China, was die Prozessierung zu Lithiumchemikalien angeht, 2024 einen geschätzten Marktanteil von circa 68 Prozent. Die Entwicklung geht zurzeit allerdings zu Gunsten der anderen Marktteilnehmer, sodass geschätzt wird, dass der Marktanteil Chinas bei der Lithiumprozessierung bis 2030 sinken wird, aber immer noch mehr als die Hälfte des Markts ausmachen wird [Benchmark Minerals 2025g].

Noch größer ist die Dominanz Chinas bezüglich der Kathodenmaterialien selbst. Im Jahr 2024 hat China in etwa 99 Prozent des weltweiten LFP-Aktivmaterials produziert. Auch hier wird prognostiziert, dass der Marktanteil in den nächsten Jahren leicht sinken wird, jedoch 2030 noch immer 97 Prozent betragen könnte [Benchmark Minerals 2025g]. Für das Kathodenmaterial NMC liegen die Kapazitäten ebenfalls zu 75 Prozent in China, wobei in diesem Fall die anderen asiatischen Staaten immerhin noch circa 23 Prozent der Kapazitäten auf sich vereinen. In der EU (Europäische Union) stehen zurzeit nur 1,5 Prozent der globalen NMC-Produktionskapazitäten. Den Prognosen folgend könnte sich dieser Anteil bis 2030 auf immerhin circa 10 Prozent erhöhen, während Chinas Anteil aufgrund des stark prognostizierten Wachstums immer noch bei knapp über 60 Prozent verbleibt. In Nordamerika ist ebenfalls noch mit einem starken Wachstum im Bereich der NMC-Produktion zu rechnen, sodass der Weltmarktanteil von unter 1 Prozent heute auf bis circa 10 Prozent anwachsen könnte [Benchmark Minerals 2025a].

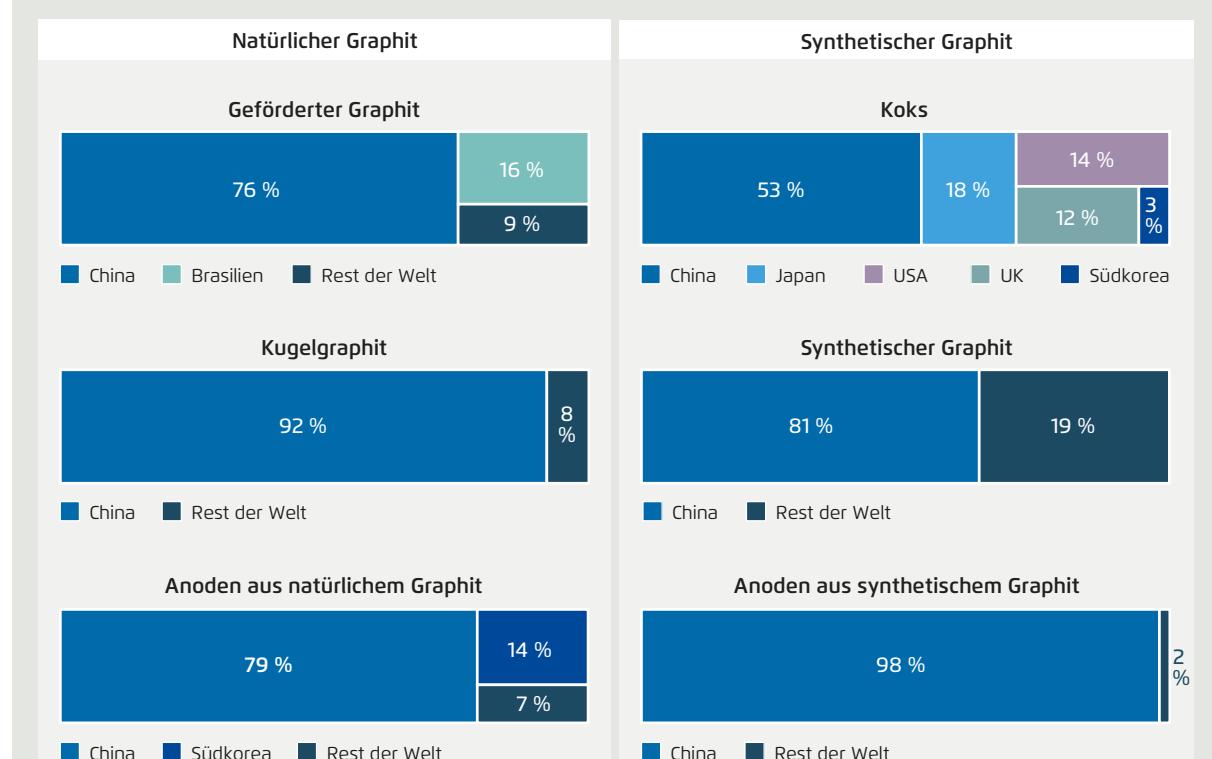
2.2 Einführung zum globalen Anodenmarkt

Der globale Anodenmarkt ist dominiert von Graphit, welches aufgrund des Preisniveaus und den elektrochemischen Eigenschaften, was vor allem die Langlebigkeit der damit betriebenen Zellen betrifft, noch immer das beste Angebot für Anoden darstellt. Als Alternativen zur reinen Graphitanode sind besonders Anoden zu nennen, die außer Graphit einen gewissen Silizium-Anteil enthalten, wobei hier zwischen einfachen Graphit-Silizium-Mischungen und Anoden, bei denen das Silizium in irgendeiner Form in den Graphit eingebettet ist, unterschieden werden kann. Besonders letztere sind noch in der Entwicklung. Allgemein erhöht Silizium den möglichen Energieinhalt der Anode deutlich, verringert jedoch auch die Lebensdauer. Preislich sind Zellen mit Anoden mit Siliziumanteil nach Einschätzung der interviewten

Expert:innen bisher meist über jenen nur aus Graphit und damit vor allem im Premiumsegment angesiedelt, wobei sich dies in Zukunft auch ändern könnte. Weitere Anodenmaterialien wie Lithium-Titan-Oxid (LTO), reines Silizium und Lithium-Metall spielen zurzeit (noch) eine sehr untergeordnete Rolle in Nischenprodukten beziehungsweise sind, abgesehen von LTO, noch in der Entwicklung.

In China werden Batterien zurzeit zu etwa 95 Prozent mit reinen Graphitanoden gebaut. Weltweit waren es 2024 im Fahrzeugsektor in etwa 85 Prozent, wobei den restlichen Anteil vor allem Graphit/Silizium-Mischungen ausmachen. LTO deckt nur etwa 1 Prozent des Fahrzeuggatteriemarktes ab. Aufgrund des starken prognostizierten Marktwachstums in China im Fahrzeugsektor könnte der Weltmarktanteil von Graphitanoden mit Siliziumanteil zumindest kurzfristig sinken. Mittel- bis langfristig

Vergleich der Wertschöpfungsketten von Anoden aus synthetischem und natürlichem Graphit Abbildung 2-2



Agora Verkehrswende (2025) | Quelle: Benchmark Minerals (2024d).

wird jedoch von einem steigenden Siliziumanteil in Graphitanoden ausgegangen [Benchmark Minerals 2025d]. Für die Produktion von Graphitanodenmaterial gibt es zwei Hauptrouten: natürlicher Graphit, gewonnen aus dem Bergbau, und synthetischer Graphit, produziert vor allem aus Steinkohlenkoks. Beide werden für Batterien in allen Sektoren eingesetzt und unterscheiden sich in ihren Eigenschaften nur geringfügig. Während natürlicher Graphit meist höhere Energiedichten mit sich bringt, zeichnet sich synthetischer Graphit häufig durch höhere Reinheit und damit einer höheren Lebensdauer aus [Giga Europe 25]. Im Jahr 2022 lag der Weltmarktanteil von synthetischem Graphit als Anodenmaterial bei etwa 58 Prozent, während natürlicher Graphit etwa 32 Prozent Marktanteil besaß (der Rest vor allem Graphit/Silizium-Mischungen) [Renard 2024]. Die Prognosen sehen synthetischen Graphit bezüglich Marktanteil weiterhin als am schnellsten wachsend, weshalb dieser noch Marktanteile hinzugewinnen könnte [Giga Europe 25, Renard 2024].

Bezüglich der Produktion von Graphit beziehungsweise den Anoden daraus dominiert China ebenfalls den Markt. Im Jahr 2024 kam China bezüglich des Vorprodukts aus natürlichem Graphit, der Graphitflocken, auf einen Anteil von circa 76 Prozent des Angebots. Dieser Anteil wird in den kommenden Jahren aufgrund des starken Wachstums in afrikanischen Ländern (Mosambik und Tansania) etwas zurückgehen. Das gleiche gilt für die Versorgung mit unbeschichtetem sphärischem Graphit (USPG), bei dem China 92 Prozent des Markts beherrscht. Dort wird ein noch stärkerer Rückgang des Anteils Chinas in den kommenden Jahren auf 86 Prozent prognostiziert, wobei auch ein signifikanter Teil der Produktionsanlagen außerhalb Chinas von chinesischen Unternehmen geführt wird [Giga Europe 25]. Synthetischer Graphit wird ebenfalls überwiegend in China produziert (> 80 Prozent in 2024). Der Nadelkoks, welcher als Rohstoff dafür dient, kommt nur etwa zur Hälfte aus China, beides allerdings mit steigenden Anteilen.

Die Anodenmaterialproduktion selbst ist fast vollständig in China lokalisiert. Südkorea hat bei Anoden aus natürlichem Graphit immerhin noch einen kleinen Marktanteil von etwas über 10 Prozent, China hat fast 80 Prozent. Bei der Anodenproduktion aus synthetischem Graphit verantwortet China über 95 Prozent des Marktes [Benchmark Minerals 2023]. Da die Preise für Anodenmaterial seit 2022 sehr stark gesunken sind und sich bis Anfang 2025 teils mehr als halbiert haben, fällt es anderen Akteuren rund um die Welt schwer, alternative Produktionslinien aufzubauen [Giga Europe 25].

3 | Wertschöpfungsketten von Lithium-Ionen-Batterien für den EU-Markt

3.1 Übersicht der Wertschöpfungskette für LIB aus Primärrohstoffen

Um der in Kapitel 2 diskutierten geopolitischen Abhängigkeit der Wertschöpfungskette von einigen wenigen Ländern, insbesondere von der Volksrepublik China, entgegenzuwirken, gibt es in jüngster Vergangenheit diverse Bestrebungen, die verschiedenen Schritte stärker auch in Europa beziehungsweise der EU (Europäische Union) selbst anzusiedeln. Insbesondere unter der zukünftig strengerem Verpflichtung von Inverkehrbringern von LIB (Lithium-Ionen-Batterie) durch die erweiterte Herstellerverantwortung (*extended producer responsibility*, EPR) im Rahmen der Batterieverordnung der EU [BatReg 2023] ist die Versorgung europäischer Hersteller mit Rohstoffen, Zwischenprodukten und Komponenten zu wettbewerbsfähigen Preisen enorm wichtig. Weiterhin soll ein De-Risking durch eine stärkere Diversifizierung von Lieferländern für Rohstoffe, Zwischenprodukte und Komponenten erreicht werden.

Ein wesentlicher Bestandteil dieser Bestrebungen ist beispielsweise der im Jahr 2024 verabschiedete Critical Raw Materials Act [CRMA 2024], der die Wiederverwendung und das Recycling strategischer Rohstoffe fördern soll, zudem aber auch die Ansiedlung der Primärroh-

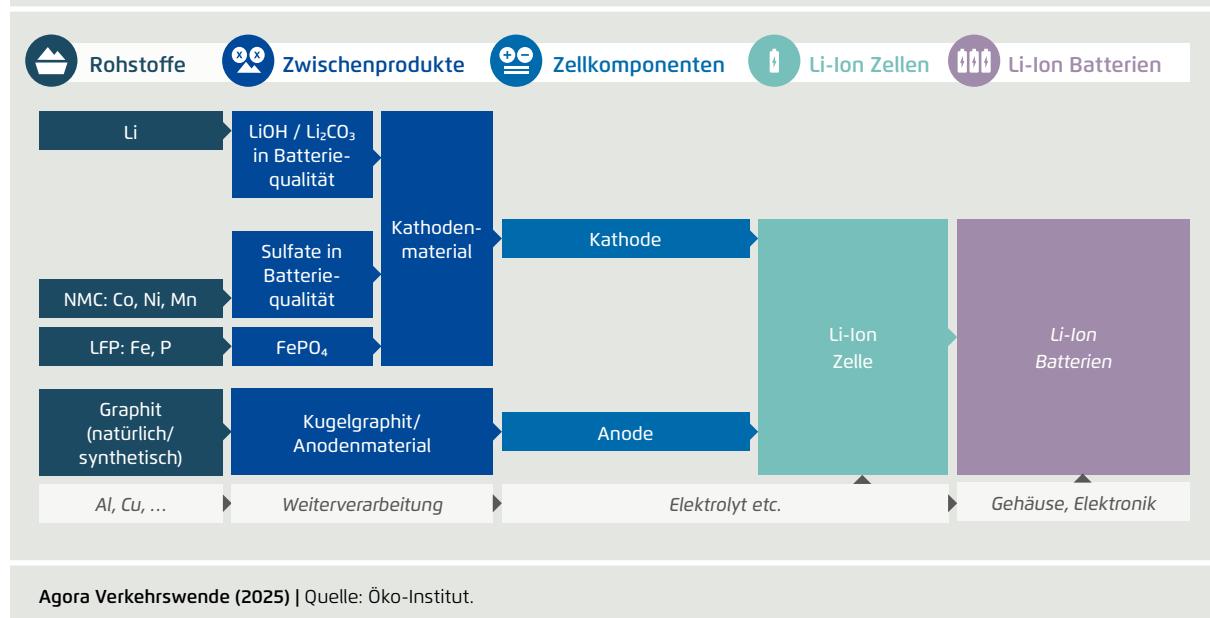
stoff-Wertschöpfungskette für Traktionsbatterien in der EU. Explizit beinhaltet dieser für die festgelegten strategischen Rohstoffe folgende Ziele:

- Vom jeweiligen jährlichen Rohstoffbedarf in der EU werden 10 Prozent innerhalb der EU gefördert sowie 25 Prozent durch Recycling in der EU produziert. 40 Prozent der Weiterverarbeitung wird in der EU durchgeführt.
- Maximal 65 Prozent eines strategischen Rohstoffs darf aus einem einzelnen nicht EU-Land bezogen werden. Dies gilt für alle Stufen der Wertschöpfungskette.
- Strategisch wichtige Projekte werden identifiziert und gefördert.
- Genehmigungen für europäische Projekte entlang der Wertschöpfungsketten werden einfacher und schneller zugänglich gemacht.

Die Entwicklungen im Aufbau der Wertschöpfungskette innerhalb der EU sollen im folgenden Abschnitt für die wichtigsten Schritte untersucht werden. In Abbildung 3-1 sind die verschiedenen Schritte der Wertschöpfungskette zur Herstellung einer LIB mit NMC (Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid)- beziehungsweise LFP (Lithium-Eisen-Phosphat)-Kathode aus Primär-

Wertschöpfungskette (stark vereinfacht) für LIB (NMC und LFP)

Abbildung 3-1



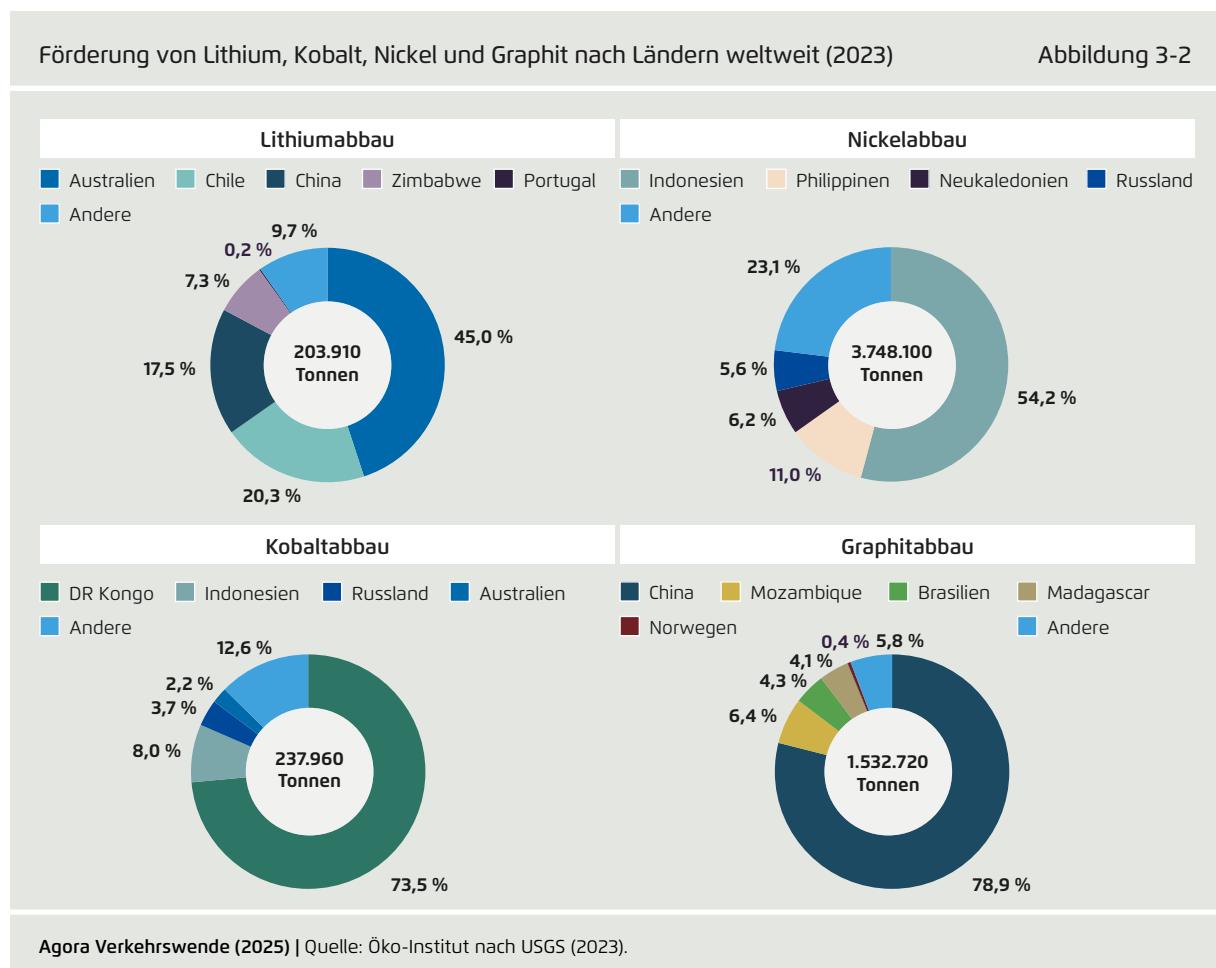
Agora Verkehrswende (2025) | Quelle: Öko-Institut.

materialien in vereinfachter Weise graphisch dargestellt. Nach dem Abbau der relevanten Rohstoffe Lithium, Graphit, Nickel und Kobalt werden diese jeweils zu den entsprechend benötigten Verbindungen in Batteriequalität weiterverarbeitet. In den nächsten Schritten werden Anoden und Kathoden separat gefertigt und daraus anschließend mit weiteren Komponenten Li-Ionen-Zellen hergestellt. Der anschließend finale Arbeitsschritt umfasst den Zusammenbau der Batterie aus mehreren Li-Ionen-Zellen sowie Peripheriekomponenten wie Gehäuse und Elektronik. Die als besonders kritisch betrachteten Schritte sind jeweils hervorgehoben und sollen hier diskutiert werden, die kursiv dargestellten Felder sind nicht Teil der vertieften Betrachtung. Diese gliedert sich demnach in den Abbau und die Weiterverarbeitung der relevanten Rohstoffe zu den jeweiligen Zwischenprodukten, die Produktion von Anode und Kathode sowie die Zelfertigung. Da die Produktion von

LIB ein sehr agiles und dynamisches Feld ist, in dem permanent in kurzen Zeitabständen neue Projekte angekündigt, geplant und auch abgesagt werden, sind die in diesem Kapitel genannten Zahlen zu geplanten Kapazitäten eine Momentaufnahme, die sich unter Umständen in wenigen Monaten wieder etwas ändern können. Die folgende Diskussion bezieht Ankündigungen und Informationen ein, die bis Ende April 2025 bekannt gemacht wurden.

3.1.1 Rohstoffabbau und -weiterverarbeitung

Die geographische Verteilung des Abbaus der wichtigsten Rohstoffe für LIB ist in Abbildung 3-2 dargestellt. Es zeigt sich in allen Fällen eine unterschiedlich stark ausgeprägte Abhängigkeit von einigen wenigen Ländern oder sogar nur einem Land. Um dem entgegenzuwirken, werden zunehmend natürliche Vorkommen innerhalb der EU zur Vorbereitung ihrer möglichen späteren



Erschließung untersucht. Zum momentanen Zeitpunkt werden zwar innereuropäisch bislang nur vereinzelt überschaubare Rohstoffmengen gefördert, es befinden sich allerdings eine Reihe von Projekten zur Förderung der verschiedenen strategischen Rohstoffe in der Planungsphase oder darüber hinaus. Die wenigen Länder in Europa, in denen bereits jetzt kleine Mengen der relevanten Rohstoffe gefördert werden, sind in den Grafiken jeweils gesondert aufgeführt.

Lithiumgewinnung in der EU

Für Lithium ist in den Daten der US Geological Survey bereits die Förderung einer sehr geringen Menge in Portugal vermerkt – allerdings werden diese Lithiumerze nicht für Batteriematerialien weiter prozessiert. Die vermutlich für die EU am weitesten vorangeschrittenen geplanten Minenprojekte sind das Barroso-Projekt in Portugal der Firma Savannah Resources mit Hauptsitz im Vereinigten Königreich [Savannah Resources 2024] sowie das Keliber-Projekt (Sibanye-Stillwater/Keliber Oy) [Keliber 2025] in Finnland, in dem ab Sommer 2025 die Produktion hochgefahren werden soll. Tabelle 3-1 enthält eine Übersicht der weiter fortgeschrittenen Projekte zur Förderung von Lithium für Batteriematerialien sowie deren voraussichtliche Kapazität. Bei vollem angekündigten Hochlauf könnten diese in Kombination eine Förderung von knapp 30 Kilotonnen Li pro Jahr in Europa erreichen.

Alle vier in der Tabelle aufgeführten Projekte haben zudem kürzlich von der EU die Einstufung als strategi-

sches Projekt im Sinne des Critical Raw Materials Act erhalten [CRMA 2025]. Diese Einstufung von Projekten soll den Vorhaben zum einen jeweils deutlich schnellere Genehmigungsverfahren garantieren. Zum anderen bietet die europäische Kommission mit ihren dafür kompetenten Institutionen den Betreibern der Vorhaben Unterstützung bei der Aufstellung und Finalisierung der Finanzierungspläne an. Darüber hinaus sind von der Europäischen Kommission noch fünf weitere Projekte zur Lithiumförderung in Frankreich, Tschechien, Spanien (zwei Projekte) und Portugal als strategische Projekte im Sinne des CRMA eingestuft worden. Diese Projekte befinden sich augenscheinlich noch in einer früheren Phase. Für alle nach dem CRMA eingestuften Projekte gilt, dass sie bis zum Zieljahr 2030 bereits industriell umgesetzt sein müssen, das heißt, dass sie Lithium aus natürlichen Lagerstätten tatsächlich fördern.

Weiterverarbeitung zu Lithiumhydroxid-Hydrat

Als Zwischenprodukt für die Kathodenherstellung wird das gewonnene Lithium im nächsten Schritt der Wertschöpfungskette zu Lithiumhydroxid-Hydrat ($\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$) in Batteriequalität weiterverarbeitet. Auch dieser Schritt wird in Europa vorangetrieben. In Deutschland befindet sich die im Herbst 2024 eingeweihte Anlage von AMG Lithium in Bitterfeld aktuell in der Hochlaufphase [AMG Lithium 2025]. Diese wird zunächst mit außereuropäisch (in Brasilien) gefördertem und in der VR China zu Lithiumhydroxid-Hydrat in technischer Qualität prozessierten Material gespeist.

Am weitesten vorangeschrittene Projekte zur Förderung von Lithium in der EU

Tabelle 3-1

Standort	Unternehmens-hauptsitz	Projekt	Unternehmen	Prognose Produktionspotential [t Li/a]*
PT	UK	Barroso Project ^[1]	Savannah Resources	4.700
FI	FI	Keliber Project ^[2]	Sibanye-Stillwater/Keliber Oy	4.400
DE	DE	Zero Carbon Lithium Project ^[3]	Vulcan Energie Ressourcen GmbH	7.000
FR	FR ^d	EMILI Project ^[4]	Imerys	10.100

* Die Mengenangaben erfolgen stets in Lithiumgehalt in Tonnen. Der Lithiumgehalt verschiedener im Lithiumabbau anfallender Verbindungen ist in Anhang 7.1 aufgeführt.

Quellen: [1] [Savannah Resources 2024], [2] [Keliber 2025], [3] [Vulcan Energy 2025], [4] [Imerys 2025a].

In Bitterfeld erfolgt die Veredelung zu Lithiumhydroxid-Hydrat ($\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$) in Batteriequalität. Die Anlage in Bitterfeld ist somit die erste sogenannte Lithiumraffinerie in Europa. Mittelfristig soll der Zwischenschritt in China an der Lagerstätte in Brasilien direkt durchgeführt werden. Zudem soll auch eine Ergänzung des Materialinputs für Bitterfeld durch geeignete Lithiumverbindungen aus dem Recycling möglich werden.

Vulcan Energy betreibt ebenfalls in Deutschland eine Pilotanlage in Frankfurt am Main, in der das über Tiefengeothermie im Oberrheingraben gewonnene Lithiumchlorid in kleinem Maßstab zu Lithiumhydroxid-Hydrat ($\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$) in Batteriequalität umgesetzt wird [Vulcan Energy 2025]. Das Unternehmen plant in den nächsten 2-3 Jahren sowohl die Lithiumgewinnung als auch die Umsetzung zum Endprodukt zu Lithiumhydroxid-Hydrat ($\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$) in Batteriequalität in Deutschland in einer ersten industriellen Stufe mit einem Produktionsvolumen von 24.000 Tonnen $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ zu realisieren. Auch in Keliber sowie im Projekt EMILI planen die Betreiber jeweils eine angeschlossene Raffinerie [Imerys 2025a, Keliber 2025]. Zusätzlich zu diesen bereits konkret angegangenen Projekten gibt es zahlreiche weitere Absichtserklärungen, wie beispielsweise die des Joint Ventures NewCo der beiden Firmen RockTech Lithium und Arcore für eine Anlage in Guben (D). In Summe wäre es mit den angekündigten Kapazitäten möglich, die zukünftig in der EU geplanten Fördermen gen auch dort weiterzuverarbeiten.

Kobalt-, Nickel- und Graphitgewinnung und -verarbeitung in der EU

Obwohl dies in Abbildung 3-2 aufgrund der kleinen Mengen nicht ersichtlich ist, wird in Finnland und Norwegen Nickel abgebaut [Boliden 2025a, Terrafame 2025, Glencore 2025a]. Das European Joint Research Center gibt dabei die Produktion innerhalb der EU im Jahr 2022 mit 1,5 Prozent der weltweiten geförderten Menge an [JRC 2022]. Hier ist jedoch auch die Produktion der griechischen Firma Larco mit einbezogen, die in den letzten Jahren große wirtschaftliche Probleme hatte [Labournet 2024], und bei der nicht abschließend festgestellt werden konnte, ob die Produktion aktuell noch läuft. Zusätzlich gibt es einige wenige Ankündigungen von weiteren Projekten zur Förderung von Nickel, die sich jedoch alle noch im Anfangsstadium befinden. Es ist dabei zu erwähnen, dass, im Gegensatz zu Lithium, Kobalt und Graphit, bei

denen der Bedarf für Elektrofahrzeugbatterien jeweils 30 bis 40 Prozent des Marktes ausmacht, bisher nur circa 10 Prozent der weltweiten Nickelförderung für Antriebsbatterien benötigt werden [NOW 2024]. Laut Schätzungen von Benchmark Minerals wird sich dieser Anteil aufgrund des Hochlaufs der Elektromobilität jedoch in den nächsten Jahren erhöhen und 2040 bis auf knapp 40 Prozent ansteigen [Benchmark Minerals 2025a].

Für die Weiterverarbeitung von Nickel in Europa sollen ebenfalls, unter anderem von Umicore sowie dem russischen Unternehmen Nornickel in Finnland, gerade weitere Kapazitäten aufgebaut werden. Hier kann allerdings noch nicht über nennenswerte Mengen gesprochen werden [Umicore 2025a, Nornickel 2025]. Es ist zudem unwahrscheinlich, dass ein russisches Unternehmen als Beitrag zur Stärkung der Rohstoffresilienz der EU verstanden werden wird.

Kobalt wird zurzeit in Europa hauptsächlich als Nebenprodukt in Kupfer- oder Nickelminen gefördert [Boliden 2025b, Glencore 2025b]. Zudem plant das in Großbritannien ansässige Unternehmen AngloAmerican eine Mine in Sakatti (Fn), in der ebenfalls eine Reihe von Metallen einschließlich Nickel und Kobalt gefördert werden sollen [AngloAmerican 2025]. Die einzige größere Anlage zur Kobaltraffinerie in Europa betreibt Umicore in Kokkola (Fn) [Umicore 2025b].

Auch Graphit wird, in geringen Mengen, bereits an einzelnen Stellen in Europa abgebaut. Das einzige Projekt welches speziell auf den Graphitabbau für Anodenaktivmaterial abzielt, ist jedoch die erst im Anlauf befindliche „Skaland Graphite Operation“ der Firma Mineral Commodities in Skaland (NW) [Mineral Commodities 2025]. Auch die Ankündigungen für geplante Projekte beschränken sich hier bislang auf einige wenige in Skandinavien. Am weitesten vorangeschritten ist dabei das Vorhaben des australischen Unternehmens Talga Resources in Vittangi (SE) [Talga Resources 2024].

Aktuell sind von der Europäischen Kommission insgesamt fünf Projekte zur Rohstoffgewinnung von Kobalt, Nickel und Graphit als strategisch eingestuft – zwei Projekte (in Schweden und Rumänien) zielen auf Graphit und drei Projekte auf Nickel und Kobalt [CRMA 2025] ab. In der Weiterverarbeitung hat die Europäische Kommission bei Graphit vier Projekte als strategisch eingestuft –

zwei weitere Projekte für Kobalt und Nickel. Insgesamt bestehen allerdings sowohl für die Rohstoffgewinnung als auch die Verarbeitung von Kobalt, Nickel und Graphit in der EU noch erhebliche Lücken, um die nach dem Critical Raw Materials Act geforderten Ziele bis zum Jahr 2030 zu erreichen.

3.1.2 Kathoden- und Anodenmaterialproduktion

Die Weiterverarbeitung von natürlichem Graphit zu Anodenaktivmaterial (AAM) ist bislang an die Förderung vor Ort gekoppelt. In den Anlagen von Mineral Commodities in Norwegen und von Talga Resources in Schweden soll jeweils direkt Anodenaktivmaterial hergestellt werden [BFZ 2024]. Hinzu kommt die Produktion von Anodenaktivmaterial aus synthetischem Graphit. Hier ist die Ansiedlung in der EU schon etwas weiter vorangeschritten und es gibt bereits einige wenige in Betrieb genommene Anlagen: Die deutsche Firma SGL Carbon produzierte an zwei Standorten in Polen Anodenaktivmaterial [SGL Carbon 2025], hat sich jedoch im Laufe des Jahres 2024 aus der Batterieentwicklung zurückgezogen, so dass hier unklar ist, inwieweit diese Produktion fortgesetzt wird. In Frankreich produziert das japanische Unternehmen Tokai COBEX [Tokai COBEX 2024] Anodenmaterial. Zudem gibt es Produktionsstätten der Firma Vianode in Norwegen [Vianode 2025] sowie Imerys in der Schweiz [Imerys 2025b]. Weitere Ankündigungen von Kapazitäten zur Anodenmaterialproduktion gibt es hauptsächlich für den skandinavischen Raum [BFZ 2024].

In der Produktion von Kathodenmaterial konnte China in den letzten Jahren seine Vormachtstellung immer weiter ausbauen. Vom weltweit produzierten Kathodenaktivmaterial kommen für NMC circa 75 Prozent aus China, während es für LFP sogar 99 Prozent sind [Benchmark Minerals 2025g]. Hier wurde zwar bereits Anfang der 2020er Jahre, und damit etwas früher als entlang der restlichen Wertschöpfungskette, damit begonnen, Kapazitäten in der EU zu planen, in Betrieb genommen sind jedoch bislang nur wenige Anlagen. NMC-Kathoden werden momentan von der BASF in Schwarzeide (DE) [BASF 2023] sowie von Umicore in Nysa (PL) produziert [Umicore 2022a]. Beide Anlagen befinden sich noch im Hochlauf zum vollen Kapazitätsausbau und sollen dann kombiniert eine Produktionskapazität von circa 60 Gigawattstunden pro Jahr (GWh/a) haben. Umicore plant zusätzlich mit Ionway, einem Joint Venture mit VW's PowerCo eine weitere Fabrik in Nysa, die nochmals 160 GWh/a Kapazität im End-

stadium beitragen soll [BZF 2024b]. Drei Anlagen befinden sich außerdem im Bau: das südkoreanische Unternehmen EcoPro baut in Debrecen (HU) [EcoPro 2025] und die chinesische Firma Huayou Cobalt und Orano XTC in Acs (HU) beziehungsweise Dunquerque (FR) [BZF 2024b]. Diese Projekte bedeuten in Summe in voller Ausbaustufe nochmals über 200 GWh/a Produktionskapazität innerhalb der EU, allerdings im Besitz von asiatischen Akteuren. Immerhin gab im März 2025 das Unternehmen Finnish Minerals zusätzlich den Baustart einer gemeinsam mit dem chinesischen Partner Beijing Easpring geplanten Kathodenmaterialfabrik mit einer angestrebten Kapazität von circa 10 GWh bekannt [electrive 2025].

Darüber hinaus gibt es wenige weitere Absichtserklärungen. Diese sind zudem im Moment meist kritisch zu sehen, da im Zuge des Vormarschs von LFP-Batterien in der Vergangenheit einige bereits angekündigte Projekte zur NMC-Kathodenproduktion wieder auf Eis gelegt oder eingestellt wurden, um die Planung an die veränderte Nachfragesituation anzupassen. Die Produktion von LFP-Kathoden in Europa wird trotzdem weiter nur schleppend hochgefahren, momentan produziert lediglich IBU-tec in Weimar (DE) kleinere Mengen (2 GWh/a) an LFP-Kathoden [BZF 2024b]. Als wichtigste geplante Projekte gelten die der Unternehmen Phi4Tech in Badajoz (ES) [Phi4Tech 2025] und Freyr in Vaasa (FN). Auch hier sind zusätzlich chinesische Akteure, wie zum Beispiel Hunan Yuneng in der EU aktiv [Hunan Yuneng 2024]. Letztere planen in Spanien eine LFP-Fabrik für 50.000 t/a LFP-Material der IV. Generation zu bauen, die 2027 mit der Produktion starten soll. Diese könnte jedoch aufgrund von neuen Exportauflagen von Seiten Chinas scheitern [Benchmark Minerals 2025c].

3.1.3 Zellfertigung

Obwohl sich auch bei der Zellfertigung bemerkbar macht, dass geplante Projekte eingestellt werden, um dem Trend hin zu LFP-Kathoden Rechnung zu tragen, gibt es in der Zellfertigung in der EU bereits wesentlich mehr operierende Anlagen als in den vorhergegangenen Stufen der Wertschöpfungskette. Hier ist jedoch ebenfalls der Anteil von außereuropäischen Akteuren sehr hoch. Tabelle 3-2 enthält die Zusammenfassung der wichtigsten Projekte innerhalb der EU, ihrem Status sowie der geplanten Produktionskapazität. Neben verschiedenen kleinen Unternehmen, die Nischenmärkte bedienen sowie Pilotlinien mit sehr kleiner Produktionskapazität, die in der Tabelle

außenvorgelassen wurden, sind als die wichtigsten Anlagen in europäischer Hand die der schwedischen Firma Northvolt in Skelleftea (SW) und des Stellantis/Mercedes-Benz/Total Energies-Joint-Ventures ACC zu nennen [Northvolt 2025a, ACC 2025a]. Seit März 2025 befindet sich Northvolt in Schweden jedoch in einem laufenden Insolvenzverfahren [Northvolt 2025b]. Die Zukunft der Fabrik ist momentan demnach nicht absehbar. Im August 2025 wurden vom US-Unternehmen Lyten Übernahmepläne für die Northvolt-Anlagen in Schweden und in Deutschland (im Bau) bekannt. Unklar ist noch, ob Lyten in Europa zukünftig Lithium-Schwefel-Zellen statt NMC-Zellen produzieren will [Lyten 2025]. Sämtliche

weitere bereits produzierende Gigafactories in der EU werden von chinesischen oder südkoreanischen Firmen betrieben [BZF 2024a].

Für die Zellproduktion sieht die Prognose für die EU als Fertigungsstandort etwas besser aus als für die vorhergehenden Schritte der Wertschöpfungskette: Obwohl eine exakte Vorhersage aufgrund von sich ständig verändernden Ankündigungen schwierig ist, wird derzeit davon ausgegangen, dass die Produktionskapazität innerhalb der EU 2030 im Vergleich mit dem Jahr 2020 um das 80-fache steigen könnte [Battery Atlas 2024]. Abbildung 3-3 zeigt dabei die Anteile der entsprechend

Wichtigste Projekte zum Bau von Zellfabriken in der EU

Tabelle 3-2

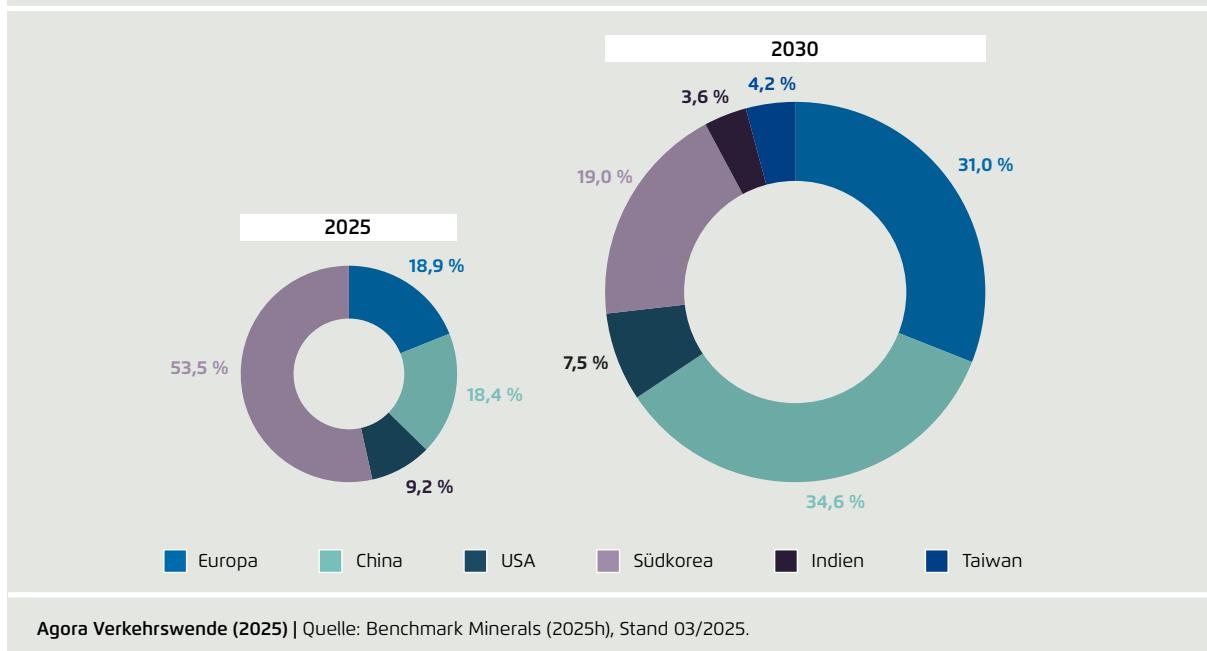
Standort	Unternehmens-hauptsitz	Projekt	Unternehmen	Status	Prognose Produktionspotential/a
FR	FR	Billy Berclau/ Douvrin	ACC	Betrieb	13 GWh, bis 2030 40 GWh geplant ^[1]
DE	CN	Arnstadt	CATL	Betrieb	2024 14 GWh ^[2]
PL	KR	Wroclaw	LG ES	Betrieb	aktuell 86 GWh ^[3]
HU	KR	Göd	Samsung SDI	Betrieb	40 GWh ^[4]
HU	KR	Komarom	SK Innovation	Betrieb	Aktuell ca. 17 GWh, bis zu ca. 30 GWh ^[5]
HU	KR	Ivánca	SK Innovation	Hochlauf	30 GWh ^[5]
DE	DE	Salzgitter	PowerCo	im Bau	20 GWh ^[6]
DE	SE	Heide	Northvolt	im Bau (fraglich)	60 GWh ^[7]
ES	DE	Valencia	PowerCo	im Bau	40–60 GWh ^[8]
FR	FR	Dunkerque	Verkor	im Bau	20 GWh ^[9]
HU	CN	Debrecen	EVE Energy	im Bau	28 GWh ^[10]
ES	CN	Navalmoral de la Mata	AESC	im Bau	50 GWh ^[11]
ES	NL/CN	Saragossa	Stellantis/CATL	im Bau	Bis 50 GWh ^[12]
HU	CN	Debrecen	CATL	im Bau	100 GWh ^[5]
SE	SE	Skelleftea	Northvolt	fraglich	aktuell 16 GWh, Ausbaupläne für bis zu 60 GWh zurückgestellt ^[13]
SE	SE	Gothenburg	Northvolt/Volvo	fraglich	bis zu 50 GWh ^[14]
FR	JP	Duoai	AESC	in Planung	24–30 GWh ^[15]

Quellen: [1] [ACC 2025a], [2] [TÜV NORD GROUP 2023], [3] [LG Energy Solution 2025], [4] [Samsung E&A 2025], [5] [Sustainable Bus 2024], [6] [PowerCo 2023] [7] [Northvolt 2024] [8] [Volkswagen AG 2023], [9] [Werwitzke 2023], [10] [EVE Germany GmbH 2023], [11] [AESC 2024], [12] [Werwitzke 2024a], [13] [Northvolt 2025a], [14] [NOVO Energy AB 2024], [15] [Randall 2023a].

Agora Verkehrswende (2025) | Quelle: Zusammenstellung Öko-Institut.

Herkunft der Unternehmen, die Zellproduktionsstätten für LIB in Europa planen

Abbildung 3-3



dahinterstehenden Unternehmen nach Kontinenten. Im Gegensatz zu den bereits operablen Anlagen, bei denen europäische Firmen 2024 lediglich circa 15 Prozent der Gesamtkapazität ausmachten [BZF 2024], liegt deren Anteil an den angekündigten Kapazitäten deutlich höher. Allerdings müssen diese Prognosen zu angekündigten Kapazitäten und bzgl. europäischer Anteile mit großer Vorsicht gewertet werden – wie nicht zuletzt die Northvolt-Insolvenz gezeigt hat.

Im ersten Quartal 2025 zeigt sich jedoch bereits an verschiedenen Stellen, dass die vor allem im Jahr 2024 schwachen Absatzzahlen für Elektroautos in Europa für viele Zell-Hersteller eine Herausforderung darstellen. Die Insolvenz Northvolts und damit ungewisse Zukunft deren Zellfabriken führte dazu, dass entgegen der 2024 veröffentlichten Zahlen [Battery Atlas 2024], laut denen europäische Unternehmen 2030 einen höheren Marktanteil innehaben könnten als asiatische, der größte Marktanteil bis 2030 höchstwahrscheinlich weiter asiatischen Unternehmen (vor allem aus Südkorea und China) gehören wird. Neben Northvolt gab beispielsweise auch ACC bekannt, dass das Unternehmen ohne finanzielle Unterstützung von Seiten der EU in Probleme geraten wird [ACC 2025b]. Zusammen mit diversen weiteren Verschie-

bungen und Absagen von bereits angekündigten Projekten bleibt damit fraglich, ob die ambitionierten Prognosen aus dem Jahr 2024 tatsächlich eintreten werden. Allerdings befinden sich die beiden Gigafactories von PowerCo in Deutschland und Spanien sowie die Anlage von Verkor in Frankreich weiterhin im Bau, beide umfassen insgesamt signifikante Produktionskapazitäten.

3.1.4 Zwischenfazit Wertschöpfungsketten für LIB aus Primärrohstoffen für den EU-Markt

Die Ansiedlung der verschiedenen Schritte der Wertschöpfungskette von LIB wird von der EU und ihren Mitgliedsstaaten als notwendig und strategisch wichtig angesehen. Dies wird unter anderem an bereits beschlossenen Maßnahmen wie dem Critical Raw Materials Act ersichtlich. Die kürzlich von der Europäischen Kommission als strategische Projekte im Sinne des Critical Raw Materials Act eingestuften 47 Vorhaben [CRMA 2025] adressieren zu einem großen Teil Vorhaben, die auf die Wertschöpfungsketten von LIB einzahlen: von der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung bis zur Bereitstellung von Zwischenprodukten in Batteriequalität. Mit Blick auf eine stärkere Europäische Resilienz sind diese Initiativen enorm wichtig und begrüßenswert. Ob diese jedoch ausreichen, um die ambitionierten Ziele des Critical Raw Materials Act zu

erreichen, kann mit Fragezeichen versehen werden. Insbesondere in Hinblick auf die Primärrohstoffversorgung und die schlechte wirtschaftliche Lage diverser Zellhersteller ist für die EU zurzeit schon abzusehen, dass der europäische Bedarf mittelfristig nicht komplett aus Ressourcen und Wertschöpfungsketten in der EU selbst gedeckt werden kann. Die EU wird zumindest in den nächsten fünf Jahren weiterhin stark auf Importe angewiesen sein.

Zusätzlich zu den Bemühungen europäischer Unternehmen, Kapazitäten für die verschiedenen Schritte der Wertschöpfungskette aufzubauen, ist die Ansiedlung verschiedener asiatischer Akteure im europäischen Raum zu berücksichtigen. Dies wird von verschiedenen Akteuren unterschiedlich bewertet. Auf der einen Seite kann argumentiert werden, dass Kapazitäten im Besitz asiatischer Unternehmen nicht zur Resilienz Europas im eigentlichen Sinne beitragen. Andererseits ist es allerdings unklar, ob eine Resilienz beziehungsweise eine Deckung des eigenen Bedarfs ohne die Ausnutzung der in den entsprechenden Unternehmen bereits existierenden Expertise und Strukturen überhaupt als realistisch einzustufen ist.

Ein weiterer Punkt, der für die Rohstoffversorgung in der Zukunft eine wichtige Rolle spielt, ist die Rückgewin-

nung von Sekundärrohstoffen aus End-of-life-Batterien, die im nächsten Abschnitt behandelt wird.

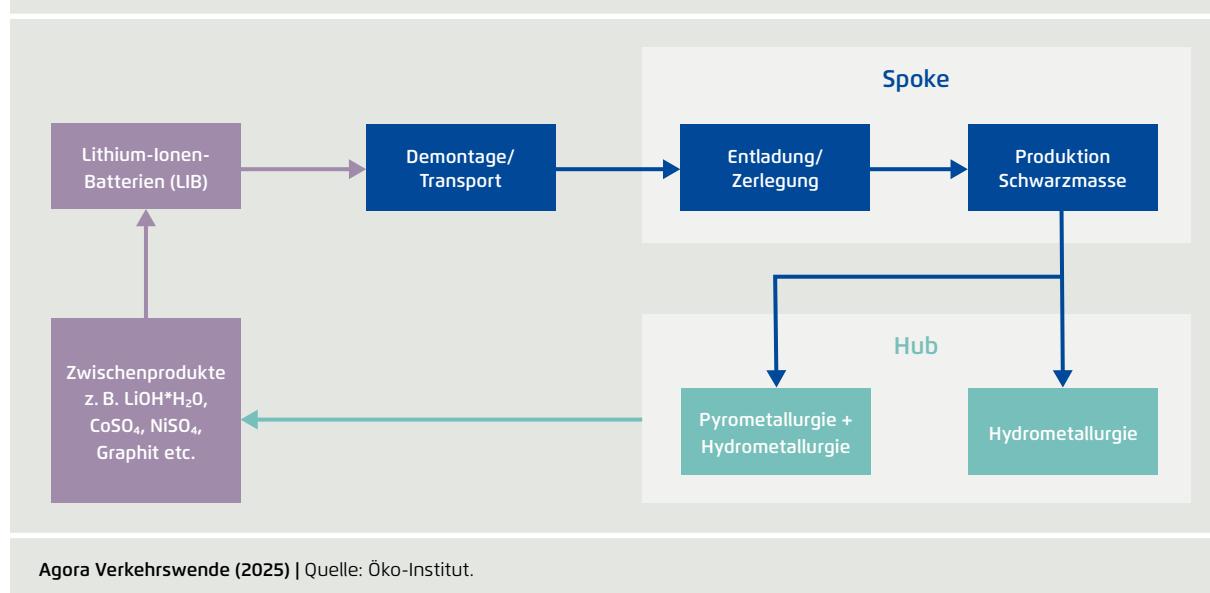
3.2 Übersicht der Wertschöpfungskette für LIB aus Sekundärrohstoffen

3.2.1 Einführung zum Recycling von LIB

In der nachfolgenden Abbildung sind die Schritte für das Recycling von LIB in einem stark vereinfachten Schema dargestellt. Anlagen für die ersten Schritte wie Erfassung/Sammlung/Sortierung, anschließend Entladung und Zerlegung (Entnahme von Peripheriekomponenten der Batterien wie Batteriegehäuse, Kabel, Batteriemanagementsystem etc.) und schließlich mechanische Aufbereitung werden in der Fachwelt unter dem Begriff *Spokes* (Deutsch: Speichen) zusammengefasst. In diesen Anlagen werden die von den Peripheriekomponenten befreiten Batteriemodule oder -zellen über mechanische Prozessschritte (Schreddern, Magnetabscheidung, Sieben etc.) und häufig auch einen Pyrolyseschritt weiterverarbeitet. Abgetrennt werden in diesen Anlagen so weit als möglich organische Lösemittel (aus dem Elektrolyten) organische Binder, Kunststoffkomponenten, eisen/stahlhaltige Partikel sowie Aluminium und Kupfer (aus Zellhüllen, Kathoden- und Anodenfolien). Wesentliches

Schema (stark vereinfacht) des Recyclings von Li-Ionen-Batterien

Abbildung 3-4



Zielprodukt ist immer die sogenannte „Schwarzmasse“. Dieses Zwischenprodukt Schwarzmasse enthält vor allem Aktivmaterialien, dies bedeutet in erster Linie Graphit (aus dem Anodenmaterial) und im Falle von NMC-Batterien die Wertmetalle Lithium, Nickel, Kobalt und auch Mangan aus dem Kathodenmaterial.

Die Schwarzmasse stellt ein werthaltiges Zwischenprodukt dar, welches entsprechend als Gut zwischen Unternehmen gehandelt wird. Anlagen zur Produktion von Schwarzmasse werden unter anderem zur Vermeidung sehr langer Transportdistanzen kompletter Batterien eher dezentral konzipiert mit Jahresdurchsätzen von einigen Tausend Tonnen Batterien bis maximal einigen Zehntausend Tonnen. In der EU sind sowohl zahlreiche Recyclinganlagen für die mechanische Behandlung zur Produktion der Schwarzmasse sowohl bereits in Betrieb als auch in Planung. Auch in europäischen Nicht-EU-Ländern wie der Schweiz, Norwegen und dem Vereinigten Königreich gibt es eine Reihe solcher Anlagen.

Die Weiterverarbeitung der Schwarzmasse kann technologisch auf unterschiedlichen Wege erfolgen: ungeachtet zahlreicher denkbarer Unterschiede im Detail entweder direkt hydrometallurgisch, das heißt Aufschluss und Weiterprozessierung der Schwarzmasse durch Lauge im sauren Milieu oder in der Kombination pyrometallurgisch (Hochtemperaturschmelzprozess) und anschließender hydrometallurgischer Weiterprozessierung und Aufreinigung bis hin zu Metallverbindungen (zum Beispiel Lithiumhydroxid-Hydrat, Nickelsulfat) in Batteriequalität. Auch wenn die unterschiedlichen Prozessschritte nicht unbedingt in einer Anlage erfolgen müssen, ist unstrittig, dass für die Weiterverarbeitung der Schwarzmasse eine größere zentrale Anlage (für den Kern der Hydrometallurgie beziehungsweise für die Pyrometallurgie) notwendig ist. Daher wird hier in Fachkreisen für Anlagen dieser Art von *Hubs* (Deutsch: *Naben*) gesprochen. Für diese Anlagen werden erhebliche größere Anlagenkapazitäten und damit Investitionskosten kalkuliert im Vergleich zu Schwarzmasseanlagen.

Für die Abdeckung Europas wird jedoch im Vergleich mit den Spokes mit einer erheblich geringeren Anzahl von Hubs gerechnet – ungeachtet des erwarteten Hochlaufs der Elektromobilität und damit erwartbar stark steigenden Mengen an End-of-Life-Batterien in den nächsten 20 Jahren. Bildlich betrachtet soll sich mittelfristig für

ganz Europa ein Netz an Spokes, das heißt einigen Dutzend Anlagen zur Schwarzmasseproduktion mit einigen größeren Hubs zur Weiterverarbeitung der Schwarzmasse hin zu Zwischenprodukten in Batteriequalität etablieren. Manche von diesen Projekten umfassen auch Anlagenstandorte, die die beiden Hauptmodule (Spoke und Hub) des LIB-Recyclings integrieren. In diesen Anlagen werden alte LIB an einem Standort von der mechanischen Behandlung bis zur Rückgewinnung der Rohstoffe wiederaufbereitet, ohne dass ein separater Transport der Schwarzmasse zwischen den Standorten erforderlich ist.

3.2.2 Anlagen zur Schwarzmasseproduktion in der EU (Spokes)

In der EU wurden in den letzten Jahren zahlreiche Recyclinganlagen zur Produktion von Schwarzmasse angekündigt und vielfach auch bereits realisiert. Viele von diesen Anlagen haben mit dem kommerziellen Betrieb bereits begonnen – in einigen Fällen sind Erweiterungen geplant. Diese Anlagen zur Schwarzmasseproduktion sind vergleichsweise einfach skalierbar. Da für diese im Kern hauptsächlich mechanischen Anlagen bei höheren Kapazitätsbedarfen einfach zweite, dritte Linien etc., parallel erreichtet werden können. So kann zum Beispiel eine Anlagenkapazität in wenigen Jahren über 5.000 Tonnen auf 10.000 Tonnen pro Jahr verdoppelt werden.

Die meisten dieser Projekte befinden sich in Mittel- und Nordeuropa, wobei Deutschland im Vergleich zu den anderen EU-Ländern die höchste Anzahl an solchen Recyclingprojekten aufweist. Zu nennen sind hier unter anderem die bestehenden Anlagen von BASF, Primobius, Li-Cycle⁴, Fortum und Redwood Materials [Schramm 2024b] [Li-Cycle 2024a] [Neometals 2022] [Redwood 2025]. Zudem wird zum Beispiel eine weitere Anlage in Wernigerode mit einer Kapazität von 25 Kilotonnen pro Jahr (kt/a) geplant [Schramm 2024a].

Die weiteren Anlagen zur Schwarzmasseproduktion durch mechanische Behandlung End-of-Life-LIB oder Produktionsausschüssen aus der Zellenproduktion sind in unterschiedlichen EU-Ländern verteilt. Weitere aktive Anlagen für die mechanische Behandlung von alten

4 Die wirtschaftliche Lage und Zukunft der Firma Li-Cycle ist zum Zeitpunkt der letzten hier berücksichtigten Informationen (Mai 2025) unklar, so dass dies auch für die entsprechende Anlage gilt.

LIB mit einer Kapazität von mehr als 10 kt/a befinden sich in Polen und Ungarn, welche von AE Elementals und POSCO/SungEel HiTech betrieben werden [Ascend Elements 2024] [SungEel HiTech 2025] [POSCO 2022]. Zu den in Betrieb laufenden Anlagen mit einer Kapazität von 10 kt/a gehören die Anlagen von SNAM und Li-Cycle in Frankreich, eine weitere Anlage von Stena Recycling in Schweden und eine von SK Tes in den Niederlanden. Weitere Anlagen zur Schwarzmasseproduktion in der EU

befinden sich in Planung. In Polen wird zum Beispiel eine der größten Anlagen zur Schwarzmasseproduktion mit einer Kapazität von 100 kt/a vom Unternehmen Attero geplant [Argus Media 2024].

In der nachfolgenden Übersicht findet sich eine Auflistung wichtiger bestehenden beziehungsweise geplanter Anlagen zur Schwarzmasseproduktion in der EU. Die Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da in

Anlagen zur Schwarzmasseproduktion in der EU (Spokes)

Tabelle 3-3

Standort	Unternehmens-hauptsitz	Projekt/Standort	Unternehmen	Status	Prognose Behandlungskapazität/a
HU	SK	Szigetszentmiklós, Bátánytereny	SungEel HiTech	In Betrieb	35 kt ^[1]
DE	DE	Schwarzheide	BASF	In Betrieb	15 kt ^[2]
PL	PL (ESM) & US (Ascend Elements)	Zawiercie	AE Elemental	In Betrieb	12 kt ^[3]
FR	CAN	Harnes	Li-Cycle	In Betrieb	10 kt ^[4]
DE	USA	Bremerhaven	Redwood Materials	In Betrieb	10 kt ^[5]
FR	FR	Saint Quentin	SNAM (Société Nouvelle d'Affinage des Métaux)	In Betrieb	10 kt ^[6]
SE	SE	Halmstad	Stena Recycling	In Betrieb	10 kt ^[7]
NL	SG	Rotterdam	SK Tes	In Betrieb	10 kt ^[8]
PL	SK	Brzeg Dolny	POSCO/SungEel HiTech	In Betrieb	7 kt ^[9]
PL	PL	Legnica	Royal Bees	In Betrieb	3,6 kt ^[10]
DE	AT	Zwickau	Erlos	In Betrieb	3,5 kt ^[11]
DE	FI	Kirchardt	Fortum Battery Solutions	In Betrieb	3 kt ^[12]
DE	AUS	Hilchenbach	Primobius	In Betrieb	10 t pro Tag ^[13] ; d.h. ca. 3 kt/a
PL	IN		Attero	In Planung	100 kt ^[14]
DE	PL (ESM) & US (Ascend Elements)	Wernigerode	AE Elemental	In Planung	25 kt ^[15]
ES	SK	Navarra	BeeCycle	In Planung	10 kt ^[16]

Quellen: [1] [SungEel HiTech 2025], [2] [Schramm 2024b], [3] [Ascend Elements 2024], [4] [Li-Cycle 2024a], [5] [Redwood 2025], [6] [SNAM 2025], [7] [Randall 2023b], [8] [Wilfer 2024], [9] [POSCO 2022], [10] [Bockey 2024], [11] [Schramm 2024c], [12] [Fortum 2023], [13] [Neometals 2022], [14] [Argus Media 2024], [15] [Schramm 2024a], [16] [Gobierno de Navarra 2024].

diesem volatilen Marktumfeld permanent neue Planungen angezeigt oder bestehende zurückgezogen werden. Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass bezüglich des Kapazitätsaufbaus von Anlagen zur Schwarzmasseproduktion in der EU von einer großen Dynamik gesprochen werden kann. Hierbei ist zu betonen, dass aktuell die überwiegende Anzahl der Anlagen bei weitem nicht an der Kapazitätsgrenze ausgelastet ist. Fachleute gehen davon aus, dass zumindest für die nächsten fünf Jahre ausreichend Anlagenkapazitäten für die Behandlung von LIB bis zum Zwischenprodukt Schwarzmasse zur Verfügung stehen werden [T&E 2024].

3.2.3 Anlagen zur Weiterverarbeitung von Schwarzmasse in der EU (Hubs)

Die im Jahr 2023 in Kraft getretene EU-Batterie-Richtlinie stellt neben vielen weiteren Anforderungen ambitionierte Anforderungen an metallspezifische Recyclingraten aus dem Recycling von LIB einerseits und an den Anteil von Sekundärmetallen für neue LIB andererseits [BatReg 2023]. Bezuglich der für diese Studie relevanten Zielmetalle Lithium, Kobalt und Nickel gibt sie folgende Zielwerte vor:

- **Spezifische Rückgewinnungsraten** (Gewichtsprozent) aus dem Recycling von LIB und Zieljahre:
 - Lithium:** ab 2027 **50 Prozent**, ab 2031 **80 Prozent**
 - Kobalt:** ab 2027 **90 Prozent**, ab 2031 **95 Prozent**
 - Nickel:** ab 2027 **90 Prozent**, ab 2031 **95 Prozent**
- **Sekundärmetallanteil** (Gewichtsprozent) für Metalle in LIB⁵ und Zieljahre:
 - Lithium:** ab 2031 **6 Prozent**, ab 2036 **12 Prozent**
 - Kobalt:** ab 2031 **16 Prozent**, ab 2036 **26 Prozent**
 - Nickel:** ab 2031 **6 Prozent**, ab 2036 **15 Prozent**

Die höheren Rückgewinnungsraten für Kobalt und Nickel gegenüber Lithium ist der Tatsache geschuldet, dass die Rückgewinnung von Kobalt und Nickel aus LIB eine längere Tradition und damit technische Reife aufweist. Die Rückgewinnung von Lithium aus LIB wird erst seit wenigen Jahren von einer Reihe von Unternehmen verfolgt und ist aufgrund der chemischen Eigenschaften von Lithium auch durchaus noch anspruchsvoller [BMWk]

2023], [SKN 2023]. Die unterschiedlichen Sekundärmetallquoten bei diesen drei Metallen sind einerseits erwarteten unterschiedlichen Rückgewinnungsquoten aus dem Recycling geschuldet und andererseits eine Konsequenz von Entwicklungen in der Batteriechemie (Trend zu tendenziell nickelreicheren und kobaltärmeren LIBs).

Die anspruchsvolle Rückgewinnung von Lithium-, Kobalt- und Nickelverbindungen – möglichst in Batteriequalität) war und ist gerade in Deutschland aber auch in anderen EU-Ländern seit Jahren Gegenstand intensiver Forschungsprojekte unter Zusammenarbeit von Unternehmen sowie universitären und außeruniversitären Forschungs-Instituten [LiBRI 2011, LithoRec I 2011, LithoRec II 2016, EcoBatRec 2016, MERCATOR 2023]. Diese Aktivitäten in Deutschland und anderen europäischen Ländern haben zur Entwicklung von Prozessen zumindest in der Dimension von Pilot- und Demonstrationsanlagen geführt. Allerdings besteht gegenwärtig in Europa (im Gegensatz zu Asien, vor allem in China und Süd-Korea) aktuell noch eine echte Lücke an industriellen Kapazitäten zur Weiterverarbeitung von Schwarzmasse. In diesem Abschnitt werden wichtige Beispiele von aussichtsreichen Aktivitäten hierzu in Europa aufgeführt. Im anschließenden Abschnitt sind industrielle Projekte dokumentiert, die integrierte Prozesse zum Recycling von LIB umfassen, also Spoke-und-Hub-Prozesse an einem Anlagenstandort.

In der EU gibt es aktuell nur einige wenige Anlagen mit Kapazitäten in der Größenordnung von wenigen Tausend Jahrestonnen zur Weiterverarbeitung von Schwarzmasse. Einer der wesentlichen Gründe ist der aktuell noch überschaubare Rücklauf an End-of-Life-LIBs. Hier ist allerdings in den nächsten 5 bis 10 Jahren mit einem deutlichen Volumenwachstum zu rechnen (siehe hierzu auch Abschnitt 3.3). Hierunter fallen die bestehenden Anlagen von Fortum sowie Akkuser Oy in Finnland, Nickelhütte Aue und Düsenfeld in Deutschland sowie Veolia in Frankreich (s. Tabelle 3-4). Bei weiteren Projekten ist aufgrund der geringeren Kapazitäten davon auszugehen, dass es sich zumeist um Pilotanlagen handelt, die (noch) nicht für den kommerziellen Betrieb zur Verfügung stehen. Beispielsweise betreibt Aurubis in Hamburg derzeit eine Pilotanlage für den hydrometallurgischen Prozess zur Behandlung der Schwarzmasse [Aurubis 2022].

5 Gilt für Industriebatterien (> 2 kWh), Antriebsbatterien für Elektrofahrzeuge, sowie ab 2036 auch für Batterien für leichte Verkehrsmittel.

In der nachfolgenden Tabelle sind Anlagen zur Weiterverarbeitung von Schwarzmasse in der EU aufgeführt, die entweder im Betrieb, im Bau, in der Planung oder zumindest angekündigt sind. Aufgrund der gewaltigen Dynamiken in diesem Bereich erhebt auch diese Tabelle keinen Anspruch auf letzte Vollständigkeit.

In jüngster Zeit haben zwei Unternehmen in Deutschland konkrete Aktivitäten für den Bau größerer Kapazitäten zur Weiterverarbeitung von Schwarzmasse angekündigt. Das Unternehmen cylib will ab dem Jahr 2027 im Industriepark Dormagen – aufbauend auf den Erfahrungen einer bereits bestehenden Pilotanlage in Aachen – jährlich bis zu 10.000 Tonnen Schwarzmasse hydrometallurgisch weiterverarbeiten und Lithium und andere Wertmaterialien

zurückgewinnen [cylib 2024]. Die zweite Anlage wurde für den Standort Goslar von dem etablierten Unternehmen H.C. Starck Tungsten angekündigt, welches im Jahr 2024 vom japanischen Unternehmen Mitsubishi Materials Corporation übernommen worden ist. Das Unternehmen setzt auf ein neuartiges Verfahren, welches durch Patente abgesichert ist, auf. Mit dem Bau der Anlage, die mit einem Investitionsvolumen von rund 340 Millionen Euro veranschlagt wird, soll 2027 begonnen werden und der Betrieb soll zwei Jahre später starten. Die Anlagenkapazität wird mit 20.000 Tonnen Schwarzmasse jährlich angegeben [H.C. Starck Tungsten 2025]. Weiterhin ist eine im Bau befindliche Anlage in Bulgarien von Altillium Metals zur Rückgewinnung von Rohstoffen aus alten LIB zu nennen, unter anderem auch von Lithium [Allen 2024].

Anlagen zur Weiterverarbeitung von Schwarzmasse in der EU (Hubs)

Tabelle 3-4

Standort	Unternehmens-hauptsitz	Projekt/Standort	Unternehmen	Status	Prognose Behandlungskapazität/a
FI	FI	Project Fortum Hydromet/ Harjavalta	Fortum Battery Solutions	In Betrieb	10 kt ^[1]
FR	FR	Moselle	Veolia	In Betrieb	7 kt ^[2]
FI	FI	Nivala	Akkuser Oy	In Betrieb	4 kt ^[3]
DE	DE	Aue	Nickelhütte Aue	In Betrieb	4 kt ^[4]
DE	DE	Wendeburg	Duesenfeld	In Betrieb	3 kt ^[5]
DE	DE	Salzgitter	VW	In Betrieb	1,5 kt ^[6]
DE	DE	Hamburg	Aurubis	Pilotbetrieb	Pilotmaßstab ^[7]
BE	BE	Hoboken	Umicore	Fertiggestellt	7 kt ^[8]
BG	UK	Medet	Altillium Metals	Im Ausbau	24.000 EV ^[9]
DE	DE	Dormagen	Cylib GmbH	In Planung	30 kt ^[10]
DE	DE	München	Tozero	Angekündigt	90 kt ^[11]
IT	CAN/USA	Portovesme	Li-Cycle/ Glencore	Angekündigt	50–70 kt ^[12]
ES	ES	Cubillos del Sil	Endesa/ Urbaser	Angekündigt	25 kt ^[13]
HU	SI	Alsózsolca	Andrada Group	Angekündigt	10 kt ^[14]
FR	FR/FR/BE	Amnevile	Renault/Veolia/ Solvay	Angekündigt	4 kt ^[15]

Quellen: [1] [Stephan 2024], [2] [ISWA 2024], [3] [Velázquez-Martínez et al. 2019], [4] [Hartmann 2022], [5] [Donner 2022], [6] [Volkswagen AG 2024], [7] [Aurubis 2022], [8] [Umicore 2022b], [9] [Mendoza 2024], [10] [Cylib 2024], [11] [Wilfer 2023], [12] [Allen 2023], [13] [Allen 2024], [14] [Randall 2023c], [15] [Innovation Origins 2023].

Viele weitere, bereits angekündigte Projekte zur Schwarzmasseverarbeitung sind aufgrund der schwierig einzuschätzenden Marktentwicklungen und nicht zuletzt der erheblichen Investitionshöhen (siehe oben das Beispiel von H.C. Starck Tungsten) zumindest vorläufig ausgesetzt beziehungsweise gestoppt. Der Chemiekonzern BASF hat ursprünglich eine Hydrometallurgie-Anlage in Spanien geplant. Auch aufgrund der Prognose, dass in naher Zukunft geringe Mengen an alten E-Fahrzeughässen anfallen würden, hat die Firma ihre Planung für die Anlage zunächst gestoppt [Osusky 2025]. Ein weiteres Beispiel ist das bereits erwähnte Projekt in Portovesme, das seit der ersten Ankündigung des Projekts im Jahr 2023 aufgrund von Verzögerungen im Genehmigungsverfahren verschoben wurde [Allen 2023]. Mittlerweile wird die Planung für die Anlage fortgesetzt [Li-Cycle 2024b], jedoch zunächst nur als Vorstudie.

Weitere Projekte – zum Teil mit sehr hohen Kapazitätsangaben – wurden in der Vergangenheit öffentlich angekündigt, ihre Realisierung ist aktuell zumindest offen. Dies gilt unter anderem für ein Projekt in München von Tozero mit einer geplanten Behandlungskapazität von bis zu 90 kt/a, das aktuell im Pilotbetrieb ist [Wilfer 2023]. Ansonsten sind in einer Reihe von EU-Ländern Anlagen in der Planung oder zumindest angekündigt – aber für alle Projekte gilt, dass das Marktumfeld dynamisch bis volatil ist und Realisierungen von Anlagen häufig mit Unsicherheiten behaftet sind.

Es wurden auch strategische Partnerschaften zwischen Recyclern angekündigt. Die produzierte Schwarzmasse von einer mechanischen Behandlungsanlage von Hydrovolt in Norwegen wird in der hydrometallurgischen Anlage von Fortum Battery Solutions in Finnland behandelt [Fortum 2024]. Neben der Zusammenarbeit mit dem Automobilhersteller Hyundai hat Stena Recycling eine weitere strategische Partnerschaft mit BASF als Recycler angekündigt [BASF 2024b].

3.2.4 LIB-Recyclinganlagen mit integrierten Prozessen in der EU (Spokes und Hubs)

Weitere Recyclingprojekte für End-of-Life-LIB in der EU umfassen vollständig integrierte Anlagen, die den gesamten Prozess der Behandlung von End-of-Life-LIB von der mechanischen Behandlung (Spokes) bis zur Rückgewinnung von recycelten Batteriematerialien (Hubs) umfassen. Solche Anlagen spielen eine wesentliche Rolle in der

Sicherstellung der vollständigen Behandlung von End-of-Life-LIB und somit der Sicherung von Sekundärrohstoffen innerhalb der EU, denn der Betrieb solcher Anlagen kann dazu führen, dass in der EU gesammelte Altbatterien und deren Sekundärrohstoffe innerhalb der EU verbleiben.

In der EU wurde in Deutschland die erste integrierte Anlage des mechanischen-hydrometallurgischen Verfahrens von der Mercedes-Benz Gruppe eröffnet. Es handelt sich dabei um eine Pilotanlage, die über eine Kapazität von 2,5 kt/a verfügt und für Forschungszwecke zur Verfügung steht [Mercedes-Benz 2024]. Eine weitere derartige Anlage war ursprünglich von Suez und Eramet in Frankreich geplant, das Projekt wurde jedoch, wie auch andere Projekte verschoben beziehungsweise gestoppt [Werwitzke 2024b].

Trotz der Relevanz solcher Anlagen zur Sicherung der Sekundärrohstoffe innerhalb der EU gibt es davon aktuell eine sehr geringe Gesamtbehandlungskapazität. Im Vergleich zu den Anlagen, in denen lediglich Schwarzmasse (Spokes) produziert wird, gibt es nur eine deutlich geringere Anzahl an Projekten für integrierte Behandlungsanlagen. Zusätzlich gibt es Anlagen zur Schwarzmasseproduktion, an denen nebenbei auch das hydrometallurgische oder pyrometallurgische Verfahren am gleichen Standort im Pilotmaßstab (zum Beispiel zur Untersuchung der weiteren Planungsschritte) betrieben wird. Dies kann an den Anlagen von SNAM in Frankreich, von AE Elemental in Polen und von BASF in Deutschland beobachtet werden [SNAM 2025] [BASF 2024a] [Ascend Elements 2024]. Unsicher sind die weiteren Schritte aus diesen Pilotanlagen, also inwiefern diese bestehenden kleinen Anlagen zukünftig in voll integrierte Anlage im industriellen Maßstab münden.

An dieser Stelle verdienen die Aktivitäten der Accurec GmbH am Standort Krefeld Erwähnung. Aktuell verarbeitet das Unternehmen dort rund 4.000 Tonnen End-of-Life-LIB pro Jahr nach Pyrolyse und mechanischer Behandlung zu Schwarzmasse. Kürzlich hat das Unternehmen einen Antrag auf Änderungsgenehmigung nach Bundes-Immissionschutzgesetz gestellt, um einerseits die Anlagenkapazität auf 20.000 Tonnen End-of-Life-LIB pro Jahr zu erhöhen und andererseits weiterhin die erzeugte Schwarzmasse hydrometallurgisch zu behandeln. Als Zielwerte werden vom Unternehmen die Produktion von jährlich 3.000 Tonnen Lithiumcarbonat und

Anlagen mit integrierten Prozessen in der EU (Spokes und Hubs)

Tabelle 3-5

Standort	Unternehmens-hauptsitz	Projekt/Standort	Unternehmen	Status	Prognose Behandlungskapazität/a
DE	DE	Kuppenheim	Mercedes-Benz Group	In Betrieb	2,5 kt (Pilotbetrieb) ^[1]
DE	DE	Krefeld	Accurec	In Betrieb	4 kt, Ausbau auf 20 kt beantragt ^[2]

Quellen: [1] [Mercedes-Benz 2024], [2] [Accurec 2025].

Agora Verkehrswende (2025) | Quelle: Zusammenstellung Öko-Institut.

7.500 Tonnen Kobalt-Nickel-Produkte genannt [Accurec 2025]. Eine Besonderheit ist hier, dass das Unternehmen in erster Linie auf die Behandlung von LIB aus Geräten (portable Batterien, Power-Tools et cetera) abzielt und erst in zweiter Priorität auf End-of-Life-LIB aus der Elektromobilität [Accurec 2025].

3.2.5 Kooperationen mit Partnern außerhalb der EU
 Die zuletzt etwas verhaltenen Einschätzungen des Hochlaufs der Elektromobilität in der EU und das damit folgende langsamere Wachstum des Rücklaufs von End-of-Life-LIB in die Kreislaufwirtschaft in der nahen Zukunft wirft die Frage auf, ob in den nächsten Jahren insbesondere die Anlagen für die Schwarzmasseproduktion in der EU ausreichend ausgelastet und damit profitabel sein werden. Würden alle die Projekte für die Anlagen zur Schwarzmasseproduktion mit den geplanten Kapazitäten realisiert, würde es in der EU mittelfristig insgesamt hier Überkapazitäten geben. Laut Benchmark Recycling werden die meisten Materialien zum Recycling in der EU bis 2031 zunächst aus Fabriken zur Zellfertigung (Ausschussmaterial) stammen [Benchmark Minerals 2025b]. Angesichts des langfristigen Zeithorizonts darüber hinaus kann sich dies jedoch erheblich ändern, wenn die derzeit verwendeten LIB das Ende ihrer Lebensdauer erreichen.

Trotz der bestehenden Recyclingprojekte stellt sich die Frage, ob die Behandlung der in der EU anfallenden End-of-Life-LIBs tatsächlich ausschließlich innerhalb der EU erfolgt oder ob sie in Staaten außerhalb der EU exportiert werden. Dies würde in erster Linie für die in der EU produzierte Schwarzmasse gelten. Auch wenn Pläne für die Errichtung von Anlagen zur

Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen in der EU vorhanden sind, ist nicht unbedingt gewährleistet, dass die Schwarzmasse in diesen Anlagen weiterverarbeitet wird, zumal die Gesamtkapazität für die Schwarzmasseproduktion höher ist als die für die Weiterverarbeitung. Schließlich gibt es auch Akteure, die Schwarzmasse in der EU produzieren, aber pyrometallurgische beziehungsweise hydrometallurgische Anlagen außerhalb der EU betreiben und daher ein Interesse haben, Schwarzmasse in Staaten außerhalb der EU zu exportieren.

Schwarzmasse wird in der EU seit März dieses Jahres als gefährlicher Abfall eingestuft, nachdem die EU im Rahmen ihrer jüngsten Industriestrategie für den Automobilsektor beschlossen hat, das Abfallverzeichnis zu aktualisieren [EC 2025]. Dieses unterscheidet nach gefährlichen und nicht gefährlichen Batterieabfällen, stuft jedoch alle Zwischenprodukte des Batterierecyclings (inklusive der Schwarzmasse) als gefährlich ein, unabhängig von ihrer eigentlichen Zusammensetzung. Nach EU-Recht, welches sich nach dem Basler Überkommen richtet, dürfen gefährliche Abfälle nur in OECD-Länder exportiert werden. Darüber hinaus ist bei der Verbringung innerhalb der EU beziehungsweise bei Exporten in OECD-Länder außerhalb der EU (wie zum Beispiel Südkorea) eine Notifizierung notwendig. Mit dieser Änderung wird der Umgang mit Schwarzmasse vereinheitlicht, denn zuvor wurde das Material je nach Land, Verkäufer und Qualität des Materials entweder als Produkt oder als Abfall eingestuft. Damit soll eine Erschwerung des Exports von Schwarzmasse einhergehen, da eine Einstufung als Produkt und damit ein Export ohne Notifizierung nicht mehr möglich sind und

vor allem die Möglichkeit zum besseren Monitoring des Exports gegeben werden. Wie sich diese neuen Regeln allerdings in der Praxis tatsächlich auswirken werden, ist derzeit noch nicht abzusehen.

Zurzeit wird mehr als 50 Prozent der Schwarzmasse aus der EU nach Asien, insbesondere Südkorea und verschiedene südostasiatische Länder, exportiert [Gherasim/Michel 2024], weil dort zahlreiche Anlagen zur Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus der Schwarzmasse bereits in Betrieb genommen worden sind, insbesondere in Südkorea und China. Nach der Aktualisierung des Abfallverzeichnisses könnte sich das Verhältnis ändern, vor allem, da kein südostasiatisches Land ein Mitgliedstaat der OECD ist und daher der Export in diese Länder verboten ist. Allerdings ist Südkorea ein Teil der OECD und Herkunft einer Reihe der genannten Unternehmen mit Aktivitäten in der EU. Ein gutes Beispiel stellen die Prozesswege des südkoreanischen Unternehmens Sungeel HiTech dar, welches zwei Anlagen in Ungarn für die Schwarzmassenproduktion betreibt, jedoch die produzierte Schwarzmasse aus diesen Anlagen in ihrer Hydrometallurgie-Anlage in Südkorea weiterbehandelt [Sungeel HiTech 2025].

In diesem Zusammenhang kann auch auf strategischen Partnerschaften zwischen OEMs (Fahrzeugherstellern) und Verwertern verwiesen werden. Letztlich sollte es aus Sicht der europäischen OEM von Interesse sein, Partnerschaften mit geeigneten Recyclingunternehmen zur Sicherung von Sekundärrohstoffen von ihren Batterieabfällen strategisch zu planen. In der EU gab in letzter Zeit eine Reihe von Ankündigungen solcher Partnerschaften, wie beispielsweise vom Automobilhersteller BMW mit seiner angekündigten langfristigen Partnerschaft mit dem Recycler SK Tes zur Behandlung seiner Batterieabfälle. Dabei soll BMW seine Altbatterien an SK Tes liefern, aus welchen in der mechanischen Behandlungsanlage in Rotterdam Schwarzmasse produziert wird [Schaidnagel 2025]. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Schwarzmasse zur Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen bislang außerhalb der EU exportiert wurde, denn SK Tes betreibt oder plant zurzeit keine hydrometallurgische Anlagen in der EU, allerdings in Singapur [SK Tes 2023]. Darüber hinaus hat Stena Recycling eine Partnerschaft mit dem Automobilhersteller Nissan angekündigt [Nissan 2025].

3.2.6 Zwischenfazit Wertschöpfungsketten für LIB aus Sekundärrohstoffen für den EU-Markt

Der zunehmende Bedarf an Batterierohstoffen und die Möglichkeit, diesen Bedarf künftig mit Sekundärrohstoffen zu decken, erhöht sowohl bei einheimischen als auch bei außereuropäischen Akteuren die Bereitschaft für langfristige Investitionen in Recyclingprojekte in der EU. Bei den genannten Anlagen handelt es sich meist um Projekte europäischer und asiatischer Unternehmen, wobei die meisten asiatischen Akteure in Südkorea ansässig sind. In Asien selbst betreiben diese Unternehmen bereits Recyclinganlagen mit großen Kapazitäten und nutzen ihre Betriebserfahrungen, um ihre Investitionen auch auf den europäischen Markt auszuweiten. In Osteuropa, besonders in Polen und Ungarn, werden die Investitionen meist von asiatischen Akteuren getätigt, während in Mitteleuropa und in den nordischen Ländern Finnland und Schweden die genannten Projekte überwiegend von einheimischen Unternehmen durchgeführt werden. Daneben sind auch nordamerikanische Unternehmen in der EU aktiv.

Ungeachtet des weltweiten Trends zur Elektromobilität und damit der attraktiven Ausgangslage für die Sekundärrohstoffsicherung innerhalb der EU scheint es in den letzten beiden Jahren die Tendenz zu geben, dass geplante Recyclingprojekte nicht immer realisiert werden. Einige von den in den letzten Jahren angekündigten Projekte in Anlagen wurden zwischenzeitlich aufgegeben oder zumindest zeitlich deutlich verschoben. Dies ist auf verschiedene Faktoren zurückzuführen. Dazu zählen vor allem wirtschaftliche Gründe, wie sehr hohe Investitionssummen (vor allem für Hubs oder integrierte Anlagen) und die Risikoabwägung, ob diese großen Anlagenkapazitäten dann ausgelastet werden können. Nicht wenige Unternehmen überdenken ihre Investitionspläne in der EU aufgrund der Prognose eines langsameren Wachstums des Rücklaufs der End-of-Life-LIBs in der nahen Zukunft, wie am Beispiel von der geplanten, aber nun verschobenen sehr großen Recyclinganlage von Umicore zu sehen ist [Benchmark Minerals 2024a]. SungEel HiTech hat ebenfalls aus diesen Gründen seine Pläne für die Anlage in Gera als Ergebnis der globalen Strategieanpassungen der Firma gestoppt [MDR 2025].

Neben den wirtschaftlichen Aspekten kommt es ebenfalls zu Verzögerungen bei Genehmigungsverfahren, welche zu einer Annulierung oder langfristigen Verschiebung eines

Projektes führen können. Gründe für solche Verzögerungen stellen beispielsweise Bürgerinitiativen gegen den Betrieb der Anlagen dar. Diese Proteste entstehen vor allem mit dem Hintergrund, dass es Befürchtungen von potenziellen Umweltverschmutzungen und Wertverlusten von lokalen Immobilien gibt. Betroffen sind hierbei die geplante Anlage von Fortum Battery Solutions und die zuvor genannte Anlage von SungEel HiTech. Beide Projekte wurden ursprünglich in Thüringen geplant [MDR 2024] [MDR 2025] [Randall 2024].

Trotz der geschilderten Rückschläge oder Verzögerungen beim Aufbau einer europäischen Wertschöpfungskette für LIB aus Sekundärrohstoffen zeigen gerade in jüngster Zeit die konkreten Pläne von Unternehmen wie cylib [cylib 2024], H.C. Starck Tungsten [H.C. Starck Tungsten 2025] und Accurec [Accurec 2025], dass durchaus konkrete Pläne für den Auf- beziehungsweise Ausbau von Anlagen zum Recycling von LIB weiterhin verfolgt werden. Unterstützt werden diese Aktivitäten zunehmend von der EU, die unter anderem mit der EU-Batterie-Richtlinie [EU 2023], dem Critical Raw Materials Act [CRMA 2024, 2025] sowie der jüngsten Industriestrategie für den Automobilsektor [EC 2025] wichtige Rahmenbedingungen für weitere Investitionen in die europäische Wertschöpfungskette für LIB gesetzt hat.

3.3 Definition der Szenarien für Antriebsbatterien in der EU-27

Neben dem Überblick über die relevanten Marktteilnehmer für LIB in der EU ist auch eine Untersuchung des potenziellen Wachstums des Marktes eine wichtige Basis für die Entwicklung von Rücknahmesystemen. Hierzu

wurden vom Öko-Institut für die EU-27-Ebene drei aktuelle Szenarien erstellt, in denen die Rohstoff- und Rezyklatströme für verschiedene Grenzfälle der Marktentwicklung untersucht wurden. Der Zeithorizont wurde dabei bis 2040 gewählt, um Entwicklungsmechanismen berücksichtigen zu können, jedoch nicht zu weit in die Zukunft zu gehen, da dann immer weniger faktenbasierten Annahmen getroffen werden können und die Unsicherheiten zu hoch werden. Neben Pkw sollten insbesondere auch verschiedene Nutzfahrzeuggruppen einbezogen werden. In jeder definierten Gruppe wurde ein durchschnittliches Fahrzeug berücksichtigt, sodass sich die in Tabelle 3-6 dargestellten untersuchten Fahrzeugklassen mit ihren jeweiligen Batteriekapazitäten ergeben. In der Gruppe der schweren Nutzfahrzeuge unterscheiden sich die Fahrzeug-Laufleistungen und damit die Lebenszeiten sowie die Batteriekapazitäten stark nach der Fahrzeugklasse [BMWK 2023]. Aus diesem Grund wurde hier nochmal in vier verschiedene Gewichtsklassen unterschieden. Eine Übersicht der betrachteten Fahrzeugklassen und angenommenen Batterieparameter findet sich in Tabelle 3-6.

Da hinsichtlich Rohstoffverbrauch, insbesondere von kritischen Rohstoffen, die Batteriezusammensetzungen im Gegensatz zu den Gesamtabsatzzahlen batterieelektrischer Fahrzeuge den größeren Hebel mit dem dynamischen Entwicklungspotenzial darstellen, wurden die Zulassungszahlen über alle Szenarien hinweg identisch gewählt, sodass sich drei in der zukünftigen Marktdurchdringung der verschiedenen Zellchemien unterschiedliche Szenarien ergeben. Die unter allen Szenarien einheitlichen Startwerte wurden dabei unter Konsultation verschiedener Quellen festgelegt [SKN 2023, BMWK 2023, IEA 2023]. Zusätzlich wurden alle Szenarioannahmen in Gesprächen mit Expert:innen diskutiert und bestätigt.

Übersicht über die betrachteten Fahrzeugklassen und angenommenen Batterieparameter Tabelle 3-6a

Klasse	Pkw			Busse	
Antrieb	BEV	HEV	PHEV	BEV	BEV
Batteriekapazität [kWh]	70	2	15	80	480
Zellchemien	NMC811, NMC622, NMC111 ^[1] , LFP, NCA, LMO ^[1]	NMC811, NMC622, NMC111 ^[1]	NMC811, NMC622, NMC111 ^[1]	NMC811, NMC622, NMC111 ^[1] , LFP	NMC622, LFP

Agora Verkehrswende (2025) | Anmerkung: [1] auslaufend; Quelle: Zusammenstellung Öko-Institut.

Übersicht über die betrachteten Fahrzeugklassen und angenommenen Batterieparameter Tabelle 3-6b

Klasse	SNF1 (3.5-7.5 t)	SNF2 (7.5-12 t)	SNF3 (> 12 t)	SNF4 (Last-/Sattelzüge)
Antrieb	BEV	BEV	BEV	BEV
Batteriekapazität [kWh]	250	420	580	860
Zellchemien	LFP	NMC622, LFP	NMC811, NMC622, LFP	NMC811, NMC622, LFP

Agora Verkehrswende (2025) | Quelle: Zusammenstellung Öko-Institut.

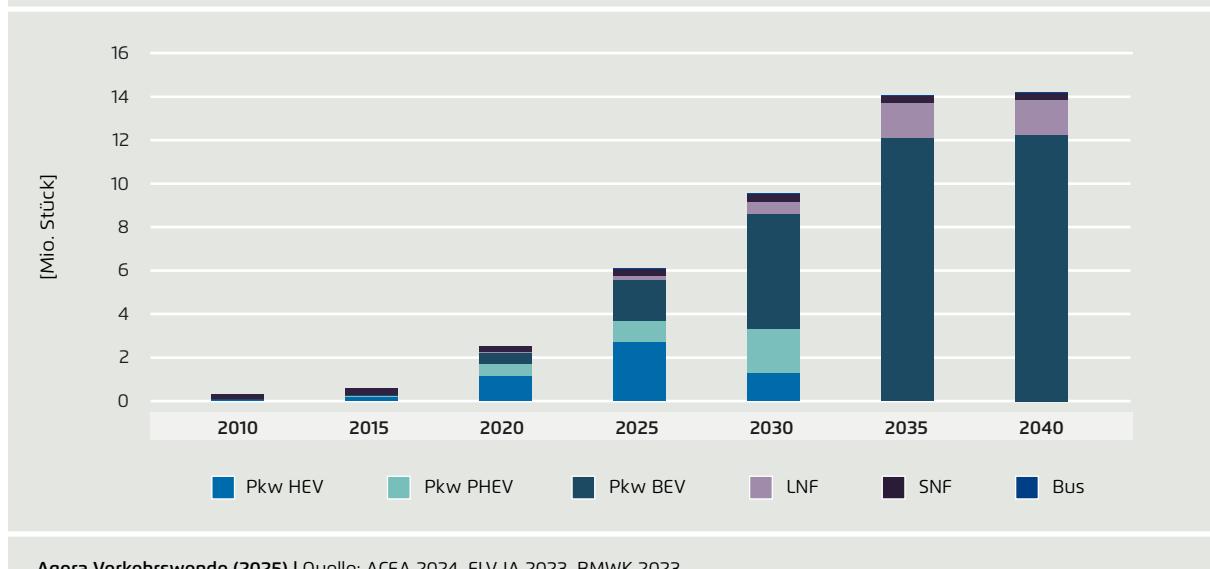
Um sowohl den zukünftigen Rohstoffverbrauch als auch die Rückläufe und potenziellen Rezyklatströme betrachten zu können, sind Annahmen über Fahrzeugzulassungszahlen in der Vergangenheit sowie der Zukunft vonnöten. Bis einschließlich des Jahres 2024 wurden jeweils die von der European Automobile Manufacturers' Association (ACEA) veröffentlichten Zulassungszahlen für die EU-27 genutzt [ACEA 2024]. Ab dem Jahr 2025 wurden die Prognosen der Begleitstudie zur Altfahrzeugverordnung der EU [ELV IA 2023] übernommen. Da das Verbot von Pkw mit Verbrennungsmotor laut der Flottengrenzwerte in der EU [EU 2023] zwar in jüngster Zeit von einzelnen Akteuren stark kritisiert wird, jedoch wahrscheinlich weiter gültig bleibt, wird weiter davon ausgegangen, dass ab 2035 nur noch vollelektrisch angetriebene Pkw in der EU neu zugelas-

sen werden dürfen. Da keine der gesuchten Quellen im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge adäquat zwischen verschiedenen Gewichtsklassen unterscheidet, wurde der (zeitlich konstante) Anteil der jeweiligen Klassen an der Gesamtzulassungszahl der schweren Nutzfahrzeuge (SNF > 3,5 t) aus den für Deutschland vorliegenden Daten extrapoliert [BMWK 2023].

Die sich ergebenden Zulassungszahlen der BEV und Hybride (PHEV und HEV) der verschiedenen Fahrzeugklassen sind in Abbildung 3-5 dargestellt. Bei den leichten Nutzfahrzeugen (LNF, < 3,5 t), schweren Nutzfahrzeuge (SNF, > 3,5 t) und Bussen wurden nur vollelektrische Antriebe (BEV) berücksichtigt. Da Fahrzeuge mit Diesel- oder Benzinmotor keinen Einfluss auf die

Zulassungszahlen der BEV und Hybride der verschiedenen Fahrzeugklassen im Modell 2020–2040

Abbildung 3-5



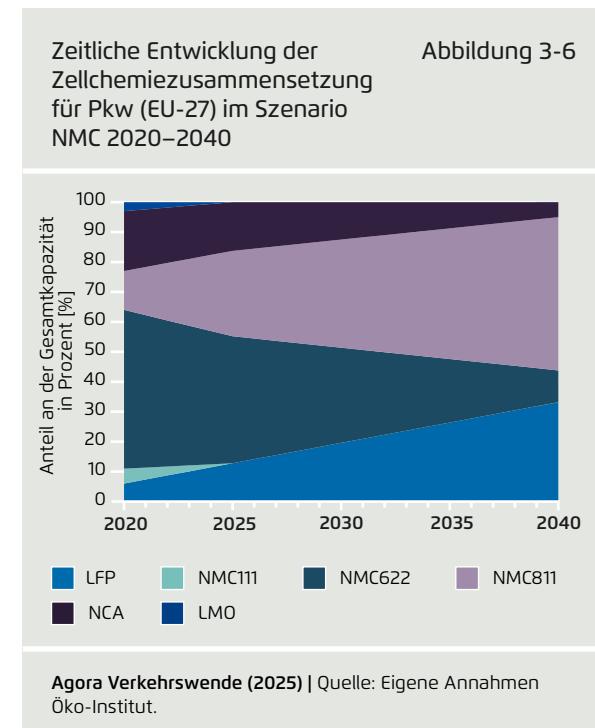
Agora Verkehrswende (2025) | Quelle: ACEA 2024, ELV IA 2023, BMWK 2023.

Rohstoffmengen der hier priorisierten Batterierohstoffe haben, wurden diese jeweils nur für die Berechnung der Gesamtfahrzeugzahl herangezogen und werden im weiteren Verlauf nicht angegeben. Es zeigt sich, dass rein aus Sicht der Stückzahlen Pkw in der EU im Vergleich zu Nutzfahrzeugen den weitaus größten Marktanteil haben. Aufgrund der stark unterschiedlich großen Batteriekapazitäten beeinflussen sie den Rohstoffbedarf jedoch auch unterschiedlich stark.

Die in einem Jahr abgemeldeten Fahrzeuge wurden jeweils aus der Kombination der Anmeldungen in allen Vorjahren und einer Annahme für die Lebenszeitverteilung der Fahrzeugklasse berechnet. Aufgrund der rasanten Fortschritte in der Batterietechnologie wurde davon ausgegangen, dass die Lebenszeit der Antriebsbatterien in den meisten Fällen der Fahrzeuglebensdauer entspricht. Dies wurde in Interviews mit Expert:innen bestätigt. Die Materialzusammensetzung einer LIB mit gegebener Zellchemie und Kapazität wurde den BatPac Modell des Argonne National Laboratory entnommen [BatPac 2022]. Für den alternativen Fall der Lithium-Festkörperbatterie (*solid-state battery, SSB*) wurde die durchschnittliche Zusammensetzung anhand von weiteren Literaturquellen [Betz et al. 2019, Benchmark Minerals 2024c] und Interviews abgeschätzt. Natrium-Ionen-Batterien enthalten, den hier getroffenen Annahmen nach, keinen der hier priorisierten Rohstoffe Lithium, Nickel, Kobalt oder Graphit und machen sich deshalb im Modell nur durch die Einsparung dieser bemerkbar.

3.3.1 Szenario Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NMC)

In diesem Szenario gewinnen im Pkw-Sektor zwar kobalt- undnickelfreie LIB (vor allem Lithium-Eisen-Phosphat, LFP) entsprechend den heute absehbaren Trends weitere Marktanteile – allerdings behaupten nickel- und kobalthaltige LIB (verschiedene Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Chemien im Mix und auch Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid (NCA)) nennenswerte Marktanteile vor allem für Mittel- und Oberklassenfahrzeuge. Dabei setzen sich hauptsächlich die nickelreichen Zellchemien (NMC622⁶ und NMC811) durch. Die bereits heute nur verschwindend

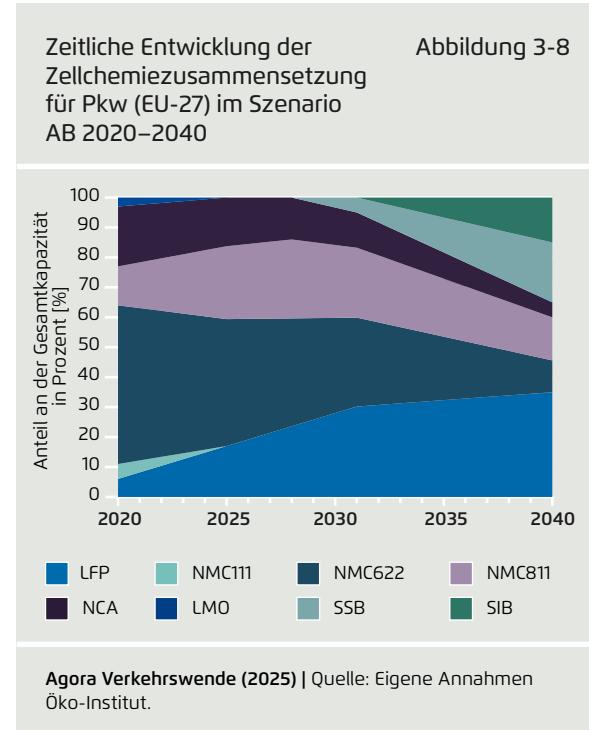
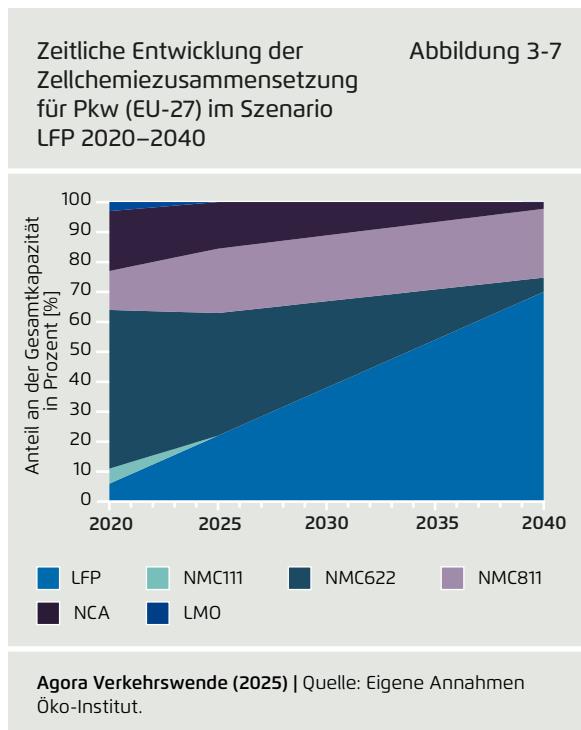


kleine Marktanteile besitzenden Batterien NMC111 und Lithiummanganoxid (LMO) laufen innerhalb weniger Jahre aus (vergleiche Abbildung 3-6). Für leichte Nutzfahrzeuge (LNF) sind die Anteile an das Pkw-Szenario angelehnt, jedoch beschränken sich die betrachteten Kathodenmaterialien hier auf NMC und LFP. Da der Nutzfahrzeugsektor im Allgemeinen preissensitiver ist als der Pkw-Sektor, sind hier die Anteile an LFP etwas größer gewählt als für die Pkw. Im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge werden vermutlich ebenfalls aufgrund der großen Preissensitivität hauptsächlich LFP-Kathoden verbaut, in den schweren Klassen jedoch aufgrund der hohen Fahrzeuggewichte auch immer mehr die leistungsstärkeren NMC-Kathoden benötigt. Aufgrund der schlechten Vorhersehbarkeit wurden für die Nutzfahrzeuge die jeweiligen Anteile der Zellchemien über den Szenariozeitraum konstant gehalten. Die genauen Annahmen zur Zellchemieverteilung der verschiedenen Nutzfahrzeugklassen finden sich in Anhang 7.2.

3.3.2 Szenario Lithium-Eisen-Phosphat (LFP)

In diesem Szenario gewinnen die nickel- und kobaltfreien LIB mit LFP als Kathodenmaterial Jahr für Jahr mehr Marktanteile und sind ab 2035 klar dominierend.

6 Bei NMC-Kathoden geben die drei Zahlen jeweils den Anteil an Nickel, Mangan beziehungsweise Kobalt im Kathodenmaterial an.



Dies geht auf Kosten der Marktanteile nahezu aller weiteren Batteriechemien. Lediglich im wenig preissensitiven dafür sehr leistungssensitiven Oberklassesegment halten sich Anteile von nickelreichen NMC-Kathoden (vergleiche Abbildung 3-7). Für die Nutzfahrzeug-Szenarien wird der zeitliche Verlauf weiter konstant gehalten, aber der Anteil an LFP erhöht.

Szenario Alternative Batterien (AB)

In diesem Szenario werden im Pkw-Sektor steigende Anteile alternativer Batteriespeicher angenommen: Lithium-Festkörperbatterien (*solid-state battery*, SSB) ersetzen vermehrt herkömmliche NMC-Kathoden, lithiumfreie Natrium-Ionen-Batterien (*sodium-ion battery*, SIB) nehmen mit etwas Zeitverzögerung aufgrund des momentan geringeren technischen Entwicklungsstands den LFP-Batterien dann Marktanteile ab. Es wird nicht angenommen, dass LIB bis 2040 komplett aus den Märkten für neu zugelassene Fahrzeuge verschwinden – allerdings werden steigende und relevante Einbußen bezüglich der Marktanteile unterstellt (vergleiche Abbildung 3-8). Im Nutzfahrzeugsektor wird bis 2040 keine relevante Marktdurchdringung der alternativen Batterien erwartet. Hier wird ein Mittel der beiden Szenarien NMC und LFP angenommen.

3.4 Ergebnisse der Szenarien für Antriebsbatterien in der EU-27

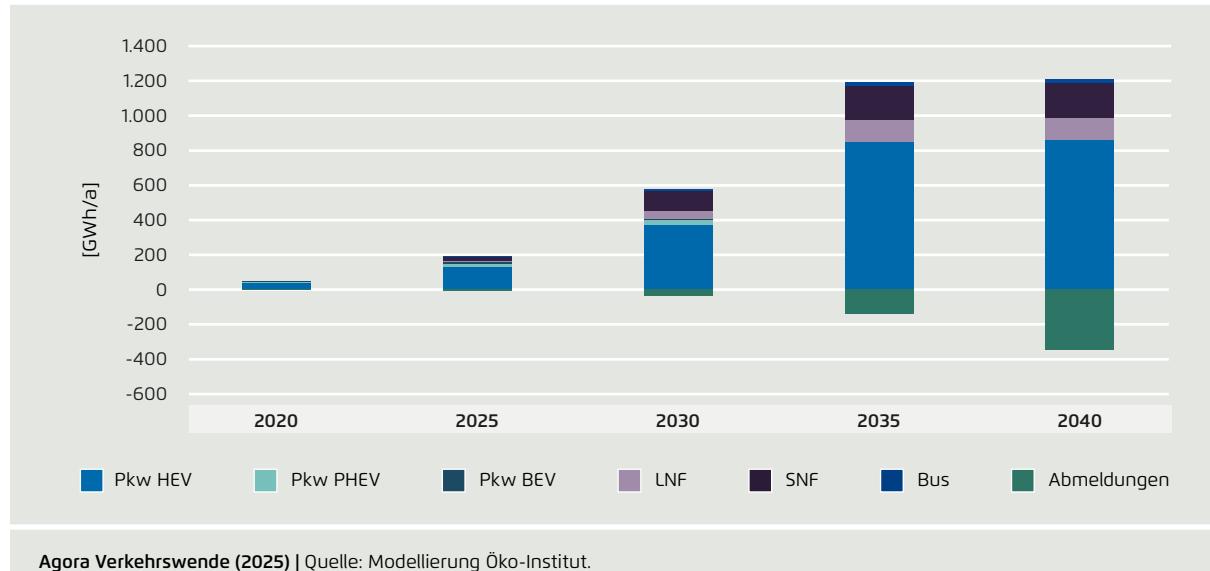
Aus den Annahmen zu den Zulassungszahlen sowie den Batteriegrößen wurde zunächst der jährliche Batteriebedarf in der EU sowie die Rückläufe von Batterien in den Kreislauf in Gigawattstunden (GWh) pro Jahr berechnet. Mit vollständiger Elektrifizierung der neu angemeldeten Pkw hält sich dieser Batteriebedarf ab dem Jahr 2035 konstant auf 1200 GWh im Jahr und ist damit jährlich etwa sechsmal höher als heute. Dies ist in Abbildung 3-9 dargestellt. Es zeigt sich hier, dass die schweren Nutzfahrzeuge trotz verhältnismäßig geringer Stückzahlen (vergleiche Abbildung 3-4) bei weiter voranschreitender Elektrifizierung der Flotten einen nicht unerheblichen Anteil der benötigten Batteriekapazität darstellen. In Summe beläuft dieser sich auf circa ein Viertel der benötigten Gesamtkapazität, wobei die schweren Nutzfahrzeuge mit circa 16 Prozent den größten Anteil haben. Weiter wird ersichtlich, dass bis zum Jahr 2040 bereits relevante Mengen an Traktionsbatterien zurück in den Kreislauf geführt werden und der Rohstoffbedarf damit zumindest in Teilen aus Sekundärmaterial gedeckt werden könnte.

Vergleicht man den berechneten Bedarf mit den in Abschnitt 3.1 angegebenen zukünftigen Produktionskapazitäten an Batteriezellen, fällt erneut auf, dass die Deckung des Bedarfs über die verschiedenen Schritte der Wertschöpfungskette unterschiedlich weit vorangeschritten ist. In Hinblick auf die Zellfertigung scheint es plausibel, dass die bis 2030 benötigten, 600 GWh Batteriekapazität pro Jahr beinahe ausschließlich innerhalb der EU produziert werden. Für das dafür benötigte Anoden- und Kathodenmaterial ist jedoch nach heutigem Ankündigungsstand maximal ein Drittel der benötigten Kapazität zu erwarten (vergleiche Abschnitt 2.1). Die in Abbildung 3-9 ersichtliche Rücklaufmenge von circa 350 GWh pro Jahr, entspricht einem Gewicht von etwas über 2 Millionen Tonnen Batterien, die im Jahr 2040 in der EU recycelt werden könnten. Insbesondere in den letzten fünf Jahren des hier betrachteten Zeitraums 2020 bis 2040 wird sich damit die Rücklaufmenge nochmals verdoppeln. Aufgrund des in Abschnitt 3.2 diskutierten geplanten Aufbaus von Recyclingkapazitäten scheint es durchaus denkbar, dass bis zu diesem Zeitpunkt die Behandlung einer so großen Menge und die Rohstoffrückgewinnung innerhalb der EU möglich sind. Aufgrund der langen Zeitspanne und der momentan sehr volatilen Situation ist darüber jedoch momentan keine abschließende Aussage zu treffen.

Für das Szenario AB sind in Abbildung 3-10 zusätzlich die Anteile der verschiedenen Batterietypen am Gesamtgewicht aller benötigten Batterien aufgetragen. Es zeigt sich hier, dass der Markt zwar auch 2040 noch von herkömmlichen LIB dominiert wird, die alternativen Batterien jedoch im Gewicht und damit im Rohstoffverbrauch einen nicht mehr gänzlich unerheblichen Anteil von ungefähr 25 Prozent einnehmen. Der Anteil der Natrium-Ionen-Batterien (SIB) ist dabei aufgrund der wesentlich geringeren Energiedichte (für die hier angenommenen Batterien knapp 60 Prozent) im Gegensatz zu Lithium-Festkörperbatterien (SSB) aufs Gewicht gesehen deutlich höher, obwohl die Absatzzahlen ähnlich bleiben. Hier ist jedoch auch zu bedenken, dass zwar der Gesamtrohstoffverbrauch von Natrium-Ionen-Batterien (SIB) höher ist, dafür allerdings sämtliche in LIB-Zellen enthaltenen kritische Rohstoffe hier wegfallen. Im Gegensatz zum Bedarf ist in den Rückläufen auf dem hier betrachteten Zeithorizont noch kein Effekt der Einführung alternativer Zellchemien bemerkbar. Dieser wird aufgrund der mittlerweile recht langen Lebensdauern der Batterien (vergleiche Abschnitt 3.3) erst weitaus später auftreten.

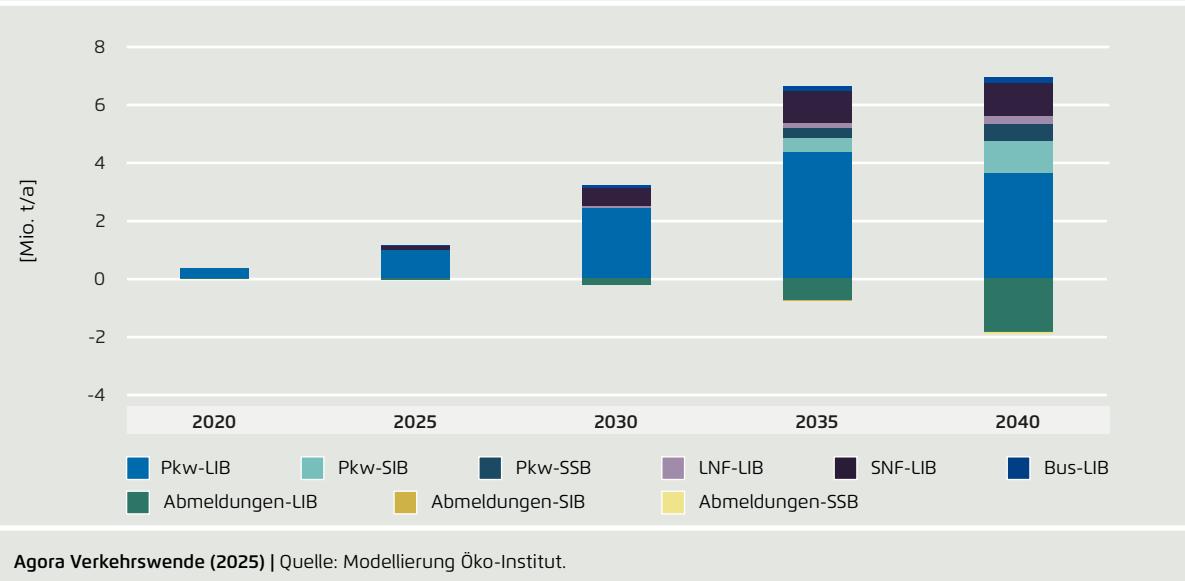
Benötigte Batteriekapazitäten für Antriebsbatterien nach Fahrzeugklassen sowie deren Rückläufe in der EU-27 in GWh/a 2020–2040

Abbildung 3-9



Anteil der verschiedenen Batterietypen am Gesamtgewicht der benötigten Antriebsbatterien im Szenario AB in der EU-27 in Mio. t/a 2020–2040

Abbildung 3-10



Im Folgenden sollen die Auswirkungen der drei verschiedenen Szenarien auf den Rohstoffverbrauch sowie das Sekundärrohstoffpotenzial der vier betrachteten Schlüsselrohstoffe Lithium, Nickel, Kobalt und Graphit analysiert werden. Die Grafiken 3-11 bis 3-14 sind dabei wie folgt aufgebaut: Der zeitliche Verlauf des Rohstoffbedarfs sowie des Rücklaufs (jeweils pro Jahr) für die Jahre 2020 bis 2035 ist in Fünf-Jahres-Schritten jeweils anhand der Ergebnisse des Szenarios NMC verdeutlicht. Für das Zieljahr 2040 dieser Studie sind dann jeweils die Ergebnisse für alle drei Szenarien als Balken nebeneinander gestellt – erst im Jahr 2040 sind relevante Ergebnisunterschiede zwischen den drei Szenarien zu erwarten. Für den Rohstoffrücklauf ist dabei zu beachten, dass es hier jeweils um die prinzipiell in den Batterien enthaltenen Rohstoffe der in einem Jahr abgemeldeten Fahrzeuge geht, ohne dass bereits eine Recyclingeffizienz berücksichtigt wurde – es handelt sich demnach also um das maximale theoretische Sekundärrohstoffpotenzial pro Jahr.

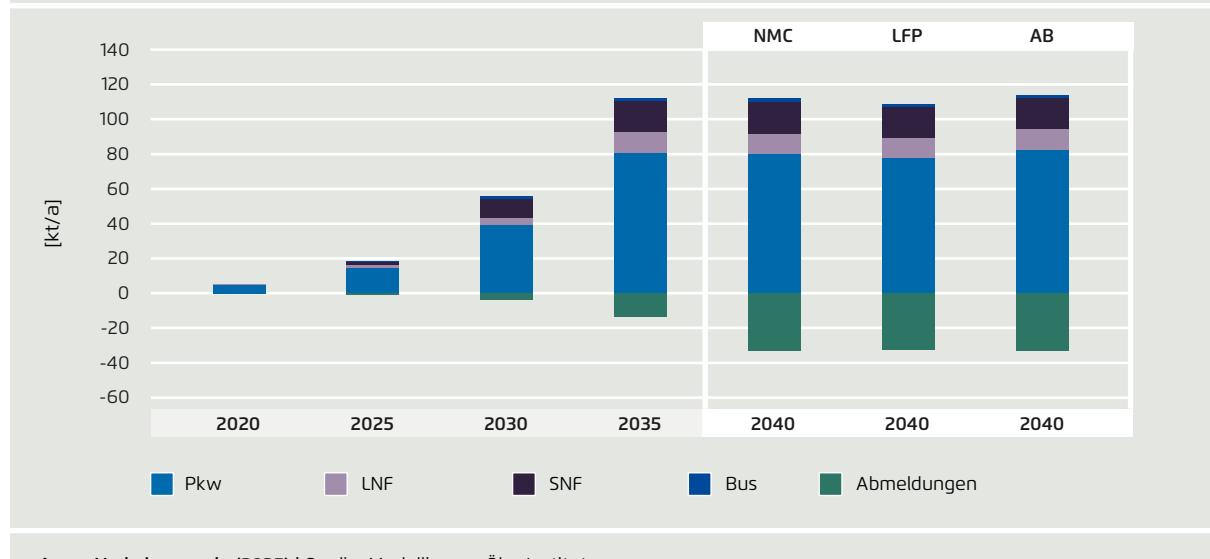
Abbildung 3-11 zeigt den Lithiumbedarf pro Jahr in den drei verschiedenen Szenarien. Analog zu den kaum noch steigenden Neuzulassungen ab 2035 bleibt auch der Gesamtlithiumbedarf ab diesem Jahr im Szenario NMC nahezu konstant und beläuft sich für alle Fahrzeugklassen

kombiniert auf etwa 110 Kilotonnen pro Jahr.⁷ Auch wenn sich die Nutzfahrzeuge aufgrund der stark unterschiedlichen Batteriegrößen stärker bemerkbar machen als in den Anmeldezahlen, bleiben die Pkw der Haupttreiber für den Lithiumbedarf für Traktionsbatterien mit einem Anteil von knapp 70 Prozent. Im Vergleich zwischen den Szenarien für das Jahr 2040 fallen zunächst die geringen Unterschiede auf. Da LIB mit NMC- und LFP-Kathoden mit ähnlichen Lithiumanteilen arbeiten, die den Hauptanteil des Lithiumbedarfs ausmachen, entspricht dies für den Vergleich dieser beiden Szenarien den Erwartungen. Im Falle der alternativen Batterien sind zwei gegenläufige Effekte zu beobachten: Während Natrium-Ionen-Batterien (SIB) komplett ohne Lithium auskommen, ist der Lithiumbedarf bei Lithium-Festkörperbatterien (SSB) aufgrund der Festkörperelektrolyte ungefähr doppelt so hoch als für herkömmliche LIB mit Flüssigelektrolyt. Bei der hier angenommenen ähnlich starken Marktdurchdringung heben sich die Effekte deshalb genau gegenseitig auf. Hier ist jedoch zu beachten,

⁷ Alle Mengenangaben für Lithium, Nickel, Kobalt beziehen sich auf die rein intrinsisch in den Batterien enthaltenen Mengen dieser Metalle – also nicht, wie zum Beispiel in Statistiken häufig zu finden, auf Lithiumcarbonat-Äquivalente (lithium carbonate equivalents, LCE) etc.

Vergleich des Rohstoffbedarfs und Sekundärrohstoffpotenzials für Lithium in den drei betrachteten Szenarien in der EU-27 in kt/a 2020–2040

Abbildung 3-11



Agora Verkehrswende (2025) | Quelle: Modellierung Öko-Institut.

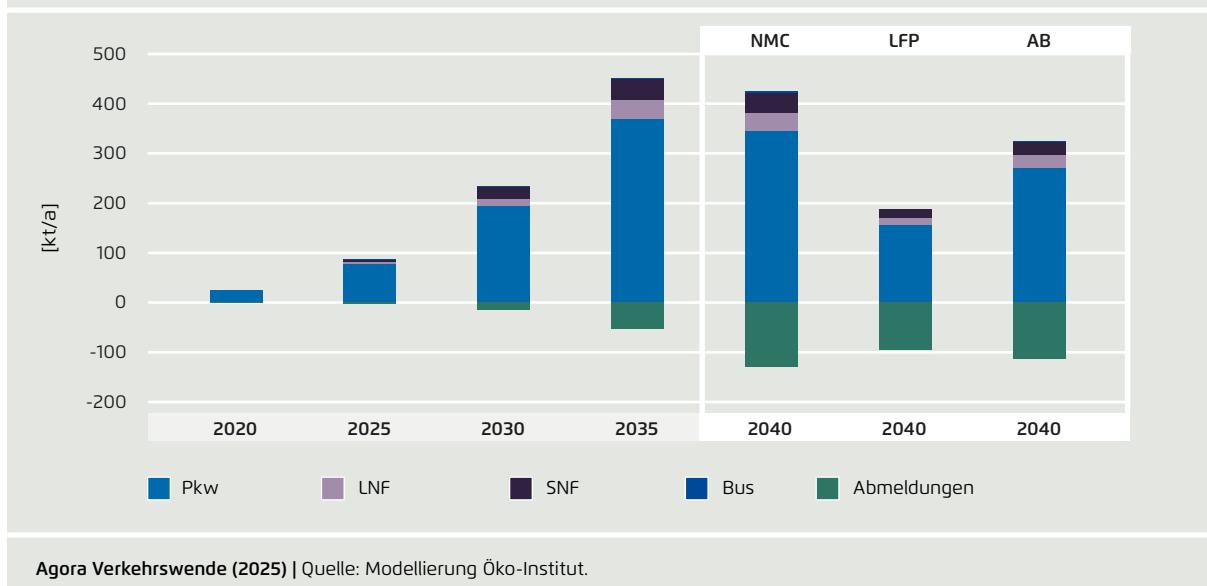
dass eine unterschiedlich starke Marktdurchdringung der beiden Technologien wahlweise zu einem deutlichen Anstieg oder Abfall des Lithiumbedarfs führen könnte. Geht man von der plausiblen Annahme aus, dass alle in Abschnitt 3.1 genannten Projekte zum Lithiumabbau innerhalb Europas bis 2040 die maximale angekündigte Ausbaustufe erreicht haben, was in Summe circa 30 kt/a Lithiumförderung bedeuten würde, könnte demnach zumindest etwas unter 30 Prozent des jährlichen Bedarfs aus europäischen Primärrohstoffquellen gedeckt werden. Zudem besteht die Möglichkeit, dass in einigen der heute noch weniger weit fortgeschrittenen oder nur angekündigten Projekte bis 2040 ebenfalls relevante Mengen gefördert werden und sich diese Zahl noch erhöht. Die Summe der geplanten Anlagen zur Weiterverarbeitung des abgebauten Lithiums übersteigt die der Bergbauprojekte momentan leicht, so dass auch dieser Schritt für den angegebenen Anteil des Bedarfs gesichert sein sollte. Während das Sekundärrohstoffpotenzial bis 2030 sehr gering ist, werden bis 2040 potenziell bereits so viele Fahrzeuge abgemeldet und recycelt, dass zusätzlich die zumindest theoretische Möglichkeit besteht, einen relevanten Anteil des Lithiumbedarfs aus dem Batterierecycling zu decken. In den im Jahr 2040 aus abgemeldeten Fahrzeugen anfallenden Traktionsbatterien sind etwas über 30 Kilotonnen Lithium enthalten, die prinzipiell

wiedergewonnen und aufbereitet werden könnten. Da die Batterieverordnung der EU [BatReg 2023] ab 2031 vorgibt, dass 80 Prozent des in einer Batterie enthaltenen Lithiums stofflich verwertet werden müssen, ist es (unter der Annahme, dass hier hauptsächlich Closed-loop-Recycling betrieben wird) möglich, dass insgesamt mehr als die Hälfte des Lithiumbedarfs im Jahr 2040 aus europäischen Primär- oder Sekundärrohstoffquellen gedeckt werden kann (Sekundärrohstoffpotenzial bei etwa 25%).

Der Nickelbedarf ist für die drei Szenarien in Abbildung 3-12 aufgetragen. Zunächst fällt auf, dass im Szenario NMC der Nickelbedarf nach 2035 leicht zurückgeht und sich 2040 auf etwas über 400 Kilotonnen pro Jahr beläuft. Dies ist damit zu erklären, dass auch in diesem Szenario LFP-Batterien kontinuierlich, wenn auch etwas moderater, Marktanteile dazugewinnen. Bei ungefähr gleichbleibenden Anmeldezahlen zwischen 2035 und 2040 wirkt sich dies minimal dämpfend auf den Nickelbedarf aus. Im Szenario LFP lässt sich der jährliche Nickelbedarf für das Jahr 2040 im Gegensatz zum NMC-Szenario fast halbieren, für das Szenario der alternativen Batterien liegt er zwischen den beiden anderen Szenarien. In allen Fällen deckt die angekündigte Kapazität der wenigen explizit in Angriff genommenen Projekte in der EU zur Rohstoffförderung und Weiterver-

Vergleich des Rohstoffbedarfs und Sekundärrohstoffpotenzials für Nickel in den drei betrachteten Szenarien in der EU-27 in kt/a 2020–2040

Abbildung 3-12



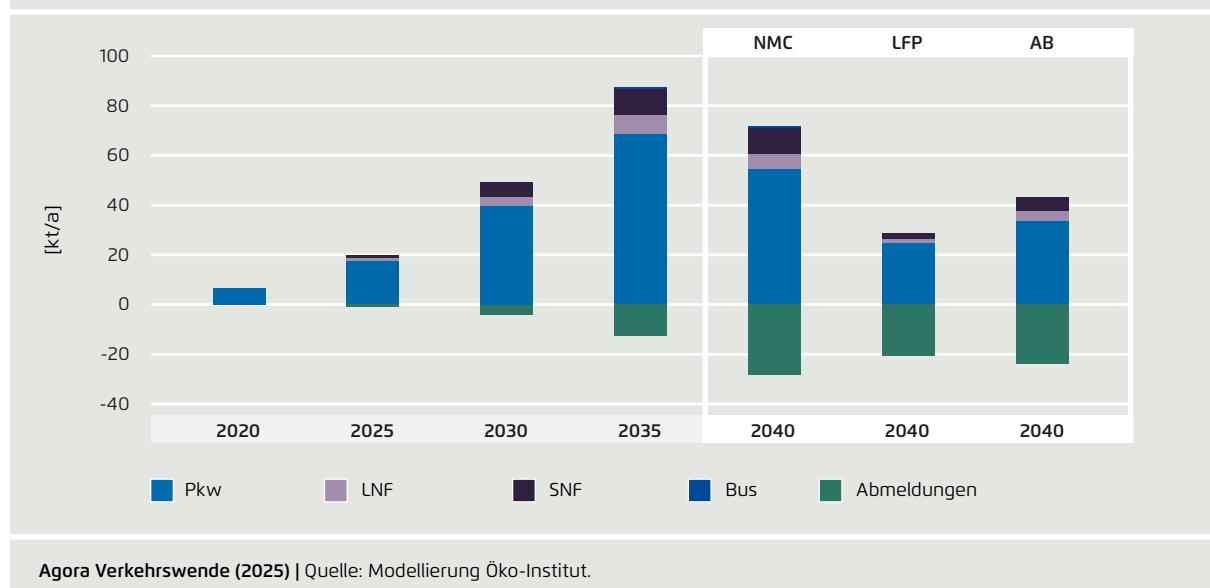
arbeitung von Nickel für die LIB-Wertschöpfungskette nur ein Bruchteil des bis 2040 entstehenden Bedarfs. Hier ist zudem davon auszugehen, dass aufgrund der aktuellen Marktentwicklung hin zu LFP-Zellen Investitionen in Wertschöpfungsketten, die diese Zellchemie nicht betreffen, momentan eher verzögert werden, um den weiteren Verlauf dieses Trends abwarten zu können.

Der verringerte Marktanteil von NMC-Kathoden macht sich im Szenario LFP auch bereits in den Rücklaufmengen für Nickel bemerkbar. Diese betragen im Szenario NMC etwa 110 kt/a am Ende des Betrachtungshorizonts im Jahr 2040 und sinken für Szenario LFP auf unter 100 kt/a ab. Da in diesem Zeitraum der Rücklauf jedoch trotzdem noch durch die heute verbauten LIB geprägt ist, die zu sehr großen Teilen nickelhaltige Kathoden besitzen, sinkt der Bedarf bis 2040 wesentlich stärker als der Rücklauf durch Fahrzeugabmeldungen. Im Szenario NMC beträgt das maximale Sekundärrohstoffpotenzial im Jahr 2040 für Nickel gut 25 Prozent und im LFP-Szenario bis rund 50 Prozent. Das Szenario Alternative Batterien liegt hier erneut zwischen den beiden anderen Szenarien. Das Recycling von Nickel aus End-of-Life-LIB kann also zukünftig definitiv einen signifikanten Beitrag für die Abdeckung der europäischen Wertschöpfungskette leisten.

Für den in Abbildung 3-13 dargestellten Kobaltbedarf verhalten sich die Trends überwiegend recht ähnlich wie bei Nickel. Die Einsparung des jährlichen Kobaltbedarfs zwischen 2035 und 2040 im Szenario NMC ist hier aufgrund des Trends zu nickelreichen NMC-Batterien, die gleichzeitig kobaltärmer sind, zusätzlich zum moderaten Hochlauf der LFP-Zellen noch ausgeprägter als für Nickel. Für Kobalt befindet sich deshalb auch bis 2040 anteilig noch mehr Material im Umlauf, das prinzipiell zurückgewonnen und als Rezyklat wieder in der Batterieherstellung eingesetzt werden kann. Im LFP-Szenario wirken sich sowohl der hohe Marktanteil an LFP-Batterien als auch der fortlaufende Trend zu nickelreichen NMC-Kathoden sehr dämpfend auf den Kobaltbedarf aus, so dass bis circa zwei Drittel der 2040 benötigten Kobaltmenge in Form von Altbatterien in den Kreislauf zurückgeführt werden könnte. Hier ist auffällig, dass die prozentuale Einsparung im Nutzfahrzeugbereich nochmals größer ist als für Pkw. Dies ist damit zu erklären, dass hier angenommen wurde, dass am Ende des Betrachtungszeitraums für die Nutzfahrzeugklassen jeweils ausschließlich LFP und die kobaltärmeren NMC811-Chemie Marktanteile behalten. Für das NMC-Szenario beträgt das maximale Sekundärrohstoffpotenzial für Kobalt immerhin rund 40 Prozent für das Jahr 2040.

Vergleich des Rohstoffbedarfs und Sekundärrohstoffpotenzials für Kobalt in den drei betrachteten Szenarien in der EU-27 in kt/a 2020–2040

Abbildung 3-13



Auch in Szenario AB zeigt sich der reduzierte jährliche Kobaltbedarf auf etwa 70 Prozent des im Vergleich zum Szenario NMC berechneten Werts bei ungefähr gleichbleibendem Rücklauf bis zum Jahr 2040. Hier ist jedoch zu erwähnen, dass der Rücklauf sich bei sinkendem Bedarf entsprechend zeitverzögert ebenfalls zurückentwickeln wird. Nichtsdestotrotz kann aus den Szenarioergebnissen rückgeschlossen werden, dass mit der Rückgewinnung von Kobalt aus End-of-Life-LIB nach allen drei Szenarien ein sehr großer Teil des Kobaltbedarfs in der EU aus sich heute oder in naher Zukunft bereits im Umlauf befindenden NMC-Batterien zukünftig gedeckt werden könnte.

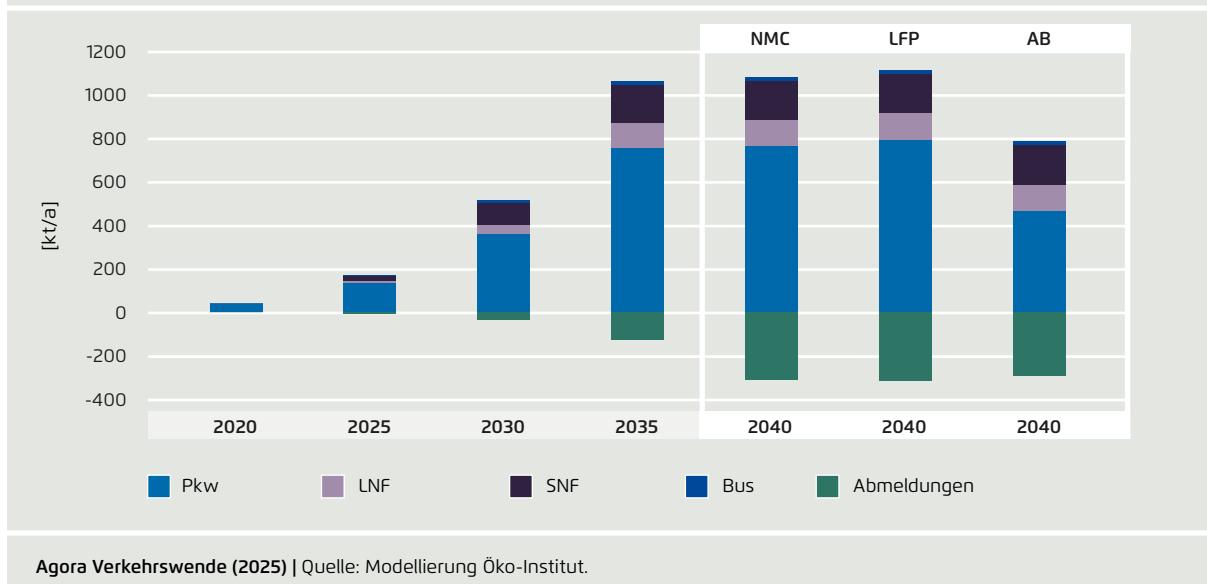
Der letzte betrachtete Schlüsselrohstoff ist Graphit. Die zeitliche Entwicklung des jährlichen Bedarfs sowie des möglichen Rücklaufs aus Fahrzeugabmeldungen ist hierfür in Abbildung 3-14 dargestellt. Zwischen den zwei, auf bereits technisch ausgereiften LIB-Technologien basierenden Szenarien LFP und NMC, lässt sich hier für Graphit im Bedarf sowie im Rücklauf kein Unterschied feststellen. Der Bedarf liegt für beide Szenarien bei etwas über 1000 Kilotonnen im Jahr 2035 und auch 2040. Auch die Verteilung zwischen den verschiedenen betrachteten Fahrzeugklassen ist hier sehr ähnlich. Im Szenario der alternativen Batterietechnologien macht sich jedoch deutlich bemerk-

bar, dass beide betrachteten Batteriealternativen kein Graphit benötigen und daher sind deutliche Einsparungen beim Graphitbedarf auf knapp 800 Kilotonnen im Jahr 2040 erkennbar. Aufgrund der Annahme, dass sich die alternativen Zellchemien auf dem betrachteten Zeithorizont nur im Pkw- und nicht im Nutzfahrzeugbereich etabliert haben, steigt hier der Anteil der Nutzfahrzeuge am Gesamtgraphitbedarf signifikant an.

Ein zusätzlicher Einflussfaktor für den zukünftigen Graphitbedarf in der Batterieherstellung ist der seit einigen Jahren sichtbare Trend hin zur Substitution mit Silizium zur Erhöhung der Energiedichte [Heimes et al. 2021]. Zur Abschätzung der potenziellen Einsparungen von Graphit durch die (teilweise) Ersetzung mit Silizium wurde hier als Sensitivität ein Vergleichsszenario zum Referenzszenario NMC aufgestellt. Bei gleichen An- und Abmeldezahlen und Zellchemieverteilungen wurde angenommen, dass die Ersetzung von 10 Gewichtsprozent Graphit eine Steigerung der Energiedichte von bis zu 40 Prozent mit sich bringt [Benchmark Minerals 2024b]. Um den Rahmen des Möglichen zu untersuchen, wurden jeweils die maximalen in den Quellen genannten Werte angenommen. Die Marktdurchdringung der Siliziumhaltigen Anoden wurde entsprechenden Hochrechnungen von Roland Berger entnommen beziehungsweise daraus

Vergleich des Rohstoffbedarfs und Sekundärrohstoffpotenzials für Graphit in den drei betrachteten Szenarien in der EU-27 in kt/a 2020–2040

Abbildung 3-14

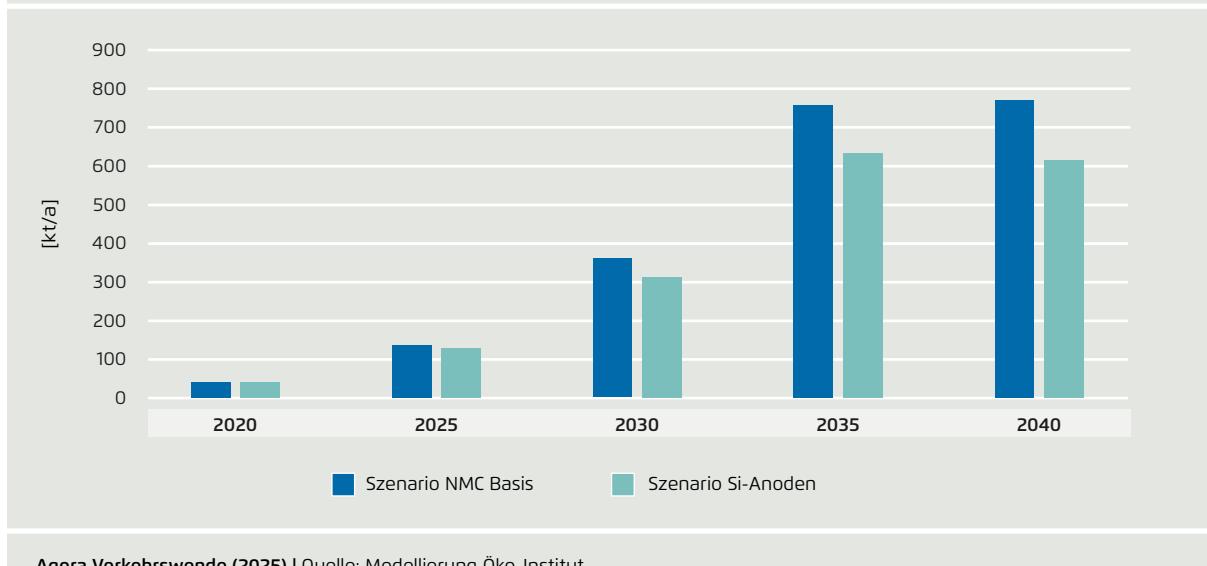


extrapoliert [Roland Berger 2024]. Es ergibt sich das in Abbildung 3-15 dargestellte Bild des Graphitbedarfs im Szenario NMC mit und ohne Berücksichtigung der Substitution von Graphit durch Silizium.

Es zeigt sich hier, dass mit den getroffenen Annahmen im Vergleich zum NMC-Szenario knapp ein Viertel des Gesamtbedarfs an Graphit (im Jahr 2040) eingespart werden könnte. Es ist jedoch zu bedenken, dass dies

Vergleich des Graphitbedarfs im Szenario NMC mit einem Vergleichsszenario der Siliziumsubstitution in der EU-27 in kt/a 2020–2040

Abbildung 3-15



unter Annahme der maximal prognostizierten Markt durchdringung und Effizienz der Fall ist, und zudem nicht eindeutig klar ist, ob sich die Technologie im Pkw- und Nutzfahrzeugsektor gleichermaßen durchsetzen wird. In allen Szenarien liegt der Graphitbedarf weit über dem, was aus den in Abschnitt 3.1 besprochenen Ankündigungen an Produktions- beziehungsweise Abbaukapazitäten an europäischem Primärmaterial zu erwarten ist. Recycling von Graphit aus End-of-Life-LIB wird zwar in zahlreichen Vorhaben für Forschung und Entwicklung adressiert [MERCATOR 2023], allerdings ist aufgrund der hohen Reinheitsanforderungen für Graphit in Batteriequalität viel eher der Einsatz von recyceltem Graphit für andere Graphitprodukte wahrscheinlich.

Insgesamt lässt sich aus den Szenarioergebnissen schlussfolgern, dass der Rohstoffbedarf für die Elektrifizierung des Straßenverkehrs auf dem betrachteten Zeithorizont gegenüber dem heutigen Wert um ein Vielfaches ansteigen wird. Dabei variieren die Auswirkungen der drei betrachteten Szenarien auf die verschiedenen betrachteten Schlüsselrohstoffe stark. Das Grundszenario NMC ist im Bezug auf die hier betrachteten Rohstoffe die rohstoffintensivste Option. Während das Szenario LFP auf den Bedarf an Lithium und Graphit wenig Auswirkungen hat, können hier immerhin mit bereits flächendeckend kommerzialisierten Technologien erhebliche Einsparungen der kritischen Rohstoffe Nickel und Kobalt erreicht werden.

Dies führt auch dazu, dass die Batterien zukünftig weniger werthaltige Materialien enthalten können und sich somit die Herausforderung stellt, wie Batterierecycling wirtschaftlich tragfähig gestaltet werden muss. Die Kombination der alternativen Technologien Natrium-Ionen-Batterie (SIB) und Lithium-Festkörperbatterie (SSB) spart etwas weniger Nickel und Kobalt ein, dafür wird der Graphitbedarf merklich gesenkt. Abgesehen von positiven Perspektiven für den Abbau und die Weiterverarbeitung von Lithium in der EU klaffen in der Versorgung mit Primärmaterial für alle Szenarien noch große Lücken. Dies macht es umso wichtiger, das aufgezeigte erhebliche Sekundärrohstoffpotenzial für Nickel, Kobalt und Lithium aus dem Recycling von LIB frühzeitig effizient nutzbar zu machen. Für die Graphitbereitstellung in Batteriequalität wird Recycling von End-of-Life-LIB jedoch voraussichtlich nur indirekt Entlastungen ergeben, da aus dem Recyclinggraphit andere Graphitprodukte hergestellt werden können.

3.5 Schlussfolgerungen der Analyse zu den Wertschöpfungsketten für den EU-Markt

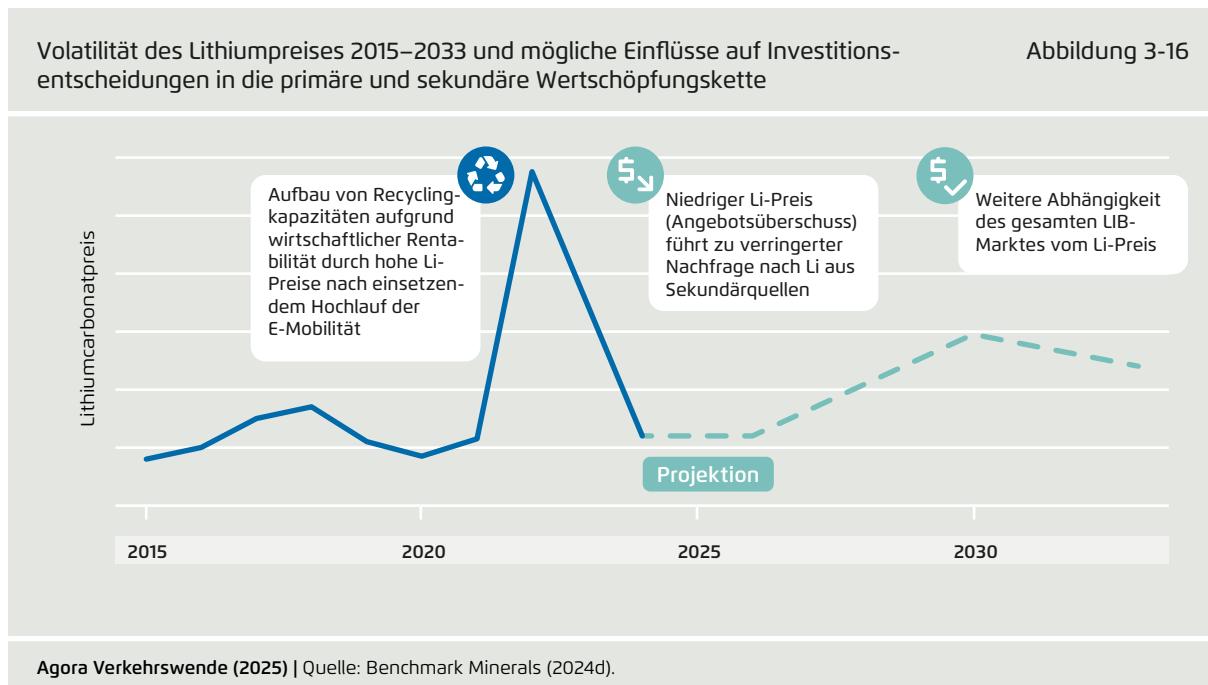
Die umfassende Analyse der aktuellen Situation und der voraussichtlichen Entwicklungen der Wertschöpfungsketten für LIB sowohl aus Primär- als auch Sekundärrohstoffen belegt erhebliche Herausforderungen für Europa. Die Ergebnisse der drei unterschiedlichen aktuellen Szenarien für den Hochlauf der Elektromobilität in der EU-27, die im Projekt abgestimmt und gerechnet wurden, weisen – wie schon andere Studien zuvor – mittel- und langfristig (bis zum Jahr 2040) für Schlüsselrohstoffe wie Lithium, Kobalt, Nickel und Graphit einen erheblichen jährlichen Mehrbedarf gegenüber heute aus. Eingebettet in die globalen Entwicklungen, die ebenfalls – nicht zuletzt vorangetrieben durch starke Akteure aus Asien – massive Wachstums tendenzen für die Batteriemarkte und damit für deren Wertschöpfungsketten aufzeigen, weist Europa noch erhebliche Lücken in den einzelnen Stufen der Wertschöpfungsketten für LIB auf.

Dennoch gibt es auch in Europa Fortschritte, wie die Eröffnung einer ersten Lithiumraffinerie in Deutschland und die signifikanten Unterstützungsleistungen der EU zur Stärkung der heimischen Wertschöpfungsketten zeigen. An dieser Stelle sei nur nochmal beispielhaft auf die strategischen Ziele des Critical Raw Materials Act (CRMA) und die erst kürzlich unter dem Dach des CRMA benannten ersten 47 strategischen Projekte zur Stärkung der Wertschöpfungsketten im Bereich der Primär- und Sekundärrohstoffe in Europa verwiesen. Die Bedeutung der LIB zeigt sich hier darin, dass ein überwiegender Teil dieser 47 strategischen Projekte die Wertschöpfungsketten von Rohstoffen wie Lithium, Kobalt, Nickel und Graphit betreffen.

An dieser Stelle muss auch auf das stets volatile Marktumfeld in Rohstoffmärkten hingewiesen werden, die zum Teil sowohl die Stornierung oder umgekehrt die Forcierung von einzelnen Projekten und die damit verbundenen häufig beträchtlichen Investitionen mit erklären kann. Als Beispiel sei auf die Verlaufskurve für den Lithiumpreis seit 2025 in Abbildung 3-16 verwiesen. Sie illustriert den Zusammenhang zwischen kurzfristig schwankenden Rohmaterialpreisen und langfristigen Investitionsentscheidungen, der so grundsätzlich

Volatilität des Lithiumpreises 2015–2033 und mögliche Einflüsse auf Investitionsentscheidungen in die primäre und sekundäre Wertschöpfungskette

Abbildung 3-16



generell gilt. Dies stellt ein Dilemma dar, denn aufgrund kurzfristig sinkender Preise können Projekte aufgeschoben werden, die einen sehr langen Zeithorizont haben. Die Erschließung neuer Minen beispielsweise dauert Jahre. So können bei steigender Nachfrage nach Batterien und Elektrofahrzeugen, zukünftig wieder temporäre Knaptheiten entstehen, die sich dann wiederum auf die Rohstoffpreise auswirken (vergleiche Agora Verkehrswende 2025).

Ein wesentliches Ergebnis der Szenarien für den Hochlauf der Elektromobilität bis zum Jahr 2040 in der EU-27, die das Öko-Institut im Rahmen dieses Projektes gerechnet und mit dem Begleitkreis nach ausführlicher Diskussion abgestimmt hat, belegen das sehr signifikante Sekundärrohstoffpotenzial durch eine optimierte Kreislaufführung der stetig wachsenden Mengen an End-of-Life-LIB in der EU-27 in den nächsten zehn bis fünfzehn Jahren. Sekundärrohstoffpotenziale zwischen 25 Prozent bis zu 50 Prozent im Falle von Lithium bzw. Nickel und von über 60 Prozent im Falle von Kobalt bis 2040 unterstreichen die strategische Relevanz effizienter Recyclingsysteme für die EU.

In diesem Zusammenhang sind die Fortschritte beim Aufbau von Behandlungskapazitäten von LIB in der EU

und nicht zuletzt in Deutschland positiv hervorzuheben. Dies betrifft aktuell in erster Linie die Anlagen zur Schwarzmasseproduktion (Spokes); die mit erheblich größeren Investitionssummen verbundenen Anlagen zur Weiterverarbeitung (Hubs) müssen nun folgen. Auch hier gibt es in jüngster Zeit nicht zuletzt in Mitteleuropa interessante Aktivitäten von Unternehmen, die Erfolge in den nächsten zwei bis fünf Jahren hier erwarten lassen. Aber wie in praktisch allen Bereichen ist auch beim Recycling von LIB in der EU-27 mit der sehr agilen Konkurrenz von Unternehmen vor allem aus Süd-Korea und China zu rechnen. Die oben beschriebenen Potenziale aus dem Recycling von LIB können für die EU nur zum Tragen kommen, wenn robuste Maßnahmen ergriffen werden, um den Abfluss von Batterien, Zwischenprodukten wie Schwarzmasse oder zurückgewonnenen Rohstoffen durch Export in Nicht-EU-Länder (in erster Linie nach Asien) zu unterbinden.

Im nachfolgenden Kapitel wird unter Berücksichtigung aller bisher geschilderten Ergebnisse zu den Wertschöpfungsketten die Perspektiven für einen optimierten LIB-Kreislauf in der EU-27 entwickelt – mit Schwerpunkt auf die Ausarbeitung der möglichen Vor- und Nachteile denkbarer Geschäftsmodelle für das Recycling von LIB.

4 | Perspektiven für einen optimierten Lithium-Ionen-Batterie-Kreislauf in der EU

Im folgenden Kapitel werden vier idealtypische Varianten von Sammelsystemen für Lithium-Ionen-Batterien (LIB) analysiert. Die dafür notwendigen Informationen und Einschätzungen wurden unter anderem durch direkte Interviews und Diskussionen mit fünf verschiedenen Fahrzeugherstellern (OEMs, *original equipment manufacturers*), einer Reihe von Recyclingunternehmen sowie Akteuren aus Industrieverbänden, Beratungsunternehmen und Nichtregierungsorganisationen zusammengetragen.

Bei der Ausarbeitung dieser vier unterschiedlichen Varianten für Sammelsysteme wird vorausgesetzt, dass nationale Gesetzgebungen in den einzelnen Mitgliedstaaten der Europäischen Union (EU) keine dieser Varianten grundsätzlich ausschließen. OEMs könnten demnach auch in Eigenverantwortung mit einem eigenen System agieren.

Im Verlauf der weiteren Ausführungen wird erläutert, dass OEMs Sekundärmaterial entweder von Recyclingunternehmen beziehen oder die Batterien in eigenen Anlagen selbst zu Sekundärmaterial verarbeiten. Theoretisch wäre es zwar möglich, dass ein OEM eine komplette Produktionslinie für die Herstellung eigener Batterien entwickelt, in der Praxis jedoch werden solche Batterien in der Regel entweder als Komplettprodukt von einem Drittanbieter bezogen oder in Form einzelner Zellen, die der OEM dann zur Endfertigung von Lithium-Ionen-Batterien verwendet. Es ist eher nicht zu erwarten, dass OEMs das recycelte Material physisch selbst direkt verwenden. Stattdessen wird dieses zur Einhaltung der in der EU-Batterieverordnung festgelegten Recyclinganteilquoten zugekauft.

In den letzten Jahren wurde die europäische Batterie-richtlinie (2006/66/EG) überarbeitet und im Jahr 2023 durch die neue Batterieverordnung [BatReg 2023] ersetzt. Diese neue Verordnung enthält mehrere neue Bestimmungen, die die Automobilindustrie dazu verpflichten, sich auf deren Einhaltung vorzubereiten. Die Überarbeitung der Altfahrzeugrichtlinie (2000/53/EG oder ELV-Richtlinie) ist ebenfalls zurzeit im Gange. Obwohl der Prozess noch nicht abgeschlossen ist, wurde 2023 ein Vorschlag für eine neue Verordnung für Altfahrzeuge veröffentlicht, der voraussichtlich Veränderungen für die Verwertung von Altfahrzeugen mit sich bringen wird. Wie bisher müssen OEMs ihren

erweiterten Herstellerverpflichtungen nachkommen, um sicherzustellen, dass zurückgenommene Fahrzeuge am Ende ihrer Lebensdauer gemäß den geltenden Rechtsvorschriften behandelt werden. Neue Bestimmungen in beiden Rechtsrahmen verlangen jedoch, dass die Branche ihre derzeitige Struktur überdenkt.

Obwohl noch nicht rechtskräftig verabschiedet, sieht Artikel 24 Absatz 2 des Verordnungsvorschlags über Kreislaufwirtschaftsanforderungen für die Konstruktion von Fahrzeugen und die Entsorgung von Altfahrzeugen [ELVRegProp 2023] vor, dass die Übergabe eines Altfahrzeugs an eine zugelassene Demontageanlage (ATF, *authorised treatment facility*) für den letzten Besitzer kostenlos sein muss – es sei denn, dem Altfahrzeug fehlen bestimmte Komponenten oder Bauteile. Die einzige Ausnahme von dieser Regel bildet die Antriebsbatterie von Elektrofahrzeugen: Sie kann theoretisch vor der Übergabe eines Altfahrzeugs an eine zugelassene Demontageanlage ausgebaut werden. Ansonsten ist die ATF verpflichtet, die Batterie auszubauen und einer getrennten Behandlung zuzuführen. Die Möglichkeit, dass die Antriebsbatterie von anderen Betreibern als der ATF aus dem Fahrzeug ausgebaut werden kann, ergibt sich aus der Batterieverordnung.

Artikel 61 Absatz 1 der Batterieverordnung [BatReg 2023] betrifft die Sammlung bestimmter Altbatterien und verpflichtet die Hersteller unter anderem dazu, Antriebsbatterien aus Elektrofahrzeugen kostenlos zurückzunehmen und deren getrennte Sammlung sicherzustellen. Zudem ist festgelegt, dass solche Batterien von Rücknahmesystemen und Sammelsystemen, einschließlich der folgenden Sammelstellen, angenommen werden müssen:

- a) Händler von Elektrofahrzeugsbatterien gemäß Artikel 62 Absatz 1;
- b) Wirtschaftsakteure, die Elektrofahrzeugsbatterien wiederaufarbeiten oder umnutzen;
- c) Behandlungsanlagen gemäß Artikel 65, in deren Geschäftstätigkeit Elektrofahrzeugsbatterien anfallen;
- d) Behörden oder in ihrem Namen handelnde Dritte, die gemäß Artikel 66 Abfallbewirtschaftungsmaßnahmen durchführen.

Ob es in allen Mitgliedstaaten möglich sein wird, Antriebsbatterien an jede dieser Sammelstellen zurückzugeben, oder ob die Rückgabe in jedem Land unter-

schiedlich gehandhabt werden wird, ist noch nicht absehbar.

Ein weiterer Aspekt von Artikel 61 betrifft Organisationen für Herstellerverantwortung (PROs, *producer responsibility organisations*): „Die Mitgliedstaaten können Vorschriften erlassen, wonach [...] Elektrofahrzeugbatterien von den in Unterabsatz 1 Buchstaben a bis d genannten Personen oder Stellen nur gesammelt werden dürfen, wenn diese mit den Herstellern beziehungsweise mit den Organisationen für Herstellerverantwortung, die gemäß Artikel 57 Absatz 1 benannt wurden, einen Vertrag geschlossen haben.“

Damit haben die Mitgliedstaaten die Möglichkeit, PROs verpflichtend einzuführen. Dies erhöht die Unsicherheit der OEMs hinsichtlich der Frage, welche Geschäftsmodelle sie in Zukunft in den einzelnen Mitgliedstaaten entwickeln sollen. Für OEMs außerhalb der EU, die lediglich in die EU exportieren und mit den Kreislaufwirtschaftsmärkten in den Mitgliedstaaten weniger vertraut sind, stellt dies eine noch größere Herausforderung dar. Darüber hinaus legt Artikel 8 der Batterieverordnung [BatReg 2023] Recyclinganteilsziele für bestimmte Industriebatterien, Batterien für Elektrofahrzeuge und Fahrzeugstarterbatterien (SLI-Batterien, *starting, lighting, ignition*) fest. Im Folgenden wird der Einfachheit halber ausschließlich auf Antriebsbatterien für Elektrofahrzeuge Bezug genommen.

Artikel 8 Absätze 2 und 3 legen verbindliche Ziele für den Mindestanteil von Kobalt, Lithium oder Nickel in Batterien fest. Ab dem 18. August 2031 müssen 16 Prozent des in den aktiven Materialien einer Elektrofahrzeugbatterie enthaltenen Kobalts und jeweils 6 Prozent des enthaltenen Lithiums und Nickels aus Batterieherstellungsabfällen oder aus Abfällen von Endverbrauchern (das heißt aus dem Batterieabfallmanagement) stammen. Ab dem 18. August 2036 sind höhere Ziele vorgesehen: 26 Prozent für Kobalt, 12 Prozent für Lithium und 15 Prozent für Nickel.

Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich die Automobilindustrie derzeit mit der Frage, wie sie sich organisieren kann, um die Rücknahme und getrennte Abfallbehandlung von Elektrofahrzeugbatterien sicherzustellen – nicht nur, um die Anforderungen der erweiterten Herstellerverantwortung (EPR, *extended producer*

responsibility) gemäß EU-Batterieverordnung zu erfüllen, sondern auch, um eine möglichst stabile Versorgung mit Sekundärrohstoffen⁸ für die eigenen Wertschöpfungsketten sicherzustellen. Eine zentrale Aufgabe ist in jedem Fall die Erfüllung der formalen und komplexen Berichtspflichten an die jeweils zuständigen nationalen staatlichen Stellen, um die Einhaltung der Vorgaben der EU überprüfbar zu machen. Dabei handelt es sich nicht zuletzt um die Übermittlung von jährlichen Daten.

Im Folgenden wird eine Reihe möglicher Geschäftsmodelle vorgestellt, die zu diesem Zweck eingesetzt werden könnten. Ihre Eignung wird aus verschiedenen Perspektiven beleuchtet.

Um zu erörtern, welche Geschäftsmodelle sich für die Sammlung und Behandlung von Elektrofahrzeugbatterien und die Beschaffung von sekundärem Kobalt, Lithium und Nickel entwickeln könnten, wurden Informationen über die Aktivitäten verschiedener OEMs recherchiert und direkte Gespräche mit OEMs und anderen Akteuren der Wertschöpfungskette geführt. Auf dieser Grundlage wurden mehrere mögliche Modelle konzipiert. Dabei wurden die an jedem Modell beteiligten Akteure, die grundlegenden Flüsse von Batterien und Materialien zwischen diesen sowie die jeweiligen Vorteile und Nachteile berücksichtigt. Diese Modelle wurden am 15. April 2025 in Berlin im Rahmen einer Begleitkreissitzung mit verschiedenen Akteuren diskutiert, um weitere Fragen zu klären und das Verständnis für die praktische Umsetzbarkeit der einzelnen Modelle zu vertiefen. In den Unterkapiteln werden vier potenzielle Geschäftsmodelle vorgestellt und diskutiert, die die Ergebnisse dieses Prozesses zusammenfassen.

4.1 Recycling-Aktivitäten von Fahrzeugherrstellern

In den letzten Jahren haben mehrere Fahrzeugherrsteller (OEMs) Initiativen gestartet, die sich auf das Recycling von Antriebsbatterien und die Rückgewinnung von Materialien für diese Batterien konzentrieren. Grund

8 In Bezug auf Batterien handelt es sich hier um Kobalt, Lithium und/oder Nickel. Andere Sekundärrohstoffe wie beispielsweise Stahl werden im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet.

dafür ist unter anderem, dass das großtechnische Recycling von Antriebsbatterien in Europa noch nicht vollständig als System etabliert ist (siehe Kapitel 3). Durch den Aufbau eigener Recyclingkapazitäten ergeben sich für OEMs aus technologischer und ökonomischer Sicht wertvolle Lernkurven. Gleichzeitig tragen Antriebsbatterien einen erheblichen Anteil zum Fahrzeuggewicht bei, sodass deren Abfallbewirtschaftung eine wichtige Rolle bei der Einhaltung der gewichtsbasierten Ziele für Wiederverwendung, Recycling und Verwertung von Alt-fahrzeugen spielt.⁹ Für viele OEMs sind solche Initiativen zudem ein weiterer Schritt zur Umsetzung ihrer erklärten Strategien zur Förderung der Kreislaufwirtschaft im Fahrzeuggbereich – Strategien, die mit den Unternehmens- und den Nachhaltigkeitszielen verknüpft sind. Angesichts der begrenzten Kapazitäten und der möglichen Durchsätze der ersten Anlagen, die von OEMs selbst entwickelt und betrieben werden (vergleiche Kapitel 3), scheint die Motivation der OEMs für die Entwicklung des Batterierecyclings derzeit weniger in der Deckung des Bedarfs an Sekundärmaterial zu liegen, sondern vielmehr im Aufbau von Erfahrungswerten. Allerdings könnten die Anlagen auch dafür genutzt werden, eigene Produktionsabfälle zu recyceln und somit bestimmte Stoffkreisläufe intern zu schließen.

Im Jahr 2021 hat Volkswagen (VW) in Salzgitter eine Pilotanlage zur Entwicklung eines Batterierecyclingverfahrens eröffnet. Die Anlage zielt darauf ab, bei der Verarbeitung der OEM-Batterien eine Recyclingeffizienz von bis zu 90 Prozent zu erreichen. Der Prozess umfasst mechanische Behandlungsschritte. Die angelieferten Batterien werden zunächst entladen und zerlegt. In dieser Phase können Aluminium aus den Gehäusen sowie Kupferkabel und Kunststoffe zurückgewonnen werden. Die verbleibenden Batteriemodule werden anschließend unter Schutzgasatmosphäre zerkleinert und verschiedenen Sortier- und Trocknungsprozessen unterzogen. Nach mehreren Prozessen entsteht Schwarzmasse, die Graphit, Lithium, Kobalt, Mangan und Nickel enthält. Diese wird zur hydrometallurgischen Aufbereitung an eine Partneranlage weitergeleitet, wo die Wertstoffe ohne Qualitäts-

verluste zurückgewonnen werden [VW Autobrander AG 2021]. Die Anlage in Salzgitter ist zunächst auf das Recycling von bis zu 3.600 Batteriesystemen pro Jahr ausgelegt, was rund 1.500 Tonnen entspricht. Sie verarbeitet Altbatterien und -module und könnte theoretisch mit zunehmender Zahl von ausgedienten Elektrofahrzeugen auf die Verarbeitung großer Mengen ausgebaut werden [Volkswagen AG 2024].

Mercedes Benz hat im süddeutschen Kuppenheim eine Batterierecyclinganlage mit integriertem mechanisch-hydrometallurgischem Verfahren eröffnet. Die Betreiber geben an, dass die Anlage eine Rückgewinnungsrate von über 96 Prozent erreicht und Lithium, Kobalt und Nickel zurückgewinnt. Diese Stoffe können in der Produktion neuer Batterien für Fahrzeuge des OEMs verwendet werden. In diesem Sinne deckt die Anlage sowohl die mechanischen Phasen der Demontage, Entladung und Zerkleinerung, Sortierung und Trocknung als auch die hydrometallurgischen Phasen ab, in denen Lithium, Kobalt und Nickel in Batteriequalität zurückgewonnen werden. Die Anlage hat eine Kapazität von 2.500 Tonnen pro Jahr; die zurückgewonnenen Materialien können zur Herstellung von 50.000 Modulen für die Elektrofahrzeuge der OEMs verwendet werden [Mercedes-Benz 2024].

Neben der bereits erwähnten Partnerschaft mit SK Te (siehe Kapitel 3.2.5) entwickelt die BMW Group im niederbayerischen Landkreis Straubing-Bogen eine Batterierecyclinganlage, die als *Cell Recycling Competence Centre (CRCC)* bezeichnet wird. Der Bau der Anlage soll in der zweiten Hälfte des Jahres 2025 beginnen. Geplant ist, sowohl Batterieherstellungsabfälle als auch komplett Batteriezellen direkt zu recyceln. Das dabei zum Einsatz kommende Direktrecyclingverfahren ist eine Eigenentwicklung der BMW Group und stellt eine mechanische Form des Recyclings dar. Dabei werden Batterieherstellungsabfälle und Batteriezellen in einzelne Bestandteile zerlegt, die anschließend direkt für die Herstellung neuer Batterien für die Elektrofahrzeuge des OEMs verwendet werden können – ohne zuvor zu Ausgangsstoffen aufbereitet werden zu müssen. Die Anlage soll nach Inbetriebnahme jährlich eine zweistellige Tonnage an Batteriezellenmaterial recyceln. Der Prozess ist laut BMW weniger energieintensiv als die gängigeren chemischen und thermischen Recyclingverfahren. Die Entwicklung der Anlage ist Teil der Batteriezellenstrategie der BMW Group, im Rahmen derer bereits eine Fertigungsstrecke für

9 Artikel 7 der ELV-Richtlinie [ELVD 2000] schreibt vor, dass Fahrzeuge zu mindestens 85 Prozent ihres Gewichts wiederverwendet und/oder recycelt werden und zu mindestens 95 Prozent ihres Gewichts wiederverwendet und/oder verwertet werden müssen..

Batteriezellen eingerichtet wurde. Diese soll direkt an das neue CRCC angeschlossen werden. Die Strategie steht im Zusammenhang mit dem Ziel des OEM, die Kreislaufwirtschaft seiner Aktivitäten zu stärken [Marxt 2025].

Vor einigen Jahren ging Renault im Rahmen seiner Strategie zur Sicherung einer stabilen Versorgung mit verantwortungsvoll gewonnenen Batteriematerialien eine Partnerschaft mit Veolia (Demontage und Recycling von LIB mittels eines hydrometallurgischen Verfahrens) und Solvay (chemische Gewinnung von Batteriematerialien) ein. Ziel der Zusammenarbeit war die Gewinnung hochreiner Metalle, die in neuen Batterien wiederverwendet werden können. Zuletzt befand sich das Projekt in der experimentellen Phase, in der eine vorindustrielle Demonstrationsanlage aufgestellt werden sollte [Renault Group 2021]. Weitere Schritte wurden danach jedoch nicht mehr unternommen [Scheuermann 2024].

Stellantis und Orano haben ebenfalls 2023 eine Zusammenarbeit begonnen, die auf das Recycling von Altbatterien aus Elektrofahrzeugen und Produktionsabfällen („Schrott“) aus Gigafabriken in Europa und Nordamerika ausgerichtet ist. Ziel ist es, Stellantis den Zugang zu recyceltem Kobalt, Nickel und Lithium zu sichern [Stellantis 2023].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass viele europäische OEMs in irgendeiner Form Recyclingkapazitäten aufzubauen, um sich zumindest perspektivisch den Zugang zu recycelten Materialien zu sichern. Ob diese Anlagen in kleinem Maßstab bleiben und eher dem Zweck dienen, Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen Batteriedesign und Recycling zu gewinnen, oder ob sie ausgebaut werden, um in Zukunft eine größere Unabhängigkeit bei der Beschaffung von Batteriematerialien zu erreichen, ist noch offen. Klar ist jedoch, dass die OEMs die Notwendigkeit erkennen, proaktiver vorzugehen, um die Rezyklateinsatzquoten gemäß der EU-Batterieverordnung einhalten zu können.

Diese Erkenntnis hat wahrscheinlich nicht nur mit den Entwicklungen in der EU zu tun. Auch in China wurden ähnliche Richtlinien entwickelt, darunter eine erweiterte Herstellerverantwortung, die Hersteller zur Sammlung von Altbatterien verpflichtet. Zudem hat China eine Plattform eingeführt, die Batterien während ihrer gesamten Lebensdauer verfolgt und so zusätzlich

sicherstellt, dass Batterien am Ende ihrer Lebensdauer gesammelt werden. Für das Recycling hat China freiwillige Rückgewinnungsziele für Lithium, Kobalt, Nickel und Mangan festgelegt – in Anlehnung an die Zielvorgaben der EU-Batterieverordnung [ICCT et al. 2023].

Darüber hinaus errichten OEMs bislang zwar nur kleine Recyclinganlagen in den jeweiligen Mitgliedstaaten, in denen sie tätig sind. Aus dieser Analyse geht jedoch klar hervor, dass sie zur Einhaltung der EU-Batterieverordnung und der künftigen Altfahrzeugverordnung die Rücknahme und das Recycling von Batterien in allen EU-Mitgliedstaaten organisieren müssen. Es erscheint unwahrscheinlich, dass in allen Ländern das gleiche Modell zum Einsatz kommt.

Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass die Mitgliedstaaten gemäß Artikel 61 Absatz 1 der EU-Batterieverordnung beschließen könnten, eine Organisation für Herstellerverantwortung (*PRO, producer responsibility organisation*) als obligatorisches Sammel- und Behandlungssystem in ihrem Land einzurichten. Da es sich hierbei um eine Kann-Bestimmung handelt, ist es unwahrscheinlich, dass diese Regelung europaweit einheitlich umgesetzt wird.

Zwar wäre es für OEMs effizienter, ein einziges System für die erweiterte Herstellerverantwortung in der gesamten EU zu etablieren, doch erscheint dies angesichts der Vielzahl bereits bestehender Systeme für die Behandlung von Gerätebatterien derzeit unwahrscheinlich. Viel wahrscheinlicher ist, dass zumindest einige dieser bestehenden Systeme weiterentwickelt werden, um ihre Aktivitäten auf das Recycling von Antriebsbatterien auszuweiten.

4.2 Geschäftsmodelle für das Sammeln und das Recycling von LIB

Auf Grundlage der Erkenntnisse zu den Aktivitäten der OEMs und des Austauschs mit den verschiedenen Interessengruppen wurden vier Konzepte für mögliche Geschäftsmodelle zur Organisation des Recyclings von LIBs entwickelt, die im Folgenden vorgestellt und diskutiert werden:

- Variante 1: Fahrzeughersteller betreibt eigenes System (Einzel-OEM)

- Variante 2: Mehrere Fahrzeughersteller betreiben eigenes System (Multi-OEM)
- Variante 3: Organisation für Herstellerverantwortung betreibt System ohne eigenen Recycler (PRO ohne Recycler)
- Variante 4: Organisation für Herstellerverantwortung betreibt System mit eigenem Recycler (PRO mit Recycler)

Im Folgenden wird jedes Modell erläutert und vereinfacht grafisch dargestellt. Die Materialströme bestehen entweder aus Altbatterien oder aus Stoffen, die aus der Abfallbehandlung der Batterien gewonnen werden. Bei den Stoffen handelt es sich entweder um Schwarzmasse, die noch aufbereitet werden muss, oder um wiedergewonnene Materialien in Batteriequalität, die zur Herstellung neuer Batterien verwendet werden können.

Nach Artikel 61 Absatz 1 der Batterieverordnung [Bat-Reg 2023] gibt es mehrere Quellen, aus denen Batterien zur Verarbeitung und zum Recycling gesammelt werden können. Neben Zerlegern oder autorisierten Demontageanlagen (ATF, *authorised treatment facility*) kommen dafür auch Batterievertreiber, -aufbereiter und -wiederverwerter sowie kommunale Sammelstellen in Frage. ATF bezieht sich in den Modellen darüber hinaus sowohl auf Demontagebetriebe, die Verträge mit dem jeweiligen OEM haben (Vertragswerkstätten), als auch auf unabhängige Demontagebetriebe. Das gilt umso mehr, als einige Mitgliedstaaten gemäß Artikel 61 Absatz 1 der Batterieverordnung beschließen können, PRO als obligatorische Sammel- und Behandlungssysteme in ihrem Land einzurichten.

Gemäß Artikel 61 Absatz 2 der Batterieverordnung [Bat-Reg 2023] müssen die Rücknahmesysteme für Elektrofahrzeugbatterien eines bestimmten OEMs das gesamte Hoheitsgebiet eines Mitgliedstaats abdecken. Es ist daher davon auszugehen, dass das gewählte Geschäftsmodell mindestens in einem Mitgliedstaat zur Anwendung kommt. Grenzüberschreitende Systeme wären zwar theoretisch möglich, doch deutet der Austausch mit OEMs darauf hin, dass diese aufgrund unterschiedlicher nationaler Vorgaben und variierender Marktbedingungen zunächst eher die Ausnahme bleiben werden.

Die grenzüberschreitende Verbringung von Altbatterien oder daraus resultierenden Abfallfraktionen wird zusätzlich durch die Verordnung (EU) 2024/1157 über

die Verbringung von Abfällen erschwert. Zwar können bestimmte Abfälle und Abfallfraktionen zwischen Mitgliedstaaten zur Verwertung (oder Beseitigung) verbracht werden, doch müssen solche Verbringungen rückverfolgbar sein und im Vorfeld ein Notifizierungs- und Genehmigungsverfahren durchlaufen. Mit anderen Worten: Betreiber, die solche Transporte organisieren, benötigen vorab die Zustimmung aller Behörden der betroffenen Länder (Herkunfts- und Bestimmungsland, aber auch Transitländer) [EC 2024]. Da die Verordnung (EU) 2024/1157 kürzlich geändert wurde und die meisten neuen Bestimmungen erst ab Mai 2026 gelten, ist es noch zu früh, um abschätzen können, wie sich die Änderungen auf den Transport von Altbatterien und damit verbundenen Abfallfraktionen auswirken könnten.

4.2.1 Variante 1: Fahrzeughersteller betreibt eigenes System (Einzel-OEM)

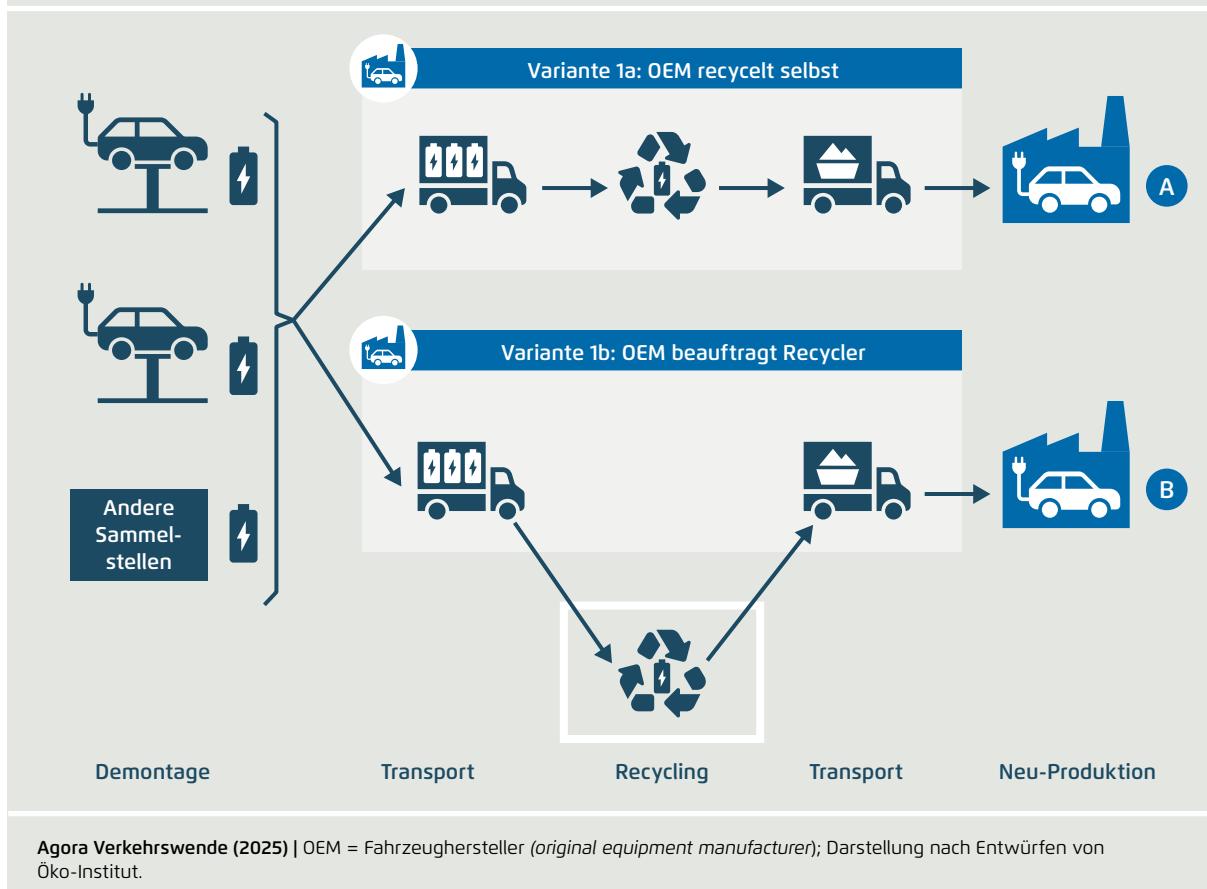
Das erste Geschäftsmodell beruht darauf, dass ein OEM die Batterieentsorgung eigenständig organisiert (siehe Abbildung 4-1). Der OEM kann entweder den gesamten Prozess – von der Abholung der Batterien bei verschiedenen Demontagebetrieben oder Sammelstellen bis zum Recycling – selbst übernehmen (Variante 1a) oder einen Dritten damit beauftragen, das Recycling abzuwickeln (Variante 1b); in diesem Fall spricht man von Recycling als Dienstleistung (*recycling as a service*).

Beim Recycling als Dienstleistung übernimmt der Dienstleister formal die vollständige Verantwortung für Sammlung, Demontage und Recycling der Batterien des jeweiligen OEMs. Das erspart dem OEM die Beauftragung verschiedener an dem Prozess beteiligter Akteure (zum Beispiel Demontagebetriebe oder andere Sammelstellen, Logistikdienstleister, Recycler). Obwohl derselbe Dienstleister seine Leistungen auch anderen OEMs anbieten kann (und dabei von einer höheren Effizienz aufgrund von Skaleneffekten profitieren könnte), bleiben die Systeme formell getrennt. Sämtliche anfallenden Daten müssten separat verwaltet werden. Die formale Berichtspflicht an die zuständige nationale Stelle obliegt sowohl in Variante 1a als auch 1b dem OEM.

Das Geschäftsmodell Einzel-OEM dürfte insbesondere in Ländern von Bedeutung sein, in denen der OEM gut etabliert ist und mit den Akteuren der lokalen Wertschöpfungskette sehr gut vertraut ist. Der OEM könnte dabei entweder eine eigene Recyclinganlage betreiben

Batterierecycling, Variante 1: Fahrzeughersteller betreibt eigenes System (Einzel-OEM)

Abbildung 4-1



oder Recyclingdienstleistungen als Bestandteil des Systems in Auftrag geben. Für den OEM bietet dieses Modell die größtmögliche Kontrolle über das System und dessen Funktionsweise – einschließlich der Ströme von Altbatterien und der daraus gewonnenen Wertstoffe. Die Optimierung von Verpackung und Logistik ist ebenfalls gegeben. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass die OEMs mit diesem Modell den größten Aufwand in Bezug auf Vertragsabschlüsse und haftungsrechtliche Fragen sowie die eigenständige Erfüllung aller Berichtspflichten und rechtlichen Vorgaben haben.

Die Transparenz des Systems mag zwar für den OEM von Vorteil sein, aber das System könnte zu den höchsten Kosten pro Batterie (oder recyceltem Material) führen. Es wird davon ausgegangen, dass dieses System auf der Ebene eines einzelnen OEMs den geringsten Nutzen aus Skaleneffekten ziehen wird.

Im Fall der Beauftragung eines externen Recyclers (Variante 1b) bleibt offen, ob dieser nur die Batterien des OEMs¹⁰ oder auch die von Wettbewerbern verarbeiten

10 Aus den Gesprächen mit verschiedenen Akteuren geht hervor, dass die Frage der Eigentumsrechte nicht trivial ist. Nach Ansicht der Autoren geht – ungeachtet der erweiterten Herstellerverantwortung (EPR) des OEM – mit dem Verkauf eines Fahrzeugs das Eigentum an diesem Fahrzeug und allen seinen Teilen auf den Käufer über. Nach der derzeitigen Rechtslage ist es häufig so, dass ein Verbraucher, der sein Fahrzeug am Ende seiner Lebensdauer an einen ATF übergibt, eine Entschädigung vom ATF erhält, sofern dem Fahrzeug keine Teile fehlen. Die ATF ist wiederum verpflichtet, bestimmte Materialien oder Komponenten vor dem Verkauf der Altkarosse an eine Schredderanlage zu entfrachten und zu entfernen, wobei sie jedoch auf freiwilliger Basis auch zusätzliche Komponenten entfernen, bei denen ein Gewinn zu erwar-

würde und was das für die dem OEM zur Verfügung gestellten zurückgewonnenen Materialien bedeutet würde. Dies könnte von dem Verhältnis zwischen der Menge, der in einem bestimmten Mitgliedstaat zu sammelnden und zu behandelnden OEM-Batterien und den Behandlungskapazitäten des beauftragten Recyclers abhängen. Während sogenannte Spokes – also Anlagen zur Herstellung von Schwarzmasse – inzwischen recht verbreitet sind, gibt es derzeit nur eine begrenzte Zahl von spezialisierten Anlagen zur Verarbeitung von Schwarzmasse (Hubs) in der EU mit noch recht kleinen Kapazitäten. Es ist daher wahrscheinlich, dass externe Anlagen Batterien verschiedener OEMs verarbeiten würden.

ten ist. In diesem Sinne geht das Eigentum an dem Fahrzeug und seinen Teilen (einschließlich der Antriebsbatterie) entlang der Wertschöpfungskette von einem Akteur auf einen anderen über. Eine Ausnahme von dieser Regel bildeten in der Vergangenheit bestimmte Renault-Modelle, bei denen die Antriebsbatterie an den Käufer des Pkw geleast wurde. Dieses Leasing-Modell wurde jedoch inzwischen eingestellt. Soweit in diesem Bericht von OEM-Batterien oder Batterien dieses OEMs die Rede ist, sind damit nicht die konkreten Eigentumsrechte der OEMs gemeint, sondern lediglich Antriebsbatterien, die aus Fahrzeugmodellen des jeweiligen OEMs ausgebaut wurden.

Das bedeutet, dass in der aktuellen Frühphase der Kreislaufwirtschaft für Antriebsbatterien in der EU der Zugriff eines OEMs auf Batterien, die von dem OEM selbst in den Markt gebracht wurden, und auf Materialien, die aus seinen eigenen Batterien zurückgewonnen wurden, nicht unbedingt möglich ist. Dies könnte bei der Zerlegung durch notwendige, sehr unterschiedliche Demontageprozesse aufgrund einer Vielfalt unterschiedlichster Antriebsbatterien diverser OEMs sowie bei der Weiterbehandlung unterschiedlichster Batteriemodule beziehungsweise -zellen¹¹ in den Recyclingprozessen zu höheren Aufwendungen führen.

Die Batterieverordnung gibt vor, dass bei einer PRO die Beteiligungsentgelte nach bestimmten ökologischen Aspekten modelliert werden sollten, um so diese Aspekte zu fördern (Ökomodulierung). Beispiele dafür können die Recyclingfähigkeit, aber auch der CO₂-Fußabdruck sein. Da PROs im Modell Einzel-OEM keine Rolle spielen, wird hier auch keine Ökomodulierung eingeführt werden können, was als

11 Die Batteriemodule beziehungsweise -zellen diverser OEMs können bezüglich Batteriechemie und Einzelkomponenten sehr unterschiedlich sein, sodass sich die Recyclingprozesse gegenüber eher einheitlichen oder zumindest ähnlichen Batteriemodulen beziehungsweise -zellen eines OEMs unter Umständen aufwendiger darstellen.

SWOT-Analyse für Variante 1: Einzel-OEM

Tabelle 4-1

STRENGTHS (Stärken)	WEAKNESSES (Schwächen)
<ul style="list-style-type: none"> Mehr Transparenz und Kontrolle für den OEM über das System hinsichtlich der tatsächlichen Kosten und der Flüsse von Batterien und Materialien. 	<ul style="list-style-type: none"> Voraussichtlich höchste Kosten pro Batterie oder Materialeinheit (zum Beispiel Logistikkosten, Vertragsausgaben). Der OEM ist verantwortlich für die Erfüllung der Berichtspflichten auf Ebene der Mitgliedstaaten.
OPPORTUNITIES (Chancen)	RISKS (Risiken)
<ul style="list-style-type: none"> Die Möglichkeit, OEM-eigene Batterien zu beziehen, kann zu einem effizienteren Recycling führen, bei dem ein geeigneter Materialmix zurückgewonnen und direkt zur Herstellung neuer Batterien weitergeleitet werden kann. Die Optimierung von Verpackung und Logistik ist potenziell möglich, auch aufgrund des direkten Zugriffs auf Daten zum Batteriezustand. 	<ul style="list-style-type: none"> Der OEM bleibt für das System verantwortlich, hat jedoch keine direkte Kontrolle über die von Dritten durchgeführten Prozesse (zum Beispiel Logistik, externe Recyclingunternehmen). Die tendenziell geringe Größe des Systems kann insofern als Risiko verstanden werden, als es nicht immer ausreichen wird, um dem OEM den Zugriff auf genügend Batterie- beziehungsweise Materialienmengen zu gewährleisten.

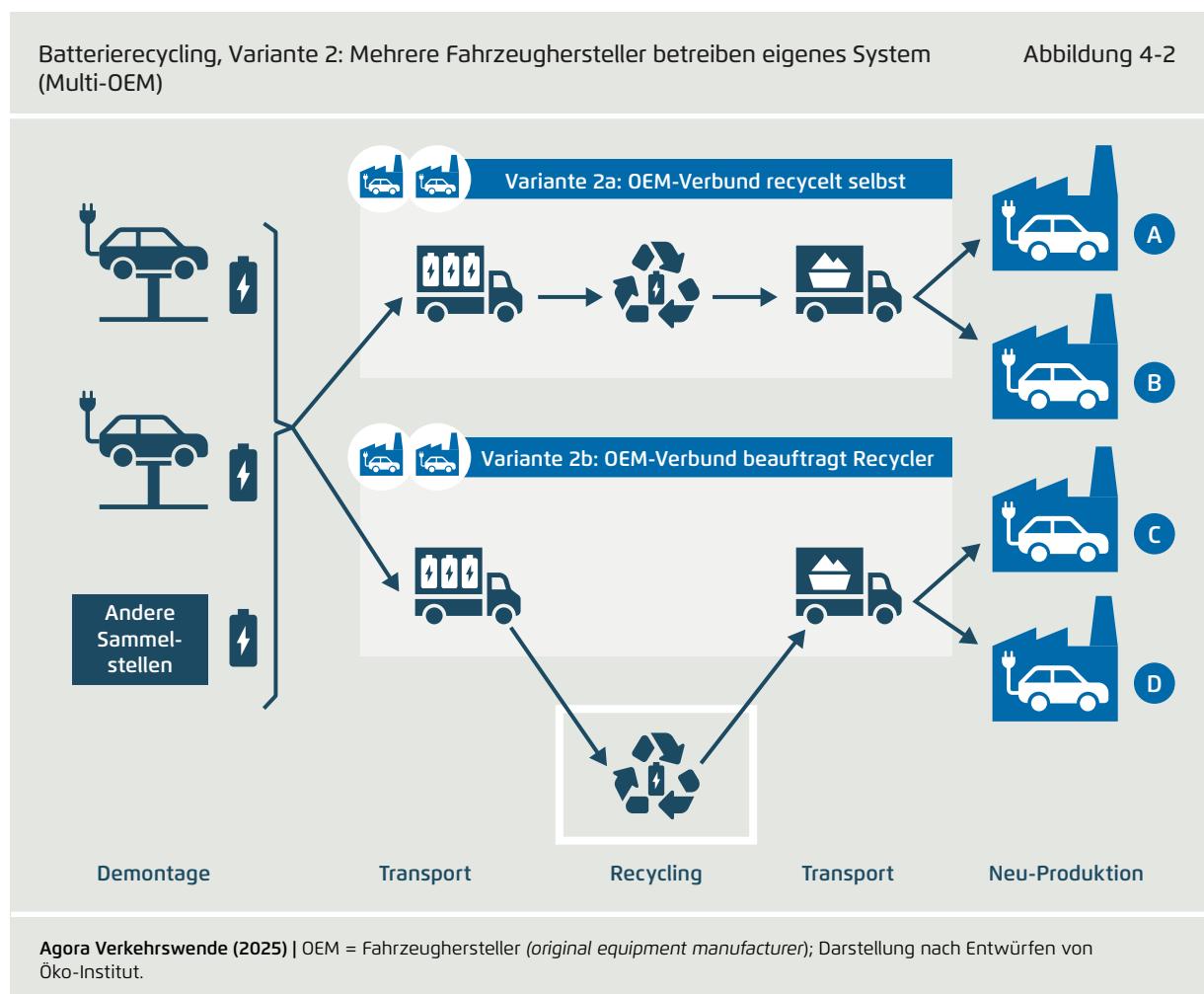
Nachteil des Modells aufgefasst werden könnte. Auf der anderen Seite ist jedoch davon auszugehen, dass OEMs eine eigene Motivation haben werden, zumindest bestimmte Aspekte ihrer Batterien zu optimieren, wenn sie diese ins Recycling zurücknehmen. Selbst wenn der OEM kein eigenes Recycling durchführt, ist davon auszugehen, dass sich der Markt regulieren wird. Die Tabelle 4-1 fasst die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken des Geschäftsmodells Einzel-OEM zusammen.

4.2.2 Variante 2: Mehrere Fahrzeughersteller betreiben eigenes System (Multi-OEM)

Das zweite Geschäftsmodell ähnelt dem ersten stark, mit dem Unterschied, dass es von mehreren OEMs statt von einem einzigen entwickelt und verwaltet wird (siehe Abbildung 4-2).

Aus Gesprächen mit den Interessengruppen ging hervor, dass OEMs, die völlig unabhängig voneinander sind, an einem derartigen Modell nur beteiligt werden könnten, wenn es von einem unabhängigen Dritten betrieben wird. Aus rechtlichen Gründen können mehrere Unternehmen, die nicht derselben Unternehmensgruppe angehören, kein gemeinsames System betreiben, da sie dadurch Zugang zu Daten über das Geschäftsvolumen von Wettbewerbern erhalten. Das könnte kartellrechtliche Bedenken auflösen. Als Praxisbeispiel für ein solches System wurde von Stakeholdern auf die Recyclingsysteme in Norwegen verwiesen: Dort fungiert der Verband der Pkw-Importeure als neutrale Instanz zwischen den OEMs und gewährleistet auf diese Weise die Rechtskonformität des Systems.

Tabelle 4-2 fasst die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken des Geschäftsmodells Multi-OEM zusammen.



SWOT-Analyse für Variante 2: Multi-OEM

Tabelle 4-2

STRENGTHS (Stärken)	WEAKNESSES (Schwächen)
<ul style="list-style-type: none"> Mehr Transparenz und Kontrolle über das System für OEMs hinsichtlich der tatsächlichen Kosten und der Flüsse von Batterien und Materialien. Dieses Geschäftsmodell begünstigt Skaleneffekte; d. h. geringere Kosten pro Einheit. 	<ul style="list-style-type: none"> Voraussichtlich höhere Kosten pro Batterie oder Materialeinheit (zum Beispiel Logistikkosten, Vertragsausgaben). Die OEMs sind verantwortlich für die Erfüllung der Berichtspflichten auf Ebene der Mitgliedstaaten.
OPPORTUNITIES (Chancen)	RISKS (Risiken)
<ul style="list-style-type: none"> Die Möglichkeit, OEM-eigene Batterien zu beziehen, kann zu einem effizienteren Recycling führen, bei dem ein geeigneter Materialmix zurückgewonnen und direkt zur Herstellung neuer Batterien weitergeleitet werden kann. Optimierung von Verpackung und Logistik potenziell möglich, auch aufgrund des direkten Zugriffs auf Daten zum Batteriezustand. 	<ul style="list-style-type: none"> Die OEMs bleiben für das System verantwortlich, haben jedoch keine direkte Kontrolle über die von Dritten durchgeführten Prozesse (zum Beispiel Logistik, externe Recyclingunternehmen). Das Geschäftsmodell gilt als rechtlich riskant, wenn nicht sogar unmöglich für Marken, die nicht demselben Konzern angehören, es sei denn, ein neutraler Dritter vermittelt zwischen den Mitgliedern (wie zum Beispiel in Norwegen).

Agora Verkehrswende (2025) | Quelle: Zusammenstellung Öko-Institut.

Aufgrund der Zusammenarbeit mehrerer OEMs wird davon ausgegangen, dass dieses System gegenüber Geschäftsmodellen einzelner OEMs Vorteile haben kann. Insbesondere könnte die Menge der verwalteten Batterien und Materialien größer sein und aufgrund von Skaleneffekten zu geringeren Kosten pro Einheit führen.

Man könnte argumentieren, dass ein Geschäftsmodell mit einer PRO, die sämtliche OEMs bedienen kann (siehe Kapitel 4.2.3), aufgrund der stärkeren Skaleneffekten die bevorzugte Lösung wäre. Das Modell Multi-OEM kann jedoch von Vorteil sein, da die zurückgewonnenen Beträge nur innerhalb der Marken des OEM geteilt werden sowie mit weiteren OEMs, die sich an diesem System ebenfalls beteiligen.

Im Rahmen der Stakeholder-Beteiligung wurde auch diskutiert, wie die an einem solchen System beteiligten OEMs die Einhaltung der Zielvorgaben zum Anteil an Sekundärrohstoffen für ihre Batterien überprüfen könnten. Der Nachweis selbst muss entlang der Wertschöpfungskette erfolgen. Die Menge an recyceltem Material ist gegeben, die Frage ist eher die Zuordnung zu einer bestimmten Batterie zu Beginn des Prozesses, um den beteiligten Herstellern die korrekte Menge an recyceltem Material zuzuordnen. Da es jedoch ohnehin aus ökonomischen Gründen gängige Praxis ist, dass die Recycler ihre Inputströme genau hinsichtlich des Rohstoffgehalts

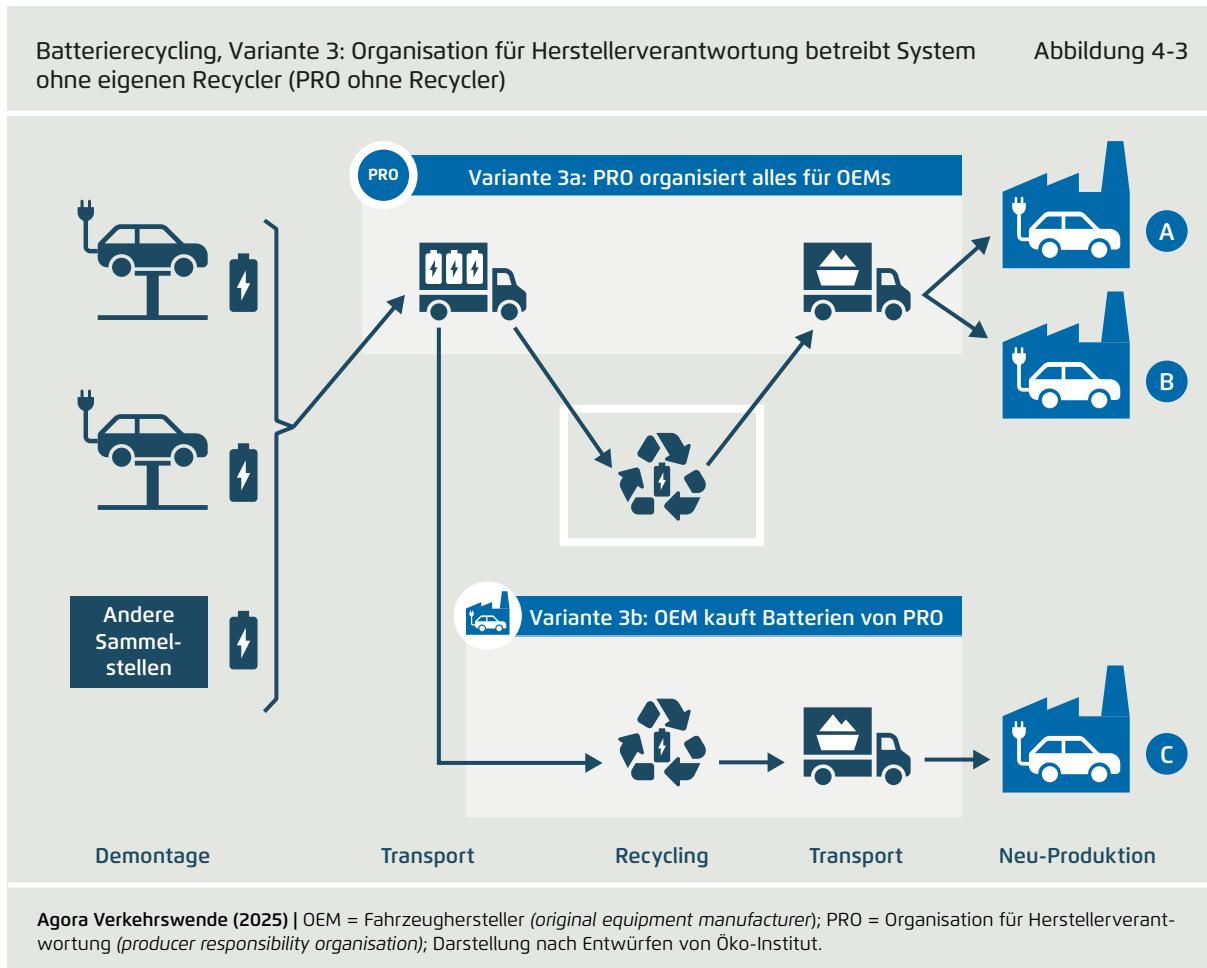
prüfen, sollte das keinerlei Problem darstellen – jedenfalls keines, das für spezifisch dieses System unlösbar wäre. Das bereits erwähnte norwegische System wurde von Stakeholdern als funktionierendes Beispiel angeführt.

4.2.3 Variante 3: Organisation für Herstellerverantwortung betreibt System ohne eigenen Recycler (PRO ohne Recycler)

Im dritten Geschäftsmodell beauftragt ein OEM, oder mehrere OEMs, eine Organisation für Herstellerverantwortung (PRO, *producer responsibility organisation*), das System zu betreiben (siehe Abbildung 4-3). Eine PRO ist ein Unternehmen oder eine Einrichtung, die von Herstellern oder lokalen Behörden gegründet wurde, um deren gesetzliche Pflichten zur Abfallentsorgung zu erfüllen – das heißt die Sammlung, das Recycling und die Entsorgung der durch die Produkte der Hersteller anfallenden Abfälle. PROs sind unabhängig von dem oder den Unternehmen, die sie gegründet haben, und gewährleisten die Einhaltung der Gesetze und Vorschriften im Zusammenhang mit Abfällen. Sie können für ein einzelnes Unternehmen oder mehrere Unternehmen der Produktbranche tätig sein. Neben der Gewährleistung der Einhaltung der Rechtsvorschriften gehören zu ihren Aufgaben die Senkung der Kosten für die beteiligten Unternehmen oder die lokale Behörde, die Sensibilisierung der Konsument:innen, die Berichterstattung über die Ergebnisse der Abfallbewirtschaftungsmaßnahmen

Batterierecycling, Variante 3: Organisation für Herstellerverantwortung betreibt System ohne eigenen Recycler (PRO ohne Recycler)

Abbildung 4-3



und die Beratung zur Abfallvermeidung und Verbesserung der Recyclingfähigkeit von Produkten [RLG 2025b].

In Gesprächen mit Interessengruppen wurde außerdem festgestellt, dass PROs in der Regel – wenn auch nicht zwingend – Nonprofit-Organisationen sind. Dies wurde als Unterschied zum Geschäftsmodell Multi-OEM (siehe Kapitel 4.2.2) erklärt, bei dem die Aufgaben für die OEMs von einem Dritten betrieben werden (Beispiel: Pkw-Importeurverband in Norwegen).

Im hier beschriebenen Geschäftsmodell PRO ohne Recycler gründet der OEM (oder mehrere OEMs) die PRO oder beauftragt eine bestehende PRO, die die erweiterten Herstellerverantwortungspflichten für diesen OEM (oder diese OEMs) übernimmt. Mit anderen Worten: Die PRO organisiert die Sammlung, Logistik, Behandlung und Verwertung von Abfällen und erfüllt weitere gesetzliche

Verpflichtungen im Rahmen der erweiterten Herstellerverantwortung.

Im Fall von Antriebsbatterien für Elektrofahrzeuge wird in diesem Modell davon ausgegangen, dass die PRO die Sammlung von Altbatterien von mehreren Demontageanlagen (ATFs) und Sammelstellen organisiert, diese mit einem Logistiksystem zu Recyclern transportiert, um Schwarzmasse zu gewinnen, und diese anschließend weiter zur Rückgewinnung von Batteriematerialien (in der Reinheitsstufe für Batteriequalität) veredeln lässt. Die Batteriematerialien werden dann den OEMs zugerechnet, die sich dem System angeschlossen haben. Die Dienstleistungen des PRO werden gemäß den vertraglichen Gestaltungen mit den OEMs vergütet. In diesem Geschäftsmodell ist die Recyclinganlage nicht inklusiver Teil des PRO, sodass sie parallel zu ihrer Zusammenarbeit mit dem PRO frei mit anderen Parteien zusammenarbeiten kann. Wie

erläutert, wird davon ausgegangen, dass das System des PRO den OEMs entweder zurückgewonnene Materialien¹² oder, im Falle eines OEM, der eine eigene Recyclinganlage betreibt, Altbatterien liefern könnte.

Die PRO organisiert das System sowohl in logistischer als auch in vertraglicher Hinsicht. Das bedeutet, dass ein OEM lediglich einen Vertrag mit der PRO abschließen muss, um seine Verpflichtungen zu regeln, während die PRO die vertraglichen Formalitäten mit allen anderen Akteuren des Systems (zum Beispiel Demontagebetriebe und Sammelstellen, Transport- und Lagerunternehmen, Recyclingbetriebe) übernimmt. Dadurch erspart sich der OEM einen immensen Aufwand für die Organisation der Vertragsbeziehungen mit allen Beteiligten. Gleichzeitig muss der OEM in der Regel eine Gebühr für die gesammelten und behandelten Abfälle (pro Altbatterie oder pro Tonne Batterien) an die PRO entrichten. Ebenso hat der OEM über die PRO wahrscheinlich Zugang zu einer viel größeren Gruppe von Sammelstellen als im Modell Einzel-OEM und damit auch zu einem größeren Pool an Altbatterien.

Da jedoch in der Regel mehrere OEMs mit derselben PRO zusammenarbeiten, müssen die zurückgewonnenen Materialien auch zwischen allen OEMs aufgeteilt werden. Je nach Organisation des Systems könnte dies bedeuten, dass der OEM weniger zurückgewonnene Materialien erhält, als ursprünglich aus seinen eigenen Batterien über das System zurückgeführt wurden. Zudem besteht die Möglichkeit, dass ein OEM, der vergleichsweise hochwertige Batterien in das System einbringt, unter Umständen benachteiligt wird im Vergleich mit einem OEM, der vergleichsweise minderwertige Batterien in das System einspeist. Zusätzlich erhält der OEM möglicherweise eine Mischung aus Materialien, die aus den Batterien aller Teilnehmer zurückgewonnen wurden, anstatt Materialien aus seinen eigenen Batterien.¹³ Anders könnte dies bei einer

12 Der OEM muss nicht notwendigerweise das zurückgewonnene Material physisch erhalten; es wird vielmehr oft der Fall sein, dass der vom PRO beauftragte externe Recycler dem OEM für seine Herstellerpflichten anrechenbare Volumina an entsprechende Partner in der Wertschöpfungskette für Batterien weiterleitet.

13 Es wird darauf hingewiesen, dass in der Realität nicht davon ausgegangen wird, dass die Rechnungslegung auf der genauen Zusammensetzung der Batterien eines OEMs und den erwarteten wiederverwertbaren Materialien basiert, sondern dass solche Risiken in die Verhandlun-

Systemgestaltung sein, in der die PRO den OEM direkt mit Batterien oder Batteriematerialien beliefert. In diesem Fall wäre zu erwarten, dass der OEM die PRO nutzt, um gezielt Zugang zu den aus seinen Fahrzeugen gesammelten Batterien zu erhalten. Die PRO ist für die Berichtspflichten gemäß den gesetzlichen Bestimmungen verantwortlich und übernimmt auch die Verantwortung für die Funktion des Systems. Dies erfordert jedoch, dass die teilnehmenden OEMs auf die höhere Transparenz und direkte Kontrolle des Systems ein Stück weit verzichten müssen.

Dieses Modell ist besonders relevant, sobald ein Land die Beauftragung einer PRO vorschreibt (siehe den Beginn von Kapitel 4). Darauf hinaus ging aus dem Austausch mit OEMs hervor, dass dieses Modell ansonsten insbesondere in Ländern relevant ist, in denen die OEMs mit den Akteuren der lokalen Wertschöpfungskette nicht vertraut sind. Bei Batterien für Elektrofahrzeuge könnte dies beispielsweise für neue Marktteilnehmer etwa aus Asien gelten, die erst kürzlich in den EU-Markt eingetreten und dort noch wenig etabliert sind. Das Modell könnte auch für EU-OEMs in Ländern relevant sein, in denen sie nur untergeordnet aktiv sind. Wenn die PRO auch die Sammlung und den Transfer von Batterien des jeweiligen OEM anbietet, könnte das dem Unternehmen bei der Sammlung seiner eigenen Batteriemodelle vom Markt helfen und ihm möglicherweise Zugang zu einer viel größeren Anzahl von Sammelstellen verschaffen als wenn ein Fahrzeughersteller ein eigenes System betreibt (siehe Modell Einzel-OEM). Die Interessengruppen erwähnten auch, dass dieses System besonders für Importeure interessant sei.

In Gesprächen mit Interessenträgern wurde geäußert, dass die Einbindung eines Dritten in das System – in diesem Fall der PRO – den Zugang zu zurückgewonnenen Materialien erschweren und zu einer ungerechten Verteilung der Materialien führen könnte. Das könnte mit der Menge an gesammelten Batterien oder ihrer Qualität zusammenhängen. Diese Einschätzung wurde jedoch nicht von allen Interessenträgern geteilt. Andere wiesen darauf hin, dass die PRO zwar für die Organisation des Systems verantwortlich sei, aber keine direkte Kontrolle über die Qualität der zurückgewonnenen Materialien habe.

gen zwischen OEMs und PROs einfließen, um die von den OEMs pro Batterie zu zahlende Gebühr und die Menge an wiederverwertbaren Materialien, für die die OEMs im Gegenzug Rechte erhalten, festzulegen.

Erfahrungen aus anderen Systemen für die erweiterte Herstellerverantwortung zeigen, dass die Verträge zwischen der PRO und den Recyclingunternehmen auch die Qualität der Zusammensetzung der angelieferten Wertstoffe betreffen kann, was im Laufe der Zeit zu einer höheren Qualität der Wertstoffe führen könnte. Hierzu sind verschiedene Szenarien möglich (technisch sowie auch vertraglich). OEMs und PROs könnten somit in ihren Verträgen klare Qualitätsanforderungen für die gelieferten recycelten Materialien festlegen. Viele Recyclinganlagen sind in der Lage, unterschiedliche Materialqualitäten zu liefern, was sich auch in unterschiedlichen Preisen widerspiegelt. Die entscheidendere Frage ist jedoch, ob in den kommenden Jahren in Europa überhaupt genügend recyceltes Material zu Verfügung stehen wird. Denn obwohl zunehmend Spokes-Einrichtungen (zur Herstellung von Schwarzmasse) entstehen, sind in der EU derzeit nur wenige Hubs (für die Herstellung von Materialien in Batteriequalität) aktiv und die Entwicklung weiterer Hubs mit relevanten Kapazitäten in naher Zukunft ist mit Unsicherheiten behaftet (siehe Kapitel 3).

In den Diskussionen mit den Stakeholdern wurde eine Studie der JRC zur Überprüfungsmethode für die Einhal-

tung der Ziele für Sekundärrohstoffanteile aus der Batterieverordnung erwähnt. Die in der Studie untersuchten Methoden basieren hauptsächlich auf einer Massenbilanzierung. Interessengruppen haben die vorgeschlagenen Modelle aufgrund ihres Massenbilanzprinzips kritisiert, da es den Inverkehrbringen ermöglichen würde, sich Material gutzuschreiben, das nicht tatsächlich in der Batterie enthalten ist – und umgekehrt. Ein Strategiepapier mehrerer Umweltorganisationen [DUH et al., 2025] nennt ein konkretes Beispiel: Ein OEM, der sowohl für den EU- als auch für den Nicht-EU-Markt produziert, könnte durch zulässige Zuteilungen höhere Recyclinganteile gelten machen, als tatsächlich im Produkt enthalten sind – indem er etwa Batterien für Nicht-EU-Länder einen Anteil von null Prozent zuweist und Batterien für die EU einen höheren Anteil, als tatsächlich physisch enthalten ist. Obwohl dies in dem Papier nicht explizit angesprochen wird, lässt sich aus der Argumentation die Befürchtung ableiten, Hersteller könnten die Recyclinganteilsziele leichter erreichen, in dem sie Rezyklatanteile ihrer gesamten Produktion in Batterien für die EU bündeln und somit keinen Anreiz für gesteigerten Rezyklateinsatz spüren. Die verschiedenen Aspekte für das Geschäftsmodell PRO ohne Recycler sind in Tabelle 4-3 zusammengefasst.

SWOT-Analyse für Variante 3: PRO ohne Recycler

Tabelle 4-3

STRENGTHS (Stärken)	WEAKNESSES (Schwächen)
<ul style="list-style-type: none"> Je nach Anzahl der teilnehmenden OEMs sind geringere Kosten pro Batterie oder Materialeinheit (z. B. Logistikkosten, Vertragsausgaben) für den OEM zu erwarten. Besonders attraktiv für OEMs, die mit der Wertschöpfungskette im Land nicht vertraut sind, sowie für neue OEMs und Importeure. Die PRO ist für das System verantwortlich und übernimmt die Berichtspflichten. 	<ul style="list-style-type: none"> Da PROs eine Mischung an Batterien sammeln, von denen sie nicht unbedingt die genaue Zusammensetzung kennen, und diese Mischung an Batterien dann an den externen Recycler geht, könnte dies die Effizienz des Recyclingprozesses eventuell negativ beeinflussen sowie auch die Wirtschaftlichkeit des PRO-Systems.
OPPORTUNITIES (Chancen)	RISKS (Risiken)
<ul style="list-style-type: none"> Die Möglichkeit, OEM-eigene Batterien zu beziehen, kann dazu führen, dass OEMs in Ländern Vorteile haben, in denen sie über eigene Recyclinganlagen verfügen. Da davon ausgegangen wird, dass die PRO im Land ihrer Tätigkeit eine starke Position einnimmt, könnte sie im Laufe der Zeit für hochwertigere Empfängermaterialien mehr bezahlen, was zur Optimierung der Wertschöpfungskette führen würde 	<ul style="list-style-type: none"> Die Verteilung der zurückgewonnenen Materialien unter den teilnehmenden OEMs kann von den Materialien abweichen, die aus den von einem bestimmten OEM gesammelten Batterien zurückgewonnen werden können. Da das Recycling außerhalb des Systems erfolgt, kann eine PRO manchmal dem Wettbewerb durch andere PROs oder OEMs ausgesetzt sein, was sich auf die Menge der Materialien auswirkt, die für die Mitglieder des Systems erworben werden können.

4.2.4 Variante 4: Organisation für Herstellerverantwortung betreibt System mit eigenem Recycler (PRO mit Recycler)

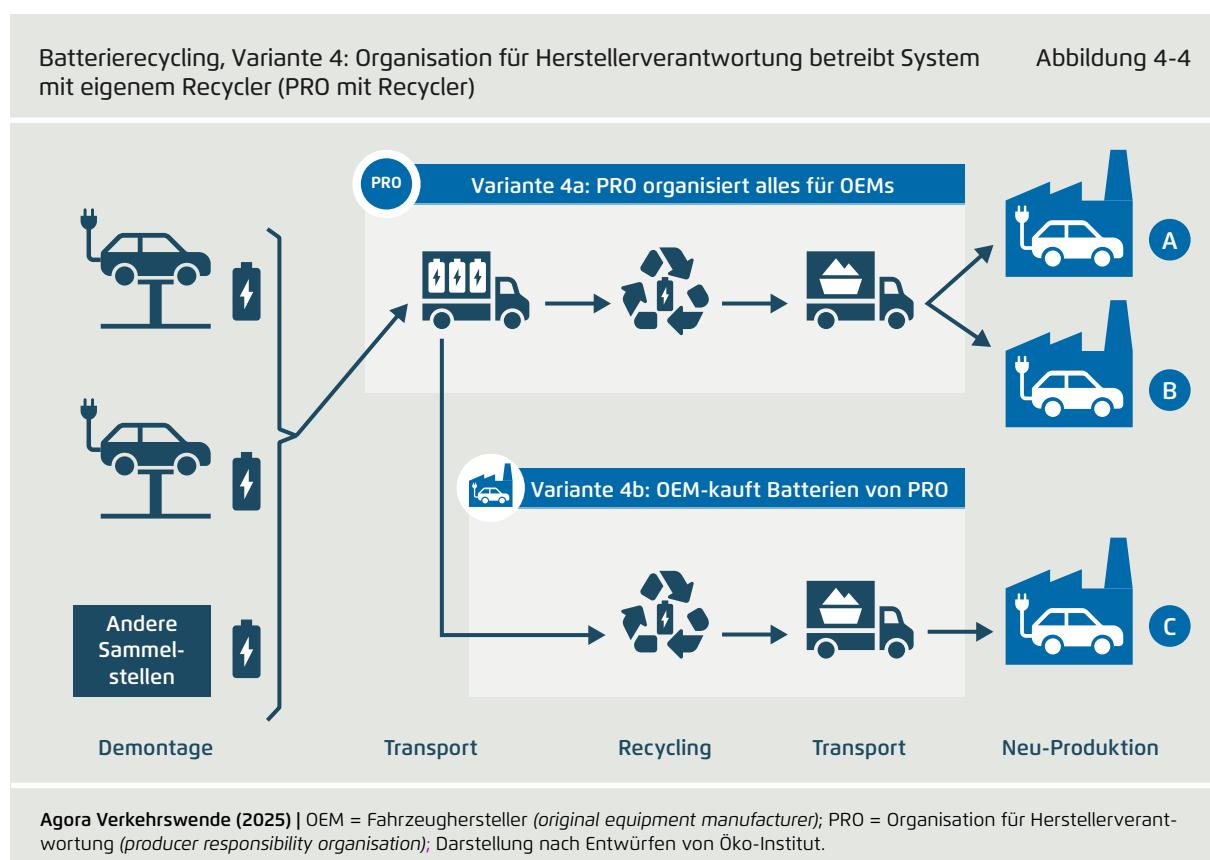
Das vierte Geschäftsmodell unterscheidet sich vom dritten Modell im Wesentlichen durch die direkte Einbeziehung des Recyclers in das System (siehe Abbildung 4-4). Dies kann beispielsweise durch einen befristeten Vertrag mit einem Recyclingunternehmen erfolgen, um sicherzustellen, dass alle Endprodukte (oder eine festgelegte Menge) an die PRO übergeben und anschließend den teilnehmenden OEMs zugewiesen werden.

Alternativ wurde auch die Möglichkeit erwähnt, dass die PRO selbst die Einrichtung einer Recyclinganlage initiiert und finanziert. Dies könnte zwar eine Möglichkeit für Recycler sein, die Schwarzmasse erzeugen, jedoch sind die Kosten für die Einrichtung einer Raffinerie zur Rückgewinnung von Endmaterialien erheblich höher. Deshalb wird diese Ausprägung der Variante von vielen Stakeholdern als wenig realistisch eingeschätzt. Die im Begleitkreis vertretenen Interessengruppen bewerteten

die Option, dass eine PRO eine eigene Recyclinganlage initiiert und finanziert, als unwahrscheinlich.¹⁴

Es wird davon ausgegangen, dass die direkte Einbeziehung des Recyclers in das System Vorteile hinsichtlich der Kosten pro Batterie oder pro Einheit wiedergewonnenem Material mit sich bringen kann. Zudem könnten Risiken vermieden werden, die sich aus der Zusammenarbeit des Recyclers mit anderen Parteien ergeben (siehe Tabelle 4-3). Gleichzeitig wiesen die Interessengruppen darauf hin, dass die Einbeziehung eines Recyclers in die Organisation zu einer marktbeherrschenden Stellung führen könnte, die unter Umständen den fairen Wettbewerb gefährden würde.

14 Es ist denkbar, dass in 10 bis 15 Jahren – einen steilen Hochlauf der Elektromobilität vorausgesetzt – aufgrund immens steigender Rücklaufmengen von Altbatterien diese aus heutiger Sicht unwahrscheinliche Option wahrscheinlicher wird – den Gesetzen von ökonomischen Skalierungseffekten folgend und aufgrund geringeren Risikos einer Unterauslastung einer solchen Anlage mit sehr hoher Jahreskapazität.



SWOT-Analyse für Variante 4: PRO mit Recycler

Tabelle 4-4

STRENGTHS (Stärken)	WEAKNESSES (Schwächen)
<ul style="list-style-type: none"> Je nach Anzahl der teilnehmenden OEMs sind in diesem Modell die geringsten Kosten pro Batterie oder Materialeinheit (zum Beispiel Logistikkosten, Vertragsausgaben) für den OEM zu erwarten. Besonders attraktiv für OEMs, die mit der Wertschöpfungskette im Land nicht vertraut sind, sowie für neue OEMs und Importeure. Die PRO ist für das System verantwortlich und übernimmt die Berichtspflichten. Höhere Versorgungssicherheit für wiedergewonnene Materialien durch direkte vertragliche Beziehungen zum Recycler. 	<ul style="list-style-type: none"> Die Verteilung der zurückgewonnenen Materialien erfolgt vermutlich auf der Ebene der einzelnen Materialien, sodass die Recyclingeffizienz geringer sein könnte als in eigenen OEM-Recyclinganlagen.
OPPORTUNITIES (Chancen)	RISKS (Risiken)
<ul style="list-style-type: none"> Die Möglichkeit, OEM-eigene Batterien zu beziehen, kann dazu führen, dass OEMs in Ländern Vorteile haben, in denen sie über eigene Recyclinganlagen verfügen. Da davon ausgegangen wird, dass die PRO im Land ihrer Tätigkeit eine starke Stellung im Markt einnehmen könnte, könnte sie im Laufe der Zeit mehr für hochwertigere Empfängermaterialien bezahlen, was zu Motivationssteigerungen in der Lieferkette führen würde. Mit anderen Worten könnte dies die Marktentwicklung hin zu effizienteren Prozessen beschleunigen. 	<ul style="list-style-type: none"> Die Verteilung der zurückgewonnenen Materialien unter den teilnehmenden OEMs kann von den Materialien abweichen, die aus den von einem bestimmten OEM gesammelten Batterien zurückgewonnen werden können. Unter bestimmten Bedingungen könnte die Einbeziehung des Recyclers in das System zu unlauterem Wettbewerb und damit zu juristischen Problemen führen. Es könnte auch die Marktpreise beeinflussen.

Agora Verkehrswende (2025) | Quelle: Zusammenstellung Öko-Institut.

Die verschiedenen Aspekte, die für das Modell PRO mit Recycler angesprochen wurden, sind in der SWOT-Analyse (Tabelle 4-4) zusammengefasst.

4.3 Zusätzliche relevante Aspekte

Wie in der Beschreibung der Modelle erläutert, ist unklar, ob externe Recyclingbetriebe – sowohl zur Herstellung von Schwarzmasse (Spokes) als auch für deren Weiterverarbeitung in Raffinerien (Hubs) – ausschließlich Batterien eines OEMs oder mehrerer OEMs verarbeiten würden. Dies dürfte maßgeblich von dem Verhältnis zwischen den zu behandelnden Altbatteriemengen und den verfügbaren Behandlungskapazitäten abhängen.

In den Gesprächen mit den Interessengruppen wurde auch die Frage aufgeworfen, wie relevant es für einen OEM ist, gezielt Zugang zu den Materialien aus seinen

eigenen Batterien zu erhalten. Für externe Recyclingunternehmen erscheint es fraglich, ob OEM-spezifische Materialien im Rahmen des Systems getrennt werden könnten – selbst wenn der geplante digitale Batteriepass dabei helfen könnte, Batterien eines bestimmten Batteriemodells und einer bestimmten Marke zu identifizieren.

Dennoch deuten die verfügbaren Daten zu OEM-Recyclinganlagen darauf hin, dass durch getrenntes Recycling gewisse Einsparungen erzielt werden können. OEMs verfügen über spezifisches Know-how hinsichtlich der Demontage der eigenen Batterien und Materialmischungen, die sich unter Umständen besonders gut zur direkten Wiederverwendung in neuen Batterien eignen.

In solchen Fällen ist es möglicherweise nicht erforderlich, einzelne Materialien zurückzugewinnen, solange die Menge der für die Herstellung neuer Batterien verwen-

deten zurückgewonnenen Materialien in die einzelnen Elemente aufgeschlüsselt werden kann, für die Recyclinganteilsziele bestehen (für Berichtszwecke). In diesem Zusammenhang haben die Interessengruppen den Zeitabstand zwischen dem Inverkehrbringen einer Antriebsbatterie für Elektrofahrzeuge und dem voraussichtlichen Ende ihrer Lebensdauer hervorgehoben. Derzeit befinden sich Antriebsbatterien für Elektrofahrzeuge in einer sehr dynamischen Entwicklungsphase. Somit ist es wahrscheinlich, dass sich die Zusammensetzung und damit auch die Relevanz für die Herstellung neuer Batterien bis zum Zeitpunkt des Recyclings möglicherweise geändert haben wird. Mit anderen Worten: Dieser Aspekt ist noch mit einer großen Unsicherheit behaftet.

Derzeit ist noch unklar, ob sich das OEM-eigene Recycling auf kleinere Anlagen beschränken wird oder ob es in Zukunft auf das Recycling größerer Mengen von OEM-Altbatterien in einem bestimmten Mitgliedstaat ausgeweitet werden kann. Das hängt sicherlich auch mit der konkreten Entwicklung von weiteren Hubs und integrierten Systemen (Spoke and Hub) in der EU in den nächsten Jahren zusammen. Sollte die Entwicklung der Recyclingkapazitäten (vor allem von Hubs) zu langsam voranschreiten, könnte dies die OEMs motivieren, ihre eigenen Recyclingkapazitäten zu erweitern oder auf eine Strategie des Zukaufens von recycelten Materialien oder von Batteriezellen mit entsprechenden Recyclinganteilen zu setzen. Das wiederum hängt von den Anreizen ab, die auf EU-Ebene zur Förderung des Batterierecyclings geschaffen werden.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sollten PROs, die die Entwicklung eines Sammel- und Behandlungssystems in einem bestimmten Mitgliedstaat in Betracht ziehen, mit den lokalen OEMs klären, ob diese bevorzugt Materialien über das System beziehen möchten oder ob sie den Zugang zu Altbatterien aus eigener Sammlung bevorzugen.

Aus Erfahrungen mit anderen Abfallströmen ist dem Öko-Institut bekannt, dass einige Reifenrunderneuerer, die Reifenrohlinge sammeln und sortieren, Reifenherstellern anbieten, ihnen die Rohlinge ihrer eigenen Markenreifen zu liefern. Das bietet dem Runderneuerer eine alternative Einnahmequelle und erleichtert gleichzeitig die gezielte Rückführung markeneigener Karkassen an Reifenhersteller mit eigenen Runderneuerungsanlagen.

Mit anderen Worten: Die Nutzung des von einer PRO entwickelten Logistiksystems zur Beschaffung markeneigener Batterien für einen bestimmten OEM könnte es ermöglichen, weitere OEMs in das System einzubeziehen und ihnen gleichzeitig die Freiheit zu lassen, wie sie das Recycling ihrer Batterien durchführen. Da die von Volkswagen und Mercedes-Benz eingesetzten Recyclinganlagen laut Angaben der Unternehmen auf etablierte energieeffizientere Verfahren im Vergleich zu üblichen hydrometallurgischen Verfahren setzen [Volkswagen AG 2024, Mercedes-Benz 2024], könnte diese Option in Zukunft an Bedeutung gewinnen – insbesondere, weil OEMs verpflichtet sind, ihren Beitrag zur Emissionsreduzierung zu erhöhen.

Sollte sich eine PRO in einem Mitgliedstaat etablieren, während einzelne OEMs sich für OEM-eigene Geschäftsmodelle (Variante 1: Einzel-OEM) entschieden haben, könnte dies den OEMs erschweren, eigene Batterien für die Behandlung und das Recycling zu beschaffen, was sich auf die Kosten für Altbatterien und damit auf die finanzielle Effizienz der OEM-eigenen Systeme auswirken könnte. Dies basiert auf der Annahme, dass die PRO über ein umfassenderes Sammelsystem mit einer größeren Anzahl von Demontageanlagen (ATFs) oder Sammelstellen und nachgeschalteten Betreibern verfügt. Die PRO könnte Batterien aller OEMs ohne Unterscheidung nach Marken sammeln, um die Lieferung einer Mindestmenge an recycelten Inhaltsstoffen an die in seinem Mitgliederkreis vertretenen OEMs sicherzustellen. Das wiederum könnte bedeuten, dass Batterien der individuell organisierten OEMs somit für die Sammlung durch diese OEMs weniger verfügbar sind, was sich auf die finanzielle Effizienz dieser Systeme auswirken würde.

Darüber hinaus könnte die Tatsache, dass die EU-Batterieverordnung die Lieferung eines Elektrofahrzeugs an eine Demontageanlage (ATF) ohne Antriebsbatterie zulässt, die Verfügbarkeit von Altbatterien für das Recycling zusätzlich einschränken – mit möglichen Folgen für die wirtschaftliche Machbarkeit sowohl OEM- als auch PRO-basierter Systeme. Es ist unklar, wie viele Batterien am Ende ihrer Lebensdauer aus Fahrzeugen ausgebaut und einer zweiten Nutzung zugeführt werden sollen. Wie sich diese Praxis in Zukunft entwickelt, ist derzeit nicht absehbar und stellt einen weiteren Unsicherheitsfaktor für die Entwicklung des Sektors dar.

Abschließend ist ein besonders relevanter Aspekt zu betonen: die dynamische Veränderung in der Zusammensetzung von LIB, insbesondere der Anteile der Kathodenmaterialien. In den kommenden 10 bis 15 Jahren werden aller Voraussicht nach die Anteile von LFP-Batterien in Neufahrzeugen gegenüber den heute noch dominierenden NMC-Batterien in der EU deutlich zunehmen (vgl. Kapitel 3). LFP-Batterien haben in der Produktion tendenziell Preisvorteile gegenüber NMC-Batterien, da sie kein Nickel und Kobalt enthalten. Beim Recycling der Batterien wird aus diesem Vorteil für die betroffenen Akteure jedoch ein Nachteil, da die entsprechenden Erlöse aus den zurückgewonnenen Wertmaterialien bei LFP-Batterien entsprechend deutlich geringer sind. Dies bedeutet im Umkehrschluss: Ungeachtet dessen, welches der hier vorgestellten vier Geschäftsmodelle betrachtet wird, die gesamten Kreislaufprozesse müssen immer effizienter werden, um den langfristig sinkenden Erlösen aus der Sekundärrohstoffgewinnung entgegenzuwirken. Systeme, die größere Skaleneffekte erschließen, dürften in Zukunft die größten Vorteile aufweisen.

5 | Schlussfolgerungen

Auf Basis der vorherigen Arbeiten im Rahmen dieser Studie und den damit verbundenen intensiven Dialogprozessen mit Stakeholdern – darunter OEMs (Fahrzeughersteller), Recyclingunternehmen, Verbände und Nichtregierungsorganisationen – werden in diesem Kapitel eine Reihe von Schlussfolgerungen zusammengefasst und Empfehlungen ausgesprochen.

5.1 Marktübersicht und Wertschöpfungsketten

- Der absehbare weitere Hochlauf der Elektromobilität in der EU bedingt bereits ab 2035, mit dann 1.200 Gigawattstunden pro Jahr gegenüber heute (2025) einen rund sechsmal höheren Batteriebedarf für Neufahrzeuge – unabhängig von den im Vorhaben untersuchten drei Szenarien.
- Mit dem steigenden Batteriebedarf in der EU ist bis 2035 ein starker Anstieg der Nachfrage nach Schlüsselmaterialien wie Lithium, Nickel, Kobalt und Graphit sehr wahrscheinlich.
- Durch den absehbar wachsenden Anteil von LFP-Batterien für Pkw, leichte und schwere Nutzfahrzeuge und schwere Nutzfahrzeuge im Batteriemix wird der Bedarfsanstieg vor allem bei Kobalt ein Stück weit abgeschwächt – bei Nickel ist der Einfluss auch dämpfend erkennbar, bei Graphit und Lithium spielt dieser Einfluss kaum eine Rolle.
- Durch eine optimierte Kreislaufführung der stetig wachsenden Mengen an End-of-Life-LIB innerhalb der EU-27 ergibt sich in den nächsten 10 bis 15 Jahren ein signifikantes Sekundärrohstoffpotenzial. Dieses liegt bis 2040 zwischen 25 Prozent bis zu 50 Prozent im Fall von Lithium bzw. Nickel und bei über 60 Prozent im Fall von Kobalt. Diese Zahlen unterstreichen die strategische Relevanz und die Notwendigkeit effizienter Recyclingsysteme für die EU.
- Europa weist allerdings noch erhebliche Lücken in den einzelnen Stufen der Wertschöpfungsketten für LIB auf. Dies gilt sowohl für die Rohstoffgewinnung als auch für die Produktion von Kathodenmaterial, die Zellfertigung sowie für das industrielle Recycling des Zwischenprodukts Schwarzmasse.
- Europäische Hersteller/Inverkehrbringer von Antriebsbatterien stehen unter sehr starkem Wettbewerbsdruck durch dominante asiatische Akteure. Um im globalen Wettbewerb Stoffkreisläufe in der EU zu

schließen und zu wettbewerbsfähigen Kosten Zugriff auf die Wertschöpfungskette von relevanten Batterierohstoffen zu erhalten, sind optimierte Recyclingprozesse und geeignete Geschäftsmodelle unerlässlich.

- Die EU ist dabei gefordert, unerwünschte Exporte wertvoller Zwischenprodukte – insbesondere von Schwarzmasse – aus der EU durch geeignete regulatorische Rahmenbedingungen zu unterbinden, um unter anderem die Ziele der EU-Batterieverordnung und des Critical Raw Material Acts robust zu unterstützen. Gleichzeitig muss die EU mit ihren Förderinstrumenten die notwendigen erheblichen Investitionen in Anlagekapazitäten zur wirklichen Schließung der Batteriekreisläufe strategisch absichern, um potenziellen Investoren ein Stück weit Risikoabsicherung zu bieten.

5.2 Kreislaufführung von LIB

In Kapitel 4 wurden vier Varianten von Geschäftsmodellen für das Recycling von LIB in der EU vorgestellt und deren potenzielle Vor- und Nachteile diskutiert. Die Varianten 1 und 2 beschreiben Systeme, die von OEMs selbst betrieben werden. Die Varianten 3 und 4 wiederum sind Modelle, bei denen ein OEM oder mehrere OEMs die gesamten Aufgaben für die Rücklaufsysteme für End-of-Life-LIB auf eine Organisation für Herstellerverantwortung (PRO) übertragen. Folgende Schlussfolgerungen zu den Geschäftsmodellen können auf Basis von Diskussionen beispielsweise mit dem Begleitkreis und Interviews unter anderem mit OEMs gezogen werden:

- Ein Geschäftsmodell, das gleichzeitig viele EU-Staaten oder gar die gesamte EU-27 abdeckt, wird einhellig als nicht realistisch eingeschätzt. Für größere Mitgliedstaaten ist eher mit Geschäftsmodellen zu rechnen, die ein Land oder wenige Länder zusammen abdecken.
- Allerdings steht die derzeitige Aufsplittung innerhalb der EU in bis zu 27 verschiedene Systeme der Hebung von wichtigen Skaleneffekten deutlich entgegen. Diese Skaleneffekte sind jedoch essenziell für den Aufbau effizienter Recyclingkreisläufe in der EU.
- Nach den Untersuchungen weist keines der vier Geschäftsmodelle ausschließlich Vorteile oder Nachteile auf. Vielmehr ist davon auszugehen, dass die OEMs in der EU je nach Mitgliedstaat unterschiedliche Systempräferenzen haben werden – abhängig vom

Mitgliedstaat und ihrer Marktrelevanz in den einzelnen Ländern. Fachleute betonen, dass sowohl für OEMs selbst als auch für beauftragte PROs Kontakte und Kenntnisse der jeweiligen nationalen Akteursnetzwerke im Bereich der Kreislaufwirtschaft entscheidende Erfolgsgaranten sind.

- Rahmensexzessungen einzelner Mitgliedstaaten, die über ihre nationalen Gesetzgebungen den Einsatz von PROs verbindlich vorschreiben, würden in diesen Ländern die Varianten 1 und 2 (Systeme, die von OEMs selbst betrieben werden) ausschließen.
- Die Marktpräsenz der OEMs ist in den diversen EU-Staaten unterschiedlich ausgeprägt. Diese Unterschiede werden bei der Entscheidung von OEMs bezüglich der Wahl der Geschäftsmodelle berücksichtigt werden.
- Ungeachtet der Unterschiede zwischen den vier Geschäftsmodellen müssen alle Systeme zukünftig immer effizienter werden, um den potentiell sinkenden Wertstofferlösen (steigender Anteil von LFP etc.) zu begegnen.



Folgende [Empfehlungen an OEMs](#) können bezüglich der Geschäftsmodelle gegeben werden:

- Vor allem OEMs, die in einzelnen Mitgliedstaaten nur eine überschaubare Marktpräsenz und wenige Einblicke und Erfahrungen mit den dortigen Akteursnetzwerken der Kreislaufwirtschaft (Demontageanlagen, Logistiker, Recycler) und den damit verbundenen Wertschöpfungsketten haben, ist von OEM-eigenen Systemen eher abzuraten. Die Gefahr einer logistischen Überforderung und im schlechtesten Fall der Nichterfüllung der erweiterten Herstellerverantwortung ist hier durchaus gegeben. Aus den Diskussionen ging hervor, dass insbesondere Importeure oder neue Marktteilnehmer (neue OEMs auf dem EU-Markt) von außerhalb der EU wahrscheinlich gut beraten sind, in solchen Ländern geeignete PROs zu beauftragen.
- Generell müssen OEMs sich mit den rechtlichen Rahmenbedingungen der EU (EU-Batterieverordnung, in Revision befindliche EU-Altfahrzeugrichtlinie etc.) und der Umsetzung und den nationalen Besonderheiten in den jeweiligen Mitgliedstaaten gut vertraut machen. Besonders relevant ist hierbei, ob PROs in bestimmten Ländern gegebenenfalls verbindlich vorgeschrieben sind.

- Für größere und in relevanten EU-Mitgliedstaaten gut etablierte OEMs mit entsprechend starker Marktpräsenz und bestehenden Netzwerken in der dortigen Kreislaufwirtschaftsbranche kann – angesichts der zurzeit noch sehr frühen Phase des End-of-Life-LIB-Kreislaufs – der Start mit einem OEM-eigenen System sinnvoll sein, um für das eigene Unternehmen wertvolle Lernkurven zu erschließen. Gleichzeitig sollten diese OEMs die Entwicklungen der Elektromobilität und die nachfolgend stark anwachsenden Mengen an End-of-Life-LIB in die strategischen Überlegungen einbeziehen. In dieser frühen Phase mit sehr überschaubaren Rückläufen an LIB kann ein OEM-eigenes System unter Umständen mit verhältnismäßig geringem logistischem Aufwand betrieben werden. Bei einer Verzehnfachung, Verhundertfachung oder weiteren Steigerung der Rücklaufmengen werden die logistischen Anforderungen erheblich zunehmen. In diesem Fall könnte die Beauftragung eines geeigneten PROs eine sinnvolle Option sein.
- Bei Wahl der Variante 2 (Mehrere Fahrzeughersteller betreiben eigenes System, Multi-OEM) müssen die beteiligten OEMs unbedingt kartellrechtliche Anforderungen berücksichtigen.



Folgende [Empfehlungen an PROs](#) können bezüglich der Geschäftsmodelle gegeben werden:

- PROs sollten ihre Geschäftsmodelle zuallererst in Mitgliedstaaten anbieten, in denen sie bereits über exzellente Netzwerke und fundierte Erfahrungen mit den dortigen Akteuren der Kreislaufwirtschaft verfügen.
- PROs können in den ersten Mitgliedstaaten, in denen sie aktiv sind, wertvolle Lernkurven für die spezifischen Anforderungen des Recyclings von End-of-Life-LIBs aus dem Fahrzeugbereich gewinnen. Diese Erkenntnisse lassen sich anschließend auch in anderen Mitgliedstaaten nutzen. Dabei darf nicht übersehen werden, dass End-of-Life-LIBs aus dem Fahrzeugbereich deutlich andere logistische Anforderungen mit sich bringen als zum Beispiel End-of-Life-LIBs aus dem Gerätbereich.
- Für PROs ist es sehr wahrscheinlich attraktiv, ihre Leistungen zunächst prioritär OEMs anzubieten, die als Importeure oder neue Marktteilnehmer auftreten, damit diese ihre Pflichten im Rahmen der erweiterten Herstellerverantwortung in den entsprechenden Mitgliedstaaten sicher erfüllen können.

§

Folgende [Empfehlungen an die Politik](#) zur Stärkung der Wertschöpfungsketten für LIB und die Schließung der Batteriekreisläufe in der EU können gegeben werden:

- Die Ziele des Critical Raw Materials Acts (CRMA) zur Stärkung der Resilienz europäischer Wertschöpfungsketten müssen für die in der Studie behandelten Schlüsselrohstoffe, Zwischenprodukte, Komponenten und strategischen Güter im Bereich der LIB durch robuste operative Maßnahmen unterlegt werden. Die Auswahl der ersten strategischen Projekte unter dem Schirm des CRMA im Frühjahr 2025 umfasst zahlreiche Vorhaben entlang der Wertschöpfungskette von Lithium-Ionen-Batterien. Es bedarf einer fortlaufenden Begleitung und eines Monitorings dieser Projekte, um aus formulierten Zielen messbare Erfolge werden zu lassen.
- In Deutschland sollten die Förderspielräume des Nationalen Rohstofffonds gezielt eingesetzt werden, um die heimische Wertschöpfungskette von LIB zu stärken (BMWE 2024).
- Die EU, die Bundesregierung und die Regierungen der weiteren Mitgliedstaaten müssen eine integrierte Strategie zur Entwicklung stabiler Wertschöpfungsketten verfolgen. Schwachstellen sind durch ein fortlaufendes Monitoring zeitnah zu identifizieren und Maßnahmen zu deren Behebung in die Wege zu leiten. Die Wertschöpfungsketten können nur zur Resilienz der EU beitragen, wenn alle Stufen gestärkt werden. Die bloße Gewinnung und Weiterverarbeitung von Batterierohstoffen in der EU erschließt nicht die vollen Potenziale, wenn nicht auch Gigafactories zur Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen von europäischen Unternehmen innerhalb der EU realisiert werden.
- Die Zielvorgaben der EU-Batterierichtlinie sind von der EU selbst und den Mitgliedstaaten fortlaufend im Auge zu behalten und deren Umsetzung muss von den Marktteilnehmern eingefordert werden.
- Der Export von für resiliente Wertschöpfungsketten wertvollen Zwischenprodukten wie Schwarzmasse aus der EU ist durch geeignete Maßnahmen wie die konsequente Anwendung kürzlich neu eingeführter Abfallschlüsselnummern in diesem Bereich robust zu unterbinden.
- EU-Mitgliedstaaten, die nachweislich ihren Verpflichtungen in den genannten Punkten nicht

nachkommen (z. B. bezüglich Exportbeschränkungen in Nicht-OECD-Länder) und damit die europäischen Interessen schwächen, sind von der EU mit den gebotenen und zulässigen Sanktionsmöglichkeiten auf den gemeinsam beschlossenen Kurs der EU zu leiten.

5.3 Diskussion und weitergehende Betrachtungen

Der spezifische Analyserahmen der betrachteten Geschäftsmodelle ist idealtypisch, da er von einem in sich abgeschlossenen System ausgeht: Fahrzeuge, die in der EU auf den Markt gebracht werden, werden auch innerhalb der EU an Zerleger veräußert und die enthaltenen Materialien werden letztlich ebenfalls in der EU recycelt. Diese Annahme ist zwar zur Herausarbeitung der Vor- und Nachteile der verschiedenen Geschäftsmodelle sinnvoll, gleichzeitig ist das Thema Schließung von Stoffkreisläufen in der Praxis aber deutlich komplexer. Zudem unterliegt das gesamte Themenfeld der Antriebsbatterien äußerst dynamischen Entwicklungen.

Zum einen sind die Stoffströme von Gebraucht- und Altfahrzeugen international, inklusive illegaler Verbrüngungen von Altfahrzeugen in Staaten außerhalb der EU. Der Export von Gebrauchtfahrzeugen mit Elektroantrieb würde dazu führen, dass diese Rohmaterialien der europäischen Kreislaufwirtschaft dauerhaft entzogen werden. Die gesetzlichen Bestimmungen zum Export von Gebrauchtfahrzeugen werden derzeit überarbeitet und könnten in Zukunft leicht verschärft werden. Allerdings besteht zum – aktuell noch sehr überschaubaren – Export von Gebrauchtfahrzeugen mit Elektroantrieb insbesondere in Zielländern wie zum Beispiel in Afrika weiterhin Forschungs- sowie Diskussionsbedarf. Dabei sind politische Ziele und Instrumente dieser afrikanischen Partnerländer zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors [Agora Verkehrswende 2025] ebenfalls zu berücksichtigen.

Gleichzeitig befindet sich das System in einer erheblichen Dynamik. Durch die fortlaufenden Weiterentwicklungen der Batteriechemien und die langen Zeithorizonte, die für einen rentablen Betrieb von Anlagen in der Recyclingindustrie notwendig sind, entstehen Unsicherheiten hinsichtlich der konkreten technischen Anforderungen an Recyclinganlagen sowie der ökonomischen Rentabilität des Recyclings.

Die vorliegende Studie verdeutlicht, dass ein permanenter und intensiver Austausch und Dialog entlang der gesamten Wertschöpfungskette des Batterierecyclings notwendig und wünschenswert ist, um auf die systemimmanen dynamischen Entwicklungen rechtzeitig und angemessen reagieren zu können.

6 | Literaturverzeichnis

ACC (2025a): *Billy-Berclau Gigafactory*. <https://www.acc-emotion.com/de/facilities/billy-berclau> (Abgerufen am 03.03.2025)

ACC (2025b): *Akkubauer ACC: Ohne Unterstützung droht „große strategische Niederlage“ für Europa*. <https://ecomento.de/2025/03/17/akkubauer-acc-ohne-unterstuetzung-droht-grosse-strategische-niederlage-fuer-europa/> (Abgerufen am 21.03.2025)

ACEA (2024): *New car registrations: +0.8% in 2024; battery-electric 13.6% market share*. <https://www.acea-auto.pc-registrations/new-car-registrations-0-8-in-2024-battery-electric-13-6-market-share/> (Abgerufen am 03.03.2024)

Accurec (2025): *Accurec strebt Lithium-Recycling im industriellen Maßstab an*. <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/accurec-strebt-lithium-recycling-im-industriellen-massstab-an-070425/> (Abgerufen am 07.05.2025)

AESC (2024): *AESC Spain celebrates the laying of the first stone of the battery gigafactory in Navalnoral de la Mata (Cáceres)*. <https://www.aesc-group.com/en/item/668bf854f7fe5a27254fcc59/> (Abgerufen am 09.05.2025)

Agora Verkehrswende (2025): *Starke Batterieindustrie, starker Automobilstandort. Neun Thesen zum Ausbau der Batterieproduktion für Elektromobilität in Deutschland und Europa*. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2025/Starke_Batterieindustrie__starker_Automobilstandort/128_Starke-Batterieindustrie-starker-Automobilstandort.pdf (Abgerufen am 17.07.2025)

Allen (2023): *Future of major Italian battery metals recycling plant in question*. <https://www.fastmarkets.com/insights/future-of-major-italian-battery-metals-recycling-plant-in-question/> (Abgerufen am 03.04.2025)

Allen (2024): *UK recycler Altium expanding to provide ‘fully circular’ model for Li battery materials*. <https://www.fastmarkets.com/insights/uk-recycler-altium-fully-circular-model-lithium-battery-materials/> (Abgerufen am 03.04.2025)

AMG Graphite (2025): *Mining*. <https://gk-graphite.com/services/mining> (Abgerufen am 27.02.2025)

AMG Lithium (2025): *Über uns*. <https://amglithium.com/de/unternehmen/ueber-uns> (Abgerufen am 27.02.2025)

AngloAmerican (2025): *About Sakatti*. <https://finland.angloamerican.com/en/about-sakatti> (Abgerufen am 27.02.2025)

Argo Media (2024): *India’s Attero to expand lithium-ion recycling capacity*. <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2586514-india-s-attero-to-expand-lithium-ion-recycling-capacity> (Abgerufen am 24.03.2025)

Ascend Elements (2024): *AE Elemental Opens Advanced Lithium-Ion Battery Recycling Facility in Poland*. <https://ascendelements.com/ae-elemental-opens-advanced-lithium-ion-battery-recycling-facility-in-poland/> (Abgerufen am 24.03.2025)

Aurubis (2022): *Growth area of battery recycling: Aurubis starts test operation in new pilot plant in Hamburg*. <https://www.aurubis.com/en/media/press-releases/press-releases-2022/growth-area-of-battery-recycling-aurubis-starts-test-operation-in-new-pilot-plant-in-hamburg> (Abgerufen am 03.04.2025)

BASF (2023): *BASF eröffnet Kathodenmaterial-Fabrik in Schwarzheide*. <https://www.electrive.net/2023/06/29/bASF-eröffnet-kathodenmaterial-fabrik-in-schwarzheide/> (Abgerufen am 28.02.2025)

BASF (2024a): *Rückgewinnung wertvoller Metalle in Schwarzheide: BASF nimmt Prototyp einer Metallraffinerie für Batterierecycling in Betrieb*. https://www.bASF.com/dam/jcr:5071aa9d-268e-3cdb-9ab8-bbc592835231/bASF/www/global/documents/de/news-and-media/news-releases/2024/04/P122_prototype-plant-start-up.pdf (Abgerufen am 03.04.2025)

BASF (2024b): *Joint News Release – BASF and Stena Recycling partner in recycling of electric vehicle batteries in Europe*. https://www.bASF.com/dam/jcr:bb40309e-a673-3e1f-8864-1221b4404381/bASF/www/global/documents/en/news-and-media/news-releases/2024/01/P100e_Joint-Press_Stena-BASF.pdf (Abgerufen am 11.04.2025)

BatPac (2022): K. W. Knehr, J. J. Kubal, P. A. Nelson, and S. Ahmed, *Battery Performance and Cost Modeling for Electric-Drive Vehicles A Manual for BatPaC v5.0* (2022)

BatReg (2023): Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023R1542> (Abgerufen am 11.04.2025)

Battery Atlas (2024): RWTH Aachen: *Battery Atlas 2024: Shaping the European Lithium Ion battery industry.*

Benchmark Minerals (2023): Infographic: *China controls three-quarters of graphite anode supply chain.* <https://source.benchmarkminerals.com/article/infographic-china-controls-three-quarters-of-graphite-anode-supply-chain> (Abgerufen am 30.04.2025)

Benchmark Minerals (2024a): *Umicore delays battery material expansion plans as short-term pressures bite.* <https://source.benchmarkminerals.com/article/umicore-delays-battery-material-expansion-plans-as-short-term-pressures-bite> (Abgerufen am 26.03.2025)

Benchmark Minerals (2024b): *In charts: How silicon anodes could impact graphite demand.* <https://source.benchmarkminerals.com/article/in-charts-how-silicon-anodes-could-impact-graphite-demand> (Abgerufen am 24.04.2025)

Benchmark Minerals (2024c): *Solid-state batteries bring new supply chain opportunities, challenges, and potential bottlenecks.* <https://source.benchmarkminerals.com/article/solid-state-batteries-bring-new-supply-chain-opportunities-challenges-and-potential-bottlenecks> (Abgerufen am 28.04.2025)

Benchmark Minerals (2024d): *Daten aus Benchmark Minerals Natural Graphite, Synthetic Graphite und Anode Forecast 2024.* <https://www.benchmarkminerals.com/> (Abgerufen am 28.04.2025)

Benchmark Minerals (2025a): *Mine to Grid: NCM.* <https://source.benchmarkminerals.com/video/watch/mine-to-grid-ncm> (Abgerufen am 20.03.2025)

Benchmark Minerals (2025b): *EU classifies black mass as hazardous waste to reduce critical mineral leakage.* <https://source.benchmarkminerals.com/article/eu-classifies-black-mass-as-hazardous-waste-to-reduce-critical-mineral-leakage> (Abgerufen am 11.04.2025)

Benchmark Minerals (2025c): *How could China's proposed technology export restrictions impact cathode expansions overseas?* <https://source.benchmarkminerals.com/article/how-could-chinas-proposed-technology-export-restrictions-impact-cathode-expansions-overseas> (Abgerufen am 28.04.2025)

Benchmark Minerals (2025d): *Mine to Grid: Anode.* <https://source.benchmarkminerals.com/video/watch/mine-to-grid-anode> (Abgerufen am 30.04.2025)

Benchmark Minerals (2025e): *Global EV sales rise 50% in February, but Tesla struggles.* <https://source.benchmarkminerals.com/article/global-ev-sales-rise-50-in-february-but-tesla-struggles> (Abgerufen am 30.04.2025)

Benchmark Minerals (2025f): *Mine to Grid: LFP.* <https://source.benchmarkminerals.com/video/watch/mine-to-grid-lfp-2> (Abgerufen am 30.04.2025)

Benchmark Minerals (2025g): *What's the impact of China's proposed export controls on lithium and cathode technologies?* <https://source.benchmarkminerals.com/video/watch/whats-the-impact-of-chinas-proposed-export-controls-on-lithium-and-cathode-technologies> (Abgerufen am 30.04.2025)

Benchmark Minerals (2025h): *What does Northvolt's bankruptcy mean for Europe's battery ambitions?* <https://source.benchmarkminerals.com/article/what-does-northvolts-bankruptcy-mean-for-europes-battery-ambitions> (Abgerufen am 30.04.2025)

Betz et al. (2019): Betz, J., Bieker, G., Meister, P., Placke, T., Winter, M., & Schmuck, R. (2019). *Theoretical versus practical energy: a plea for more transparency in the energy calculation of different rechargeable battery systems.* Advanced Energy Materials, 9(6), 1803170

Bockey (2024): *Battery Recycling in Europe (January 2024).* <https://battery-news.de/en/2024/01/19/battery-recycling-in-europe-as-of-january-2023/> (Abgerufen am 07.05.2025)

Boliden (2025a): *Open pit mine in one of Finland's biggest mineral deposit areas.* <https://www.boliden.com/operations/mines/boliden-kevitsa/> (Abgerufen am 27.02.2025)

Boliden (2025b): *Metals for Modern Life.* Boliden Group. https://www.boliden.com/globalassets/media/337-6514-metals-for-modern-life-2017-en_final.pdf (Abgerufen am 27.02.2025)

BMWE (2024): *Rohstofffonds der Bundesregierung startet.* <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2024/10/20241002-rohstofffonds-der-bundesregierung-startet.html> (Abgerufen am 15.08.2025)

BMWK (2023): *Öko-Institut e. V: Bedarf strategischer Rohstoffe für den Pkw- und Lkw-Sektor in Deutschland bis 2040.* Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Rohstoffbedarf-PKW-LKW-Szenarien-D.pdf> (Abgerufen am 30.11.2023)

Business Wire (2022): *Li-Cycle and Glencore Accelerate Operational Plans for European Recycling Hub.* <https://www.businesswire.com/news/home/20230918660608/en/Li-Cycle-and-Glencore-Accelerate-Operational-Plans-for-European-Recycling-Hub> (Abgerufen am 03.04.2025)

BZF (2024a): VDI/VDE Innovation + Technik. *Wissenschaftliche Begleitung Batteriezellforschung: Batteriezellfertigung in Europa: Status Quo und Ausblick* (Mai 2024)

BZF (2024b): VDI/VDE Innovation + Technik. *Weakening European electric vehicle market: Challenges and Opportunities for the battery industry* (Dezember 2024)

CRMA (2024): *Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020.* https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401252 (Abgerufen am 28.02.2025)

CRMA (2025): *Commission decision of 25.3.2025 recognising certain critical raw material projects as Strategic Projects under Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council, C(2025) 1904 final* (Abgerufen am 05.05.2025)

cylib (2024): *Made in Germany: Battery recycler cylib to scale strategic critical raw material production for Europe.* <https://www.cylib.de/post/made-in-germany-battery-recycler-cylib-to-scale-strategic-critical-raw-material-production-for-europe> (Abgerufen am 07.05.2025)

Diario de Navarra (2024): *La planta de reciclaje de baterías de Caparroso podrá dar empleo a 70 personas.* <https://www.diariodenavarra.es/noticias/negocios/dn-management/2024/08/26/planta-reciclaje-baterias-caparroso-podra-dar-empleo-70-personas-619767-2541.html> (Abgerufen am 25.03.2025)

Donner (2022): *Elektroautos: Akku-Recycling schon jetzt wirtschaftlich.* <https://www.heise.de/hintergrund/E-Autos-Akku-Recycling-schon-jetzt-wirtschaftlich-7161779.html> (Abgerufen am 09.05.2025)

DUH et al., (2025): *JRC recycled content calculation and verification rules (Article 8 of Regulation (EU) 2023/1542).* Joint position of DUH, EEB, ECOS and ZWE on stakeholder workshop on 3rd April 2025

EC (2024): *Waste shipments.* https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-shipments_en (Abgerufen am 27.04.2025)

EC (2025): *New battery-related waste codes will boost circular management of batteries and their critical raw materials.* https://environment.ec.europa.eu/news/battery-related-waste-codes-update-set-boost-circular-economy-2025-03-05_en (Abgerufen am 07.05.2025)

EcoBatRec (2016): *Ökobilanzen zu den Recyclingverfahren LithoRec II und EcoBatRec für Lithium-Ionen-Batterien-LCA-Li-Bat-Recycling;* Buchert, M.; Sutter, J.; in Kooperation mit TU Braunschweig, Volkswagen, RWTH Aachen, Rock-wood Lithium GmbH, Electrocycling GmbH, Solvay Fluor GmbH, Audi AG, Accurec Recycling GmbH; 2016; Förderung: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)

EcoPro (2025): Group History. <https://ecoprobmh.com/en/sub010103> (Abgerufen am 28.02.2025)

electrive (2025): Finnish Minerals beginnt mit Bau seiner Kathodenmaterial-Fabrik. (Florian Theiß). <https://www.electrive.net/2025/03/20/finnish-minerals-beginnt-mit-bau-seiner-kathodenmaterial-fabrik/> (Abgerufen am 28.04.2025)

ELVD (2000): Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of-life vehicles – Commission Statements, OJ L 269, 21.10.2000, p. 34–43 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32000L0053> (Abgerufen am 29.04.2025)

ELV IA (2023): Öko-Institut, Mehlhart Consulting. Rahmenvertrag unter Ramboll Copenhagen. *Study to support the impact assessment for the Review of Directive 2000/53/EC on end-of-life-vehicles*

ELVRegProp (2023): Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über Anforderungen an die Kreislauforientierte Konstruktion von Fahrzeugen und über die Entsorgung von Altfahrzeugen, zur Änderung der Verordnungen (EU) 2018/858 und (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinien 2000/53/EG und 2005/64/EG. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN-DE/TXT/?from=EN&uri=CE-LEX%3A52023PC0451> (Abgerufen am 25.04.2025)

European Lithium (2025): Wolfsberg-Projekt. <https://europeanlithium.com/wolfsberg-lithium-project/> (Abgerufen am 26.02.2025)

EU (2023): Europäisches Parlament, Europäischer Rat. *Verordnung (EU) 2023/851 vom 19. April 2023 zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/631 im Hinblick auf eine Verschärfung der CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge im Einklang mit den ehrgeizigeren Klimazielen der Union* (19.04.2023)

EVE Germany GmbH (2023): EVE Power baut ein Ökostrom-Kraftwerk zur Versorgung von BMW-Elektroautos in Ungarn. <https://www.evebattery.de/news-1275> (Abgerufen am 09.05.2025).

Fortum (2023): *Fortum Battery Recycling receives permit to start battery recycling operations in Germany.* <https://www.fortum.com/media/2023/03/fortum-battery-recycling-receives-permit-start-battery-recycling-operations-germany> (Abgerufen am 24.03.2025)

Fortum (2024): *Fortum Battery Recycling and Hydrovolt join forces to drive the Nordic battery industry forward.* <https://www.fortum.com/media/2024/02/fortum-battery-recycling-and-hydrovolt-join-forces-drive-nordic-battery-industry-forward> (Abgerufen am 11.04.2025)

Gherasim/Michel (2024): *Europe's Black Mass Evasion: From Black Box to Strategic Recycling.* <https://www.ifri.org/en/studies/europe-s-black-mass-evasion-black-box-strategic-recycling> (Abgerufen am 03.04.2025)

Giga Europe (2025): *Beyond China: Global Outlook on Graphite and Battery Anode Supply.* (Veranstaltung, 21.03.2025)

Glencore (2025a): *Metals and Minerals: Nickel.* <https://www.glencore.com/what-we-do/metals-and-minerals/nickel> (Abgerufen am 27.02.2025)

Glencore (2025b): *Metals and Minerals: Cobalt.* <https://www.glencore.com/what-we-do/metals-and-minerals/cobalt> (Abgerufen am 27.02.2025)

Gobierno de Navarra (2024): *La Presidenta Chivite se reúne con el consorcio coreano-español promotor del proyecto BeeCycle para avanzar en su implantación.* <https://www.navarra.es/es/-/nota-prensa/la-presidenta-chivite-se-reune-con-el-consorcio-coreano-espagnol-promotor-del-proyecto-beecycle-para-avanzar-en-su-implantacion> (Abgerufen am 07.05.2025)

H.C. Starck Tungsten (2025): *Fördermittel-Zusage für neue Batterie-Recyclinganlage in Goslar.* <https://www.electrive.net/2025/04/05/foerdermittel-zusage-fuer-neue-batterie-recyclinganlage-in-goslar/> (Abgerufen am 06.05.2025)

Hartmann (2022): *Deutschland ist in Europa Vorreiter bei Recyclinganlagen für Lithium-Ionen-Batterien.* <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/deutschland-in-europa-vorreiter-bei-recyclinganlagen-fuer-lithium-ionen-batterien-240522/> (Abgerufen am 09.05.2025).

Heimes et al. (2021): H. Heimes, A. Kamper, C. Offermanns, K. Kreisköther, A. Kwade, S. Doose, M. Ahuis, P. Michalowski, S. Michaelis, E. Rahimzei, S. Brückner, K. Rottnick: *Recycling von Lithium-Ionen-Batterien*. PEM RWTH Aachen, VDMA, Battery Lab Factory TU Braunschweig

Hunan Yuneng (2024): China's Hunan Yuneng to build Spain battery LFP plant. <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2561383-china-s-hunan-yuneng-to-build-spain-battery-lfp-plant>, Artikel vom 24.04.2024 (Abgerufen am 28.02.2025).

ICCT (2023): Alexander Tankou, Georg Bieker, Dale Hall: *Scaling up reuse and recycling of electric vehicle batteries: Assessing challenges and policy approaches*. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/02/recycling-electric-vehicle-batteries-feb-23.pdf> (Abgerufen am 04.07.2025)

IEA (2023): Share of battery capacity of electric vehicle sales by chemistry and region, 2021–2023. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-battery-capacity-of-electric-vehicle-sales-by-chemistry-and-region-2021-2023> (Abgerufen am 03.03.2025)

Imerys (2025): The EMILI Project. <https://emili.imerys.com/en/emili-project> (Abgerufen am 26.02.2025)

Imerys (2025b): Minerals & more Graphite. <https://www.imerys.com/minerals/graphite> (Abgerufen am 28.02.2025)

Innovation Origins (2023): France encourages battery recycling projects. <https://innovationorigins.com/en/france-encourages-battery-recycling-projects/> (Abgerufen am 09.05.2025)

ISWA (2024): Veolia's Pascal Muller says "We are leader in the field of battery recycling". <https://waste-management-world.com/resource-use/we-are-leader-in-the-field-of-battery-recycling/> (Abgerufen am 07.05.2025)

JRC (2022): Raw Materials Profiles – Nickel. <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/rmp/Nickel> (Abgerufen am 27.02.2025)

Kaisersberg (2025): Das Unternehmen. <https://www.grafit.at/> (Abgerufen am 27.02.2025)

Keliber (2025): Lithium project. <https://www.sibanyestill-water.com/business/europe/keliber/lithium-project/> (Abgerufen am 26.02.2025)

Labournet (2024): Kampf gegen Privatisierung des griechischen Nickelunternehmens Larco: Mehr als 1000 Beschäftigte werden entlassen und verlieren auch ihre Werkwohnungen. <https://www.labournet.de/interventionen/solidaritaet/kampf-gegen-privatisierung-des-griechischen-nickelunternehmens-larco-mehr-als-1000-beschaeftigte-werden-entlassen-und-verlieren-auch-ihre-werkwohnungen/> Artikel vom 15.08.2024, (Abgerufen am 27.02.2025)

LG Energy Solution (2025): Get to know us. <https://lgen-sol.pl/en/get-know-us/> (Abgerufen am 09.05.2025)

Li-Cycle (2024a): Li-Cycle Receives Approval for Government Grant from State of Saxony-Anhalt for Lithium-Ion Battery Recycling Facility. <https://li-cycle.com/press-releases/li-cycle-receives-approval-for-government-grant-from-state-of-saxony-anhalt-for-lithium-ion-battery-recycling-facility/> (Abgerufen am 24.03.2025)

Li-Cycle (2024b): Li-Cycle Provides Update on Pre-Feasibility Study for European Recycling Hub Project and Collaboration with Glencore. <https://investors.li-cycle.com/news/news-details/2024/Li-Cycle-Provides-Update-on-Pre-Feasibility-Study-for-European-Recycling-Hub-Project-and-Collaboration-with-Glencore/default.aspx> (Abgerufen am 03.04.2025)

LiBRi (2011): Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzepts für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – LiBRi. Teilprojekt: LCA der Recyclingverfahren, Leitung Umbrella Arbeitsgruppe LCA, Mitwirkung Ressourcenarbeitsgruppe; Buchert, M.; Jenseit, W.; Merz, C.; Schüler, D.; in Zusammenarbeit mit: Umicore AG & Co. KG, Hanau (Verbundleitung); Daimler AG (DAI), Stuttgart; TU Clausthal, Institut für Aufbereitung, Deponie-technik und Geomechanik (IFAD), Clausthal-Zellerfeld; 2011; Förderung: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); VDI/VDE Innovation, Berlin

LithoRec I (2011): Ökobilanz zum „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec); Buchert, M.; Jenseit, W.; Merz, C.; Schüler, D.; 2011; Förderung: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)

LithoRec II (2016): Ökobilanzen zu den Recyclingverfahren LithoRec II und EcoBatRec für Lithium-Ionen-Batterien - LCA-Li-Bat-Recycling; Buchert, M.; Sutter, J.; in Kooperation mit TU Braunschweig, Volkswagen, RWTH Aachen, Rock-wood Lithium GmbH, Electrocycling GmbH, Solvay Fluor GmbH, Audi AG, Accurec Recycling GmbH; 2016; Förderung: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)

Lyten (2025): US-Batterieentwickler Lyten will Northvolt übernehmen. <https://www.electrive.net/2025/08/07/us-batterieentwickler-lyten-will-northvolt-uebernehmen/> (Abgerufen am 22.08.2025)

Marxt (2025): Innovatives Direktrecycling bei der BMW Group: Neues Kompetenzzentrum in Niederbayern bringt Rohstoffe aus Batteriezellen zurück in den Kreislauf. <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0446534DE/innovatives-direktrecycling-bei-der-bmw-group:-neues-kompetenzzentrum-in-niederbayern-bringt-rohstoffe-aus-batteriezellen-zurueck-in-den-kreislauf> (Abgerufen am 25.4.2025)

MDR (2024): 1.500 Einwände gegen Batterie-Recyclingfabrik in Artern. <https://www.mdr.de/nachrichten/thueringen/nord-thueringen/kyffhaeuser/batterie-recyclingfabrik-artern-einwaende-umweltamt-100.html> (Abgerufen am 26.03.2025)

MDR (2025): Sungeel stoppt Pläne für Batterie-Recyclinganlage in Gera. <https://www.mdr.de/nachrichten/thueringen/ost-thueringen/gera/sungeel-batterie-recycling-anlage-100.html> (Abgerufen am 26.03.2025)

Mendoza (2024): Spain makes its debut in lithium battery recycling market to extract valuable metals. <https://www.surinenglish.com/spain/spain-makes-its-debut-battery-recycling-extract-20240712083732-nt.html> (Abgerufen am 07.05.2025)

MERCATOR (2023): Material Effizientes Recycling für die Circular Economy von Automobilspeichern durch Technologie Ohne Reststoffe. Accurec Recycling GmbH, IME der RWTH Aachen, CTG GmbH, UVR-FIA GmbH, Öko-Institut e.V., Juni 2023, mit Förderung durch das BMWK (FKZ 16EM4007)

Mercedes-Benz (2024): Batterie-Kreislauf mit eigener Recyclingfabrik geschlossen. <https://group.mercedes-benz.com/unternehmen/news/recyclingfabrik-kuppenheim.html> (Abgerufen am 03.04.2025)

Mineral Commodities (2025): Skaland Graphite Operation. Mineral Commodities. <https://www.mineralcommodities.com/operations-projects/graphite/norway/> (Abgerufen am 27.02.2025)

Neometals (2022): Primobius eröffnet erste kommerzielle Recyclinganlage. https://www.neometals.com.au/wp-content/uploads/2022/03/20220328-Hilchenbach-opening-event-Final_DE.pdf (Abgerufen am 24.03.2025)

Nissan (2025): Nissan and Stena Recycling Give Used EV Batteries a New Life. <https://europe.nissannews.com/en-GB/releases/nissan-and-stena-recycling-give-used-ev-batteries-a-new-life> (Abgerufen am 1.9.2025)

Nornickel (2025): Nornickel Hjarvalta. <https://www.nornickel.fi/> (Abgerufen am 27.02.2025)

Northvolt (2024): Taking the front seat in Germany's energy transition. <https://northvolt.com/career/locations/heide/> (Abgerufen am 09.05.2025)

Northvolt (2025a): Europe's first homegrown gigafactory. <https://northvolt.com/career/locations/skelleftea/> (Abgerufen am 03.03.2025)

Northvolt (2025b): Northvolt: Was wird aus der Fabrik in Heide? <https://www.zdf.de/nachrichten/wirtschaft/unternehmen/northvolt-batterien-schweden-insolvenz-100.html> (Abgerufen am 20.03.2025)

NOVO Energy AB (2024): Start of construction for Sweden's second, and Gothenburg's first battery gigafactory. <https://www.novoenergy.se/start-of-construction-for-swedens-second-and-gothenburgs-first-battery-gigafactory> (Abgerufen am 09.05.2025)

NOW (2024): Strategische Rohstoffe für Antriebsbatterien in Elektrofahrzeugen. Marktanalyse (11/2024)

Osusky (2025): Blackbox Schwarzmasse. <https://background.tagesspiegel.de/energie-und-klima/briefing/blackbox-schwarzmasse> (Abgerufen am 03.04.2025)

Phi4Tech (2025): Cathode factory. <https://www.nanomate.es/en/projects/> (28.02.2025).

POSCO (2022): POSCO builds EV battery recycling plant in Poland. <https://newsroom.posco.com/en/posco-builds-ev-battery-recycling-plant-in-poland/> (Abgerufen am 03.05.2025)

PowerCo (2023): Where transformation happens – welcome to Salzgitter. <https://www.powerco.de/en/career/salzgitter.html> (Abgerufen am 09.05.2025)

Randall (2023a): EIB grants AESC funds for battery factory in France. <https://www.electrive.com/2023/10/13/eib-grants-aesc-funds-for-battery-factory-in-france/> (Abgerufen am 09.05.2025)

Randall (2023b): Stena opens new battery recycling plant in Sweden. <https://www.electrive.com/2023/03/30/stena-opens-new-battery-recycling-plant-in-sweden/> (Abgerufen am 07.05.2025)

Randall (2023c): Andrada Group to build battery recycling plant in Hungary. <https://www.electrive.com/2023/08/30/andrada-group-to-build-battery-recycling-plant-in-hungary/> (Abgerufen am 07.05.2025)

Randall (2024): Fortum faces resistance on planned recycling factory in Germany. <https://www.electrive.com/2024/08/23/fortum-faces-resistance-on-planned-recycling-factory-in-germany/> (Abgerufen am 26.03.2025)

Redwood (2025): Redwood expands in Europe, acquiring leading EU battery recycler, Redux Recycling GmbH. <https://www.redwoodmaterials.com/news/redwood-europe/> (Abgerufen am 24.03.2025)

Renard (2024): Key challenges to setup a competitive LFP – Na-ion low cost supply chain to serve the European market. Präsentation im Rahmen des Battery Experts Forum, Avicenne Energy, 6.11.2024, Darmstadt, Deutschland

Renault Group (2021): Groupe Renault, Veolia & Solvay join forces to recycle end-of-life EV battery metals in a closed loop. <https://media.renaultgroup.com/groupe-renault-veolia-solvay-join-forces-to-recycle-end-of-life-ev-battery-metals-in-a-closed-loop/> (Abgerufen am 25.04.2025)

RLG (2025a): What is Eco-Modulation? <https://rev-log.com/resource/what-is-eco-modulation/> (Abgerufen am 27.4.2025)

RLG (2025b): What are Producer Responsibility Organisations (PROs)? <https://rev-log.com/resource/what-are-producer-responsibility-organisations/> (Abgerufen am 27.4.2025)

Roland Berger (2024): Direkte Mitteilung von Dr. Wolfgang Bernhart am 17.12.2024. *Roland Berger Battery Demand-Supply Market Model, Graphite Demand and Supply in Europe*

Samsung E&A (2025): Samsung SDI K Phase 1 Project. <https://www.samsungena.com/en/business/project-template?idx=68> (Abgerufen am 09.05.2025)

Savannah resources (2025): Barroso Lithium Project, Portugal – The most significant conventional lithium project in Europe. <https://www.savannahresources.com/project/barroso-lithium-project-portugal/> (Abgerufen am 26.02.2025)

Schaidnagel (2025): BMW Group treibt Kreislaufwirtschaft für Hochvoltbatterien voran – Pressemeldung. <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0447285DE/bmw-group-treibt-kreislaufwirtschaft-fuer-hochvoltbatterien-voran?language=de> (Abgerufen am 11.04.2025)

Scheuermann (2024): Nachhaltige Kreislaufwirtschaft: Automobilkonzerne setzen auf Batterierecycling. <https://www.powtech-technopharm.com/de-DE/industry-insights/2024/artikel/sustainable-circular-economy-automotive-companies-focus-battery-recycling> (Abgerufen am 08.05.2025)

Schramm (2024a): ESM and Ascend Elements plan EV battery recycling plant in Germany. <https://www.euwid-recycling.com/news/business/esm-and-ascend-elements-plan-battery-recycling-plant-in-germany-220524/> (Abgerufen am 24.03.2025)

Schramm (2024b): BASF erhält fast fünf Mio € für Batterie-Recycling in Schwarzheide. <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/bASF-erhaelt-fast-fuenf-mio-eur-fuer-batterie-recycling-in-schwarzheide-190724/> (Abgerufen am 24.03.2024)

Schramm (2024c): Sachsen: Erlos eröffnet Batterie-Recyclinganlage. <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/sachsen-erlos-eroeffnet-batterie-recycling-anlage-240724/> (Abgerufen am 07.05.2025)

SGL Carbon (2025): Unsere Standorte – die SGL Carbon weltweit. <https://www.sglcarbon.com/unternehmen/ueber-uns/standorte-weltweit/> (Abgerufen am 28.01.2025)

SKN (2023): Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2023): Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045. Studie im Auftrag der Stiftung Klimaneutralität. <https://www.stiftung-klima.de/de/studie/> (Abgerufen am 28.01.2025)

SK Tes (2023): Hydrometallurgy vs Pyrometallurgy: Best Methods for Battery Recycling. <https://www.sktes.com/news/the-difference-between-hydrometallurgy-and-pyrometallurgy#what-is-TES-doing> (Abgerufen am 11.04.2025)

SNAM (2025): Treatments. <https://www.snam.com/en/our-expertise/treatments/> (Abgerufen am 03.04.2025)

Stellantis (2023): Stellantis and Orano Enter Electric Vehicle Battery Recycling Agreement. <https://www.stellantis.com/en/news/press-releases/2023/october/stellantis-and-orano-enter-electric-vehicle-battery-recycling-agreement> (Abgerufen am 25.4.2025)

Stephan (2024): Battery recycling in Europe continues to pick up speed: Recycling capacities of lithium-ion batteries in Europe. <https://www.isi.fraunhofer.de/en/blog/themen/batterie-update/lithium-ionen-batterie-recycling-europa-kapazitaeten-update-2024.html> (Abgerufen am 07.05.2025)

SungEel HiTech (2025): Our story. <https://www.sungeelht.hu/eng/about1.html> (Abgerufen am 24.03.2025)

Sustainable Bus (2024): Hungary – the future paradise for EV battery manufacturers? <https://www.sustainable-bus.com/news/hungary-battery-plants-ev-projects/> (Abgerufen am 09.05.2025)

T&E (2024): What Strategic Projects to select – T&E recommendations on the implementation of the EU Critical Raw Materials Act. https://www.transportenvironment.org/uploads/files/2024_09_CRMA_implementation_briefing.pdf (Abgerufen am 07.05.2025)

Talga Resources (2024): Talga's mining study outlines expansion potential at Vittangi. <https://mining.com.au/talgas-mining-study-outlines-expansion-potential-at-vittangi/>, Artikel vom 31.05.2024. (Abgerufen am 27.02.2025)

Terrafame (2025): Our product journey. <https://www.terrafame.com/offering/our-product-journey.html> (Abgerufen am 27.02.2025)

Toaki COBEX (2024): Battery Show Europe 2024. <https://event.businessfrance.fr/the-battery-show-europe-2024/tokai-cobex/> (Abgerufen am 28.2.2025)

TÜV NORD GROUP (2023): Batteriezellen in Deutschland: Wer baut wo? <https://www.tuev-nord.de/explore/de/innovation/batteriezellen-in-deutschland-wer-baut-wo/> (Abgerufen am 09.05.2025)

Umicore (2022a): <https://www.umincore.de/de/presse/news/umicore-eröffnet-europas-erste-gigafactory-für-batteriematerialien/> (Abgerufen am 28.02.2025)

Umicore (2022b): Umicore introduces new generation Li-ion battery recycling technologies and announces award with ACC. <https://www.umincore.com/en/media/newsroom/new-generation-li-ion-battery-recycling-technologies-and-announces-award-with-acc/> (Abgerufen am 09.05.2025)

Umicore (2023): Umicore eröffnet Europas erste Gigafactory für Batteriematerialien. <https://www.umincore.com/en/media/newsroom/umicore-battery-recycling/> (Abgerufen am 18.03.2025)

Umicore (2025a): Kokkola – Nickel. <https://www.umincore.fi/en/our-sites/our-metals/nickel/> (Abgerufen am 27.02.2025)

Umicore (2025b): Umicore in Kokkola. <https://www.umincore.fi/en/> (Abgerufen am 27.02.2025)

USGS (2023): U.S. Geological Survey. (2023). Mineral Commodity Summaries

Velázquez-Martínez et al. (2019): Velázquez-Martínez, O., Valio, J., Santasalo-Aarnio, A., Reuter, M., Serna-Guerrero, R. (2019): *A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective*. <https://www.mdpi.com/2313-0105/5/4/68> (Abgerufen am 09.05.2025)

Vianode (2025): Anode graphite for the carbon neutral society. <https://www.vianode.com/company>, (Abgerufen am 28.02.2025)

Vulcan Energy (2025): Zero Carbon Lithium™ Projekt. <https://v-er.eu/de/zero-carbon-lithium-business/> (Abgerufen am 26.02.2025)

VW Autobrander (AG 2021): Aus alt mach neu – Batterierecycling in Salzgitter – In Salzgitter passt gerade etwas, das es im Volkswagen Konzern noch nie gab. <https://www.auto-brander.ch/de/aus-alt-mach-neu-batterierecycling-in-salzgitter> (Abgerufen am 25.4.2025)

Volkswagen (AG 2023): Gigafactory Valencia: PowerCo gibt Startschuss für Bau der zweiten Zellfabrik. Pressemitteilung. <https://www.volkswagen-group.com/de/pressemitteilungen/gigafactory-valencia-powerco-gibt-startschuss-fuer-bau-der-zweiten-zellfabrik-17033> (Abgerufen am 09.05.2025).

Volkswagen (AG 2024): Das Batterierecycling von Volkswagen – Für einen geschlossenen Kreislauf. <https://www.volkswagen.ch/de/entdecken-und-erleben/volkswagen-magazin/nachhaltigkeit/das-batterierecycling-von-volkswagen.html> (Abgerufen am 25.4.2025)

Werwitzke (2023): Frankreich: Baubeginn von Verkors Zellenfabrik in Dünkirchen. <https://www.electrive.net/2023/11/17/frankreich-baubeginn-von-verkors-zellenfabrik-in-duenkirchen/> (Abgerufen am 09.05.2025)

Werwitzke (2024a): Jetzt offiziell: Stellantis und CATL bauen Werk für LFP-Batteriezellen in Spanien. <https://www.electrive.net/2024/12/10/jetzt-offiziell-stellantis-und-catl-bauen-werk-fuer-lfp-batteriezellen-in-spanien/> (Abgerufen am 09.05.2025)

Werwitzke (2024b): Eramet und Suez setzen Pläne für Batterierecycling in Frankreich aus. <https://www.electrive.net/2024/10/25/eramet-und-suez-setzen-plaene-fuer-batterierecycling-in-frankreich-aus/> (Abgerufen am 03.04.2025)

Wilfer (2023): Batterierecycling: Start-up Tozero kooperiert mit chinesischer Huayou-Gruppe. <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/batterierecycling-start-up-tozero-kooperiert-mit-chinesischer-huayou-gruppe-221123/> (Abgerufen am 03.04.2025)

Wilfer (2024): SK Tes opens lithium battery recycling plant in Rotterdam. <https://www.euwid-recycling.com/news/business/sk-tes-opens-lithium-battery-recycling-plant-in-rotterdam-260924/> (Abgerufen am 07.05.2025)

WP Holding (2025): Akkurecycling. <https://www.wphgroup.de/akkurecycling/index.php/> (Abgerufen am 24.03.2025)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Globale Batterienachfrage 2020, 2024 und 2030	9
Abbildung 2-2:	Vergleich der Wertschöpfungsketten von Anoden aus synthetischem beziehungsweise natürlichem Graphit	11
Abbildung 3-1:	Wertschöpfungskette (stark vereinfacht) für LIB (NMC und LFP)	13
Abbildung 3-2:	Förderung von Lithium, Kobalt, Nickel und Graphit nach Ländern weltweit (2023)	14
Abbildung 3-3:	Herkunft der Unternehmen, die Zellproduktionsstätten für LIB in der EU planen	19
Abbildung 3-4:	Schema (stark vereinfacht) des Recyclings von Li-Ionen-Batterien	20
Abbildung 3-5:	Zulassungszahlen der BEV und Hybride der verschiedenen Fahrzeugklassen im Modell 2020–2040 (Mio. Stück/a)	29
Abbildung 3-6:	Zeitliche Entwicklung der Zellchemiezusammensetzung für Pkw (EU-27) im Szenario NMC 2020–2040	30
Abbildung 3-7:	Zeitliche Entwicklung der Zellchemiezusammensetzung für Pkw (EU-27) im Szenario LFP 2020–2040	31
Abbildung 3-8:	Zeitliche Entwicklung der Zellchemiezusammensetzung für Pkw (EU-27) im Szenario AB 2020–2040	31
Abbildung 3-9:	Benötigte Batteriekapazitäten für Antriebsbatterien nach Fahrzeugklassen sowie deren Rückläufe in der EU-27 in GWh/a 2020–2040	32
Abbildung 3-10:	Anteil der verschiedenen Batterietypen am Gesamtgewicht der benötigten Antriebsbatterien im Szenario AB in der EU-27 in Mio. t/a 2020–2040	33
Abbildung 3-11:	Vergleich des Rohstoffbedarfs und Sekundärrohstoffpotenzials für Lithium in den drei betrachteten Szenarien in der EU-27 in kt/a 2020–2040	34
Abbildung 3-12:	Vergleich des Rohstoffbedarfs und Sekundärrohstoffpotenzials für Nickel in den drei betrachteten Szenarien in der EU-27 in kt/a 2020–2040	35
Abbildung 3-13:	Vergleich des Rohstoffbedarfs und Sekundärrohstoffpotenzials für Kobalt in den drei betrachteten Szenarien in der EU-27 in kt/a 2020–2040	36
Abbildung 3-14:	Vergleich des Rohstoffbedarfs und Sekundärrohstoffpotenzials für Graphit in den drei betrachteten Szenarien in der EU-27 in kt/a 2020–2040	37
Abbildung 3-15:	Vergleich des Graphitbedarfs im Szenario NMC mit einem Vergleichsszenario der Siliziumsubstitution in der EU-27 in kt/a 2020–2040	37
Abbildung 3-16:	Volatilität des Lithiumpreises 2015–2033 und mögliche Einflüsse auf Investitionsentscheidungen in die primäre und sekundäre Wertschöpfungskette	39
Abbildung 4-1:	Batterierecycling, Variante 1: Fahrzeughersteller betreibt eigenes System (Einzel-OEM)	45
Abbildung 4-2:	Batterierecycling, Variante 2: Mehrere Fahrzeughersteller betreiben eigenes System (Multi-OEM)	47
Abbildung 4-3:	Batterierecycling, Variante 3: Organisation für Herstellerverantwortung betreibt System ohne eigenen Recycler (PRO ohne Recycler)	49
Abbildung 4-4:	Batterierecycling, Variante 4: Organisation für Herstellerverantwortung betreibt System mit eigenem Recycler (PRO mit Recycler)	52

Abbildung 7-1:	Szenarioannahmen für leichte Nutzfahrzeuge im Szenario NMC, LFP, AB	72
Abbildung 7-2:	Szenarioannahmen für schwere Nutzfahrzeuge im Szenario NMC	73
Abbildung 7-3:	Szenarioannahmen für schwere Nutzfahrzeuge im Szenario LFP	74
Abbildung 7-4:	Szenarioannahmen für schwere Nutzfahrzeuge im Szenario AB	75

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Am weitesten vorangeschrittene Projekte zur Förderung von Lithium in der EU	15
Tabelle 3-2:	Wichtigste Projekte zum Bau von Zellfabriken in der EU	18
Tabelle 3-3:	Anlagen zur Schwarzmasseproduktion in der EU (Spokes)	22
Tabelle 3-4:	Anlagen zur Weiterverarbeitung von Schwarzmasse in der EU (Hubs)	24
Tabelle 3-5:	Anlagen mit integrierten Prozessen in der EU (Spokes and Hubs)	26
Tabelle 3-6:	Übersicht über die betrachteten Fahrzeugklassen und angenommenen Batterieparameter	28
Tabelle 4-1:	SWOT-Analyse für Geschäftsmodell 1: Einzel-OEM	46
Tabelle 4-2:	SWOT-Analyse für Geschäftsmodell 2: Multi-OEM	48
Tabelle 4-3:	SWOT-Analyse für das Geschäftsmodell 3: PRO ohne Recycler	51
Tabelle 4-4:	SWOT-Analyse zum Geschäftsmodell 4: PRO mit Recycler	53
Tabelle 7-1:	Lithiumgehalt verschiedener im Lithiumabbau anfallender Li-Verbindungen	72

7 | Anhang

Lithiumgehalt verschiedener im Lithiumabbau anfallender Li-Verbindungen

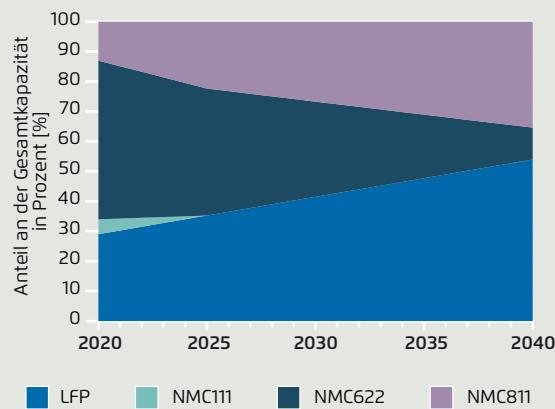
Tabelle 7-1

Name	Lithiumkarbonat (LCE)	Lithiumhydroxid	Lithiumhydroxid-monohydrat
Formel	Li_2CO_3	LiOH	$\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$
Umrechnungsfaktor Li	5,32	3,42	6,06

Agora Verkehrswende (2025) | Quelle: Öko-Institut.

Szenarioannahmen für leichte Nutzfahrzeuge (LNF) im Szenario NMC 2020–2040

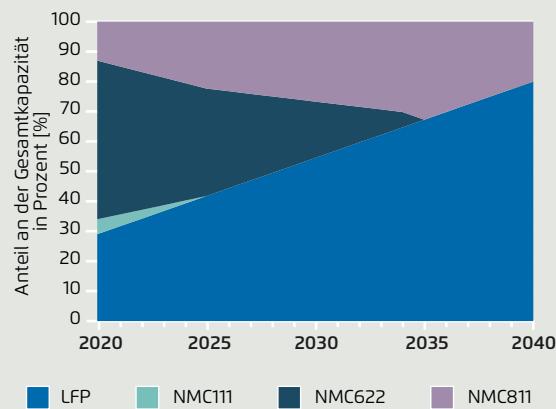
Abbildung 7-1a



Agora Verkehrswende (2025) | Quelle: Eigene Annahmen
Öko-Institut.

Szenarioannahmen für leichte Nutzfahrzeuge (LNF) im Szenario LFP 2020–2040

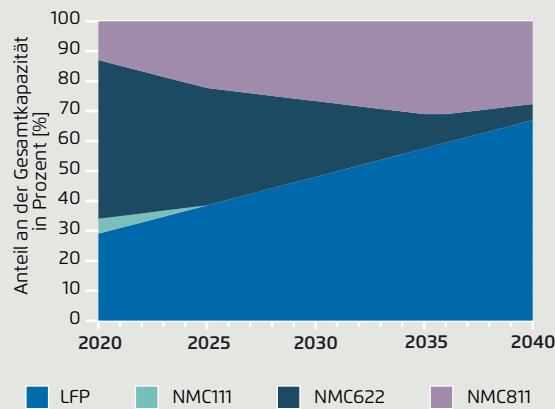
Abbildung 7-1b



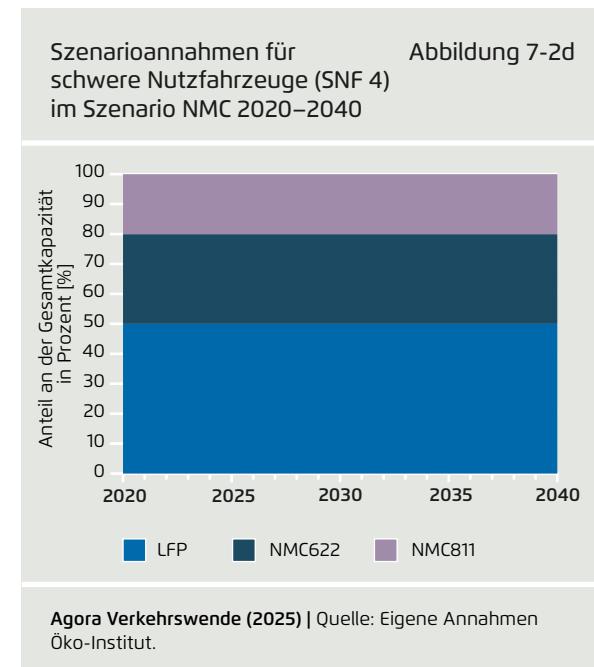
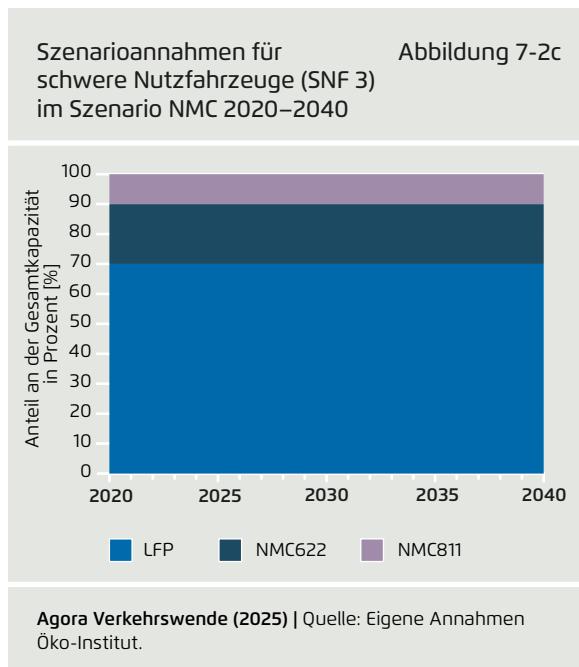
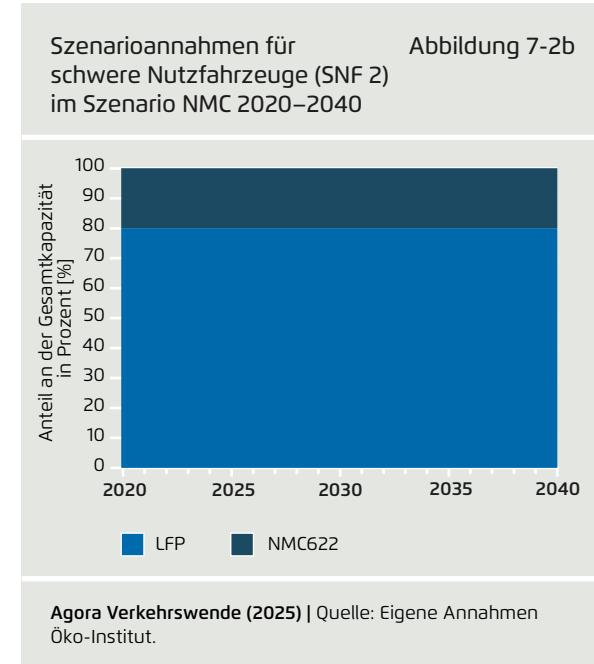
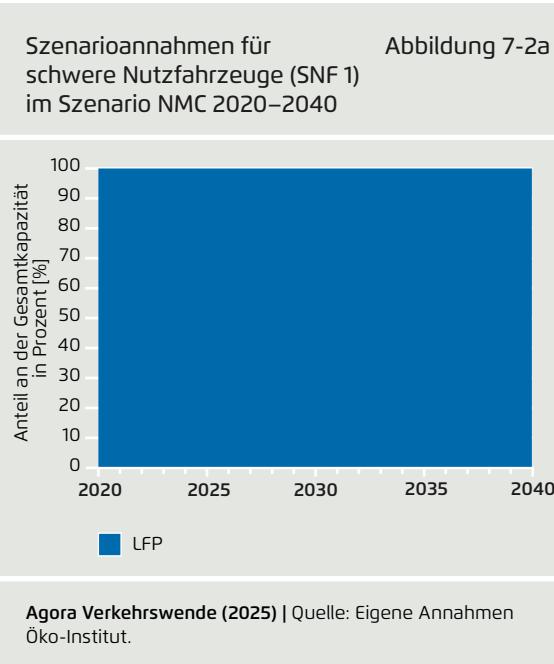
Agora Verkehrswende (2025) | Quelle: Eigene Annahmen
Öko-Institut.

Szenarioannahmen für leichte Nutzfahrzeuge (LNF) im Szenario AB 2020–2040

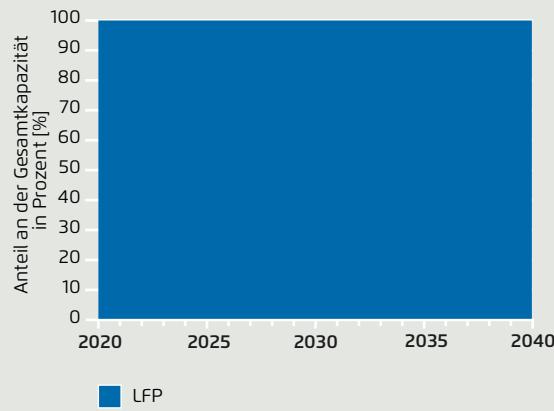
Abbildung 7-1c



Agora Verkehrswende (2025) | Quelle: Eigene Annahmen
Öko-Institut.

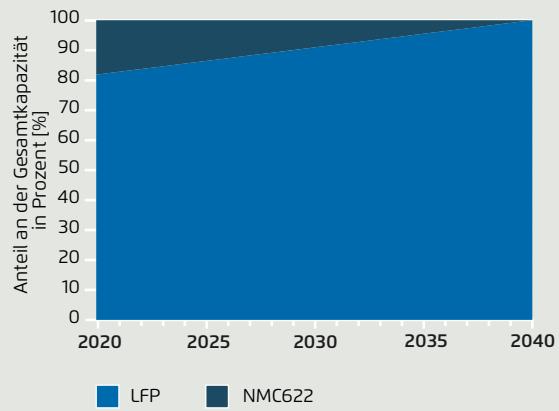


Szenarioannahmen für
schwere Nutzfahrzeuge (SNF 1)
im Szenario LFP 2020–2040



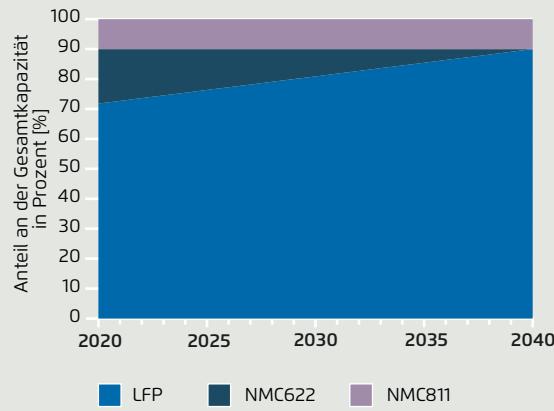
Agora Verkehrswende (2025) | Quelle: Eigene Annahmen
Öko-Institut.

Szenarioannahmen für
schwere Nutzfahrzeuge (SNF 2)
im Szenario LFP 2020–2040



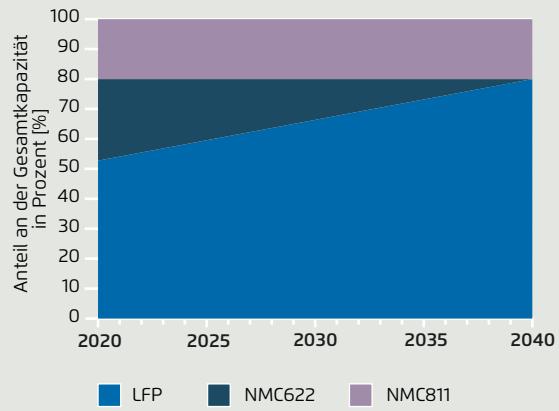
Agora Verkehrswende (2025) | Quelle: Eigene Annahmen
Öko-Institut.

Szenarioannahmen für
schwere Nutzfahrzeuge (SNF 3)
im Szenario LFP 2020–2040

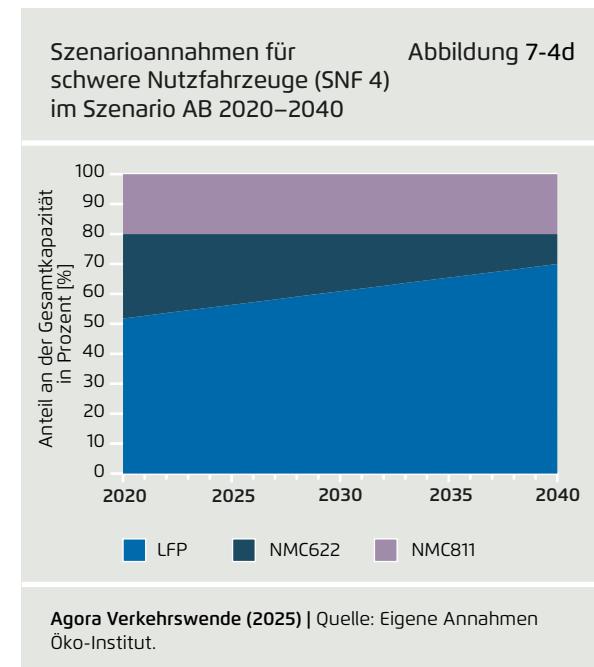
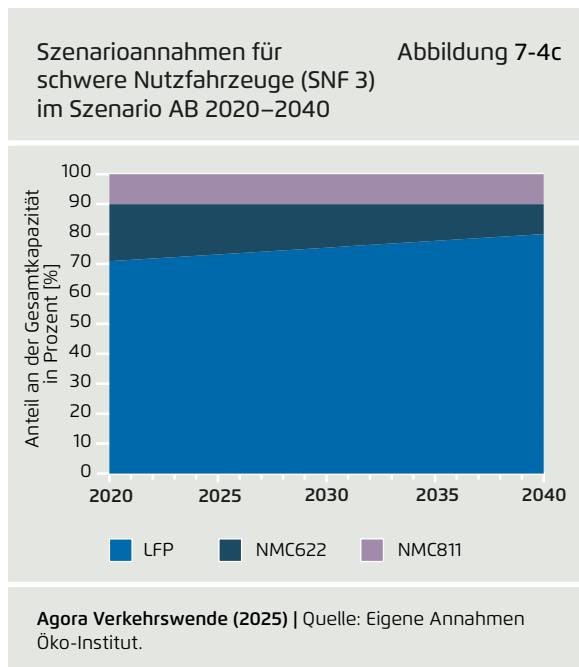
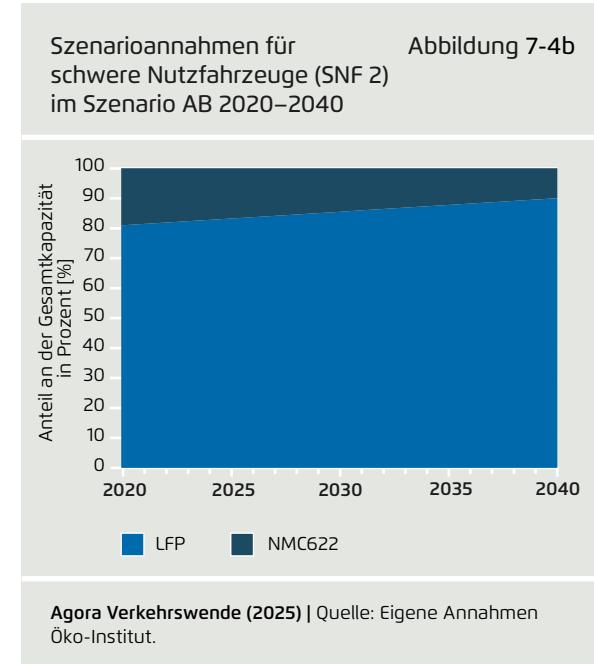
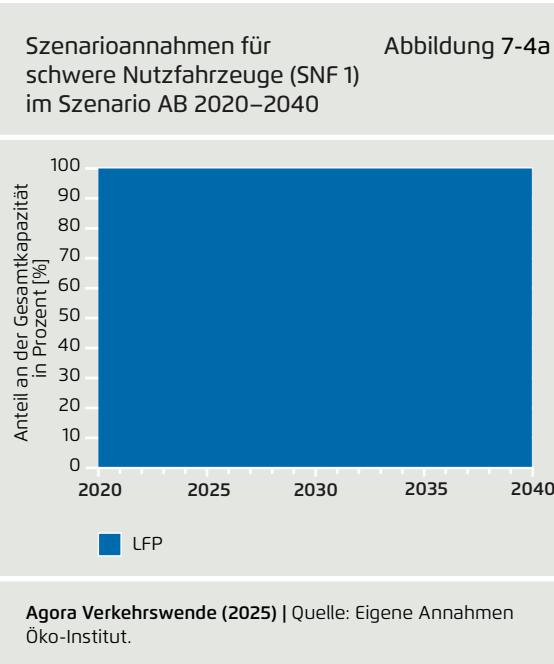


Agora Verkehrswende (2025) | Quelle: Eigene Annahmen
Öko-Institut.

Szenarioannahmen für
schwere Nutzfahrzeuge (SNF 4)
im Szenario LFP 2020–2040



Agora Verkehrswende (2025) | Quelle: Eigene Annahmen
Öko-Institut.



Agora Verkehrswende ist ein Thinktank für klimaneutrale Mobilität mit Sitz in Berlin. Im Dialog mit Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft setzt sich die überparteiliche und gemeinnützige Organisation dafür ein, die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor auf null zu senken. Dafür entwickelt das Team wissenschaftlich fundierte Analysen, Strategien und Lösungsvorschläge.

Agora Verkehrswende

Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 | 10178 Berlin
www.agora-verkehrswende.de
info@agora-verkehrswende.de

Agora
Verkehrswende

