

Themenpapier Cluster Elektromobilität Süd-West

Wertstoffkreislauf von Traktionsbatterien aus Europa



Inhaltsverzeichnis

1	Primärrohstoff-Verfügbarkeit für die europäische Traktionsbatterie-Produktion und Einfluss recycelter Rohstoffe .	7
1.1	Einleitung und Vorgehensweise	7
1.2	In Europa benötigte und hergestellte Energiekapazität	8
1.3	In Europa benötigte Materialmengen	11
1.4	Verfügbare Primärrohstoffmengen und Abbauländer	13
1.5	Voraussetzungen und Potenziale recycelter Rohstoffe	16
1.6	Schlussfolgerungen für die Primärrohstoff-Verfügbarkeit und den Einfluss recycelter Rohstoffe	20
2	Stand und Entwicklung von xEV-Altfahrzeugverwertung und -verbleib im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen	22
2.1	Einleitung und Vorgehensweise	22
2.2	Umgang mit Fahrzeugen am Ende ihres Lebenszyklus in Europa	23
2.3	Quantifizierung des Verbleibs von Fahrzeugen am Ende ihres Lebenszyklus in Europa	24
2.4	Merkmale von Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang am Ende ihres Lebenszyklus in Europa	28
2.5	Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus im Fahrzeug	28
2.6	Schlussfolgerungen für xEV-Altfahrzeugverwertung und-verbleib im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen ..	31
3	Ökonomische Aspekte des Recyclings von Traktionsbatterien	33
3.1	Einleitung und Vorgehensweise	33
3.2	Qualität recycelter Materialien und Kosten der Verfahren	34
3.3	Effekte des Recyclings auf Preis und Verfügbarkeit	35
3.3.1	Lithium	36
3.3.2	Nickel	38
3.3.3	Mangan	39
3.3.4	Kobalt	40
3.3.5	Graphit	41
3.3.6	Gegenüberstellung der Rohstoffpreise und Rezyklatkosten	43
3.4	Emissionen der Recyclingverfahren und der Förderung	43
3.5	Schlussfolgerungen für ökonomische Aspekte des Recyclings von Traktionsbatterien	45

4	Maßnahmen zur Sicherstellung des Verbleibs möglichst vieler Traktionsbatterie-Rohstoffe im europäischen Wertstoffkreislauf	46
4.1	Einleitung und Vorgehensweise	46
4.2	Verschärfungen der juristischen Rahmenbedingungen	47
4.3	Weitere Standardisierung und Normung	49
4.4	Attraktivierung durch neue Geschäftsmodelle	51
4.5	Schlussfolgerungen für den Verbleib möglichst vieler Rohstoffe nach dem End of Life der Traktionsbatterien im europäischen Wertstoffkreislauf	53
5	Handlungsempfehlungen	55
5.1	Handlungsempfehlungen für die Politik	55
5.2	Handlungsempfehlungen für die Wirtschaft	58
6	Zusammenfassung und Ausblick	60
	Literaturverzeichnis	63
	Abbildungsverzeichnis	75
	Tabellenverzeichnis	76
	Abkürzungsverzeichnis	76
	Impressum	77

Management Summary

Unternehmen der Automobilwirtschaft in Europa benötigen in den nächsten Jahren in großem Maßstab Zugriff auf Materialien für die Herstellung von Energiespeichern.

Auf dem europäischen Kontinent wächst der Bedarf an Traktionsbatterien gemäß aktuellen Prognosen von insgesamt knapp 90 GWh im Jahr 2022 um mehr als den Faktor zwölf auf über 1.200 GWh zur Mitte des nächsten Jahrzehnts.

Hergestellt werden sollen dort im Jahr 2030 gemäß Ankündigungen bis zu 1.500 GWh. Der Bezug dafür erforderlicher Materialien darf weder die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen beeinträchtigen noch in eine Abhängigkeit von einigen wenigen Lieferanten mit Sitz außerhalb der Europäischen Union führen. Von den Rohstoffen für die wichtigsten Aktivmaterialien wird jedoch Lithium hauptsächlich auf dem südamerikanischen Kontinent und in Australien gewonnen, Nickel in Südostasien, Mangan und Kobalt auf dem afrikanischen Kontinent und Graphit zur Weiterverarbeitung in China.

In Europa ist bislang lediglich Portugal als Produzent vergleichsweise kleiner Mengen Lithium bekannt und im Oberrheingraben soll erst ab dem Jahr 2025 in größerer Menge Lithium gewonnen werden.

Vor diesem Hintergrund ist es zweckdienlich, mittels Recycling von Traktionsbatterien am Ende ihres Produktlebenszyklus im Fahrzeug einen Beitrag zur zuverlässigen Versorgung der Unternehmen der Automobilwirtschaft zu leisten.

In der **Europäischen Union** wird gemäß aktuellem Vorschlag für die Verordnung über Batterien und Altbatterien demnächst vorgeschrieben sein, dass neu hergestellte Batterien ab Mitte des nächsten Jahrzehnts einen Anteil von recyceltem Lithium, Nickel oder Kobalt in Höhe von 12%, 15% bzw. 26% enthalten müssen. Bereits zu Beginn des nächsten Jahrzehnts muss in angewendeten Recyclingprozessen zugeführtes Lithium zu 80% und Nickel sowie Kobalt zu jeweils 95% in einer mit den den Primärrohstoffen vergleichbaren Qualität zurückgewonnen werden. Mit der Menge des dann zurückgewonnenen Materials wird sich der Bedarf an den wichtigsten Materialien im nächsten Jahrzehnt zu teilweise deutlich über 10% decken lassen.

Mittelfristig stammt der überwiegende Teil der recycelten Materialien noch aus Produktionsausschuss aus der Herstellung von Batteriezellen, -modulen und -systemen.

Der Anteil von Batterien aus Produktionsausschuss an der Gesamtzahl der recycelten Batterien sinkt allerdings mit zunehmender Erfahrung mit den Herstellungsprozessen von rund 70% im Jahr 2025 auf rund 30% im Jahr 2035. Das Recycling von Nickel und Kobalt ist heute bereits industriell etabliert. Mit dem Recycling von Lithium gibt es bislang erst wenige Erfahrungen. Mangan und Graphit sind weltweit in großer Menge zu niedrigen Preisen verfügbar. Ihr Recycling ist deshalb wirtschaftlich nicht attraktiv. Es kann aber die Zuverlässigkeit der Versorgung mit den Materialien verbessern, ohne Abhängigkeiten zu vergrößern, und lässt sich etwa durch die Vorgabe eines Anteils recycelter Materialien, der zukünftig in Traktionsbatterien enthalten sein muss, herbeiführen.

Pkw im Bestand sind in Europa im Durchschnitt knapp zwölf Jahre alt. Entsprechend erreichen dort, unter der Annahme einer bei konventionellen und elektrischen Antriebssträngen vergleichbaren Alterung, ab dem Jahr 2030 Traktionsbatterien in nennenswerter Menge das Ende ihres Lebenszyklus im Fahrzeug. Von den rund 11,4 Millionen Fahrzeugen, die im Durchschnitt jedes Jahr den Bestand der Europäischen Union verlassen, werden allerdings lediglich rund 6,6 Millionen einer Verwertungsanlage zugeführt. Rund 1 Million Einheiten werden in Länder außerhalb der Europäischen Union exportiert. Bei rund 3,8 Millionen Einheiten ist der Verbleib hingegen unbekannt. Ihr Beitrag zum Recycling und damit zur Versorgung der europäischen Unternehmen kann nicht eingeschätzt werden. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass Traktionsbatterien mit weniger als den in der Automobilindustrie in der Regel geforderten 70 % Mindestanteil an nutzbarer Energiekapazität wiederaufbereitet oder etwa im »Second Life« wiederverwendet werden können.

Schätzungen des Anteils der Traktionsbatterien, deren Materialien dadurch weitere sechs bis zehn Jahre dem Recycling vorenthalten blieben, reichen von 10 bis 75%.

Die Kosten des Recyclings der heute bereits zurückgewonnenen Materialien Nickel und Kobalt liegen in der Größenordnung des Preises der jeweiligen Primärrohstoffe.

Das Recycling von Lithium ist hingegen im Jahr 2023 und auch zur Mitte des nächsten Jahrzehnts noch sehr viel teurer als der Primärrohstoff.

Ursache hierfür sind einerseits die in Europa vergleichsweise hohen Lohn- und Energiekosten. Andererseits schlägt die Logistik stark zu Buche. Denn Traktionsbatterien müssen am Ende ihres Lebenszyklus unter Einhaltung hoher Brandschutzauflagen gesammelt und zur Weiterverarbeitung transportiert werden, was die Recyclingkosten um weitere 10 bis 30% erhöht. Nichtsdestotrotz trägt das Recycling auch von Lithium, wozu die demnächst in der Europäischen Union geltenden Vorschriften motivieren, zur Sicherung der uneingeschränkten Versorgung mit den Materialien und zur Reduktion von Abhängigkeiten bei.

Der Verbleib möglichst vieler Rohstoffe aus Fahrzeugen am Ende ihres Lebenszyklus in der Europäischen Union wurde bis vor kurzem allein durch verschiedene formale Anreize, wie die notwendige Abmeldung eines Fahrzeugs zur Befreiung von wiederkehrenden Gebühren, und Vorschriften, wie das Verbot eines Exports von Abfällen, verfolgt. Diese formalen Anreize sind auch weiterhin gegeben.

Inzwischen haben aber Nutzende ebenfalls die Möglichkeit, auf Basis innovativer Geschäftsmodelle aktiv am Verbleib wertvoller Materialien in Europa mitzuwirken.

Dabei scheint der Verkauf des eigenen Fahrzeugs zurück an dessen Hersteller mittelfristig das vielversprechendste Geschäftsmodell zu sein, um insbesondere Traktionsbatterien im europäischen Wertstoffkreislauf zu halten. Perspektivisch, wenn in Europa günstigere Fahrzeuge in größerer Zahl verfügbar sind und die Digitalisierung weiter Einzug in den Alltag der Menschen gehalten hat, scheint »Battery as a Service« vielversprechend, was sich aus dem Erfolg der »... as a Service«-Lösung in anderen Branchen wie der Logistik ableiten lässt.

Den Rahmen dafür zu schaffen, dass der Zugriff auf Materialien zur Herstellung von Traktionsbatterien in Europa zuverlässig sichergestellt ist, obliegt mehreren Akteuren. Seitens der Politik sollte eine Arbeitsgruppe auf Ebene der Europäischen Kommission mit Branchenexpert:innen aus der Industrie und der Wissenschaft initiiert werden. Dort sollten auf Basis von Maßnahmen, die in einzelnen Ländern bereits durchgeführt wurden, Vorschläge zur Schließung des Wertstoffkreislaufs bei den Energiespeichern aus Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang auf dem Kontinent entwickelt werden. Des Weiteren sollte der aktuelle Vorschlag für die demnächst in Kraft tretende Verordnung über Batterien und Altbatterien optimiert werden. Es gilt, Vorgaben und Gültigkeitsbereiche zu konkretisieren und die grenzüberschreitende Weitergabe von Informationen verbindlich festzuschreiben.

Grundsätzlich sollten in der gesamten Europäischen Union geltende Standards und einheitliche Regeln erarbeitet und die Zusammenarbeit weiter verbessert werden.

In den bereits eingerichteten und laufenden europaweiten Forschungsprojekten (»IPCEIs«) zu Batterien sind Partner aus verschiedenen Ländern grenzüberschreitend tätig. Es gilt lediglich, die Ausrichtung kontinuierlich zu evaluieren und bei Bedarf anzupassen, etwa durch die zusätzliche Berücksichtigung der Logistik.

Die Wirtschaft sollte sich – der Idee des »Design for Recycling« folgend – möglichst unternehmensübergreifend abstimmen und bereits in der Phase der Produktentwicklung Wert auf die Modularisierung von Traktionsbatterien legen. Zur weiteren Verbesserung der Recyclbarkeit von Traktionsbatterien könnte perspektivisch eine Reduktion der Zahl der Varianten von Materialzusammensetzungen

beitragen. Darüber hinaus sollten Kooperationen zwischen den Unternehmen über mehrere Wertschöpfungsstufen hinweg initiiert werden, wobei auch relevante Informationen und Daten ausgetauscht werden sollten. Clusterinitiativen bieten hier eine geeignete Plattform. Einerseits stellen sie die Einhaltung aller Vorgaben wie etwa kartellrechtlicher Grundsätze sicher. Andererseits bieten sie Mitarbeitenden aus Forschung und Industrie eine neutrale Plattform und fördern den Austausch sowie die Initiierung gemeinsamer Forschungs- und Entwicklungsprojekte, die wiederum die Basis für zukünftige Wertschöpfung darstellen.

1.

Primärrohstoff-Verfügbarkeit für die europäische Traktionsbatterie-Produktion und Einfluss recycelter Rohstoffe

In Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang wird die Energie für den Betrieb der elektrischen Maschine, die für den Vortrieb des Fahrzeugs sorgt, in der Traktions- oder Hochvoltbatterie gespeichert. In diesem Kapitel wird zunächst die Entwicklung der Nachfrage nach Traktionsbatterien in Europa betrachtet und darauf aufbauend der Bedarf an Rohstoffen zur Herstellung der elektrischen Energiespeicher in den nächsten Jahren analysiert. Des Weiteren stehen die weltweiten Förderstätten von Rohstoffen für Batteriekathode und -anode und die bisher zur Verfügung gestellten Mengen im Fokus. Auf dieser Basis lassen sich Aussagen treffen, in welchem Umfang eine Deckung des europäischen Bedarfs mit Primärrohstoffen gelingt und wie ökonomische und ökologische Begleiterscheinungen zu beurteilen sind. Abschließend ist Gegenstand der Untersuchungen, wie durch einen Einsatz recycelter Rohstoffe zu einer verlässlichen und nachhaltigen Herstellung von Traktionsbatterien in Europa beigetragen werden kann.

1.1 Einleitung und Vorgehensweise

Die aus unterschiedlichen Branchen bereits bekannte Abhängigkeit der europäischen Industrie von Rohstoffimporten ist grundsätzlich auch im noch relativ jungen Feld der Herstellung von Traktionsbatterien gegeben.

Denn mit Lithium, Nickel, Mangan, Kobalt und Graphit lassen sich die Materialien, die die Eigenschaften sowohl aktueller Lithium-Ionen-Batterien als auch zu erwartender zukünftiger Generationen elektrischer Energiespeicher maßgeblich bestimmen, absehbar in keinem Land der Europäischen Union in der erforderlichen Menge fördern (EU-Kommission, 2020a), (EU-Kommission, 2020b). Zwar werden in Portugal pro Jahr rund 500 t Lithium gewonnen und ab dem Jahr 2025 sollen im Oberrheingraben jährlich 24.000 t Lithiumhydroxid für die Produktion von Traktionsbatterien für etwa 1 Million batterieelek-

trische Fahrzeuge gewonnen werden (DERA, 2022a), (DXC, 2023), (USGS, 2022), (USGS, 2022), (electrive.net, 2023). Jedoch wurden allein in den zurückliegenden beiden Jahren der Coronapandemie europaweit insgesamt rund 10 Millionen Pkw gefertigt (ACEA, 2022a). Auf Basis von Prognosen zur Entwicklung dieser Zahl und des Anteils batterieelektrischer Fahrzeuge in den nächsten Jahren lassen sich zumindest in Europa benötigte Mengen Lithium und der weiteren Materialien zur Produktion von Traktionsbatterien ermitteln. Damit ist dann eine Beurteilung der Verfügbarkeit von Primärrohstoffen und des Einflusses recycelter Rohstoffe möglich.

Zur Bestimmung der Rohstoffmengen, die in Europa zur Herstellung von Traktionsbatterien bis zum Jahr 2035 notwendig sind, dienen in der vorliegenden Publikation zunächst Veröffentlichungen mit prognostizierten, für die Fertigung batterieelektrischer Fahrzeuge benötigten Energiekapazitäten, etwa (VDI/VDE IT, 2022a). Die Veröffentlichungen stammen hauptsächlich aus dem sogenannten »IPCEI on Batteries«. Dabei handelt es sich um ein europaweites Forschungsprojekt mit dem Ziel, eine Wertschöpfungskette für Batterien von der Erforschung von Werkstoffen bis hin zur Umsetzung von Recyclingmaßnahmen in der Europäischen Union aufzubauen und zu etablieren (IPCEI Batteries, 2022). Wegen der Fokussierung auf Europa sind die genannten herangezogenen Veröffentlichungen als Grundlage für die in der vorliegenden Publikation durchgeführten Untersuchungen geeignet.

Den in den kommenden Jahren für batterieelektrische Fahrzeuge benötigten Energiekapazitäten werden im nächsten Schritt Mengen von Lithium, Nickel, Mangan, Kobalt und Graphit zugeordnet, die in Batterien zum Einsatz kommen müssen, um die Kapazitäten zur Verfügung stellen zu können. Dabei wird zum einen der technische Fortschritt berücksichtigt, wie zum Beispiel der andauernde Rückgang der pro kWh erforder-

lichen Menge Lithium (T&E, 2021). Zum anderen fließen prognostizierte Veränderungen der in Lithium-Ionen-Batterien mehrheitlich eingesetzten Materialzusammensetzungen und der Batterietechnologie im Allgemeinen in die Betrachtungen ein. Beispiele in diesem Zusammenhang sind die Verdrängung kobalthaltiger Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid(NCA)-Zellen durch nickelreiche Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid(NMC)-Zellen sowie die Markteinführung von Natrium-Ionen- sowie Solidstate- bzw. Feststoff-Batterien (Hackmann, 2021), (T&E, 2021).

Den ermittelten Materialmengen, die bis zum Jahr 2035 in Europa zur Herstellung von Traktionsbatterien erforderlich sind, werden die bislang weltweit verfügbaren Mengen von Lithium, Nickel, Mangan, Kobalt und Graphit gegenübergestellt. Dabei wird auch auf die entsprechenden Abbauländer und auf potenzielle ökonomische und ökologische Begleiterscheinungen eines Bezugs von dort eingegangen. So stammt Lithium aktuell hauptsächlich aus lediglich fünf Ländern außerhalb Europas. Beteiligungen europäischer Unternehmen am dortigen Abbau sind bislang nicht vorhanden. Darüber hinaus ist die Förderung von Lithium auch mit zunehmenden Umweltrisiken verbunden, etwa da sie teilweise in bereits wasserarmen Regionen stattfindet und dort die Trockenheit weiter verstärkt (vbw, 2022). In diesem Zusammenhang wird im vorliegenden Themenpapier auch behandelt, wie und in welchem Umfang sich mit Hilfe recycelter Rohstoffe eventuelle unerwünschte Begleiterscheinungen und Risiken abgebauter Primärrohstoffe minimieren oder sogar ausschließen lassen. Rahmenbedingungen, wie die erforderliche Wartezeit bis zur Verfügbarkeit einer ausreichenden Menge recycelbaren Materials, fließen in die Betrachtungen ein (NPM, 2021).

1.2 In Europa benötigte und hergestellte Energiekapazität

Bereits in naher Zukunft wird es einen immensen Bedarf an Traktionsbatterien geben.

Darauf deuten die Prognosen zur Verbreitung von Pkw mit elektrifiziertem Antriebsstrang in diversen Publikationen hin. So sagen jüngere Studien, die sich mit Bedingungen für Klimaneutralität befassen und auch das Nutzerverhalten berücksichtigen, allein für Deutschland einen Bestand in Höhe von rund 10 bis 15 Millionen batterieelektrischen Fahrzeugen im Jahr 2030 voraus (Agora, 2021), (Ariadne, 2021), (BCG, 2021), (dena, 2021), (ISI, 2021a).

Auch Ambitionen seitens der Politik spielen eine Rolle. Die Regierungskoalition hat einen Bestand von mindestens 15 Millionen vollelektrischen Pkw bis zum Jahr 2030 als Ziel für Deutschland im Koalitionsvertrag festgehalten (Regierung, 2021). Des Weiteren dürfen nach der Annahme der Verordnung zur Verschärfung der CO₂-Emissionsnormen im Straßenverkehr durch den Rat der Europäischen Union ab dem Jahr 2035 nur noch Pkw und leichte Nutzfahrzeuge neu zugelassen werden, die im Betrieb emissionsfrei sind (Rat der EU, 2023a). Dies wird sich auch in einem europaweit nochmals stark wachsenden Bestand an Pkw mit elektrifiziertem Antriebsstrang äußern. Zudem haben mehrere Automobilhersteller insbesondere aus Europa, den USA und Ostasien angekündigt, zumindest in ausgewählten Märkten noch vor dem Jahr 2035 ihr Angebot vollständig auf batterieelektrische Fahrzeuge umzustellen (ams, 2022).

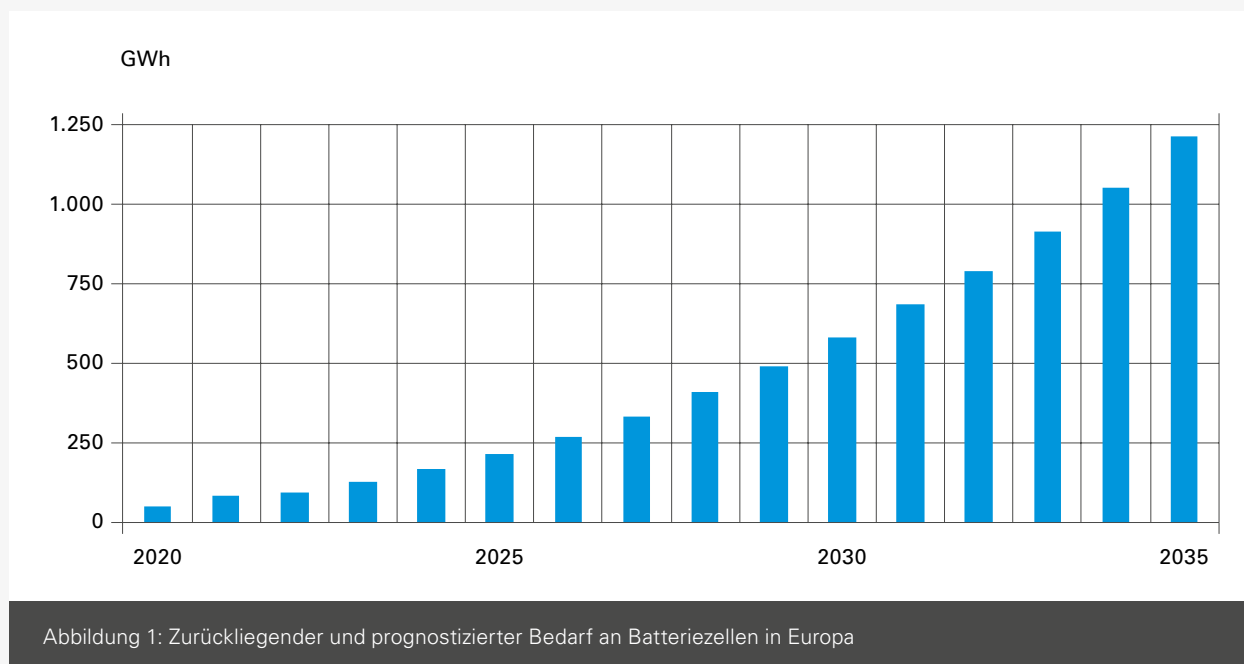
Neben den oben beschriebenen Entwicklungen im Pkw-Bereich wächst seitens europäischer und US-amerikanischer Hersteller auch das Angebot an Lkw mit batterieelektrischem Antriebsstrang. Diese werden sich bereits zur Mitte des gegenwärtigen Jahrzehnts gegenüber konventionell angetriebenen Lkw durch niedrigere Gesamtkosten des Betriebs ohne Einbußen beim Leistungsvermögen auszeichnen und entsprechend zum Ende des Jahrzehnts allein in Europa fast ein Drittel der Neuzulassungen ausmachen (Agora, 2022), (Strategy&, 2022a).

Je nachdem, welche Geschwindigkeit der Marktdurchdringung und welche Produktionsstandorte batterieelektrischer Pkw und Lkw angenommen werden, ergeben sich unterschiedlich große Bedarfe an Batteriezellen für Traktionsbatterien für unterschiedliche Regionen der Welt in den nächsten Jahren. In Prognosen werden für Europa für das Jahr 2025 rund 150 bis 280 GWh und für das Jahr 2030 rund 390 bis 780 GWh erwartet (VDI/VDE IT, 2022a). Andere Publikationen gehen von nochmals höheren Bedarfen aus, unterstellen allerdings auch eine derzeit eher weniger wahrscheinliche weitere Zunahme des jährlichen Fahrzeugabsatzes (Strategy&, 2022b).

In den Jahren 2020 und 2021 betrug der Bedarf in Europa rund 50 GWh bzw. rund 90 GWh (Adamas, 2021), (Statista, 2021), (Adamas, 2022).

Wird für die Jahre 2020 und 2021 jeweils der oben genannte Wert, für die Jahre 2025 und 2030 jeweils der Mittelwert der oben genannten Spanne sowie ein exponentielles Wachstum des Bedarfs an Batteriezellen für Traktionsbatterien in Europa zugrunde gelegt, ergibt sich für das Jahr 2035 eine Nachfrage in Höhe von rund 1.200 GWh. Die beschriebene Entwicklung ist in Abbildung 1 veranschaulicht. Die dargestellten Werte sind zwar ausschließlich mobilen Anwendungen zuzuordnen. Sie würden sich aber auch bei einer zusätzlichen Berücksichtigung des Bedarfs für Unterhaltungselektronik und stationäre Energiespeicher wegen deren vergleichsweise geringen Anteils an der gesamten Nachfrage nicht nennenswert ändern (WEF, 2019), (AVICENNE ENERGY, 2021), (DERA, 2022a).

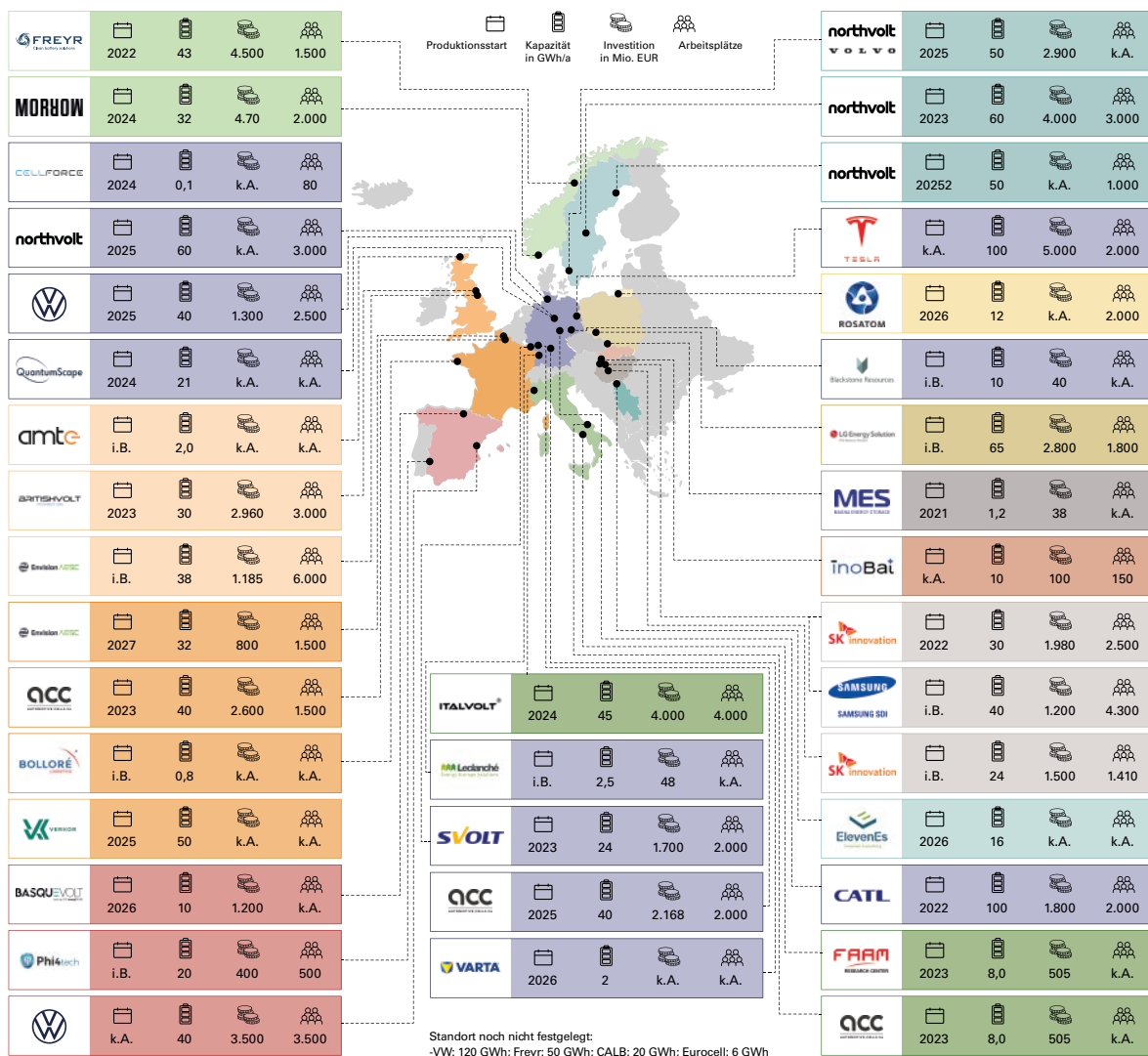
In Anbetracht des prognostizierten Bedarfs an Batteriezellen in Europa beabsichtigen zahlreiche Unternehmen dort, deren Herstellung in den nächsten Jahren aufzunehmen. Von diesen Planungen stehen wegen des US-amerikanischen Inflation



Reduction Act¹ im Moment jedoch bis zu zwei Drittel in Frage oder sollen erst zu einem späteren Zeitpunkt realisiert werden (T&E, 2023a). In Abbildung 2 sind die im Jahr 2022 für den Kontinent angekündigten Produktionsstandorte dargestellt. Diese sollen zusammen im Jahr 2022 eine Produktionskapazität in Höhe von 124 GWh und bis zum Jahr 2025 bzw. 2030

eine Produktionskapazität in Höhe von rund 500 GWh bzw. 1.500 GWh erreicht haben (ISI, 2022). Damit würden sie den für Ende des Jahrzehnts prognostizierten mittleren Bedarf fast um den Faktor drei und den prognostizierten maximalen Bedarf fast um den Faktor zwei übertreffen.

1 | Beim Inflation Reduction Act handelt es sich um ein Investitionsprogramm und steuerliche Neuregelungen, worüber die USA zur Ausrichtung der Batterie-Wertschöpfungskette zu eigenen Gunsten öffentliche Mittel in Höhe von insgesamt rund 135 Milliarden Euro (150 Milliarden US-Dollar) zur Verfügung stellen und weitere Maßnahmen zur Neuausrichtung der US-amerikanischen Wirtschaft auf erneuerbare Energien verfolgen (T&E, 2023a).



Quelle: (VDI/VDE IT, 2022b)

Abbildung 2: Im Jahr 2022 für Europa angekündigte Standorte zur Herstellung von Batteriezellen

1.3 In Europa benötigte Materialmengen

Der Bedarf an Rohstoffen, der sich in den nächsten Jahren in Europa für die Herstellung von Batteriezellen ergeben wird, kann auf Grundlage sowohl der ermittelten benötigten Energiekapazität als auch der angekündigten Produktionskapazität bestimmt werden. Dabei ist jeweils zu berücksichtigen, dass die Materialzusammensetzung insbesondere der sogenannten Aktivmaterialien von Batteriekathode und -anode großen Einfluss auf die je Batteriezelle zur Verfügung stehende Energiekapazität hat. Bei den derzeit nahezu ausschließlich eingesetzten Lithium-Ionen-Batterien kommen grundsätzlich als Aktivmaterialien auf Kathodenseite Lithium, Nickel, Mangan, Kobalt, Sauerstoff, Eisen sowie Phosphor und auf Anodenseite Graphit und Silizium in Frage (RWTH, 2021), (e-mobil BW, 2022).

Zu Beginn der Verbreitung von Lithium-Ionen-Batteriezellen war deren Kathode in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle aus Lithium, Kobalt und Sauerstoff zusammengesetzt. Solche sogenannten Lithium-Kobalt-Oxid(LCO)-Kathoden kommen jedoch heute insbesondere in batterieelektrischen Fahrzeugen nicht mehr zum Einsatz. Gründe hierfür sind die angestrebte Abwendung von Kobalt, dessen Anteil in LCO-Kathoden sehr hoch ist und dessen Förderung aus ökologischer, menschen- und arbeitsrechtlicher Sicht unter ungenügenden Bedingungen stattfindet. Des Weiteren ist die Anfälligkeit von Batteriezellen mit LCO-Kathode gegenüber unkontrollierbarer Überhitzung, die auch als »thermal runaway« bezeichnet wird, relativ hoch im Vergleich zu anderen Materialzusammensetzungen (VDE, 2015). Zu den anderen Zusammensetzungen zählen Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid(NMC)-Kathoden, die derzeit den größten Marktanteil haben. NMC-Kathoden lassen sich wiederum nach dem Verhältnis, in dem Nickel, Mangan und Kobalt zueinander stehen, einteilen. Nach NMC111-Kathoden bei der Einführung der Materialzusammensetzung dominieren aktuell NMC622-Kathoden. Diese werden nach der weiteren Verbesserung der Widerstandsfähigkeit gegen unkontrollierbare Überhitzung schon wieder zunehmend durch NMC811-Kathoden und perspektivisch durch NMC9.5.5-Kathoden abgelöst. Ziel ist die Steigerung der Energiekapazität bei gleichzeitiger Senkung der Kosten. Auf Seiten der Anode, die heute in der weit überwiegenden Zahl der Fälle noch ausschließlich aus Graphit besteht, lässt sich durch das Einbringen von Silizium ebenfalls die Energiekapazität einer Batteriezelle erhöhen und zur Reduzierung ihrer Kosten beitragen. Allerdings ist in den nächsten Jahren nur eine langsame Steigerung des Siliziumanteils in der Anode möglich, da stets zunächst die beim Entladen und La-

den auftretende Volumenänderung, die infolge des Transfers der Lithium-Ionen in der Batteriezelle in die bzw. aus der Siliziumstruktur auftritt, schrittweise überwunden werden muss (CSEM, 2020), (THINKTANK, 2020), (Hackmann, 2021), (ISI, 2021b), (T&E, 2021).

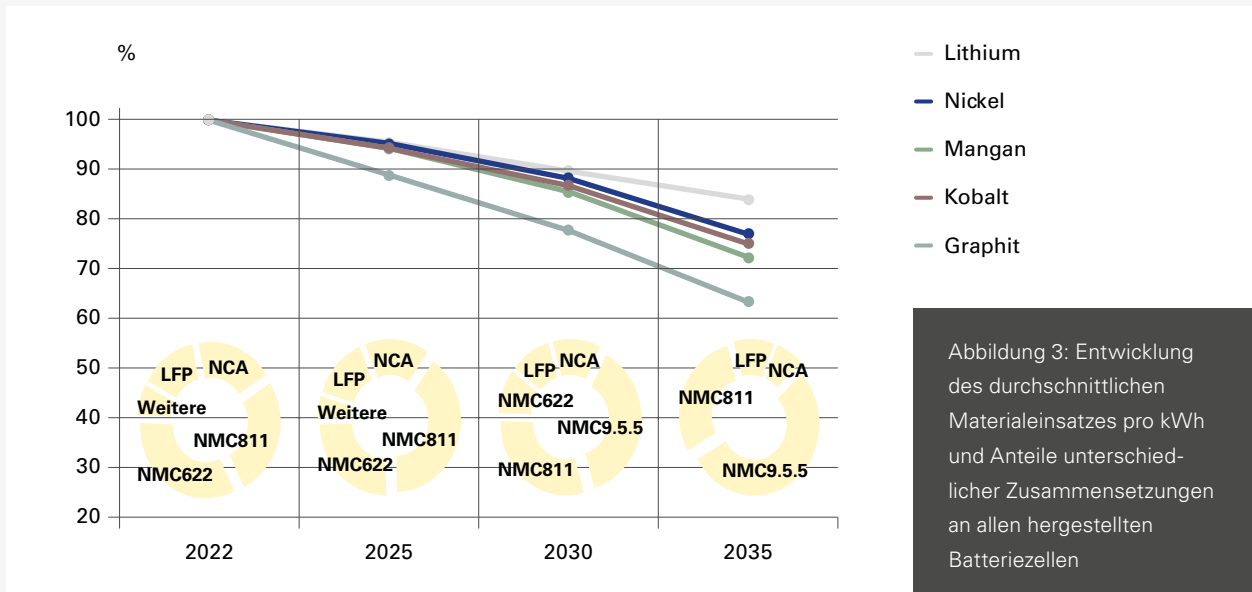
In batterieelektrischen Fahrzeugen kommen Lithium-Eisen-Phosphat(LFP)-Kathoden in Kombination mit Anoden aus Graphit ebenfalls zunehmend zum Einsatz. Batteriezellen mit LFP-Kathode bleiben zwar hinsichtlich ihrer Energiedichte hinter solchen mit NMC-Kathode zurück, sie zeichnen sich aber durch das Fehlen von Kobalt und damit durch vergleichsweise geringe Materialkosten sowie durch eine lange zyklische Lebensdauer aus (VDE, 2015), (CSEM, 2020), (ISI, 2021b), (T&E, 2021).

Je nachdem, mit welchen Anteilen die oben genannten Materialzusammensetzungen pro Jahr zugrunde gelegt werden, um die für Europa jeweils prognostizierte benötigte Energiekapazität bzw. angekündigte Produktionskapazität zu erreichen, ergeben sich unterschiedliche Bedarfe unter anderem an den Aktivmaterialien. Im vorliegenden Themenpapier wird der Fokus besonders auf Lithium, Nickel, Mangan, Kobalt und Graphit gelegt, da deren Verfügbarkeit für europäische Unternehmen im Vergleich zu den anderen Materialien eingeschränkt ist (EU-Kommission, 2020a), (EU-Kommission, 2020b). Die in einer Batteriezelle verwendete Menge der genannten Aktivmaterialien ist je nach betrachteter Publikation unterschiedlich. Demzufolge kamen zum Jahr 2022 im Durchschnitt über alle Publikationen und Materialzusammensetzungen hinweg pro kWh jeweils etwas mehr als 100 g Lithium, knapp 750 g Nickel, 90 g Mangan, 90 g Kobalt und 900 g Graphit zum Einsatz. Es ist zu erwarten, dass diese Werte im nächsten Jahrzehnt auf dann im Durchschnitt weniger als 90 g Lithium, 600 g Nickel, 70 g Mangan, 70 g Kobalt und 600 g Graphit pro kWh gesunken sind (Olivetti, 2017), (T&E, 2021), (NPM, 2021), (Hackmann, 2022), (Strategy&, 2022b). Die genannten Daten und ihre zwischenzeitliche durchschnittliche Entwicklung sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die prozentuale Veränderung gegenüber dem Jahr 2022 und die Veränderung der Anteile der unterschiedlichen Materialzusammensetzungen an allen hergestellten Batteriezellen sind in Abbildung 3 dargestellt. Werden die Werte der für Europa prognostizierten benötigten Energiekapazität zugeordnet, ergibt sich der in Abbildung 4 dargestellte Bedarf an Aktivmaterialien bis zum Jahr 2035. Sollten die Standorte zur Herstellung von Batteriezellen in Europa im angekündigten Umfang realisiert werden (siehe Abbildung 2), fällt der Materialbedarf um den Faktor zwei bis drei höher aus.

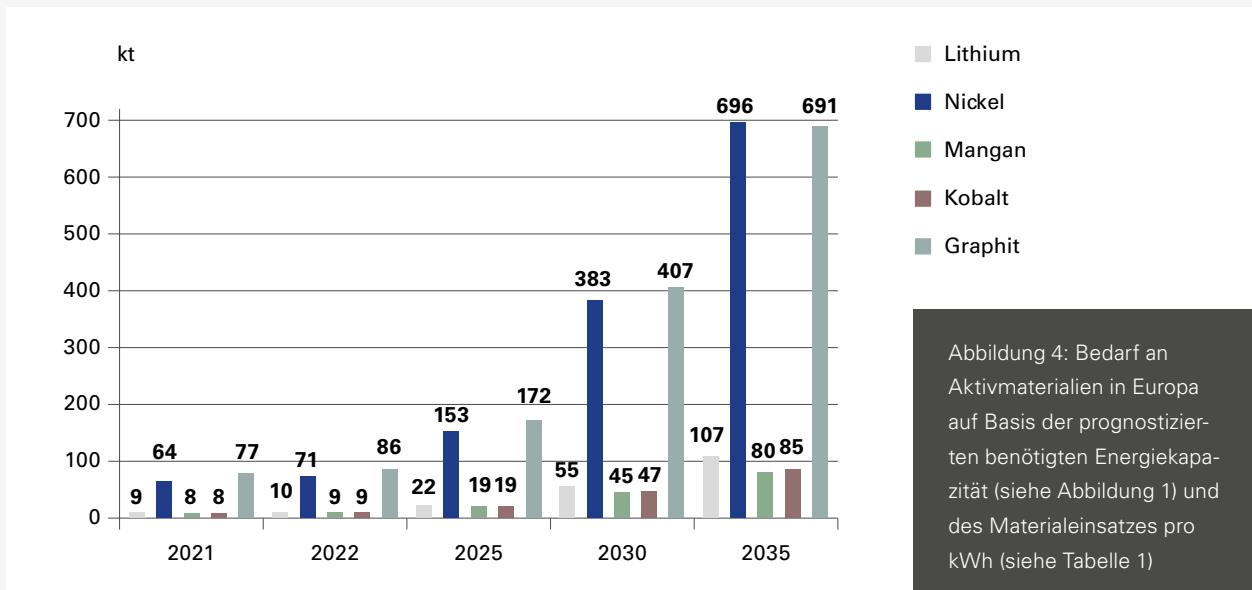
Betrachtetes Aktivmaterial	Zum Jahr 2022	Zum Jahr 2025	Zum Jahr 2030	Zum Jahr 2035
Lithium	105 g	100 g	94 g	88 g
Nickel	745 g	710 g	658 g	574 g
Mangan	91 g	86 g	78 g	66 g
Kobalt	93 g	88 g	81 g	70 g
Graphit	900 g	800 g	700 g	570 g

Tabelle 1: Durchschnittlicher Materialeinsatz in Traktionsbatterien pro kWh

Quelle: (Fraunhofer IAO, Daten aus Olivetti, 2017), (NFM, 2021), (T&E, 2021), (Hackmann, 2022), (Strategy&, 2022b), (Maisei, 2023)



Quelle: (Fraunhofer IAO, eigene Darstellung, Daten aus Olivetti, 2017), (NFM, 2021), (T&E, 2021), (Hackmann, 2022), (Strategy&, 2022b), (Maisei, 2023)



Quelle: (Fraunhofer IAO, eigene Darstellung)

1.4 Verfügbare Primärrohstoffmengen und Abbauländer

Die Rohstoffe zur Herstellung von Traktionsbatterien sind weltweit grundsätzlich in ausreichender Menge vorhanden. Herausfordernd ist ihre in der Mehrzahl der Fälle größere Konzentration bzw. einfachere Zugänglichkeit außerhalb Europas, weswegen ein Bedarf an den Primärrohstoffen gleichzeitig eine Abhängigkeit von den entsprechenden Ländern bedeutet.

Es existieren über alle Kontinente verteilt bereits seit vielen Jahren etablierte Strukturen für den Abbau, die Verarbeitung und den Handel der Primärrohstoffe, die den in Kapitel 1.3 genannten Aktivmaterialien zugrunde liegen. Denn sie werden erst seit vergleichsweise kurzer Zeit auch für Lithium-Ionen-Batterien herangezogen und kamen zuvor schon lange für andere Anwendungen zum Einsatz, Lithium zum Beispiel in der Glas- und Keramikindustrie, Nickel für nichtrostende Stähle, Mangan in der Eisen- und Stahlindustrie und Kobalt für Superlegierungen (DERA, 2021a), (USGS, 2022), (vbw, 2022).

Im Jahr 2021 wurden weltweit rund 100.000 t Lithium, rund 2,7 Millionen t Nickel, rund 20 Millionen t Mangan, rund 170.000 t Kobalt und rund 1 Million t Graphit für die Verarbeitung produziert (USGS, 2022). Die Anteile der verschiedenen Weltregionen daran waren auch in Abhängigkeit vom Rohstoff sehr unterschiedlich und in der Vergangenheit in etwa wie in Abbildung 5 dargestellt aufgeteilt. Die Entstehung dieser Aufteilung wurde unter anderem durch vorteilhafte Rahmenbedingungen in den jeweiligen Ländern begünstigt, wie besonders umfangreiche Rohstoffvorkommen vor Ort verbunden mit dem Willen der Politik und der Wirtschaft zur Produktion.

Allein für Traktionsbatterien wird der weltweite Bedarf an Rohstoffen für Aktivmaterialien schon bald um ein Vielfaches größer sein als in Abbildung 4 für Europa dargestellt. Dies macht deutlich, dass (mit Ausnahme von Mangan und Graphit) die gesamte Nachfrage bereits in wenigen Jahren das oben genannte Angebot im Jahr 2021 produzierter Materialmengen weit übertrifft. Entsprechend muss schnell eine erhebliche Vergrößerung von Produktionskapazitäten erfolgen und mit dem Abbau neu entdeckter Lagerstätten begonnen werden.

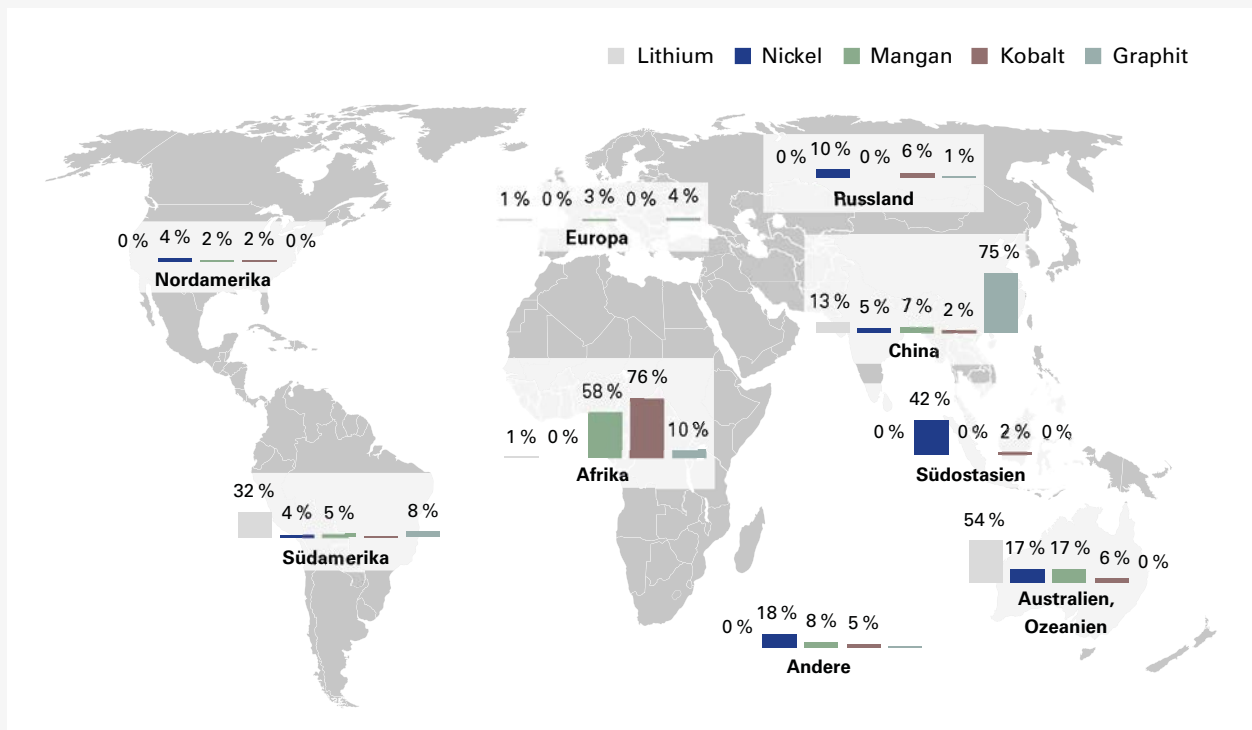
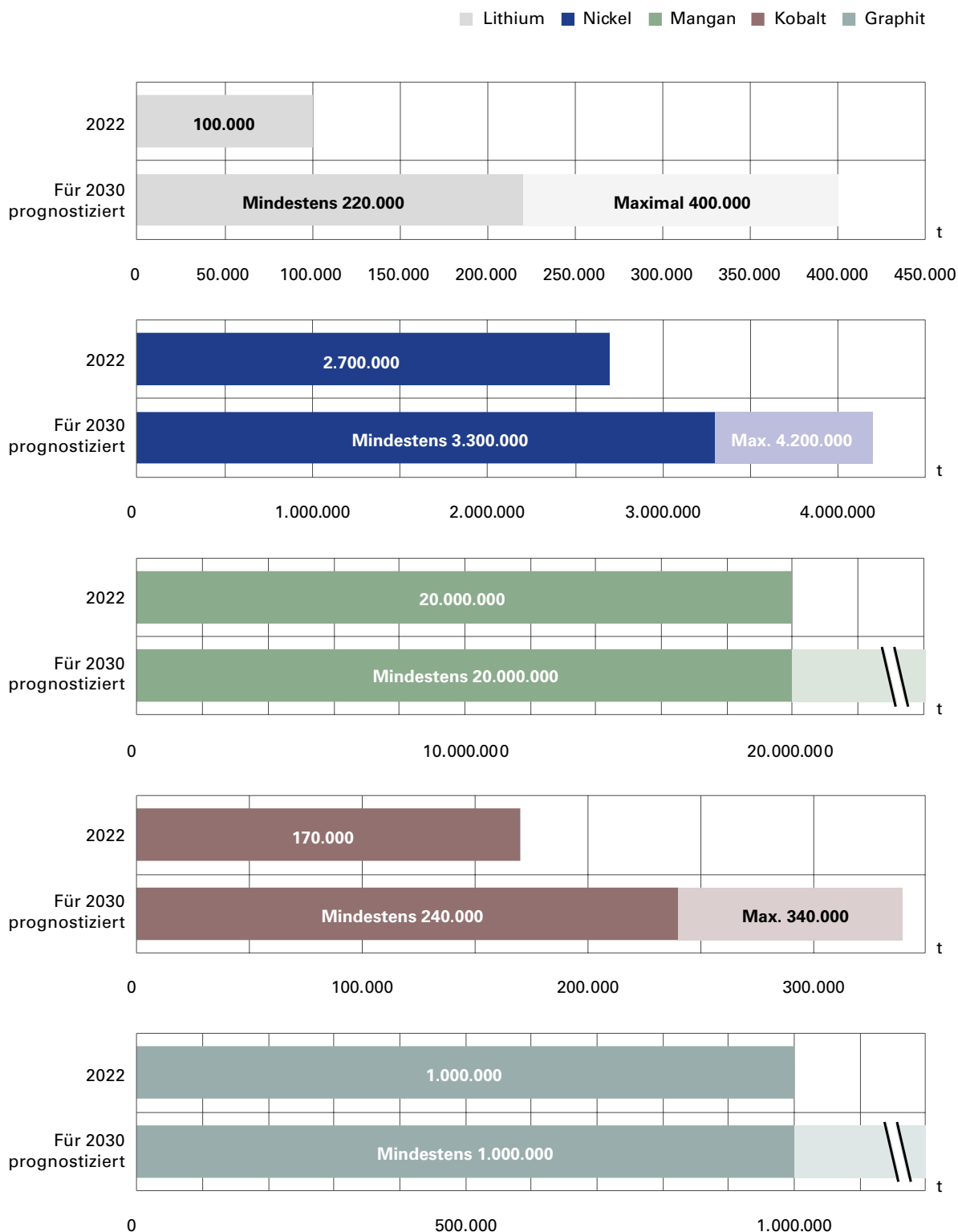


Abbildung 5: Beiträge zur weltweit verfügbaren Menge bis zum Jahr 2022

Quelle: Fraunhofer IAO, eigene Darstellung, Daten aus (RWTH, 2022), (USGS, 2022)

Europa kann jedoch nur eingeschränkt eigeninitiativ handeln, da auf dem Kontinent die meisten für Aktivmaterialien benötigten Primärrohstoffe nur in sehr geringem Umfang oder überhaupt nicht vorkommen. Lediglich Lithium ist über die bereits heute geförderte Menge (zuletzt 900 t in Portugal) noch in einem solchen Ausmaß vorhanden, dass dessen Berücksichtigung zu einer nennenswerten Steigerung des in Abbildung 5 für Europa genannten Anteils führen würde (USGS, 2022). So sollen ab dem Jahr 2025 im Oberrheingraben jährlich 24.000 t Lithiumhydroxid gewonnen werden (DXC, 2023), (electrive.net, 2023). Damit und mit weiteren Bergbauprojekten etwa in der Tschechischen Republik, in Serbien und in Portugal sollen zum Jahr 2030 auf dem europäischen Kontinent rund 20.000 t Lithium produziert werden (DERA, 2022b), (KU Leuven, 2022).

Außer in Europa wurden auch auf anderen Kontinenten bereits Maßnahmen zur Steigerung der Produktion von Lithium getroffen. Dies trifft hauptsächlich auf die bisherigen Abbauländer zu. Deswegen wird die für das Jahr 2030 prognostizierte, auf dann rund 220.000 bis 400.000 t erheblich gesteigerte produzierte Menge, ähnlich wie in Abbildung 5 ersichtlich, zwischen den verschiedenen Weltregionen aufgeteilt sein. Ähnliches gilt für Kobalt, von dem 240.000 bis 340.000 t im Jahr 2030 produziert werden sollen, sowie für Mangan und Graphit, deren Verfügbarkeit weltweit nicht kritisch ist. Bei Nickel ist die Verfügbarkeit hingegen als kritisch einzustufen und der Krieg in der Ukraine könnte die Verknappung von Nickel auf dem Weltmarkt noch verschärfen, da Russland bis zum Jahr 2022 zum weltweit verfügbaren Nickel 10 % beigetragen hat (siehe Abbildung 5). In jedem Fall wird infolge von Maßnahmen zur Steigerung der Produktion insbesondere in Indonesien der Anteil Südostasiens an der für das Jahr 2030 prognostizierten produzierten Menge in Höhe von 3,3 bis 4,2 Millionen t noch wesentlich größer als in Abbildung 5 dargestellt sein (DERA, 2022b), (KU Leuven, 2022). In Abbildung 6 sind die im Jahr 2022 und für das Jahr 2030 prognostizierten produzierten Primärrohstoffmengen zusammengefasst.



Quelle: (Fraunhofer IAO, eigene Darstellung, Daten aus (DERA, 2022b), (KU Leuven, 2022))

Abbildung 6: Produzierte Primärrohstoffmengen für die betrachteten Aktivmaterialien

Unternehmen aus Europa können trotz sehr geringer bzw. nicht vorhandener Vorkommen vor Ort an Primärrohstoffe gelangen, indem sie sie etwa über Börsen (z. B. London Metal Exchange) oder über Rohstoffhändler einkaufen. Deren Sitz befindet sich allerdings in der weit überwiegenden Mehrzahl der Fälle zwar in Europa, jedoch nicht in der Europäischen Union. Des Weiteren können langfristige Lieferverträge direkt mit Bergbaubetrieben und Raffinerien abgeschlossen werden, was derzeit der verbreitetste Weg zur Sicherung des weltweiten Rohstoffzugangs ist. Zwecks Diversifizierung sind unterschiedliche Lieferanten aus verschiedenen Weltregionen zu wählen. Auch eine Beteiligung an einem laufenden Rohstoffbetrieb oder an einem in der Entwicklung stehenden Rohstoffprojekt kommt in Frage. Jedoch nimmt die Entwicklung einer Mine allein von der Entdeckung bis zur Produktion bereits rund ein Jahrzehnt Vorlaufzeit in Anspruch und bindet erhebliche Investitionen über mehrere Jahrzehnte. Derzeit gibt es nur noch wenige große, weltweit tätige Explorations-, Bergbau- und Handelsunternehmen mit Sitz in Europa. Dessen weltweiter Anteil an den Bergbauaktivitäten ist in den letzten hundert Jahren von 40 % auf 3 % gesunken. Sobald die Beschaffung von Primärrohstoffen gelungen ist, können sie zur Überwindung befristeter Versorgungsengpässe zum Teil eingelagert werden.

Nach ihrer Nutzung in einem Produkt ist an dessen Lebenszyklusende deshalb das Recycling sehr zweckdienlich (IRS, 2021a), (IRS, 2021b).

1.5 Voraussetzungen und Potenziale recycelter Rohstoffe

Durch eine neue Verwertung von Aktivmaterialien mittels Recycling am Ende des Produktlebenszyklus ist es möglich, den Bedarf an Primärrohstoffen für Traktionsbatterien zu reduzieren.²

Damit dies gelingt, müssen allerdings zunächst mehrere Voraussetzungen geschaffen werden. So ist sicherzustellen, dass die Aktivmaterialien nicht verloren gehen, sondern für das Recycling zur Verfügung stehen. Hierauf wird mit Blick auf Traktionsbatterien in den nachfolgenden Kapiteln näher eingegangen. Des Weiteren ist es erforderlich, in einem angewendeten Recyclingprozess eine hohe Materialausbeute zu erzielen. In Zusammenhang mit den Aktivmaterialien Lithium, Nickel und Kobalt gelten in der Europäischen Union demnächst Vorgaben für die Prozesseffizienz. Die Werte und das Jahr ihres jeweiligen Inkrafttretens sind in Abbildung 7 zusammengefasst. Mit Blick auf Nickel und Kobalt ist zu berücksichtigen, dass bei den beiden Materialien die Effizienz in industriell etablierten pyro- sowie hydrometallurgischen Recyclingprozessen bereits heute zwischen 90 und 95 % und damit in der Größenordnung der in Abbildung 7 genannten Werte liegt. Bei Lithium hingegen ist der metallurgische Prozess sehr aufwendig und von daher aktuell noch nicht wirtschaftlich. Daher erfährt das Thema Recycling von Lithium erst jetzt zunehmend Aufmerksamkeit. Bei Mangan und Graphit fand in der Vergangenheit aus wirtschaftlichen Gründen ebenfalls kein Recycling im industriellen Maßstab statt. Dass damit jedoch zumindest perspektivisch begonnen wird, erscheint angesichts der absehbaren Marktentwicklung wahrscheinlich. Zuvor müssen allerdings Verfahren zum Recycling von Mangan und Graphit entwickelt werden, was gemäß Branchenexpert:innen mehrere Jahre in Anspruch nimmt (DERA, 2022a), (Europäische Union, 2023), (Rat der EU, 2023b).

² | Mit der demnächst erscheinenden Verordnung wird in der Europäischen Union ab dem nächsten Jahrzehnt vorgeschrieben, dass neu hergestellte Batterien einen Anteil von recyceltem Lithium, Nickel oder Kobalt in Höhe von zunächst 6 %, 6 % bzw. 16 % und später 12 %, 15 % bzw. 26 % enthalten müssen. Erstgenannte Anteile gelten ab acht Jahren und letztgenannte Anteile ab 13 Jahren nach dem für Ende des Jahres 2023 zu erwartenden Inkrafttreten der Verordnung über Batterien und Altbatterien und somit aller Voraussicht nach ab dem Jahr 2031 bzw. 2036 (Europäische Union, 2023), (Rat der EU, 2023b).

Die in Abbildung 7 genannte Effizienz bezieht sich lediglich auf den Recyclingprozess und von daher auf nicht mehr als Demontage, mechanische Vorbehandlung und metallurgisches Recycling von Batterien. Wichtig ist, dass im Prozess unterschiedliche Materialzusammensetzungen gleichzeitig verarbeitet werden können, etwa sowohl Batterien mit LCO-Kathode als auch solche mit NMC111- bis NMC811- oder LFP-Kathode. Andernfalls wäre vor dem Recycling ein kostenintensiver Vorsortierprozess einzurichten, was zu mehreren parallelen metallurgischen Recyclingprozessen mit entsprechend geringeren Durchsätzen und höheren Fixkosten führen würde (Hagelüken, 2021).

In Anbetracht des perspektivisch stark zunehmenden Bedarfs an Rohstoffen zur Herstellung von Batteriezellen sowie des demnächst in der Europäischen Union für Batterien vorgeschriebenen Anteils recycelter Materialien gibt es zahlreiche Ankündigungen von Unternehmen, Recyclingkapazitäten in Europa aufzubauen zu wollen. Entsprechende gemäß Pressemitteilungen der jeweiligen Unternehmen bereits in Betrieb genommene sowie geplante Einrichtungen sind in Abbildung 8 dargestellt. Die dort ersichtlichen vorgesehenen Kapazitäten erscheinen im Moment sehr hoch und ihre letztendliche Umsetzung bleibt je Einrichtung abzuwarten.

Die in den nächsten Jahren verfügbare Menge an recycelten Materialien in vergleichbarer Qualität zu Primärrohstoffen, auch

als Rezyklat bezeichnet, hängt neben der Effizienz im Recyclingprozess und den in Betrieb befindlichen Recyclingkapazitäten maßgeblich von den sogenannten Rücklaufmengen, in denen Batterien dem Recycling zugeführt werden, ab. Die Rücklaufmengen speisen sich unter anderem aus der Unterhaltungselektronik und aus stationären Energiespeichern. Mittelfristig macht Produktionsausschuss aus der Herstellung von Batteriezellen, -modulen und -systemen zwei Drittel bis drei Viertel der Rücklaufmengen aus. Grund hierfür ist, dass bei der Inbetriebnahme von Einrichtungen zur Herstellung von Batteriezellen die Ausschussrate bei 10 bis 30 % liegt (ADL, 2022). Entsprechend macht Produktionsausschuss von der für Europa angekündigten Produktionskapazität im Jahr 2025 rund 70 GWh aus (siehe Kapitel 1.2). Dieser Wert wächst bis zum Jahr 2030 auf rund 120 GWh, was sich aus der im Lauf der Zeit stark steigenden Produktionskapazität und einer gleichzeitig auf 5 bis 15 % sinkenden Ausschussrate ergibt. Dann ist der Anteil von Produktionsausschuss an den Rücklaufmengen auf rund 50 % gesunken. Die anderen 50 % stammen weiterhin aus der Unterhaltungselektronik, aus stationären Energiespeichern und ab dem nächsten Jahrzehnt in nennenswertem Umfang aus Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus. Deren Anteil an den Rücklaufmengen wächst daraufhin mit großer Geschwindigkeit auf rund 70 % im Jahr 2035 (NPM, 2021), (ADL, 2022), (BMI, 2022), (T&E, 2023b). Produktionsausschuss wird es auch dann noch in großer Fülle geben, seine Menge wächst jedoch trotz weiterhin steigender Produktions-

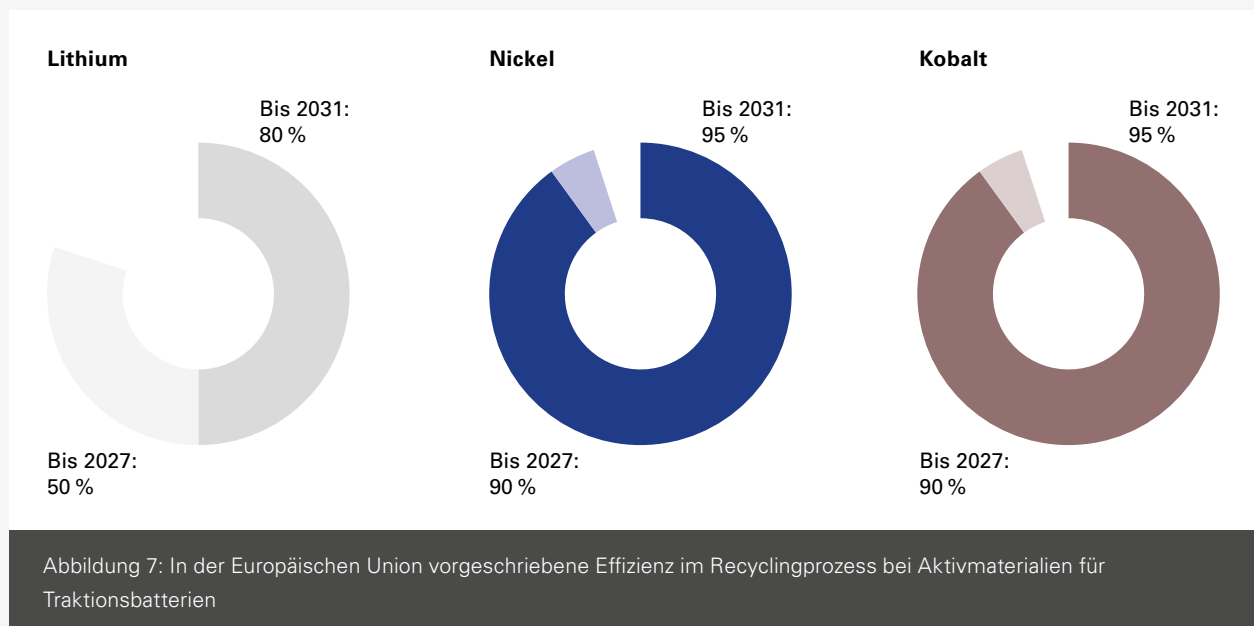
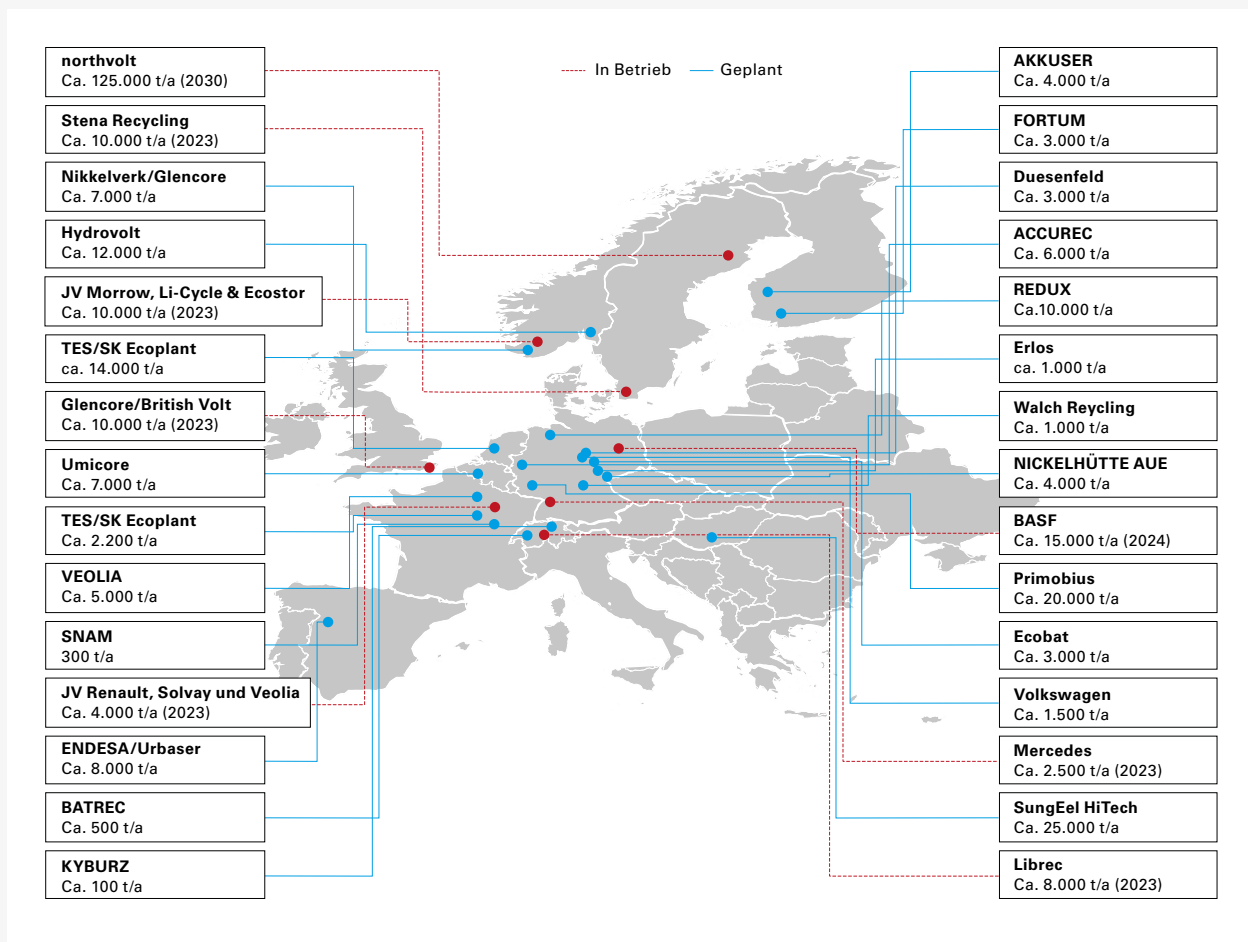


Abbildung 7: In der Europäischen Union vorgeschriebene Effizienz im Recyclingprozess bei Aktivmaterialien für Traktionsbatterien



Quelle: (DERA, 2022a)

Abbildung 8: Im Jahr 2022 in Betrieb genommene sowie geplante Recyclingkapazitäten in Europa

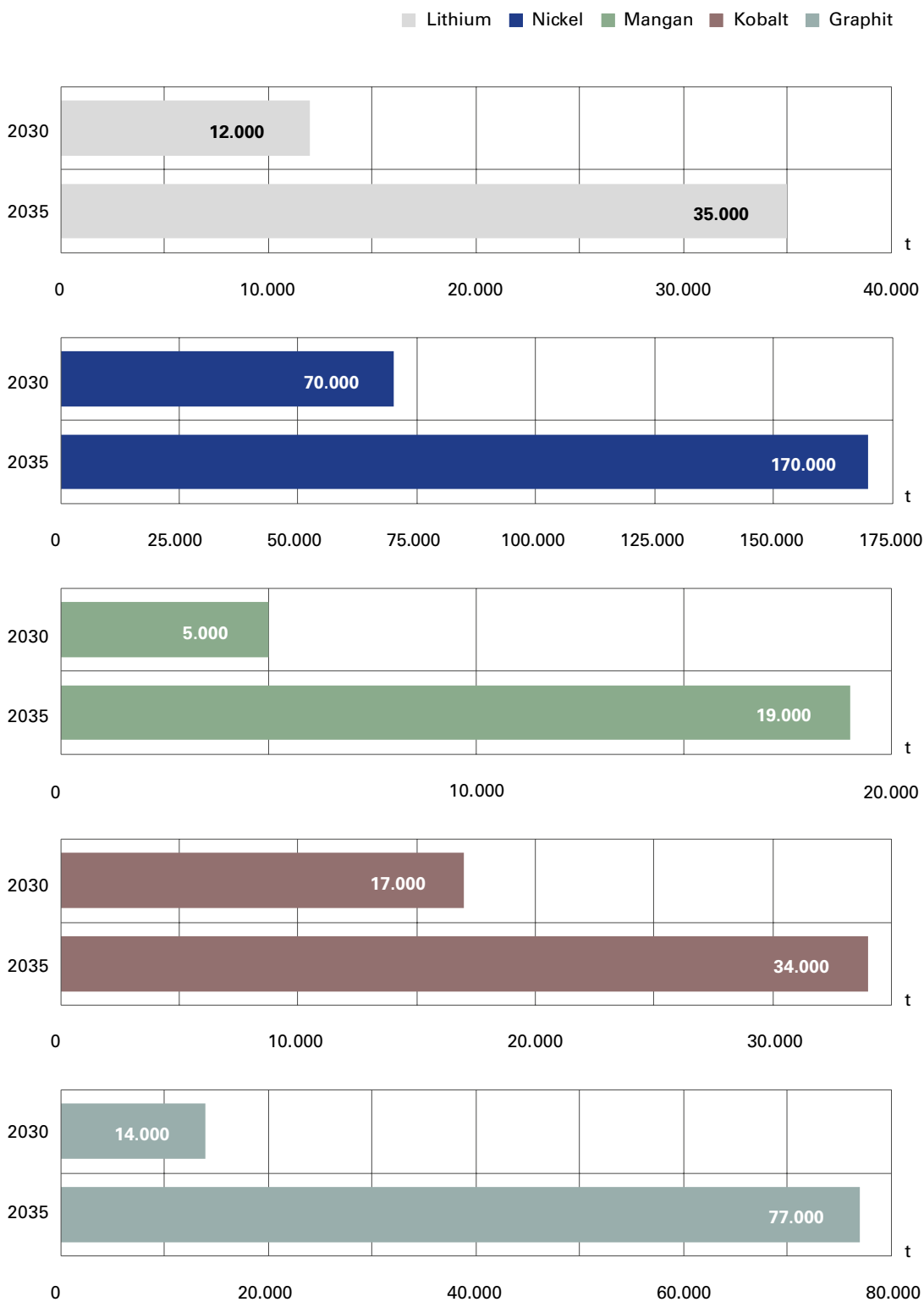
kapazität mit immer langsamerer Geschwindigkeit aufgrund von zunehmender Erfahrung mit der Herstellung von Batteriezellen.

Entsprechend den obenstehenden Ausführungen lässt sich bis zum Ende des Jahrzehnts vergleichsweise wenig Rezyklat gewinnen.

Bis eine nennenswerte Menge Rezyklat zur Verfügung steht, müssen erst Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang bzw. deren Traktionsbatterien in größerer Zahl das Ende ihres Lebenszyklus erreicht haben.

Hierfür wird in Publikationen ein Zeitraum von rund zehn Jahren genannt (NPM, 2021), (DERA, 2022a), (EuRIC, 2023). Die Pkw im Bestand in Deutschland sind im Durchschnitt ebenfalls ca.

zehn Jahre alt (KBA, 2022). In der Europäischen Union liegt das durchschnittliche Alter der Pkw im Bestand bei knapp zwölf Jahren (ACEA, 2022b). Rezyklatmengen, die sich auf dieser Grundlage und abzüglich Anteilen für Verluste bei der Sammlung, durch Exporte oder durch Weiternutzung der Batterien etwa als stationäre Energiespeicher («Second Life») erzielen lassen, sind in Abbildung 9 aufgeführt. Dabei ist analog zu Angaben in Publikationen unterstellt, dass auch für Mangan und Graphit bereits mittelfristig Recyclingkapazitäten existieren (NPM, 2021), (DERA, 2022a), (KU Leuven, 2022), (T&E, 2023b).



Quelle: Fraunhofer IAO, eigene Darstellung, Daten aus (NFM, 2021), (DEFA, 2022a), (KU Leuven, 2022), (T&E, 2023b)

Abbildung 9: Prognose in Europa mittels Recycling erzielbarer Mengen an Rezyklat

1.6 Schlussfolgerungen für die Primärrohstoff-Verfügbarkeit und den Einfluss recycelter Rohstoffe

Im Folgenden werden die Fragestellungen, ob die Rohstoff-Verfügbarkeit für die europäische Produktion von Traktionsbatterien durch Primärrohstoffe langfristig gesichert ist und welchen Einfluss recycelte Rohstoffe auf die Rohstoffversorgung haben könnten, beantwortet.

Der Bedarf an Rohstoffen in Europa für die Herstellung von Traktionsbatterien wird in den nächsten Jahren stark steigen und zusammen mit der weltweiten Nachfrage schon bald die zuletzt produzierten Primärrohstoffmengen übertreffen. Entsprechend werden bereits Rohstoffprojekte entwickelt, sodass in absehbarer Zeit größere Primärrohstoffmengen zur Verfügung stehen.

Allerdings ist trotzdem mindestens übergangsweise von einem Anstieg der Rohstoffpreise auszugehen, solange Umfang und Geschwindigkeit der Entwicklung der Rohstoffprojekte hinter der Zunahme der Nachfrage zurückbleiben. Eine zusätzliche Herausforderung für Europa ist, dass dort wichtige Primärrohstoffe nur in sehr geringem Umfang oder überhaupt nicht vorkommen. So ist Portugal als Produzent vergleichsweise kleiner Mengen Lithium bekannt und etwa in Deutschland und Finnland soll die Förderung von Rohstoffen für Traktionsbatterien aufgenommen werden. Entsprechend ist der Kontinent bei den Primärrohstoffen für alle Aktivmaterialien von Traktionsbatterien auf eine zuverlässige Belieferung aus unterschiedlichen Weltregionen angewiesen. Dies birgt insofern erhebliche Risiken, als sowohl bereits ausgebrochene als auch drohende bewaffnete Konflikte den Rohstoffzugang sowie Transportwege einschränken oder sogar unterbrechen können.

Durch eine vorausschauende Differenzierung von Bezugsquellen kann die Gefahr eines Ausfalls von Lieferungen zumindest reduziert werden.

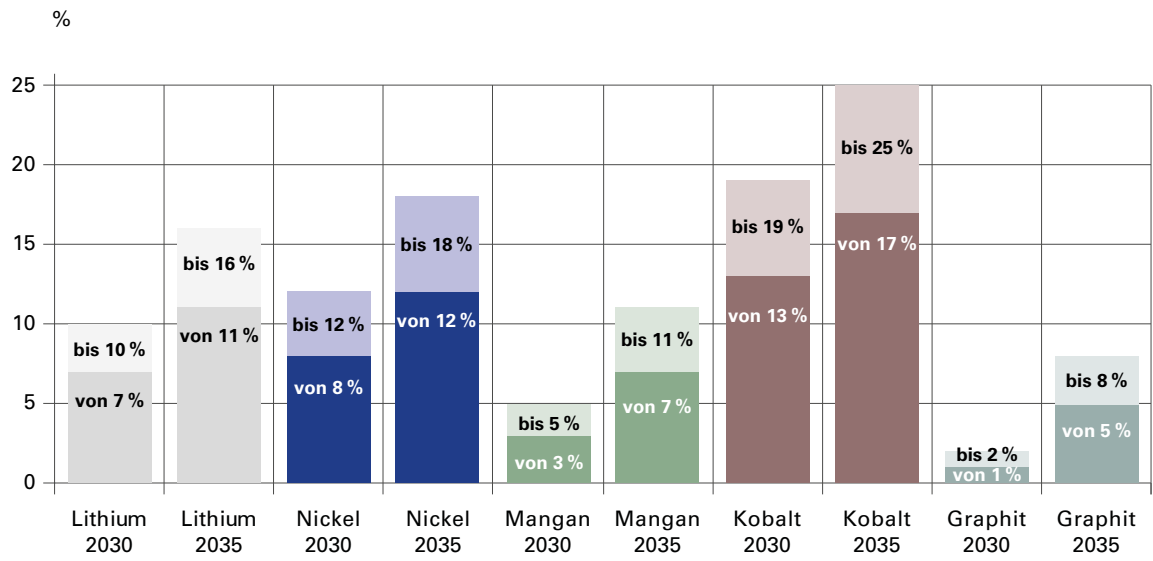
Den Annahmen und Berechnungen zufolge lässt sich bis zum Ende des Jahrzehnts der Bedarf für die in Europa angekündigten Produktionskapazitäten an Lithium um rund 7 bis 10 %, an Nickel um rund 8 bis 12 %, an Mangan um rund 3 bis 5 %, an Kobalt um rund 13 bis 19 % und an Graphit um rund 1 bis 2 % durch Rezyklat abdecken.

Bis zum Jahr 2035 steigen die genannten Anteile jeweils im Durchschnitt um fünf Prozentpunkte, sodass zu dem Zeitpunkt

der Bedarf an Lithium um rund 11 bis 16 %, an Nickel um rund 12 bis 18 %, an Mangan um rund 7 bis 11 % an Kobalt um rund 17 bis 25 % und an Graphit um rund 5 bis 8 % durch Rezyklat abgedeckt werden kann. Die genannten Werte sind in Abbildung 10 zusammengefasst.

Der Beitrag recycelter Rohstoffe zur Sicherstellung der Versorgung ist somit sehr groß.

Die Verfügbarkeit von Rohstoffen für Europa lässt sich darüber hinaus noch stärker ausbauen, wenn Einrichtungen mit Sitz dort wieder stärker Explorations- und Bergbauaktivitäten ausführen, etwa in Finnland, oder daran partizipieren, etwa auf dem südamerikanischen Kontinent. Auch verstärkt Handel zu treiben und so Kontakte zu etablierten Metallbörsen und Rohstoffhändlern aufzubauen oder deren Ansiedlung oder Gründung in der Europäischen Union zu veranlassen, kann den Zugriff auf Rohstoffe verbessern. Dazu kann ferner die Einlagerung eines Teils beschaffter Primärrohstoffe beitragen, um damit befristete Versorgungsengpässe überwinden zu können.



Quelle: Fraunhofer IAO, eigene Darstellung

Abbildung 10: Durch Rezyklat (siehe Abbildung 9) abdeckbarer Anteil des Bedarfs für die in Europa angekündigten Produktionskapazitäten (siehe Abbildung 4)

2.

Stand und Entwicklung von xEV-Altfahrzeugverwertung und -verbleib im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen

Die im voranstehenden Kapitel (siehe Abbildung 9) angegebenen Mengen an Rezyklat, mit denen zur Sicherung der Rohstoffversorgung in Europa beigetragen werden kann, hängen maßgeblich davon ab, dass dort entsprechende Fahrzeuge am Ende ihres Lebenszyklus verfügbar sind. Für den Umgang mit solchen Fahrzeugen, die nicht exportiert werden und dann sogenannte Altfahrzeuge darstellen, existieren grundsätzlich etablierte und bewährte Verfahren zur Verwertung der Bestandteile. Für eine zufriedenstellende Rückgewinnung der Materialien aus Traktionsbatterien bedarf es allerdings neuer Lösungen, bevor Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang vermehrt bzw. mehrheitlich der Verwertung zugeführt werden. Im Rahmen dieses Kapitels wird die Notwendigkeit der neuen Lösungen herausgearbeitet und es wird auf Besonderheiten beim Umgang mit Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus eingegangen.

2.1 Einleitung und Vorgehensweise

In Europa wird der Schutz von Menschen und Umwelt nicht nur während Entwicklung, Herstellung und Betrieb von Fahrzeugen durch zahlreiche Vorschriften sichergestellt. Auch am Ende des Lebenszyklus gelten mehrere Richtlinien. Diese sollen einerseits etwa eine Ausfuhr nicht mehr funktionstüchtiger Fortbewegungsmittel in Länder mit weniger strengen Regelungen unterbinden. Andererseits sollen sie dafür sorgen, dass die Altfahrzeuge auch innerhalb der Europäischen Union nicht verloren gehen und dass ihre wertvollen Bestandteile zur Deckung des Rohstoff- und Materialbedarfs der Industrie beitragen. Entsprechend stellt die Verwertung von Fahrzeugen inzwischen ein verbreitetes Geschäftsmodell dar. Nichtsdestotrotz wird von den Fahrzeugen am Ende ihres Lebenszyklus nach wie vor lediglich ein Bruchteil zur Rückgewinnung der verfügbaren Materialien herangezogen. Bei Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang sowie unter anderem bei deren

Traktionsbatterien und E-Motoren ist es nun in Anbetracht des Fehlens entsprechender Rohstoffvorkommen in der Europäischen Union sehr empfehlenswert, Altfahrzeuge in möglichst großer Zahl der Verwertung zuzuführen.

Nachfolgend wird zunächst dargelegt, wie Fahrzeuge das Ende ihres Lebenszyklus in Europa erreichen und auf welche Arten dann auf Basis der geltenden Richtlinien mit ihnen umgegangen werden kann. Dazu zählt sowohl der Export in ein Land außerhalb der Europäischen Union als auch die Einstufung als Altfahrzeug. Durch die Zuordnung von Mengenangaben wird des Weiteren aufgezeigt, welcher Umgang aktuell am verbreitetsten ist. Außerdem werden Ursachen dafür benannt und es werden Optionen zur Lenkung des Umgangs in eine für die Rohstoffversorgung förderliche Richtung aufgeführt.

Bei den Beschreibungen wird einerseits differenziert zwischen konventionellen Fahrzeugen und solchen mit elektrischem Antriebsstrang. Andererseits wird auf besondere Merkmale von Traktionsbatterien eingegangen, deren Lebenszyklusende nicht mit dem der Fahrzeuge übereinstimmen muss. Dies ergibt sich dadurch, dass eine Traktionsbatterie bereits als nicht mehr funktionstüchtig für mobile Anwendungen deklariert wird, wenn sie grundsätzlich zwar noch zur Speicherung von Energie fähig ist, aber einen Teil ihrer Energiekapazität verloren hat. Die dann noch gegebenen Möglichkeiten, die Batterie wiederaufzubereiten oder im sogenannten »Second Life« wiederzuverwenden, sowie das Vorgehen bei ihrer Verwertung werden abschließend behandelt.

2.2 Umgang mit Fahrzeugen am Ende ihres Lebenszyklus in Europa

Auch wenn sich Fahrzeuge den Großteil ihres Lebenszyklus innerhalb der Europäischen Union befinden, stehen sie dort nicht ohne weiteres Zutun für das Recycling zur Verfügung.

Denn will sich eine Person ihres Fahrzeugs entledigen, hat sie in der Regel die Absicht, dabei keinen finanziellen Nachteil zu erleiden oder sogar einen Vorteil zu erzielen. Entsprechend ist ein Verkauf des Fahrzeugs selbst dann reizvoll, wenn es die Funktion der Fortbewegung nicht mehr erfüllt. Abnehmende auch für nicht mehr funktionsfähige Fahrzeuge finden sich in Ländern außerhalb Europas. Dies ist zwar komfortabel für die Person, die zuletzt das Eigentum an dem Fahrzeug innehatte. Aber so verlassen wertvolle Materialien die Europäische Union und gehen häufig im Land des letztendlichen Verbleibs des Fahrzeugs aufgrund dort fehlender Richtlinien oder ausbleibender Beaufsichtigung innerhalb kurzer Zeit im Abfall ganz verloren. Dies ist für Europa im Fall von Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang, deren Materialien zur Reduktion der Abhängigkeit von Rohstoffimporten in erheblichem Umfang zurückgewonnen werden sollen, eine besondere Herausforderung.

Damit wertvolle Materialien aus einem Fahrzeug, dessen sich jemand entledigen will, bestenfalls der Europäischen Union erhalten bleiben oder ihr vollständiger Verlust in einem Land außerhalb Europas zumindest möglichst lange hinausgezögert wird, gibt es in der Europäischen Union grundsätzlich Vorschriften und Gesetze in vielerlei Hinsicht. Diese lassen sich zuvorderst danach unterscheiden, ob sie auf ein Fahrzeug angewendet werden sollen, das zwar den Ansprüchen europäischer Nutzender nicht mehr genügt, aber grundsätzlich noch als Fortbewegungsmittel mit zumindest minimalen Komfortmerkmalen dienen kann, oder das funktionsunfähig ist. Der aktuelle Stand der Vorschriften und Gesetze zu beiden Anwendungsfällen wird in diesem Kapitel ausführlicher behandelt. Das Verständnis der jeweiligen Richtlinien ist wichtig, um die Handlungsbedarfe für einen Erhalt möglichst vieler Fahrzeuge und ihrer wertvollen Materialien in Europa identifizieren und entsprechend ausgerichtete Maßnahmen ableiten zu können.

Der Zeitpunkt, zu dem sich in der Europäischen Union eine Person des in ihrem Eigentum befindlichen Fahrzeugs entledigen will, wird als Ende des Lebenszyklus des Fahrzeugs in Europa bezeichnet. Wenn der Anlass darin besteht, dass die Fortbewegung überhaupt nicht mehr möglich ist und damit die vorgesehene Funktion nicht mehr erfüllt wird, liegt ein Altfahrzeug vor. Andererseits kann ein Fahrzeug auch das Ende seines Lebenszyklus in Europa erreicht haben, wenn lediglich Nutzerfreundlichkeit und Komfort bei der Fortbewegung eingeschränkt sind oder wenn es unfreiwillig, z. B. durch Diebstahl, nicht mehr verfügbar ist.

Ein Altfahrzeug gilt in Europa gemäß Richtlinie 2000/53/EG als gefährlicher Abfall und darf von daher gemäß Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 nicht in Länder außerhalb der Europäischen Union exportiert werden. Stattdessen ist es gemäß Richtlinie 2000/53/EG einer zugelassenen Verwertungsanlage zuzuführen. Erst im Anschluss daran erhält die Person, die zuletzt das Eigentum an dem Fahrzeug innehatte, einen für die Abmeldung erforderlichen Verwertungsnachweis und es erfolgt eine Eintragung im entsprechenden Register. In Deutschland wird ein Altfahrzeug zunächst nach der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) unter dem Schlüssel »160104*« eingeordnet.³ So sind Fahrzeuge beschrieben, wie sie in der Regel zur Entsorgung abgegeben werden und noch Öle, Kraftstoffe oder andere gefährliche Bestandteile, wie zum Beispiel Starterbatterien oder Airbags, enthalten. Darüber hinaus sind in Fahrzeugen, die nach dem genannten Schlüssel charakterisiert sind, auch noch ein Katalysator sowie weitere Komponenten und (Kunststoff-) Teile eingebaut, die zum Beispiel Platin, Kupfer, Aluminium oder Glas enthalten und sich entsprechend gut für das Recycling oder eine Wiederverwendung eignen. Nach der Entfernung der genannten sowohl gefährlichen als auch wertvollen Bestandteile, der Trockenlegung, der Schadstoffentfrachtung sowie der Demontage der Räder, Sitze sowie weiterer größerer Baugruppen, wird das entsprechende Altfahrzeug nach der AVV unter dem Schlüssel 160106 eingeordnet. So kann es in einer Schredderanlage zerkleinert werden in die sogenannte Leicht- und Schwerfraktion. Hieraus lassen sich schließlich Nichteisenmetalle, Aluminium und andere Metallteile gewinnen (IPA, 2020), (Trinomics, 2020).

Wenn ein Fahrzeug das Ende seines Lebenszyklus in Europa erreicht hat, aber die Fortbewegung noch ermöglicht, kann es in ein Land außerhalb der Europäischen Union exportiert wer-

³ | Durch den Asterisk (*) wird Abfall gekennzeichnet, der noch gefährliche Bestandteile wie etwa Altöle oder Kraftstoffe enthält.

den. Hierzu sind etwa mit Konformitätsbescheinigung, Anmeldebescheinigung und Zulassungsbescheinigung zunächst unterschiedliche Dokumente vorzulegen. Nach dem Abschluss des Vorgangs wird zur Bestätigung von der Zollbehörde ein für die Abmeldung erforderlicher Ausfuhrbescheid ausgestellt und es erfolgt eine Eintragung im entsprechenden Register. Zur Vermeidung des Exports von Fahrzeugen, die die vorgesehene Funktion nicht mehr erfüllen, somit Altfahrzeuge darstellen und einer zugelassenen Verwertungsanlage zuzuführen wären, könnte die Pflicht zum Nachweis einer kürzlich bestandenen Verkehrsprüfung in allen Ländern der europäischen Union eingeführt werden (ADEME, 2019), (UBA, 2020).

Eine dritte Art, auf die ein Fahrzeug das Ende seines Lebenszyklus in Europa erreichen kann, ist sein Diebstahl oder sonstiger Verlust. In diesem Fall stellt die Polizei oder eine Versicherungsgesellschaft eine Diebstahlanzeige oder eine Schadensmeldung bei amtlich bestätigtem dauerhaftem, unwiederbringlichem Verlust des Fahrzeugs aus und es erfolgt eine Eintragung im entsprechenden Register. Durch diese Regelungen und die oben beschriebene Richtlinie 2000/53/EG soll ein Umgang mit Fahrzeugen am Ende ihres Lebenszyklus in Europa, der den Interessen und Absichten der Europäischen Union gemäß dem Vertrag von Lissabon (Europäische Union, 2009) entgegenwirkt, vermieden werden. Erreicht werden soll dies etwa dadurch, dass sich eine Person von den wiederkehrenden Gebühren, mit denen der Besitz eines Fahrzeugs verbunden ist, erst durch Vorlage eines der oben angeführten Bescheide oder Nachweise befreien kann (UBA, 2020).

In den drei oben beschriebenen Fällen soll nicht nur die Einhaltung der Interessen und Absichten der Europäischen Union gemäß dem Vertrag von Lissabon (Europäische Union, 2009) sichergestellt werden, sondern es soll auch das Ende des Lebenszyklus in Europa von Fahrzeugen dokumentiert und den Behörden bekannt werden. Es gibt allerdings Fälle, in denen bewusst oder unbewusst sowie entgegen oder auch in Einklang mit der Gesetzeslage eine solche Dokumentation nicht stattfindet. Hier einige Beispiele.

- Ein Export von Fahrzeugen in Länder außerhalb der Europäischen Union wird nicht gemeldet (kein Gesetzesverstoß, aber ein Verstoß gegen die Meldepflicht gegenüber Zollbehörden).

- Ein Export von Altfahrzeugen in Länder außerhalb der Europäischen Union (Verstoß gegen europäisches Recht).
- Eine Verwertung von Altfahrzeugen in einer zugelassenen Verwertungsanlage ohne Eintragung im entsprechenden Register und ohne Ausstellung eines Verwertungsnachweises (kein Gesetzesverstoß).
- Eine Verwahrung von Fahrzeugen als Oldtimer auf einem Privatgrundstück (kein Gesetzesverstoß).

Eine weitere Möglichkeit, dass eine Dokumentation nicht stattfindet, ist der Export eines Fahrzeugs vor dem Ende seines Lebenszyklus in ein anderes Land innerhalb der Europäischen Union. Wird das Fahrzeug dort nicht gemäß Richtlinie 1999/37/EG erneut zugelassen, sondern einer Verwertungsanlage zugeführt, ohne Eintragung im entsprechenden Register, findet eine Dokumentation nicht statt, ohne dass gegen ein Gesetz verstoßen wird (Öko-Institut, 2018), (Trinomics, 2020), (UBA, 2020).

2.3 Quantifizierung des Verbleibs von Fahrzeugen am Ende ihres Lebenszyklus in Europa

Die in Kapitel 2.2 beschriebenen Vorschriften, die auf eine Kontrolle des Verbleibs von Fahrzeugen am Ende ihres Lebenszyklus in Europa abzielen, zeigten in der Vergangenheit grundsätzlich Wirkung. In den zurückliegenden Jahren haben im Durchschnitt jeweils ca. 11,4 Millionen Fahrzeuge den Bestand der Europäischen Union verlassen. Davon wurden jeweils im Durchschnitt etwa 6,6 Millionen Fahrzeuge einer zugelassenen Verwertungsanlage gemäß Richtlinie 2000/53/EG zugeführt. Es wurden stets Wiederverwendungs- und Recyclingquoten nahe 90 % (89,6 % in Europa im Jahr 2019; neuere Daten liegen nicht vor) und je Land der Europäischen Union zwischen 80 und 90 % erreicht (86,9 % in Deutschland im Jahr 2019). Vorgeschrieben sind 85 % gemäß Richtlinie 2000/53/EG. Bei der Altfahrzeug-Verwertungsquote, die neben der stofflichen Verwertung der Materialien der Altfahrzeuge auch die energetische Verwertung, zum Beispiel die Abfallverbrennung zur Energieerzeugung, beinhaltet, wurden im Durchschnitt in der Europäischen Union zuletzt deutlich mehr als 90 Gewichtsprozent (95,1 Gew.-% im Jahr 2019) erreicht (93,6 Gew.-% in Deutschland im Jahr 2019). Vorgeschrieben sind 95 Gew.-% (Öko-Institut, 2018), (UBA, 2020), (UBA, 2021), (ARF, 2022), (Eurostat, 2023).

In Länder außerhalb der Europäischen Union wurde in den letzten Jahren im Durchschnitt jeweils ca. 1 Million Fahrzeuge exportiert. Davon erhielt im Jahr 2020 die Region Osteuropa/Kaukasus (zum Beispiel Ukraine, Serbien, Georgien) mit rund 530.000 Einheiten die meisten. Dies ist in Abbildung 11 dargestellt. Im selben Jahr wurden nach Afrika rund 420.000, in die Region China/Südostasien/Australien/Ozeanien rund 40.000 und nach Nordamerika rund 10.000 Einheiten exportiert (UNEP, 2021), (Eurostat, 2023). Dies ist in Abbildung 12 veranschaulicht.

Ein Vergleich der oben genannten Mengen an Fahrzeugen am Ende ihres Lebenszyklus in Europa, die in den zurückliegenden Jahren jeweils einer Verwertungsanlage zugeführt oder in Länder außerhalb der Europäischen Union exportiert wurden, mit der Zahl an Fahrzeugen, die jeweils den Bestand verlassen haben, lässt eine sehr große Differenz erkennen.

Bei jährlich rund 3,8 Millionen Fahrzeugen ist der Verbleib unbekannt.

Dazu zählen zwar auch gestohlene Fahrzeuge. Wird jedoch deren Zahl, die mittels ausgestellten Diebstahlanzeigen oder Schadensmeldungen erfasst werden kann (vgl. Kapitel 2.2) und in den zurückliegenden Jahren im Durchschnitt knapp 700.000 Einheiten betrug (Eurostat, 2019), von den unbekannt verbliebenen Fahrzeugen abgezogen, verbleiben immer noch mehrere Millionen Einheiten, deren Lebenszyklusende in Europa nicht dokumentiert und den Behörden daher nicht bekannt ist. Eine Auswahl möglicher Ursachen hierfür ist am Ende von Kapitel 2.2 aufgelistet. In Abbildung 13 sind die Arten des Verbleibs von Fahrzeugen am Ende ihres Lebenszyklus in Europa und ihre zuletzt jährlichen Anteile zusammengefasst.

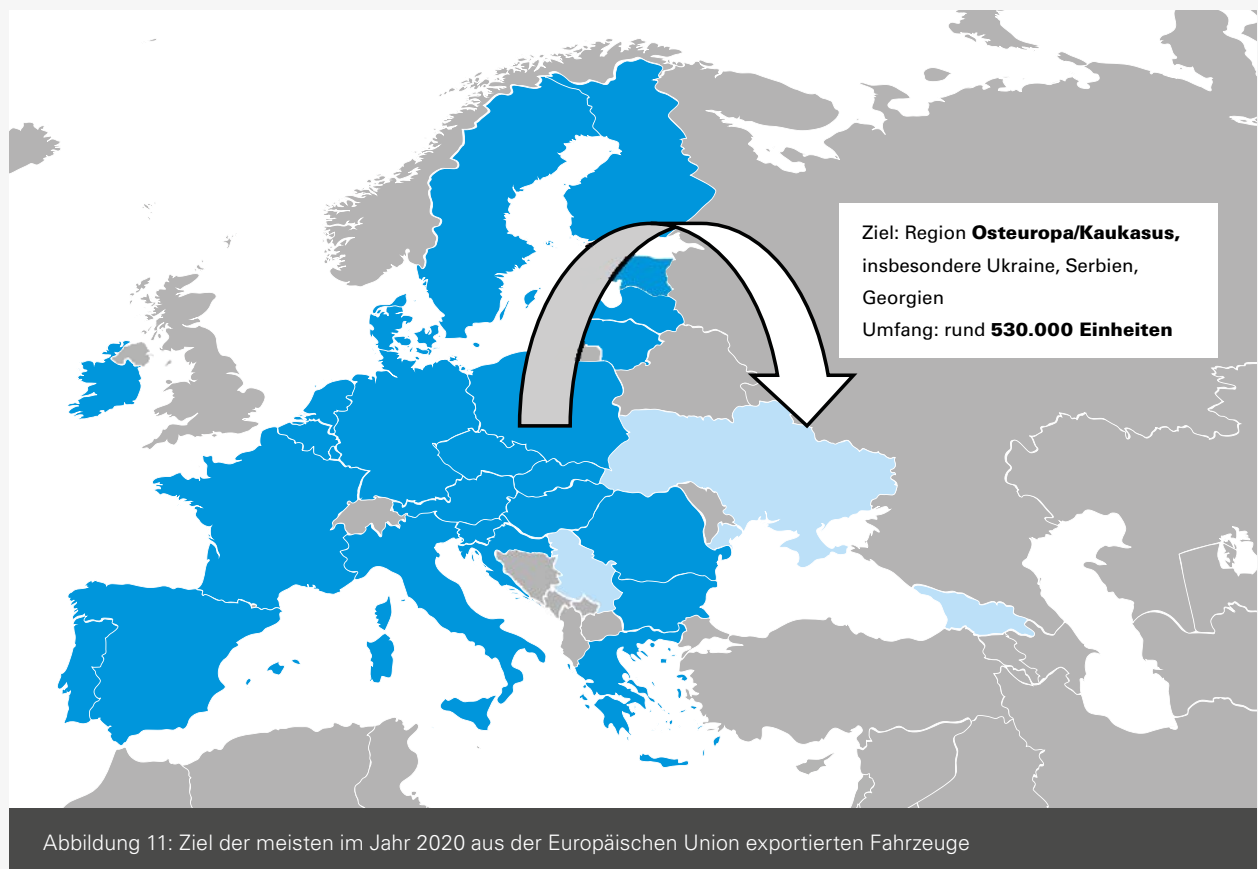
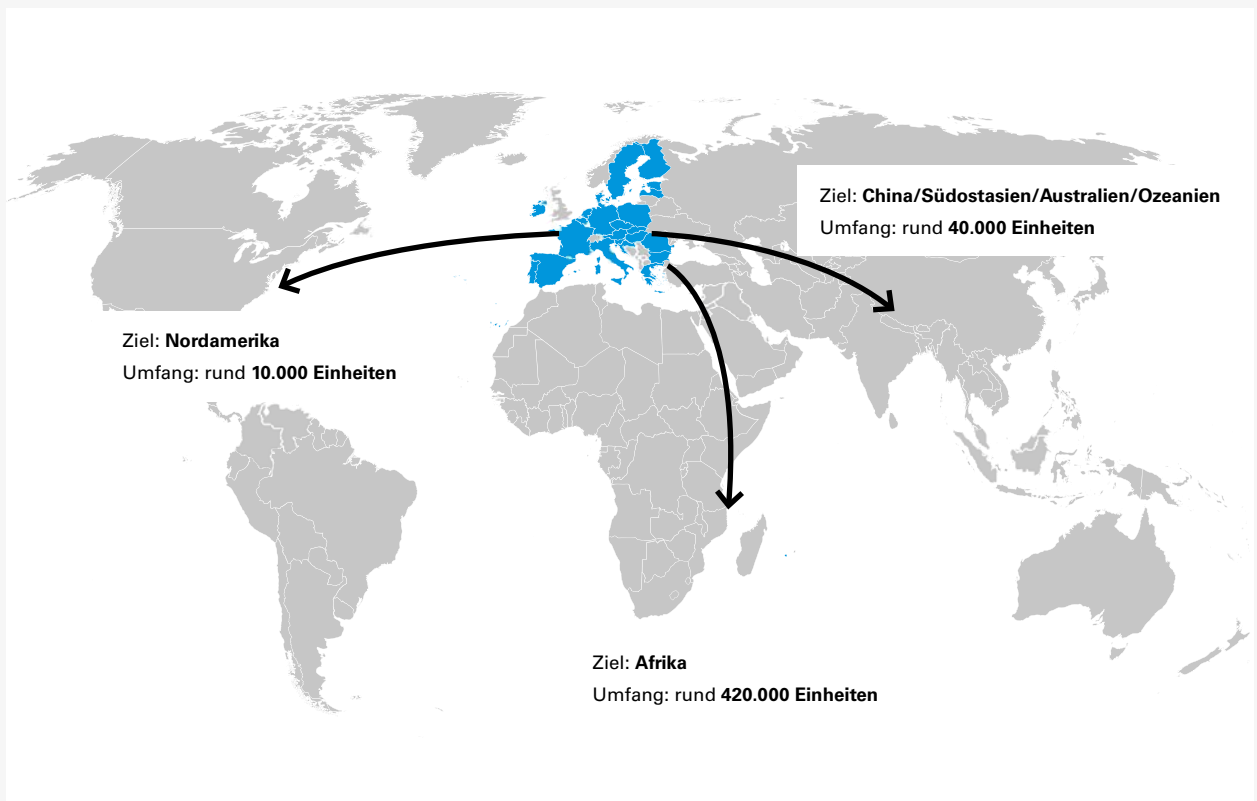
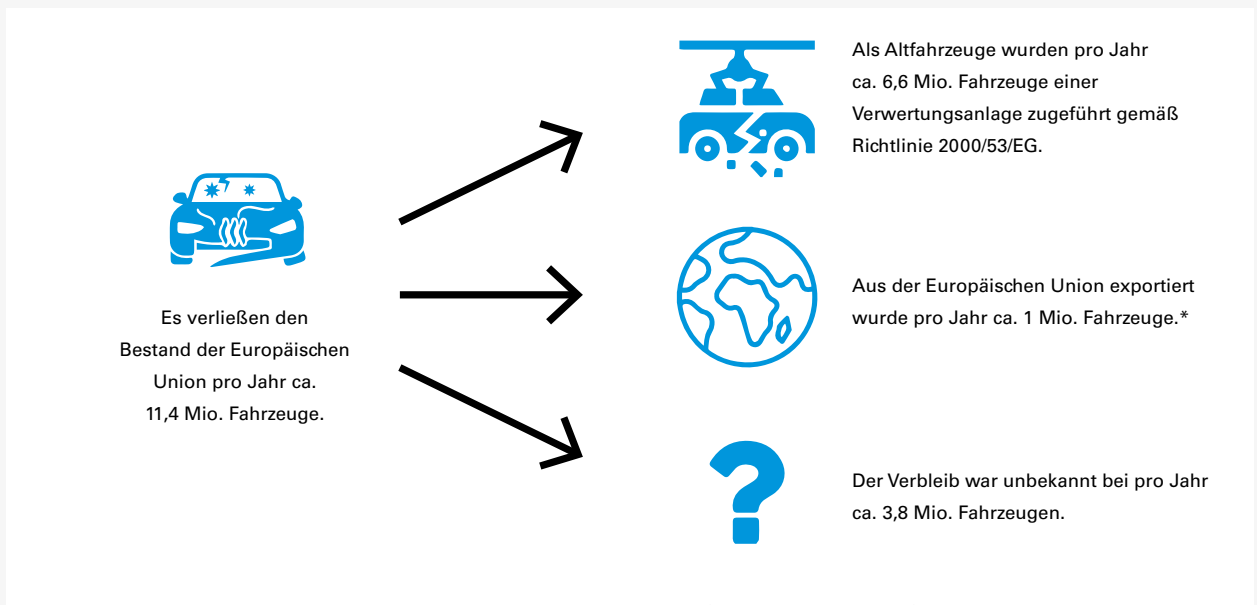


Abbildung 11: Ziel der meisten im Jahr 2020 aus der Europäischen Union exportierten Fahrzeuge



Quelle: (Fraunhofer IAO, eigene Darstellung, Daten aus (UNEP, 2021), (Eurostat, 2023))

Abbildung 12: Ziele der weiteren im Jahr 2020 aus der Europäischen Union exportierten Fahrzeuge



*Von den aus der Europäischen Union exportierten Fahrzeugen gingen ca. 53 % nach Osteuropa/Kaukasus (z. B. Ukraine, Serbien, Georgien), ca. 42 % nach Afrika, ca. 4 % nach China/Südostasien/Australien/Ozeanien und ca. 1 % nach Nordamerika (UNEP, 2021), (Eurostat, 2023).

Quelle: (Fraunhofer IAO, eigene Darstellung, Daten aus (Öko-Institut, 2018), (Trinomics, 2020), (UBA, 2020), (UNEP, 2021), (Eurostat, 2023))

Abbildung 13: Verbleib der Fahrzeuge am Ende ihres Lebenszyklus in Europa im Durchschnitt in der zurückliegenden Zeit bis zum Jahr 2022

Der Vollständigkeit halber sei darauf hingewiesen, dass es nicht das Ende des Lebenszyklus in Europa für Fahrzeuge darstellt, wenn sie in andere Länder der Europäischen Union exportiert werden. Dies geschah, wie in Abbildung 14 dargestellt, zuletzt pro Jahr im Durchschnitt mit etwa 2 Millionen Fahrzeugen. Exporteur der meisten Fahrzeuge in andere Länder der Europäischen Union war stets Deutschland. Die meisten Fahrzeuge aus anderen Ländern der Europäischen Union importierten Deutschland, Frankreich und Polen (Öko-Institut, 2011), (UBA, 2017), (UNEP, 2021).

Jeglicher Export eines Fahrzeugs am Ende seines Lebenszyklus in Europa in ein Land außerhalb der Europäischen Union ist einerseits insofern zu überdenken, als dann der Schutz der Umwelt etwa gemäß Richtlinie 75/442/EWG oder 2008/98/EG über Abfälle oder gemäß Richtlinie 1013/2006 über die Verbringung von Abfällen nicht mehr sichergestellt ist. Andererseits verlassen mit dem Fahrzeug auch wichtige Rohstoffe die Europäische Union. Vor diesem Hintergrund ist es erstre-

benswert, die Fälle unbekanntem Verbleib von Fahrzeugen zu reduzieren und insbesondere den gesetzeswidrigen Export von Altfahrzeugen in Länder außerhalb der Europäischen Union zu unterbinden. Einige Maßnahmen, um dies zu erreichen, werden in Europa bereits diskutiert, etwa:

- Verbesserung und Vereinheitlichung der Verfahren und des Datenaustauschs zur An- und Abmeldung von Fahrzeugen innerhalb der Europäischen Union,
- Förderung der Einforderung und Ausstellung eines Verwertungsnachweises, wenn ein Altfahrzeug einer Verwertungsanlage zugeführt wird,
- Einführung verbindlicher und durchsetzbarer Leitlinien zur Unterscheidung zwischen Altfahrzeugen und funktionsfähigen Fortbewegungsmitteln (Öko-Institut, 2018), (ADEME, 2019), (UBA, 2020).

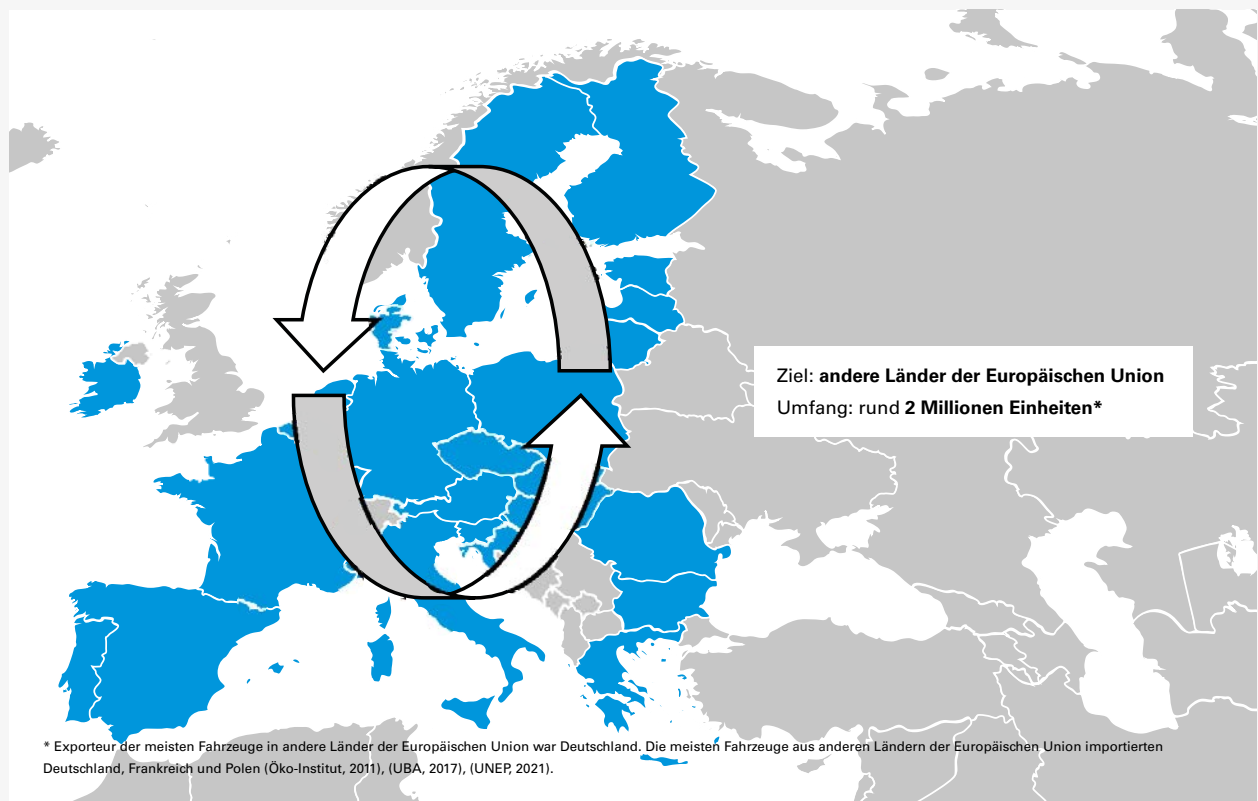


Abbildung 14: Verbleib von Fahrzeugen vor dem Ende ihres Lebenszyklus in Europa im Durchschnitt in der zurückliegenden Zeit bis zum Jahr 2022

2.4 Merkmale von Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang am Ende ihres Lebenszyklus in Europa

Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang werden sich zwar perspektivisch stark in Europa verbreiten, derzeit und in den nächsten Jahren ist ihr Anteil am Fahrzeugbestand allerdings noch vergleichsweise gering (siehe Kapitel 1). Daher gibt es mit ihnen bislang noch keine oder nur sehr wenige Erfahrungen zum Ende ihres Lebenszyklus in Europa. So besteht dort derzeit die größere Herausforderung noch im Umgang mit den Fahrzeugen, bevor sie das Ende ihres Lebenszyklus erreichen. Denn obwohl in mehreren Ländern der Europäischen Union zuletzt viele Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang zugelassen wurden, ist ihr Anteil am Bestand nicht im gleichen Umfang gestiegen. Dies betrifft insbesondere Länder wie Deutschland oder Frankreich, in denen der Kauf von Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang vom Staat mit hohen finanziellen Zuschüssen gefördert wurde und wird. Es besteht der Verdacht, dass in vielen Fällen zunächst die Fördermaßnahmen beim Kauf in Anspruch genommen und die Fahrzeuge anschließend zeitnah in andere Länder verkauft wurden. Dabei dürfte es sich aufgrund der vergleichsweise geringen Hürden und der Eignung eines für den europäischen Markt vorgesehenen Fahrzeugs stets um ein Land der Europäischen Union gehandelt haben. Dies lohnte sich in der Vergangenheit bei entsprechend schnellem Weiterverkauf trotz des Wertverlusts aufgrund der Höhe der Förderungen. Es bleibt abzuwarten, ob sich durch die Änderung der Förderkonditionen etwa in Deutschland die hohe Zulassungszahl von Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang deutlicher im Bestand niederschlagen wird (ICCT, 2020), (ADAC, 2022a), (CAM, 2022), (CAM, 2023).

Sobald Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang in nennenswertem Umfang das Ende ihres Lebenszyklus in Europa erreicht haben, werden sie auch in größerer Zahl Verwertungsanlagen zugeführt werden. Die Abläufe richten sich dann nach momentanem Stand der Dinge nach der Richtlinie 2000/53/EG über Altfahrzeuge. Mit dem Beginn dieser Entwicklung ist in Anbetracht des Alters der Pkw im Bestand Europas, das durchschnittlich knapp zwölf Jahre beträgt, ab Mitte des nächsten Jahrzehnts zu rechnen (ACEA, 2022b). Die Rentabilität der Verwertung wird dann zumindest vorübergehend zunächst sinken, da für die Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang erst verschiedene Vorbereitungen zu treffen sind. Diese umfassen eine geeignete Ausbildung des Personals, eine angepasste Ausrüstung der Unternehmen sowie die Schaffung

von Strukturen für Lagerung, Sicherheit und Transport. Dabei müssen die Anforderungen sowohl der Fahrzeuge selbst als auch der Traktionsbatterien als Komponenten mit besonderem Wertschöpfungs-, aber auch Gefahrenpotenzial berücksichtigt werden.

Die Demontage der Traktionsbatterien erfordert eine spezielle Ausbildung und Ausrüstung des Personals und ist zeitaufwendig.

Es ist auch zu hinterfragen, ob die Richtlinie 2000/53/EG über Altfahrzeuge in ihrer derzeitigen Form die Verwertung und das Recycling von Traktionsbatterien nach den Absichten und Zielen der Europäischen Union gemäß dem Vertrag von Lissabon (Europäische Union, 2009) vor dem Hintergrund der genannten Anforderungen nach wie vor sicherstellt. Mögliche Transporte der Energiespeicher über weite Strecken zu speziell qualifizierten Verwertungsanlagen könnten bei der Formulierung zukünftiger Richtlinien der Europäischen Union berücksichtigt werden. Grundsätzlich ist allerdings davon auszugehen, dass die Verwertung von Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang und insbesondere von Traktionsbatterien in Anbetracht des hohen Werts ihrer Bestandteile und Materialien bereits in absehbarer Zeit sehr rentabel sein wird (Trinomics, 2020).

2.5 Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus im Fahrzeug

Traktionsbatterien haben sehr große Bedeutung für die Unternehmen der Automobilindustrie und darüber hinaus in Europa. Denn einerseits sind sie ausschlaggebend für die Leistungs- und damit die Wettbewerbsfähigkeit zahlreicher zukünftig relevanter Produkte. Andererseits bringen sie einer überschaubaren Anzahl an Lieferanten, die teilweise seit Jahrzehnten etablierte Produzenten von Lithium-Ionen-Batterien und fast ausnahmslos im asiatischen Raum beheimatet sind, derzeit noch eine überlegene Marktposition ein. Diese Situation ist neu für die Branche, in der konventionelle Komponenten bislang in der Regel von einer Vielzahl unterschiedlicher Hersteller bezogen und entsprechende Preisvorteile erzielt werden konnten. Selbst dann, wenn die Energiespeicher höchstens noch über rund 70 % nutzbarer Energiekapazität verfügen und somit nicht mehr für den mobilen Einsatz geeignet sind, sind sie etwa für stationäre Anwendungen oder als Quelle recycelter Materialien trotzdem weiterhin relevant. Deswegen erfahren Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus im Fahrzeug an dieser Stelle eine genauere Betrachtung.

Grundsätzlich erstreckt sich die Dauer des Lebenszyklus von Traktionsbatterien im Fahrzeug über einen längeren Zeitraum, als es zu Beginn der Verbreitung von Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang angenommen wurde. Modelle von Tesla haben im Alltag, wenn auch unter günstigen Bedingungen, über Jahre bereits mehrere 100.000 Kilometer zurückgelegt. Des Weiteren gibt Renault an, dass in seit dem Jahr 2013 ausgelieferten Fahrzeugen die weit überwiegende Mehrheit der Traktionsbatterien noch funktionsfähig sei.

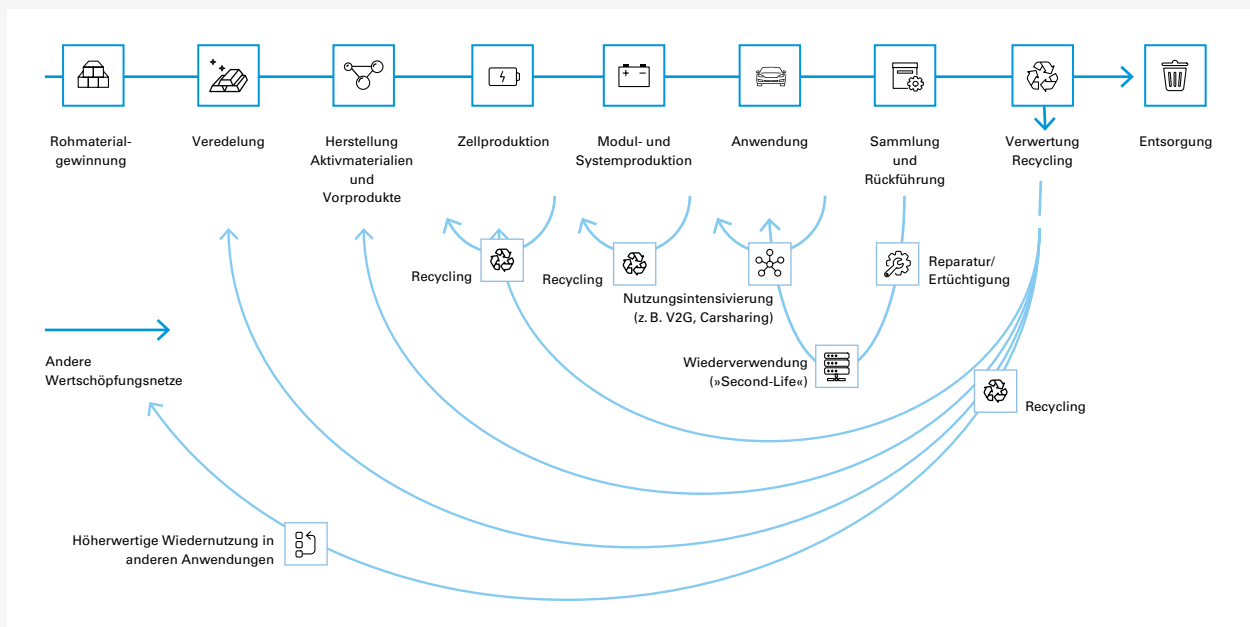
Generell nennen nahezu alle Hersteller als Ende des Lebenszyklus im Fahrzeug 70 % Mindestanteil an nutzbarer Energiekapazität.

Diese wird in der Regel acht Betriebsjahre lang oder über 160.000 Kilometer garantiert (Süddeutsche, 2020), (ADAC, 2022c), (electrive.net, 2022).

Am Ende ihres Lebenszyklus im Fahrzeug können Traktionsbatterien einer Wiederaufbereitung (englisch: Remanufacturing) unterzogen werden. Dieses Verfahren sorgt dafür, dass sie im Vergleich zum fabrikneuen Zustand genauso gut oder sogar noch besser werden (acatech, 2020). Kommt eine Wiederaufbereitung nicht mehr in Frage, kann die Wiederverwendung (englisch: Reusing) der Batterie in Betracht gezogen

werden. Denn aufgrund ihrer zwar verminderten, aber weiterhin vorhandenen Fähigkeit zur Speicherung elektrischer Energie können Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus im Fahrzeug auch noch in anderer Funktion, in der 70 % Mindestanteil an nutzbarer Energiekapazität nicht vorausgesetzt werden, genutzt werden. Die Einordnung dieser als »Second Life« bezeichneten Art der Wiederverwendung im Lebenszyklus einer Traktionsbatterie ist in Abbildung 15 ersichtlich.

Bei der Wiederverwendung einer Traktionsbatterie wird der Energiespeicher zunächst dem Fahrzeug entnommen. Er wird dann mit höchstens geringfügigen Modifikationen in einer anderen Funktion, die weniger anspruchsvoll als der Fahrzeugbau ist und auch eine nutzbare Energiekapazität von lediglich noch 70% oder weniger toleriert, zum Einsatz gebracht. Aktuelle Beispiele für »Second-Life«-Anwendungen sind stationäre Energiespeicher, wie Hausspeicher oder Notstromversorgungen, sowie Anlagen für das »Peak Shaving«, was etwa das Spitzenlastmanagement von Großverbrauchern oder die Bereitstellung von Regelleistung meint (NOW, 2020). In Tabelle 2 sind die Stärken, Schwächen, Chancen sowie Risiken dieser Art der Wiederverwendung von Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus im Fahrzeug aufgeführt.



Quelle: (acatech, 2020)

Abbildung 15: Lebenszyklus einer Traktionsbatterie einschließlich Wiederverwendung und Recycling

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> ■ »Second-Life« in stationären und mobilen Anwendungen grundsätzlich möglich ■ Zusätzliche Erlöse oder Kosteneinsparungen möglich ■ Verringerung von Treibhausgasemissionen und Ressourcenbedarf 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Unsicherheit bzgl. des Zustands am Ende des Lebenszyklus im Fahrzeug ■ Unsicherheit bzgl. der Lebensdauer im »Second-Life« ■ Sicherheitstechnische Bedenken ■ Wiederaufbereitungskosten
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> ■ Wachsender Markt für Elektromobilität ■ Wachsende Nachfrage nach stationären Energiespeichern ■ Steigendes Umwelt- und Ressourcenbewusstsein ■ Verzögerung der anfallenden Recyclingkosten ■ Steigerung der Wirtschaftlichkeit durch Fördermaßnahmen ■ Entwicklung neuer Geschäftsmodelle ■ »Design-for-Second-Life«: Baukastenstrategie möglich 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Geringe Verfügbarkeit gebrauchter Batterien ■ Unsicherheit bzgl. Batteriepreisentwicklung ■ Fehlende Zahlungsbereitschaft durch geringe Akzeptanz von gebrauchten Produkten ■ Unklare Rechtssituation (z. B. Haftung, Recyclingpflicht) ■ Fehlende Standardisierung ■ Hohe Anforderungen an logistische Ketten

Quelle: (NOW, 2020)

Tabelle 2: Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken der als »Second Life« bezeichneten Wiederverwendung von Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus im Fahrzeug

Es ist zu beachten, dass Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus im Fahrzeug durch Wiederaufbereitung und Wiederverwendung für einen sehr langen Zeitraum der Verwertung der Aktivmaterialien mittels Recycling vorenthalten werden.

Eine wiederaufbereitete Traktionsbatterie steht dem Recycling, sofern tatsächlich eine Ertüchtigung in eine zum fabrikneuen Zustand vergleichbare Beschaffenheit gelingt, erst nach rund zehn Jahren zur Verfügung, nachdem sie erneut das Ende ihres Lebenszyklus im Fahrzeug erreicht hat (siehe Kapitel 1.5).

Über was für einen Zeitraum sich das »Second Life« einer Traktionsbatterie erstreckt, lässt sich noch nicht fundiert einschätzen, da diesbezüglich bislang nicht genug Daten existieren. Branchenexpert:innen gehen von rund sechs Jahren aus, was sich aber in Abhängigkeit vom technischen Fortschritt und von der Akzeptanz noch erheblich ändern kann (NPM, 2021). Je nachdem, wie gut sich Wiederaufbereitung und Wiederverwendung letztendlich technisch umsetzen lassen und von Nutzenden nachgefragt werden, werden entsprechend viele der Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus im Fahrzeug erst später als bislang angenommen dem Recycling zugeführt. Diesbezügliche Schätzungen reichen von 10 bis 75 % (Hagelüken, 2021). Analog dazu ändern sich auch die Mengen verfügbaren Rezyklats, die in Kapitel 1.5 für das nächste Jahr-

zehnt prognostiziert sind. Vor diesem Hintergrund bedarf es vor der unternehmerischen oder (förder-)politischen Entscheidung für eine der Optionen für den Umgang mit Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus erst der vollständigen Identifikation und fundierten Beurteilung aller damit einhergehenden Vor- und Nachteile sowie Chancen und Risiken.

Kommen Wiederaufbereitung und Wiederverwendung nicht in Betracht, können Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus im Fahrzeug und gemeinsam mit Altfahrzeugen einer Verwertungsanlage zugeführt werden. Die Schritte, die ein Energiespeicher dann durchläuft, unterscheiden sich allerdings von den bislang in der Verwertung von Fahrzeugen gewohnten Vorgehensweisen. Ziel der Verwertung bzw. des Recyclings von Traktionsbatterien ist es, mit Rezyklat einen zur Herstellung neuer Produkte geeigneten Sekundärrohstoff in vergleichbarer Qualität zu primären Rohstoffen zur Verfügung zu stellen. In Anbetracht der Eigenschaften und Merkmale der Aktivmaterialien von Traktionsbatterien ist deren Verwertung ein komplexer und in der Regel mehrstufiger Vorgang, der auf unterschiedliche Arten mit spezifischen Vor- und Nachteilen durchgeführt werden kann. In der Regel wird die Traktionsbatterie zunächst deaktiviert und bis auf Modul-Ebene (evtl. auch bis auf Zellebene) zerlegt. Der nächste Schritt besteht in der weiteren Separation mittels Pyrolyse oder mechanischer Aufbereitung. Dem können sich pyrometallurgische Verfahren anschließen. Diese sind etabliert, ermöglichen jedoch allein

nur niedrige Rückgewinnungsquoten bei Nickel und Kobalt sowie bei Kupfer. Um auch Lithium rückzugewinnen zu können, bedarf es außerdem des Einsatzes eines hydrometallurgischen Verfahrens. Einige Möglichkeiten zur Kombination der genannten Recyclingverfahren sind in Abbildung 16 dargestellt.

Unabhängig davon wird des Weiteren an Verfahren zur Rückgewinnung vollständiger Materialzusammensetzungen, zum Beispiel NMC611, gearbeitet (auch als »Direktes Recycling« bezeichnet). Dem wird eine sehr hohe Verfahrenseffizienz zugeschrieben (Gaines, 2021), (Edström, 2022). Ob »Direktes Recycling« allerdings für Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus im Fahrzeug praxisrelevant ist, muss sich erst noch erweisen. Denn einerseits werden Batteriezellen mit hoher Geschwindigkeit weiterentwickelt, sodass an heutigen Materialzusammensetzungen unter Umständen schon in absehbarer Zeit kein Bedarf mehr besteht. Andererseits ist davon auszugehen, dass die Qualität einer durch »Direktes Recycling« rückgewonnenen Materialzusammensetzung der Kathode, bedingt etwa durch Alterungsprozesse und Verunreinigungen, für die Herstellung neuer Batteriezellen nicht ausreichend ist. Ein möglicher Anwendungsfall für das »Direkte Recycling«

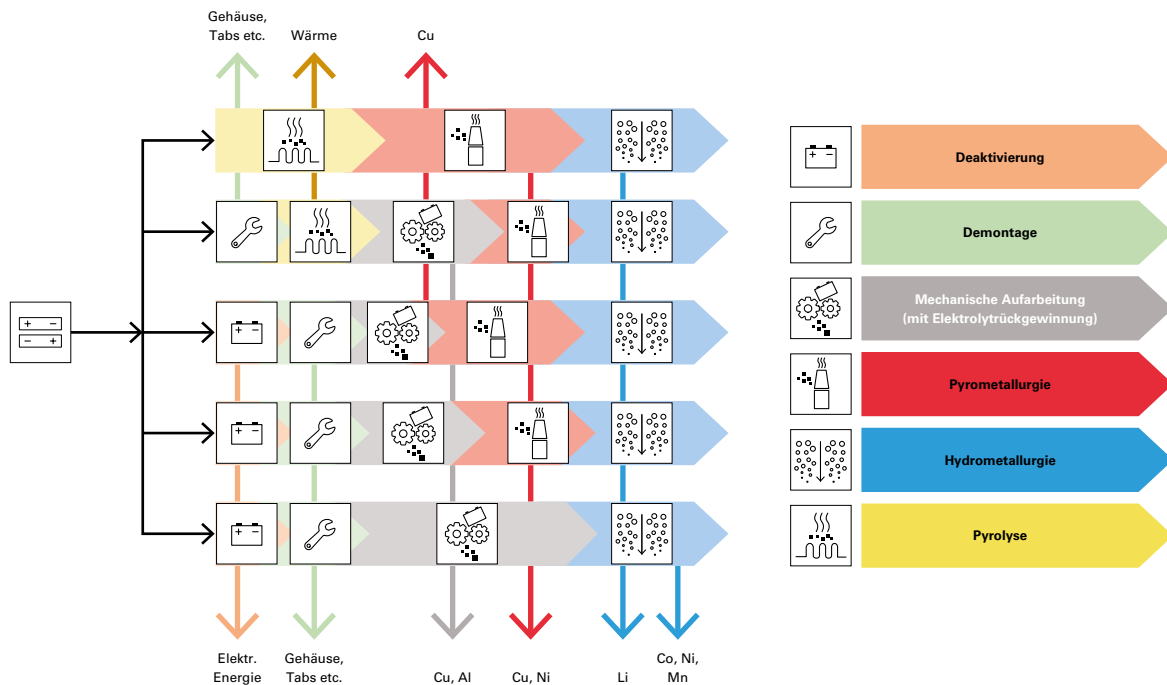
kann allerdings sortenreiner Produktionsausschuss sein (Sojka, 2020), (Hagelücken, 2021).

2.6 Schlussfolgerungen für xEV-Altfahrzeugverwertung und -verbleib im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen

Auf Basis der obenstehenden Ausführungen wird die Fragestellung, wie sich die Altfahrzeugverwertung und der Fahrzeugverbleib von xEV im Vergleich zu Verbrennungsfahrzeugen heute und in Zukunft gestaltet, beantwortet.

Technisch gesehen unterscheidet sich die Verwertung von Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang erheblich von der konventioneller Fahrzeuge.

Vor diesem Hintergrund ist zum einen eine geeignete Qualifizierung der Beschäftigten für allgemeine Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen (Qualifikationsstufe 1S) sowie für Arbeiten an Hochvoltssystemen im spannungsfreien Zustand (Qualifikationsstufe 2S) und an unter Spannung stehenden



Quelle: (Dose, 2021), (RWTH, 2021)

Abbildung 16: Schritte und Verfahren für das Recycling von Traktionsbatterien sowie Kombinationsmöglichkeiten

Hochvoltsystemen (Qualifikationsstufe 3S) notwendig (DGUV, 2021). Zum anderen muss die Ausstattung bei Verwertungsbetrieben angepasst werden. Diese Vorkehrungen zu treffen, wird den Unternehmen kurzfristig einen erheblichen Einsatz finanzieller und personeller Mittel abverlangen. Mittel- bis langfristig werden sich die Investitionen jedoch aufgrund des hohen Werts der rückgewonnenen Materialien lohnen (siehe Kapitel 3).

Der Fahrzeugverbleib ist heute generell noch in erheblichem Umfang unbekannt und es muss davon ausgegangen werden, dass ein umfangreicher Export von Altfahrzeugen in Länder außerhalb der Europäischen Union stattfindet.

Dieser Zustand ist in Anbetracht der Abhängigkeit Europas von Rohstoffimporten und des großen möglichen Beitrags recycelter Rohstoffe zur Rohstoffversorgung nicht hinnehmbar. Deswegen wird bereits an den in Kapitel 2.2 aufgezählten Richtlinien einschließlich geeigneter Maßnahmen gearbeitet, sodass davon ausgegangen werden kann, dass zukünftig Altfahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang verhältnismäßig mehr in der Europäischen Union verbleiben, als es bislang bei konventionellen Altfahrzeugen der Fall war.

3.

Ökonomische Aspekte des Recyclings von Traktionsbatterien

Neben der grundsätzlichen Verfügbarkeit von Rohstoffen in ausreichender Menge zur Herstellung von Traktionsbatterien sind in großem Maße ihr Preis und ebenso die mehrheitliche Herkunft der jeweiligen Produzenten und Lieferanten entscheidend für den Erfolg der Branche in Europa.

Dies gilt umso mehr, als derzeit die überwiegende Menge der benötigten Rohstoffe in Ländern anderer Kontinente eingekauft wird. Dort sind des Weiteren die Unternehmen, die für die Versorgung mit einem Rohstoff maßgeblich sind, in hoher Konzentration vertreten. Somit können Entwicklungen allein in diesen Ländern bereits erhebliche Auswirkungen auf den Preis haben, ohne dass Europa hierauf nennenswert Einfluss nehmen könnte. In diesem Kapitel werden Voraussetzungen und Rahmenbedingungen behandelt, durch deren Berücksichtigung eine Verbesserung der beschriebenen Situation mittels Recycling zugunsten Europas gelingen kann.

3.1 Einleitung und Vorgehensweise

Durch die Rückgewinnung von Aktivmaterialien aus Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus ist es für Europa gemäß den Ausführungen in den voranstehenden Kapiteln in einem gewissen Umfang möglich, den Bedarf daran vor Ort selbst zu bedienen. Mit Blick auf die Herstellung von Energiespeichern entsteht hierdurch jedoch nur dann ein Mehrwert, wenn sich zurückgewonnenes Material wieder in Traktionsbatterien einsetzen lässt. Die Erfüllung dieses Kriteriums mittels der verschiedenen Recyclingverfahren wird im Rahmen dieses Kapitels behandelt. Des Weiteren spielt eine Rolle, wie die Kosten für die Rückgewinnung eines Materials im Verhältnis zu dessen Preis stehen. Schließlich werden eventuelle Auswirkungen der Recyclingverfahren auf die Umwelt beleuchtet und, um Vergleiche anstellen zu können, ihre Emissionen

denen der Förderung des Primärrohstoffs gegenübergestellt. Nach der Beschreibung der Qualität, in der aus Traktionsbatterien zurückgewonnene Materialien vorliegen, werden die Kosten für die Anwendung der Recyclingverfahren Pyro- und Hydrometallurgie dargelegt. Dabei wird auf die diversen Posten eingegangen, die zu den Kosten beitragen. Ebenfalls wird aufgezeigt, wie sich die für heute ermittelten Werte perspektivisch bedingt durch unterschiedliche Einflüsse entwickeln. Anschließend erfolgt für Lithium, Nickel, Mangan, Kobalt und Graphit jeweils zunächst eine Betrachtung des Verlaufs des Preises für den Primärrohstoff in den zurückliegenden Jahren. Dem wird mit derselben Einheit auf Grundlage der ermittelten Kosten für Pyro- und Hydrometallurgie der Preis für das rückgewonnene Material gegenübergestellt. Auf Basis eines Vergleichs der Preise für den Primärrohstoff und das zurückgewonnene Material wird eine Bewertung der Konkurrenzfähigkeit des Recyclings sowie in diesem Zusammenhang bereits geltender oder empfehlenswerter Vorgaben vorgenommen.

Darüber hinaus erfolgt eine Einschätzung der weiteren Entwicklung des Preises für das Material, etwa infolge der angekündigten Verstärkung der Ausbeutung eines bereits laufenden Rohstoffbetriebs oder durch die Entwicklung neuer Minen. Auch potenzielle Auswirkungen des Recyclings auf die Preisentwicklung werden behandelt. Schließlich wird jeweils für Lithium, Nickel, Mangan, Kobalt und Graphit untersucht, wie sich die Abhängigkeit von der Versorgung aus Ländern außerhalb Europas darstellt, ob diese Abhängigkeit durch Recycling von Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus beeinflusst werden kann und welche Rolle die Kosten der Recyclingverfahren spielen.

3.2 Qualität recycelter Materialien und Kosten der Verfahren

Eine Voraussetzung für sowohl qualitativ hochwertig als auch wirtschaftlich attraktiv aus Traktionsbatterien recycelte Materialien ist, dass die Batteriezellen aus den Energiespeichern effizient und automatisiert demontiert und entnommen werden können.

Dem steht perspektivisch noch entgegen, dass die Traktionsbatterien unterschiedlicher Fahrzeuge unterschiedlich aufgebaut sind. Deswegen ist die Automatisierung der Demontage bislang nicht möglich. Um die Demontage automatisieren zu können, ist es erforderlich, dass die Traktionsbatterien unterschiedlicher Fahrzeuge im Vergleich zu heute ähnlicher zueinander sowie besser zugänglich aufgebaut und mit einfacher lösbaren Verbindungen versehen werden (RWTH, 2021). Im Anschluss an die Demontage sind weitere Verfahren zur Rückgewinnung der Materialien aus Traktionsbatterien anzuwenden.

In Kapitel 2.5 sind mit Pyro- und Hydrometallurgie die beiden heute vielversprechendsten Verfahren zum Recycling von Traktionsbatterien genannt, die mindestens mittelfristig noch dem »Direkten Recycling« vorzuziehen sind. Je nach Zielstellung werden sie bei Bedarf miteinander kombiniert und um eine pyrolytische oder mechanische Vorbehandlung oder beides ergänzt. Von den Aktivmaterialien der Energiespeicher werden heute Lithium, Nickel und Kobalt getrennt voneinander zurückgewonnen. In den weiteren Betrachtungen liegen sie der Annahme nach als Rezyklate und somit in vergleichbarer Qualität zu Primärrohstoffen vor. Dies erreichen Recyclingunternehmen heute bereits (Velázquez-Martínez, 2019), (Hagelüken, 2021), teilweise allerdings nicht mit der vollständigen Menge eines Materials in einer Traktionsbatterie und nur im Verbund mit

anderen, auf spezielle Verfahrensschritte spezialisierten Einrichtungen (Handelsblatt, 2022). Eine Rückgewinnung von Mangan und Graphit findet im Moment aus wirtschaftlichen Gründen nicht im industriellen Maßstab statt. Trotzdem werden der Vollständigkeit halber potenzielle Kosten dafür betrachtet.

Anbieter, die heute bereits mit dem Recycling von Traktionsbatterien beauftragt werden können, sind in Abbildung 8 aufgelistet. Von diesen werden es die Hersteller von Batteriezellen einfordern, dass durch den Einsatz rückgewonnener Materialien bei der Fertigung neuer Zellen in keiner Weise technische Parameter beeinträchtigt werden. Vor diesem Hintergrund finden Verfahren zur Rückgewinnung vollständiger Materialzusammensetzungen wegen der noch vergleichsweise geringen Qualität des Ergebnisses und in Anbetracht des schnellen technischen Fortschritts an dieser Stelle keine Berücksichtigung (Sojka, 2020), (Velázquez-Martínez, 2019), (Hagelüken, 2021).

Bei der Ermittlung repräsentativer Werte für die Kosten je Verfahren, auf deren Basis anschließend Angaben zum Preis zurückgewonnener Materialien möglich sind, müssen unterschiedliche Parameter miteinbezogen werden. Diese umfassen Ausgaben für:

- Betrieb, Wartung und Instandhaltung von Anlagen,
- Betriebsstoffe, wie zum Beispiel Strom, Wasser und Erdgas,
- verarbeitete Materialien, wie zum Beispiel Lauge und weitere Hilfsstoffe.

Darüber hinaus sind Beschäftigte zu bezahlen und Mieten, Versicherungsgebühren sowie Steuern zu entrichten. Unter Anwendung von Werten aus dem Jahr 2019 für die genannten Größen wurden Kosten für das Recycling von Traktionsbatterien in Europa mittels Pyrometallurgie in Höhe von rund 19 bis 20 €/kWh und mittels Hydrometallurgie in Höhe von rund 13 bis 14 €/kWh ermittelt (Vekić, 2020), (Lander, 2021). Da seitdem der Strompreis um 60 % und der Verbraucherpreisindex um über 20 % gestiegen sind (BDEW, 2023), (Destatis, 2023), werden für das Jahr 2022 die Kosten für das Recycling von Traktionsbatterien in Europa mittels Pyrometallurgie auf 24 €/kWh und mittels Hydrometallurgie auf 17 €/kWh geschätzt. Es ist davon auszugehen, dass die Kosten nicht mehr im Ausmaß wie zuletzt steigen und dass in Anbetracht der zunehmenden Zuführung von Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus (siehe Kapitel 1.5) auch bei Recyclingbetrieben zur Automobilindustrie vergleichbare Produktivitätssteigerungen in Höhe von rund 2 % pro Jahr erreicht werden (Puls, 2021). Die auf dieser Basis folgenden sowie die derzeitigen Kosten für das Recycling von Traktionsbatterien sind in Abbildung 18 aufgeführt.

Bei der Pyrometallurgie sind für Betriebsstoffe wie Strom und Erdgas und bei der Hydrometallurgie für Lauge und weitere verarbeitete Materialien hohe Ausgaben zu leisten. Bei beiden Verfahren entfällt der größte Teil der Kosten jeweils auf Betrieb, Wartung und Instandhaltung von Anlagen. Gegenüber anderen Kontinenten sind in Europa insbesondere die Lohnkosten sehr

hoch. Darüber hinaus schlägt neben Energie und Personal die Logistik stark zu Buche. Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus müssen gesammelt und zur Weiterverarbeitung transportiert werden – dabei sind hohe Brandschutzaufgaben einzuhalten. In der Folge erhöhen sich die in Abbildung 17 aufgeführten Recyclingkosten durch den Transport um weitere 10 bis 30 %. Entsprechend bietet sich die Einrichtung eines engmaschigen Netzes an Sammelstellen und Recyclingwerken an (Lander, 2021), (Berylls, 2022), (Handelsblatt, 2023), (Redwood, 2023).

3.3 Effekte des Recyclings auf Preis und Verfügbarkeit

Auf Basis der im voranstehenden Kapitel ausgewiesenen Kosten für die Rückgewinnung von Aktivmaterialien aus Traktionsbatterien erfolgt an dieser Stelle eine Untersuchung möglicher Auswirkungen des Recyclings auf den Materialpreis. Es wird vorausgesetzt, dass sich mit den zurückgewonnenen Materialien aufgrund ihrer hier angenommenen, vergleichbaren Qualität auch mit Primärrohstoffen vergleichbare Preise erzielen lassen. Diese Annahme wurde einerseits von Expert:innen aus der Industrie geäußert und in der Diskussion mit anderen Branchenexpert:innen bestätigt. Andererseits entspricht die Annahme dem wirtschaftlichen Verhalten von Unternehmen. Denn ein Batteriehersteller würde in Abwesenheit entsprechender regulatorischer Vorgaben für Rezyklat keinen höheren Preis als für Primärrohstoff bezahlen und entsprechend kann

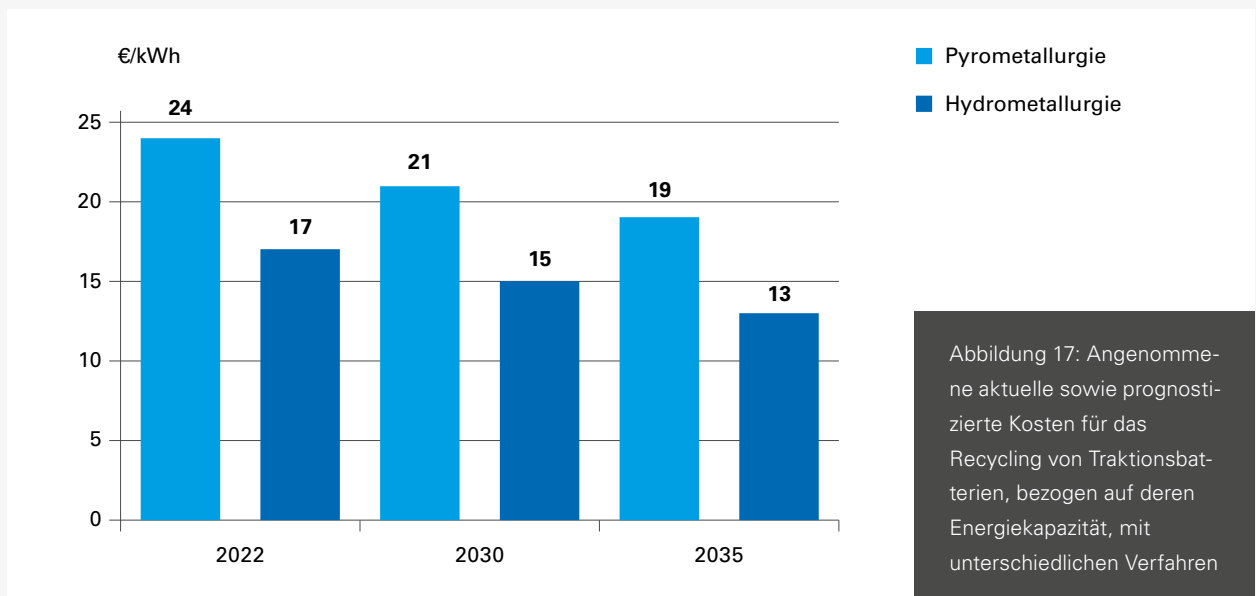


Abbildung 17: Angenommene aktuelle sowie prognostizierte Kosten für das Recycling von Traktionsbatterien, bezogen auf deren Energiekapazität, mit unterschiedlichen Verfahren

Quelle: (Fraunhofer IAO, eigene Darstellung, Daten aus (Vekić, 2020), (Lander, 2021), (BDEW, 2023)(Destatis, 2023), (Puls, 2021))

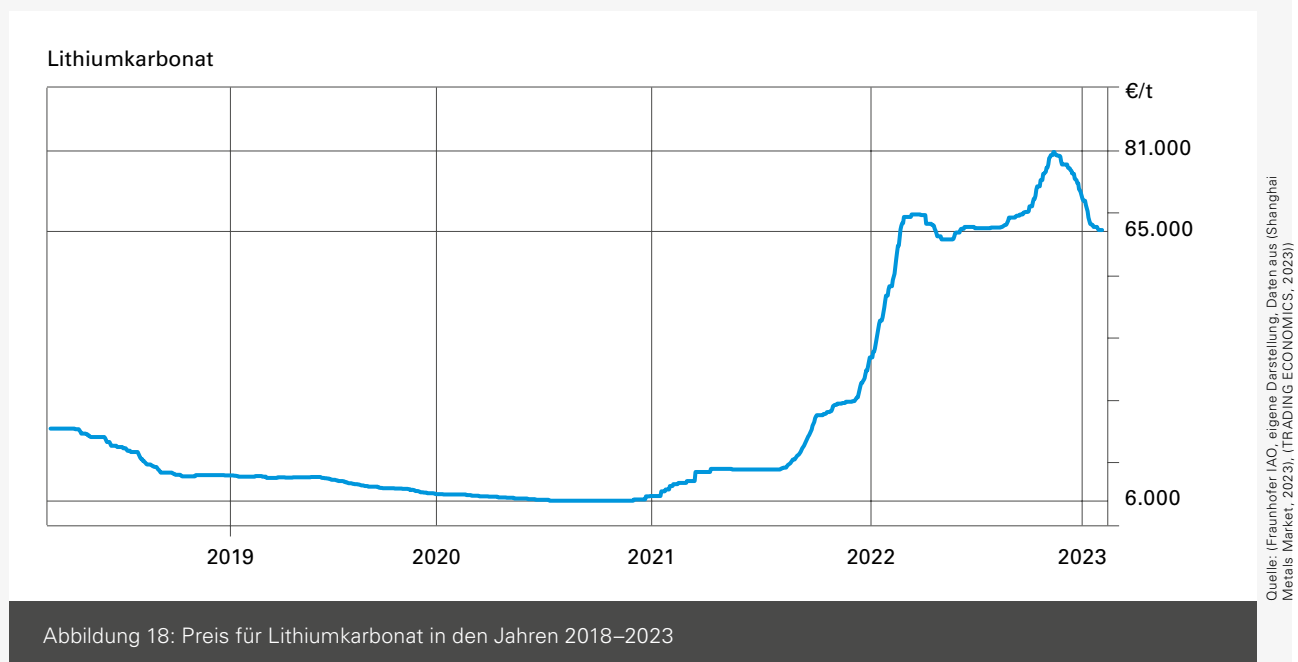
ein Recyclingunternehmen für Rezyklat trotz der hohen damit verbundenen Kosten (siehe Kapitel 3.2) keinen höheren Preis als für Primärrohstoff verlangen. Der Preis stellt einen erheblichen Faktor bei der Beurteilung des Risikos, das Material beziehen zu können, dar. Daher werden im Folgenden auch Potenziale des Recyclings zur Verbesserung der Versorgungslage behandelt. Der Fokus liegt auf Lithium, Nickel, Mangan, Kobalt und Graphit, da deren Verfügbarkeit für europäische Unternehmen im Vergleich zu anderen Materialien eingeschränkt ist (siehe Kapitel 1.4).

3.3.1 Lithium

Nachdem der Preis für das Batterievorprodukt Lithiumkarbonat aufgrund einer nur schwach wachsenden Nachfrage bei einem gleichzeitig erheblich vergrößerten Angebot in den Jahren 2019 und 2020 auf lediglich rund 6.000 €/t gesunken war, ist der Preis im Jahr 2021 stark auf über 80.000 €/t gestiegen. Zuletzt ist er wieder etwas auf rund 65.000 €/t gesunken (siehe Abbildung 18). Dies lässt sich einerseits auf ein außerordentliches Wachstum der Nachfrage nach Lithium für Traktionsbatterien zurückführen. Andererseits trägt zu dem Anstieg bei, dass Prognosen eine perspektivisch geringe Versorgung, insbesondere mit Primärrohstoff, zur Bedienung des entstehenden Bedarfs voraussagen (DERA, 2023), (Shanghai Metals Market, 2023), (TRADING ECONOMICS, 2023). Zwar erwarten auch

Branchenexpert:innen insbesondere in den bevorstehenden Jahren erneut einen Preisanstieg, weil die Automobilhersteller in Europa ihren CO₂-Flottengrenzwert bis zum Jahr 2025 um 15 % gegenüber dem Jahr 2021 reduzieren müssen, entsprechend viele Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang absetzen möchten und somit einen sehr starken Anstieg der Nachfrage nach Lithium verursachen (Europäische Union, 2021). Bis Mitte des nächsten Jahrzehnts ist allerdings ein Rückgang des Preises für Lithiumkarbonat auf rund 20.000 €/t prognostiziert (Berylls, 2022). Dies lässt sich hauptsächlich durch das in diesem Zeitraum stark zunehmende Angebot (siehe Kapitel 1.4 und 1.5) bei geringerem Materialeinsatz pro kWh (siehe Kapitel 1.3) erklären. Die Prognose des Preises ist in Kapitel 3.3.6 in Abbildung 23 dargestellt.

Ein hoher Preis für Lithiumkarbonat ist vorteilhaft für die Unternehmen, die dessen Rückgewinnung anbieten. Als Verfahren hierfür kommt ausschließlich die Hydrometallurgie in Frage (siehe Kapitel 2.5). Deren Kosten bezogen auf die Energiekapazität der recycelten Traktionsbatterie sind zwar geringer als bei der Pyrometallurgie (siehe Abbildung 17), allerdings wird aufgrund des hohen mit dem Verfahren verbundenen Aufwands mit dem Recycling von Lithium erst jetzt begonnen (DERA, 2022a). Wird eine vollständige Rückgewinnung der aktuell pro kWh eingesetzten 105 g Lithium angenommen (siehe Tabelle 1 in Kapitel 1.3), ergibt sich für recyceltes Li-



thiumkarbonat bei den derzeitigen Kosten in Höhe von 17 €/kWh (siehe Abbildung 17) trotzdem ein zum Primärrohstoff nicht konkurrenzfähiger Preis in Höhe von rund 162.000 €/t. Diese Erkenntnis stimmt überein mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen (Lander, 2021).

Wenn zu Beginn des nächsten Jahrzehnts viele Traktionsbatterien mit den aktuell pro kWh eingesetzten 105 g Lithium das Ende ihres Lebenszyklus erreichen (siehe Kapitel 1.5), sollen die Kosten für ihr Recycling der Annahme nach auf 13 €/kWh gefallen sein (siehe Abbildung 17). Dennoch ergibt sich dann immer noch ein Preis in Höhe von rund 124.000 €/t für recyceltes Lithiumkarbonat. Der Primärrohstoff kostet gemäß Abbildung 18 derzeit lediglich knapp halb so viel und wird in Anbetracht der bereits gestarteten Aktivitäten zur Vergrößerung des Angebots aller Voraussicht nach perspektivisch noch günstiger (DERA, 2023). Die Ergebnisse der oben beschriebenen Berechnungen unter der Annahme einer vollständigen Rückgewinnung des aktuell pro kWh eingesetzten Lithiums sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Es ist zu berücksichtigen, dass aktuell die Rückgewinnung von rund 50 % gelingt (Handelsblatt, 2022). In der Europäischen Union sollen bis zum Jahr 2031 durch Recycling lediglich 80 % des eingesetzten Lithiums zurückgewonnen werden (siehe Kapitel 1.5) (Rat der EU, 2023b). Vor diesem Hintergrund wird das Recycling von Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus keine Auswirkungen auf den Preis für Lithium haben.

Hinsichtlich des Einflusses von rückgewonnenem Lithiumkarbonat auf die Verfügbarkeit des Materials wurde in Kapitel 1 aufgezeigt, dass sich der Bedarf an Lithium in Europa, je nach Betrachtung der vor Ort benötigten oder zur Produktion angekündigten Energiekapazität, im Jahr 2030 zu rund 10 bis 20 % und im Jahr 2035 zu rund 10 bis 30 % mittels Rezyklat decken lässt.

Diese Erkenntnis stimmt überein mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen (KU Leuven, 2022), (DERA, 2023). Gleichzeitig wird die oben genannte Vergrößerung des Angebotes an Primärrohstoff, die hauptsächlich in Europa selbst sowie in gegenüber Europa kooperativ eingestellten, politisch stabilen Ländern wie Australien (DERA, 2023) stattfindet, dazu führen, dass die Versorgung mit dem Material stets gesichert ist. Generell wird die in Publikationen prognostizierte Situation, dass der weltweit entstehende Bedarf an Lithium nicht allein durch Primärrohstoff gedeckt werden könnte, in Anbetracht der verfügbaren Lithiumreserven und der Gesetze der Marktwirtschaft nicht eintreten (USGS, 2022), (DERA, 2023).

Vor diesem Hintergrund hat das Recycling von Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus nur marginale Auswirkungen auf die Verfügbarkeit von Lithium.

Entsprechend ist an dieser Stelle in Anbetracht der hohen Kosten der Materialrückgewinnung die Bedeutung des Anteils an recyceltem Material, den neu hergestellte Batterien demnächst in der Europäischen Union enthalten müssen, zu betonen (Rat der EU, 2023b).

Ohne diese Vorschrift gäbe es keine ökonomische Motivation für die Rückgewinnung von Lithium aus Traktionsbatterien in Europa.

Verfahren	Aktuelle Verfahrenskosten	Perspektivische Verfahrenskosten im Jahr 2035
Hydrometallurgie – aktuell 17 €/kWh, perspektivisch 13 €/kWh	162.000 €/t	124.000 €/t

Tabelle 3: Preis für vollständig (zu 100 %) zurückgewonnenes Lithiumkarbonat bei der heute pro kWh eingesetzten Menge (siehe Tabelle 1)

Quelle: Fraunhofer IAO

3.3.2 Nickel

Der Preis für Nickelmetall, aus dem das Batterievorprodukt Nickelsulfat gewonnen wird, schwankte in den zurückliegenden Jahrzehnten erheblich und lag noch vor nicht allzu langer Zeit bei lediglich rund 10.000 €/t. In der zweiten Hälfte des Jahres 2019 führte ein in Indonesien in Aussicht stehendes Exportverbot für Nickelerze nahezu zu einer Verdopplung des Preises. Indonesien in Südostasien ist weltweit die wichtigste Quelle für Nickel (siehe Abbildung 5). Mit dem Nachfragerückgang zu Beginn der Coronapandemie sank der Nickelpreis Anfang des Jahres 2020 kurzfristig. Seitdem stieg er fast kontinuierlich an. Gründe hierfür waren zunächst Produktionsausfälle und eine erhöhte Nachfrage. Hauptsächlich ausgelöst durch den Krieg in der Ukraine beschleunigte sich der Preisanstieg zu Beginn des Jahres 2022 erheblich, da Russland ebenfalls eine wichtige Quelle für Nickel ist. Nach einem anschließenden deutlichen Rückgang bewegte sich der Preis in der jüngeren Vergangenheit auf einem vergleichsweise hohen Niveau oberhalb von 30.000 €/t (DERA, 2022c). Die beschriebenen Entwicklungen des Preises für Nickelmetall sind in Abbildung 19 dargestellt. Bis Mitte des nächsten Jahrzehnts ist ein weiterer Anstieg des Preises auf rund 36.000 €/t prognostiziert (Berylls, 2022). Dies lässt sich dadurch erklären, dass zusammen mit dem Angebot (siehe Kapitel 1.4 und 1.5) auch die Nachfrage etwa durch die Erhöhung des Anteils von Nickel in Traktions-

batterien (siehe Kapitel 1.3), aber auch in weiteren Branchen neben der Automobilindustrie zunimmt (DERA, 2022c). Die Prognose des Preises ist in Abbildung 23 dargestellt. Nickel lässt sich sowohl mittels Pyro- als auch mittels Hydrometallurgie zurückgewinnen (siehe Kapitel 2.5). Wird eine Rückgewinnung der aktuell pro kWh eingesetzten 605 g Nickel und eine derzeit noch verbreitete, aber bereits als niedrig einzuschätzende Effizienz in Höhe von 90 % angenommen, ergibt sich für recyceltes Nickel je nach eingesetztem Verfahren bereits bei den momentanen Kosten ein konkurrenzfähiger Preis in Höhe von rund 31.000 bis 44.000 €/t und bei den für das Jahr 2035 prognostizierten Kosten ein Preis in Höhe von rund 23.000 bis 35.000 €/t (siehe Tabelle 4). Allerdings kommt aktuell die weit überwiegende Mehrheit des weltweit produzierten Nickels bei der Herstellung nichtrostender Stähle zum Einsatz. Dort sind das Recycling und die Wiederverwendung rückgewonnener Materialien schon seit sehr vielen Jahren etabliert und bei der Preisbildung berücksichtigt (DERA, 2022c).

Von daher wird es bei der Betrachtung von Auswirkungen auf Preise auch dann keine Rolle spielen, aus welchen Quellen rückgewonnenes Nickel stammt, wenn Traktionsbatterien in größerer Zahl dem Recycling zugeführt werden.



Verfahren	Aktuelle Verfahrenskosten	Perspektivische Verfahrenskosten im Jahr 2035
Pyrometallurgie – aktuell 24 €/kWh, perspektivisch 19 €/kWh	44.000 €/t	35.000 €/t
Hydrometallurgie – aktuell 17 €/kWh, perspektivisch 13 €/kWh	31.000 €/t	23.000 €/t

Tabelle 4: Preis für zu 90 % zurückgewonnenes Nickel bei der heute pro kWh eingesetzten Menge (siehe Tabelle 1)

Quelle: Fraunhofer IAO

Die Nachfrage nach Nickel wird auch weiterhin mit unverminderter Geschwindigkeit wachsen. Dies ist schon am Bedarf zu erkennen, der mit der Verbreitung von Traktionsbatterien einhergeht. Nichtrostende Stähle werden allerdings das dominierende Anwendungsfeld für das Material bleiben. Rückgewonnenes Nickel wird bei der Versorgung in gleichem Maße wie bereits heute eine sehr wichtige Rolle spielen. Um jedoch sinkende Preise zu erreichen, ist es erforderlich, dass insbesondere die in Indonesien angekündigte Steigerung der Förderung auch in dem großen in Aussicht gestellten Umfang realisiert wird. Das Land ist gegenüber Europa kooperativ eingestellt (DERA, 2022c).

3.3.3 Mangan

Mangan spielt hinsichtlich seines Gewichtsanteils pro kWh heute und perspektivisch eine zu Lithium vergleichbare Rolle (siehe Tabelle 1) und entsprechend wird der Bedarf daran für Traktionsbatterien in den nächsten Jahren zunehmen. Grundsätzlich sind Energiespeicher jedoch nur ein sehr kleiner Einsatzbereich des Materials. Zuletzt wurden für Lithium-Ionen-Batterien etwa 0,2 % des weltweit geförderten Mangans verwendet. Für alle Batterien unabhängig von der Technologie waren es immerhin 3 %. Das mit Abstand wichtigste Anwendungsgebiet für Mangan ist weiterhin die Stahlindustrie, die jüngst mehr als 90 % des verfügbaren Materials verbrauchte. In Traktionsbatterien mit NMC-Kathode wird Mangan in Form von hochreinem Mangansulfat eingesetzt (DERA, 2021a). Dessen Preis in zurückliegenden Jahren ist in Abbildung 20 dargestellt. Bis Mitte des nächsten Jahrzehnts ist ein Anstieg des Preises auf rund 6.000 €/t prognostiziert (Berylls, 2022). Dies lässt sich dadurch erklären, dass zusammen mit dem Angebot (siehe Kapitel 1.4 und 1.5) auch die Nachfrage insbesondere in weiteren Branchen neben der Automobilindustrie zunimmt (DERA, 2021b). Die Prognose des Preises ist in Abbildung 23

dargestellt. Eine Rückgewinnung von Mangan aus Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus müsste mittels Hydrometallurgie erfolgen (siehe Kapitel 2.5). Dies ist jedoch in Anbetracht von Kosten über 100.000 €/t für rückgewonnenes Material (160.000 €/t im Jahr 2023 und 123.000 €/t im Jahr 2035) bei dem in Abbildung 20 genannten Preis in Höhe von weniger als 1.000 €/t und auch bei dem für das Jahr 2035 prognostizierten Preis in Höhe von rund 6.000 €/t (Berylls, 2022) für den Primärrohstoff in keiner Weise attraktiv und kommt deswegen auch nicht zum Einsatz. Entsprechend hat das Recycling von Traktionsbatterien keinen Effekt auf den Preis für Mangan.

Weltweit ist Mangan in sehr großer Menge verfügbar. Aktuell belaufen sich die Reserven auf mehr als 1,5 Milliarden t. Gefördert wurden in den zurückliegenden Jahren jeweils im Durchschnitt lediglich rund 20 Millionen t. Von Australien abgesehen sind aber mit Südafrika, Brasilien und Gabun die wichtigsten Abbauländer derzeit nicht uneingeschränkt kooperativ gegenüber Europa eingestellt. Des Weiteren findet die Weiterverarbeitung von Mangan zum Batterievorprodukt Mangansulfat zum weit überwiegenden Teil in China statt. Außerdem ist davon auszugehen, dass auch in Zukunft die Stahlindustrie sehr große Mengen des Materials beanspruchen wird (DERA, 2021a), (DERA, 2021b), (USGS, 2022).

Vor diesem Hintergrund kann die Rückgewinnung von Mangan perspektivisch einen Beitrag dazu leisten, dass das Material auch weiterhin uneingeschränkt für die Herstellung von Traktionsbatterien verfügbar ist.

Mangansulfat

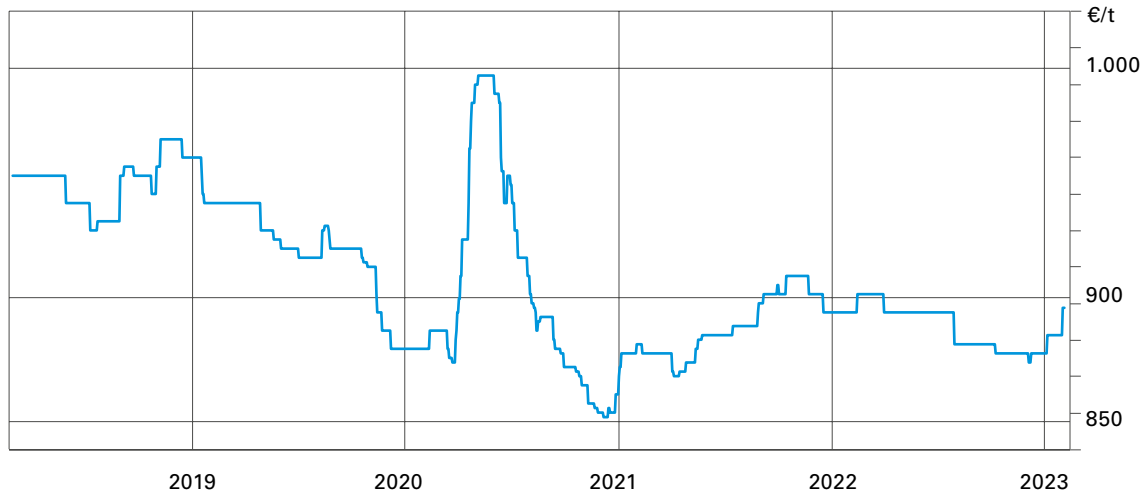


Abbildung 20: Preis für Mangansulfat in den Jahren 2018–2023

Quelle: Fraunhofer IAO, eigene Darstellung, Daten aus Fastmarkets, 2023; (Shanghai Metals Market, 2023)

Zur Überwindung der Hürde der sehr hohen Kosten des Recyclings könnte ähnlich wie bei Lithium ein vorgeschriebener Anteil von Mangan, der in Europa zukünftig als Rezyklat in Traktionsbatterien enthalten sein muss, in Erwägung gezogen werden (siehe Abbildung 8).

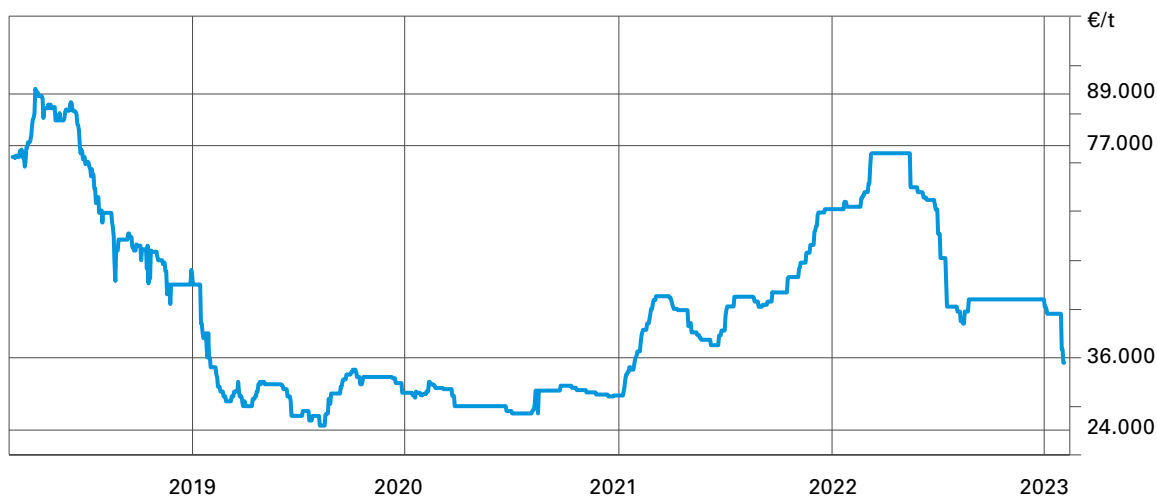
3.3.4 Kobalt

Der Preis für Kobalt schwankte in den zurückliegenden Jahrzehnten ähnlich wie bei Nickel, als dessen Beiprodukt Kobalt hauptsächlich gewonnen wird, sehr stark. Dies ist in Abbildung 21 für das Batterievorprodukt Kobaltsulfat dargestellt. Das mit Abstand wichtigste Anwendungsfeld von Kobalt sind Energiespeicher generell. In naher Zukunft werden Traktionsbatterien den größten Teil der Nachfrage generieren. Veranlasst durch die zunehmende Verbreitung von Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang stieg der Preis für Kobalt seit dem Jahr 2015 auf fast 90.000 €/t, um mit einer Vergrößerung des Angebots in Anbetracht des hohen Preises sowie dem Rückgang der Nachfrage während der Coronapandemie wieder deutlich zu sinken und ausgelöst durch den Einmarsch Russlands in die Ukraine erneut zu steigen. Nach einem anschließenden deutlichen Rückgang bewegte sich der Preis in der jüngeren Vergangenheit auf einem vergleichsweise hohen Niveau unterhalb von 36.000 €/t (DERA, 2018), (DERA, 2021a). Bis Mitte des nächsten Jahrzehnts ist allerdings ein Rückgang des Preises

für Kobalt auf rund 33.000 €/t prognostiziert (Berylls, 2022). Dies lässt sich hauptsächlich durch den in diesem Zeitraum zurückgehenden Materialeinsatz pro kWh erklären (siehe Kapitel 1.3). Die Prognose des Preises ist in Abbildung 23 dargestellt.

Die Rückgewinnung von Kobalt mittels Pyro- und Hydrometallurgie ist bereits im industriellen Einsatz etabliert. Deswegen werden mit dem Preis für den Primärrohstoff vergleichbare Kosten des Recyclings angenommen (siehe Abbildung 23). Das Kobalt stammt momentan noch mehrheitlich aus verbrauchten Katalysatoren, kobalthaltigen Schrotten, Legierungen, Magneten, Hartmetallen und Energiespeichern außer Traktionsbatterien. Schätzungen zufolge wurden zuletzt weltweit rund 10.000 t des Materials zurückgewonnen. In Anbetracht einer Nachfrage im Umfang von insgesamt rund 110.000 t zur selben Zeit ist ein Effekt des rückgewonnenen Kobalts auf den Preis nicht anzunehmen (DERA, 2018), (USGS, 2022). Dies kann sich mit Blick auf Traktionsbatterien und die Situation in Europa ändern. Dort sind ab dem Ende des Jahrzehnts große Mengen zurückgewonnenen Kobalts prognostiziert (siehe Abbildung 9 in Kapitel 1.5) und der Anteil von Kobalt an den Aktivmaterialien wird durch die Einführung neuer Materialzusammensetzungen reduziert werden (siehe Kapitel 1.3).

Kobaltsulfat



Quelle: Fraunhofer IAO, eigene Darstellung, Daten aus (Shanghai Metals Market, 2023); (TRADING ECONOMICS, 2023)

Abbildung 21: Preis für Kobaltsulfat in den Jahren 2018–2023

Wegen der daraus folgenden Vergrößerung des Angebots bei zurückgehender Nachfrage ist durch das Recycling von Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus mit einem positiven Effekt auf den Preis von Kobalt zu rechnen.

Hierzu wird auch der demnächst in der Europäischen Union vorgeschriebene Anteil rückgewonnenen Kobalts in Traktionsbatterien beitragen (siehe Kapitel 1.5).

Die mit Abstand größten Kobaltvorkommen befinden sich in Afrika in der Demokratischen Republik Kongo. Des Weiteren hat China seine Weiterverarbeitungskapazitäten in den zurückliegenden Jahren weiter ausgebaut. Das Land dominiert insbesondere die Raffinadeproduktion von Kobaltchemikalien wie dem Batterievorprodukt Kobaltsulfat. Zwar hat auch Europa seine Weiterverarbeitungskapazitäten neu strukturiert und wird diese weiter ausbauen, um vor allem die europäische Nachfrage in Zukunft besser bedienen zu können. Dies ändert aber nichts daran, dass die Demokratische Republik Kongo auch in den kommenden Jahren der mit Abstand größte Kobaltproduzent bleiben wird. Vor diesem Hintergrund ist die Bedeutung der Rückgewinnung von Kobalt mittels Recycling von Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus zu betonen. Die dadurch vergrößerte Unabhängigkeit von Lieferanten außerhalb der Europäischen Union kann perspektivisch auch als Hebel dazu

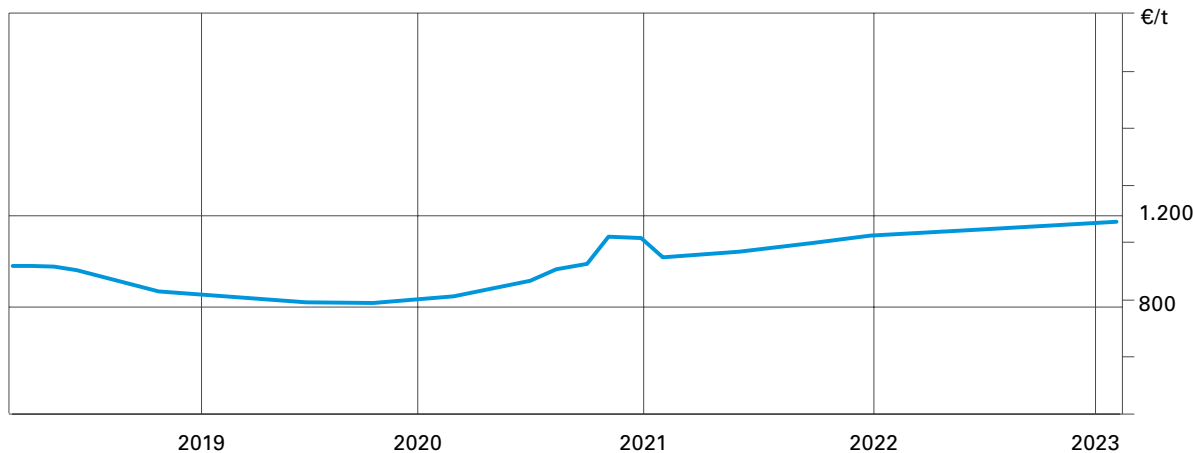
genutzt werden, auf eine Verbesserung von Arbeitsbedingungen bei der Bergwerksförderung hinzuwirken (DERA, 2018), (DERA, 2021a).

3.3.5 Graphit

In Traktionsbatterien wird seitens der Anode sowohl natürlicher als auch synthetischer Graphit verwendet. Ebenfalls verbreitet ist der Mix beider Graphittypen. Synthetischer Graphit zeichnet sich durch bessere Materialeigenschaften wie Homogenität, Reinheit und einheitliche Qualität aus. Natürlicher Graphit, der in Form von Flockengraphit und in der erforderlichen Qualität zum Einsatz kommen muss, kostet zwar in der Regel um den Faktor zwei bis drei weniger als synthetischer Graphit. Da es aber erforderlich ist, ihn durch eine Reihe von kostenintensiven Prozessschritten zu batterietauglichem Spherical Graphite aufzuarbeiten, unterscheiden sich die Preise letztendlich nur unerheblich. Über alle Marktsegmente für Lithium-Ionen-Batterien gemittelt ist davon auszugehen, dass natürlicher und synthetischer Graphit aktuell in einem Verhältnis von 40 : 60 zur Anwendung kommen (DERA, 2021a), (DERA, 2021c).

Auf den Preis für Graphit hat China als wichtigstes Abbau- und bedeutender Exporteur vieler Graphitspezifikationen signifikanten Einfluss. Nach einer Niedrigpreisphase durch Überkapazitäten und die Überversorgung des Marktes ließ eine

Flockengraphit, +80 mesh*



*»+80 mesh« ist die Kategorie des Flockengraphits und beschreibt die Flockengröße. Das Konzentrat des Flockengraphits der Kategorie »+80 mesh« zeichnet sich durch einen hohen Kohlenstoffgehalt aus und eignet sich daher gut für Lithium-Ionen-Batterien.

Quelle: Fraunhofer IAO, eigene Darstellung, Daten aus (DERA, 2021c), (Fastmarkets, 2023)

Abbildung 22: Preis für Flockengraphit in den Jahren 2018–2023

verstärkte Nachfrage von Batterieherstellern den Preis für Flockengraphit im Jahr 2018 wieder ansteigen. Nach einem erneuten Rückgang steigt der Preis seit Ende des Jahres 2020 wieder leicht. Stark gestiegene Frachtkosten bei gleichzeitigen Lieferverzögerungen aufgrund der pandemiebedingten anhaltenden Knappheit von Containerkapazitäten hielten Handelnde zuletzt vom Bezug von Flockengraphit ab und dämpften so eine weitere Preissteigerung (DERA, 2021c). Die Entwicklung des Preises für Flockengraphit ist in Abbildung 22 dargestellt. Es wird angenommen, dass der Preis bis Mitte des nächsten Jahrzehnts nahezu unverändert bleibt, da auch in den zurückliegenden Jahren weder wirtschaftliche noch politische Ereignisse einen nennenswerten Einfluss hatten. Die Prognose des Preises ist in Abbildung 23 dargestellt.

Aufgrund seiner guten Verfügbarkeit bei relativ niedrigen Preisen ist das Recycling von natürlichem Graphit derzeit von untergeordneter Relevanz.

Der Preis mittels Hydrometallurgie rückgewonnenen Graphits in Höhe von rund 19.000 €/t im Jahr 2023 und 14.000 €/t im Jahr 2035 wäre nicht konkurrenzfähig gegenüber dem Primärrohstoff (siehe Abbildung 23). Von daher hat das Recycling von Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus momentan keinen Effekt auf den Preis von Graphit. Des Weiteren ist heute die Reinheit von zurückgewonnenem Graphit noch gering, so-

dass es nicht für die Herstellung neuer Batteriezellen in Frage kommt. Langfristig ist die Rückgewinnung von Graphit aus Traktionsbatterien aufgrund des relativ hohen Materialeinsatzes jedoch sehr vielversprechend (DERA, 2021c).

Hinsichtlich der zukünftigen Versorgung mit Graphit muss die gesamte Wertschöpfungskette bis hin zur Anodenproduktion betrachtet werden. Dabei fällt auf, dass China schon sehr lange fast die gesamte Lieferkette dominiert und den Markt sowohl für natürliches als auch für synthetisches Graphit bestimmt. So ist das Land aktuell für deutlich mehr als die Hälfte der weltweiten Produktion von Flockengraphit verantwortlich. Diese Situation wird sich auch durch Explorationsbemühungen in Afrika nicht entspannen. Des Weiteren gibt es eine hohe Konzentration der Unternehmen, die Flockengraphit zu batterieauglichem Spherical Graphite aufbereiten und Anoden herstellen, in China (DERA, 2021a), (DERA, 2021c). Vor diesem Hintergrund ist die Bedeutung der Rückgewinnung von Graphit mittels Recycling von Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus ähnlich wie bei Kobalt zu betonen. Zur Überwindung der Hürde der sehr hohen Kosten des Recyclings könnte ähnlich wie bei Lithium ein vorgeschriebener Anteil von Graphit, der in Europa zukünftig als Rezyklat in Traktionsbatterien enthalten sein muss, in Erwägung gezogen werden (siehe Abbildung 9).

3.3.6 Gegenüberstellung der Rohstoffpreise und Rezyklatkosten

In den voranstehenden Kapiteln ist für die Aktivmaterialien Lithium, Nickel, Mangan, Kobalt und Graphit jeweils die Entwicklung des Preises des Primärrohstoffs in der zurückliegenden Zeit bis zum Jahr 2023 veranschaulicht. Außerdem ist prognostiziert, wie sich der Preis in Anbetracht der zu erwartenden Entwicklung von Angebot und Nachfrage bis zur Mitte des nächsten Jahrzehnts voraussichtlich verändern wird. Darüber hinaus sind die Kosten angegeben, die die Rückgewinnung der Materialien in einem geeigneten Recyclingverfahren in den Jahren 2023 und 2035 verursacht bzw. im Fall von Mangan und Graphit verursachen würde. In Abbildung 23 werden die Werte zusammengefasst und einander gegenübergestellt.

3.4 Emissionen der Recyclingverfahren und der Förderung

Das Recycling von Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus dient neben der Verbesserung der Versorgung mit Materialien zwar auch der Verbesserung der Nachhaltigkeit der Energiespeicher. Trotzdem entstehen bei der Anwendung der Verfahren auch Emissionen. Deren Menge hängt teilweise erheblich vom zugrunde gelegten Strommix ab. So wird etwa auf Basis des europäischen Strommixes für die Pyrometallurgie in der Literatur ein Ausstoß von bis zu 89 kg CO₂ eq/kWh recycelter Energiekapazität ermittelt. Wird hingegen der Strommix von Belgien als Land der Europäischen Union mit weniger Emissionen bei der Energieerzeugung zugrunde gelegt, kann der Ausstoß der Pyrometallurgie derzeit auf rund 53 kg CO₂ eq/kWh recycelter Energiekapazität sinken.

Die Differenz der Werte zeigt, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien und deren Einsatz für das Recycling von Traktionsbatterien anzustreben sind (Vekić, 2020) (ANL, 2019), (Kallitsis, 2022).

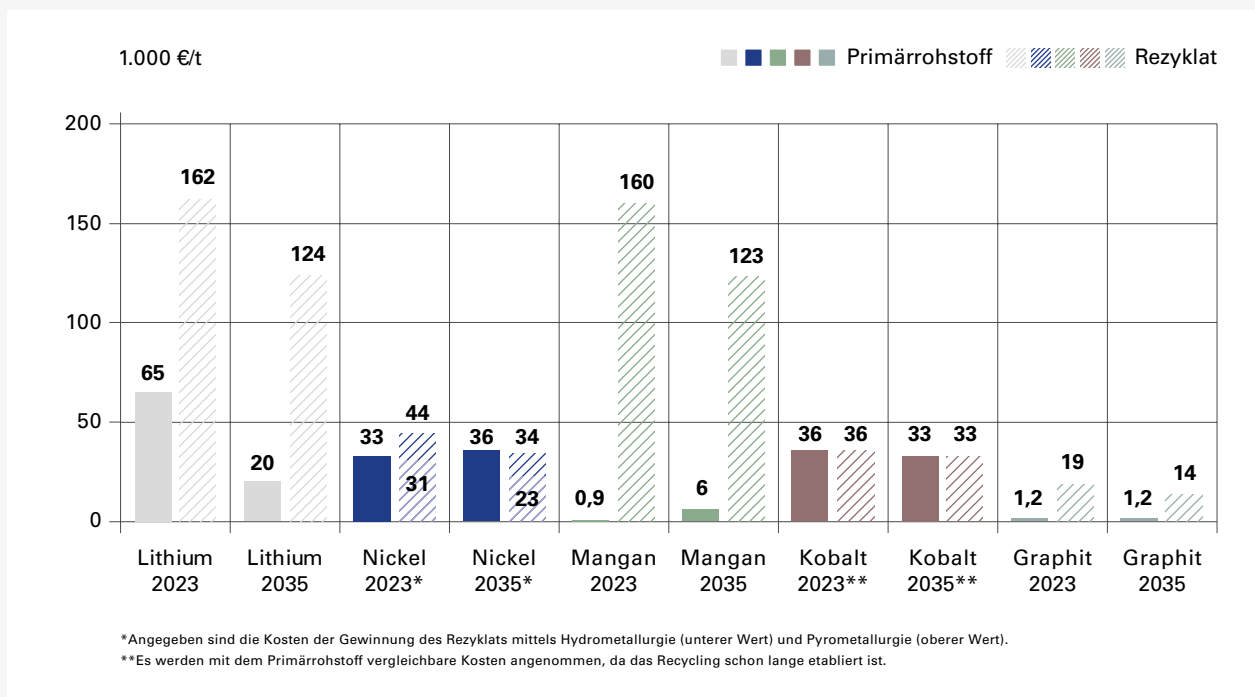


Abbildung 23: Preis des Primärrohstoffs und Kosten des Rezyklats im Jahr 2023 und prognostiziert für das Jahr 2035

Quelle: Fraunhofer IAO, eigene Darstellung

Verfahren	Aktuelle Verfahrenskosten
Recycling mittels Pyrometallurgie	53 bis 89 kg CO ₂ eq/kWh recycelter Energiekapazität
Recycling mittels Hydrometallurgie	43 bis 45 kg CO ₂ eq/kWh recycelter Energiekapazität
Förderung von Primärrohstoffen	61 bis 63 kg CO ₂ eq/kWh erzeugter Energiekapazität

Tabelle 5: Ausstoß von Emissionen beim Recycling von Traktionsbatterien und bei der Förderung von Primärrohstoffen

Quelle: Fraunhofer IAO, Daten aus (ANL, 2019), (Vekić, 2020), (Kallitsis, 2022)

Für die Hydrometallurgie wird in der Literatur ein Ausstoß von Emissionen in Höhe von 43 bis 45 kg CO₂ eq/kWh recycelter Energiekapazität genannt. Obwohl diese Werte deutlich unter denen der Pyrometallurgie liegen, ist zu berücksichtigen, dass bei der Hydrometallurgie neben Energie auch noch zahlreiche Chemikalien zum Einsatz kommen, die zur Vermeidung von Schäden für die Umwelt sorgsam handzuhaben sind. Die Chemikalien umfassen Ammonium- und Natriumhydroxid sowie Salz- und Schwefelsäure. Auch ist die Hydrometallurgie mit einem hohen Wasserverbrauch verbunden (ANL, 2019), (Vekić, 2020), (Kallitsis, 2022). Der Umgang mit den genannten Stoffen ist gut beherrschbar, muss zur Sicherstellung eines nachhaltigen Recyclings jedoch von Anfang an beachtet werden.

Für die Bereitstellung der Primärrohstoffe von Traktionsbatterien sind in der Literatur Emissionen in Höhe von 61 bis 63 kg CO₂ eq/kWh erzeugter Energiekapazität genannt. Alle aufgeführten Werte zu Emissionen sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Bei den Primärrohstoffen ist zu berücksichtigen, dass deren Förderung über die Emissionen hinaus in der Regel erhebliche Eingriffe in die Natur bedeutet und häufig auch mit großen Gefahren für die ausführenden Beschäftigten verbunden ist (Vekić, 2020).

3.5 Schlussfolgerungen für ökonomische Aspekte des Recyclings von Traktionsbatterien

Auf Basis der obenstehenden Ausführungen wird hier die Fragestellung, wie sich ökonomische Aspekte des Recyclings von Traktionsbatterien gestalten, behandelt. Der Stand der Technik erlaubt es Unternehmen oder Verbänden von Unternehmen, von Lithium, Nickel und Kobalt aus Traktionsbatterien jeweils einen Teil in einer mit den Primärrohstoffen vergleichbaren Qualität zurückzugewinnen. Bei Mangan und Graphit ist eine Rückgewinnung in einer für Traktionsbatterien erforderlichen Qualität aus technischer Sicht grundsätzlich ebenfalls möglich, aber sehr aufwendig und noch nicht zufriedenstellend im industriellen Maßstab umgesetzt (DERA, 2021c). Der von Lithium, Nickel und Kobalt in der Regel heute zurückgewonnene Teil reicht von rund 50 % bei Lithium bis 95 % bei Nickel und Kobalt (Velázquez-Martínez, 2019), (DERA, 2022a), (Handelsblatt, 2022). Dies ist allerdings auch mit hohen Kosten verbunden, die bei Nickel und Kobalt im Vergleich zum Primärrohstoff jedoch konkurrenzfähig sind. Entsprechend ist das Recycling von Nickel und Kobalt wirtschaftlich rentabel. Hinzu kommt eine Verringerung der Abhängigkeit von einzelnen Ländern wie Russland im Fall von Nickel und insbesondere von der Demokratischen Republik Kongo im Fall von Kobalt (siehe Abbildung 5).

Bei Lithium ist das Recycling mit so hohen Kosten verbunden, dass das Rezyklat heute deutlich teurer als der Primärrohstoff ist. Dies wird sich auch perspektivisch nicht ändern.

In diesem Fall stellen die in der Europäischen Union geltenden Ziele, die Umwelt zu schützen und zu erhalten und Abhängigkeiten zu reduzieren, die maßgeblichen Triebfedern für die Rückgewinnung des Materials aus Traktionsbatterien dar (Europäische Union, 2009).

Bei Mangan und Graphit ist nicht nur die technische Umsetzung für eine Rückgewinnung noch nicht ausgereift, auch die Kosten würden den Preis der Primärrohstoffe um ein Vielfaches übertreffen.

Gründe hierfür sind auch die seit Langem etablierten Strukturen, in denen die Primärrohstoffe gefördert, raffiniert und vertrieben werden und die ihre Ausbringungsmengen in Anbetracht der absehbar wachsenden Nachfrage nun erhöhen. Dadurch entsteht im Fall von Graphit eine Abhängigkeit ins-

besondere von China, das nicht uneingeschränkt kooperativ gegenüber Europa eingestellt ist (Europäische Union, 2009), (AI, 2021). Zur Verringerung oder Auflösung dieser Abhängigkeit und im Fall von Mangan zum Schutz und Erhalt der Umwelt kann Recycling trotz hoher Kosten einen wertvollen Beitrag leisten, auch wenn der Anlass hierfür zunächst mittels Richtlinien geschaffen werden muss. Es gilt, die Nachhaltigkeit durch die stete Optimierung von Randbedingungen kontinuierlich zu verbessern.

4.

Maßnahmen zur Sicherstellung des Verbleibs möglichst vieler Traktionsbatterie-Rohstoffe im europäischen Wertstoffkreislauf

Im Rahmen dieses Kapitels werden unterschiedliche Ansätze für Maßnahmen behandelt, durch deren Anwendung möglichst viele Traktionsbatterien zur Rückgewinnung ihrer Materialien im europäischen Wertstoffkreislauf verbleiben sollen. Dabei wird zunächst die Notwendigkeit des Erhalts der Materialien im europäischen Kreislauf dargelegt. Anschließend erfolgt die Beschreibung von drei konkreten möglichen Maßnahmen.

4.1 Einleitung und Vorgehensweise

Bei der Schließung von Wertstoffkreisläufen bestehen neben technologischen und ökonomischen Herausforderungen weitere darin, entsprechende Umfänge an recycelbaren Materia-

lien zur Verfügung zu haben, um die Nachfragerücke decken und die Profitabilität des Recyclings verbessern bzw. erreichen zu können (Lander, 2021). Die mittelfristig geringe Menge an verwertbaren Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus offenbart nun eine Diskrepanz in Bezug auf die sich momentan im Aufbau befindenden Recyclingkapazitäten. So wird erwartet, dass die Kapazitäten der Recyclinganlagen in Europa die verfügbare Menge an recycelbarem Material bis zum Jahr 2025 um ein Mehrfaches übersteigen werden (siehe Abbildung 24). Ein Großteil der zur Verfügung stehenden Schrottmengen entstammt dem Produktionsausschuss oder Rückläufern aus anderen Industrien als der Mobilitätswirtschaft, wie zum Beispiel der Unterhaltungselektronik (siehe Kapitel 1.5). Recycling-

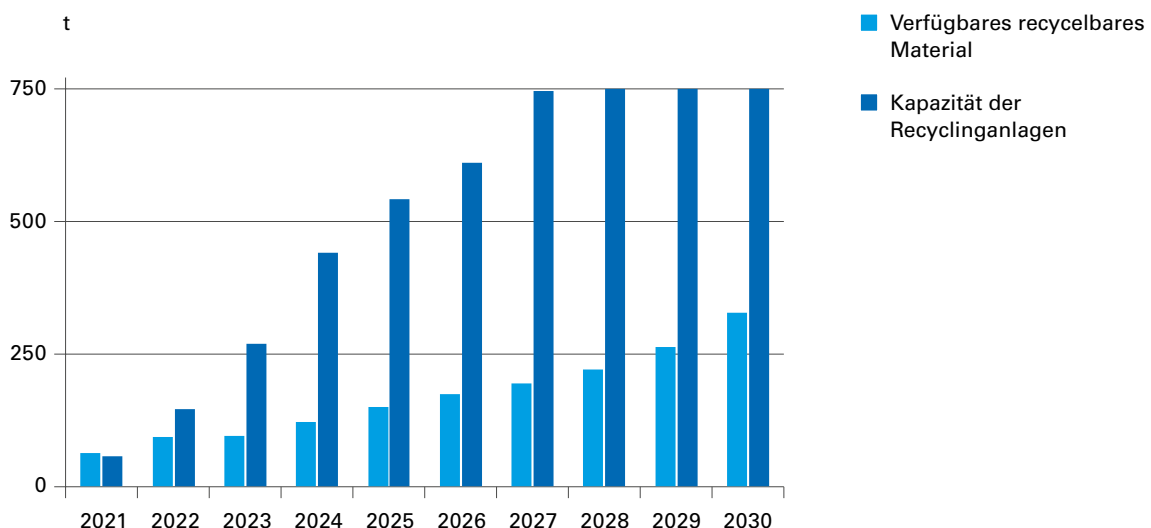


Abbildung 24: Gegenüberstellung prognostizierter recycelbarer Materialien und angekündigter Recyclingkapazitäten

Quelle: (Driftschroer, 2022)

basierte Ansätze können daher langfristig ihr volles Potenzial nur entfalten, wenn die entsprechenden Kreisläufe auch geographisch geschlossen werden und die entsprechenden Traktionsbatterien inklusive ihrer während des Lebenszyklus enthaltenen Rohstoffe auch für das Recycling in Europa verbleiben.

Eine Untersuchung aus dem Jahr 2019 hat ergeben, dass für die erfolgreiche Umsetzung von zirkulären Wertschöpfungsnetzwerken für Traktionsbatterien aus Elektrofahrzeugen an folgenden kritischen Erfolgsfaktoren gearbeitet werden muss (Regett, 2019):

- Die Konstruktion von Batteriezellen und -modulen muss sich dahingehend verändern, dass das Lebensende bereits am Anfang mitberücksichtigt wird (»Design for Disassembly«). Hierbei hilft die Einführung von Mindeststandards.
- Eine ausreichende Kooperation entlang der Batteriewertschöpfungskette zwischen Unternehmen der Automobilbranche und der Energiewirtschaft muss gewährleistet werden, da es einen hohen Bedarf an neuen Partnerschaften und Plattformen gibt, um unternehmensübergreifende datengetriebene Geschäftsmodelle umzusetzen.
- Rücknahmesysteme und entsprechende Anreize müssen etabliert werden, um für ausreichende Mengen Recyclingmaterial zu sorgen.
- Der Erlass geeigneter Vorschriften, wie es demnächst mit der Verordnung über Batterien und Altbatterien geschieht (Europäische Union, 2023), (Rat der EU, 2023b), ist unausweichlich, um höhere Sammel- und Recyclingraten zu erzielen.

Vor diesem Hintergrund ergeben sich drei übergeordnete Maßnahmenbereiche, die in den folgenden Kapiteln ausführlicher vorgestellt werden.

- Verschärfung der juristischen Rahmenbedingungen
- Weitere Standardisierung und Normung
- Attraktivierung durch neue Geschäftsmodelle

4.2 Verschärfungen der juristischen Rahmenbedingungen

In der Europäischen Union ist die Verwertung von Batterien maßgeblich durch die Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik-Altgeräte sowie durch die Richtlinie 2006/66/EG zu Batterien und Akkumulatoren geregelt (BMVU, 2021), (BMVU, 2022b). Das Recycling von Batterien ist in Deutschland konkret durch das Batteriegesetz reguliert. An die Stelle der genannten Vorschriften tritt demnächst die Verordnung über Batterien und Altbatterien (Europäische Union, 2023), (Rat der EU, 2023b). Grundsätzlich liegt den Vorgaben das Prinzip der Extended Producer Responsibility (erweiterte Herstellerverantwortung) zugrunde. Diese erweitert die Verantwortung der Batteriehersteller und -anbieter auf die Entsorgung der Batterien und ihrer Rohstoffe, die etwa auch kostenlos zurückzunehmen sind (Neumann, 2022). Für Traktionsbatterien von Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang gelten die genannten Vorschriften in gleicher Weise (Neumann, 2022).

Gemäß den oben angeführten Richtlinien sind die Mitgliedstaaten der Europäischen Union verpflichtet, Sammelstellen für Altbatterien in der Nähe der Endnutzende einzurichten, wobei die Kosten dafür im Fall von Traktionsbatterien von den Automobilherstellern oder, wenn es sich um Unternehmen von außerhalb der Europäischen Union handelt, den Importeuren zu tragen sind (Neumann, 2022), (Europäische Union, 2023). Zusätzliche Regelungen zur Rückgewinnungsquote, etwa im Kontext des European Green Deal, besagen, dass bis zum Jahr 2031 mindestens 80 % des Lithiums in Altbatterien zurückgewonnen werden muss (siehe Kapitel 1.5) und die Sammelquoten für Gerätealtbatterien langfristig auf 70 % zu steigern sind (BMVU, 2022a), (Neumann, 2022). In der neuen Batterieverordnung der EU ist zudem vorgeschrieben, dass künftig eine Wiederverwertungsquote für Batterien von 90 % erreicht werden muss. Außerdem müssen neu produzierte Batterien perspektivisch einen Mindestanteil von recyceltem Material enthalten und Hersteller müssen die Haltbarkeit und Lebensdauer ihrer Produkte genau berechnen und transparent machen (ADAC, 2022b), (Rat der EU, 2023b). Zu den weiteren Anforderungen gehören ein Batteriepass für Batterien mit einer Kapazität von über 2 kWh sowie Mindestanforderungen an Leistung und Haltbarkeit (Neumann, 2022).

Hinsichtlich des Ziels, mittels Rückgewinnung von Materialien die Verfügbarkeit von Rohstoffen in Europa sicherzustellen, ist die demnächst in Kraft tretende Verordnung über Batterien und Altbatterien allem Anschein nach und gemäß Diskussionen mit Branchenexpert:innen sowohl angemessen anspruchsvoll als auch realistisch umsetzbar.

So motiviert die Verordnung etwa Unternehmen und Behörden dazu, mehr Traktionsbatterien als bislang für das Recycling in Europa zu sammeln, sobald diese das Ende ihres Lebenszyklus im Fahrzeug erreicht haben (siehe Kapitel 2.3). Des Weiteren erhalten die Unternehmen genug Zeit, Recyclingverfahren zu verbessern und so die Ausbeute bei der Rückgewinnung von Materialien weiter zu erhöhen (siehe Kapitel 1.5). Die Vorgabe ambitionierterer Ziele und strengerer Vorschriften wäre in Anbetracht der dafür gegenüber heute erforderlichen organisatorischen und technischen Weiterentwicklung der Politik und der Industrie nicht effizient.

Neben Vorgaben zu den Anteilen verwendeter Recyclingmaterialien in neuen Batterien und der geforderten Transparenz hinsichtlich Lebensdauer und Haltbarkeit ist auch die digitale Kennzeichnung sämtlicher Zellen vorgeschrieben, um deren Nachverfolgbarkeit zu gewährleisten (Schwarzer, 2022). Interessant hierbei ist, dass ein Teilaspekt der Kennzeichnung auch die Erfassung des CO₂-Fußabdrucks über die komplette Wertschöpfungskette ist. Wird zusätzlich zu den Recyclinganteilen eine Obergrenze für den CO₂-Ausstoß über den gesamten Lebenszyklus vorgegeben, kann eine in Norddeutschland mit erneuerbaren Energien produzierte Batteriezelle mit den vorgeschriebenen Anteilen recycelter Rohstoffe attraktiver werden als eine mit dem heute in China üblichen Strommix hergestellte Batteriezelle (Schwarzer, 2022).

Die vorgenannten Maßnahmen zielen insbesondere auf eine Attraktivierung der Batterierückgabe in Europa beziehungsweise Deutschland durch vereinfachte Rückgabemechanismen, zugehörige Verantwortungsprinzipien sowie Zielvorgaben ab. Abseits der generischen Vorgaben des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, der Regulierungen zum Fahrzeugexport sowie der Vereinbarungen des Basler Übereinkommens zur Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle fehlen allerdings Grundlagen und Vorschriften, die den Export gebrauchter Batterien ins außereuropäische Ausland konkret regulieren (siehe Kapitel 2.2, (BAFA, 2023), (Öko-Institut, 2022)). Statistiken bezüglich der Anzahl exportierter Traktionsbatterien am End of Life werden einer-

seits aktuell nicht erhoben. Andererseits können Exporte am End of Life eine ökonomisch attraktivere Variante als ein aufwendiges Recycling in Europa darstellen (vgl. Kapitel 3, (Köllner, 2022)). Neben der fehlenden Rückführung der Rohstoffe in den europäischen Kreislauf resultieren daraus auch Defizite bezüglich der ökologischen Nachhaltigkeit aufgrund einer Endlagerung beziehungsweise fehlenden Recyclingmöglichkeiten in den Zielländern, zum Beispiel auf dem afrikanischen Kontinent (Öko-Institut, 2022). Verbindliche rechtliche Vorgaben wie beispielsweise für die Altfahrzeugverwertung, die sich auch auf spezifische Subsysteme wie die Batterie beziehen, könnten vor diesem Hintergrund dazu beitragen, einen Ausbau und Export von Traktionsbatterien zu verhindern. So schlägt das Öko-Institut (Öko-Institut, 2022) beispielsweise vor:

- den Export auf Batterien zu beschränken, die noch mindestens 80 % ihrer ursprünglichen Energiespeicherkapazität aufweisen,
- die Ausfuhr von Batterien nur zu genehmigen, wenn diese von gleicher Qualität wie neue Batterien sind, die in den Zielländern verfügbar sind, und
- und dass bei gebrauchten Batterien vor einem Export deren Funktionsfähigkeit nachzuweisen ist.

Diese Art der möglichen Regulatorik würde somit unmittelbar die eigentliche Ausfuhr beschränken und damit einen größeren Teil der Altbatterien im Kreislauf halten.

4.3 Weitere Standardisierung und Normung

Zentrale Herausforderungen bei der Rohstoffrückgewinnung aus Traktionsbatterien sind die Aufwände in der Demontage und im eigentlichen Recycling, die eine ökonomische Rückgewinnung gegenüber dem Preis für den Primärrohstoff oder alternative Entsorgungsmöglichkeiten unattraktiv machen können (siehe Kapitel 3).

Standardisierung und Normung können diese Aufwände reduzieren, indem sie auf eine verbesserte Kompatibilität zwischen Batterie und Prozess sowie auf eine Verringerung der Vielfalt hinwirken oder allgemein das Verständnis von Technologie durch die Bereitstellung von Informationen fördern (Temple, 2005). Durch die damit erreichbaren ökonomischen Vorteile wird der Verbleib von Traktionsbatterien sowie deren Recycling innerhalb Europas attraktiver.

Grundsätzlich ist eine Standardisierung beziehungsweise Normung jedes einzelnen Prozessschrittes im Batterierecycling aus Abbildung 16 denkbar, um die genannten Vorteile zu erzielen. Spezifische Mehrwerte können allerdings insbesondere in der Demontage sowie der mechanischen Aufbereitung erzielt werden, unter anderem aufgrund der Prozesskomplexität und der Vorteile einer Verringerung der Variantenvielfalt (IPA, 2021). So kann beispielsweise eine Standardisierung der Verschraubungen und der Verbindungen zwischen Modulen, Zellen und Batteriegehäusen eine automatisierte Demontage beziehungsweise mechanische Aufbereitung ermöglichen (Schäfer, 2022), (IPA, 2021). Eine sortenreine Zerlegung z. B. mittels Roboter ist möglich. Sind zusätzlich Kontaktierung, physischer Aufbau sowie Informationen für Leistungsindikatoren vorhanden und verknüpfbar mit Lebenszyklusinformationen, kann eine teilautomatisierte Bewertung der Komponentenzustände erfolgen. Darauf aufbauend kann anschließend das Recycling oder eine Wiederverwendung einzelner Komponenten, z. B. des Batteriemanagementsystems, der Kabel oder einzelner Zellen, zielgerichtet adressiert werden (IPA, 2021). Neben Standardisierung und Normung mechanischer und elektrochemischer Eigenschaften der Batterien ist daher ebenfalls eine Standardisierung des Datenaustauschs und -formats über die Batterie- und Lebenszykluseigenschaften zweckdienlich, wie es z. B. im internationalen Materialdatensystem oder in Catena-X erfolgt (siehe Kapitel 4.4, (DXC, 2023), (Catena-X, 2022)). Des Weiteren bedarf es eines Batteriemanagementsystems, um die verbleibende Energiespeicherkapazität einer Batterie feststellen zu können.

Der Normung und Standardisierung liegt in diesem Kontext eine vorausschauende Perspektive zugrunde:

Zweckdienliche Eigenschaften der Traktionsbatterie müssen bereits während der Entwicklung entsprechend in das Batteriedesign integriert werden (sogenanntes »Design for Recycling«).

In Bezug auf die Pyrometallurgie-, Hydrometallurgie- sowie Pyrolyseprozesse ist dann zusätzlich denkbar, »Best Practices« bezüglich des Materialeinsatzes in der Standardisierung festzuhalten. So können beispielsweise wasserbasierte Bindersysteme für Elektrodenmaterialien zum Einsatz kommen, um den Einsatz toxischer Lösungsmittel beim Recycling zu verringern (Schäfer, 2022). Ein »Design for Recycling« bedingt entsprechend spezifische Informationsflüsse und Messgrößen zur Beurteilung des Designs im Hinblick auf den erst später im Lebenszyklus stattfindenden Recyclingprozess, um ein kreislaufgerechtes Design zu generieren (IAO, 2022). Das beschriebene Prinzip ist in Abbildung 25 dargestellt.

Im Widerspruch zur Idee des »Design for Recycling« steht eine Vorgehensweise zum Aufbau von Traktionsbatterien, die demnächst vermehrt von Batterie- und Automobilherstellern eingesetzt wird. Dabei handelt es sich um die Umsetzung der sogenannten »Cell-to-Pack-Technologie«, bei der die Zellen der Traktionsbatterie direkt in das Batteriesystem, das auch als Pack bezeichnet wird, integriert werden.

Es erfolgt keine Bündelung der Zellen zu Modulen (Gerlitz, 2021). Deswegen muss Klebstoff zu ihrer Fixierung zum Einsatz kommen, was einen Austausch einzelner Zellen erheblich erschwert oder sogar unmöglich macht und den Aufwand für eine Reparatur sowie das Recycling der Traktionsbatterie deutlich erhöht (Donaldson, 2022). Allerdings soll durch die Cell-to-Pack-Technologie pro Traktionsbatterie eine Steigerung der verfügbaren Energiekapazität um rund 15 % bei gleichbleibendem Volumen möglich sein, eine Vereinfachung der Konstruktion sowie eine Reduktion der Teileanzahl um rund 40 % gelingen und der Aufwand zur Herstellung sinken (Fichtner, 2022). Diese Gesichtspunkte haben vordergründig einen positiven Effekt auf den Erfolg der Unternehmen. Deswegen ist davon auszugehen, dass der Einsatz der Cell-to-Pack-Technologie und perspektivisch unter Umständen der sogenannten »Cell-to-Chassis-Technologie«, bei der die Zellen der Traktionsbatterie mittels Klebstoffs ohne Bündelung zu einem System direkt in die Karosserie integriert werden, auch in Europa bis

(InsideEVs, 2022). Hierdurch wird eine Standardisierung bei den Fahrzeugen nur eines Herstellers bereits erheblich erschwert. Darüber hinaus kann die Normung und Standardisierung das Risiko bergen, dass gegen kartellrechtliche Grundsätze verstoßen wird. Ein entsprechend sorgfältiges Vorgehen würde für die Unternehmen großen Aufwand bedeuten.

4.4 Attraktivierung durch neue Geschäftsmodelle

Um einen Verbleib der kritischen Rohstoffe im europäischen Wertstoffkreislauf sicherzustellen, bedarf es neben regulatorischer Vorgaben und standardisierender Anreize auch attraktiver, neuer Geschäftsmodelle. Hierbei ergeben sich diverse Ansatzpunkte, insbesondere in Verknüpfung mit weiteren Transformationsbereichen des Mobilitätssektors.

Historisch gesehen sind die Geschäftsmodelle im Automobilsektor produktbezogen. Die Wertschöpfungskette ist geprägt durch den Verkauf von Komponenten, Subsystemen und schließlich Fahrzeugen entlang des Lebenszyklus (Teichert, 2020). Dies bedingt, dass der Zugriff auf die Rohstoffe, die zu Beginn des Lebenszyklus eingebracht wurden, mit dem Verkauf des Fahrzeugs verloren geht. Eine Rückgewinnung bedingt somit den Rückkauf des Gesamtfahrzeugs. Dabei stehen diese Geschäftsmodelle einerseits im Wettbewerb mit anderen Formen der Fahrzeugweiterverwertung (siehe Kapitel 2). Andererseits sind sie damit abhängig vom Fahrzeugangebot am Markt. Die Entscheidung, wann, wo und auf welchem Weg ein Fahrzeug der Rohstoffrückgewinnung zugeführt wird, obliegt den Kund:innen.

Durch die Digitalisierung des Mobilitätssektors lässt sich nun eine zunehmende Servitization – das Anbieten von Produkten kombiniert mit Dienstleistungen statt lediglich materieller Produkte – auch im privaten Mobilitätsbereich erkennen, wie sie im B2B-Bereich (z. B. Logistik) schon seit Jahren zu beobachten ist. Anstelle des Kaufs von Komponenten oder Gesamtfahrzeugsystemen tritt die Anmietung oder das Abonnement der Komponente mit entsprechender Service-Garantie. Beispiele hierfür sind »Reifen as a Service« im Logistikbereich (Continental, 2023), diverse Abo-Modelle verschiedener Hersteller (vgl. z. B. (VW, 2023), (Porsche, 2023), (Volvo, 2023)) oder Batteriemietmodelle und Austauschsysteme (Renault, 2023), (Leicht, 2022), (Swobbee, 2023).

Im Gegensatz zu verkaufsbezogenen Geschäftsmodellen kann auf Basis der oben genannten Ansätze der Lebenszyklus des

Fahrzeugs und damit auch der Batterie vom Hersteller gezielt gesteuert werden. So kann der Erstlebenszyklus etwa beabsichtigt früher und mit attraktiverer Restkapazität beendet werden, um eine Zweitnutzung zu ermöglichen. In Kombination mit Lebenszyklusdaten der Batterie, wie dem Gesundheitszustand, kann alternativ auch individuell eine Recyclingstrategie gewählt werden, sollte der Batteriezustand keine Zweitnutzung mehr zulassen. Dabei stellt bereits die Erfassung und Auswertung der Lebenszyklusdaten ein Geschäftsmodell dar (Circunomics, 2022). Abschließend kann durch die gezielte Kontrolle der Batterielebensdauer die verfügbare Menge an Rohstoffen zielgerichtet kontrolliert werden: Durch die frühzeitige Beendigung kann eine zeitweise Rohstoffknappheit durch Recycling ebendieser Batterien überbrückt werden. Andersherum können Traktionsbatterien länger im Lebenszyklus verbleiben, um eventuell ausgelastete Recyclingkapazitäten nicht zusätzlich zu überlasten (LRP, 2023). Das Fahrzeug im Betrieb wird zum Rohstoffspeicher. Insgesamt verbleiben die Materialien bei derartigen Geschäftsmodellen in gebundener Form in der Batterie stets im Zugriff des Automobilherstellers bzw. des Importeurs. Ein Verbleib der Materialien in Europa kann zum Lebenszyklusende gezielt gesteuert bzw. garantiert werden. Die Geschäftsmodelle können auf Basis des Gesamtfahrzeugs (z. B. Auto-Abos oder Fullservice-Leasing) oder lediglich auf Basis der Batteriekomponente stattfinden (VW, 2023), (Porsche, 2023), (Renault, 2023), (Swobbee, 2023).

Bereits umgesetzte Geschäftsmodelle zeigen das dahinter liegende Potenzial auf. So ermöglichen etwa erste Leihkonzepte als »Battery as a Service« den Zugang zu den Traktionsbatterien von Fahrzeugen, ohne diese zu besitzen (Regett, 2019). In solchen Fällen wird nicht für Material und Know-how bezahlt, sondern für den Einsatz der Batterie. Entsprechende Geschäftsmodelle wurden für Traktionsbatterien in den batterieelektrischen Fahrzeugen der Marken Renault und Smart bereits umgesetzt. Das hybride Konzept aus Fahrzeugkauf und Batteriemiete konnte unter anderem aufgrund des dadurch komplizierteren Fahrzeugweiterverkaufs sowie rechtlichen Unsicherheiten im B2C-Markt keine Kundenakzeptanz erlangen (Leicht, 2022), (Leichsenring, 2022), (Hucko, 2013). In Kombination mit Abo-Geschäftsmodellen im B2C-Markt könnte diese Option auf B2B-Ebene allerdings erneut interessant werden, um die Nachhaltigkeitsziele zu erreichen (Regett, 2019). Eine Variante davon wäre ein System, bei dem für die Nutzung der Batterie ein Pfand zu hinterlegen wäre, das bei Rückführung den Kund:innen erstattet wird. Dies wäre bereits bei besitzgetriebenen Fahrzeugen umsetzbar. Pfandsysteme sind in

diversen Recycling- und Rücknahmebereichen (z. B. Getränkeflaschen) bekannt und sowohl in Deutschland als auch in weiteren Ländern der Europäischen Union etabliert oder geplant (Statista, 2020), (Augsburger Allgemeine, 2022). Für Traktionsbatterien sei an dieser Stelle auf zahlreiche Publikationen wie zum Beispiel (acatech, 2020) verwiesen, die unterschiedliche Varianten des Batteriepfands und damit verbundene Vor- und Nachteile detailliert diskutieren. Vorteile bestehen unter anderem darin, dass sich ein Pfandsystem erfahrungsgemäß vergleichsweise kostengünstig implementieren und verwalten lässt, einen wirksamen Anreiz für Nutzende zur Rückgabe von Produkten am Ende ihres Lebenszyklus an den Hersteller darstellt und sogar eine langfristige Kundenbindung unterstützt. Im Fall von Traktionsbatterien müsste allerdings ein sehr hohes Pfand erhoben werden, damit es dem Wert des Energiespeichers angemessen ist, was die Nutzerakzeptanz einschränken und den Einzug, die Verwahrung sowie die Auszahlung aufwendig machen kann.

Konzepte wie die oben beschriebenen sind auch nach einem Einsatz der Batterie im Fahrzeug in »Second-Life«-Anwendungen denkbar, wenn die Batterien stationär z. B. als Hausspeicher oder zum Ausgleich von Spannungsspitzen eingesetzt werden. Im extremen Fall sind Abo-Modelle denkbar, bei denen die Rohstoffe und nicht fertige Batteriezellen/-module im Sinne eines »Material as a Service« vermietet statt verkauft werden. Es ist denkbar, dass das Rohmaterial für die Anzahl von X Ladezyklen vermietet und danach vom Anbieter zurückgenommen wird. Dieser kann die Batterie entweder in einer »Second-Life«-Anwendung nochmals vermieten, verkaufen oder in die Aufbereitung geben und einen Wiederverkauf der Wertstoffe anstreben. Konkrete Umsetzungen für derartige Dienstleistungen sind bislang allerdings nicht bekannt.

Alternativ existieren auch Geschäftsmodelle, bei denen die Fahrzeuge inklusive Traktionsbatterien gezielt nach einer definierten Zeitspanne zurückgekauft werden oder die entsprechenden Kosten und Erlöse für den End of Life bereits in der Kaufphase verbucht und über den Lebenszyklus hinweg gemanagt werden. Ein solches System betreibt das Japan Automobile Recycling Promotion Center. Das Center verwaltet die von den Fahrzeughaltern entrichteten Recyclingbeiträge und steuert und überwacht den Fluss der Altfahrzeuge im Autorecyclingsystem. Eine Erweiterung auf positive Erlösströme für die Fahrzeughalter ist grundsätzlich denkbar (JARC, 2023).

Ebenfalls zu nennen ist das System der KYBURZ Switzerland AG. Das Unternehmen erwirbt verkaufte batterieelektrische

Fahrzeuge, die es selbst hergestellt hat, nach etwa sieben Jahren wieder. Die Batterien der Fahrzeuge werden getestet und bei einer verbliebenen Energiekapazität größer 65 % des ursprünglichen Zustands entweder in anderen Fahrzeugen oder in stationären Anwendungen zum Einsatz gebracht. Ist die verbliebene Energiekapazität kleiner, werden die Materialien der Batterie in der unternehmenseigenen Recyclinganlage zurückgewonnen (KYBURZ, 2023).

Neben der Kontrolle des Lebenszyklus entstehen weitere Geschäftsmodelle, die den Verbleib von Traktionsbatterien in Europa für besitzbezogene Konzepte attraktivieren. So hat sich beispielsweise der Preis für Lithiumkarbonat nach einer Reduzierung bis ins Jahr 2021 seitdem mehr als verzehnfacht und auch die Preise für Nickel und Kobalt sind in den vergangenen zwei Jahren stark gestiegen (siehe Kapitel 3.3). Darüber hinaus müssen neu hergestellte Batterien in der Europäischen Union demnächst einen Anteil recycelten Materials enthalten (Rat der EU, 2023b). Unter diesen Voraussetzungen lohnt sich das Recycling in Europa auch unter ökonomischen Aspekten (Bauer, 2022).

Eine effiziente Gestaltung der Wertschöpfungskette im Recycling ist wichtig, was insbesondere in entsprechenden Netzwerken ermöglicht wird.

Durch Spezialisierung und gezielte Zusammenarbeit der einzelnen Partner kann ein globales Maximum an Wiederverwendung und Wirtschaftlichkeit erlangt werden – im Gegensatz zur lokalen Optimierung einzelner Akteure entlang des Lebenszyklus. Dadurch wird es möglich, mit Partnern Leistungsangebote über den kompletten Lebenszyklus hinweg anzubieten: von der Rohstoffgewinnung über die Rohstoffveredelung, die Zellfertigung und die Batteriemontage bis hin zu »Second-Life«-Anwendungen und einer Weiter-/Wiederverwertung im Sinne einer erneuten Rohstoffgewinnung aus »einer Hand« (Zellweger, 2022), (Nolting, 2008). Mit dem Forschungsprojekt CircuBAT soll zum Beispiel in den kommenden Jahren ein zirkuläres netzwerkbasierendes Geschäftsmodell aufgebaut werden, wobei alle Phasen im Lebenszyklus einer Batterie – von der Herstellung über den Einsatz bis hin zum Recycling – betrachtet werden (Hagmann, 2022). Das Forschungsprojekt Ekoda adressiert unter anderem die gezielte Weiter- oder Wiederverwendung von Traktionsbatterien in kreislauforientierten Nutzungskonzepten durch Verknüpfung der Wertschöpfungspartner (IWU, 2023). Im industriellen Kontext lassen sich ebenfalls Ansätze entsprechender Kooperationen beobachten (vgl. z. B. VW, Toyota, Ford und Volvo mit Redwood Materials, Audi

und MG Motors mit Umicore, Li-Cycle mit Vingroup oder das Japan Automobile Recycling Promotion Center (Schaal, 2022), (Agarwal, 2022), (Dietze, 2023), (JARC, 2023)). Auch für die mietbezogenen Geschäftsmodelle kann ein derartiges Netzwerk Grundlage zur Effizienzsteigerung darstellen.

Bei den hier vorgestellten Geschäftsmodelloptionen wird die Relevanz digitaler Technologien deutlich. Diese übernehmen nicht nur die Rolle des Enablers, z. B. durch die Übermittlung der Anzahl der Ladezyklen einer Batterie an den Eigentümer in einem Abo-Modell, sondern ermöglichen teilweise erst die Umsetzung zirkulärer Geschäftsmodelle, da sie zentraler Bestandteil sind. Somit sind digitale Technologien ein wesentlicher Faktor für neue Geschäftsmöglichkeiten, die im »Rahmen eines datengetriebenen Kreislaufmanagements sowohl durch bestehende als auch durch neue Systemanbieter ergriffen werden« können (Regett, 2019). In China hat die Regierung beispielsweise zu sogenannten Internet- und Recycling-Geschäftsmodellen aufgerufen, bei denen Software und Künstliche Intelligenz zum Einsatz kommen sollen, um die Effizienz des Materialflusses von »Second-Life«- und Recyclingmaterialien zu messen und zu optimieren (Sciurti, 2022). In Deutschland etabliert sich aktuell das Datenökosystem CATENA-X, auf dessen Basis die Rückverfolgbarkeit von Rohstoffen in Batteriesystemen mittels durchgängiger Datenketten ermöglicht werden soll (Catena-X, 2022).

Darüber hinaus unterstützen von Industrieunternehmen entwickelte und teilweise patentierte Verfahren, z. B. zum Traktionsbatterie-Recycling (Duesenfeld, 2023) oder ein eigens entwickeltes hydrometallurgisches Verfahren zur Gewinnung von Lithium aus Altbatterien (Witsch, 2022), ein Verhindern des Abflusses wichtiger Kompetenzen ins außereuropäische Ausland und ermöglichen attraktive Geschäftsmodelle durch Kostenreduktionen.

4.5 Schlussfolgerungen für den Verbleib möglichst vieler Rohstoffe nach dem End of Life der Traktionsbatterien im europäischen Wertstoffkreislauf

Auf Basis der obenstehenden Ausführungen wird hier die Fragestellung, wie der Verbleib möglichst vieler Rohstoffe nach dem End of Life der Traktionsbatterien im europäischen Wertstoffkreislauf erreicht werden kann, zusammenfassend behandelt.

Für Nutzende war bis vor kurzem die Befreiung von wiederkehrenden Gebühren durch die Abmeldung der wesentliche Ansporn für die Zuführung eines Altfahrzeugs zur Verwertung. Auf gewerblicher Seite waren und sind mit den Altfahrzeugen befasste Unternehmen jeweils zur Einhaltung gesetzlicher Vorgaben verpflichtet. Diese jeweilige Motivationslage ändert sich in Anbetracht des Bestrebens der Europäischen Union, bestehende Abhängigkeiten bei Rohstoffen zu reduzieren. Dadurch kommen neue Anreizsysteme und Regularien in Betracht. Intelligente Lösungen, die die Berücksichtigung der Rückgewinnung von Materialien bereits zu Beginn des Lebenszyklus ermöglichen, benötigen einerseits die notwendigen Rahmenbedingungen zur Skalierung und Vernetzung (vgl. Kapitel 4.3), führen andererseits dann aber auch zu bislang nicht gekannten, effizienten Kooperationen über mehrere Wertschöpfungsstufen hinweg.

Des Weiteren werden Nutzenden durch innovative Geschäftsmodelle attraktive Anreize geboten, aktiv am Verbleib wertvoller Materialien in Europa mitzuwirken. Dabei scheint der Verkauf des eigenen Fahrzeugs zurück an dessen Hersteller mittelfristig das vielversprechendste Geschäftsmodell zu sein, um möglichst viele Materialien aus Traktionsbatterien im europäischen Wertstoffkreislauf zu halten. Denn die aktuell in Europa verfügbaren Automobile mit elektrischem Antriebsstrang sind mehrheitlich sehr teuer und Nutzende möchten hochpreisige Produkte erfahrungsgemäß vollständig besitzen. Für sie sind Mietzahlungen oder ähnliche Kosten für einen Bestandteil des von ihnen erworbenen Produkts, was in diesem Fall die Traktionsbatterie wäre, nicht attraktiv.

Perspektivisch, wenn in Europa günstigere Fahrzeuge in größerer Zahl verfügbar sind und die Digitalisierung weiter Einzug in den Alltag der Menschen gehalten hat, scheint »Battery as a Service« sehr vielversprechend, was sich aus dem Erfolg der »... as a Service«-Lösung in anderen Branchen wie der Logistik ableiten lässt (siehe Kapitel 4.4).

Ob die Geschäftsmodelle mit zu hinterlegenden Sicherheiten (z. B. Pfand) oder durch eine Anpassung der Besitzverhältnisse variiert werden, hängt unter anderem maßgeblich vom Interesse der beteiligten Akteure ab (vgl. Kapitel 4.4). Flankiert werden können diese Maßnahmen durch regulatorische Vorgaben, die insbesondere im Bereich des Batterieexports nicht nur ökonomische, sondern auch global gesehen ökologische Vorteile bringen können (vgl. Kapitel 4.2). Um den Verbleib von Rohstoffen in Europa zu maximieren, ist eine in sich stimmige Kombination der einzelnen Maßnahmenmöglichkeiten anzustreben, um die Partizipation sowohl der wirtschaftlichen Akteure als auch der Kund:innen zu erwirken. Die demnächst in der Europäischen Union in Kraft tretende Verordnung über Batterien und Altbatterien schafft hierfür einen guten Rahmen. Des Weiteren bereiten sich die Recyclingunternehmen, die die Materialien aus den Traktionsbatterien zurückgewinnen und in den europäischen Wertstoffkreislauf zurückgeben, mehrheitlich angemessen auf die bevorstehenden Aufgaben vor. Bisher ist jedoch nicht erkennbar, dass die Akteure, die das Einsammeln von Altfahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang konkret durchführen oder veranlassen sollten oder die Nutzende zur geeigneten Abgabe ihres Altfahrzeugs motivieren sollten, ebenfalls bereits entsprechende Vorbereitungen im erforderlichen Umfang treffen.

5. Handlungsempfehlungen

Die Verbreitung von Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang in Europa ist unter anderem zur Einhaltung der Klimaziele essenziell. Sie stellt den Kontinent aber auch vor zahlreiche Herausforderungen. Eine dieser Herausforderungen ist es, mit der Traktionsbatterie eine der demnächst bedeutendsten Komponenten der Automobilindustrie zuverlässig zur Bedienung der Nachfrage, zu einem wettbewerbsfähigen Preis und unter nachhaltigen Bedingungen herstellen zu können. Die dafür benötigten Rohstoffe wurden bislang in der Regel hauptsächlich kostengetrieben erworben. Dies führte zu eingeschränkter Versorgungssicherheit und Abhängigkeit von Ländern außerhalb der Europäischen Union, deren Unternehmen sich zwar aus wirtschaftlicher Sicht als Lieferanten eigneten, die jedoch nicht immer die im Vertrag von Lissabon festgehaltenen Werte und Ziele Europas wie den Arbeits- und Umweltschutz sowie den Schutz von Rede- oder Versammlungsfreiheit und weiterer Menschenrechte teilen (Europäische Union, 2009). Zur Verbesserung dieser Situation kann mittels Recycling von Traktionsbatterien ein erheblicher Beitrag geleistet werden. Der Umfang dieses Beitrags und mögliche Wege, ihn zu gestalten, sind in den voranstehenden Kapiteln dargelegt. Damit die durch Recycling gebotenen Potenziale aber tatsächlich gehoben werden können, bedarf es des tatkräftigen Einsatzes sowohl der Politik als auch der Wirtschaft. Kapitel 5.1 formuliert Handlungsempfehlungen für beide Gruppen, auf deren Basis der Standort Europa weiter gestärkt werden kann.

5.1 Handlungsempfehlungen für die Politik

In Deutschland wurden etwa mit der Circular Economy Initiative⁴ oder der im Januar 2023 herausgegebenen Normungsroadmap Circular Economy⁵ bereits mehrere Maßnahmen durchgeführt, deren Ziele eine Vermeidung von Verschwendung und die Wiederverwendung oder Verwertung von Produkten am Ende ihres Lebenszyklus sind. Die beiden genannten Aktivitäten widmeten sich zu einem erheblichen Teil auch konkret Traktionsbatterien. Auf dieser Basis bietet sich nun die Initiierung einer Arbeitsgruppe auf Ebene der Europäischen Kommission mit Branchenexpert:innen sowohl aus der Politik als auch aus der Industrie und der Wissenschaft an. Dort können zum Beispiel ausgehend von den bislang lediglich für Deutschland entworfenen Strategien weitere Vorschläge zur Schließung des Wertstoffkreislaufs bei den Energiespeichern aus Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang auf dem Kontinent entwickelt werden.

Handlungsempfehlungen im Hinblick auf den aktuellen Vorschlag für die demnächst in Kraft tretende Verordnung über Batterien und Altbatterien (siehe (Europäische Union, 2023)) lauten in Anlehnung an die Empfehlungen der Circular Economy Initiative⁵:

- **Der Gültigkeitsbereich der Verordnung sollte noch deutlicher definiert werden.** Im aktuellen Vorschlag wird das Ende des Lebenszyklus lediglich mit »Sammlung, Zerlegung und Recycling« beschrieben. Hinsichtlich der Sammlung sollte klargestellt werden, dass auch Batterien aus dem »Second Life« dem Recycling zugeführt und

4 | Siehe <https://www.circular-economy-initiative.de/ressourcenschonende-batteriekreislaufe-mit-circular-economy-die-elektromobilitaet-antreiben>

5 | Siehe <https://www.din.de/de/forschung-und-innovation/themen/circular-economy/normungsroadmap-circular-economy>

somit letztendlich sämtliche Energiespeicher am Ende ihres Lebenszyklus gesammelt und verwertet werden müssen. In diesem Zusammenhang sollten auch mögliche Transporte von Traktionsbatterien über weite Strecken zu speziell qualifizierten Verwertungsanlagen berücksichtigt werden. Hinsichtlich des Recyclings sollte klargestellt werden, dass es erst dann abgeschlossen ist, wenn zurückgewonnenes Material in zu Primärrohstoffen vergleichbarer Qualität (Rezyklat) vorliegt.

- **Für die Berechnung von CO₂-Fußabdrücken für relevante Elemente, beispielsweise Rezyklate, Primärmaterialien und Batteriesysteme, sollten einfach anwendbare, nachvollziehbare, standardisierte Rechenwege vorgegeben werden.** Im aktuellen Vorschlag finden sich in diesem Zusammenhang keine Angaben, sodass heute stellenweise ausgewiesene CO₂-Fußabdrücke nicht vergleichbar sind.
- **Der vorgesehene digital auswertbare Datensatz unter anderem mit Angaben zur Herkunft und zu Umwelt- bzw. Menschenrechtseffekten verwendeter Batteriematerialien sowie mit sicherheitsrelevanten Angaben zu jeder Traktionsbatterie (»Batteriepass«) ist ein sehr sinnvolles und wichtiges Instrument.** Er sollte in der im Vorschlag für die Verordnung über Batterien und Altbatterien (siehe (Europäische Union, 2023)) beschriebenen Form eingeführt werden und darüber hinaus auch zur Dokumentation und Verifikation der Wiederverwendung oder Verwertung von Energiespeichern zum Einsatz kommen.

- **Die Information über eine erfolgte Rückgabe oder Rücknahme einer Traktionsbatterie einzeln oder als Teil eines Altfahrzeugs entsprechend der im Vorschlag formulierten Pflichten sollte, auch zur Reduktion der Zahl der Fahrzeuge mit unbekanntem Verbleib, grenzüberschreitend mitgeteilt werden.** In Anbetracht der großen Bedeutung des Wertstoffkreislaufs von Traktionsbatterien ist es angebracht, eine thematisch zur Richtlinie 2000/53/EG über Altfahrzeuge gehörende Vorgabe unter Berücksichtigung etwaiger Widersprüche in die Verordnung über Batterien und Altbatterien zu integrieren. Auf der anderen Seite sollte sichergestellt werden, dass die Richtlinie 2000/53/EG Traktionsbatterien angemessen berücksichtigt.
- **Vergleichbar zum voranstehenden Punkt sollten die Pflicht zur Ausstellung eines Verwertungsnachweises, wenn ein Altfahrzeug einer Verwertungsanlage zugeführt wird, und die Pflicht zum Nachweis der grundlegenden Funktionsfähigkeit eines Fahrzeugs vor dem Export in die Verordnung über Batterien und Altbatterien integriert werden.** So gelingt ein Beitrag zum Wertstoffkreislauf von Traktionsbatterien, da die Zahl der Fahrzeuge mit unbekanntem Verbleib weiter reduziert und der illegale Export von Altfahrzeugen unterbunden wird.

Unabhängig von der Verordnung über Batterien und Altbatterien lauten weitere Handlungsempfehlungen, die auf die Schaffung von Standards und einheitlichen Regeln sowie auf die Verbesserung der Zusammenarbeit innerhalb der Europäischen Union abzielen:

- **Die Bildung von Industriestandards generell sollte in Abstimmung mit der Wirtschaft vorangetrieben werden.** Um die Demontage von Traktionsbatterien automatisieren zu können, sollte etwa erreicht werden, dass die Energiespeicher sowohl unterschiedlicher Fahrzeuge als auch unterschiedlicher Hersteller im Vergleich zu heute ähnlicher zueinander sowie besser zugänglich aufgebaut und mit einfacher lösbaren Verbindungen versehen werden.
- **Die Rahmenbedingungen für innovative Geschäftsmodelle wie »Battery as a Service«, »Material as a Service« oder Abo-Modelle, die zum Erhalt von Materialien in der Europäischen Union beitragen, sollten überall dort auf Einheitlichkeit überprüft und bei Bedarf angeglichen werden.**
- **Weitere nationale und transnationale Regeln und Vorschriften,** etwa hinsichtlich der Mitteilung über die Zuführung von Altfahrzeugen zur zugelassenen Verwertung (Reduktion der Zahl der Fahrzeuge mit unbekanntem Verbleib), grenzüberschreitender Transporte von Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang oder bezogen auf Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus, **sollten europaweit harmonisiert werden.**
- **Grundsätzlich sollte die Einhaltung bereits geltender Vorgaben sichergestellt und entsprechend etwa vermieden werden, dass Traktionsbatterien – gegen Richtlinie 2000/53/EG und Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 verstoßend – illegal in Länder außerhalb der Europäischen Union exportiert werden.**

Des Weiteren sollte **die Förderung von Forschung und Entwicklung zur Verbesserung des Recyclings von Traktionsbatterien weiterhin kontinuierlich evaluiert und bei Bedarf angepasst werden.** So sollte die Logistik aufgrund ihres großen Beitrags zu den Recyclingkosten noch intensiver im Rahmen von geförderten Projekten berücksichtigt werden, um

dadurch die Rentabilität des Recyclings zu optimieren. Für »Direktes Recycling« sollte das Potenzial und dessen Erreichbarkeit einschließlich des Zeithorizonts untersucht werden. **Des Weiteren bedarf es vor einer (förder-)politischen Entscheidung für die Wiederaufbereitung von Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus im Fahrzeug oder für deren Wiederverwendung etwa im »Second Life« der Identifikation und fundierten Beurteilung aller jeweils damit einhergehenden Vor- und Nachteile sowie Chancen und Risiken.** Denn diese Verfahrensweisen entziehen Traktionsbatterien für einen sehr langen Zeitraum der Verwertung der Aktivmaterialien im Recycling. Eine Wiederverwendung früherer Traktionsbatterien mit kobaltreicher NMC111-Kathode im »Second Life« würde erhebliche Mengen des Materials, von dem eine große Abhängigkeit besteht, über viele Jahre in stationären Anwendungen binden, für die sich auch Batterien mit kobaltfreier Lithium-Eisen-Phosphat-Kathode eignen.

Ungeachtet des oben genannten weiteren Forschungsbedarfs arbeiten in den zu Batterien generell bereits eingerichteten und laufenden IPCEIs (deutsch: wichtige Projekte von gemeinsamem europäischem Interesse) »IPCEI on Batteries« und »European Battery Innovation (EuBatIn)« schon Partner:innen aus verschiedenen Ländern der Europäischen Union zusammen. Beide IPCEIs scheinen mit ihrer Förderung in Höhe von jeweils rund 3 Milliarden Euro für den Moment finanziell ausreichend ausgestattet zu sein. Da sie abgesehen von der Logistik für das Recycling die gesamte Wertschöpfungskette von Batterien abdecken, von der Gewinnung von Rohstoffen über die Konstruktion und Herstellung vollständiger Energiespeicher bis hin zur Erwirkung einer Kreislaufwirtschaft, scheinen sie aktuell auch thematisch sehr erfolgversprechend ausgerichtet zu sein. Dadurch gelingt es, durch neue effiziente und automatisierte Lösungen für die Trennung und Wiedergewinnung von Wertstoffen die wirtschaftliche Attraktivität rückgewonnener Materialien zu erhöhen.

Ergänzend zu den oben ausgeführten Punkten sollten die etablierten Recyclingbetriebe einerseits eingehend für die bevorstehende Transformation von konventionellen Fahrzeugen zu solchen mit elektrischem Antriebsstrang sensibilisiert werden. Eine diesbezüglich geeignete Kampagne auf europäischer Ebene kann sich an den zuletzt in Deutschland für das Kfz-Gewerbe gestarteten Maßnahmen orientieren, die auf einer umfassenden Publikation fußen.⁶

6 | Siehe <https://www.e-mobilbw.de/service/meldungen-detail/neue-studie-zeigt-beschaefigungseffekte-im-kfz-gewerbe>

Andererseits sollten die Betriebe bei der Qualifizierung ihrer Beschäftigten unterstützt werden. Bei der Ausarbeitung entsprechender Maßnahmen kann auf Erfahrungen hinsichtlich der Wirksamkeit des Qualifizierungschancengesetzes⁷ in Deutschland aufgebaut werden.

Schließlich sollten Potenziale von Explorations-, Bergbau- und Handelsaktivitäten weltweit geprüft und Unternehmen aus der Europäischen Union dazu motiviert sowie dabei unterstützt werden. Zur grundsätzlichen Verbesserung der Verfügbarkeit von Rohstoffen sollte ferner die Einlagerung eines Teils beschaffter Primärrohstoffe zur Überwindung befristeter Versorgungsengpässe evaluiert und je nach Ergebnis umgesetzt werden. Die Schaffung attraktiver Standortbedingungen zur Ansiedlung oder Gründung von Einrichtungen in Europa, die langfristig mit etablierten Metallbörsen und Rohstoffhändlern konkurrieren können, sollte in Betracht gezogen werden.

5.2 Handlungsempfehlungen für die Wirtschaft

Entlang des gesamten Produktlebenszyklus verteilte Unternehmen aus Europa sehen sich vor zahlreiche Herausforderungen gestellt. Hersteller müssen für benötigte Rohstoffe Lieferanten, die heute noch zum Großteil in Ländern außerhalb der Europäischen Union beheimatet sind, auswählen und haben häufig keine Möglichkeit zur Reaktion auf ungünstige ökonomische, ökologische oder politische Entwicklungen. Betriebe, die bislang konventionelle Automobile mit deren bekannten Komponenten verwertet haben, müssen nun ihre Anlagen für das Recycling von Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang umstellen und ihre Beschäftigten für den Umgang mit Traktionsbatterien neu qualifizieren.

Die genannten Unternehmen an den unterschiedlichen Stellen des Produktlebenszyklus bestimmen durch ihr Handeln, wie maßgebliche Materialien von Traktionsbatterien, die in absehbarer Zeit zu den wichtigsten Komponenten der Automobilindustrie zählen, Europa betreten und wieder verlassen oder dem Kontinent erhalten bleiben. Um der damit einhergehenden großen Bedeutung gerecht zu werden, ist einerseits politische Unterstützung in Form der in Kapitel 5.1 aufgelisteten Punkte erforderlich. Diese reichen von der Verbesserung des grenz-

überschreitenden Informationsaustauschs innerhalb der Europäischen Union, um den Verbleib von Fahrzeugen und damit die Menge recycelbarer Materialien vollständig zu kennen, bis hin zur einfach verständlichen Definition vorgegebener Zielwerte wie der zu erreichenden Sammelquote, um Aufwand zur Interpretation der Vorgaben zu vermeiden. Andererseits bedarf es auch eigener Anstrengungen:

- **Der Idee des »Design for Recycling« folgend sollte möglichst unternehmensübergreifend in Abstimmung getreten und bereits in der Phase der Produktentwicklung Wert auf die Modularisierung von Traktionsbatterien gelegt werden – spätestens perspektivisch sollte eine Harmonisierung der Vielzahl von Materialzusammensetzungen erfolgen.**

An dieser Stelle können Clusterinitiativen unterstützen, indem sie Mitarbeitenden aus Forschung und Industrie eine neutrale Plattform bieten und den Austausch sowie die Initiierung gemeinsamer Forschungs- und Entwicklungsprojekte fördern.

- **Bislang für die Unternehmen ungewohnte Geschäftsmodelle wie Leih- und Pfandsysteme, aber auch innovative Lösungen wie Leasing, Sharing, »Battery as a Service« oder »Material as a Service«, die teilweise neue Eigentumsverhältnisse an der Batterie voraussetzen, sollten entwickelt, im Dialog mit allen beteiligten Unternehmen transparent ausgehandelt und erprobt werden.** Diesbezüglich können Informationen über die Funktionsweise sowie Vor- und Nachteile der ungewohnten Geschäftsmodelle im Rahmen von Clusterinitiativen gesammelt und Interessierten zur Verfügung gestellt werden und mögliche Beteiligte können miteinander in Kontakt gebracht werden.

- **Sammel-, Logistik- und Demontagekapazitäten sollten für die absehbar zu verarbeitenden Mengen in entsprechendem Umfang eingerichtet bzw. ausgebaut werden, Investitionen in benötigte Technologien sowie in genutzte Infrastruktur sollten im erforderlichen Ausmaß getätigt werden und die Digitalisierung sollte flächendeckend zum Einsatz gebracht werden.** Eine Zusammenarbeit aller Beteiligten im Rahmen einer Clusterinitiative wie dem Cluster

⁷ | Siehe etwa <https://www.biwe.de/qualifizierungschancengesetz>

Elektromobilität Süd-West kann das Verständnis für die bevorstehenden Entwicklungen sowie für die Interessen und Herausforderungen der involvierten Akteure entlang der Wertschöpfungskette verbessern und so die Entwicklung eines effizienten Rückführsystems ohne eine Beeinträchtigung des Wettbewerbs begünstigen.

■ **Recyclingtechnologien sollten mit dem Ziel optimaler Rückgewinnungsraten über die gesamte Prozesskette in hoher Qualität bei optimierten Umweltauswirkungen und Kosten weiterentwickelt werden.**

Geförderte Projekte hierzu können im Rahmen von Clusterinitiativen angestoßen werden, nachdem von Betroffenen und Interessierten der aktuelle Stand der Technik sowie bestehende Forschungsbedarfe identifiziert wurden.

■ **Es sollte bei allen betroffenen Einrichtungen trotz der derzeit noch geringen Menge recycelbarer Traktionsbatterien rechtzeitig mit der Weiter- oder Neuqualifikation der Beschäftigten und der Anpassung der Ausstattung sowie der Kompetenzen begonnen werden. Clusterinitiativen können dabei unterstützen, die je Unternehmen und Betrieb benötigten Qualifikationen zu identifizieren und entsprechende Qualifizierungsmaßnahmen auszuwählen.**

- **Unter Berücksichtigung der kartellrechtlichen Grundsätze sollten Kooperationen zwischen den Unternehmen auch über mehrere Wertschöpfungsstufen hinweg initiiert werden, wobei auch ein Austausch relevanter Informationen und Daten stattfinden sollte.** Clusterinitiativen, die von einer neutralen Einrichtung wie der e-mobil BW GmbH koordiniert werden, bieten sich als rechtssichere Formate an, in denen die Einhaltung aller Vorgaben sichergestellt ist. Dort ist es möglich, Vertrauen aufzubauen, dass sich die Preisgabe von Interna im Rahmen der Formate auch zum eigenen Vorteil auswirken kann und keinesfalls zum eigenen Nachteil.

Die oben aufgelisteten, prozessualen Maßnahmen müssen rechtzeitig in das Ergebnis münden, dass die demnächst in der Europäischen Union geltenden Richtlinien etwa hinsichtlich des Rezyklat-Anteils in neuen Produkten oder der Effizienz von Recyclingprozessen von den jeweils betroffenen Unternehmen erfüllt werden können. Unterstützend beim Erreichen dieser Ziele kann für Unternehmen einerseits ein kontinuierliches

Monitoring der eigenen Rohstoffsituation bzw. der erreichten Rückgewinnungsquoten wirken. Andererseits gelingt im Rahmen geförderter Verbundforschungsprojekte zwischen Unternehmen und Forschungseinrichtungen, die sich etwa mit Möglichkeiten zur Einhaltung der in Aussicht stehenden Vorgaben beschäftigen, in kurzer Zeit die Überführung gewonnener wissenschaftlicher Ergebnisse in anwendungsorientierte Lösungen. Erfolgsbeispiele hierfür sind die zu Batterien generell bereits eingerichteten und laufenden IPCEIs »IPCEI on Batteries« und »European Battery Innovation (EuBatIn)«. Eine mögliche Beteiligung daran unter der aktuellen oder einer angepassten Ausrichtung sollte fortwährend genauso geprüft werden wie weitere Aufrufe zur Projektinitiierung.

Bei Teilen der Unternehmen, die in der Europäischen Union mit Rohstoffen für Traktionsbatterien befasst sind, ist das Bemühen darum als sehr zielführend zu beurteilen. So ist die Inbetriebnahme vieler Einrichtungen zur Rückgewinnung von Materialien in Aussicht gestellt oder bereits erfolgt. Gemäß Ankündigungen entstehen dadurch kurzfristig größere Kapazitäten als recycelbare Materialien verfügbar sind. Des Weiteren haben einige Betriebe entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Batterien die bevorstehenden Herausforderungen und auch die Potenziale schon verstanden. Entsprechend werden Anpassungen der Ausstattung sowie Qualifizierungsmaßnahmen durchgeführt oder in die Wege geleitet, wo bislang der Umgang mit Traktionsbatterien keine Rolle gespielt hat. Diese Aufbruchstimmung muss auf alle Betriebe in Europa, die auf die Transformation bislang noch nicht vorbereitet sind, übertragen werden. Darüber hinaus entstehen vereinzelt neue Unternehmen, die auf die Bedürfnisse des Wertstoffkreislaufs speziell von Traktionsbatterien ausgerichtet sind und übernehmen etwa deren Logistik. Dieses Engagement gilt es europaweit zu wecken und zu fördern.

Die größte Herausforderung für die Wirtschaft ist die Wartezeit, bis die Menge recycelbarer Traktionsbatterien nennenswert zunimmt.

Wenn die Unternehmen diese angemessen berücksichtigen, können sie ab Beginn des nächsten Jahrzehnts von den bis dahin gesammelten Erfahrungen und getroffenen Vorbereitungen erheblich profitieren.

6.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Präferenz des elektrischen Antriebsstrangs seitens Industrie, Politik und Gesellschaft vollzieht sich immer schneller. Hersteller und Zulieferer müssen deswegen **große technologische Anstrengungen** auf sich nehmen, um die bevorstehenden Herausforderungen bewältigen zu können. Für europäische Unternehmen werden zunehmend die **Begrenztheit benötigter Rohstoffe** insbesondere im Bereich der Traktionsbatterie sowie damit einhergehende Abhängigkeiten von globalen Rohstofflieferketten sichtbar. So kann erwartet werden, dass der Bedarf an Traktionsbatterien in Europa von rund 90 GWh im Jahr 2022 bis zum Jahr 2035 auf bis zu 1.200 GWh ansteigen wird.

Dementsprechend wird die gesamte Nachfrage bereits in wenigen Jahren das heute verfügbare Angebot produzierter Materialmengen deutlich übertreffen.

Die Rohstoffe zur Herstellung von Traktionsbatterien sind weltweit zwar grundsätzlich in ausreichender Menge vorhanden. Herausfordernd ist allerdings die Konzentration der Primärrohstoffe außerhalb Europas, die eine **Abhängigkeit von den entsprechenden Ländern** mit teilweise differenzierender Wertvorstellung hinsichtlich des Schutzes unter anderem der Umwelt sowie der Menschenrechte bedeutet. Das Themenpapier adressiert daher die Fragestellung, ob die Rohstoff-Verfügbarkeit für die europäische Produktion von Traktionsbatterien durch Primärrohstoffe langfristig gesichert ist und welchen Einfluss recycelte Rohstoffe auf die Rohstoffversorgung haben könnten.

Die Mengen an Rezyklat, mit denen zur Sicherung der Rohstoffversorgung in Europa beigetragen werden kann, hängen maßgeblich davon ab, dass die entsprechenden Fahrzeuge am Ende ihres Lebenszyklus dort verfügbar sind und auch dort verarbeitet werden.

Grundsätzlich können Fahrzeuge entweder als Altfahrzeuge einer zugelassenen Verwertungsanlage in Europa zugeführt oder, wenn sie noch verkehrstüchtig sind, in Länder außerhalb der Europäischen Union exportiert werden. In den zurückliegenden Jahren haben im Durchschnitt jeweils ca. 11,4 Millionen Fahrzeuge den Bestand der Europäischen Union verlassen. Davon wurden im Durchschnitt etwa 6,6 Millionen Fahrzeuge einer zugelassenen Verwertungsanlage zugeführt, wobei die Wiederverwendungs- und Recyclingquoten im Schnitt bei circa 90 % lagen. Gleichzeitig wurde etwa 1 Million Fahrzeuge ins außereuropäische Ausland exportiert. Hauptempfänger waren die Regionen Osteuropa/Kaukasus und Afrika.

Bei jährlich rund 3,8 Millionen Fahrzeugen ist der Verbleib unbekannt.

Vor dem Hintergrund der darin enthaltenen Rohstoffe ist es erstrebenswert, die Fälle unbekanntes Verbleibs von Fahrzeugen zu reduzieren. Hierzu bedarf es der Einführung einer in der gesamten Europäischen Union geltenden, klar definierten Pflicht zur Rückgabe und Rücknahme, zu deren Nachweis sowie zur Information darüber. Des Weiteren bedarf es überall der Einführung eines Nachweises der Funktionstüchtigkeit eines Fahrzeugs vor dessen Export in ein Land außerhalb der Europäischen Union.

Für den Umgang mit Fahrzeugen und Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus gibt es in Europa grundsätzlich Vorschriften und Gesetze, damit die Bestandteile zur Deckung des Rohstoff- und Materialbedarfs der Industrie beitragen sowie der Schutz von Menschen und Umwelt gewährleistet ist. Die Lebenszyklusdauer von Traktionsbatterien im Fahrzeug erstreckt sich allerdings über einen längeren Zeitraum, als es zu Beginn der Verbreitung von Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang gemutmaßt wurde. So weisen nahezu alle Hersteller als **Ende des Lebenszyklus im Fahrzeug 70% Mindestanteil an nutzbarer Energiekapazität** aus. Eine Traktionsbatterie, die bereits als nicht mehr funktionstüchtig für mobile Anwendungen deklariert wird, kann somit im sogenannten **»Second Life«** noch zur Speicherung von Energie in anderen Anwendungsfällen eingesetzt werden. Aktuelle Beispiele für »Second-Life«-anwendungen sind stationäre Energiespeicher sowie Anlagen für das Spitzenlastmanagement von Großverbrauchern. Potenziale liegen insbesondere in der Nivellierung der volatilen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Herausforderungen lassen sich etwa in der vorab fehlenden Kenntnis des Gesundheitszustands identifizieren. Erst danach werden die Batterien einer Rückgewinnung der Rohmaterialien zugeführt.

In Anbetracht der Eigenschaften und Merkmale der Aktivmaterialien von Traktionsbatterien ist deren Verwertung ein komplexer und in der Regel mehrstufiger Vorgang, der den gezielten Einsatz pyrometallurgischer, hydrometallurgischer sowie pyrolytischer Verfahren zusammen mit der mechanischen Aufbereitung und Demontage umfasst.

Technisch gesehen unterscheidet sich die Verwertung von Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang daher erheblich von der bei konventionellen Fahrzeugen. Dies bedingt einer-

seits eine **Weiter- oder Neuqualifizierung der Beschäftigten** sowie eine Anpassung der Ausstattung und Kompetenzen bei Verwertungsbetrieben. Andererseits zeigt sich weiterhin **Forschungsbedarf hinsichtlich Verfahrensgestaltung und -umsetzung.**

Bereits heute ist es möglich, beispielsweise die in Traktionsbatterien eingesetzten Aktivmaterialien Lithium, Nickel, Mangan, Kobalt und Graphit in einer den Primärrohstoffen vergleichbaren Qualität zurückzugewinnen. Kostenbezogen sind diese recycelten Materialien allerdings gegenüber Primärrohstoffen aufgrund der seit Langem etablierten und entsprechend effizienten Förderstrukturen sowie der großen Fördermengen nur bedingt wettbewerbsfähig.

So liegen die Preise für recycelte Batteriematerialien wie Lithium teilweise um ein Vielfaches über dem Preis für die Primärrohstoffe. Der Anlass zur Nutzung der recycelten Materialien müsste daher zunächst durch Richtlinien oder Regulatorik gegeben werden. Dadurch könnte neben einer Verringerung der Abhängigkeit von Ländern außerhalb der Europäischen Union auch ein besserer Schutz der Umwelt gelingen.

Denn Recycling erzeugt tendenziell weniger Emissionen und greift weniger in die Umwelt ein, als es bei der Förderung von Primärrohstoffen der Fall ist.

Langfristig könnte sich bei einem erneuten Anstieg des Preises von Lithium eine Rückgewinnung allerdings auch aus ökonomischer Sicht als attraktiv erweisen.

Eine Herausforderung bei der Umsetzung dieser Wertstoffkreisläufe ist die mittelfristig geringe Menge an verwertbarem Batterieschrott. Dieser speist sich aktuell und auch in den

nächsten Jahren noch maßgeblich aus der Unterhaltungselektronik. Entsprechend werden für das Jahr 2025 fast um den Faktor vier größere Recyclingkapazitäten gegenüber dem verfügbaren recycelbaren Material prognostiziert. Maßnahmen zur Sicherstellung des Verbleibs möglichst vieler Traktionsbatterien und deren Rohstoffe im europäischen Wertstoffkreislauf kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Intelligente Lösungen, die bereits zu Beginn des Lebenszyklus eine Berücksichtigung der Rückgewinnung von Materialien aus Traktionsbatterien ermöglichen, benötigen jedoch geeignete regulatorische und operative Rahmenbedingungen zur Skalierung und Effizienzsteigerung der Verfahren. Hier können die **Standardisierung und Normung bestimmter Bauteile**, der Batteriearchitektur und der eingesetzten Materialzusammensetzung unterstützen, indem sie die Demontage sowie die Rückgewinnung in Europa effizienter und damit ökonomisch attraktiver gestalten. Durch **neu entstehende Abo- und Leasingkonzepte** kann der Lebenszyklus des Fahrzeugs und auch der Traktionsbatterie zielgerichtet kontrolliert werden. Dadurch lassen sich Rohstoffverfügbarkeiten und Recyclingkapazitäten geeignet balancieren und der Wertstoffkreis gezielt gestalten. Wenn die Batterie nicht mehr im Besitz der Kund:innen ist, kann ein Verbleib in der Europäischen Union sichergestellt werden. Pfandsysteme können dazu beitragen, Nutzende zur Rückführung von Altfahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang im Privatbesitz zu motivieren. Neben dem Aufbau der entsprechenden Netzwerke können diese Maßnahmen regulatorisch unterstützt oder komplementiert werden.

Insbesondere im Bereich des illegalen Batterieexports lassen sich nicht nur ökonomische, sondern auch ökologische Vorteile heben, wenn beispielsweise die Ausfuhr von Traktionsbatterien in Länder mit unzureichender Recyclinginfrastruktur wirksam unterbunden wird.

Zur Hebung dieser Potenziale sind etwa mit dem Beschluss der Verordnung über Batterien und Altbatterien, der zum Ende des Jahres 2023 oder kurz darauf zu erwarten ist, zunächst geeignete Maßnahmen zu treffen. Die Skalierung der dann festgelegten, ab dem Jahr 2027 bzw. 2031 geltenden Effizienz im Recyclingprozess (die heute schon erreicht wird) auf industrielle Maßstäbe bereiten die betroffenen Unternehmen bereits vor. Die Hersteller von Batteriezellen können ihrerseits die Vorbereitungen treffen, die acht bzw. 13 Jahre nach dem Beschluss der Verordnung und somit aller Voraussicht nach ab dem Jahr 2031 bzw. 2036 vorgeschriebenen Rezyklatanteile in ihren Produkten umzusetzen. Mit entsprechenden Anstrengungen wird teilweise bereits begonnen. Für die **Sammlung von Traktionsbatterien** am Ende ihres Lebenszyklus und deren Zuführung zum Recycling entstehen in den Ländern Europas isoliert schon erste Strukturen in Einklang mit der Verordnung über Batterien und Altbatterien. Bis jedoch die zur Sicherung nennenswerter Wertstoffmengen erforderliche grenzüberschreitende Zusammenarbeit erreicht ist, wird es bis zum Anstieg der Nachfrage seitens der Zellhersteller zu Beginn des nächsten Jahrzehnts dauern.

Mit der Einführung des Batteriepasses, der in Zusammenhang mit einer Traktionsbatterie relevante Daten enthalten und eine entsprechend wichtige Rolle spielen, bislang jedoch nicht nennenswert vorangetrieben wird, ist gemäß der Verordnung dreieinhalb Jahre nach ihrem Beschluss und somit im Jahr 2027 zu rechnen.

Schließlich wird die als außergewöhnlich wichtig identifizierte Förderung einer zielgerichteten länderübergreifenden Zusammenarbeit zwischen Unternehmen auch über mehrere Wertschöpfungsstufen hinweg mehrere Jahre in Anspruch nehmen. Denn sie verlangt zunächst eine Harmonisierung von Regeln und Vorschriften sowie einen Abbau menschlicher Vorbehalte etwa im Rahmen von **Clusterinitiativen** oder anderen zuverlässigen Formaten. Wird hiermit jedoch unverzüglich begonnen, gelingt rechtzeitig ein erheblicher Beitrag zum Erhalt wichtiger Materialien im europäischen Wertstoffkreislauf und damit die Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der hiesigen Industrie.

Literaturverzeichnis

(acatech, 2020)

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, (2020): Ressourcenschonende Batteriekreisläufe – Mit Circular Economy die Elektromobilität antreiben. 2020. Online verfügbar unter <https://www.acatech.de/publikation/ressourcenschonende-batteriekreislaeufe/>.

(ACEA, 2022a)

European Automobile Manufacturers' Association (2022): EU passenger car production. 01.04.2022. Online verfügbar unter <https://www.acea.auto/figure/eu-passenger-car-production/>.

(ACEA, 2022b)

European Automobile Manufacturers' Association (2022): Average age of the EU vehicle fleet. 02.04.2022. Online verfügbar unter <https://www.acea.auto/figure/average-age-of-eu-vehicle-fleet-by-country/>.

(ADAC, 2022a)

ADAC (2022): Förderung für Elektroautos. 29.07.2022. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/kaufen/foerderung-elektroautos/>.

(ADAC, 2022b)

ADAC (2022): Elektroauto-Akkus: So funktioniert das Recycling. 16.08.2022. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-akku-recycling/>.

(ADAC, 2022c)

ADAC (2022): Elektroauto-Batterie – Lebensdauer, Garantie, Reparatur. 25.10.2022. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-batterie/>.

(Adamas, 2021)

Adamas Intelligence (2021): 134.5 GWh of Passenger EV Battery Capacity Added to Roads in 2020. 04.02.2021. Online verfügbar unter <https://www.adamasintel.com/passenger-ev-battery-capacity-deployed-2020/>.

(Adamas, 2022)

Adamas Intelligence (2022): A Record 286.2 GWh Deployed Onto Roads in Passenger EV Batteries in 2021. 08.02.2022. Online verfügbar unter <https://www.adamasintel.com/record-battery-capacity-deployed-in-2021/>.

(ADEME, 2019)

ADEME (2019): Global Overview of Incentive Schemes aiming to bring ELVs through Authorised Processing Channels. 2019. Online verfügbar unter <https://copperalliance.org/wp-content/uploads/2021/08/global-overview-of-incentive-schemes-for-elvs-2019.pdf>.

(ADL, 2022)

Arthur D. Little (2022): European Battery Recycling – An Emerging Cross-Industry Convergence. Juni 2022. Online verfügbar unter <https://www.adlittle.com/us-en/insights/viewpoints/european-battery-recycling-emerging-cross-industry-convergence>.

(Agarwal, 2022)

Agarwal, Shalu; Rosina, Milan: Auswirkungen von Batterie-Recycling auf die Umwelt. 26.8.2022. Online verfügbar unter <https://www.all-electronics.de/markt/auswirkungen-von-batterie-recycling-auf-die-umwelt-235.html>.

(Agora, 2021)

Agora Energiewende et al. (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Juni 2021. Online verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045-vollversion/>.

(Agora, 2022)

Agora Verkehrswende et al. (2022): Elektro-Lkw schneller auf die Straße bringen. 12.10.2022. Online verfügbar unter <https://www.agora-verkehrswende.de/presse/pressemitteilungen/studie-europa-kann-emissionsfreie-lkw-schneller-auf-die-strasse-bringen/>.

(AI, 2021)

Amnesty International (2021): China 2020. 07.04.2021. Online verfügbar unter <https://www.amnesty.de/informieren/amnesty-report/china-2020>.

(ams, 2022)

auto-motor-und-sport.de (2022): Verbrenner-Aus bei Autoherstellern. 04.03.2022. Online verfügbar unter <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/verbrenner-ausstieg-auto-hersteller-elektro-zukunft/>.

(ANL, 2019)

Argonne National Laboratory (2019): EverBatt – A Closed-loop Battery Recycling Cost and Environmental Impacts Model. April 2019. Online verfügbar unter <https://www.osti.gov/biblio/1530874>.

(ARF, 2022)

Auto Recycling World (2022): Eurostat latest figures for ELV reuse, recycling and recovery targets. 04.02.2022. Online verfügbar unter <https://autorecyclingworld.com/eurostat-latest-figures-for-elv-reuse-recycling-and-recovery-targets/>.

(Ariadne, 2021)

Ariadne (2021): Report – Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045. Oktober 2021. Online verfügbar unter <https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitaet-2045-szenarienreport/>.

(Augsburger Allgemeine, 2022)

Augsburger Allgemeine (2022): Wie in Deutschland – In welchen Ländern gibt es Pfand. 25.08.2022. Online verfügbar unter <https://www.augsburger-allgemeine.de/panorama/pfand-in-anderen-laendern-uebersicht-id63217871.html>.

(AVICENNE ENERGY, 2021)

AVICENNE ENERGY (2021): The Rechargeable Battery Market and Main Trends 2020–2030. 28.09.2021. Online verfügbar unter https://www.crepim.fr/DOCS_CLIENT/Batteries%20Market%20in%202020%20by%20technology,%20applications%20&%20battery%20suppliers-Li-ion%20components%20market%20&%20value%20chain-Raw%20materials%20market%20Supplier-Raw%20material%20cost-Ne.pdf.

(BAFA, 2023)

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2023): Güterlisten. 14.02.2023. Online verfügbar unter https://www.bafa.de/DE/Aussenwirtschaft/Ausfuhrkontrolle/Gueterlisten/queterlisten_node.html.

(Bauer, 2022)

Bauer, Christoph (2022): LITHIUM-RECYCLING AUF NEUEN WEGEN. 14.09.2022. Online verfügbar unter <https://elements.evonik.de/forschung-und-innovation/lithium-recycling-auf-neuen-wegen/>.

(BCG, 2021)

Boston Consulting Group (BCG), Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI) (2021): Klimapfade 2.0. Oktober 2021. Online verfügbar unter <https://www.bcg.com/de-de/klimapfade>.

(BDEW, 2023)

BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2023): BDEW-Strompreisanalyse Jahresbeginn 2023. 09.02.2023. Online verfügbar unter <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>.

(Berylls, 2022)

Berylls Strategy Advisors (2022): Battery Recycling – Circular economy on the example of e-Mobility. November 2022. Online verfügbar unter <https://www.berylls.com/battery-recycling-circular-economy-on-the-example-of-e-mobility/>.

(BMI, 2022)

Benchmark Mineral Intelligence (2022): Battery production scrap to be main source of recyclable material this decade. 05.09.2022. Online verfügbar unter <https://source.benchmarkminerals.com/article/battery-production-scrap-to-be-main-source-of-recyclable-material-this-decade>.

(BMVU, 2021)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2021): Europäische Richtlinie zu Batterien und Akkumulatoren. 14.09.2021. Online verfügbar unter <https://www.bmuv.de/themen/wasser-ressourcen-abfall/kreislaufwirtschaft/abfallarten-abfallstroeme/altbatterien/europaeische-richtlinie-zu-batterien-und-akkumulatoren>.

(BMVU, 2022a)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2022): EU-Umweltrat beschließt neue Regeln für nachhaltigere Batterien. 17.03.2022. Online verfügbar unter <https://www.bmuv.de/pressemitteilung/eu-umweltrat-beschliesst-neue-regeln-fuer-nachhaltigere-batterien>.

(BMVU, 2022b)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2022): Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik-Altgeräte. 28.07.2022. Online verfügbar unter <https://www.bmuv.de/gesetz/richtlinie-2012-19-eu-ueber-elektro-und-elektronik-altgeraete>.

(CAM, 2022)

Center of Automotive Management GmbH & Co. KG (2022): Export gebrauchter Elektrofahrzeuge. 23.02.2022. Online verfügbar unter <https://auto-institut.de/automotiveinnovations/emobility/export-gebrauchter-elektrofahrzeuge/>.

(CAM, 2023)

Center of Automotive Management GmbH & Co. KG (2022): Electromobility Report 2023 – Exportgeschäft mit gebrauchten Elektrofahrzeugen (BEV). 09.03.2023. Online verfügbar unter <https://auto-institut.de/presse/electromobility-report-2023-exportgeschaeft-mit-gebrauchten-elektrofahrzeugen-bev/>.

(Catena-X, 2022)

Catena-X, Automotive Network (2022): Catena-X: Rückverfolgbarkeit – Die erste automobile Data Driven Value Chain – vom Rohstoff bis zum Recycling. 13.2.2023. Online verfügbar unter https://catena-x.net/fileadmin/user_upload/02_Mehrwerte/Catena-X_Rueckverfolgbarkeit.pdf.

(Circunomics, 2022)

Circunomics GmbH (2023): End-to-end Solution. 2022. Online verfügbar unter <https://www.circunomics.com/solution>.

(Continental, 2023)

Continental (2023): # Flottenlösungen – Continental, Ihr starker Partner – Conti360° Solutions. 13.02.2023. Online verfügbar unter <https://www.continental-reifen.de/b2b/services-and-solutions/conti-360.html>.

(CSEM, 2020)

Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique SA (2020): Die Weiterentwicklung der Li-Ionen-Batterie. 25.05.2020. Online verfügbar unter <https://www.ssm-studies.ch/ssm-studies/referate>.

(dena, 2021)

Deutsche Energie-Agentur GmbH (2021). Aufbruch Klimaneutralität. Oktober 2021. Online verfügbar unter <https://www.dena.de/newsroom/meldungen/dena-leitstudie-aufbruch-klimaneutralitaet/>.

(DERA, 2018)

Deutsche Rohstoffagentur (2018): Rohstoffrisikobewertung – Kobalt. 2018. Online verfügbar unter https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Produkte/Schriftenreihe/schriftenreihe_node.html.

(DERA, 2021a)

Deutsche Rohstoffagentur (2021): Batterierohstoffe für die Elektromobilität. 18.03.2021. Online verfügbar unter [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DERA Themenheft-01-21.html](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DERA%20Themenheft-01-21.html).

(DERA, 2021b)

Deutsche Rohstoffagentur (2021): Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe – Mangan. November 2021. Online verfügbar unter https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Produkte/Rohstoffwirtschaftliche%20Steckbriefe/rohstoffwirtschaftliche_steckbriefe_node.html.

(DERA, 2021c)

Deutsche Rohstoffagentur (2021): Rohstoffrisikobewertung – Graphit. 2021. Online verfügbar unter https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Produkte/Schriftenreihe/schriftenreihe_node.html.

(DERA, 2022a)

Deutsche Rohstoffagentur (2022): Lithium-Ionen-Batterie-recycling in Deutschland und Europa. Mai 2022. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Nachrichten/Aktuelles/2022/2022-05-16_kurzstudie-zum-recyclingpotenzial-von-li-ion-batterien.html.

(DERA, 2022b)

Deutsche Rohstoffagentur (2022): Rohstoffrisikobewertung – Lithium 2030. 23.06.2022. Online verfügbar unter https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Aktuelles/rohstoff_lithium.html.

(DERA, 2022c)

Deutsche Rohstoffagentur (2022): Der globale Nickelmetallmarkt – zwischen Legierungselement und Batterierohstoff. Mai 2022. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Nachrichten/Aktuelles/aktuelles_node.html.

(DERA, 2023)

Deutsche Rohstoffagentur (2022): Rohstoffrisikobewertung – Lithium. 2023. Online verfügbar unter https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Produkte/Schriftenreihe/schriftenreihe_node.html.

(Destatis, 2023)

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2023): Verbraucherpreisindizes. 2023. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Verbraucherpreisindex/Tabellen/Verbraucherpreise-12Kategorien.html>.

(DGUV, 2021)

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (2021): Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen. August 2021. Online verfügbar unter <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/3982>.

(Dietze, 2023)

Dietze, Carina: E-Autos: Wie werden die Batterien in Zukunft recycelt? 04.01.2023. Online verfügbar unter: https://efahrer.chip.de/news/e-autos-wie-werden-die-batterien-in-zukunft-recycelt_1010899.

(DIN, 2022)

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2022): ELSTA – Projekt zur Förderung der Elektromobilität durch Standardisierung, Koordination und Stärkung der öffentlichen Wahrnehmung. 25.01.2022. Online verfügbar unter <https://www.dke.de/de/arbeitsfelder/mobility/elsta>.

(Donaldson, 2022)

Donaldson, Peter (2022): Cell-to-pack batteries. In: E-Mobility Engineering 014, Volume Four | Issue Two, Summer 2022. Online verfügbar unter <https://www.emobility-engineering.com/magazine/eme014/>.

(Doose, 2021)

Doose, Stefan et al. (2021): Challenges in Ecofriendly Battery Recycling and Closed Material Cycles – A Perspective on Future Lithium Battery Generations. In: Metals 2021, 11, 291. Online verfügbar unter <https://www.mdpi.com/2075-4701/11/2/291>.

(Driftschröder, 2022)

Driftschröder, Anna (2022): Der Überlebenskampf der Batterierecycler. 13.10.2022. Online verfügbar unter <https://www.manager-magazin.de/unternehmen/energie/recycling-von-e-auto-batterien-wie-das-warten-auf-schrott-zum-ueberlebenskampf-fuer-batterie-recycler-wird-a-9147d34c-11b5-4b13-a024-924a4a620d29>.

(Duesenfeld, 2023)

Duesenfeld 2023: Home. 13.02.2023. Online verfügbar unter https://www.duesenfeld.com/index_de.html.

(DXC, 2023)

DXC Technology (2023): CDX – COMPLIANCE DATA EXCHANGE. 13.2.2023. Online verfügbar unter <https://public.mdsystem.com/de/web/imds-public-pages/cdx>.

(e-mobil BW, 2022)

e-mobil BW GmbH (2022): Die Produktionskette »Batteriesystem« und kritische Ressourcen. Februar 2022. Online verfügbar unter https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Themenpapier_Cluster_ESW_Produktionskette_Batteriesystem_und_kritische_Ressourcen.pdf.

(Edström, 2022)

Edström, Kristina et al. (2022): BATTERY 2030+ – Inventing the Sustainable Batteries of the Future. Februar 2022. Online verfügbar unter <https://battery2030.eu/research/roadmap/>.

(electrive.net, 2022)

electrive.net (2022): 99 Prozent aller Zoe-Akkus noch einsatzfähig. 10.05.2022. Online verfügbar unter <https://www.electrive.net/2022/05/10/reault-99-prozent-aller-zoe-akkus-noch-einsatzfaehig/>.

(electrive.net, 2023)

electrive.net (2023): Vulcan Energy will mehr Lithium im Oberrheingraben fördern. 13.02.2023. Online verfügbar unter <https://www.electrive.net/2023/02/13/vulcan-energy-will-mehr-lithium-im-oberrheingraben-foerdern/>.

(EU-Kommission, 2020a)

Europäische Kommission (2020): Study on the EU's list of Critical Raw Materials – Final Report (2020). September 2020. Online verfügbar unter https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en.

(EU-Kommission, 2020b)

Europäische Kommission (2020): Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU – A Foresight Study. September 2020. Online verfügbar unter https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en.

(EuRIC, 2023)

European Recycling Industries Confederation (2023): Kritische Rohstoffe – Recycling laut Industrie »kein Allheilmittel«. 08.03.2023. Online verfügbar unter <https://www.euractiv.de/section/energie-und-umwelt/news/kritische-rohstoffe-recycling-laut-industrie-kein-allheilmittel/>.

(Europäische Union, 2009)

Europäische Union (2009): Vertrag von Lissabon. 01.12.2009. Online verfügbar unter https://european-union.europa.eu/principles-countries-history/principles-and-values/aims-and-values_de.

(Europäische Union, 2021)

Europäische Union (2009): Verordnung (EU) 2019/631 [...] zur Festsetzung von CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge [...]. 02.12.2021. Online verfügbar unter <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/631/2021-12-02>.

(Europäische Union, 2023)

Europäische Union (2023): Verfahren 2020/0353/COD – [...] Verordnung [...] über Batterien und Altbatterien [...]. 18.01.2023. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/HIS/?uri=CELEX:52020PC0798>.

(Eurostat, 2019)

Statistical office of the European Union Eurostat (2023): Fewer cars stolen in most Member States. 04.11.2019. Online verfügbar unter <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20191104-1>.

(Eurostat, 2023)

Statistical office of the European Union Eurostat (2023): EU trade since 1988 by statistical procedure, by HS2-4-6 and CN8. Januar 2023. Online verfügbar unter <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/newxtweb/>.

(Fastmarkets, 2023)

Fastmarkets (2023): Metals and mining prices. 2023. Online verfügbar unter <https://www.fastmarkets.com/our-products/price-data/metals-and-mining-prices>.

(Fichtner, 2022)

Fichtner, Maximilian (2022): Recent Research and Progress in Batteries for Electric Vehicles. In: Batteries & Supercaps Volume 5, Issue 2, February 2022. Online verfügbar unter <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/batt.202100224>.

(Gaines, 2021)

Gaines, Linda et al. (2021): Direct Recycling R&D at the ReCell Center. In: Recycling 2021, 6(2). Online verfügbar unter <https://www.mdpi.com/2313-4321/6/2/31>.

(Gerlitz, 2021)

Gerlitz, Eduard et al. (2021): Cell-to-Pack-Technologie für Li-Ionen-Batterien – Aktueller Entwicklungsstand, Marktakteure in der Automobilindustrie und Auswirkungen auf eine nachhaltige Produktionstechnik unter dem Aspekt der Kreislaufwirtschaft. In: ZWF Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 116 (2021) 10: 689-694. Online verfügbar unter <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/zwf-2021-0146/html>.

(Hackmann, 2021)

Hackmann, Markus (2021): Current Technology Roadmap – Li-Ion and Next-Gen Technology Solutions for the Automotive Industry. Electrivate.net LIVE. 13.10.2021.

(Hackmann, 2022)

Hackmann, Markus (2022): Europe's position in a contested battery (raw) material market – challenges and potential approaches. Electrivate.net LIVE. 14.09.2022.

(Hagelüken, 2021)

Hagelüken, Christian (2021): Ein zweites Leben nicht für jede. Mai 2021. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/353665392_Ein_zweites_Leben_nicht_fur_jede_-_Das_Recycling_von_Lithium-Ionen-Batterien_stellt_hohe_Anforderungen_an_die_industrielle_Praxis.

(Hagmann, 2022)

Hagmann, Michael (2022): »CircuBAT« verbessert Ökobilanz der E-Mobilität. 31.3.2022. Online verfügbar unter <https://www.empa.ch/de/web/s604/circubat>.

(Handelsblatt, 2022)

Handelsblatt (2022): Lithium aus Altbatterien – Krefelder Unternehmen will erste Fertigung in Europa starten. 08.12.2022. Online verfügbar unter <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/rohstoff-recycling-lithium-aus-altbatterien-krefelder-unternehmen-will-erste-fertigung-in-europa-starten/28853490.html>.

(Handelsblatt, 2023)

Handelsblatt (2023): Batterie zur Wiederverwertung – So soll das Recycling bei Elektroautos gelingen. 01.02.2023. Online verfügbar unter <https://www.handelsblatt.com/mobilitaet/elektromobilitaet/autoindustrie-batterie-zur-wiederverwertung-so-soll-das-recycling-bei-elektroautos-gelingen/28957460.html>.

(Hucko, 2013)

Hucko, Margret (2013): Ausgeliehen und abgewürgt. 28.10.2013. Online verfügbar unter: <https://www.spiegel.de/auto/aktuell/elektroauto-renault-kann-aufladen-der-batterie-stoppen-a-930066.html>.

(IAO, 2022)

Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation
IAO (2022): Lebenszyklusorientierte Entwicklung von Fahrzeug-Komponenten. 11.05.2022. Online verfügbar unter <https://www.iao.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/aktuelles/lebenszyklusorientierte-entwicklung-von-fahrzeug-komponenten.html>.

(ICCT, 2020)

International Council on Clean Transportation (2020): Analyzing policies to grow the electric vehicle market in European cities. 23.02.2020. Online verfügbar unter <https://theicct.org/fordermasnahmen-fur-elektrofahrzeuge-im-europaischen-vergleich/>.

(INSTABAT, 2023)

INSTABAT (2023). 13.2.2023. Online verfügbar unter <https://www.instabat.eu/>.

(InsideEVs, 2021)

InsideEVs (2021): E-GMP-Akkus: So kommen die Größen 58, 73 und 77 kWh zustande. 13.10.2021. Online verfügbar unter <https://insideevs.de/news/540362/e-gmp-batteriegrossen-module-aufbau/>.

(InsideEVs, 2022)

InsideEVs (2022): MEB+ sorgt für 700 km Reichweite und bis zu 200 kW Ladeleistung. 08.12.2022. Online verfügbar unter <https://insideevs.de/news/625585/meb-700km-reichweite-200-kw/>.

(IPA, 2019)

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA (2019): Industrielle Demontage von Batteriemodulen und E-Motoren DeMoBat. 13.02.2023. Online verfügbar unter <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/DeMoBat.html>.

(IPA, 2020)

Informationsportal Abfallbewertung (2020): Abfallsteckbrief 1601 – Altfahrzeuge verschiedener Verkehrsträger. 01.04.2020. Online verfügbar unter <https://www.abfallbewertung.org/repgen.php?report=ipa>.

(IPA, 2021)

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA (2021): Roboter recycelt Batterien. 03.11.2021. Online verfügbar unter <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/roboter-recycelt-batterien.html>.

(IPCEI Batteries, 2022)

IPCEI on Batteries (2022): What is IPCEI on Batteries? 2022. Online verfügbar unter <https://www.ipcei-batteries.eu/about-ipcei>.

(IRS, 2021a)

THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien (2021): Ist die deutsche Ressourcenstrategie resilient? Mai 2021. Online verfügbar unter <https://www.thinktank-irs.de/>.

(IRS, 2021b)

THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien (2021): Resiliente Rohstoffversorgung und verantwortliche Lieferketten für die Industrie. Mai 2021. Online verfügbar unter <https://www.thinktank-irs.de/>.

(ISI, 2021a)

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI et al. (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. 03.05.2021. Online verfügbar unter <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/>.

(ISI, 2021b)

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2021): Quantifizierung Batterierecycling. Juni 2021. Online verfügbar unter <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/news/kurzversion-der-studie-quantifizierung-batterierecycling-vom-fraunhofer-isi-ist-online/>.

(ISI, 2022)

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2022): Europäische Batteriezellfertigung: Verzehnfachung der Produktionskapazitäten bis 2030. 15.07.2022. Online verfügbar unter <https://www.isi.fraunhofer.de/de/presse/2022/presseinfo-17-Batteriezellfertigung-Verzehnfachung-2030.html>.

(IWU, 2023)

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU (2023): Ein zweites Leben für Batterie, Getriebe und Zahnräder. 02.01.2023. Online verfügbar unter <https://www.iwu.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/PM-2023-ein-zweites-leben-fuer-batterie-getriebe-und-zahnraeder.html>.

(JARC, 2023)

Japan Automobile Recycling Promotion Center (2023): The Authorized Automotive Recycling Coordinator. 13.02.2023. Online verfügbar unter <https://www.jarc.or.jp/en/recycling/>.

(Kallitsis, 2022)

Kallitsis, Evangelos et al. (2022): Life cycle assessment of recycling options for automotive Li-ion battery packs. In: Journal of Cleaner Production, Volume 371, 15 October 2022, 133636. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622032140>.

(KBA, 2022)

Kraftfahrt-Bundesamt (2022): Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter (FZ 15). März 2022. Online verfügbar unter https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Fahrzeugalter/fahrzeugalter_node.html.

(Köllner, 2022)

Köllner, Christiane (2022): Regeln für Batterieexporte erforderlich. 04.08.2022. Online verfügbar unter <https://www.springerprofessional.de/batterie/nachhaltigkeit/regeln-fuer-batterieexporte-erforderlich/23246978>.

(KU Leuven, 2022)

KU Leuven (2022): Metals for Clean Energy – Pathways to solving Europe's raw materials challenge. April 2022. Online verfügbar unter <https://eurometaux.eu/media/jmxf2qm0/metals-for-clean-energy.pdf>.

(KYBURZ, 2023)

KYBURZ Switzerland AG (2023): KYBURZ MultiLife Konzept. 2023. Online verfügbar unter <https://kyburz-switzerland.ch/de/MultiLife>.

(Lander, 2021)

Lander, Laura et al. (2021): Financial viability of electric vehicle lithium-ion battery recycling. 23.07.2021. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589004221007550>.

(Leichsenring, 2022)

Leichsenring, Stefan (2022): Aus für die Batteriemiete durch Verbraucherschutz-Klage? 13.02.2023. Online verfügbar unter <https://insideevs.de/news/613422/batteriemiete-abschaltmoeglichkeit-renault-bundesgerichtshof/>.

(Leicht, 2022)

Liecht, Luca; Vitale, Sandro; Setlili, Daniel (2022): Gebrauchtwagen ohne Akku – was zu beachten ist. 10.02.2023. Online verfügbar unter <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/elektro-gebrauchtwagen-kaeufers-miet-batterie-akku-vertrag-uebernehmen-oder-kaufen/>.

(LRP, 2023)

LRP-Autorecycling GmbH (2023): Home. 13.02.2023. Online verfügbar unter <https://www.lrp-autorecycling.de/>.

(Maisel, 2023)

Maisel, Franziska et al. (2023): A forecast on future raw material demand and recycling potential of lithium-ion batteries in electric vehicles. In: Resources, Conservation and Recycling Volume 192, May 2023, 106920. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344923000575>.

(Neumann, 2022)

Neumann, Jonas et al. (2022): Recycling von Lithium-Ionen-Batterien – aktueller Stand der Technik, Kreislaufwirtschaft und Recycling der nächsten Generation. 10.01.2022. Online verfügbar unter <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aenm.202102917>.

(Nolting, 2008)

Nolting, Katrin et al. (2008): Kooperieren – aber wie? Ein Leitfaden zum Aufbau von Kooperationsbeziehungen zwischen Lokalen-Agenda-21-Initiativen und Akteuren aus Wirtschaft und Wissenschaft. Juni 2008. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kooperieren-aber-wie>.

(NPM, 2021)

Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (2021): Batterierecyclingmarkt Europa – Chance für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft. September 2021. Online verfügbar unter <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/2download/batterierecyclingmarkt-europa-chance-fuer-eine-nachhaltige-kreislaufwirtschaft/>.

(NOW, 2020)

Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie NOW GmbH (2020): NOW-Factsheet – Elektromobilität und Recycling. 25.09.2020. Online verfügbar unter <https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/now-factsheet-elektromobilitaet-und-recycling/>.

(OHLF, 2021)

Open Hybrid LabFactory (OHLF): Forschungsprojekt ZIRKEL. 01.10.2021. Online verfügbar unter <https://open-hybrid-lab-factory.de/forschung-projekte/projektverband/zirkel>.

(Öko-Institut, 2011)

Öko-Institut e.V. (2011): European second-hand car market analysis. 24.02.2011. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/publikationen/p-details/european-second-hand-car-market-analysis-final-report>.

(Öko-Institut, 2018)

Öko-Institut e.V. (2018): Assessment of the implementation of the ELV Directive with emphasis on ELVs unknown whereabouts. 26.03.2018. Online verfügbar unter <https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/1ca32beb-316a-11e8-b5fe-01aa75ed71a1>.

(Öko-Institut, 2022)

Öko-Institut e.V. (2022): Gebrauchte Lithium-Ionen-Akkus nach Afrika spenden? Klare Regeln dringend nötig. 20.6.2022. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/presse/archiv-presse-meldungen/presse-detailseite/2022/gebrauchte-lithium-ionen-akkus-nach-afrika-spenden-klare-regeln-dringend-noetig>.

(Olivetti, 2017)

Olivetti, Elsa A. et al. (2017): Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations – Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals. 11.10.2017. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435117300442>.

(Porsche, 2023)

Porsche (2023): Porsche Drive Abo – Passend für jede Lebenssituation. 10.02.2023. Online verfügbar unter <https://finder.porsche.com/de/de-DE/driveabo>.

(Puls, 2021)

Puls, Thomas (2021): Strukturwandel in der Automobilindustrie – wirkt die Pandemie als Beschleuniger? In: ifo Schnelldienst, 2021, 74, Nr. 05, 03–35. Online verfügbar unter <https://www.ifo.de/publikationen/2021/aufsatz-zeitschrift/strukturwandel-der-automobilindustrie-wirkt-die-pandemie-als>.

(Rat der EU, 2023a)

Rat der EU, Europäischer Rat (2023): »Fit für 55« – Rat nimmt Verordnung über CO₂-Emissionen für neue Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge an. 28.03.2023. Online verfügbar unter <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/03/28/fit-for-55-council-adopts-regulation-on-co2-emissions-for-new-cars-and-vans/>.

(Rat der EU, 2023b)

Rat der EU, Europäischer Rat (2023): Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries. 18.01.2023. Online verfügbar unter <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2022/12/09/council-and-parliament-strike-provisional-deal-to-create-a-sustainable-life-cycle-for-batteries/>.

(Redwood, 2023)

Redwood Materials Inc. (2023): One year update – Redwood's California EV Battery Recycling Program. 02.03.2023. Online verfügbar unter <https://www.redwoodmaterials.com/news/update-california-ev-battery-recycling-program/>.

(Regett, 2019)

Regett, Anika (2019): Der Weg zu zirkulären Geschäftsmodellen für Elektrofahrbatterien. In: ET. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 69(9):66–70, September 2019. Online verfügbar unter <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/der-weg-zu-zirkulaeren-geschaeftsmodellen-fuer-elektrofahrbatterien/>.

(Regierung, 2021)

Regierungskoalition (2021): Mehr Fortschritt wagen – Koalitionsvertrag zwischen SPD, BÜNDNIS 90/ DIE GRÜNEN und FDP. November 2021. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/gesetzesvorhaben/koalitionsvertrag-2021-1990800>.

(Renault, 2023)

Renault Financial Services (2023): Tarife. 10.02.2023. Online verfügbar unter <https://www.renaultfs.de/kundenservice/batteriemiettarife>.

(R+V, 2023)

R+V Allgemeine Versicherung AG (2023): E-Auto-Entsorgung – Alles Wissenswerte zum Stromer-Recycling. 13.2.2023. Online verfügbar unter <https://www.ruv.de/kfz-versicherung/magazin/rund-ums-auto/elektroauto-verschrotten>.

(RWTH, 2021)

RWTH Aachen (2021): Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. Juni 2021. Online verfügbar unter <https://www.pem.rwth-aachen.de/cms/PEM/Der-Lehrstuhl/Presse-Medien/Aktuelle-Meldungen/~purpi/Recycling-Broschuere/>.

(RWTH, 2022)

RWTH Aachen (2022): Battery Atlas 2022. August 2022. Online verfügbar unter <https://www.pem.rwth-aachen.de/cms/PEM/Der-Lehrstuhl/Presse-Medien/Aktuelle-Meldungen/~wieib/PEM-buendelt-Marktaktivitaeten-in-europa/>.

(Schaal, 2022)

Schaal, Sebastian (2022): Li-Cycle startet Recycling-Kooperation mit Vingroup-Tochter. 04.11.2022. Online verfügbar unter <https://www.electrive.net/2022/11/04/li-cycle-startet-recycling-kooperation-mit-vingroup-tochter/>.

(Schäfer, 2022)

Schäfer, Patrick (2022): Standards für Recycling können Batteriekosten senken. 13.01.2022. Online verfügbar unter <https://www.springerprofessional.de/batterie/robotik/standards-fuer-recycling-koennen-batteriekosten-senken/20027390>.

(Schwarzer, 2022)

Schwarzer, Christoph M. (2022): Elektroauto – Batterie-Recycling wird Vorschrift. 20.12.2022. Online verfügbar unter <https://www.heise.de/hintergrund/Elektroautos-Batterie-Recycling-wird-Vorschrift-7400812.html>.

(Sciurti, 2022)

Sciurti, Domenico (2022): Wie China bis 2025 ein vollständiges Batterierecycling-System aufbauen will. 10.02.2022. Online verfügbar unter: <https://www.electrive.net/2022/02/10/wie-wiederverwendung-und-recycling-von-batterien-in-china-ausgebaut-werden-muessen/>.

(Shanghai Metals Market, 2023)

Shanghai Metals Market (2023): Markets. 2023. Online verfügbar unter <https://www.metal.com/price>.

(Sojka, 2020)

Sojka, Reiner et al. (2020): Comparative study of Li-ion battery recycling processes. September 2020. Online verfügbar unter <https://accurec.de/wp-content/uploads/2021/04/Accurec-Comparative-study.pdf>.

(Statista, 2020)

Statista (2020): Pfandsysteme in Europa. 02.06.2020. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/infografik/21881/aktive-und-geplante-einweg-pfandsysteme-in-europa/>.

(Statista, 2021)

Statista (2021): E-Mobilität. 22.07.2021. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/infografik/25389/prognose-zur-weltweiten-nachfrage-nach-lithium-ionen-batterien-fuer-elektrofahrzeuge-nach-regionen/>.

(Strategy&, 2022a)

Strategy& (2022): The Dawn of Electrified Trucking. Oktober 2022. Online verfügbar unter <https://www.electrive.net/2022/10/04/studie-e-lkw-ab-anfang-der-2030er-jahre-marktfuehrend/>.

(Strategy&, 2022b)

Strategy& (2022): Gigafactories & Raw Materials – The key to successful battery EV adoption. August 2022. Online verfügbar unter <https://www.strategyand.pwc.com/de/en/industries/energy-utilities/gigafactories-and-raw-materials.html>.

(Süddeutsche, 2020)

Süddeutsche (2020): Und der Akku hält und hält. 03.01.2020. Online verfügbar unter <https://www.sueddeutsche.de/auto/tesla-batterie-haltbarkeit-1.4714730>.

(Swobbee, 2023)

Swobbee (2023): Das Akku-Wechselnetzwerk. 10.02.2023. Online verfügbar unter <https://swobbee.de/>.

(Teichert, 2020)

Teichert, Matthias Achim et al. (2020). Das Abo-Model – der Game Changer im Automotive?. In: Proff, H. (eds) Neue Dimensionen der Mobilität. Springer Gabler, Wiesbaden.

(Temple, 2005)

Temple, Paul et al. (2005): The Empirical Economics of Standards. Juni 2005. Online verfügbar unter https://www.immagic.com/eLibrary/ARCHIVES/GENERAL/UK_DTI/T050602D.pdf.

(T&E, 2021)

Transport & Environment (2021): From dirty oil to clean batteries. März 2021. Online verfügbar unter <https://www.transportenvironment.org/discover/batteries-vs-oil-comparison-raw-material-needs/>.

(T&E, 2023a)

Transport & Environment (2023): How not to lose it all. März 2023. Online verfügbar unter <https://www.transportenvironment.org/discover/two-thirds-of-european-battery-production-at-risk-analysis/>.

(T&E, 2023b)

Transport & Environment (2023): A European Response to US IRA. Januar 2023. Online verfügbar unter <https://www.transportenvironment.org/discover/a-european-response-to-us-inflation-reduction-act/>.

(THINKTANK, 2020)

THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien (2020): Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität – Status, Zukunftsperspektiven & Recycling. März 2020. Online verfügbar unter https://egg.agw.kit.edu/65_441.php.

(TRADING ECONOMICS, 2023)

TRADING ECONOMICS (2023): Commodities. 2023. Online verfügbar unter <https://tradingeconomics.com/commodities>.

(Trinomics, 2020)

Trinomics B.V. (2020): Supporting the Evaluation of the Directive 2000/53/EC on end-of-life vehicles. August 2020. Online verfügbar unter <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/c2704e61-ebfb-11ea-b3c6-01aa75ed71a1>.

(TU Chemnitz, 2023)

TU Chemnitz (2023): TU Chemnitz erforscht automatisierte Demontage von Fahrzeugbatterien. 15.03.2023. Online verfügbar unter <https://www.tu-chemnitz.de/tu/pressestelle/2023/03.15-14.57.html>.

(UBA, 2017)

Umweltbundesamt (2017): Entwicklung von Lösungsvorschlägen, einschließlich rechtlicher Instrumente, zur Verbesserung der Datenlage beim Verbleib von Altfahrzeugen. Juni 2017. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-von-loesungsvorschlaegen>.

(UBA, 2020)

Umweltbundesamt (2020): Effectively tackling the issue of millions of vehicles with unknown whereabouts. Juli 2020. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/effectively-tackling-the-issue-of-millions-of>.

(UBA, 2021)

Umweltbundesamt (2021): Altfahrzeugverwertung und Fahrzeugverbleib. 02.08.2021. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altfahrzeugverwertung-fahrzeugverbleib#2019-knapp-eine-halbe-million-altfahrzeuge>.

(UNEP, 2021)

United Nations Environment Programme (2021): Used Vehicles and the Environment – Update and Progress 2021. 11.11.2021. Online verfügbar unter <https://www.unep.org/resources/report/used-vehicles-and-environment-progress-and-updates-2021>.

(USGS, 2022)

U.S. Geological Survey (2022): Mineral commodity summaries 2022 – U.S. Geological Survey. 31.01.2022. Online verfügbar unter <https://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2022>.

(vbw, 2022)

Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e. V. (2022): Rohstoffsituation der bayerischen Wirtschaft. Dezember 2022. Online verfügbar unter <https://www.vbw-bayern.de/vbw/Themen-und-Services/Rohstoffe-Ressourcen/Rohstoffsituation-der-bayerischen-Wirtschaft-16.jsp>.

(VDI/VDE IT, 2022a)

VDI/VDE Innovation + Technik GmbH (2022): IPCEI Batteries, Market analysis | Q2 2022 – Heavy Commercial Vehicles Boost Future Battery Demand. Mai 2022. Online verfügbar unter <https://www.ipcei-batteries.eu/accompanying-research/media-publications>.

(VDI/VDE IT, 2022b)

VDI/VDE Innovation + Technik GmbH (2022): The importance of regional value creation structures in the battery industry. September 2022. Online verfügbar unter <https://vdivde-it.de/en/publication/study-importance-regional-value-creation-structures-battery-industry>.

(VDE, 2015)

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (2015): Kompendium – Li-Ionen-Batterien. Juli 2015. Online verfügbar unter <https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/IKT-EM/ikt2-komp-lithium-ionen.pdf>.

(Vekić, 2020)

Vekić, Nikola (2020): Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität – Status, Zukunftsperspektiven, Recycling. März 2020. Online verfügbar unter <https://egg.agw.kit.edu/img/Lithium-Ionen-Batterien%20f%C3%BCr%20die%20Elektrom.pdf>.

(Velázquez-Martínez, 2019)

Velázquez-Martínez, Omar et al. (2019): A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective. In: Batteries 2019, 5(4), 68. Online verfügbar unter <https://www.mdpi.com/2313-0105/5/4/68>.

(Volvo, 2023)

Volvo (2023): Das flexible Auto-Abo. 10.02.2023. Online verfügbar unter <https://www.volvocars.com/de/care-by-volvo/>.

(VW, 2023)

VW (2023): Das Volkswagen AutoAbo. 10.02.2023. Online verfügbar unter <https://www.volkswagen.de/de/angebote-und-produkte/autoabo.html>.

(WEF, 2019)

World Economic Forum (2019): A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030. September 2019. Online verfügbar unter <https://www.weforum.org/reports/a-vision-for-a-sustainable-battery-value-chain-in-2030>.

(Witsch, 2022)

Witsch, Kathrin (2022): Lithium aus Altbatterien – Krefelder Unternehmen will erste Fertigung in Europa starten. 08.12.2022. Online verfügbar unter: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/rohstoff-recycling-lithium-aus-altbatterien-krefelder-unternehmen-will-erste-fertigung-in-europa-starten/28853490.html>.

(Zellweger, 2022)

Zellweger, Sophie (2022): Ambitionierte Nachhaltigkeitsziele können nur mit Kooperationen erreicht werden. 18.09.2022. Online verfügbar unter: <https://www.sustainableschweiz.ch/themendossier/ambitionierte-nachhaltigkeitsziele-koennen-nur-mit-kooperationen-erreicht-werden-id.685>.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zurückliegender und prognostizierter Bedarf an Batteriezellen in Europa	9
Abbildung 2:	Im Jahr 2022 für Europa angekündigte Standorte zur Herstellung von Batteriezellen	10
Abbildung 3:	Entwicklung des durchschnittlichen Materialeinsatzes pro kWh und Anteile unterschiedlicher Zusammensetzungen an allen hergestellten Batteriezellen	12
Abbildung 4:	Bedarf an Aktivmaterialien in Europa auf Basis der prognostizierten benötigten Energiekapazität (siehe Abbildung 1) und des Materialeinsatzes pro kWh (siehe Tabelle 1)	12
Abbildung 5:	Beiträge zur weltweit verfügbaren Menge bis zum Jahr 2022	13
Abbildung 6:	Produzierte Primärrohstoffmengen für die betrachteten Aktivmaterialien	15
Abbildung 7:	In der Europäischen Union vorgeschriebene Effizienz im Recyclingprozess bei Aktivmaterialien für Traktionsbatterien	17
Abbildung 8:	Im Jahr 2022 in Betrieb genommene sowie geplante Recyclingkapazitäten in Europa	18
Abbildung 9:	Prognose in Europa mittels Recycling erzielbarer Mengen an Rezyklat	19
Abbildung 10:	Durch Rezyklat (siehe Abbildung 9) abdeckbarer Anteil des Bedarfs für die in Europa angekündigten Produktionskapazitäten (siehe Abbildung 4)	21
Abbildung 11:	Ziel der meisten im Jahr 2020 aus der Europäischen Union exportierten Fahrzeuge	25
Abbildung 12:	Ziele der weiteren im Jahr 2020 aus der Europäischen Union exportierten Fahrzeuge	26
Abbildung 13:	Verbleib der Fahrzeuge am Ende ihres Lebenszyklus in Europa im Durchschnitt in der zurückliegenden Zeit bis zum Jahr 2022	26
Abbildung 14:	Verbleib von Fahrzeugen vor dem Ende ihres Lebenszyklus in Europa im Durchschnitt in der zurückliegenden Zeit bis zum Jahr 2022	27
Abbildung 15:	Lebenszyklus einer Traktionsbatterie einschließlich Wiederverwendung und Recycling	29
Abbildung 16:	Schritte und Verfahren für das Recycling von Traktionsbatterien sowie Kombinationsmöglichkeiten	31
Abbildung 17:	Angenommene aktuelle sowie prognostizierte Kosten für das Recycling von Traktionsbatterien, bezogen auf deren Energiekapazität, mit unterschiedlichen Verfahren	35
Abbildung 18:	Preis für Lithiumkarbonat in den Jahren 2018–2023	36
Abbildung 19:	Preis für Nickelmetall 2018–2023	38
Abbildung 20:	Preis für Mangansulfat in den Jahren 2018–2023	40
Abbildung 21:	Preis für Kobaltsulfat in den Jahren 2018–2023	41
Abbildung 22:	Preis für Flockengraphit in den Jahren 2018–2023	42
Abbildung 23:	Preis des Primärrohstoffs und Kosten des Rezyklats im Jahr 2023 und prognostiziert für das Jahr 2035	43
Abbildung 24:	Gegenüberstellung prognostizierter recycelbarer Materialien und angekündigter Recyclingkapazitäten	46
Abbildung 25:	Informations- und Materialflüsse beim »Design for Recycling«	50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Durchschnittlicher Materialeinsatz in Traktionsbatterien pro kWh	12
Tabelle 2:	Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken der als »Second Life« bezeichneten Wiederverwendung von Traktionsbatterien am Ende ihres Lebenszyklus im Fahrzeug	30
Tabelle 3:	Preis für vollständig (zu 100 %) zurückgewonnenes Lithiumkarbonat bei der heute pro kWh eingesetzten Menge (siehe Tabelle 1)	37
Tabelle 4:	Preis für zu 90 % zurückgewonnenes Nickel bei der heute pro kWh eingesetzten Menge (siehe Tabelle 1)	39
Tabelle 5:	Ausstoß von Emissionen beim Recycling von Traktionsbatterien und der Förderung von Primärrohstoffen	44

Abkürzungsverzeichnis

AVV	Abfallverzeichnis-Verordnung
B2B	Business-to-Business
B2C	Business-to-Consumer
CO ₂ eq	CO ₂ equivalent (CO ₂ -Äquivalent; Maß für den Vergleich der Emissionen unterschiedlicher Emittenten)
i. B.	im Bau
IPCEI	Important Project of Common European Interest (wichtiges Projekt von gemeinsamem europäischem Interesse)
LCO	Lithium-Kobalt-Oxid
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat
Lkw	Lastkraftwagen
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid
Pkw	Personenkraftwagen
USA	United States of America (Vereinigte Staaten von Amerika)
V2G	Vehicle to Grid
xEV	Sammelbegriff für batterieelektrische, Hybrid- oder Plug-in-Hybrid Fahrzeuge

Impressum

Herausgeber

Cluster Elektromobilität Süd-West c/o e-mobil BW GmbH –
Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg

Autoren

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO
Daniel Borrmann, Dr. Florian Herrmann, Sebastian Stegmüller, Lukas Block, Lukas Keicher

Redaktion und Koordination des Themenpapiers

e-mobil BW GmbH
Felicitas Behr, Walter Holderried

Layout/Satz/Illustration

markentrieb
Die Kraft für Marketing und Vertrieb

Fotos

Umschlag: © Gerardo Carnero/istockphoto
Die Quellennachweise aller weiteren Bilder befinden sich auf der jeweiligen Seite.

Auslieferung und Vertrieb

e-mobil BW GmbH, Leuschnerstraße 45, 70176 Stuttgart
Telefon +49 711 892385-0, Fax +49 711 892385-49, info@e-mobilbw.de, www.e-mobilbw.de

Mai 2023

© Copyright liegt bei den Herausgebern

Alle Rechte vorbehalten. Dieses Werk ist einschließlich seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Herausgebers unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Für die Richtigkeit der Herstellerangaben wird keine Gewähr übernommen.



www.e-mobilbw.de

e-mobil BW GmbH

Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und
Automotive Baden-Württemberg

Leuschnerstraße 45 | 70176 Stuttgart
Telefon +49 711 892385-0 | Fax +49 711 892385-49
info@e-mobilbw.de

