

Bähr, Cornelius; Bakalis, Dennis; Lichtenthäler, Sarah

Research Report

Umsetzung der EU-Batterieverordnung in Deutschland: Eine Analyse der Rohstoff- und Rezyklatbedarfe für die Elektromobilität und stationäre Stromspeicherung

IW-Report, No. 44/2024

Provided in Cooperation with:

German Economic Institute (IW), Cologne

Suggested Citation: Bähr, Cornelius; Bakalis, Dennis; Lichtenthäler, Sarah (2024) : Umsetzung der EU-Batterieverordnung in Deutschland: Eine Analyse der Rohstoff- und Rezyklatbedarfe für die Elektromobilität und stationäre Stromspeicherung, IW-Report, No. 44/2024, Institut der deutschen Wirtschaft (IW), Köln

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/307591>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



Umsetzung der EU-Batterieverordnung in Deutschland

Eine Analyse der Rohstoff- und Rezyklatbedarfe für die Elektromobilität und stationäre Stromspeicherung

Cornelius Bähr / Dennis Bakalis / Sarah Lichtenthäler

Köln, 29.11.2024

IW-Report 44/2024

Wirtschaftliche Untersuchungen,
Berichte und Sachverhalte



Herausgeber

Institut der deutschen Wirtschaft Köln e. V.

Postfach 10 19 42

50459 Köln

Das Institut der deutschen Wirtschaft (IW) ist ein privates Wirtschaftsforschungsinstitut, das sich für eine freiheitliche Wirtschafts- und Gesellschaftsordnung einsetzt. Unsere Aufgabe ist es, das Verständnis wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Zusammenhänge zu verbessern.

Das IW in den sozialen Medien

x.com

[@iw_koeln](#)

LinkedIn

[@Institut der deutschen Wirtschaft](#)

Instagram

[@IW_Koeln](#)

Ansprechpartner

Cornelius Bähr

Senior Consultant

baehr@iwkoeln.de

0221 – 4981-797

Dr. Thilo Schaefer

Leiter des Clusters Digitalisierung und Klimawandel

thilo.schaefer@iwkoeln.de

0221 – 4981-791

Alle Studien finden Sie unter

www.iwkoeln.de

In dieser Publikation wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit regelmäßig das grammatische Geschlecht (Genus) verwendet. Damit sind hier ausdrücklich alle Geschlechteridentitäten gemeint.

Stand:

Oktober 2024

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Zusammenfassung	4
1 Einleitung	5
2 Entwicklungen im Ausbau von Stromspeicherkapazitäten	7
2.1 Ausbaustand stationärer Batteriespeicher und Bestand an Elektrofahrzeugen.....	7
2.2 Ziele und Prognosen zur weiteren Entwicklung	9
3 Rohstoffbedarfe und Recycling	12
3.1 Status quo im Batterierecycling	12
3.2 Etablierte Zellchemien in Batteriesystemen nach Anwendungsfall	13
3.3 Vorgaben der EU-Batterieverordnung	15
4 Methodik.....	17
4.1 Datenaufbereitung	17
4.2 Modellstruktur.....	18
4.3 Aufbau des Basisszenarios.....	21
5 Ergebnisse	22
5.1 Ergebnisse im Basisszenario	22
5.2 Effekte eines verzögerten Markthochlaufs der E-Mobilität	26
5.3 Relevanz des Recyclingmaterials aus der E-Mobilität für stationäre Batteriespeichersysteme	29
6 Fazit	32
7 Abstract.....	34
Anhang: Ergänzende Abbildungen	35
Tabellenverzeichnis.....	38
Abbildungsverzeichnis.....	38
Abkürzungsverzeichnis	39
Literaturverzeichnis	40

JEL-Klassifikation

O30 – Innovation; Research and Development; Technological Change; Intellectual Property Rights; General

Q30 – Nonrenewable Resources and Conservation; General

Q55 – Environmental Economics; Technological Innovation

Q56 – Environmental Economics; Environment and Development; Environment and Trade; Sustainability;
Environmental Accounts and Accounting; Environmental Equity; Population Growth

Zusammenfassung

Dieser Report setzt sich mit der Erreichbarkeit der Vorgaben der EU-Batterieverordnung in Deutschland auseinander, wenn neben den benötigten Rohstoffen für den Hochlauf der Elektromobilität auch der Zubau stationärer Batteriespeichersysteme berücksichtigt wird. Für die Analyse wurde dabei ein Modell entwickelt, welches die Wechselwirkungen zwischen beiden Märkten einbezieht – insbesondere hinsichtlich einer Second-Life-Anwendung der Fahrzeugbatterien für die stationäre Stromspeicherung. Im Fokus stehen die Verfügbarkeiten von rezyklierten Lithium, Nickel und Kobalt. Um zu beurteilen, ob das in einem Jahr anfallende Rezyklat den Bedarf im jeweiligen Jahr decken kann, wird der Saldo aus Rezyklatverfügbarkeit und -nachfrage jeweils in Jahresscheiben betrachtet.

Hauptergebnisse: In Deutschland werden für Lithium, Nickel und Kobalt temporäre Rezyklatengpässe erwartet. Diese Engpässe fallen hinsichtlich der Verfügbarkeit von Rezyklat aus Kobalt am problematischsten aus. Der Rezyklatbedarf im Bereich der stationären Batteriespeichersysteme ist insbesondere für Lithium und Kobalt auf das Recyclingmaterial aus der Elektromobilität angewiesen. Wenn der Markthochlauf der Elektromobilität in Deutschland nicht kontinuierlich voranschreitet, sondern sich zunächst verzögert und dann mit stärkerem Momentum ansteigt, werden die Rezyklatknappheiten weiter verstärkt.

Batterierecycling vor Ort mindert Rohstoffabhängigkeiten: Während temporäre Rezyklatknappheiten in Deutschland absehbar sind, kann der Export gebrauchter Elektrofahrzeuge diese Knappheiten weiter verstärken. Der Export der Fahrzeuge führt dazu, dass die in den Fahrzeugen gebundenen Rohstoffe der inländischen Produktion nicht mehr zur Verfügung stehen. Um die Resilienz der Rohstoffversorgung zu erhöhen, ist daher der Ausbau der Recyclingkapazitäten von hoher Bedeutung.

Batteriezellforschung steigert die Wettbewerbsfähigkeit: Elektrofahrzeuge und stationäre Speichersysteme beruhen bislang vor allem auf lithiumbasierten Zellchemien. Während in der Elektromobilität ein höherer Marktanteil auf NMC-Zellchemien und im Bereich stationärer Batteriespeicher ein höherer Marktanteil auf LFP-Zellchemien zurückgeht, zeigt sich generell mit der Zeit eine Entwicklung hin zu kobaltärmeren Batterien. Die Batteriezellforschung ist dabei ein wichtiger Hebel, da mit ihr sowohl bestehende Lithium-Ionen-Batterien hinsichtlich ihres Rohstoffbedarfs optimiert als auch alternative Zellchemien wie Natrium-Ionen-Batterien für einen Markthochlauf vorbereitet werden können. Das Beenden der projektbasierten Förderungen zur Batteriezellforschung, wie im aktuellen Entwurf des Bundeshaushaltsplans 2025 vorgesehen, kann dazu führen, dass Deutschland in dieser Zukunftstechnologie an Wettbewerbsfähigkeit einbüßt.

Bestehende Zielkonflikte im Normengerüst der EU-Batterieverordnung: Die Vorgaben der Rezyklatquoten beziehen sich indirekt auf spezifische Annahmen zum weiteren Markthochlauf der Elektromobilität und der stationären Stromspeicherung. Weicht der tatsächliche Markthochlauf von diesen Annahmen ab, werden die Vorgaben der Rezyklatquoten schwerer erreicht. Dabei ist es weder erstrebenswert, aufgrund der starren Rezyklatquoten die inländische Batterieproduktion zu bremsen, noch die Weiternutzung der Fahrzeugbatterien (Second Life) einzuschränken. Daher ist es notwendig, in den vorgeschriebenen Quoten Anpassungsbereitschaft zu zeigen oder die nicht intendierten Konsequenzen eines Verfehlens der Vorgaben zu tragen.

1 Einleitung

Deutschland hat sich das Ziel gesetzt, bis 2045 klimaneutral zu werden. Für eine erfolgreiche Energiewende ist dabei der Ausbau der erneuerbaren Energien (EE) von zentraler Bedeutung. Denn nicht nur die bisherigen Stromverbraucher müssen auf regenerativen Strom umgestellt werden, sondern durch die Elektrifizierung von Industrieanlagen, die E-Mobilität und die elektrische Wärmeerzeugung kommen auch weitere neue Stromverbraucher hinzu, die EE-Strom nachfragen. Hier wurde im Jahr 2023 ein Meilenstein erreicht, als mit 51,8 Prozent erstmals mehr als die Hälfte des gesamten jährlichen Bruttostromverbrauchs durch EE gedeckt wurde. Im Jahr 2000 lag dieser Anteil noch bei 6,3 Prozent (UBA/AGEE, 2024).

Die volatilen Einspeiseprofile von Photovoltaik (PV)- und Windenergieanlagen führen dabei zu einer steigenden Nachfrage nach Flexibilität im Stromsystem, da für eine kontinuierliche Stromversorgung eine konstante Netzfrequenz durch sowohl den zeitlichen als auch den regionalen Ausgleich von Stromerzeugung und -nachfrage gewährleistet sein muss (Bakalis/Lichtenthäler, 2024). Im Zuge dessen nehmen auch Stromspeicher eine immer wichtigere Rolle im Energiesystem ein. Denn stationäre batterieelektrische Speichersysteme (BESS) – ob in Form von Heimspeichern, Gewerbe- oder Großspeichern –, können bei einem netzdienlichen Betrieb das Stromnetz entlasten und ermöglichen gleichzeitig eine höhere Integration von EE. Weiteres Flexibilisierungspotenzial könnte perspektivisch auch durch den Markthochlauf der E-Mobilität („mobile Speicher“) realisiert werden, welcher auch für die Dekarbonisierung des Verkehrssektors von hoher Bedeutung ist. Die Schlüsselrolle der Flexibilität für eine Transformation des Energiesystems wurde zuletzt durch die EU-Verordnung zur Verbesserung des Elektrizitätsmarktdesigns (Verordnung (EU) 2024/1747) in den Vordergrund gerückt. In Deutschland sind mit der Stromspeicherstrategie Ende 2023 bereits erste Schritte gemacht worden, um den Markthochlauf stationärer BESS zu unterstützen (BMWK, 2023). Sowohl für stationäre BESS als auch für Elektrofahrzeuge besteht dabei eine Herausforderung darin, dass deren Herstellung kritische Rohstoffe wie Lithium, Kobalt und Nickel benötigt. Da diese innerhalb der EU nicht im hinreichenden Maß vorkommen, muss ein Großteil der Rohstoffe aus anderen Ländern importiert werden. Rund 63 Prozent des Kobalts für Batterien werden derzeit aus der Demokratischen Republik Kongo importiert, während 60 Prozent in China weiterverarbeitet werden (Europäische Kommission, 2023). Um die Resilienz der Rohstoffversorgung zu erhöhen, wurden im Critical Raw Materials Act (Verordnung (EU) 2024/1252) explizite Ziele zur Erhöhung der Recyclingkapazitäten beschlossen, die den Aufbau einer Recyclingwirtschaft incentivieren. So sollen am Ende der Lebenszeit eines Produkts die darin gebundenen kritische Rohstoffe weiter im Inland nutzbar gemacht werden, statt dass sie erst im Ausland dem Recycling zugeführt werden.

Mit der EU-Batterieverordnung (Verordnung (EU) 2023/1542) werden nun weitere Maßnahmen adressiert, welche zu einer nachhaltigen Verwendung von Batterien und den darin enthaltenen Rohstoffen führen sollen und in Folge der Grundsätze europäischer Politik auch in die deutsche Gesetzgebung Einzug halten werden. In ihr werden spezifische Sammelquoten, Recyclingeffizienzen und Rezyklatgehalte für verschiedene Batterien festgeschrieben. Berücksichtigt sind dabei neben den in der E-Mobilität verbauten Fahrzeugbatterien auch Industriebatterien, welche in ihrer Definition ebenfalls die in Deutschland verbreiteten Heimspeicher zur PV-Eigenstromverbrauchsoptimierung inkludieren. Hinsichtlich der erforderlichen Rezyklatgehalte, welche bei der Herstellung neuer Batterien ab 2031 einzuhalten sind, stellt sich nun die Frage, woher das benötigte Recyclingmaterial kommt. Denn sowohl im Bereich stationärer BESS als auch in der E-Mobilität ist hinsichtlich der aktuellen Ziele ein starker Markthochlauf vorgesehen, welcher die Versorgung mit den entsprechenden Mengen an Primärmaterial erfordert. Aufgrund der vergleichsweise hohen Lebensdauer stationärer BESS in Kombination mit deren erst seit 2015 an Fahrt aufnehmenden Markthochlaufs ist absehbar, dass im

Jahr 2031 die Anzahl der zu recycelnden BESS eher gering ausfallen dürfte. Es ist anzunehmen, dass deshalb auch für neue stationäre BESS zunächst Recyclingmaterial aus ehemaligen Fahrzeugbatterien benötigt wird. Werden außer Betrieb gesetzte Fahrzeuge am Ende ihrer Lebenszeit hingegen exportiert und nicht dem Recyclingkreislauf vor Ort zugeführt, könnte eine potenzielle Rezyklatknappheit verschärft werden (Lichtenthäler/Bähr, 2024).

In einer Analyse der zu erwartenden Verfügbarkeit von Recyclingmaterialien mit Fokus auf der E-Mobilität kommen Lichtenthäler/Bähr (2024) zu dem Schluss, dass die europäische Fahrzeugindustrie für sich genommen nur knapp in der Lage sein wird, die notwendigen Rezyklatgehalte für neue Fahrzeugbatterien zu erreichen. Für Lithium und Nickel werden die Vorgaben als erreichbar eingestuft, für Kobalt hingegen wird es kritischer. Der vorliegende Beitrag ergänzt eine Überprüfung der Umsetzbarkeit der Vorgaben aus der EU-Batterieverordnung hinsichtlich des benötigten Recyclingmaterials innerhalb Deutschlands und erweitert den Blick über die E-Mobilität hinaus auf die Rolle stationärer BESS. Die hier entstehende zusätzliche Rezyklatnachfrage macht es sinnvoll, beide Märkte in einer gemeinsamen Analyse zu betrachten. Basierend auf dem aktuellen Bestand und Prognosen zur zukünftigen Bedarfsentwicklung in beiden Märkten wird somit eine Abschätzung getroffen, ob die Vorgaben der Batterieverordnung hinsichtlich des Markthochlaufs der E-Mobilität und dem Zubau stationärer BESS in Deutschland erfüllt werden können.

Die Studie ist dabei wie folgt aufgebaut: In Abschnitt 2 werden der Status quo des Markthochlaufs von stationären BESS und der E-Mobilität in Deutschland sowie die aktuellen Ziele und Prognosen der zu erwartenden künftigen Entwicklung in diesen Märkten dargestellt. Abschnitt 3 kontextualisiert diese Ziele mit einem Fokus auf den damit einhergehenden Rohstoff- und Rezyklatbedarf, welcher über die EU-Batterieverordnung fixiert wird. Dabei wird ebenfalls auf die derzeit verbreiteten Recyclingmethoden und Batterie-Zellchemien in den verschiedenen Anwendungsfällen eingegangen. Auf Lichtenthäler/Bähr (2024) aufbauend wird in Abschnitt 4 ein Modell entwickelt, welches über den Rohstoffbedarf in der E-Mobilität hinaus die Rolle der stationären BESS berücksichtigt. Abschnitt 5 präsentiert die Modellergebnisse eines repräsentativen Basisszenarios und analysiert den Effekt eines verzögerten Markthochlaufs der E-Mobilität auf den Ressourcenbedarf. Weiterhin wird untersucht, ob sich der Rezyklatbedarf des Zubaus stationärer BESS auch ohne das Rezyklat aus der E-Mobilität bedienen ließe: Diese Betrachtung berücksichtigt somit direkt, inwiefern der Export alter Elektrofahrzeuge (anstelle des Recyclings vor Ort) eine Verschärfung der Rezyklatknappheit mit sich bringt. Abschnitt 6 fasst die Ergebnisse zusammen und zeigt politischen Handlungsbedarf auf.

2 Entwicklungen im Ausbau von Stromspeicherkapazitäten

In diesem Abschnitt wird der Ausbaustand stationärer BESS und der Markthochlauf der E-Mobilität in Deutschland beschrieben. Abschnitt 2.1 bietet eine Übersicht der aktuell installierten Speicherkapazität aus stationären BESS und dem Bestand elektrischer Fahrzeuge. Abschnitt 2.2 beleuchtet die zu erwartenden künftigen Entwicklungen in beiden Märkten unter Berücksichtigung aktueller Ziele und Prognosen.

2.1 Ausbaustand stationärer Batteriespeicher und Bestand an Elektrofahrzeugen

Grundsätzlich lassen sich Energiespeicher sowohl anhand ihrer physikalischen Speichereigenschaften als auch ihrer Speicherdauer kategorisieren. Die Speicherdauer kann über die Entladerate („C-Rate“) konzeptualisiert werden, welche das Verhältnis aus der Leistung (in kW) und der Kapazität (in kWh) wiedergibt. Ihr Kehrwert gibt an, wie lange ein Speicher entladen werden kann, bis dieser leer ist. Während chemische Energiespeicher wie Wasserstoff sich perspektivisch für die saisonale Langzeitspeicherung eignen, können BESS¹ als Kurzfristspeicher im Stromsystem einen wichtigen Beitrag für die Systemstabilität bieten und bei einer netzdienlichen Nutzung eine bessere Integration der EE ins Stromnetz ermöglichen (Bakalis/Lichtenthäler, 2024). Neben stationären BESS könnten perspektivisch auch die Speicherkapazitäten der Elektrofahrzeuge für die Flexibilisierung des Stromsystems eine zunehmende Rolle spielen. Der Ausbau der Ladeinfrastruktur ist dabei für den Markthochlauf von wesentlicher Bedeutung, da der derzeitige Mangel an Ladepunkten oft noch als Hindernis für einen Umstieg vom Verbrenner hin zur E-Mobilität genannt wird (NOW, 2024). Sowohl für Elektrofahrzeuge als auch stationäre BESS müssen dabei für eine netzdienliche Nutzung zusätzliche Preissignale geschaffen werden, welche neben der Preishöhe an der Strombörse in Echtzeit ebenfalls den Netzauslastungszustand in der jeweiligen Netzebene widerspiegeln. Andernfalls könnten etwa unter einer dynamischen Weitergabe der Börsenstrompreise in einem Intervall niedriger Preise zusätzliche Lastspitzen im Verteilnetz auftreten, wenn beispielsweise viele Elektrofahrzeuge und stationäre BESS zeitgleich einen Anreiz für das Aufladen der Batterie erhalten. Im derzeitigen regulatorischen Rahmen werden die benötigten Preissignale nicht gesetzt. Selbst dynamische Stromtarife werden bislang nicht flächendeckend angeboten. Dabei könnten diese bereits jetzt netzdienliches Verhalten begünstigen (Eicke et al., 2024).

In Abbildung 2-1 ist die verbaute Batteriekapazität aus Elektrofahrzeugen (links) und der Nettoausbaustand der Speicherkapazitäten aus stationären BESS (rechts) in Deutschland zwischen den Jahren 2015 und 2024 (zweites Halbjahr) dargestellt. Grundsätzlich haben die Speicherkapazitäten in beiden Bereichen stark zugenommen. Die Speicherkapazität der verbauten Fahrzeugbatterien wurde hier anhand des Modells aus Abschnitt 4 berechnet. Die in der E-Mobilität verbaute Speicherleistung wird im Juli 2024 auf rund 117 GWh geschätzt und beträgt somit bereits jetzt das 8,3-Fache der aggregierten Speicherkapazität aus stationären BESS. Sowohl bei batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) als auch bei Plug-In-Hybriden (PHEV) sind dabei lithiumbasierte Batterietechnologien der Standard. Die absolute Anzahl aller BEV liegt bei rund 1,6 Millionen. Darüber hinaus führen zu diesem Zeitpunkt auf deutschen Straßen rund eine Million PHEV. In der E-Mobilität

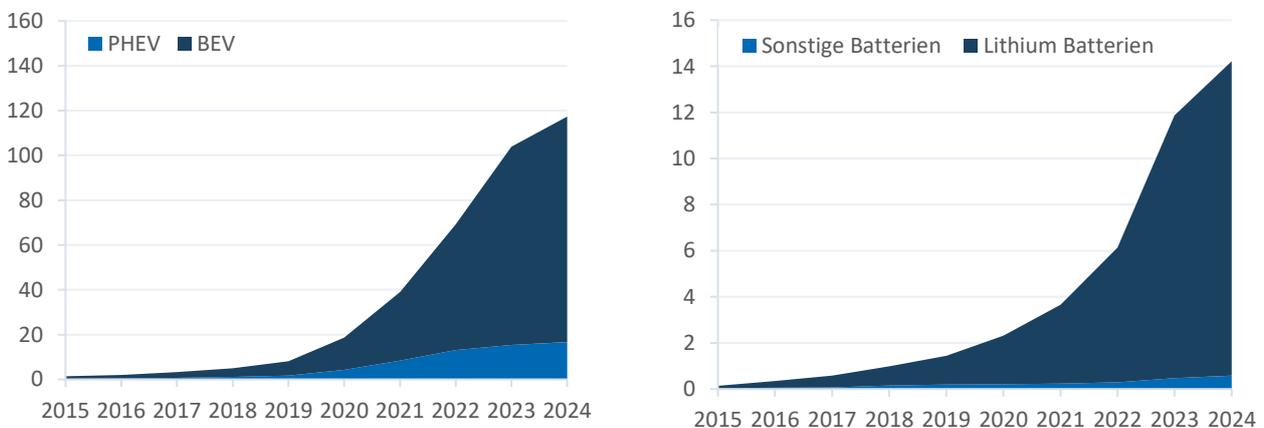
¹ Stationäre BESS können auf Basis der Speicherkapazität in die Bereiche Heimspeicher, Gewerbe- und Industriespeicher sowie Großspeicher unterteilt werden (vgl. Figgner et al., 2023). Bei Heimspeichern steht zumeist die Optimierung des PV-Eigenverbrauchs im Vordergrund. Für Gewerbe- und Industriespeicher kann auch die Lastspitzenkappung interessant sein, über welche die Höhe der zu zahlenden Netznutzungsentgelte und somit ein Teil der Stromkosten gemindert werden kann (NRW.Energy4Climate, 2024). Großspeicher werden heute für verschiedene Netz- und Systemleistungen (beispielsweise dem Netzengpassmanagement) genutzt und finden ebenfalls in den Day-Ahead- und Intraday-Märkten Verwendung (Frontier, 2023).

ist von Jahr zu Jahr ein steigender Fahrzeugbestand erkennbar. Dabei nimmt seit 2022 der Anteil der BEV an der Gesamtzahl der Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb gegenüber dem Anteil der PHEV tendenziell zu.

Aufbauend auf den Angaben der registrierten Einheiten aus dem Marktstammdatenregister der Bundesnetzagentur (BNetzA, 2024) zeigt sich im Juni 2024 für stationäre BESS eine insgesamt installierte Speicherkapazität von rund 14,2 GWh. Dabei sind auch hier vor allem lithiumbasierte Batterietechnologien verbreitet: Deren Marktanteil liegt bei rund 98 Prozent. Neben dem Bestand der BESS nimmt ebenfalls die Ausbaugeschwindigkeit zu: Mit rund 5,7 GWh neu installierter Kapazität im Jahr 2023 lag der Zubau in diesem Jahr etwa mehr als doppelt so hoch wie der des Vorjahrs. Der Zubau findet bislang insbesondere im Bereich der Heimspeicher statt. Insgesamt kommen rund 80 Prozent der installierten Speicherkapazität aus diesem Segment. Auch im internationalen Vergleich hebt sich der deutsche Speichermarkt durch die Prävalenz von Heimspeichern deutlich von anderen Ländern ab und gilt insgesamt als der größte weltweit (BloombergNEF, 2023b). Das Wachstum im Heimspeichersegment geht in Teilen auch aus verschiedenen staatlichen Subventionen für den Kauf eines stationären BESS hervor. Aufgrund der vergleichsweise hohen Lebensdauer der BESS und dem erst seit 2015 beginnenden Ausbau sind von den bis heute installierten Speicherkapazitäten in Summe lediglich 6,5 MWh rückgebaut worden. Gemäß einer durchschnittlichen Lebensdauer von rund 17,5 Jahren² ist dabei bereits jetzt absehbar, dass die Speicher erst ab dem Jahr 2030 für ein potenzielles Recycling zur Verfügung stehen werden.

Abbildung 2-1: Bestand der Speicherkapazitäten aus Elektrofahrzeugen und stationären BESS

Verbaute Speicherkapazität von BEV und PHEV (links) und aggregierte Speicherkapazität stationärer BESS (rechts), in GWh, Jahre 2015 bis Juli 2024



Anmerkung: Sonstige Batterien inkludieren Blei-, Nickel-Cadmium-, Nickel-Metallhydrid-, Redox-Flow-, Hochtemperatur- und Batterien ohne weitere Angabe der Zellchemie. Die Speicherkapazität der Elektrofahrzeuge wurde anhand des Modells aus Abschnitt 4 berechnet. Diese ergibt sich aus den aggregierten Neuzulassungen der Elektrofahrzeuge abzüglich der Außerbetriebsetzungen, die anhand von Weibull-Verteilungen mit einer durchschnittlichen Batterielebensdauer von 14 Jahren modelliert wurden.

Eigene Darstellungen basierend auf BNetzA, 2024; KBA, 2024b; 2024c

² Die hier genannte Lebensdauer stationärer BESS resultiert aus einer Schätzung auf Basis der Angaben im Marktstammdatenregister (BNetzA, 2024). Dabei wurde durch das Minimieren der Residuenquadratsummen die Zeitreihe des Bruttozubaues stationärer BESS über die Länge der Lebensdauer der BESS an die Zeitreihe des Nettoausbaus gefittet.

Die Preise der Lithium-Ionen-Batterien (LIB) für stationäre BESS und Elektrofahrzeuge sind im vergangenen Jahrzehnt signifikant gesunken (Abbildung 2-2). Gerade in der E-Mobilität sind LIB aufgrund ihrer komparativen Vorteile zu alternativen Zellchemien die am schnellsten wachsende Technologie (Orangi et al., 2024). Eine steigende Nachfrage, beispielsweise aufgrund der Schlüsselrolle der Elektrofahrzeuge für die Verkehrswende, begünstigt dabei den Hochlauf der Batteriezellproduktion und der daraus resultierenden technologischen Fortschritte. Ein Großteil der vergangenen Preisreduktionen für LIB kann dabei auf Kosteneinsparungen in den Aktivmaterialien der Kathoden zurückgeführt werden (Orangi et al., 2024). Während im Jahr 2013 global die volumengewichteten Durchschnittspreise für LIB in den beiden Segmenten noch 780 \$/kWh betragen haben, sind sie bis zum Jahr 2023 auf ein Niveau von 139 \$/kWh abgesunken. Dabei wird bei weiter voranschreitendem technischen Fortschritt und verbesserten Fertigungstechniken auch zukünftig von Kostensenkungen bis hin zu 80 \$/kWh im Jahr 2030 ausgegangen (BloombergNEF, 2023a). Hinsichtlich der verschiedenen Zellchemien der LIBs zeigt sich weiterhin ein Wandel von Nickel-Mangan-Kobalt (NMC) hin zu Lithium-Eisenphosphat (LFP). Die LFP-Zellchemie weist im direkten Vergleich zur NMC-Zellchemie dabei durchschnittlich 32 Prozent geringere Kosten auf (ebenda). Da sich NMC-Batterien aufgrund ihrer höheren Energiedichte mehr für einen Anwendungsfall im Bereich der E-Mobilität anbieten, haben diese dort bislang einen höheren Marktanteil als im Bereich stationärer BESS (vgl. Abschnitt 3.2). Generell sind die Preise der verschiedenen Batterietypen von den Entwicklungen der Rohstoffpreise und dem technologischem Fortschritt beeinflusst, wobei insbesondere im letzten Jahr global steigende Produktionskapazitäten und eine vergleichsweise geringere Nachfrage zu einem stärkeren Preisverfall beigetragen haben (ebenda).

Abbildung 2-2: Preisentwicklung der LIB für stationäre BESS und BEV

Volumengewichtete Durchschnittspreise für LIB in \$2023/kWh, Jahre 2013 bis 2023



Anmerkung: Die Preisentwicklungen von BloombergNEF (2023a) stellen gewichtete Mittelwerte über insgesamt 303 Datenpunkte von BEV und stationären BESS dar. Dabei werden nur LIB-Zellchemien betrachtet.

Eigene Darstellung basierend auf BloombergNEF, 2023a

2.2 Ziele und Prognosen zur weiteren Entwicklung

Spätestens aufgrund der EU-Verordnung zur Verbesserung des Elektrizitätsmarktdesigns (Verordnung (EU) 2024/1747, § 19e, § 19f) ist klar, dass die Rolle der Flexibilität des Stromsystems in den Mitgliedstaaten weiter in den Vordergrund rücken wird: Denn in einem Turnus von zwei Jahren soll künftig der nationale Flexibilitätsbedarf geschätzt und über indikative Flexibilitätsziele fixiert werden. Dabei ist auch der Beitrag der Energiespeicherung explizit auszuweisen. Während die Höhe eines hypothetischen Flexibilitätsziels für die

aggregierte Speicherkapazität aus stationären BESS bisher ausbleibt, können die Netzentwicklungspläne (NEP) der Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) dennoch vorab als Orientierungspunkte genutzt werden, da aus ihnen eine aus Netzsicht optimale Speicherkapazität im jeweiligen Zieljahr hervorgeht. Grundsätzlich baut der NEP auf einem Szenariorahmen auf, zu dessen Erstellung die vier deutschen ÜNB in einem Turnus von zwei Jahren verpflichtet sind (EnWG, § 12a). Die Annahmen zur Entwicklung der Stromerzeugung und -nachfrage werden dann im NEP genutzt, um benötigte Netzverstärkungen und -ergänzungen zu identifizieren. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für das Bundesbedarfsplangesetz, in welchem schließlich der Bau spezifischer Stromtrassen fixiert wird (Bakalis/Lichtenthäler, 2024).

Um die benötigten Rohstoffmengen, die zur Deckung des Bedarfs an stationären BESS benötigt werden, herzustellen, wird in dieser Studie der aktuelle Entwurf des Szenariorahmens für den NEP des Jahres 2025 herangezogen (50 Hertz et al., 2024). Der den Analysen im Abschnitt 5 zugrunde liegende Ausbaupfad baut auf dem Szenario B des Szenariorahmens auf. Dieses geht von einer weitgehenden Transformation des Energiesystems aus, in dem der Ausbau EE entlang des gesetzlichen Ausbaupfads stattfindet und ein höherer Flexibilitätsbedarf unter anderem auf Basis eines größeren Anteils stationärer BESS gedeckt wird. Im Jahr 2037 prognostiziert der Szenariorahmen insgesamt eine installierte Speicherkapazität von 202 GWh, welche bis ins Jahr 2045 auf 318 GWh weiter ansteigt (ebenda).

Entgegen der Abwesenheit expliziter Ziele zum Ausbau von stationären BESS hat die Bundesregierung bereits 2011 erste Ziele hinsichtlich der Bestandszahlen von BEV formuliert. Die im „Regierungsprogramm Elektromobilität“ anvisierte Anzahl der BEV in Höhe von 6 Millionen bis zum Jahr 2030 wurde fortan über das Klimaschutzprogramm 2030 hinweg bis zum aktuellen Koalitionsvertrag der Bundesregierung auf insgesamt 15 Millionen BEV angehoben (FfE, 2023). Neben dem Bestand elektrischer Fahrzeuge wird im Koalitionsvertrag der Bundesregierung für das Jahr 2030 weiterhin ein flächendeckendes Netz von insgesamt einer Million Ladepunkte angestrebt, welches den Markthochlauf der E-Mobilität unterstützen soll (SPD et al., 2021). Auch auf EU-Ebene finden sich über die Alternative-Fuels-Infrastructure-Regulation explizite Ziele für die zur Verfügung zu stellende Ladeleistung pro BEV und PHEV (IEA, 2023). Im April 2023 wurde zudem mit Zustimmung des europäischen Rates und des EU-Parlaments der Vorschlag der EU-Kommission für eine Änderung der zugelassenen CO₂-Emissionsnormen im Verkehrssektor beschlossen. Hinsichtlich der CO₂-Flottengrenzwerte wurde festgelegt, gegenüber dem Grenzwert von 2021 die durchschnittlichen Emissionen neuer Personenkraftwagen (95 g CO₂/km) und leichter Nutzfahrzeuge (147 g CO₂/km) bis 2035 um 100 Prozent zu verringern (Verordnung (EU) 2019/631, § 1). Ab dem Jahr 2035 können somit nur noch Fahrzeuge neu zugelassen werden, welche keine Auspuffemissionen gas- oder partikelförmiger Schadstoffe ausweisen – etwa BEV.

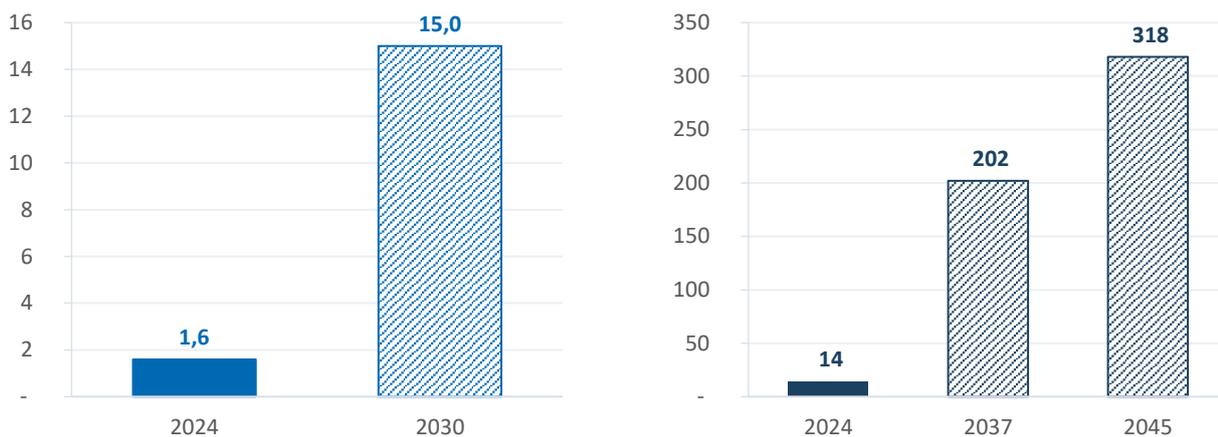
Die in diesem Abschnitt skizzierten Zielvorgaben bilden die Grundlage für die Berechnungen der Ausbaupfade im Bereich der stationären BESS und des Markthochlaufs der E-Mobilität, welche in Abschnitt 4.1 detaillierter beschrieben werden. Abbildung 2-3 stellt die Zielwerte im direkten Vergleich zusammenfassend dar. Grundsätzlich wird dabei deutlich, dass sich Deutschland in beiden Märkten ambitionierte Ziele gesetzt hat. Während sich die Benchmarkwerte aus dem NEP direkt auf die aggregierte Speicherleistung beziehen, wird für das Ziel des Bestands an Elektrofahrzeugen nur ein Wert der absoluten Fahrzeugmenge anvisiert. Legt man die Ergebnisse des Modells aus Abschnitt 4.2 zugrunde, lässt sich das Ziel von 15 Millionen BEV im Jahr 2030 dennoch in die hypothetisch damit einhergehende Speicherkapazität der Fahrzeuge umwandeln (vgl. Abbildung A-1, Anhang). Bei einer durchschnittlichen Lebensdauer der Fahrzeugbatterien in Höhe von 14 Jahren beträgt die Speicherkapazität im Jahr 2030 insgesamt 853 GWh. Der Großteil davon kommt aus BEV (828 GWh). Die Speicherkapazität aus PHEV erreicht in diesem Jahr mit insgesamt 25 GW ihren Höchstwert und

sinkt danach, da in Folge der abnehmenden CO₂-Flottengrenzwerte von einem fallenden Anteil der PHEV und einem steigenden Anteil der BEV an den Neuzulassungen ausgegangen wird. Im Jahr 2045 summiert sich die verbaute Batteriekapazität in der E-Mobilität auf 2,3 TWh auf.

Im direkten Vergleich zeichnet sich somit hier bereits ab, dass die E-Mobilität auch hinsichtlich des Ressourcenbedarfs den treibenden Faktor darstellen wird, da ihre insgesamt verbaute Speicherkapazität weit über der im Segment stationärer Speicher liegt. Hinsichtlich des theoretischen Flexibilisierungspotenzials der Elektrofahrzeuge für das Stromnetz muss dabei unterstrichen werden, dass die aggregierte Kapazität nicht das tatsächliche Potenzial widerspiegelt. So sind bislang nicht alle Elektrofahrzeuge rückspeisefähig. Weiterhin könnten die Fahrzeuge nicht an das Stromnetz angeschlossen sein, da die Bereitstellung der Flexibilität aus Sicht des Fahrzeughalters nicht wirtschaftlich oder unerwünscht ist oder die Speicherkapazität der Batterie durch Alterungseffekte bereits abgenommen hat. Das tatsächlich nutzbare Potenzial hängt somit vom gesetzlichen und regulatorischen Rahmen ab, welcher eine Teilnahme an potenziell netzdienlichen Maßnahmen incentivieren kann (VDE, 2024).

Abbildung 2-3: E-Mobilität und stationäre Stromspeicherung: Status quo und aktuelle Ziele

Bestand an BEV in Millionen (links) und Ausbaustand stationärer BESS in GWh (rechts), Juni 2024



Anmerkung: Das Ziel eines Bestands von 15 Millionen BEV bis 2030 wird im aktuellen Koalitionsvertrag der Bundesregierung formuliert (SPD et al., 2021). Die Speicherkapazitäten stationärer BESS werden mit den Prognosen aus dem aktuellen Szenariorahmentwurf der ÜNB für die Jahre 2037 und 2045 gegenübergestellt (50 Hertz et al., 2024).

Eigene Darstellung basierend auf SPD et al., 2021; 50 Hertz et al., 2024; BNetzA, 2024; KBA, 2024a; 2024c

3 Rohstoffbedarfe und Recycling

Die im vorangegangenen Kapitel dargestellten Ziele zum Ausbau stationärer BESS und dem Markthochlauf der E-Mobilität gehen mit bestimmten Rohstoffbedarfen einher. Dieses Kapitel kontextualisiert die Ziele unter Berücksichtigung der verschiedenen Zellchemien mit einem Blick auf die Material- und Ressourcenebene. Abschnitt 3.1 fasst zunächst den Status quo aktueller Recyclingverfahren für Rohstoffe aus Batterien zusammen. Abschnitt 3.2 diskutiert die bisher genutzten Zellchemien für stationäre BESS und Elektrofahrzeuge und hinterlegt diese mit spezifischen Rohstoffintensitäten. Abschnitt 3.3 stellt die Vorgaben der EU-Batterieverordnung dar, welche zur Schätzung der Rohstoffbedarfe genutzt werden.

3.1 Status quo im Batterierecycling

Nach aktuellem Stand der Technik gibt es drei Recyclingverfahren für Batterien: die Pyrometallurgie, die Hydrometallurgie und das direkte Recycling, die entweder einzeln oder in Kombination durchgeführt werden können. Vor den Recyclingverfahren werden die Batterien in aufwändigen Prozessen vorbehandelt. Abhängig von der Bauweise und den Batterietypen werden verschiedene Recyclingrouten durchlaufen. Folgende Aufzählung liefert eine kurze Übersicht über die einzelnen Recyclingverfahren (vgl. Rallo et al., 2024):



Die **Pyrometallurgie** ist ein thermisches Verfahren, in dem die Batterien in einem Ofen sehr hohen Temperaturen ausgesetzt und eingeschmolzen werden. In diesem Hochofen werden Legierungen und Schlacke erzeugt, die die Wertstoffe Kobalt, Kupfer, Eisen und Nickel enthalten (Dolotko et al., 2023). Mangan, Lithium, Aluminium und Graphit sowie Kunststoffe gehen durch die hohen Temperaturen wertstofflich verloren und auch der Elektrolyt wird in diesem Verfahren nicht wiedergewonnen.



Die **Hydrometallurgie** folgt in der Regel auf einen mechanischen Aufbereitungsprozess oder auf das pyrometallurgische Verfahren. Mit Hilfe von wässrigen Lösungen werden die Metalle aus den Batterien extrahiert (Dolotko et al., 2023; Baum et al., 2022). Mit diesem Verfahren können reine Nichteisen-Metalle aus den Aktivmaterialien einer Batterie wiedergewonnen werden: Etwa kann die über Pyrometallurgie erzeugte Legierung aus Kobalt, Kupfer, Eisen und Nickel aufgetrennt werden. Abhängig von der gewählten Recyclingroute können unterschiedliche Materialien durch dieses Verfahren aufbereitet werden. Beispielsweise ist die Wiedergewinnung des Elektrolyten abhängig von den vorherigen Verfahren. Ebenso können theoretisch auch Lithiumsalze wiedergewonnen werden (Dolotko et al., 2023). Es wird geschätzt, dass mit den aktuellen hydrometallurgischen Verfahren 19 Prozent der Batteriemasse recycelt werden können, um Lithium, Mangan, Kobalt und Nickel wiederzugewinnen (Strategy&/RWTH Aachen, 2023). Die Rückgewinnung von Aluminium, Eisen und Kupfer befindet sich hingegen noch im Entwicklungsstadium.



Das **Direkt-Recycling** hat das Ziel, aktive Bestandteile der Batterie wiederzugewinnen, ohne die chemische Struktur zu zerstören (Gaines/Wang, 2021; Baum et al., 2022). Zur Trennung der Bestandteile werden beispielsweise physikalische Methoden, magnetische oder moderate thermische Verfahren angewendet (Baum et al., 2022). Der Vorteil gegenüber der Pyro- und Hydrometallurgie liegt darin, dass das Direkt-Recycling eine vollständige Wiedergewinnung der Materialien in ihren ursprünglichen Strukturen und mit ihren ursprünglichen Eigenschaften ermöglicht. Außerdem kann Direkt-Recycling im direkten Vergleich mit den energieintensiven alternativen Recyclingverfahren weniger negative Umweltauswirkungen aufweisen.

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass durch die beschriebenen Recyclingtechnologien noch nicht alle Materialien der Batterien wiedergewonnen werden können. Für eine Verbesserung des Batterierecyclings sollte schon im Design die Recyclingfähigkeit berücksichtigt werden. Während pyro- und hydrometallurgische Verfahren im industriellen Maßstab genutzt werden, steckt das Direkt-Recycling noch in den Anfängen und ist kaum automatisiert. Obwohl es Vorteile bietet, wird es derzeit aufgrund geringer Effizienz und niedriger Materialrückgewinnung nicht großflächig eingesetzt (Lichtenthäler/Bähr, 2024). Hinzu kommt, dass sich Batterietechnologien weiterentwickeln und das zurückgewonnene Material oft nicht mehr für neue Batterien geeignet ist. Die energieintensiven Recyclingverfahren und hohen Betriebskosten hemmen zudem den Ausbau von Recyclingkapazitäten in Deutschland, sodass wettbewerbsfähige Energiepreise als Schlüsselfaktor gelten. Aktuell gibt es nur wenige verlässliche Daten zur Effizienz und Rückgewinnungsrate der Verfahren, da uneinheitliche Definitionen und intransparente Berechnungsmethoden vorherrschen. Forschungen zeigen jedoch, dass das Direkt-Recycling das größte Potenzial hat (Rallo et al., 2024).

3.2 Etablierte Zellchemien in Batteriesystemen nach Anwendungsfall

Während verschiedene Recyclingverfahren für Batterien etabliert sind, stehen die recycelbaren Rohstoffe in Abhängigkeit zu den genutzten Zellchemien, die den unterschiedlichen Batterietypen zugrunde liegen. Grundsätzlich lässt sich der allgemeine Aufbau einer Batterie dabei auf verschiedenen Ebenen beschreiben. Die gesamte Batterie wird häufig als **Batteriepäck** bezeichnet. Es besteht aus den verschiedenen Batteriemodulen und zusätzlichen mechanischen, elektrischen und thermischen Komponenten. Durch die Anzahl der Module und durch deren Verschaltung, kann abhängig vom Anwendungsfall die erforderliche Batterieleistung erzielt werden. Ein **Batteriemodul** besteht aus mehreren **Batteriezellen**, die ebenfalls in ihrer Verschaltung variieren können. Eine Batteriezelle besitzt eine **Anode** (negative Elektrode) und eine **Kathode** (positive Elektrode). Dazwischen befindet sich ein **Separator** (häufig eine Membran aus Kunststoffolie), der die Elektroden voneinander trennt und ein ionenleitendes **Elektrolyt**, welches die Bewegung der Ionen (und somit den Ladungsaustausch) ermöglicht (VDE, 2021).

Die notwendigen Rohstoffe für die Batterieproduktion sind von der Batterietechnologie abhängig. Aktuell sind LIB sowohl für den Einsatz in BEV als auch bei stationären BESS die führende Technologie (IEA, 2023; BloombergNEF, 2023b). Der Schwerpunkt der vorliegenden Studie fokussiert sich auf das Recycling der Kathode (beziehungsweise deren Aktivmaterial). Grund dafür ist einerseits, dass die Zellchemie der Kathode maßgeblich die Rohstoffe bestimmen, welche beim Recycling anfallen. Andererseits resultiert der Fokus ebenfalls aus der Tatsache, dass graphitbasierte Anoden derzeit – und auch in absehbarer Zukunft – das zentrale Anodenmaterial sind (Fraunhofer ISI, 2023). Graphit wird darüber hinaus auch nicht in der EU-Batterieverordnung berücksichtigt. Auch silikonbasierte Anoden, welche aufgrund niedrigerer Kosten, höherer Speicherkapazitäten und schnellerer Ladung eine tendenziell zunehmende Nachfrage erfahren, werden aus diesem Grund in der Analyse nicht weiter berücksichtigt. In den letzten Dekaden war die Forschung und Entwicklung im Bereich der Batterien und im Speziellen des Kathodenmaterials hauptsächlich durch Anwendungsfälle in der E-Mobilität geprägt. Grundsätzlich werden für BEV und stationäre BESS zumeist folgende Kathoden-Materialzusammensetzungen gewählt:

	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid	NMC
	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid	NCA
	Lithium-Eisen-Phosphat	LFP

Die Zellchemien weisen generell unterschiedliche Charakteristika auf, welche sie für spezifische Anwendungsfälle prädestinieren. LMO-Batterien spielen im Vergleich zu alternativen Kathodenmaterialien im Bereich der E-Mobilität und stationärer BESS nur eine Nebenrolle: Während sie heute insbesondere in Elektrofahrzeugen, E-Scootern und kleineren Anwendungen (etwa als Knopfzellen) eingesetzt werden, hat dieses Kathodenmaterial dennoch ursprünglich in der Anwendung der ersten kommerziell erfolgreichen BEV eine wichtige Rolle gespielt (Fraunhofer ISI, 2023). Im Gegenzug haben NMC-Zellchemien heutzutage einen größeren Marktanteil in beiden Segmenten – insbesondere in der E-Mobilität. In kleineren BEV lag ihr Marktanteil im Jahr 2022 bei rund 60 Prozent, gefolgt von LFP (30 Prozent) und NCA-Zellchemien (8 Prozent) (IEA, 2023; Bähr et al., 2024). Deren hohe Verbreitung lässt sich dadurch erklären, dass sich NMC-Batterien insbesondere hinsichtlich ihrer hohen Energiedichte, Entladungsrate und Wirkungsgrad auszeichnen. Neben einem niedrigeren Gewicht der Batterie (und somit einer höheren Reichweite) ermöglicht eine höhere Entladungsrate einen schnelleren Antrieb und eine schnellere Ladung der Batterie (BloombergNEF, 2023b).

Während NMC- (sowie NCA-) Zellchemien zunächst auch in stationären BESS genutzt wurden, hat sich der stationäre Speichermarkt im Gegensatz zu den Entwicklungen in der E-Mobilität dahingehend entwickelt, dass heutzutage die in stationären BESS übliche Zellchemie auf LFP basiert (BloombergNEF, 2023b). Diese Entwicklung hat sich insbesondere auch aufgrund der Sicherheit, niedrigerer Kosten, längerer Lebensdauer sowie durch eine geringere Zyklenalterung ergeben. Darüber hinaus spielt das vergleichsweise höhere Gewicht der LFP-Zellchemie in einer stationären Anwendung nur eine untergeordnete Rolle. Aktuelle Prognosen gehen dementsprechend auch zukünftig von einer stärkeren Verbreitung der NMC- und NCA-Zellchemie in der E-Mobilität aus, während in der stationären Stromspeicherung die LFP-Zellchemie dominiert (ebenda).

Die zukünftige Rohstoffnachfrage wird insgesamt von der Speicherkapazität der benötigten Batterien und den jeweiligen Marktanteilen der Zellchemien abhängen. Bereits jetzt zeigt sich eine Substitution³ von Kobalt durch Nickel und andere Rohstoffe (Fraunhofer ISI, 2023). Grundsätzlich zeichnet sich ab, dass die in der E-Mobilität prävalenten NMC- (und NCA-) Batterien neben Lithium und Kobalt insbesondere Nickel gebunden haben, während die LFP-Batterien in stationären BESS vor allem auf die Verfügbarkeit von Lithium angewiesen sind. Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über die enthaltenen Rohstoffmengen von Lithium, Kobalt und Nickel in den unterschiedlichen Batterietypen. Diese bilden in Verbindung mit der angenommenen Entwicklung der Speicherkapazitäten die Grundlage für das Errechnen der Rezyklatmengen.

Tabelle 3-1: Rohstoffzusammensetzung verschiedener Zellchemien

Auszug der in den Zellchemien gebundenen Rohstoffe in Tonnen pro GWh Speicherkapazität

	NCA	NMC ₁₁₁	NMC ₆₂₂	NMC ₈₁₁	LFP	LMO
Lithium	95	120	104	96	84	80
Kobalt	65	333	176	82	0	0
Nickel	725	333	525	653	0	0

Anmerkung: Die Tabelle beschreibt die Rohstoffmengen von Lithium, Kobalt und Nickel in unterschiedlichen Kathodenmaterialien. Weitere Rohstoffe, die für die Herstellung der Batterien erforderlich sind, aber nicht in der EU-Batterieverordnung erwähnt wurden (Mangan, Eisen, Phosphor, Aluminium, Sauerstoff), werden hier vernachlässigt.

Quelle: DERA, 2021

³ Diese Substitution zeigt sich beispielsweise innerhalb der E-Mobilität in einem über die Zeit zunehmenden Anteil der NMC₈₁₁-Batterien. Diese bestehen in einem Verhältnis von 8:1:1 aus den Rohstoffen Nickel, Mangan und Kobalt. Ein höherer Nickelanteil erhöht dabei tendenziell ebenfalls die Speicherkapazität einer Batterie (DERA, 2021).

Neben den unterschiedlichen Entwicklungen der Marktanteile der Zellchemien in der E-Mobilität und der stationären Stromspeicherung sind aktuell weitere Entwicklungen in der Batterieforschung ersichtlich. Wichtige Fortschritte in der Forschung sind dabei etwa Natrium-Ionen Batterien (NIB), welche im Gegensatz zu den bisher verwendeten Zellchemien ohne kritische Rohstoffe wie Lithium, Kobalt und Nickel auskommen. Da deren Produktion insbesondere von der Verfügbarkeit von Natriumchlorid (etwa aus Meerwasser) beruht, bilden sie eine kostengünstige und gut skalierbare Alternative für Energiespeichersysteme (Fraunhofer FFB, 2023). Während bereits erste kommerzielle Produkte bestehen, ist deren künftige Marktdurchdringung vorab nur schwer abzuschätzen und wird daher in der vorliegenden Studie nicht betrachtet. Die Interpretation der hier vorgestellten Ergebnisse sollte dies berücksichtigen: Eine Substitution der aktuell vorherrschenden LIB-Batterien zu neuen NIB-Batterien kann eine geringere Nachfrage nach Lithium, Kobalt und Nickel mit sich bringen, welche das Erreichen der Vorgaben der EU-Batterieverordnung begünstigt.

3.3 Vorgaben der EU-Batterieverordnung

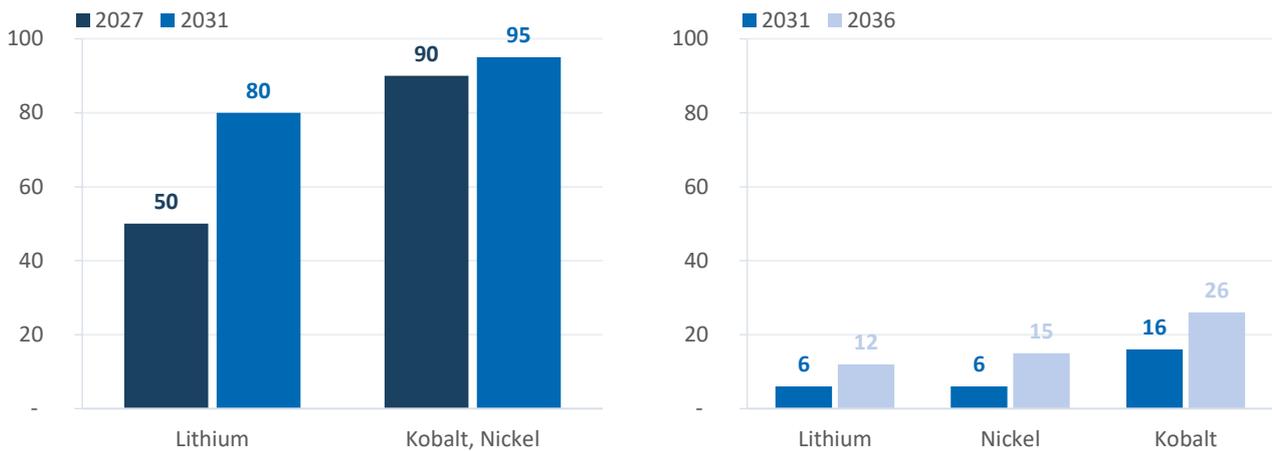
Die EU-Batterieverordnung ist seit Februar 2024 in allen EU-Mitgliedsländern gültig und verfolgt das Ziel, die negativen Auswirkungen von Batterien auf die Umwelt zu minimieren. Insgesamt berücksichtigt sie dabei ein breites Anwendungsfeld über Fahrzeug-, Industrie- und Gerätebatterien und darüber hinaus. Die Kategorie der Industriebatterien umfasst dabei ebenfalls Batterien, welche „zur Energiespeicherung im privaten oder häuslichen Umfeld verwendet werden“ (Verordnung (EU) 2023/1542). Die Batterieverordnung strebt weiterhin ein hohes Maß der stofflichen Verwertung der Batterien an, welche am Ende ihrer Lebenszeit recycelt werden. Dafür werden explizite Rückgewinnungsquoten auf Rohstoffebene vorgeschrieben, welche sich auf die Anteile beziehen, die mindestens durch die angewendeten Recyclingverfahren wiedergewonnen werden müssen (Verordnung (EU) 2023/1542, § 71). Rohstoffe, die durch aktuelle Verfahren bereits gut recycelt werden können, müssen höhere Vorgaben erreichen als die Rohstoffe, die durch aktuelle Verfahren bislang weniger gut recycelt werden können (Abbildung 3-1, links). Entsprechend werden spätestens zum Ende des Jahres 2027 für Kobalt, Kupfer, Blei, Nickel (90 Prozent) und Lithium (50 Prozent) Zielvorgaben der stofflichen Verwertung in Prozent gültig. Diese steigen zum Ende des Jahres 2031 für Kobalt, Kupfer, Blei, Nickel (95 Prozent) und Lithium (80 Prozent) weiter (Verordnung (EU) 2023/1542, Anhang XII, Teil C).

Um die Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft zu stützen, eine ressourceneffizientere Rohstoffnutzung zu ermöglichen und die Abhängigkeit der EU von Drittländern zu verringern, werden gerade bei kritischen Rohstoffen wie Kobalt, Lithium, Blei und Nickel Rezyklatgehalte in neuen Batterien vorgeschrieben. Diese beschreiben einen Mindestanteil der Aktivmaterialien neuer Batterien aus verwerteten Rohstoffen von Abfällen wie etwa Altbatterien und anderen Produkten (Abbildung 3-1, rechts). Für neu produzierte Batterien gelten ab 2031 Rezyklatgehalte für Kobalt (16 Prozent), Blei (85 Prozent), Lithium und Nickel (jeweils 6 Prozent). Ab 2036 steigen die Rezyklatgehalte von Kobalt (26 Prozent), Lithium (12 Prozent) und Nickel (15 Prozent) weiter (Verordnung (EU) 2023/1542, § 8). Die Batterieverordnung legitimiert die EU-Kommission dazu, die vorgegebenen Ziele bis Mitte August 2026 zu prüfen und gegebenenfalls anzupassen, für den Fall, dass die Verfügbarkeiten des Recyclingmaterials oder die technischen Möglichkeiten eine Anpassung erfordern. Gleichzeitig hat die EU-Kommission die Möglichkeit, verpflichtende Rezyklatgehalte für weitere Materialien zu ergänzen, sofern dies durch die Entwicklung der chemischen Zusammensetzung der Batterien notwendig wird. Ab 2026 sollen diese Überprüfungen mindestens alle fünf Jahre stattfinden (Verordnung (EU) 2023/1542, § 71).

Durch die verbindlichen Ziele der Rückgewinnungsquoten und Rezyklatgehalte für die verschiedenen Rohstoffe der Batterien, kann unter Berücksichtigung des absehbaren Markthochlaufs der E-Mobilität sowie des Zubaus stationärer BESS der Bedarf der Rohstoffe im jeweiligen Jahr berechnet werden. Für diese Berechnung werden die in Abschnitt 3.2 diskutierten Marktanteile verschiedener Zellchemien zugrunde gelegt. Entsprechend wird sich auf die (kritischen) Rohstoffe Lithium, Kobalt und Nickel fokussiert.

Abbildung 3-1: Vorgaben der EU-Batterieverordnung: Rückgewinnungsquote und Rezyklatgehalte

Höhe der Rückgewinnungsquoten (links) und Rezyklatgehalte (rechts) in Prozent, Jahre 2027, 2031 und 2036



Anmerkung: Die Darstellung beschränkt sich auf die Vorgaben zu Lithium, Nickel und Kobalt, da diese für den Rohstoffbedarf der stationären BESS und Elektrofahrzeuge maßgeblich sind.

Eigene Darstellung auf Basis der EU-Batterieverordnung, Verordnung (EU) 2023/1542

4 Methodik

Um die Umsetzbarkeit der EU-Batterieverordnung hinsichtlich des Rohstoff- und Rezyklatbedarfs der Elektrofahrzeuge und stationären BESS in Deutschland beurteilen zu können, wurde auf Lichtenthäler/Bähr (2024) aufbauend ein Modell entwickelt, welches die Wechselwirkungen zwischen beiden Märkten abbildet. Zentral ist dabei vor allem der Effekt einer verlängerten Lebensdauer von Fahrzeugbatterien als stationäre BESS (Second Life) auf den Rohstoff- und Rezyklatbedarf. Abschnitt 4.1 beschreibt die verwendeten Daten der Inputparameter des Modells, Abschnitt 4.2 skizziert dessen grundsätzliche Logik und Abschnitt 4.3 geht auf die Parameterwerte ein, welche für die Analyse im Folgeabschnitt verwendet wird.

4.1 Datenaufbereitung

Um den anfallenden Rohstoffbedarf für den Markthochlauf der E-Mobilität und des Ausbaus stationärer BESS zu berechnen, müssen zunächst die benötigten Daten aufbereitet werden. Dabei wird wie folgt vorgegangen:



Rohstoffnachfrage der E-Mobilität

- Neuzulassungen der Elektrofahrzeuge berechnen:** Die Daten zur E-Mobilität werden auf Basis der Zeitreihen der Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen zwischen 2010 bis 2023 vom Kraftfahrt-Bundesamt (KBA, 2024b) berechnet. Diese ermöglichen eine Aufteilung der Fahrzeuge nach Segmenten. In dieser Studie werden die BEV gemäß NOW (2024) in die drei Kategorien Kleinwagen (Mini, Kleinwagen), Mittelklasse (Kompaktklasse, Mittelklasse, Mini-Van, Sonstige) und Oberklasse (obere Mittelklasse, Oberklasse, SUV, Sportwagen, Utilities, Wohnwagen) eingeteilt.⁴ PHEV werden getrennt betrachtet. Die Unterteilung der Segmente geht dabei darauf ein, dass sich die Zellchemien und Speicherkapazitäten in den Segmenten unterscheiden.
- Speicherkapazitäten schätzen:** Um die mit den Neuzulassungen einhergehenden Speicherkapazitäten abzuschätzen, werden die von FfE (2024) vorgeschlagenen Parameterbereiche zur Modellierung von BEV herangezogen. Die Angaben zu durchschnittlichen Speicherkapazitäten nach BEV-Segmenten im Jahr 2024 sowie die Annahmen zur Verteilung dieser in den Jahren 2030 und 2045 werden dabei in einem Intervall angegeben. In dieser Studie wird die untere Intervallgrenze („Minimum“) für eine konservative Berechnungen der Speicherkapazitäten genutzt. Die Entwicklungen der Speicherkapazitäten werden dabei zwischen den Jahren linear fortgeschrieben. Für PHEV werden die durchschnittlichen Speicherkapazitäten aus DERA (2021) übernommen. Dabei wird vor dem Jahr 2024 für BEV und PHEV angenommen, dass die Speicherkapazität der Fahrzeuge um je 1 Prozent gestiegen ist. Für PHEV steigt die durchschnittliche Speicherkapazität auch nach 2024 um je 1 Prozent.
- Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen fortschreiben:** Ab 2023 werden die Neuzulassungen von BEV und PHEVs annahmebasiert fortgeschrieben. Hierbei werden die in den Mobilitätsszenarien des Bundesverband Erneuerbare Energie (BEE, 2024) geschätzten erforderlichen Neuzulassungen bis 2030 als Basis genutzt. Wenn sich die Neuzulassungen wie in BEE beschrieben entwickeln, würde dabei das im Koalitionsvertrag der Bundesregierung erklärte Ziel eines Bestands von 15 Millionen BEV bis 2030 erreicht werden (vgl. Abschnitt 2.2). Ab 2030 wird angenommen, dass der angegebene Anteil von BEV an allen Neuzulassungen bis 2035 auf 100 Prozent der insgesamten Neuzulassungen im Jahr 2030 weiter steigt und bis 2045 auf einem Niveau von rund 3 Millionen pro Jahr verweilt. Dabei wird bei der Fortschreibung der

⁴ Die Einteilung der SUV in die Kategorie „Oberklasse“ stellt dabei eine Vereinfachung dar. Einige SUV könnten abhängig von der Ausführung alternativ auch der Mittelklasse zugeordnet werden, was hier jedoch nicht berücksichtigt wird. Die Neuzulassungen in diesem Segment nehmen insgesamt stark zu: 48 Prozent aller BEV-Neuzulassungen im Jahr 2023 waren SUV (KBA, 2024b).

durchschnittliche Anteil der verschiedenen Fahrzeugsegmente zwischen dem Jahr 2017 und 2023 für die Entwicklungen der Folgejahre genutzt. Da die auf EU-Ebene festgelegten CO₂-Flottengrenzwerte auf Basis der Auspuffemissionen berechnet werden (vgl. Abschnitt 2.2), wird angenommen, dass der Anteil der PHEV bis zum Jahr 2035 auf 0 Prozent sinkt. Während die Regelungen derzeit hinsichtlich einer Nutzung von PHEV mit E-Fuels diskutiert werden, wird hier somit von deren weiteren Nutzung abgesehen.

4. **Berechnung der gebundenen Rohstoffe:** Um den Markthochlauf der Elektrofahrzeuge hinsichtlich der dafür benötigten Rohstoffe zu berechnen, wird zunächst die angenommene Entwicklung der Marktanteile verschiedener Zelltechnologien nach Fahrzeugsegmenten von der Stiftung Klimaneutralität et al. (2023) herangezogen. Zwischen den dort angenommenen Marktanteilen in 5-Jahres-Abschnitten werden die Daten linear fortgeschrieben (vgl. Abbildung A-2, Anhang). Anschließend werden die in den Segmenten enthaltenen Rohstoffe (Lithium, Nickel und Kobalt) nach den jeweiligen Zellchemien über die Angaben der deutschen Rohstoffagentur (DERA, 2021; vgl. Tabelle 3-1) berechnet.



Rohstoffnachfrage stationärer Batteriespeichersysteme

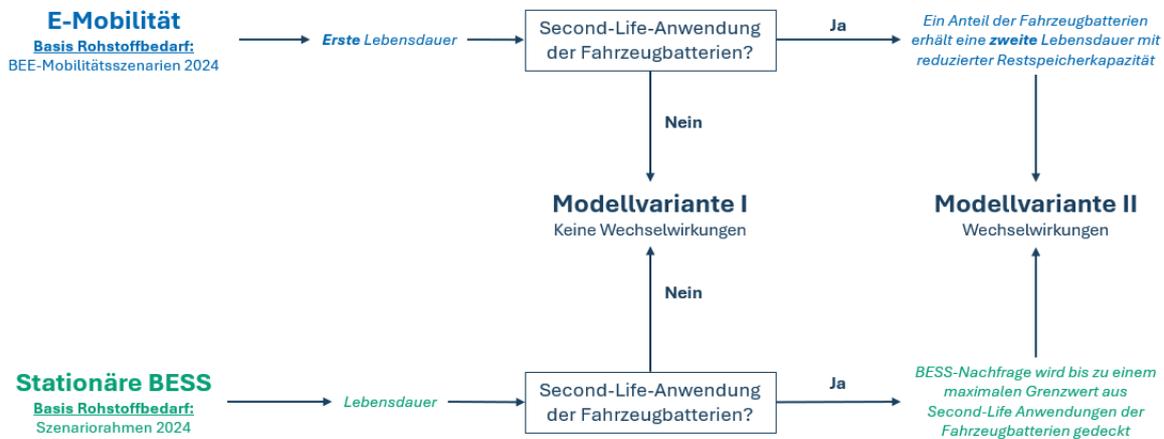
1. **Bruttozubau der stationären BESS berechnen:** Für die Entwicklung des Rohstoffbedarfs aus stationären BESS wird zunächst der Bruttoausbaustand zwischen 2010 bis 2023 aus dem Marktstammdatenregister der BNetzA (2024) ausgelesen. Nach der Anwendung von Konsistenzfiltern, welche potenzielle Fehleinträge ausschließen sollen, werden die Daten anhand der angegebenen Speicherkapazitäten aggregiert.
2. **Neuinstallationen stationärer BESS fortschreiben:** Der Speicherzubau wird auf Basis der Angaben aus Szenario B des aktuellen Szenariorahmens der UNB für den NEP 2025 modelliert (50 Hertz et al., 2024). Insgesamt steigt die installierte Speicherkapazität dabei von 202 GWh im Jahr 2037 auf insgesamt 318 GWh im Jahr 2045 (vgl. Abschnitt 2.2). Als konservative Schätzung wird der Ausbaustand im Jahr 2024 bis zum Zielwert des Jahres 2037 und zwischen den Jahren 2037 und 2045 linear fortgeschrieben.
3. **Berechnung der gebundenen Rohstoffe:** Auch für die Berechnung der stationären BESS werden die Marktanteile der verschiedenen Zellchemien benötigt. Für eine Schätzung dieser wird berücksichtigt, dass die Verbreitung der LFP-Zellchemie bei stationären BESS weitaus größer als im Segment der E-Mobilität ist (BloombergNEF, 2023b). Gleichsam zeigt sich generell eine der E-Mobilität ähnliche Entwicklung hin zu kobaltärmeren Batterien. Um diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen, wird die Entwicklung der Marktanteile im E-Mobilitätssegment mit der Verbreitung von LFP, NCA und NMC-Batterien im Bereich stationärer BESS im Jahr 2023 auf Basis der Angaben in Aquila Capital (2024) gewichtet. Entsprechend wird von einer hohen Verbreitung der LFP-Zellchemien und einer gleichzeitigen Abwendung kobaltintensiver Batterien ausgegangen (vgl. Abbildung A-2, Anhang). Zuletzt werden die gebundenen Rohstoffe auf Basis der Angaben zum Rohstoffgehalt aus DERA (2021; vgl. Tabelle 3-1) berechnet.

4.2 Modellstruktur

Das Modell zur Berechnung des Rohstoffbedarfs und der Rezyklatverfügbarkeit unterscheidet grundsätzlich zwischen zwei Fällen: Im ersten Fall werden keine Second-Life-Anwendungen alter Fahrzeugbatterien für stationäre BESS genutzt. Im zweiten Fall findet ein Anteil der Fahrzeugbatterien am Ende ihrer (ersten) Lebenszeit eine Verwendung als stationäres BESS. Abbildung 4-1 stellt die Unterscheidung der beiden Modellvarianten schematisch dar.

Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des Modells

Die Abbildung illustriert die Parameter, welche in der jeweiligen Modellvariante einen Effekt auf die Rezyklatverfügbarkeit und -nachfrage haben.



Quelle: Institut der deutschen Wirtschaft

In **Modellvariante I** finden keine Second-Life-Anwendungen von Fahrzeugbatterien als stationäre BESS statt: Die Rohstoffnachfrage und Rezyklatverfügbarkeit ist exogen durch die Geschwindigkeit der Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen und den Neuinstallationen stationärer BESS bestimmt. Da sich der Ausbaupfad für stationäre BESS auf einen bestimmten Bestand der in einem Jahr installierten Speicherkapazität bezieht, werden im Lauf der Jahre Reinvestitionen für die BESS fällig, welche in der Zwischenzeit das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben. Diese Reinvestitionen kommen zur erforderlichen Menge der Neuinstallationen stationärer BESS hinzu. Am Ende der jeweiligen Lebensdauer der Batterien des Fahrzeugbestands und der stationären BESS werden die gebundenen Rohstoffe für das Recycling verfügbar.

In **Modellvariante II** geht ein Anteil der Fahrzeugbatterien nach Ende der ersten Lebenszeit in eine Anwendung als stationäres BESS über: In diesem Fall sind Rohstoffnachfrage und Rezyklatverfügbarkeit endogen. Die Restkapazität der Fahrzeugbatterien beträgt in diesem Fall nur einen exogen festgelegten, reduzierten Anteil der ursprünglichen Kapazität. Weiterhin wird angenommen, dass nur ein exogen festgelegter Anteil der im jeweiligen Jahr anfallenden Nachfrage für stationäre BESS über Second-Life-Anwendungen alter Fahrzeugbatterien gedeckt wird⁵ – der Rest steht nach dem Ende deren ersten Lebensdauer dem Recycling zur Verfügung. Da durch die Inbetriebnahme der Second-Life-Anwendungen der Bedarf zusätzlicher stationärer BESS sinkt, resultiert zwar eine geringere Rohstoffnachfrage in diesem Markt, jedoch werden die in den Fahrzeugbatterien gebundenen Rohstoffe auch erst nach Ende ihrer zweiten Lebensdauer für das Recycling verfügbar. Auch in diesem Szenario entsteht im Bereich der stationären BESS Reinvestitionsbedarf: Einerseits muss die ausscheidende Speicherkapazität der Second-Life-Anwendungen am Ende ihrer Lebenszeit kompensiert werden, andererseits fallen auch für die stationären BESS am Ende ihrer Lebensdauer Reinvestitionen an, um den angenommenen Ausbaupfad einzuhalten.

⁵ Die Begrenzung der Nachfragedeckung wird eingeführt, da die rückkehrende Speicherkapazität aus der E-Mobilität gegebenenfalls weit über der Nachfrage stationärer BESS im jeweiligen Jahr liegen kann. Es ist zu erwarten, dass in diesem Fall dennoch neue BESS in Betrieb genommen werden – etwa, weil Haushalte von einer zu geringen zweiten Lebensdauer der Second-Life-Anwendungen ausgehen, eine technische Umstellung der Nutzung zu kompliziert ist, oder innovative BESS zusätzliche Funktionalitäten bieten. Ebenfalls könnten Unternehmen die Nutzung von stationären BESS gegenüber alten Fahrzeugbatterien bevorzugen, wenn sie diese im MWh-Bereich benötigen.

Die Auswirkungen der einzelnen Modellparameter auf die Rezyklatnachfrage und -verfügbarkeit werden zusammenfassend in Tabelle 4-1 dargestellt.

Tabelle 4-1: Komparative Statik: Einfluss der Modellparameter

Diese Tabelle gibt einen Überblick zum Effekt eines Anstiegens einzelner Modellparameter auf die Rezyklatverfügbarkeit und -nachfrage

Modellparameter	Rezyklatverfügbarkeit	Rezyklatnachfrage
Lebensdauer in Jahren	–	–
Anteil der Second-Life-Anwendungen aus der E-Mobilität in Prozent	–	–
Maximale Bedarfsdeckung der Nachfrage von stationären BESS in Prozent	–	–
Restspeicherkapazität in Prozent	Kein Effekt	–

Quelle: Institut der deutschen Wirtschaft

Generell führt eine Verlängerung der Lebensdauer der Batterien zu einer geringeren Rezyklatverfügbarkeit, da die gebundenen Rohstoffe erst zu einem späteren Zeitpunkt dem Recycling zur Verfügung stehen. Durch eine längere Lebensdauer wird hingegen ebenfalls die Rezyklatnachfrage gesenkt, da die Batterien länger genutzt werden und so im Markt der stationären BESS weniger Bedarf nach Neuinstallationen oder Reinvestment besteht. Ein erhöhter Anteil an Second-Life-Anwendungen im Bereich der stationären BESS führt ebenfalls zu einer geringeren Rezyklatverfügbarkeit und -nachfrage, da die gebundenen Rohstoffe einerseits nicht direkt recycelt werden, andererseits jedoch einen Teil der Nachfrage zusätzlicher stationärer BESS decken. Je nachdem, wie hoch der Anteil der im Segment der stationären BESS maximal bedienten Nachfrage ist, hat die Nutzung der Second-Life-Anwendungen einen stärkeren Effekt. Durch die stärkere Verbreitung von LFP-Zellchemien bei den stationären BESS (vgl. Abschnitt 3.2) kann sich dies insbesondere in einem geringeren Lithium-Rohstoffbedarf niederschlagen. Eine höhere Restspeicherkapazität der Autobatterien am Ende ihrer ersten Lebenszeit hat keinen Effekt auf die Rezyklatverfügbarkeit, senkt jedoch die Nachfrage nach zusätzlichem Rezyklat, da weniger Ausbau stationärer BESS benötigt wird.

Um zu beurteilen, ob das in einem Jahr anfallende Rezyklat den Bedarf im jeweiligen Jahr decken kann, wird das Saldo aus Rezyklatverfügbarkeit und -nachfrage jeweils in Jahresscheiben betrachtet. Die Lebenszeiten der Batterien werden dabei in Anlehnung an Lichtenthäler/Bähr (2024) über Weibull-Verteilungen⁶ modelliert. Implizit wird auf Lichtenthäler/Bähr (2024) aufbauend weiterhin die Annahme getroffen, dass einerseits Batterien auch bei einer Unterdeckung von Recyclingmaterial gebaut werden und andererseits bei einem Überschuss keine Lagerhaltung über mehrere Jahre stattfindet. Ebenfalls könnte der Export überschüssigen Recyclingmaterials je nach Nachfrage im Ausland mit weiteren Erlösen verbunden sein, welche einen Anreiz zum Verkauf stellen. Ist die Nachfrage nach Rezyklat in einem Jahr hingegen größer als dessen Verfügbarkeit, könnte zusätzlich benötigtes Material ebenfalls über Importe aus dem Ausland gedeckt werden. Systematische Nachfrage- oder Angebotsüberschüsse werden in dem Modell somit grundsätzlich nicht zwischen den Jahren akkumuliert.

⁶ Weibull-Verteilungen der funktionalen Form $f(x) = \frac{k}{T} * \left(\frac{x}{T}\right)^{k-1} * e^{-\left(\frac{x}{T}\right)^k} \forall x > 0$ werden unter anderem für Zuverlässigkeits- und Lebensdaueruntersuchungen genutzt. Für die Parametrisierung wird in dieser Studie neben einer exogen festgelegten Lebenszeit (T) der Lageparameter $k = 5$ gewählt, sodass die Weibull-Verteilung in eine Normalverteilung konvergiert. Batterien haben somit eine mittlere Lebenszeit von T Jahren.

4.3 Aufbau des Basisszenarios

Der Aufbau des im vorigen Abschnitt skizzierten Modells erlaubt über die Wahl unterschiedlicher Parameter die Berechnung der Rezyklatnachfrage und -verfügbarkeit von Jahr zu Jahr in verschiedenen Szenarien. Für einen Szenarienvergleich wird in einem ersten Schritt ein Basisszenario entworfen, welches die Grundlage für die Analyse der Effekte alternativer Parametrisierungen bildet. Grundsätzlich werden Szenarien verglichen, welche entweder keine Second-Life-Anwendungen der Autobatterien aus der E-Mobilität als stationäre BESS vorsehen (**Modellvariante I**) oder deren Nutzung zulassen (**Modellvariante II**). Insgesamt werden vier unterschiedliche Subsznarien miteinander verglichen.

In allen Szenarien wird von einer durchschnittlichen Lebensdauer der Elektrofahrzeuge in Höhe von 14 Jahren ausgegangen. Dieser Wert orientiert sich an den Annahmen aus Lichtenthäler/Bähr (2024). Wenn eine Second-Life-Anwendung der Autobatterien aus der E-Mobilität erlaubt wird, wird auf Basis von Gao et al. (2024) von einer konservativ geschätzten zusätzlichen Lebensdauer in Höhe von zwölf Jahren ausgegangen. 15 Prozent der Fahrzeugbatterien gehen in diesem Fall in eine Nutzung als stationäres BESS über. In Anlehnung an die Angaben vom Fraunhofer ISI (2023) wird die durchschnittliche Restspeicherkapazität der Fahrzeugbatterien auf 80 Prozent gesetzt. Die maximal von den Second-Life-Batterien bediente Nachfrage aus dem Segment stationärer BESS liegt bei 20 Prozent. Generell wird von einer längeren Lebensdauer der Batterien im Anwendungsfall als stationäres BESS gegenüber dem Anwendungsfall in der E-Mobilität ausgegangen (vgl. VDE, 2021). Für die Lebensdauer der stationären BESS werden auf Karamov (2020) basierend zwei Fälle betrachtet: Im ersten Fall beträgt die durchschnittliche Lebensdauer 15 Jahre, im zweiten Fall beträgt sie 20 Jahre.

Die Berechnung der anfallenden und benötigten Recyclingmaterialien wird auf den Angaben der EU-Batterieverordnung aufgebaut – da dort keine spezifischen Angaben zu den Sammelquoten von Traktionsbatterien, welche in Elektroautos genutzt werden, und den Batterien aus stationären BESS am Ende ihrer Lebenszeit getroffen werden, wird sich an der Parametrisierung in Lichtenthäler/Bähr (2024) orientiert: Im Bereich der E-Mobilität wird die Sammelquote auf 90 Prozent festgelegt, während sie bei stationären BESS 95 Prozent beträgt. Die Annahmen der Modellparameter fügen sich insgesamt in folgende vier Szenarien zusammen:

Tabelle 4-2: Übersicht der betrachteten Szenarien

Übersicht der gewählten Parameter für den Szenarienvergleich in Abschnitt 5

		E-Mobilität	
		Lebensdauer: 14 Jahre	Lebensdauer: 14 Jahre, Second Life: 12 Jahre
Stationäre BESS	Lebensdauer: 15 Jahre	Szenario 1	Szenario 3
	Lebensdauer: 20 Jahre	Szenario 2	Szenario 4
Parameter zu Second-Life-Anwendungen:			
Anteil der Second-Life-Anwendungen aus der E-Mobilität:			15 Prozent
Maximale Bedarfsdeckung der Nachfrage von stationären BESS:			20 Prozent
Restspeicherkapazität der Autobatterien:			80 Prozent

Anmerkung: Die Szenarien 1 und 2 beziehen sich auf die Modellvariante I (ohne Second-Life-Anwendungen). Szenarien 3 und 4 beziehen sich auf Modellvariante II (mit Second-Life-Anwendungen).

Quelle: Institut der deutschen Wirtschaft

5 Ergebnisse

Das folgende Kapitel analysiert die Möglichkeit der Einhaltung der Vorgaben aus der EU-Batterieverordnung für die beiden Märkte der E-Mobilität und stationärer BESS in Deutschland. Dazu wird die prognostizierte Nachfrage nach Rezyklaten von Lithium, Nickel und Kobalt für die jeweiligen Szenarien der Rezyklatverfügbarkeit im betreffenden Jahr gegenübergestellt. In Abschnitt 5.1 werden zunächst die Hauptergebnisse unter Berücksichtigung der Annahmen zum Basisszenario aus Abschnitt 4.3 dargestellt. Im Anschluss werden zwei Alternativszenarien analysiert. Abschnitt 5.2 untersucht den Effekt eines verzögerten Markthochlaufs der E-Mobilität, in welchem zwar das Ziel von 15 Millionen BEV bis 2030 erreicht wird, jedoch zunächst weniger BEV in den Bestand eingehen. Abschnitt 5.3 betrachtet den Rohstoffbedarf im Markt für stationäre BESS isoliert, um abzuschätzen, wie wichtig das Recyclingmaterial aus der E-Mobilität für ein Erreichen der Vorgaben der EU-Batterieverordnung ist.

5.1 Ergebnisse im Basisszenario

Im Basisszenario wird davon ausgegangen, dass sich die Speicherkapazitäten der stationären BESS entsprechend der Benchmarks aus dem Szenariorahmen der UNB weiterentwickeln. Im Jahr 2037 wird dabei eine Kapazität von 202 GWh erreicht, welche bis 2045 auf 318 GWh weiter ansteigt. In der E-Mobilität wird das Ziel der Bundesregierung, bis 2030 insgesamt 15 Millionen BEV im Fahrzeugbestand zu halten erreicht und die Verkehrswende schreitet entsprechend der Bestrebungen, bis 2035 keine Verbrennungsmotoren mehr zuzulassen, voran. Bis 2030 werden dadurch insgesamt 853 GWh an Speicherkapazität in den Elektrofahrzeugen verbaut – bis 2045 steigt die Kapazität auf insgesamt 2,3 TWh weiter an. Die Ergebnisse des Basisszenarios werden zunächst für eine Übersicht der mit den Fortschreibungen der Speicherkapazitäten einhergehenden Rohstoff- und Rezyklatnachfragen in einer isolierten Betrachtung der beiden Märkte dargestellt, in welcher keine Second-Life-Anwendungen zum Einsatz kommen (Modellvariante I). Daran anschließend werden die Hauptergebnisse zum Saldo aus Rezyklataufkommen und -bedarf für die vier Szenarien aus Abschnitt 4.3 insgesamt dargestellt.



Rohstoffnachfrage und Rezyklataufkommen

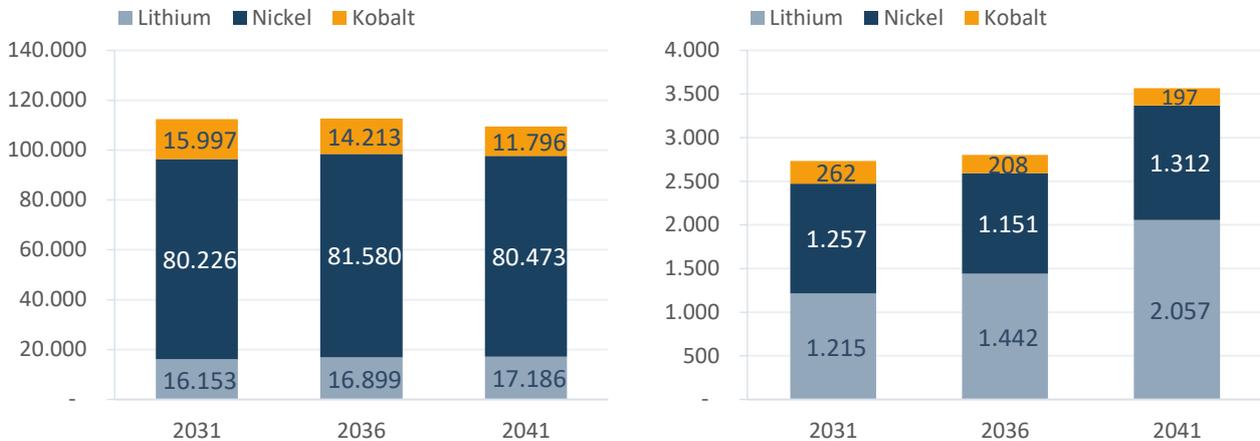
Isolierte Betrachtung der Elektrofahrzeuge und der stationären BESS

Für einen ersten Überblick wird zunächst der Fall betrachtet, in welchem die beiden Märkte unabhängig voneinander bleiben (Abbildung 5-1): In diesem Fall findet keine Second-Life-Anwendung der Fahrzeugbatterien als stationäre BESS statt. Für die Übersicht wird neben einer durchschnittlichen Lebensdauer von 14 Jahren für Elektrofahrzeuge eine „mittlere“ durchschnittliche Lebensdauer der stationären BESS in Höhe von 17,5 Jahren gewählt (vgl. Abschnitt 4.3). Entsprechend der Batterieverordnung liegen die Jahre 2031, 2036 und 2041 im Fokus. Um den Rohstoffbedarf für neue Elektrofahrzeuge und stationäre BESS im Jahr 2031 insgesamt zu decken, werden 17 Kilotonnen⁷ (kt) Lithium, 81 kt Nickel und 16 kt Kobalt benötigt. Im Jahr 2036 steigt die Nachfrage nach Lithium (18 kt) und Nickel (83 kt) weiter an, während die Nachfrage nach Kobalt (14 kt) sinkt. Im Jahr 2041 wächst der Rohstoffbedarf von Lithium (19 kt) weiter, während der Bedarf nach Nickel (82 kt) auf ähnlichem Niveau wie im Jahr 2036 bleibt. Die Nachfrage nach Kobalt (12 kt) sinkt währenddessen weiter.

⁷ Eine Kilotonne ist äquivalent zu 1000 Tonnen.

Abbildung 5-1: Entwicklung der insgesamten Rohstoffnachfrage nach Batterien

Insgesamter Bedarf an Lithium, Nickel und Kobalt für Elektrofahrzeuge (links) und stationäre BESS (rechts), in Tonnen, Jahre 2031, 2036 und 2041



Quelle: Institut der deutschen Wirtschaft

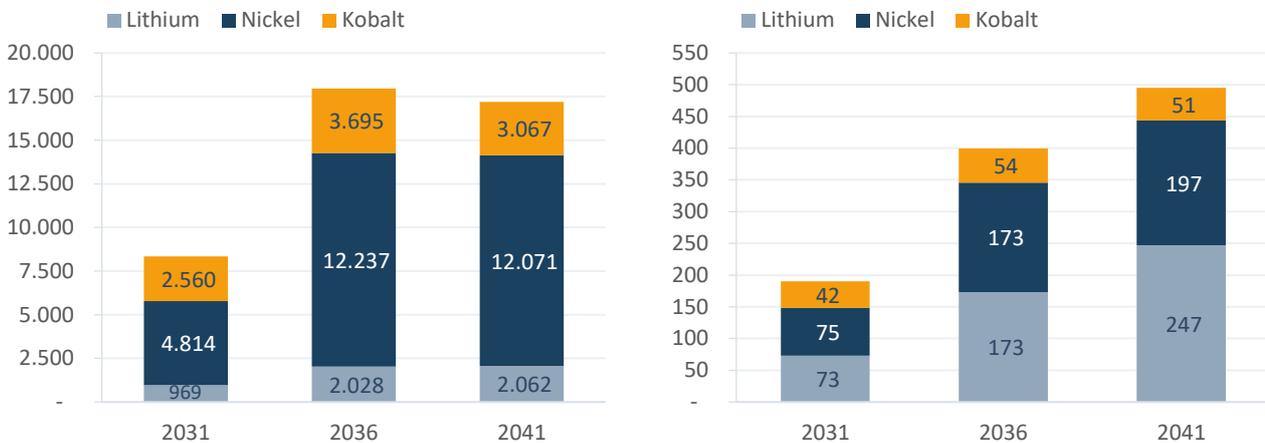
Die sinkende Kobaltnachfrage geht in Teilen aus dem Trend der NMC-Batterien zu weniger Kobalt- und mehr Nickelinhalt hervor, die bereits in Lichtenthäler/Bähr (2024) beschrieben wurde. Der zeitgleiche Anstieg an LFP-Batterien, welcher weder Kobalt noch Nickel für die Herstellung benötigt, steigert zeitgleich die Nachfrage nach Lithium. Da ab 2035 von einer konstanten Anzahl der Neuzulassungen ausgegangen wird und zwischen 2030 und 2045 die durchschnittliche Speicherkapazitaten⁸ auf Basis von FfE (2023) nur im Segment mittlerer BEV weiter zunehmen, liegt die Rohstoffnachfrage in der E-Mobilität im Jahr 2041 insgesamt leicht unter der Nachfrage des Jahres 2036. Die Entwicklung in den Marktanteilen der Zellchemien führt so insgesamt zu einer niedrigeren Rohstoffnachfrage, während trotz konstanter Neuzulassungen in der E-Mobilität die marginale Speicherkapazität von Jahr zu Jahr zunimmt. Insgesamt liegt der Rohstoffbedarf in der E-Mobilität in den drei Jahren somit nah beieinander. Im Segment der stationären BESS nimmt die Rohstoffnachfrage nach Lithium, Nickel und Kobalt in Summe hingegen zu, da hier auch bei einer linearen Fortschreibung im „zweiten Zeitintervall“ (Jahre 2037 bis 2045) mehr Speicher zugebaut werden als im „ersten Zeitintervall“ (Jahre 2024 bis 2037). Das liegt auch an den benötigten Reinvestitionen der Speicher, die erst im zweiten Zeitintervall das Ende ihrer Lebenszeit erreichen. Dabei zeigt sich generell aufgrund der Entwicklungen hin zur LFP-Zellchemie eine steigende Lithiumnachfrage und eine fallende Kobaltnachfrage.

Abbildung 5-2 stellt dar, wieviel Rezyklat für Elektrofahrzeuge und stationäre BESS zur Erfüllung der Vorgaben der EU-Batterieverordnung benötigt wird. Im Vergleich zu Abbildung 5-1 wird dabei direkt ersichtlich, wie sich die angehobenen Rezyklatquoten im Jahr 2036 (vgl. Abschnitt 3.3) auf die benötigten Rezyklatmengen auswirken. Die Zunahme zeigt sich vor allem in einer deutlich höheren Nachfrage nach Nickel-Rezyklat für Elektrofahrzeuge. Für stationäre BESS wird Lithium in vergleichbarer Größenordnung nachgefragt wie Nickel, was an der Entwicklung hin zu LFP-Batterien liegt.

⁸ Bei der konservativen Fortschreibung der Speicherkapazitäten wird im Segment der Kleinwagen von einem Anstieg von 20 kWh (Jahr 2024) auf 30 kWh (Jahr 2030) ausgegangen, welcher dann bis zum Jahr 2045 konstant bleibt. Die Speicherkapazität der Mittelklassewagen steigt von 50 kWh (Jahr 2024) über 60 kWh (Jahr 2030) auf 80 kWh (Jahr 2045) an. Die Speicherkapazität von Oberklassewagen steigt von 80 kWh (Jahr 2024) auf 90 kWh (Jahr 2030) an und verweilt auf diesem Niveau bis ins Jahr 2045 (FFE, 2024).

Abbildung 5-2: Entwicklung der Nachfrage nach Rohstoffen aus Recyclingmaterial für Batterien

Insgesamter Bedarf an Lithium-, Nickel- und Kobalt-Rezyklat für Elektrofahrzeuge (links) und stationäre BESS (rechts) bei Einhaltung der Rezyklateinsatzquoten der EU-Batterieverordnung, in Tonnen, Jahre 2031, 2036 und 2041



Quelle: Institut der deutschen Wirtschaft


Rezyklataufkommen und Rezyklatbedarf

Gemeinsame Betrachtung der Elektrofahrzeuge und stationären BESS

Die in der Folge dargestellten Szenarien kombinieren den Automobilmarkt mit dem Markt für stationäre BESS unter anderem vor dem Hintergrund des Ziels der Etablierung einer Kreislaufwirtschaft. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft ist die Weiterverwendung von Fahrzeugbatterien als stationäres BESS am Ende ihrer Lebenszeit dem Recycling vorzuziehen, da das Produkt weitergenutzt und seine Lebensdauer verlängert wird. Eine Auseinandersetzung mit den Vorgaben der Abfallhierarchie aus dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG, § 6) und der gleichzeitigen Erfüllung der Rezyklateinsatzquoten aus der EU-Batterieverordnung (Verordnung (EU) 2023/1542, § 8) bieten Lichtenthäler/Bähr (2024). Unter anderem sind die Preise für Primär- und Sekundärrohstoffe in der Praxis ein wesentlicher Faktor, durch den es für Hersteller wirtschaftlich attraktiver sein kann, die Batterien direkt dem Recycling zuzuführen.

Die berechneten Differenzen zwischen der Nachfrage nach Recyclingrohstoffen für neue Fahrzeugbatterien und stationäre BESS und den verfügbaren Mengen an Recyclingmaterialien aus alten Fahrzeugen und BESS werden in Abbildung 5-3 für die vier beschriebenen Szenarien aus Abschnitt 4.3 visualisiert. Hierbei bedeuten positive Werte, dass die zur Verfügung stehenden Mengen an Rezyklaten höher sind als die Mengen, die für die vorgeschriebenen Quoten benötigt werden. In diesen Fällen ist ausreichend Recyclingmaterial vorhanden, um die Vorgaben der Batterieverordnung zu erfüllen. Negative Werte bedeuten, dass die zur Verfügung stehenden Mengen an Rezyklaten niedriger sind als die Mengen, die für die vorgeschriebenen Quoten benötigt werden. In diesen Fällen ist nicht ausreichend Recyclingmaterial vorhanden, um die Vorgaben der Batterieverordnung zu erfüllen.

Abbildung 5-3: Vergleich von Rezyklataufkommen und Rezyklateinsatz für Fahrzeugbatterien und stationäre BESS

Differenz zwischen rechnerischem Rezyklataufkommen aus Fahrzeugbatterien und stationären BESS und von der EU-Batterieverordnung vorgeschriebenem Rezyklateinsatz, in Tonnen, Jahre 2031 und 2036



Quelle: Institut der deutschen Wirtschaft

Auffallend für alle Rohstoffe und alle Szenarien ist die Tatsache, dass eine Unterdeckung von Recyclingmaterial nur für einen gewissen Zeitraum vorhanden ist und sich bis 2036 wieder aufgelöst hat. Die Vorgaben aus der EU-Batterieverordnung für das Jahr 2036 können demnach für die Kombination beider Märkte in Deutschland voraussichtlich gedeckt werden. Dieses Ergebnis unterscheidet sich grundlegend von der alleinigen Betrachtung des Fahrzeugmarkts in der EU bei Lichtenthäler/Bähr (2024). Die Autoren sagen in ihrer Analyse des europäischen Fahrzeugmarkts eine Knappheit für Lithium und Kobalt abhängig vom Szenario auch im Jahr 2036 voraus. Im Jahr 2031 sind die hier gezeigten Unterdeckungen für Kobalt am stärksten. Ähnlich wie auf EU-Ebene ist dies durch zwei wesentliche Faktoren begründet: Zum einen sind die vorgegebenen Rezyklateinsatzquoten der EU-Batterieverordnung für Kobalt im Vergleich zu den Vorgaben für Nickel und Lithium am höchsten und zum anderen verbleiben bei der Annahme einer längeren Lebensdauer zum Beispiel durch Second-Life-Anwendungen die besonders kobalthaltigen Batterien länger in Nutzung (ebenda). Auch für Lithium und Nickel sind jedoch die Unterdeckungen im Jahr 2031 sehr deutlich, wobei sie in Szenario 4 für alle betrachteten Rohstoffe am stärksten ausfällt. Dies ist das Szenario, in dem Second-Life-Anwendungen angenommen werden und die durchschnittliche Lebensdauer von stationären BESS mit 20 Jahren vergleichsweise hoch ist. Wie in Abschnitt 4.2 bereits erwähnt, führt die Nutzung von Fahrzeugbatterien in Second-Life-Anwendungen dazu, dass die Rohstoffe nach dem Ende des automobilen Lebens nicht direkt dem Recycling zugeführt werden, auch wenn gleichzeitig weniger Rohstoffe für neue stationäre BESS benötigt werden. Die längere durchschnittliche Lebensdauer stationärer BESS führt dazu, dass auch hier Rohstoffe länger gebunden sind, bevor ihre Materialien recycelt werden. Trotz der resultierenden höheren Knappheit im Jahr 2031 ist dies aber dennoch im Sinne der Kreislaufwirtschaft erstrebenswert.

Während die Analyse von Lichtenthäler/Bähr (2024) zu dem Schluss kommt, dass die Erreichung der Rezyklateinsatzquoten aus der EU-Batterieverordnung für den Automobilmarkt in der EU sehr ambitioniert ist, aber zumindest für Lithium und Nickel als erreichbar eingestuft werden kann, zeigen die Ergebnisse der vorliegenden Analyse, dass eine Erfüllung der Vorgaben der Verordnung für Deutschland allein nicht realistisch erscheint, wenn Automobil- und Speichermarkt gemeinsam betrachtet werden. Analog zu Lichtenthäler/Bähr (2024) wurden auch in der vorliegenden Studie keine Preiseffekte oder Marktreaktionen in die Analyse mit aufgenommen. Veränderungen von Rohstoffpreisen oder Nachfrageverschiebungen hinsichtlich der Batterietypen können die Nachfrage nach Recyclingmaterialien beeinflussen. Dies kann auch als Reaktion auf die knappen Mengen Recyclingmaterialien geschehen, sodass hier eine wechselseitige Abhängigkeit existiert.

5.2 Effekte eines verzögerten Markthochlaufs der E-Mobilität

Die Prognosen bezüglich der Rezyklataufkommen und -nachfrage sind neben anderen Faktoren abhängig vom Hochlaufprofil der Elektrofahrzeuge. Bedingt ist diese Abhängigkeit auch dadurch, dass die Batteriekapazitäten im Automobilmarkt die des stationären Speichermarkts deutlich übersteigen (vgl. Abschnitt 2.1). Ein langsamerer Hochlauf würde beispielsweise die berechneten Knappheiten der Rezyklate reduzieren. Geht man jedoch nur für einen kurzen Zeitraum von einem geringeren Wachstumspfad aus, der danach wieder wächst, vergrößert sich die Rezyklatknappheit beziehungsweise der Überschuss an Rezyklaten verringert sich. Grund dafür ist, dass das große Volumen der Fahrzeugbatterien erst später recycelt wird, die hohen Vorgaben aber dennoch erfüllt werden müssen. Die bisher beobachtbaren Bestandszunahmen in der E-Mobilität gingen in Teilen auch auf politisch beschlossene Subventionen wie den Umweltbonus und die Innovationsprämie zurück, welche bei einer Anschaffung der Fahrzeuge einen Teil der Kosten mitfinanziert haben (FfE, 2023; IEA, 2023). Jene Subventionen sind jedoch in Folge benötigter Einsparungen des Klima- und

Transformationsfonds im Dezember 2023 beendet worden,⁹ was unter anderem die derzeit beobachtbare Abnahme an Neuzulassungen für BEV mit erklärt (vgl. KBA, 2024c). Aufgrund des aktuell stockenden Hochlaufs der E-Mobilität in Deutschland wird hier ein Szenario eines verzögerten Markthochlaufs betrachtet, welches im Rahmen eines Robustheitschecks des Modells getestet wird.

Um eine Verzögerung des Markthochlaufs bei der E-Mobilität zu modellieren, wird die Entwicklung im Basisszenario über eine Exponentialfunktion¹⁰ dahingehend transformiert, dass ab 2023 zunächst eine geringere Anzahl an BEV zugelassen wird (vgl. Abbildung A-3, Anhang). Die Zulassungen der BEV nehmen dennoch dann in kürzerer Zeit bis 2030 so zu, dass sich wie im Basisszenario ein Bestand von 15 Millionen BEV ergibt. Die Entwicklungen der PHEV, deren Neuzulassungen ab 2023 bis 2035 konstant abnehmen, sind von dieser Transformation ausgenommen. Wie im Basisszenario wird angenommen, dass die Neuzulassungen von BEV, welche im Jahr 2030 mit insgesamt 2,9 Millionen Fahrzeugen rund 96 Prozent aller Zulassungen ausmachen, bis 2035 weiter auf 100 Prozent ansteigen. Ab 2035 werden die Neuzulassungen auf einem Niveau von rund 3 Millionen Fahrzeugen festgehalten, was 100 Prozent der Neuzulassungen aus dem Jahr 2030 entspricht.

In Abbildung 5-4 wird der Effekt eines verzögerten Markthochlaufs der E-Mobilität auf die Einhaltung der Vorgaben der EU-Batterieverordnung dargestellt. Im Vergleich zu den Ergebnissen des Basisszenarios aus Abschnitt 5.1 zeigt sich dabei eine deutliche Verknappung in der Rezyklatverfügbarkeit über alle Rohstoffe hinweg. Im Szenario mit einer Second-Life-Anwendung der Fahrzeugbatterien als stationäre BESS und einer Lebensdauer der BESS in Höhe von 20 Jahren (Szenario 4) ist die Knappheit von Lithium, Nickel und Kobalt am stärksten ausgeprägt. Der Effekt des verzögerten Markthochlaufs schlägt sich generell darin nieder, dass die in den Elektrofahrzeugen gebundenen Rohstoffe erst zu einem späteren Zeitpunkt dem Recycling zur Verfügung stehen. Aufgrund der angenommenen Lebenszeit der Autobatterien in Höhe von durchschnittlich 14 Jahren wird die Verknappung des Rezyklats bei sonst gleichbleibender Nachfrage vor allem bei einem Vergleich im Jahr 2036 sichtbar. Ähnlich wie im Basisszenario aus Abschnitt 5.1 ist vor allem die Verfügbarkeit von Kobalt problematisch. Während die Rezyklatnachfrage im Jahr 2035 erstmals durch das anfallende Rezyklat aus Kobalt gedeckt werden kann, fällt sie im Folgejahr aufgrund einer erhöhten Rezyklateinsatzquote in allen Szenarien wieder ins Negative. Im Basisszenario konnte die erhöhte Rezyklateinsatzquote hingegen noch bedient werden.

Insgesamt muss hier betont werden, dass die Effekte eines langsameren Hochlaufs der E-Mobilität stark ausfallen, wenn in die Interpretation mit einbezogen wird, dass sich die hier ausgewiesenen Unterschiede in der Höhe der Neuzulassungen insgesamt nur auf einen Zeitraum von sechs Jahren beziehen. Denn sowohl im Basis- als auch im Alternativszenario wird die Zielsetzung von 15 Millionen BEV im Jahr 2030 immer noch erreicht. Die Lücke zwischen dem zur Verfügung stehenden und dem benötigten Rezyklat wird dabei umso größer sein, wenn der Bestand bis zum Jahr 2030 die Zielmarke der Bundesregierung gar nicht erst erreicht und erst danach die Voraussetzungen geschaffen werden, um den Wechsel hin zur E-Mobilität zu beschleunigen: Ein sprunghafter Anstieg an Neuzulassungen wird nicht mit den benötigten Recyclingmengen vereinbar sein.

⁹ Dennoch bleiben auch weiterhin bestimmte Privilegien für BEV gegenüber Fahrzeugen mit konventionellen Antriebsarten bestehen, zum Beispiel geringere Parkkosten oder Freistellungen von Zufahrtsbeschränkungen (EmoG, § 3).

¹⁰ Die Transformation der Entwicklungen der Neuzulassungen von BEV erfolgt in drei Schritten. Zunächst wird die ursprüngliche Zeitreihe auf ein Intervall zwischen 0 und 1 normiert. Daraufauf folgt auf die normierten Werte eine exponentielle Transformation der Form $y_t = (e^{kx_{norm}} - 1) * (e^k - 1)$ mit einem Krümmungsparameter $k = 2$ angewendet. Die transformierten Werte y_t werden im letzten Schritt genutzt, um die Entwicklung der Neuzulassungen zwischen 2023 und 2030 zu skalieren.

Abbildung 5-4: Vergleich von Rezyklataufkommen und Rezyklateinsatz für Fahrzeugbatterien und stationäre BESS bei verzögertem Markthochlauf der E-Mobilität

Differenz zwischen rechnerischem Rezyklataufkommen aus Fahrzeugbatterien und stationären BESS und von der EU-Batterieverordnung vorgeschriebenem Rezyklateinsatz in Tonnen, Jahre 2031 und 2036



Quelle: Institut der deutschen Wirtschaft

5.3 Relevanz des Recyclingmaterials aus der E-Mobilität für stationäre Batteriespeichersysteme

Im Gegensatz zur E-Mobilität zeigt sich derzeit im Segment der stationären BESS ein starker Zubau, welcher durch die fallenden Preise für BESS auch in Zukunft weitgehend anhalten könnte (vgl. Abschnitt 2.1). Spätestens die im Dezember 2023 veröffentlichte Stromspeicherstrategie der Bundesregierung unterstreicht nun, dass die Stromspeicherung anhand stationärer BESS generell als zentraler Pfeiler für ein Erreichen der Klimaneutralität angesehen wird. Durch das Beseitigen bestehender Investitionshindernisse wie etwa langsame Genehmigungs- und Netzanschlussverfahren, soll dabei perspektivisch auch der Weg für weitere Investitionen in stationäre (Groß-)speicher frei gemacht werden (BMWK, 2023).

In diesem Kapitel wird der Fokus auf die Entwicklungen im Markt für stationäre BESS gelegt und die Frage beantwortet, inwiefern das für dessen künftigen Ausbau benötigte Rezyklat aus dem Recyclingmaterial der derzeit aktiven BESS allein bedient werden kann. Entsprechend wird der stationäre Speichermarkt isoliert betrachtet. Eine beständige Rezyklatknappheit verdeutlicht dahingehend, wie wichtig das Recycling der Elektrofahrzeuge für die Deckung des Bedarfs im Bereich stationärer BESS ist – und inwiefern der Export von Fahrzeugen für ein Recycling außerhalb Deutschlands eine Bedrohung für das Erreichen der Ziele der EU-Batterieverordnung darstellt. Dabei wird entsprechend der Annahmen aus Abschnitt 4.3 eine Lebensdauer der BESS in Höhe von 15 Jahren (**Fall 1**) und 20 Jahren (**Fall 2**) angenommen. Um zu untersuchen, wie die Geschwindigkeit des Speicherzubaues den Bedarf nach Rezyklat beeinflusst, werden weiterhin zwei verschiedene Ausbautrends modelliert (vgl. Abbildung A-4, Anhang).

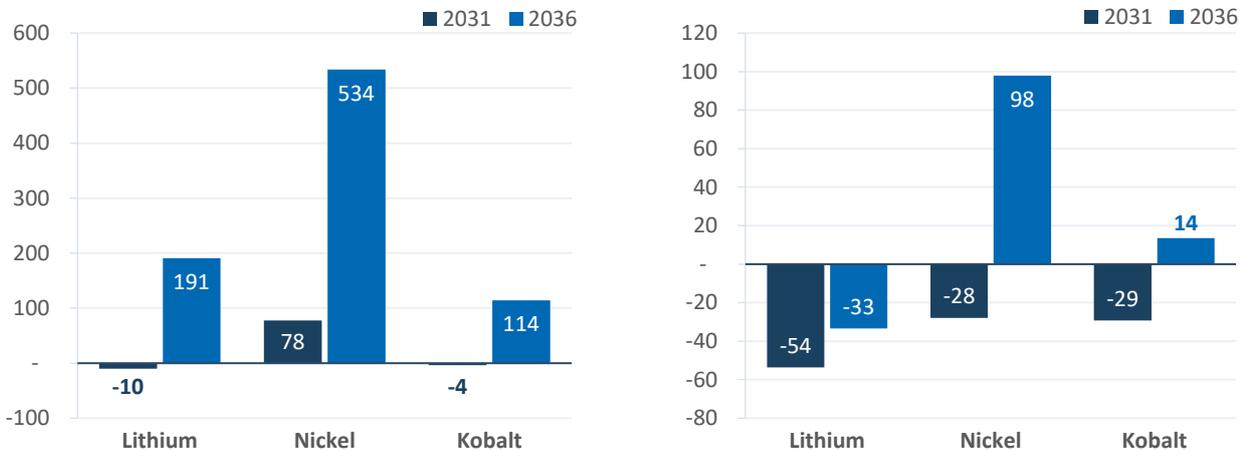


Im **ersten Szenario** wird der Ausbaustand entsprechend des vorangegangenen Abschnitts **linear** fortgeschrieben. Die Speicherkapazität erreicht so die Benchmarks aus dem Szenariorahmen der ÜNB für die Jahre 2037 (202 GWh) und 2045 (318 GWh).

Abbildung 5-5 stellt die Ergebnisse für eine isolierte Betrachtung der stationären BESS dar, wenn davon ausgegangen wird, dass deren Zubau zwischen dem Ausbaustand vom Juni 2024 bis zu den jeweiligen Zielen des Szenariorahmens der ÜNB (50 Hertz et al., 2024) linear ansteigt. Generell zeigt sich dabei, dass sowohl in beiden Fällen Defizite in der Rezyklatverfügbarkeit bestehen. Bei einer angenommenen Lebenszeit von 15 Jahren (Abbildung 5-5, links) liegt der Bedarf nach Rezyklat für Lithium und Kobalt nur knapp über dessen Verfügbarkeit. Hingegen zeigt sich, dass die Nachfrage nach Nickel auch ohne das Recyclingmaterial aus alten Fahrzeugbatterien bedient werden kann. Die Resultate ändern sich vergleichsweise stark bei einer längeren angenommenen Lebenszeit der stationären BESS (Abbildung 5-5, rechts). In diesem Fall besteht vor allem bei Lithium (bis hin zum Jahr 2037) eine höhere Nachfrage als aus dem Recycling alter BESS zur Verfügung gestellt werden kann. Sowohl bei der Verfügbarkeit von Nickel als auch Kobalt bestehen temporäre Engpässe, welche sich im Jahr 2032 für Nickel und im Jahr 2033 für Kobalt auflösen.

Abbildung 5-5: Rezyklataufkommen und -einsatz bei stationären BESS: Linearer Ausbautrend

Differenzen im Bereich der stationären BESS mit einer Lebensdauer von 15 Jahren (links) und 20 Jahren (rechts) in Tonnen, lineare Fortschreibung des Ausbautrends



Quelle: Institut der deutschen Wirtschaft



Im **zweiten Szenario** wird der Ausbaustand auf Basis einer **S-Kurve** modelliert. Der zunächst schnellere Zubau der Speicherkapazitäten führt dabei zu einem höheren Wert als im NEP für das Jahr 2037 angenommen ist, während der Wert für das Jahr 2045 wie geplant erreicht wird.

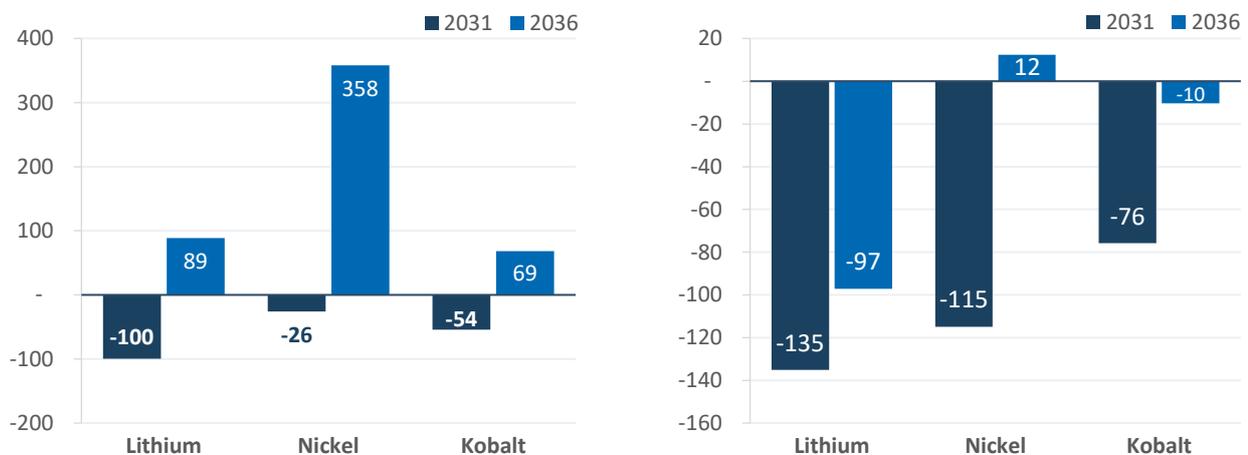
Die alternative Berechnung auf Basis einer S-Kurve geht darauf ein, dass aktuell auch weiterhin mit einem steigenden Zubau der Speicherkapazitäten stationärer BESS, etwa infolge weiterer Preissenkungen der LIB-Technologie, ausgegangen wird (BloombergNEF, 2023a; Figgner et al., 2023). Die steigende Zubaugeschwindigkeit wird dabei durch den zunächst exponentiell ansteigenden Teil der S-Kurve beschrieben („Anlaufphase“). Der Speicherzubau kann im Laufe der Zeit dennoch abnehmen, etwa wenn durch eine steigende Anzahl an (Groß-)Speichern am Strommarkt Kannibalisierungseffekte auftreten, die die Wirtschaftlichkeit der Speicher verringern und weiteren Zubau hemmen (50 Hertz et al., 2024). Diese Kannibalisierungseffekte können beispielsweise dann entstehen, wenn viele Speicher zum gleichen Zeitpunkt Strom einspeichern (wenn der Preis niedrig ist) und wieder ins Netz abgeben (wenn der Preis hoch ist). Dadurch nehmen die Strompreisdifferenziale zwischen Hoch- und Niedrigpreisphasen ab, wodurch aus Sicht der Speicherbetreiber die potenziell erreichbaren Gewinne sinken und Investitionsanreize für neue Speicher entsprechend abnehmen. Dieser (Sättigungs-)Effekt wird durch eine über die Zeit abnehmende Steigung beschrieben, in welchem der Zubau neuer Speicher langsam abflacht („Abflachungsphase“). Durch eine Modellierung auf Basis einer S-Kurve steigt somit in der Anlaufphase die Rezyklatnachfrage stärker an (und am Ende der Lebenszeit fällt mehr Recyclingmaterial an), während in der Abflachungsphase eine geringere Rezyklatnachfrage herrscht (und später entsprechend weniger Rezyklat zur Verfügung steht).

In Abbildung 5-6 werden die Ergebnisse zum Rezyklataufkommen und -einsatz aus stationären BESS unter dem Zubauprofil einer S-Kurve dargestellt. Auch hier kommt es in beiden Fällen zu Rezyklatknappheiten, welche jedoch tendenziell stärker ausfallen als die, die anhand des linearen Zubauprofils entstehen. Dadurch, dass in diesem Szenario der Bedarf an stationären BESS den derzeit beobachtbaren exponentiellen Zubau weiterführt, kommt es zu einer zunächst höheren Nachfrage nach Rezyklat. Unter der Annahme einer Lebensdauer von 15 Jahren (Abbildung 5-6, links), sind in allen drei Rohstoffen vorübergehende Engpässe

beobachtbar. Die Defizite in der Rezyklatverfügbarkeit werden bei einer längeren Lebensdauer der BESS (Abbildung 5-6, rechts) umso bedeutender. In diesem Fall bestehen sowohl für Lithium als auch für Kobalt persistente Engpässe, wobei auch der Bedarf an rezyklierten Nickel nur knapp gedeckt wird. Dadurch, dass bei einem s-förmigen Zubauprofil nach einer Phase exponentiellen Wachstums der Zubau langsam abnimmt, während die früh installierten BESS langsam das Ende ihrer Lebenszeit erreichen, wird für Kobalt bereits im Jahr 2037 der Bedarf an Rezyklat gedeckt werden können. Für Lithium ist dies im Jahr 2038 der Fall.

Abbildung 5-6: Rezyklataufkommen und -einsatz bei stationären BESS: S-kurviger Ausbautrend

Differenzen im Segment der stationären BESS mit einer Lebensdauer von 15 Jahren (links) und 20 Jahren (rechts) in Tonnen, s-kurvige Fortschreibung des Ausbautrends



Quelle: Institut der deutschen Wirtschaft

Die Ergebnisse verdeutlichen insgesamt, dass auch im Bereich der stationären BESS temporäre Engpässe in der Versorgung mit Recyclingmaterialien auftreten können, welche nicht allein durch die zurückkommenden Rohstoffe der derzeit betriebenen BESS am Ende ihrer Lebenszeit gedeckt werden können. Aufgrund der hohen Verbreitung der LFP-Zellchemie, welche insbesondere auf der Verfügbarkeit von Lithium aufbaut, ist die Knappheit in diesem Rohstoff besonders auffallend. Insgesamt zeichnet sich durch die Ergebnisse ab, dass das Recycling der Fahrzeugbatterien aus der E-Mobilität für die Bedarfsdeckung des Rezyklats für die stationäre Stromspeicherung eine wichtige Rolle spielen wird. Durch die hohe Anzahl der Rohstoffe, welche gegenüber dem Bedarf der stationären BESS aus der E-Mobilität gedeckt werden können, scheint die Bedarfsdeckung zwar möglich zu sein. Wichtig ist dennoch zu gewährleisten, dass die Fahrzeuge, die das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben, im Inland bleiben, sodass die Rohstoffe vor Ort dem Recyclingkreislauf zugeführt werden können.

6 Fazit

Die vorliegende Studie hat analysiert, inwiefern die Vorgaben der EU-Batterieverordnung innerhalb Deutschlands erreicht werden können, wenn neben dem Bedarf an Recyclingmaterial in der E-Mobilität auch die Nachfrage im Bereich stationärer BESS einbezogen wird. Grundsätzlich zeichnet sich dabei ab, dass die Ergebnisse maßgeblich durch das Hochlaufprofil der E-Mobilität getrieben werden, da die in den Elektrofahrzeugen gebundenen Rohstoffe schon jetzt ein Vielfaches der Rohstoffe im Bereich stationärer BESS betragen. Generell passt diese Beobachtung zu den Prognosen auf internationaler Ebene, welche ebenfalls davon ausgehen, dass die Hauptquelle des Recyclingmaterials für LIB ab 2030 aus Fahrzeugbatterien kommen wird. Dabei wird auch von einer Zunahme der Second-Life-Anwendungen ausgegangen (Fraunhofer FFB, 2023).

Auf EU-Ebene haben die Auswertungen zur Rezyklatverfügbarkeit und -nachfrage mit einem Fokus auf die E-Mobilität von Lichtenthäler/Bähr (2024) ergeben, dass die Vorgaben der EU-Batterieverordnung zwar ambitioniert sind, jedoch zumindest für Nickel und Lithium absehbar erreicht werden können. Diese Studie zeigt, dass bei einer Betrachtung auf Deutschlandebene für Nickel, Lithium und Kobalt temporäre Rezyklatengpässe zu erwarten sind. Die Engpässe fallen hinsichtlich der Verfügbarkeit von Kobalt am problematischsten aus. Während Second-Life-Anwendungen der Fahrzeugbatterien die Rezyklatknappheit noch verstärken, da etwa die besonders kobalthaltigen Batterien erst später recycelt werden, ist deren Nutzung im Sinne der Ressourceneffizienz dennoch erstrebenswert. Entsprechend ist positiv zu bewerten, dass sich bereits jetzt verschiedene Projekte zu Second-Life-Anwendungen in Europa etabliert haben, von denen sich zahlreiche in Deutschland befinden (VDE, 2022). Die Weiternutzung der Fahrzeugbatterien ist dennoch aktuell mit verschiedenen Herausforderungen verbunden. So ist oft unklar, in welchem Zustand sich die Batterien nach dem Ende ihrer ersten Lebenszeit befinden, oder wie lange sie noch weiter verwendbar sind – darüber hinaus erfordert eine Weiternutzung oftmals umfangreiche technische Eingriffe (Fraunhofer ISI, 2023). Hier geht die EU-Batterieverordnung wichtige Schritte, indem sie die Grundlage für einen digitalen Produktpass bildet, welcher künftig jederzeit Daten zum Alterungszustand und der voraussichtlichen Lebensdauer der Batterien zur Verfügung stellen könnte, wenn er entsprechend aktueller Bestrebungen umgesetzt wird (Neligan et al., 2023).

Für die Batterien, für welche keine Second-Life-Anwendungen mehr in Frage kommen, muss hingegen gewährleistet werden, dass diese am Ende ihrer Lebensdauer möglichst vollständig eingesammelt und dem Recyclingkreislauf zugeführt werden, sodass das Batterierecycling einen Beitrag zur Versorgung mit den darin enthaltenen kritischen Rohstoffe leisten kann (Bähr et al., 2024). Werden gebrauchte Elektrofahrzeuge mit samt der in ihnen gebundenen Rohstoffe hingegen exportiert, fehlen diese für den Bau neuer Fahrzeuge und BESS und verschärfen somit bestehende Importabhängigkeiten. Diese Abhängigkeiten können zu einem erhöhten Risiko an Versorgungsunterbrechungen in der Rohstoffzufuhr führen und entsprechend negative Auswirkungen auf die inländische Wertschöpfung mit sich bringen. Der europäische Critical Raw Materials Act schreibt daher vor, dass künftig 25 Prozent des jährlichen Verbrauchs in der Union durch Recycling gedeckt werden sollen (Verordnung (EU) 2024/1252 § 5). So wird etwa ein Ansteigen der inländischen Recyclingkapazitäten motiviert, welches den Aufbau der Recyclingwirtschaft fördert. Die EU-Batterieverordnung denkt diese Zielsetzungen weiter und incentiviert über die verpflichtenden Rezyklatquoten indirekt ebenfalls eine erhöhte Sammelquote für die Batterien, welche keine spezifischen Sammelquoten vorgegeben bekommen haben. Denn um die verpflichtenden Anteile neuer Batterien aus Recyclingmaterial (Rezyklatquote) zu bedienen, müssen Batterien am Ende ihrer Lebenszeit möglichst im Inland eingesammelt und dem Recycling zur Verfügung gestellt werden (Sammelquote). Diesbezüglich führt die EU-Batterieverordnung neben einer

nachhaltigeren Batterieproduktion ebenfalls zu einer erhöhten Resilienz der Rohstoffversorgung – und lässt sich so theoretisch ebenfalls als nicht-tarifäre Handelsbeschränkung interpretieren.

Während die EU-Batterieverordnung unter anderem die Rolle der Rohstoffe hervorhebt, welche für die Produktion von LIB am wichtigsten sind, könnten perspektivisch alternative Zellchemien weitere Abhilfe schaffen und ein Einhalten der Vorgaben zu Rezyklatanteilen begünstigen. NIB können auch ohne Lithium, Nickel und Kobalt hergestellt werden und mindern so perspektivisch deren Rohstoffnachfrage. Bereits jetzt werden erste Elektrofahrzeuge und stationäre BESS in China mit NIB-Batterien gebaut. Dabei stützt die chinesische Regierung die Entwicklung der NIB kontinuierlich, um auch in den kommenden Jahren eine führende Rolle in dieser Technologie einzunehmen, wobei sie diese auch jetzt schon im Bereich der LFP-Zellchemien für LIB hat (Fraunhofer FFB, 2023). Die Batteriezellforschung ist auch daher wichtig, da mit ihr sowohl bestehende LIB hinsichtlich ihres Rohstoffbedarfs optimiert als auch alternative Zellchemien wie NIB für einen Markthochlauf vorbereitet werden können. Die aktuellen Bestrebungen im Entwurf zum Bundeshaushalt 2025, projektbasierte Förderungen im Bereich der Batteriezellforschung in Deutschland (unter anderem aufgrund der fehlenden Mittel im Klima- und Transformationsfonds) auslaufen zu lassen, ist daher ein klarer Schritt in die falsche Richtung. Denn eine schwache inländische Batteriezellforschung kann sich auch in einer steigenden Rohstoffabhängigkeit niederschlagen, die die eigene Staatssouveränität mindert. Gerade im Automobilsektor sollte Deutschland daher für eine wettbewerbsfähige Batteriewertschöpfungskette eintreten, was auch eine entsprechende Ausweitung der Recyclingkapazitäten bedeutet (Schaefer et al., 2024). Während ein wesentlicher Grund für das starke Wachstum der E-Mobilität in China ein starker lokaler Markt für die BEV war, führen hingegen die anhaltenden Diskussionen zur Überarbeitung der CO₂-Flottengrenzen sowohl in der Bevölkerung als auch in der Industrie zu Verunsicherungen. Das Auslaufen der Batteriezellforschung könnte dabei perspektivisch dazu führen, dass nicht nur der Hochlauf der E-Mobilität behindert wird, sondern Deutschland generell in dieser Zukunftstechnologie an Wettbewerbsfähigkeit einbüßt.

In der Analyse ist weiterhin ersichtlich geworden, dass das Normengerüst der EU-Batterieverordnung maßgeblich vom Einhalten der zugrunde gelegten Hochlaufpfade der Märkte abhängt, deren konkret vorgeschriebene Rezyklatanteile bei Abweichungen mit den tatsächlichen Hochlaufpfaden kontrastieren können: Es werden Zielkonflikte sichtbar. Die Auswirkungen eines verzögerten Hochlaufs der E-Mobilität zeigen etwa, dass die Zielsetzungen nur dann erreicht werden können, wenn Deutschland jetzt in die Verkehrswende investiert und diese kontinuierlich voranschreitet. Andernfalls erfordern die starren Rezyklatquoten eine Deckung durch Recyclingmaterial, welches zumindest temporär nicht zur Verfügung steht. Ähnliches zeigt sich in einer isolierten Betrachtung des stationären Speichermarkts: Weicht man von einem konservativ geschätzten linearen Zubauprofil der Speicherkapazitäten ab und erlaubt ein Hochlaufprofil mit einer zum aktuellen Ausbautrend eher passenden exponentiellen Fortschreibung, welche langsam abflacht, steigt die Nachfrage nach Rezyklat aus dem Bereich der E-Mobilität an. Gerade Kobalt und Lithium wird für stationäre BESS in allen Szenarien mindestens temporär aus alten Fahrzeugbatterien bereitgestellt werden müssen. Offensichtlich ist dabei, dass es nicht erstrebenswert sein kann, die Batterieproduktion in Deutschland (oder der EU) zu bremsen, um auf die rigiden Rezyklatquoten eingehen zu können. Ebenso ist eine geminderte Nutzung von Second-Life-Anwendungen aus kreislaufwirtschaftlicher Sicht nicht zielführend. Damit die EU-Batterieverordnung einen Beitrag für eine nachhaltige Produktion und zunehmende Resilienz der Rohstoffversorgung leisten kann, muss sie mit den bestehenden Entwicklungen in Einklang gebracht werden. Daher ist es notwendig, in den vorgeschriebenen Quoten Anpassungsbereitschaft zu zeigen oder die nicht intendierten Konsequenzen eines Verfehlens dieser zu tragen.

7 Abstract

This study examines the achievability of the requirements of the EU Battery Regulation in Germany if, in addition to the raw materials required for the ramp-up of electromobility, the expansion of stationary battery energy storage systems is also taken into account. For this analysis, a model was developed that incorporates the interactions between the two markets - particularly with regard to second-life applications of vehicle batteries for stationary electricity storage. The study focusses on the availability of recycled lithium, nickel and cobalt. In order to assess whether the recyclate produced in a given year can cover the demand in that year, the balance of recyclate availability and demand is considered in annual slices.

Main results: In Germany, temporary shortages of recyclate for lithium, nickel and cobalt are expected. These bottlenecks are most problematic with regard to the availability of recycled cobalt. The demand of recyclate for stationary electricity storage systems is further dependent on recycled material from batteries of electric vehicles, particularly considering lithium and cobalt. If the market ramp-up of electromobility in Germany does not progress continuously, but is initially delayed and then increases with greater momentum, the shortage of recyclates will be further exacerbated.

On-site battery recycling reduces dependence of raw materials: While temporary shortages of recyclate are foreseeable in Germany, the export of used electric vehicles can further exacerbate these shortages. The export of vehicles means that the raw materials contained in the vehicles can no longer be made available for domestic production. In order to increase the resilience of the raw material supply, it is therefore very important to further expand recycling capacities.

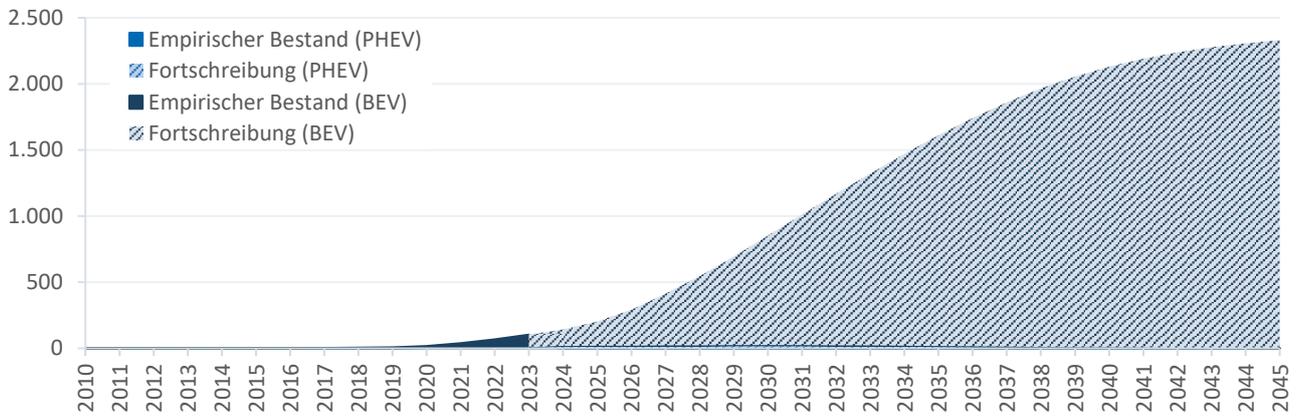
Battery cell research increases competitiveness: Electric vehicles and stationary battery storage systems have so far been based primarily on lithium-ion Batteries. While NMC cell chemistries have a higher market share in electromobility and LFP cell chemistries have a higher market share in stationary battery energy storage systems, there is a general trend towards batteries with lower cobalt content over time. Battery cell research is an important lever here, as it can be used both to optimize existing lithium-ion batteries in terms of their raw material requirements and to prepare alternative cell chemistries such as sodium-ion batteries for market ramp-up. Ending the funding for project-based battery cell research, as envisaged in the current draft of the 2025 federal budget, could result in Germany losing competitiveness in this technology.

Existing conflicts of objectives in the EU Battery Regulation: The recyclate quota targets indirectly relate to specific assumptions regarding the further market ramp-up of electromobility and stationary electricity storage. If the actual market ramp-up deviates from these assumptions, it will be more difficult to achieve the recyclate quota targets. However, it is neither desirable to slow down domestic battery production due to rigid recyclate quotas nor to restrict the continued use of vehicle batteries (second life) as stationary battery storage systems. It is therefore necessary to show a willingness to adapt the prescribed quotas or to bear the unintended consequences of failing to meet the targets.

Anhang: Ergänzende Abbildungen

Abbildung A-1: Modellbasierte Fortschreibung der Speicherkapazitäten aus der E-Mobilität

Verbaute Batteriekapazität in BEV und PHEV in GWh, Jahre 2010 bis 2045

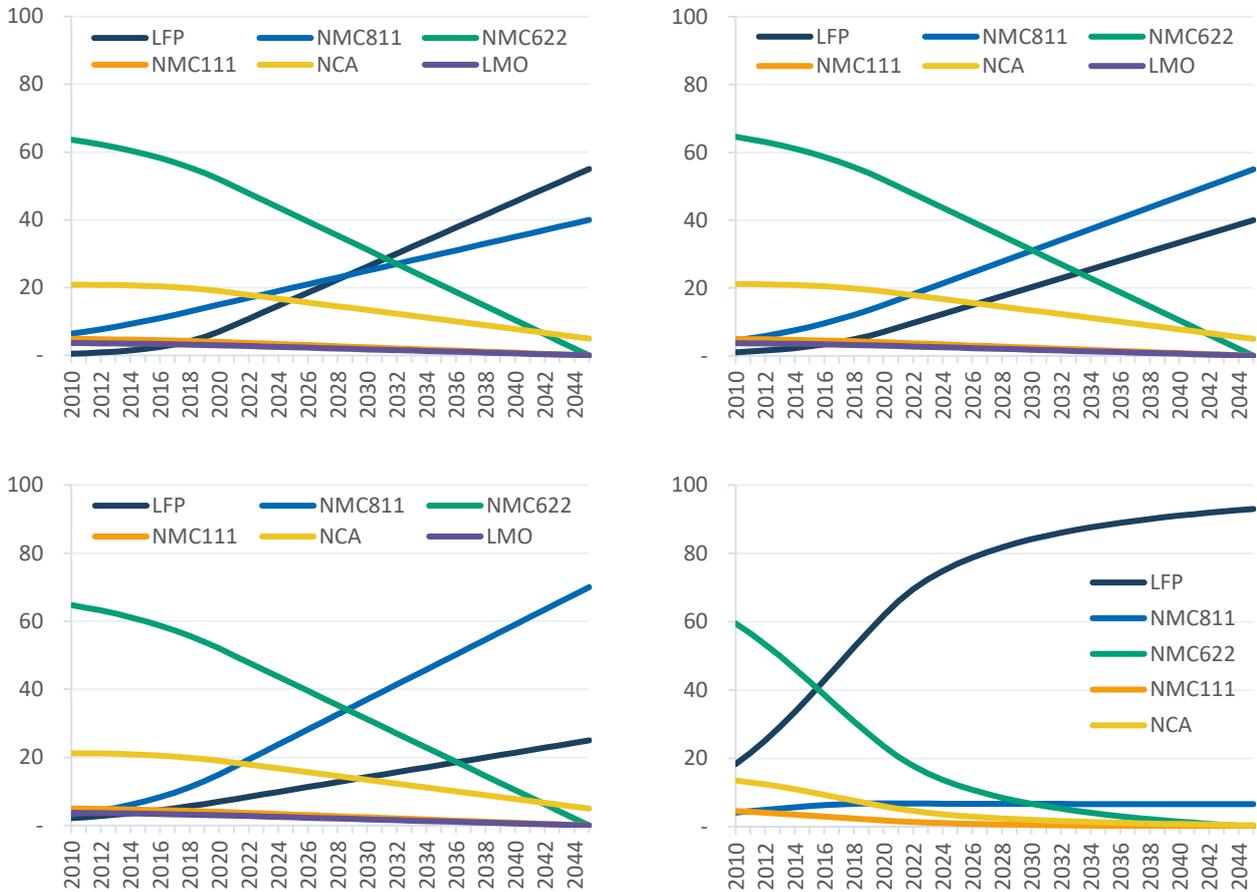


Anmerkungen: Die Berechnung der Speicherkapazitäten in der E-Mobilität basiert auf dem Modell aus Abschnitt 4. Dabei wird die Speicherkapazität der Neuzulassungen von Jahr zu Jahr aggregiert und die anhand der Weibull-Verteilungen berechneten Außerbetriebssetzungen der Fahrzeuge von der Gesamtkapazität abgezogen. Die durchschnittliche Lebensdauer der Fahrzeugbatterien wird dabei auf 14 Jahre gesetzt.

Eigene Berechnungen basierend auf BEE, 2024; DERA, 2021; Stiftung Klimaneutralität et al., 2023; KBA, 2024b

Abbildung A-2: Marktanteile unterschiedlicher Zellchemien

Marktanteile der LFP-, NMC-, NCA- und LMO-Zellchemien für Kleinwagen (oben links), Mittelklassewagen (oben rechts), Oberklassewagen (unten links) und stationäre BESS (unten rechts), in Prozent, Jahre 2010 bis 2045

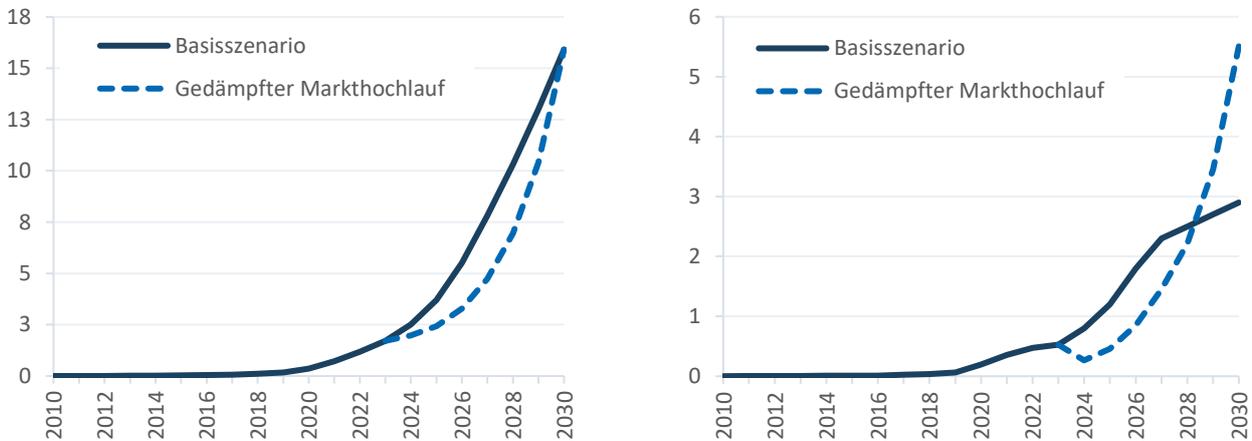


Anmerkung: Die Entwicklungen der Marktanteile der verschiedenen Zellchemien für PHEV werden in dieser Studie mit den Entwicklungen im Fahrzeugsegment „Oberklassewagen“ gleichgesetzt.

Eigene Berechnungen basierend auf Stiftung Klimaneutralität et al., 2023; Aquila Capital, 2024

Abbildung A-3: Vergleich des Markthochlaufs der E-Mobilität im Basis- und Alternativszenario

Kumulierte Neuzulassungen (links) und Neuzulassungen pro Jahr (rechts) für BEV in Millionen, Jahre 2010 bis 2030

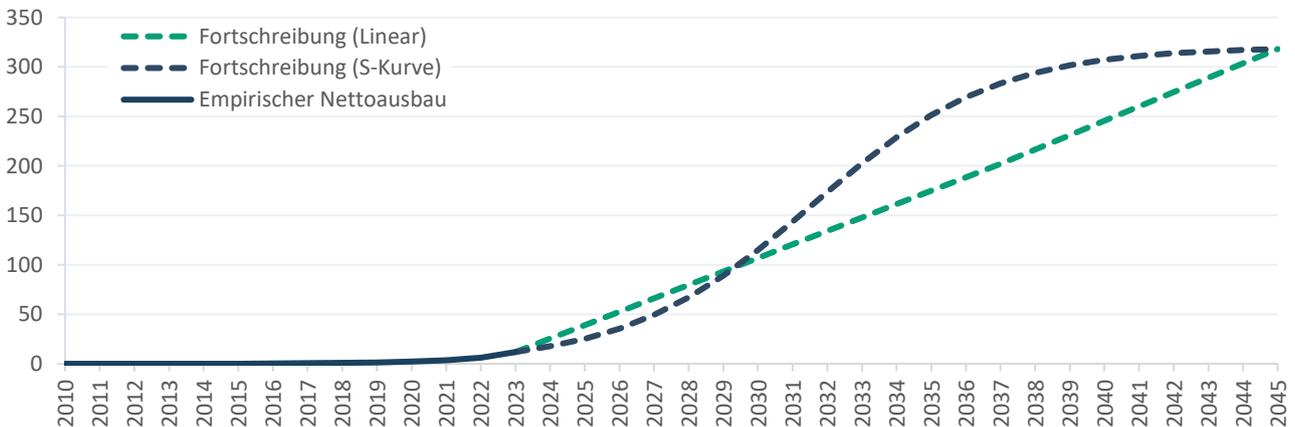


Anmerkungen: Die kumulierten Neuzulassungen summieren sich in der Darstellung nicht exakt auf 15 Millionen BEV auf, da durch die Berechnung keine Außerbetriebssetzungen berücksichtigt werden. Die Darstellung dient nur als illustrativer Vergleich zwischen den Entwicklungen im Basis- und Alternativszenario des Abschnitts 5.2.

Eigene Berechnungen basierend auf BEE, 2024; KBA, 2024b

Abbildung A-4: Fortschreibung der Neuzulassungen stationärer BESS

Annahmebasierte Fortschreibungen der Speicherkapazitäten, in GWh, Jahre 2010 bis 2045



Anmerkungen: Die lineare Fortschreibung des Trends orientiert sich an den Benchmarkwerten des NEP für die Jahre 2037 und 2045. Der alternativen Fortschreibung wird eine im Bereich der Innovationsdiffusion typische funktionale Form einer S-Kurve zugrunde gelegt. Für die Gleichung $f(t, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \xi) = \frac{\theta_1}{[1 + \xi \cdot \exp(-\theta_2 \cdot (t - \theta_3))]^{1/\xi}}$ wurden die Parameter $\theta_1 = 320\,000$, $\theta_2 = 3$, $\theta_3 = 12$ und $\xi = 8$ gewählt. Der zunächst schnellere Ausbau der BESS führt in diesem Alternativszenario zu einem Ausbaustand über den Werten des NEP im Jahr 2037, während der Wert im Jahr 2045 wie geplant erreicht wird.

Eigene Berechnungen basierend auf BNetzA, 2024

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Rohstoffzusammensetzung verschiedener Zellchemien	14
Tabelle 4-1: Komparative Statik: Einfluss der Modellparameter	20
Tabelle 4-2: Übersicht der betrachteten Szenarien	21

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Bestand der Speicherkapazitäten aus Elektrofahrzeugen und stationären BESS.....	8
Abbildung 2-2: Preisentwicklung der LIB für stationäre BESS und BEV.....	9
Abbildung 2-3: E-Mobilität und stationäre Stromspeicherung: Status quo und aktuelle Ziele	11
Abbildung 3-1: Vorgaben der EU-Batterieverordnung: Rückgewinnungsquote und Rezyklatgehalte	16
Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des Modells	19
Abbildung 5-1: Entwicklung der insgesamten Rohstoffnachfrage nach Batterien	23
Abbildung 5-2: Entwicklung der Nachfrage nach Rohstoffen aus Recyclingmaterial für Batterien.....	24
Abbildung 5-3: Vergleich von Rezyklataufkommen und Rezyklateinsatz für Fahrzeugbatterien und stationäre BESS.....	25
Abbildung 5-4: Vergleich von Rezyklataufkommen und Rezyklateinsatz für Fahrzeugbatterien und stationäre BESS bei verzögertem Markthochlauf der E-Mobilität	28
Abbildung 5-5: Rezyklataufkommen und -einsatz bei stationären BESS: Linearer Ausbautrend	30
Abbildung 5-6: Rezyklataufkommen und -einsatz bei stationären BESS: S-kurviger Ausbautrend	31
Abbildung A-1: Modellbasierte Fortschreibung der Speicherkapazitäten aus der E-Mobilität	35
Abbildung A-2: Marktanteile unterschiedlicher Zellchemien	36
Abbildung A-3: Vergleich des Markthochlaufs der E-Mobilität im Basis- und Alternativszenario.....	37
Abbildung A-4: Fortschreibung der Neuzulassungen stationärer BESS.....	37

Abkürzungsverzeichnis

BESS	Batterieelektrische Speichersysteme
BEV	Batterieelektrische Fahrzeuge
EE	Erneuerbare Energien
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat
LIB	Lithium-Ionen-Batterie
LMO	Lithium-Mangan-Oxid
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid
NEP	Netzentwicklungsplan
NIB	Natrium-Ionen-Batterie
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid
PHEV	Plug-In-Hybrid
PV	Photovoltaik
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber

Literaturverzeichnis

50 Hertz / Amprion / TenneT / TransnetBW, 2024, Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2037/2045, Version 2025. Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber

Aquila Capital, 2024, Battery Energy Storage Systems (BESS) – Enhancing System Stability and Efficiency. White Paper, Hamburg

Bähr, Cornelius / Kempermann, Hanno / Kuttler, Felicitas / Brauckhoff, Emma, 2024, Begleitforschung des Expertenkreises Transformation der Automobilwirtschaft zum Thema Resilienz der automobilen Wertschöpfungs- und Liefernetzwerke Thema „Innovationen“. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Köln

Bakalis, Dennis / Lichtenthäler, Sarah, 2024, Batteriespeicherausbau: Mit Preissignalen und Flexibilitätszielen zur Energiewende, IW-Kurzbericht, Nr. 57, Köln

Baum, Zachary J. / Bird, Robert E. / Yu, Xiang / Ma, Jia, 2022, Lithium-Ion Battery Recycling—Overview of Techniques and Trends, in: ACS Energy Letters, 7. Jg., Nr. 2, S. 712–719

BEE – Bundesverband Erneuerbare Energie, 2024, BEE-Mobilitätsszenarien 2045. Eine Analyse von drei Szenarien zum Umsetzen der Klimaschutzziele bis 2045, Berlin

BloombergNEF, 2023a, Lithium-Ion Battery Pack Prices Hit Record Low of \$139/kWh, <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/> [1.10.2024]

BloombergNEF, 2023b, Scaling the Residential Energy Storage Market

BMWK – Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2023, Stromspeicher-Strategie. Handlungsfelder und Maßnahmen für eine anhaltende Ausbaudynamik und optimale Systemintegration von Stromspeichern, Berlin, <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/stromspeicherstrategie-231208.pdf?blob=publicationFile&v=2> [21.12.2023]

BNetzA – Bundesnetzagentur, 2024, Marktstammdatenregister, <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR> [1.7.2024]

DERA – Deutsche Rohstoffagentur, 2021, DERA Rohstoffinformationen. Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021

Dolotko, Oleksandr et al., 2023, Universal and efficient extraction of lithium for lithium-ion battery recycling using mechanochemistry, in: Communications chemistry, 6. Jg., Nr. 1, S. 49

Eicke, Anselm / Hirth, Lion / Mühlenpfordt, Jonathan, 2024, Mehrwert dezentrale Flexibilität. Oder: Was kostet die verschleppte Flexibilisierung von Wärmepumpen, Elektroautos und Heimspeichern?, <https://neon.energy/mehrwert-flex/> [22.10.2024]

Europäische Kommission, 2023, European Critical Raw Materials Act, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_23_1663 [24.10.2024]

FfE – Forschungsstelle für Energiewirtschaft, 2023, Entwicklung und Förderung der Elektromobilität in Deutschland, München, <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/entwicklung-und-foerderung-der-elektromobilitaet-in-deutschland/> [2.10.2024]

FfE, 2024, Konsistente Parameterbereiche zur Modellierung intelligenter Elektrofahrzeuge im Energiesystem. Discussion Paper, München

Figgenger, Jan et al., 2023, The development of battery storage systems in Germany: A market review (status 2023), https://www.researchgate.net/publication/369479477_The_development_of_battery_storage_systems_in_Germany_A_market_review_status_2023/link/641d47ec66f8522c38ccfd6d/download [27.9.2024]

Fraunhofer FFB, 2023, Umfeldbericht zu Natrium-Ionen-Batterien 2023: Status Quo und Perspektiven entlang einer zukünftigen Wertschöpfungskette

Fraunhofer ISI, 2023, Lithium-Ion Battery Roadmap - Industrialization Perspectives Toward 2030

Frontier – Frontier Economics, 2023, Wert von Großbatteriespeichern im deutschen Stromsystem

Gaines, Linda / Wang, Yan, 2021, How to Maximize the Value Recovered from Li-Ion Batteries: Hydrometallurgical or Direct Recycling?, in: The Electrochemical Society Interface, 30. Jg., Nr. 3, S. 51–54

Gao, Wei et al., 2024, Evaluation of the second-life potential of the first-generation Nissan Leaf battery packs in energy storage systems, in: eTransportation, Nr. 20, S. 100313

IEA – International Energy Agency, 2023, Global EV Outlook 2023. Catching up with climate ambitions, Paris

Karamov, Dimitriy, 2020, Methodology for calculating the lifetime of storage batteries in autonomous energy systems with renewable power generation, in: Energy Reports, Nr. 6, S. 15–24

KBA – Kraftfahrt-Bundesamt, 2024a, Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, 1. Januar 2024 (FZ 13), https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz13_b_uebersicht.html?nn=3514348 [30.09.2024]

KBA, 2024b, Neuzulassungen nach Umwelt-Merkmalen (FZ 14), https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz14_n_uebersicht.html?nn=3514348 [26.09.2024]

KBA, 2024c, Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen mit alternativem Antrieb im August 2024 (FZ 28), https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz28/fz28_gen-tab.html?nn=3514348 [10.10.2024]

Lichtenthäler, Sarah / Bähr, Cornelius, 2024, Neue Batterien aus Recyclingmaterial: Was ist in Europa möglich?, IW-Trends, 51. Jg., Nr. 3, S. 107–130

Neligan, Adriana / Schleicher, Carmen / Engels, Barbara / Kroke, Thorsten, 2023, Digitaler Produktpass — Enabler der Circular Economy. Relevanz und Umsetzbarkeit durch Unternehmen, IW-Report, Nr. 47, Berlin/Köln

NOW – Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, 2024, Ladeinfrastruktur nach 2025/2030: Szenarien für den Markthochlauf. Neuauflage 2024, <https://nationale-leitstelle.de/wp-content/uploads/2024/06/Studie-LIS-2025-2030-Neuauflage-2024.pdf> [11.10.2024]

NRW.Energy4Climate, 2024, Photovoltaik und Batteriespeicher für Gewerbe- und Industrieunternehmen - einfach erklärt, Düsseldorf

Orangi, Sina et al., 2024, Historical and prospective lithium-ion battery cost trajectories from a bottom-up production modeling perspective, in: Journal of Energy Storage, Nr. 76, S. 1–14

Rallo, Hector / Sánchez, Anna / Canals, Luc / Amante, Beatrix, 2024, Battery dismantling centre in Europe: A centralized vs decentralized analysis, in: Resources, Conservation & Recycling Advances, 15. Jg, S. 200087

Schaefer, Thilo et al., 2024, Transformationpfade für das Industrieland Deutschland. Gutachten in Kooperation des Instituts der deutschen Wirtschaft mit der Boston Consulting Group und dem Bundesverband der deutschen Industrie, Berlin / Köln

SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP, 2021, Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit, Berlin, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/koalitionsvertrag-2021-1990800> [22.10.2024]

Stiftung Klimaneutralität / Prognos / Öko-Institut / Wuppertal Institut, 2023, Souveränität Deutschlands sichern. Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045, Berlin

Strategy& / RWTH Aachen, 2023, EU recycling market. The EU recycling market – a viable and sustainable business. Joint study between Strategy& and PEM of RWTH Aachen University, <https://www.strategyand.pwc.com/de/en/recycling-european-battery.html> [16.7.2024]

UBA – Umweltbundesamt / AGEE – Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien, 2024, Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2023

VDE – Verband der Elektrotechnik, 2021, Kompendium: Li-Ionen-Batterien. Grundlagen, Merkmale, Gesetze und Normen, Frankfurt

VDE, 2022, 2nd Life Battery Storage Projects in Europe. White Paper, VDE Renewables, Hamburg

VDE, 2024, Bidirektionales Laden. Laden und Rückspeisen von Elektrofahrzeugen aus Sicht des Stromnetzes, VDE FNN