

LITHIUMBEDARF FÜR DIE BATTERIEZELLEN- PRODUKTION IN DEUTSCHLAND UND EUROPA IM JAHR 2030

Autoren

Katharina Steiger, Christoph Hilgers, Jochen Kolb

SRG WORKING PAPER 3

Angewandte Geowissenschaften (AGW) | 2022

Impressum

Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa im Jahr 2030
Ohne Anhang.

Autoren

Katharina Steiger^{1,2}, Prof. Dr. Christoph Hilgers^{1,3}, Prof. Dr. Jochen Kolb^{1,4}

¹ Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)

² THINKTANK für Industrielle Ressourcenstrategien

³ Lehrstuhl für Strukturgeologie und Tektonik

⁴ Lehrstuhl für Geochemie und Lagerstättenkunde

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Adenauerring 20a, Geb. 50.41, 76187 Karlsruhe

sgt.agw.kit.edu

Erscheinungsdatum: 11/2022

DOI 10.5445/IR/1000153059

Copyright is held by authors.

Wiedergaben in jeglicher Form, auch in Auszügen, müssen mit Quellenangaben gekennzeichnet werden.

Zitierhinweis: Steiger, K., Hilgers, C., Kolb, J. 2022. Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa im Jahr 2030. S., Karlsruhe.

Zusammenfassung

Um in der EU die Mobilität, wie im Paket „Fit for 55“ der EU festgelegt, emissionsfrei zu gestalten, werden Technologien für die Elektromobilität (E-Mobilität) ausgebaut. Der führende Energiespeicher hierfür ist bis auf Weiteres die Lithium-Ionen-Batterie (LIB). In den kommenden Jahren sollen in Deutschland und anderen europäischen Ländern Produktionsstätten für LIBs errichtet werden. In Deutschland sind aktuell mindestens zehn Batteriezellenproduktionsstandorte geplant. Die Elektrodenmetalle (Li, Ni, Co, Mn, Al) stehen gegenwärtig nur durch Importe zur Verfügung.

Die Gewinnung von Lithium aus Lagerstätten der EU-27 wird in verschiedenen Projekten angestrebt. Stand Mai 2022 existieren sieben Projekte in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium, die eine industrielle Förderung von Lithium aus konventionellen, magmatischen oder sedimentären Lagerstätten sowie aus unkonventionellen Lagerstätten, geothermalen Solen, je nach Projekt ab 2024, 2025 oder 2026 vorsehen. Nach Angaben der Produzenten könnten im Jahr 2030 Lithiumchemikalien wie Lithiumhydroxid Monohydrat, Lithiumkarbonat sowie Lithiumfluorid, die für die Produktion von Elektroden notwendig sind, in Höhe von 133,6 kt Lithiumäquivalent (LCE) durch diese heimischen Lagerstätten bereitgestellt werden. Recycling könnte nach DERA-Prognosen zwischen 2,5 % und 10,6 % des Bedarfs an Lithium im Jahr 2030 in Europa decken.

In der vorliegenden Studie wurde berechnet, dass die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 zwischen 60,4 kt LCE und 173,2 kt LCE benötigen wird. Mittels verschiedener Annahmen wurde eine Verfügbarkeit dafür von Primärlithium aus den sieben EU-27 Projekten mit maximal ca. 39,4 kt LCE/a und von Sekundärlithium mit maximal ca. 6,9 kt LCE/a berechnet. Je nach Szenario bleiben zwischen 47,5 kt LCE/a und 173,2 kt LCE/a, die im Jahr 2030 über Lieferketten aus dem außereuropäischen Ausland zu decken wären, was je nach Preisannahme ein monetäres Volumen zwischen 1,2 und 11,5 Mrd. US\$ darstellen würde. Bei Einbeziehung von bereits bestehenden Abnahmeverträgen der Lithiumprojekte in der EU-27 und der Annahme von einer Reduktion im Lithiumverbrauch in den Kathoden sowie von Effizienzsteigerungen im Recycling könnte das Primär- und Sekundärlithium aus der EU-27 den Bedarf an Lithium für die Elektroden für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 zu maximal 34,5 % decken.

Folglich bleibt die geplante Batteriezellenproduktion in Deutschland, der EU-27 und weiteren Staaten in Europa auch zukünftig von der Rohstoffgewinnung im Ausland und resilienten Lieferketten abhängig. Weitere innovative Fördermethoden und Aufbereitungstechnologien, wie beispielsweise die Lithiumgewinnung aus Grubenwasser ehemaliger Bergwerke oder Produktionswässern aus Erdgas- oder Erdölförderungen, an denen derzeit geforscht wird, könnten bei technisch und wirtschaftlicher Realisation das Angebot an europäischem Lithium erhöhen. Auch die Weiterentwicklung und der Ausbau der Recyclingmöglichkeiten innerhalb

Europas ist essentiell für die Deckung der wachsenden Nachfrage. Allerdings wird es keine autarke Produktion von Lithiumionenbatteriezellen im Jahr 2030 in Europa geben, da neben den unzureichenden Mengen an Primär- und Sekundärlithium es weder eine ausreichende Infrastruktur für die Raffination für die benötigten Lithiummengen, noch die Elektrodenproduktion in Aussicht ist. Wenn Europa nicht an allen Prozessschritten der Wertschöpfungskette investiert, wird es weiterhin von asiatischen, insbesondere von chinesischen Produzenten abhängig sein.

1. Einführung

Lithium (Li) ist das leichteste Metall des Periodensystems, es kommt mit 0,007 % in der Erdkruste vor und ist durch seine steigende Relevanz als Rohstoff für Zukunftstechnologien seit 2020 ein potentiell kritischer Rohstoff für die EU (EU Kommission, 2020a). Lithium wird derzeit zu ca. 56 % aus Festgesteinen und zu ca. 31 % aus Solen¹ gewonnen, weitere 13 % sind beiden Lagerstättentypen zuzuordnen (vgl. USGS, 2022; Schmidt, 2017).

Die Lithium-Ionen-Batterie (LIB) hat im Vergleich zu anderen Batterietechnologien eine hohe gravimetrische Energiedichte, je nach Zellformat liegt diese zwischen 150 und 300 Wh/kg, die einer Natrium-Ionen-Batterie liegt bei ca. 50 – 120 Wh/kg (VDMA, 2020; Fatima et al., 2020). Deshalb und aufgrund ihrer Lebensdauer und der hohen Marktreife werden LIBs als Energiespeicher in der Elektromobilität (E-Mobilität) genutzt (Tarascon, 2010; Nguyen, 2020; Duffner et al., 2021). Die Anwendung von Lithium in wieder aufladbaren Batterien für portable Elektronik, für Elektrofahrzeuge und auch Elektrowerkzeuge hat dazu geführt, dass sich der Prozentsatz von Lithium für Batterieanwendungen an der globalen Produktion innerhalb von zehn Jahren von 27 % in 2011, bei einer globalen Produktion von 34 kt Lithium, auf 74 % in 2021, bei einer globalen Produktion von 104,8 kt Lithium, erhöht hat, mit steigender Tendenz (USGS, 2012, 2022; Schmidt, 2022). Der zweitgrößte Abnehmer für Lithium ist weiterhin die Keramik- und Glasindustrie mit 14 % (USGS, 2022). Außerdem findet Lithium Anwendung in der Polymerindustrie, bei der Aufbereitung von Luft, in chemischen Anlagen und Atomkraftwerken, als Fluss- und Schmiermittel und auch in der psychomedizinischen Pharmazie (BGR, 2020b).

Im Juni 2022 hat das EU Parlament dem Vorschlag der Europäischen Kommission vom Juli 2021 im Rahmen des europäischen Grünen Deals ab 2035 die CO₂-Emissionen für Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge um 100 % zu senken, zugestimmt (EU Parlament, 2022). Dies hat zur Folge, dass Neufahrzeuge mit Verbrennungsmotor ab 2035 in der EU nicht mehr verkauft werden dürften (EU Kommission, 2021; Rat der EU, 2022). Der weltweit vermehrte Einsatz von Elektro-Fahrzeugen mit Batterie (BEV) wird den Lithiumbedarf weiter steigern. In dieser Studie wird mit einer Szenarioanalyse die Höhe eines möglichen europäischen Primär- und Sekundärlithiumangebots und der Lithiumbedarf (in t LCE) für die Kathoden für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 ermittelt. Hierfür werden Recherchen ausgewertet und eine Nachfrage-Angebotsgleichung aufgestellt. Mittels einer Sensitivitätsanalyse wird die Auswirkung einzelner Komponenten auf das Ergebnis überprüft. Abschließend werden die Ergebnisse der Szenarioanalyse diskutiert und ein Ausblick zu weiteren Lithiumgewinnungsmöglichkeiten gegeben.

¹ Eine Sole ist per Definition Salzwasser was auf 1 kg 14 g gelöste Stoffe (z.B. Natriumchlorid) aufweist (Meschede et al., 2020). Salzseen, Geothermalwässer oder auch Lagerstättenwässer zählen dazu.

2. Ausgangslage der Rohstoffversorgung für den Industriestandort Deutschland

2.1 Zukünftiger Lithiumbedarf

Dass die Verfügbarkeit von Lithium für die kontinuierlich wachsende Nachfrage nach LIBs in der E-Mobilität zukünftig herausfordernd sein könnte, wird seit mehreren Jahren von unterschiedlichen Autoren prognostiziert (vgl. Väyrynen & Salminen, 2012; Kushnir & Sandén, 2012; Vikstroem, 2013; Speirs et al., 2014; Olivetti et al., 2017). Bei Einhaltung einer Klimaerwärmung von 2°C im Jahr 2100 (2°C Szenario, IEA) sieht die Weltbank den weltweiten Bedarf an Lithium für Energiespeicher für das Jahr 2050 bei ca. 415 kt, was die Lithiumproduktion aus dem Jahr 2021 (ca. 100 kt) um das Vierfache übersteigen würde (IEA, 2017; Nguyen, 2020; Anmerkung: Aktualisierung Lithiumproduktion 2018: ca. 95 kt, USGS, 2022).

Für das Jahr 2040 wird ein globaler Bedarfszuwachs an Lithium für Lithiumionen-Hochleistungsspeicher für mobile Anwendungen um das Zehn- bis Fünzigfache im Vergleich zu 2018 erwartet (Marscheider-Weidemann et al., 2021). Hinzu kommt der Bedarf an Lithium für Feststoffbatterien, welcher dazu beiträgt, dass die Lithiumnachfrage weltweit für beide Energiespeichertechnologien, je nach Szenario, im Jahr 2040 bei 77,6 kt (413 kt LCE), 375,1 kt (1.997 kt LCE) oder 554,3 kt (2.950 kt LCE) liegen könnte (Marscheider-Weidemann et al., 2021). Diese Szenarien basieren auf den möglichen Zukunftsszenarien, den sogenannten „Shared Socioeconomic Pathways“ (SSP), des Weltklimarats (IPCC) (O'Neill et al., 2017). In der am 23.06.2022 vorgestellten Aktualisierung ihrer Risikobewertung Lithium gibt die DERA die globale Nachfrage nach Lithium für Batterieanwendungen bereits für das Jahr 2030 im SSP2 mit ca. 281 kt an (Schmidt, 2022). Des Weiteren zeigt sie verschiedene Szenarien auf, in denen es im Jahr 2030 zu einem Angebotsdefizit von Lithium zwischen 69 kt (367 kt LCE) und 341 kt (1.671 kt LCE) auf dem Weltmarkt kommen kann (Schmidt, 2022).

Für die E-Mobilität in Europa² wird von einem Lithiumbedarf von ca. 72,5 kt (386 kt LCE) ausgegangen (Schmidt, 2022). Eine weitere Studie (Gregoir & van Acker, 2022), welche auf Szenarien aufgestellt von der IEA beruht, berechnete die Lithiumnachfrage für Batteriespeicher und elektrische Fahrzeuge für Europa³ für 2030 mit 100 kt LCE bis 300 kt LCE und für 2050 mit 600 kt LCE bis 800 kt LCE, abhängig vom Erfolg der Implementierung von neuen Produktionsstandorten für Batteriezellen (Gregoir & van Acker, 2022). 2020 nahm die Europäische Kommission für 2030 eine Lithiumnachfrage für Batterien für die E-Mobilität und Erneuerbare Energien in der EU-27 von ca. 61 kt (ca. 325 kt LCE) an (Abb. 3.1; Bobba et al., 2020).

² Der Begriff „Europa“ wird in der Veröffentlichung der DERA (Schmidt, 2022) nicht näher definiert.

³ In dieser Studie beinhaltet der Begriff Europa die 27 Mitgliedstaaten der Europäischen Union, das Vereinigte Königreich und die EFTA-Mitgliedstaaten (Island, Liechtenstein, Norwegen und die Schweiz) (Gregoir & van Acker, 2022).

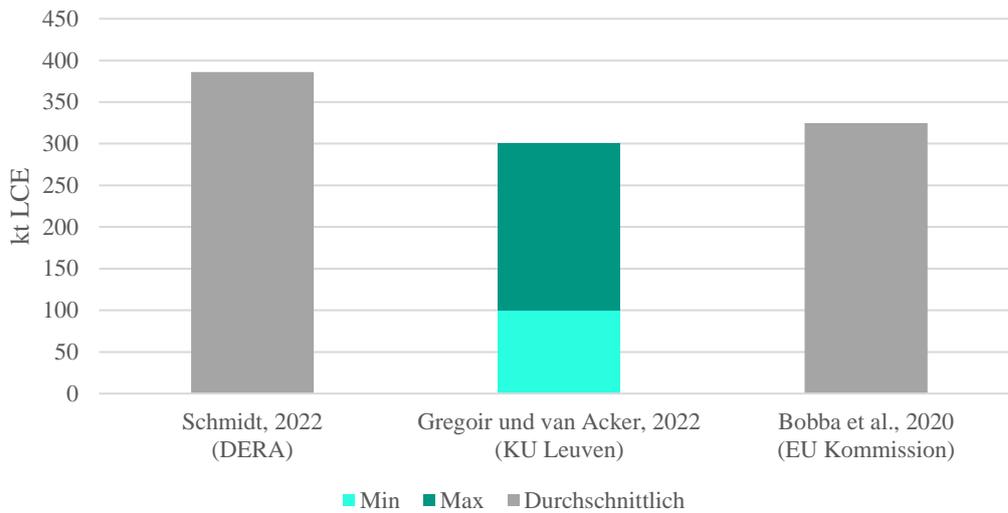


Abbildung 3.1: Lithiumnachfrage für die E-Mobilität im Jahr 2030 in der EU-27 und weiteren Europa (nach Schmidt, 2022; Gregoir & van Acker, 2022; Bobba et al, 2020).

2.2 Lithium-Ressourcen und -Produktion

Die Nachfrage nach Lithium wird global durch Primärrohstoffe gedeckt, die größten Lithiumreserven und -ressourcen liegen in Lateinamerika und Australien (USGS, 2022). Raffiniertes Lithium stammt zu Teilen dort her, aber hauptsächlich aus China (Schmidt, 2022). 2021 beliefen sich die weltweiten identifizierten Lithiumressourcen auf 89 Mio. t Lithium, die Reserven auf 22 Mio. t Lithium (Abb. 3.2; USGS, 2022).

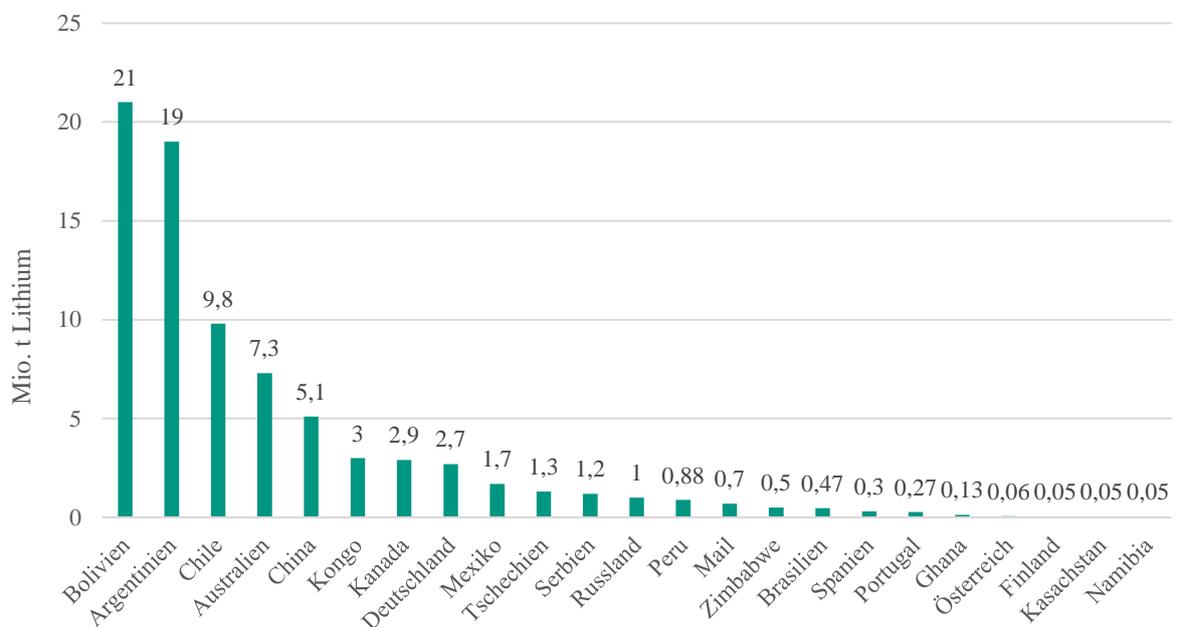


Abbildung 3.2: Verteilung der identifizierten Lithiumressourcen weltweit (Stand 2021; USGS, 2022).

Durch den Ausbau der Exploration steigen die Lithiumreserven und -ressourcen jährlich (Abb. 3.3; USGS, 2006 – 2022). Die globale Produktion von Lithium ist in den vergangenen zwei Jahrzehnten mit Unterbrechungen von Angebotsüberhängen, der Weltwirtschaftskrise 2008/2009 und dem Ausbruch der COVID-19 Pandemie von 14,2 kt in 2002 auf 82,5 kt Lithium im Jahr 2020 gestiegen. Für das Jahr 2021 werden 104,8 kt erwartet, was eine Steigerung um ca. 27 % innerhalb eines Jahres wäre (USGS, 2001 - 2022). Der Anteil der Produktion, der für Batterieanwendungen weltweit verwendet wird, stieg von 4,5 kt Lithium im Jahr 2006 auf 77,6 kt Lithium im Jahr 2021, seit 2015 ist die Verwendung in Batterietechnologien die Hauptanwendung von Lithium (Abb. 3.3; USGS, 2007 – 2022).

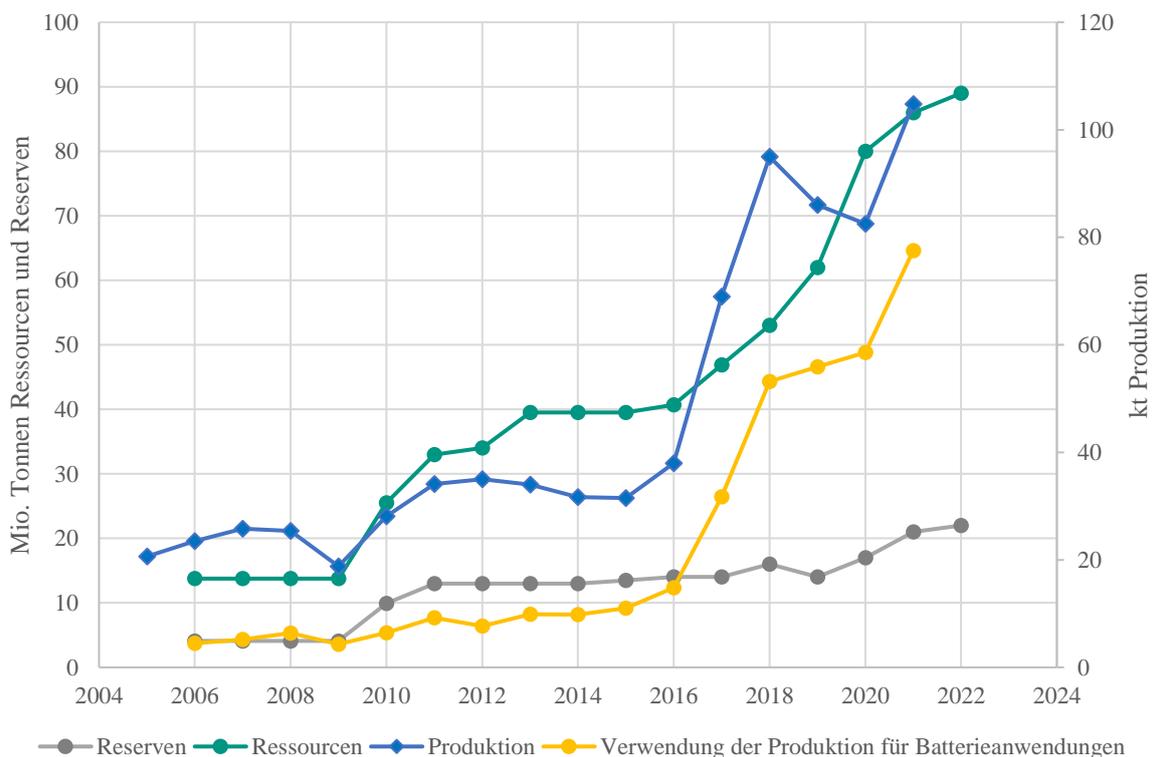


Abbildung 3.3: Entwicklung weltweiter Lithiumproduktion und Verwendung in Batterietechnologien (in kt Lithium) sowie die Entwicklung der explorierten Lithiumreserven und -ressourcen (in Mio. t Lithium) (nach USGS, 2002 - 2022).

Für Bergbauprojekte werden je nach Projektstadium unterschiedlich detaillierte, standardisierte Bewertungen erstellt, in denen u.a. die zukünftigen Rohstoffproduktionsmengen stützend auf den ermittelten Ressourcen und Reserven angegeben werden, um eine Einschätzung für die Rentabilität und finanzielle Machbarkeit eines Bergbauvorhabens zu liefern (Bullock, 2011). Bei Ressourcen handelt es sich um gegenwärtig bekannte, jedoch nicht ökonomisch abbaubare Vorkommen (JORC, 2012). Gemäß USGS (2022) werden Ressourcen in identifizierte und unentdeckte Ressourcen unterteilt. Die identifizierten Ressourcen werden nochmals in gemessene (measured), angezeigte (indicated) und vermutete (inferred) Ressourcen unterteilt. Bei gemessenen Ressourcen handelt es sich um Ressourcen, bei denen die geologische Beschaffenheit (u.a.

Größe, Form, Tiefe, Mineralgehalt) durch Messungen und detaillierte Probenahmen mit ausreichender Sicherheit geschätzt werden kann. Bei angezeigten Ressourcen kann die geologische Beschaffenheit ebenfalls ausreichend bestimmt werden, jedoch mit einer niedrigeren Sicherheit aufgrund einer geringeren Datendichte. Vermutete Ressourcen werden aufgrund einer gefolgerten Kontinuität der gemessenen und (oder) angezeigten Ressourcen angenommen (USGS, 2022). Bei Reserven handelt es sich um bekannte und technisch wie auch wirtschaftlich abbaubare Lagerstätten (Hilgers et al., 2021). Unentdeckte Ressourcen werden vom USGS (2022) in hypothetische und spekulative Ressourcen unterteilt, es sind jene Ressourcen, bei denen aufgrund der geologischen Gegebenheiten erwartet werden kann, dass sie durch moderne Explorationsmethoden entdeckt werden könnten, sie entsprechen dem Begriff des Geopotentials (USGS, 2022; Wellmer, 2008).

Bei einem klassischen drei-Phasen Ansatz (Lee, 1984) wird zunächst eine Scoping-Study (Konzeptstudie) durchgeführt, darauf folgt eine Vormachbarkeitsstudie (Pre-Feasibility Study, PFS) und abschließend wird das Projekt mit einer Machbarkeitsstudie (Feasibility Study FS) bewertet. Eine Konzeptstudie stellt die relevantesten Fakten eines möglichen Bergbauvorhabens dar und bestimmt damit die Entscheidung für oder gegen Investitionen in weiterführende Studien sowie deren Inhalt (Mackenzie und Cusworth, 2007). Nach dem Kanadisches Institut für Bergbau, Metallurgie und Petroleum (CIM, 2014) zufolge stellt eine Vormachbarkeitsstudie (PFS) eine detaillierte Analyse der technischen und wirtschaftlichen Gegebenheiten eines Bergbauvorhabens dar. Die Machbarkeitsstudie (FS) konkretisiert die Bestandteile der PFS, sie liefert umfangreichere Angaben über die geologischen, technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gegebenheiten des Bergbauvorhabens. Hierdurch können die Effektivität und Profitabilität des Projekts und damit mögliche Investitionen bewertet werden (CIM, 2014). Das NASA-Konzept des technologischen Reifegrads (Technology Readiness Level, TRL) kann während aller Studien herangezogen und auch im Bergbau als Projektmanagementmethode angewandt werden (DUSD(S&T), 2003).

In Deutschland wird noch kein Primärlithium im industriellen Maßstab gefördert (BGR, 2021; BGR, 2020b). In Europa wird bislang nur in Portugal Lithium gefördert, die Produktion lag im Jahr 2021 bei 900 t (USGS, 2022). Bislang existiert keine Lithiumraffination in den Ländern der EU-27 (Hilgers & Becker 2020). Für das Jahr 2030 wird in Europa eine Raffineriekapazität von 155 kt LCE (battery grade) prognostiziert, zusätzlich geplant sind weitere 130 kt LCE verteilt auf Deutschland, Polen und das Vereinte Königreich England, die jedoch noch in frühen Projektstadien seien (Gregoir & van Acker, 2022). In Deutschland sollen Lithiumraffinerien an drei Standorten entstehen (Stand Juli 2022; AMG Lithium, 2022; Rock Tech Lithium, 2022; VER 2022b).

Neben der heimischen Förderung beruht die Rohstoffbeschaffungsstrategie Deutschlands auf Importen und dem Recycling (BMWi, 2019); die Rohstoffstrategie des Bundes wird derzeit überarbeitet. Das Recycling von

Lithium spielt bislang eine untergeordnete Rolle, die EOL-RIR (End-of-Life Recycling Input Rate) von Lithium in der EU betrug 2017 noch 0 % (EU Kommission, 2018). Die EOL-RR (End-of-Life Recycling Rate) liegt bei weniger als 1 % (Persio et al., 2020; IEA, 2021a). Die Sammelquote (CR = Collection Rate, auch scarp collection rate - Altschrottsammelquote) gibt die Menge eines Metalls an, die in End-of-Life-Produkten (EOL) enthalten ist, die gesammelt und den Recyclingwegen zugeführt werden (Weil und Ziemann 2014). Die End-of-Life recycling rate (EOL-RR) gibt den Prozentsatz eines Materials in den Abfallströmen an, der tatsächlich recycelt wird (Output-Perspektive) (Persio et al., 2020). Die End-of-Life recycling input rate (EOL-RIR) gibt an, wie viel des gesamten Materialinputs in das Produktionssystem aus dem Recycling von Post-Verbraucher-Schrott stammt (Input-Perspektive) (Persio et al., 2020).

Es wird angenommen, dass mit steigenden Rückführquoten der LIBs die Verfügbarkeit von recyceltem Lithium zunehmen und entsprechend die Einsatzquote in neuen LIBs in den kommenden Jahrzehnten, nach 2030, ansteigen wird, sofern die technische Machbarkeit im industriellen Maßstab gegeben sein wird (Gregoir & van Acker, 2022; Mayya et al., 2018; Velázquez-Martínez et al., 2019). Dies muss geschehen, damit die von der Europäischen Kommission vorgeschlagenen Quotenvorgaben für die Recyclingeffizienzen und den Recyclinganteil in LIBs in Höhe von 35 – 70 % (je nach bevorzugter Option) erfüllt werden können (EU Kommission, 2020).

2.3 Wertschöpfungskette Lithium-Ionen-Batterie (LIB)

Bei der Fertigung einer LIB wird das Lithiumerz für die Herstellung der positiven Elektrode (beim Entladen: Kathode) als Lithiumhydroxid Monohydrat ($\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$; battery grade mind. 56,6 wt% LiOH; Livent, 2018) oder als Lithiumkarbonat (Li_2CO_3 ; battery grade min. 99,95 wt% LiOH; Livent, 2022) raffiniert (Abb. 3.4). Neben Lithium sind für die Herstellung der Elektroden in einer LIB Graphit (beim Entladen: Anode) sowie die Metalle Aluminium, Kobalt, Mangan und Nickel (beim Entladen: Kathode) essentiell (DERA, 2021). Außerdem wird in der Kollektorfolie der Anode Kupfer benötigt (DERA, 2021). Nachdem die Elektrodenfertigung abgeschlossen ist, wird die Batteriezelle⁴ gefertigt (Heimes et al., 2018). Anschließend werden die Batteriemodule⁵ und dann die Packs⁶ entsprechend des Kundenbedarfes zu einer Batterie zur Fahrzeugmontage zusammengesetzt (Heimes et al., 2018a). Batterien für Verkehrswagen können zwischen 7.000 und 10.000 Batteriezellen benötigen (Type 18650; Karabelli & Oberle, 2022), der Energiespeicher für das Tesla Model Y besteht aus 4.416 Zellen (Brigde & Faigen, 2022).

⁴ Eine Batteriezelle besteht aus den Komponenten: Anode, Kathode und einem Separator (Heimes et al., 2018).

⁵ Batteriemodule bestehen aus mehreren parallel oder seriell verschalteten Batteriezellen, Sensoren, Batteriemanagementsystemmodul und Kontaktierungssystem in einem Gehäuse mit Isolationsplatte und -folie (Heimes et al., 2018a).

⁶ Batteriepacks sind mehrere Batteriemodule die mit anderen elektrischen, mechanischen und thermischen Komponenten zusammengebaut sind (Heimes et al., 2018a).

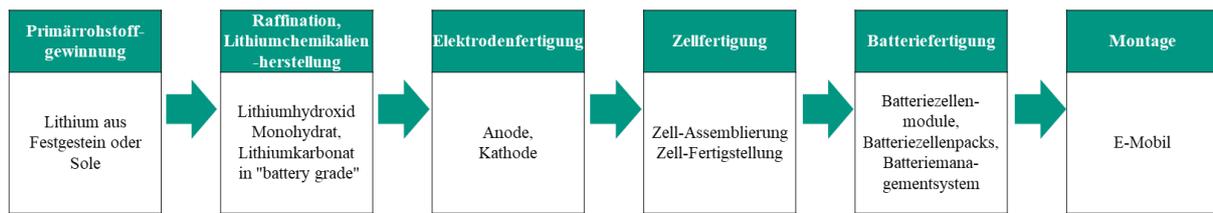


Abbildung 3.4: Vereinfachte Darstellung der Wertschöpfungskette einer LIB für die E-Mobilität (nach Väyrynen & Salminen, 2012; Heimers et al., 2018, 2018a; Karabelli & Oberle, 2022).

Die globale Nachfrage nach großformatigen Batterien für das Jahr 2030 wurde von der Unternehmensberatung Roland Berger im Jahr 2019 mit 2 TWh prognostiziert (Bernhart, 2019). Einer neueren Studie zufolge soll die Nachfrage nach LIBs für das Jahr 2030 weltweit ca. 3,127 TWh betragen (Roland Berger, 2022). Das Fraunhofer ISI gibt eine Nachfrage in Europa für das Jahr 2030 mit 1 TWh an (Thiemann et al., 2020). Im Jahr 2020 betrug die Auftragslage für Batteriezellen und Batterien 747 GWh weltweit, davon wurden 76 % (568 GWh) in China gefertigt, Europa lag mit 7 % (52 GWh) zwar hinter den USA mit 8 % (60 GWh), aber bereits vor Südkorea mit 5 % (37 GWh) und Japan mit 4 % (30 GWh) (Bridge & Faigen, 2022). Ende 2021 gab es global 150 „Gigafactories“ mit einer Energiespeicherproduktionskapazität von ca. 1 TWh (Bridge & Faigen, 2022). Die größten Produzenten in den letzten Jahren waren LG Chemical (17 %; Hauptsitz Seoul, Südkorea; Produktionsstätten in Südkorea, China, USA und Polen), Samsung (13 %; Hauptsitz Yongin; Südkorea; Produktionsstätten in Asien, USA und Europa), Panasonic (12 %; Hauptsitz in Kadoma, Japan; Produktionsstätten in Japan, China und USA) und CATL (11 %; Hauptsitz in Ningde, China; Produktionsstätten in China und Deutschland) (Karabelli & Oberle, 2022; Bridge & Faigen, 2022). Die Elektrodenproduktion findet ebenfalls hauptsächlich in Asien statt, China, Japan und Südkorea produzieren gemeinsam ca. 97 % der Kathoden und 99 % der Anoden (IEA, 2022). Hauptproduzenten sind CNGR (Hauptsitz: China), BASF (Hauptsitz: Deutschland), Johnson Matthey (Hauptsitz: England), Umicore (Hauptsitz: Belgien), und Sumitomo (Hauptsitz Japan) (Bridge & Faigen, 2022). Für 2025 ist eine europäische Kathodenproduktion von 4 % und eine Anodenproduktion von 2 % geplant (IEA, 2022). Die Produktion von Elektroden kann integriert in einer „Giga-Factory“ oder separat erfolgen (Bridge & Faigen, 2022).

3. Methodik

Um ein hypothetisches Spektrum des Lithiumbedarfs und den Möglichkeiten der Deckung einer entsprechenden Lithiumnachfrage im Jahr 2030 für die Batteriezellenproduktion in Deutschland aufzeigen zu können, wird das Vorgehen einer Szenarioanalyse gewählt. Szenarioanalysen werden im Bereich des strategischen Managements angewandt und können daher in verschiedensten Disziplinen mit betriebswirtschaftlichem Bezug übertragen werden, so auch bei der Aufstellung von Nachfrageszenarien für Rohstoffe und Energie (Brauers und Weber, 1988; vgl. IEA, 2021a, 2021b). Eine Szenarioanalyse kann auch dann herangezogen werden, wenn für eine zukünftige Situation keine analogen historischen Daten zur Verfügung stehen und mehrere Einflussfaktoren existieren, welche bewusst miteinbezogen oder ausgeschlossen werden (Kosow und Gaßner, 2008). Als Grundlage der Szenarioanalyse wird eine Nachfrage-Angebotsgleichung (1) angenommen, in welcher die Nachfrage dem Bedarf (2) gleichkommt:

$$N(Li) = A(Li) \quad (1)$$

$$N(Li) = B(Li) \quad (2)$$

B = Bedarf, N = Nachfrage, A = Angebot, Li = Lithium

Um Szenarien zur Lösung der Nachfrage- Angebotsgleichung aufstellen zu können, werden folgende Inputparameter mittels einer online-Recherche erfasst:

- der geplante Ausbau der Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa,
- der Lithiumbedarf in verschiedenen Batteriezellentechnologien nach Marktanteil,
- die Lithiumproduktion der geplanten Lithiumförderprojekte in Europa und
- der Stand des Lithiumrecyclings in Europa.

Die Daten der Recherchen ermöglichen es, Szenarien für die Batteriezellenproduktionskapazitäten (S_n) in GWh in Deutschland für das Jahr 2030 zu definieren (Kap. 3.5.1). Diese stellen die Ausgangslage für die Berechnung des Lithiumbedarfs ($B(Li)_{S_n}$) für die Batteriezellenproduktion in Deutschland und in Europa im Jahr 2030 dar (3) (Kap. 3.5.2). Die Angebotsseite ($A(Li)_{S_n}$) wird durch drei Komponenten definiert (Kap. 3.5.3). Als erste Angebotskomponente dient das europäische Primärlithium (P_{bn}), das **aus konventionellen, magmatischen und sedimentären Gesteinen sowie unkonventionellen geothermalen Solen gewonnen werden soll**. Als **zweite Angebotskomponente** wird das potentielle Angebot an Sekundärlithium in Europa definiert, das sich durch das Produkt der zu erwartenden Recyclingquote und dem Bedarf ($R_x * B(Li)_{S_n}$) ergibt. Die dritte Angebotskomponente stellen die Mengen dar, die auf dem außereuropäischen Markt nachgefragt werden müssten (I_m), diese werden durch Umstellen der Gleichung (5) ermittelt:

$$B(Li)_{Sn} = A(Li)_{Sn} \quad (3)$$

$$B(Li)_{Sn} = P_{bn} + (R_x * B(Li)_{Sn}) + I_m \quad (4)$$

$$I_m = B(Li)_{Sn} - P_{bn} - (R_x * B(Li)_{Sn}) \quad (5)$$

S = Batteriezellenproduktion	n = Kapazitätsszenario
P = Europäisches Primärlithium	b = Primärlithiumangebotsszenario
R = Europäische Sekundärlithiumrate	x = Recyclingrateszenario
I = Menge außereuropäischer Markt	m = Außereuropäisches Nachfrageszenario

Die Lithiumbedarfsdeckung für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 wird für einen Grundfall und mittels Einbeziehung von bereits geschlossenen Lithium-Abnahmeverträgen für einen Praxisfall berechnet. Außerdem wird der Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion in Europa im Jahr 2030 kalkuliert (Kap. 3.5.4). Eine monetäre Größenordnung möglicher Nachfragemengen von Lithiumchemikalien auf dem außereuropäischen Markt wird durch drei Preisszenarien für Deutschland und Europa determiniert. In der vorliegenden Studie wird Europa als Überbegriff für die Staaten der EU-27 sowie Norwegen, Serbien und das Vereinigte Königreich verwendet. Wie der Lithiumbedarf sich verhält, wenn durch Weiterentwicklung der Kathoden- und Batterietechnologien der Lithiumverbrauch verringert wird und durch steigende Recyclingraten der Anteil an Sekundärlithium erhöht wird, wird in einer Sensitivitätsanalyse betrachtet. Grundsätzlich werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um die Auswirkung einer Veränderung der unterschiedlichen Parameter einer Gleichung zu identifizieren und zu beurteilen (vgl. Vanuytrecht et al., 2014, Iooss und Saltelli, 2017).

Wieviel Lithium in einer Batterie zelle verbaut wird, hängt von der Kathodentechnologie und dem Zelldesign ab (Marscheider-Weidemann et al. 2021). Die Menge von Lithium in der positiven Elektrode ist durch die Entwicklung der Batteriezellentechnologie in den vergangenen Jahren gesunken (vgl. Tarascon, 2010a; Simon et al., 2015; Olivetti et al., 2017). Im Jahr 2010 lag der Lithiumeinsatz noch bei ca. 150 g/kWh Batteriekapazität, in der Studie „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“ der DERA wurden Werte zwischen 80 und 123 g/kWh je nach Kathodentechnologie angegeben (Tarascon, 2010; Marscheider-Weidemann et al. 2021). Der Lithiumanteil variiert je Kathodentyp, die Zahlenangaben im Kürzel der Kathodentechnologie geben das Verhältnis der anderen Metallbestandteile an, so beispielsweise (Thielmann et al., 2015):



Unter Primärlithium wird in dieser Studie Lithium verstanden, welches aus Festgestein (Granit, Pegmatit und Sediment) im Tage- oder Untertagebergbau, oder aus Geothermalwasser, welches bei der Tiefengeothermie gefördert wird, gewonnen wird und noch nicht Bestandteil eines industriellen Rohstoffkreislaufes gewesen ist (vgl. Meshram et al., 2014). Lithium in magmatischen Gesteinen ist an Minerale wie bspw. Zinnwaldit (Glimmermineral) oder Spodumen gebunden, in sedimentären Gesteinen an Minerale wie Jadarit oder Zeolith (Breiter et al., 2016; Barros et al., 2016; Grant und Goodenough, 2021). Nach dem Abbau kann durch diverse Aufbereitungsschritte und metallurgische Behandlungen Lithium in Form von Lithiumoxid (Li_2O), Lithiumchlorid (LiCl), Lithiumkarbonat (LiCO_3), Lithiumhydroxid Monohydrat ($\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$) oder Lithiumfluorid (LiF) gewonnen werden (Peerawattuk und Bobicki, 2018; Swain, 2017). Die unterschiedlichen Lithiumprodukte werden international zum Vergleich als Lithiumcarbonatäquivalente (Lithium Carbonate Equivalent = LCE) dargestellt (Tab. 3.1). Als Sekundärlithium wird in dieser Studie das Lithium bezeichnet, welches aus dem Recyclingprozess stammt (vgl. EU Kommission, 2018; Meshram et al., 2014).

Tabelle 3.1: Umrechnungsfaktoren eines Lithiumsprodukts in Lithiumcarbonatäquivalente (LCE) (s. z.B. Schmidt 2017).

Lithiumprodukt	in 1 LCE
Lithium (Li)	5,323
Lithiumchlorid (LiCl)	0,871
Lithiumoxid (Li_2O)	2,473
Lithiumkarbonat (Li_2CO_3)	1,000
Lithiumhydroxid Monohydrat ($\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$)	0,880
Lithiumfluorid (LiF)	1,420

4. Ergebnisse

4.1 Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa im Jahr 2030

Es wurden 38 Produktionsstätten für Batteriezellen ermittelt, welche bis zum Jahr 2030 mit einer Batteriezellenproduktionskapazität von über 1,5 TWh in Europa errichtet werden sollen (Stand Juli 2022; Abb. 3.5; Anhang 3.1). Die European Battery Alliance schätzte im Jahr 2021, dass bereits bis Mitte der 2020er Jahre das Marktpotenzial für in Europa produzierte Batterien sich auf 250 Mrd. Euro belaufen werde (BMW, 2021). Das Ministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK, ehemals BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) gibt an, dass Deutschland und Europa zum Ziel haben, im Jahr 2030 30 % des Weltbedarfs an Batteriezellen heimisch zu produzieren (BMWK, 2022).

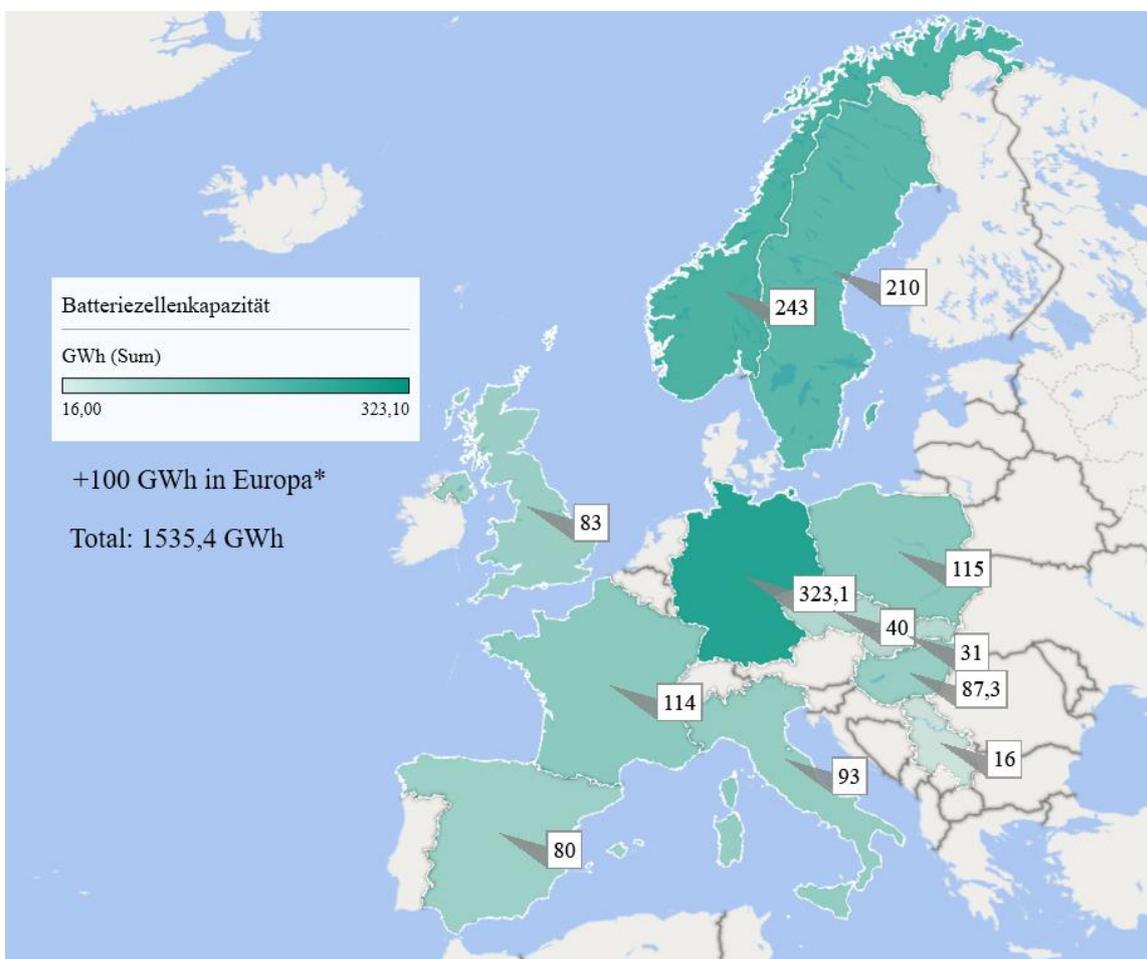


Abbildung 3.5: Geplante maximale Batteriezellenproduktionskapazitäten im Jahr 2030 in Europa nach Ländern (nach Anhang 3.1).
*Europa: Der Volkswagen Konzern plant insgesamt sechs Batteriezellenproduktionsstätten mit einer Gesamtkapazität von 240 GWh in Europa, für 100 GWh wurden die Standorte noch nicht genauer definiert (VW, 2022a).

Für den Standort Deutschland lassen sich zehn Batteriezellenproduzenten bestimmen (Stand Juli 2022; Tab. 3.2). Innerhalb dieses Jahrzehnts wollen diese zehn Unternehmen Batteriezellen für die E-Mobilität im industriellen Maßstab produzieren und teilweise die Kapazität in den Jahren nach dem Produktionsstart, noch vor dem Jahr 2030, erhöhen (Tab. 3.2). Ausgenommen von der Studie sind Produktionsstandorte, die

bereits produzierte Batteriemodule zusammensetzen oder Feststoff-Lithiumbatterien produzieren werden (vgl. BMW Group, 2021; Volkswagen, 2022). Ob die Batteriezellenproduzenten in Deutschland die Elektrodenproduktion selbst übernehmen werden oder die Elektroden, für welche das Lithium benötigt wird, vom europäischen oder Weltmarkt zugekauft werden, kann derzeit nicht für alle Produzenten definiert werden (Stand Juli 2022). Die BASF wird Cellforce mit NMC-Kathodenmaterial aus Schwarzheide (Brandenburg, Deutschland) beliefern (BASF, 2021). Die Kathoden für den geplanten Northvolt Batteriezellenproduktionsstandort Heide, wie auch die für den Northvolt Standort in Göteborg, werden von Northvolt selbst an seinem Standort Northvolt Ett in Skellefteå, Schweden, produziert (Northvolt, 2022). Die Volkswagen Gruppe möchte in einem Joint Venture mit Umicore die Kathoden für seine geplanten europäischen Batteriezellenproduktionsstätten selbst in Europa fertigen (Volkswagen, 2021).

*Tabelle 3.2: Geplante Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 (nach Anhang 3.1). *Automotive Cell Company = ACC, ein Joint Venture von Stellantis, SAFT, Mercedes, Total.*

Unternehmen	Hauptsitz	Standort	Beginn Produktionsstart	Kapazität zu Beginn [GWh]	Maximale Kapazität [GWh]
Automotive Cells Company*	Frankreich	Kaiserslautern	2025	13,4	40
Akasol	Deutschland	Darmstadt	2021	1	5
Blackstone Resources	Schweiz	Döbeln	2023	0,5	5
CATL	Volksrepublik China	Erfurt, Arnstadt	2022	8	14
Cellforce (Porsche)	Deutschland	Tübingen	2024	0,1	0,1
Gotion	Volksrepublik China	Göttingen	2023	3,5	18
Leclanché + Enersis Group	Frankreich	Willstätt	2025	0,12	1
Northvolt	Schweden	Heide	2025	60	60
Svolt	Volksrepublik China	Überherrn	2023	6	24
Volkswagen	Deutschland	Salzgitter	2025	20	40
Total				112,62	207,1

Zusätzliche Batteriezellen sollen in Deutschland auch vom US-amerikanischen Konzern Tesla produziert werden. Die Produktionsstätte für Batteriezellen von Tesla ist seit März 2022 genehmigt und befindet sich direkt neben der schon bestehenden Giga-Fabrik gerade im Bau (Land Brandenburg, 2022). Die Menge der zu produzierenden Batteriezellen von Tesla ist vom Unternehmen nicht offiziell bekannt gegeben (Stand Juli 2022). Der amerikanische-chinesische Batteriehersteller Microvast hat im Januar 2021 in Brandenburg, in Ludwigsfelde einen Batterieproduktionsstandort eröffnet (Kluge, 2021). Des Weiteren gibt es Aussagen über Batteriezellstandorte von Varta (CIC energiGUNE, 2022). Auch wenn keine offiziellen Unternehmensangaben

zu den genannten drei Batteriezellenproduktionsstandorten zu finden sind, werden diese für die Bestimmung einer maximalen Produktionskapazität in Deutschland im Jahr 2030 herangezogen (Tab. 3.3).

Tabelle 3.3: Weitere geplante Batteriezellenproduktionsstandorte in Deutschland im Jahr 2030 (nach Graupner, 2022; CIC energiGUNE, 2022).

Unternehmen	Standort	Produktionsstart	Kapazität [GWh]
Tesla	Grünheide	2023	100
VARTA	n.b.	2024	10
Microvast	Ludwigsfelde	2021	6
Total			116

Durch die vorliegenden Kapazitätsdaten werden drei Batteriezellenproduktionsszenarien (S_n) für das Jahr 2030 in Deutschland bestimmt. Es wird ein Mindest-Szenario S₁ mit 112,62 GWh, was durch die Kapazitäten der zehn Batteriezellenproduktionsstandorte zu Beginn bestimmt wird, ein Mittleres-Szenario S₂ mit 207,1 GWh, was durch die möglichen Kapazitätserweiterungen der zehn Batteriezellenproduktionsstandorte bestimmt wird und ein Maximal-Szenario S₃ mit 323,1 GWh, was zur erweiterten Kapazität der zehn Unternehmen noch die Kapazitäten der drei Unternehmen ohne offizielle Unternehmensbekanntmachungen hinzuzählt, definiert (Tab. 3.4).

Tabelle 3.4: Szenarien der Batteriezellenproduktionskapazität in Deutschland im Jahr 2030.

Batteriezellenproduktions-szenario	Kapazität [GWh]	Erläuterung
Mindest-Szenario S ₁	112,62	Die zehn geplanten Produktionsstätten behalten ihre Produktionskapazität wie zu Beginn bei (Tab. 3.1).
Mittleres Szenario S ₂	207,1	Die Kapazitäten der geplanten zehn Produktionsstätten werden wie nach den Maximalangaben der Betreiber ausgebaut werden (Tab. 3.1).
Maximum-Szenario S ₃	323,1	Zur maximalen Kapazität aus S ₂ kommen noch die möglichen Kapazitäten der Produzenten Microvast, Tesla und VARTA hinzu (Tab. 3.2).

Die Batteriezellenproduktionskapazitäten für Europa werden wie im Fall von Deutschland für drei Szenarien bestimmt (Stand Juli 2022; Anhang 3.1, Tab. 3.5).

Tabelle 3.5: Szenarien der Batteriezellenproduktionskapazität in Europa im Jahr 2030.

Batteriezellenproduktions-szenario	Kapazität [GWh]	Erläuterung
Mindest-Szenario S ₁	828,67	Berechnete Anfangskapazität aller Standorte in Europa (Anhang 3.1).
Mittleres Szenario S ₂	1.419,4	Berechnete Maximalkapazität aller Standorte in Europa (Anhang 3.1).
Maximum-Szenario S ₃	1.535,4	Zur maximalen Kapazität aus S ₂ kommen noch die möglichen Kapazitäten der Produzenten Microvast, Tesla und VARTA hinzu (Tab. 3.2).

4.2 Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa im Jahr 2030

Der in diesem Kapitel berechnete Lithiumbedarf in t LCE soll gleichverstanden werden mit der Nachfrage nach den Lithiumchemikalien (Lithiumhydroxid Monohydrat und Lithiumkarbonat) für die Kathoden. In der Auftragsstudie „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“ der DERA werden die spezifischen Lithiummengen in verschiedenen Kathodentypen angegeben und ihr Marktanteil für das Jahr 2030 prognostiziert (Tab. 3.6, Marscheider-Weidemann et al. 2021).

Tabelle 3.6: Spezifische Lithiummenge verschiedener Kathodentypen (Stand Ende 2021) mit entsprechenden prognostizierten Marktanteilen im Jahr 2030 (Marscheider-Weidemann et al., 2021).

Kathodentechnologie	Kathodenkürzel	Lithium [kg/kWh]	Marktanteile im Jahr 2030
Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid	NMC 811	0,096	45 %
Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid	NMC 622	0,104	25 %
Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid	NCA 5	0,095	12 %
Hochenergie Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid	HE-NMC	0,123	10 %
Lithiumeisenphosphat	LFP	0,084	5 %
Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid	NMC 532	0,121	2 %
Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid	NMC 433	0,117	1 %

4.2.1 Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030

Durch Multiplikation der angegebenen Marktanteile aus Tabelle 3.6 mit den Batteriezellen-produktionskapazitäten für Deutschland aus Tabelle 3.4 (Kap. 3.5.1) ergibt sich ein gerundeter Bedarf an Lithiumchemikalien für die deutsche Batteriezellenproduktion im Jahr 2030 in Höhe von 60,4 kt LCE in S1, 111,0 kt LCE in S2 und 173,2 kt LCE in S3 (Tab. 3.7).

Tabelle 3.7: Berechneter Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030.

Kathoden-kürzel	Spezifische Lithiummenge [kg/kWh]	Marktanteil 2030	Minimum-Szenario S1: 112,62 GWh		Mittleres Szenario S2: 207,1 GWh		Maximum-Szenario S3: 323,1 GWh	
			Lithium [t]	t LCE	Lithium [t]	t LCE	Lithium [t]	t LCE
NMC 811	0,096	45%	4.865	25.897	8.947	47.623	13.958	74.298
NMC 622	0,104	25%	2.928	15.586	5.385	28.662	8.401	44.716
NCA 5	0,095	12%	1.284	6.834	2.361	12.567	3.683	19.606
HE-NMC	0,123	10%	1.385	7.374	2.547	13.559	3.974	21.154
LFP	0,084	5%	473	2.518	870	4.630	1.357	7.223
NMC 532	0,121	2%	273	1.451	501	2.668	782	4.162
NMC 433	0,117	1%	132	701	242	1.290	378	2.012
Summe		100,0%	11.340	60.361	20.853	111.000	32.533	173.173

4.2.2 Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion in Europa im Jahr 2030

Durch Multiplikation der angegebenen Marktanteile aus Tabelle 3.6 mit den Batteriezellen-produktionskapazitäten für Europa aus Tabelle 3.5 (Kap. 3.5.1) beläuft sich der Lithiumbedarf für die 38 angekündigten europäischen Batteriezellenproduktionsstätten gerundet auf 444,1 kt LCE in S1, 760,8 kt LCE in S2 und 822,9 kt LCE in S3 (Tab. 3.8).

Tabelle 3.8: Berechneter Lithiumbedarf in t LCE für die Batteriezellenproduktion in Europa im Jahr 2030.

Kathoden-kürzel	Spezifische Lithiummenge [kg/kWh]	Markt-anteile 2030	Minimum-Szenario 828,67 GWh		Mittleres Szenario 1.419,4 GWh		Maximum-Szenario 1.535,4 GWh	
			Lithium in t	t LCE	Lithium in t	t LCE	Lithium in t	t LCE
NMC 811	0,096	45%	35.799	190.556	61.318	326.396	66.329	353.071
NMC 622	0,104	25%	21.545	114.686	36.904	196.442	39.920	212.496
NCA 5	0,095	12%	9.447	50.286	16.181	86.132	17.504	93.171
HE-NMC	0,123	10%	10.193	54.255	17.459	92.932	18.885	100.527
LFP	0,084	5%	3.480	18.526	5.961	31.733	6.449	34.326
NMC 532	0,121	2%	2.005	10.675	3.435	18.284	3.716	19.779
NMC 433	0,117	1%	970	5.161	1.661	8.840	1.796	9.562
Summe		100,0%	83.439	444.145	142.919	760.760	154.599	822.933

4.3 Lithiumangebot in Europa

Im Jahr 2022 kann eine Nachfrage nach Lithium für die Batteriezellenproduktion in Deutschland nur aus Importen gedeckt werden. Bis im Jahr 2030 könnte diese Quelle durch Primärlithium aus europäischen Projekten, sowie einen Anteil an Sekundärlithium ergänzt werden. Voraussetzung für eine durchgängige europäische Wertschöpfungskette von LIBs sind Raffinerien in denen das Lithium veredelt werden kann sowie Elektrodenproduktionsstätten.

4.3.1 Primärlithium

Primärlithium aus Projekten im fortgeschrittenen Stadium

Stand Mai 2022 gibt es in der EU-27 sieben Projekte, die beabsichtigen ab Mitte der 2020er Jahre Lithium im industriellen Maßstab zu fördern (Tab. 3.9 & 3.10). Alle diese Projekte haben mindestens eine Konzeptstudie erarbeitet, oder bereits schon eine Vormachbarkeitsstudie oder Machbarkeitsstudie veröffentlicht. Sie werden aus diesem Grund als Projekte „im fortgeschrittenen Stadium“ bezeichnet. Die Projekte in Portugal, Deutschland, Tschechien, Österreich und Finnland sind an magmatische (Pegmatit, Granit und Greisen) Lagerstätten gebunden. Ein Projekt in Spanien ist in einer sedimentären Lagerstätte zu finden. Ein weiteres Projekt beabsichtigt aus Geothermalwasser des Oberrheingrabens Lithium industriell zu fördern.

Das Projekt Mina do Baroso in Nordportugal von Savannah Resources Plc sieht vor, ab 2025 jährlich 175.000 t Spodumenkonzentrat mit 6 % Lithiumoxid zu fördern, was ca. 25.967 t LCE entspricht, als Nebenprodukte werden Feldspat und Quarz angegeben (Savannah Resources Plc, 2022; Savannah Resources Plc, 2021). Die Produktionslaufzeit wurde auf 11 Jahre berechnet (Savannah Resources Plc, 2018). Die Weiterverarbeitung zu Lithiumhydroxid könnte in zwei geplanten Lithiumraffinerien in Portugal erfolgen (Savannah Resources Plc, 2022). Das Projekt Zinnwald der Zinnwald Lithium Plc hat eine Bergwerkslizenz bis 2047 und plant ab 2025 jährlich 5.112 t Lithiumfluorid (ca. 7.285 t LCE) sowie als Nebenprodukt Kaliumsulfat, ein Produkt für die Düngemittelindustrie, im Erzgebirge zu gewinnen (Bacanora Lithium Plc, 2019; Zinnwald Lithium Plc, 2021). In ihrer Investorenpräsentation vom März 2022 schreibt die Zinnwald Lithium Plc, dass sie die Lithiumchemikalien Lithiumhydroxid, Lithiumkarbonat und Lithiumfluorid in „battery grade“ anbieten wird (Zinnwald Lithium Plc, 2022). Auf der anderen Seite der Landesgrenze in Tschechien befindet sich das Projekt Cinovec der European Metals Holding Ltd. Hier könnten auf Grundlage der Erzgehalte über 25 Jahre lang jährlich 29.386 t Lithiumhydroxid (ca. 25.860 t LCE) gefördert werden (European Metals Holding Ltd, 2022). Der Beginn der Produktion in Cínovec wird von Analysten für 2024 angenommen (S&P Global, 2021). Nach Unternehmensangaben soll eine Lithiumchemikalienanlage integriert werden (European Metals Holding Ltd., 2022). Das Projekt der European Lithium in Österreich, Wolfsberg, plant einen Produktionsbeginn für 2023 mit einer über mindestens 12 und im besten Fall 25 Jahren andauernden, jährlichen Produktion von ca. 10.129 t Lithiumhydroxid (ca. 8.914 t LCE) (European Lithium Ltd, 2021). In Finnland soll das Projekt Keliber

ab 2026 für 16 Jahre 15.000 t Lithiumhydroxid (ca. 13.200 t LCE) fördern (Keliber, 2022). Das spanische Projekt San José der Infinity Corporation Ltd sieht vor, ab 2025 über 26 Jahre lang jährlich ca. 19.840 t Lithiumhydroxid (ca. 17.142 t LCE) zu produzieren (Infinity Lithium, 2021, 2022).

Die 2020 gegründete Vulcan Energie Ressourcen GmbH (VER), Tochterunternehmen der 2018 gegründeten australischen Vulcan Energy Resources hat zum Ziel, ab 2024 auf deutscher Seite im Oberrheingraben Lithium aus Geothermalwasser im industriellen Maßstab zu fördern (VER, 2022). Das Geothermalwasser im Oberrheingraben weist Werte von maximal 181 mg Li/l auf, laut des Unternehmens werden Förderraten zwischen 100 l/s und 120 l/s pro Bohrloch erwartet (PFS, VER, 2020; VER, 2022). Die VER möchte neben der bereits angewandten Technologie der Wärme- und Stromerzeugung aus der Tiefengeothermie (400-5.000 m) ein direktes Lithiumextraktionsverfahren (DLE) in den Produktionskreislauf von zwei Geothermie-Anlagen in Landau und Insheim (Rheinland-Pfalz) einführen, um Lithiumchlorid zu gewinnen (VER, 2022). Die angestrebte Extraktion mittels eines Sorbens hat in der kommerziellen Anwendung bei der Lithiumextraktion aus Salaren einen Technologiereifegrad (TRL) von 9 (VER, 2021). Insgesamt werden von der VER ca. 15.85 Mio. t LCE vermutete und angezeigte Ressourcen für ihre Lizenzen angenommen (VER, 2022a). Das durch die DLE-Anlagen extrahierte Lithiumchlorid soll in einer separaten Lithiumraffinerie im Chemiepark Höchst bei Frankfurt in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen Nobian zu jährlich 15.000 t Lithiumhydroxid Monohydrat (ca. 13.200 t LCE) in Batteriequalität umgewandelt werden (VER, 2022; 2022b). Ab 2025 sollen jährlich weitere 25.000 t Lithiumhydroxid (ca. 22.000 t LCE) durch drei weitere Geothermie-Anlagen produziert werden (VER, 2022).

Tabelle 3.9: Daten der Lithiumprojekte (Stand Mitte 2022; nach Savannah Resources Plc, 2018, 2022; Bacarona, 2019; Zinnwald Lithium, 2021, 2022; Tagesschau, 2021; European Metals Holding Ltd, 2022; S&P Global, 2021; European Lithium Ltd, 2021; Keliber, 2022; Infinity Lithium, 2021, 2022; VER, 2020, 2022; Rio Tinto, 2020).

Unternehmen	Land	Projekt	Entwicklungsstadium	Produkt	Menge (t/Jahr)	Menge (LCE t/Jahr)	Produktionsbeginn	Erwartete Bergwerksproduktion in Jahren (LOM)	Lizenzdauer	Bergwerkslaufzeit Ende (Lizenz)
Savannah Resources	Portugal	Mina do Barroso	Konzeptstudie (2018)	Spodumenkonzentrat	175.000	25.967	2025	11	k.A.	2036
Deutsche Lithium	Deutschland	Zinnwald	Machbarkeitsstudie (2019)	LiF (LiOH·H ₂ O, Li ₂ CO ₃)	5.112	7.285*	2025	k.A.	30	2047
European Metals	Tschechien	Cinovec	Vormachbarkeitsstudie (Update 2022)	LiOH·H ₂ O	29.386	25.860	2024	25	k.A.	k.A.
European Lithium	Österreich	Wolfsberg	Vormachbarkeitsstudie (2018)	LiOH·H ₂ O	10.129	8.914	2023	12 - 25	k.A.	k.A.
Keliber	Finnland	Keliber	Machbarkeitsstudie (Update 2022)	LiOH·H ₂ O	15.000	13.200	2026	16	k.A.	k.A.
Infinity Lithium	Spanien	San Jose	Konzeptstudie (2021)	LiOH·H ₂ O	19.480	17.142	2025	26	k.A.	k.A.
VER	Deutschland	Oberheingraben	Vormachbarkeitsstudie (2020)	LiOH·H ₂ O	40.000	35.200	2025	k.A.	k.A.	k.A.
Total						133.567				

* In der Unternehmenspräsentation des Zinnwaldprojekts vom Juli 2021 wurden noch 7.285 t LCE im Jahr angegeben, allerdings auf der Basis einer Lithiumfluoridproduktion, die Möglichkeit zur Lithiumhydroxid- und Lithiumkarbonatproduktion wurde ohne Mengenangaben erwähnt (Zinnwald Lithium plc, 2021). In der neusten Unternehmenspräsentation des Zinnwaldprojekts (März 2022) wird zwar die flexible Produktion verschiedenster "battery grade" Produkte wie Lithiumhydroxid, Lithiumkarbonat neben Lithiumfluorid benannt, allerdings sind keine Mengenangaben zu einer jährlichen Produktion angegeben (Zinnwald, 2022).

Tabelle 3.10: Übersicht über die Ressourcen- und Reservenangaben der Lithiumprojekte aus Festgestein (Stand Mitte 2022; nach Savannah Resources Plc, 2021; Bacarona, 2019; European Metals Holding Ltd, 2021; European Lithium, 2022; Keliber, 2021; Infinity Lithium, 2021)

Projekt	Gemessene Ressourcen (Mt)	Angezeigte Ressourcen (Mt)	Vermutete Ressourcen (Mt)	Summe Ressourcen (Mt)	Lithiumoxid (%)	LCE (Mt)	Nebenprodukte	Reserven (Mt)	Lithiumoxid (%)	LCE (Mt)
Mina do Barroso	6,6	8,4	12,0	27,0	1,06	0,71	Feldspat, Quarz	k.A.	k.A.	k.A.
Zinnwald	18,5	17,0	4,9	40,4	0,35	0,76	Wolfram, Zinn	31,2	0,3	0,5
Cinovec	53,3	360,2	294,7	708,2	0,42	7,39	Wolfram, Zinn	k.A.	k.A.	k.A.
Wolfsberg	2,9	3,4	4,7	11,0	1,00	0,27	Feldspat, Quarz	7,4	0,7	0,1
Keliber	4,3	9,4	1,9	15,6	1,05	0,41	k.A.	12,3	0,9	0,3
San Jose	k.A.	59,0	52,2	111,2	0,61	1,68	Zinn	k.A.	k.A.	k.A.
Total				913,4		11,22				

Weitere Primärlithiumprojekte in Europa

Das Projekt von Rio Tinto im Jadar Becken in Serbien, eine sedimentäre Lagerstätte, wurde während der Recherchen aufgrund von Bedenken hinsichtlich möglicher Auswirkungen des Bergwerks auf die örtlichen Gemeinden eingestellt (Rio Tinto, 2022) und wird daher nicht in die Aufstellung der Angebotsszenarien für europäisches Primärlithium einbezogen. Laut Unternehmensangaben betragen die Ressourcen 139,2 Mio. t mit einem Lithiumoxidgehalt von 1,78 % und einem Bortrioxid-Gehalt von 14,7 %, die Reserven werden mit 16,6 Mio. t und einem Lithiumoxidgehalt von 1,81 % angegeben (Rio Tinto, 2020). Mit diesen Vorräten gab das Unternehmen eine jährliche Produktion von 55.000 t Lithiumkarbonat (battery grade) an (Rio Tinto, 2020). Ein weiteres Lithiumfördervorhaben in Serbien wird von dem Unternehmen Euro Lithium+Borates in Valjevo erarbeitet (EuroLithium, 2022). Das Projekt befindet sich noch im Anfangsstadium (Stand Oktober 2022) und wird daher ebenfalls nicht in die Studie einbezogen.

Es existieren weitere Projekte, die aus dem Geothermalwasser des Oberrheingrabens Lithium gewinnen möchten. Das Kooperationsprojekt der Energie Baden-Württemberg (EnBW), dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und weiteren Universitäts- und Wirtschaftspartnern forscht an einem geeigneten Sorptionsmittel und hat bereits eine Pilotanlage am EnBW-Standort Bruchsal aufgebaut (TRL 6-7) (Stand Oktober 2022; UnLimited, 2022, a). Die Lithiumkonzentration im Geothermalwasser in 1,9 und 2,4 km Tiefe in Bruchsal liegt zwischen 159 mg/l und 166 mg/l bei einer Schüttungsrate von 24 l/s (Sanjuan, 2016; ITG, 2022)). Allerdings liegen noch keine Angaben zu den möglichen Lithiummengen vor, die industriell produziert werden können, daher wird dieses Projekt nicht in der Berechnung miteinbezogen.

Auf der französischen Seite des Oberrheingrabens wurde von 2019 bis 2021 das Projekt EuGeLi (European Geothermal Lithium Brines) ausgeführt (EIT Raw Materials, 2019; ERAMET, 2019). Bei dem vornehmlich durch die EIT Raw Materials finanziertem Projekt arbeiteten zehn Unternehmen und akademische Institutionen aus Frankreich, Belgien und Deutschland daran, Lithium mittels eines Adsorptionsmittels in Extraktionssäulen aufzufangen (EIT Raw Materials, 2020). Im Frühjahr 2021 gelang es dem Projektteam zum ersten Mal, Lithium aus Geothermalwasser aus 2,6 und 3,2 km Tiefe am Kraftwerk Rittershofen (Schüttungsrate 80 l/s) zu extrahieren (ERAMET, 2021; Bundesverband Geothermie; 2020). Das Projekt endete im Dezember 2021 mit dem erfolgreichen Resultat, dass einige Kilogramm an battery-grade Lithiumkarbonat produziert wurden (BRGM, 2022).

Auch in England wird an der Förderung von Lithium aus Geothermalwässern gearbeitet. Cornish Lithium Limited gründete gemeinsam mit Geothermal Engineering Limited (GEL) das Joint Venture GeoCubed mit dem Zweck der Stromerzeugung, Wärmegewinnung und Lithiumextraktion in Cornwall, Südengland (GEO3, 2022). Im Juli 2021 gab das Unternehmen bekannt, dass das französische Startup Geolith SAS die Pilotanlage mit ihrer Lithium-Capt® Direct Lithium Extraction Technologie ausstatten wird (GEO3, 2021). Es ist

geplant, dass die Pilotanlage 10 t LCE pro Jahr produziert und als Grundlage für die Hochskalierung einer industriellen Anlage dient (GEO3, 2021). Im August 2021 gab Geothermal Engineering Limited die bislang höchsten Lithiumkonzentrationen von 250 mg/l bekannt (Geothermal Engineering Ltd, 2021). Im Gegensatz zum Oberrheingraben befindet sich das Thermalwasser in Cornwall nicht in tiefliegenden Gesteinen, sondern zirkuliert oberflächennah (< 400 m) in lithiumreichem, zerklüfteten Granit (Cornish Lithium, 2022). Das lithiumreiche Thermalwasser tritt an mehreren Stellen als warme Solen an der Oberfläche oder in aufgelassenen Bergwerken aus (Cornish Lithium, 2022).

Primärlithiumangebot aus der EU-27 für die Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa im Jahr 2030

Vier Unternehmen der sieben fortgeschrittenen Projekte haben bereits Vereinbarungen mit unterschiedlichen Abnehmern geschlossen. Verbindliche Abnahmeverträge (binding offtake agreements) hat die VER mit LG Energy Solutions, Renault, Stellantis, Umicore und der Volkswagen Gruppe geschlossen (VER, 2021 a – d, 2022c). Eine Ankündigung zur Erstellung eines verbindlichen Abnahmevertrags hat Savannah Resources mit dem portugiesischen Energieunternehmen Galp Energia publiziert (Savannah Resources, 2021a). Infinity Lithium veröffentlichte eine Absichtserklärung zur Abnahme (Memorandum of Understanding) mit LG Energy Solutions, jedoch ohne Mengenangaben (Infinity Lithium, 2022). Eine Absichtserklärung zur Abnahme (MoU) zwischen der European Lithium und der BMW AG besteht seit August 2022, in dem BMW das Recht auf 100 % des produzierten Lithiumhydroxid Monohydrats zugestanden wird (European Lithium, 2022). Für die Berechnung des Lithiumangebots aus europäischen Lithiumquellen, welches theoretisch dem Markt noch zur Verfügung stehen könnte, werden daher Lithiummengen, die bereits Abnehmern, verbindlich oder nicht, zugesprochen wurden, nicht mit einkalkuliert und die Gesamtsumme von 133.567 t LCE (Tab. 3.9) um diese Mengen auf 76.470 t LCE reduziert (Tab. 3.11).

Tabelle 3.11: Potentielles Lithiumangebot aus der EU-27 nach Abzug bereits vereinbarter Abnahmemengen (Stand August 2022; nach Savannah Resources Plc, 2022, 2021a; Zinnwald Lithium, 2021, 2022; Tagesschau, 2021; European Metals Holding Ltd, 2022; S&P Global, 2021; European Lithium Ltd, 2021, 2021a; Keliber, 2022; Infinity Lithium, 2021, 2022, 2022a; VER, 2021a-d, 2022, 2022c; Rio Tinto, 2020).

Unternehmen	Land	Projekt	Produkt	Menge (t/a)	Menge (LCE t/a)	Abnahme laut Vereinbarung (LCE t/a)	t LCE/a verfügbar
Savannah Resources	Portugal	Mina do Barroso	Spodumenkonzentrat	175.000	25.967	50 %	12.983
Deutsche Lithium	Deutschland	Zinnwald	LiF (LiOH, LiCO)	5.112	7.285	-	7.285
European Metals	Tschechien	Cinovec	LiOH	29.386	25.860	-	25.860
European Lithium	Österreich	Wolfsberg	LiOH	10.129	8.914	100 %	0
Keliber	Finnland	Keliber	LiOH	15.000	13.200	-	13.200
Infinity Lithium	Spanien	San Jose	LiOH	19.480	17.142	k.A.	17.142
VER	Deutschland	Oberheingraben	LiOH	40.000	35.200	36.197*	0
Summe					133.567		76.470

* Anmerkung: Die Abnahmevereinbarungen der Vulcan Energie Ressourcen (VER, 2021a-d, 2022c) werden in den offiziellen Mitteilungen des Unternehmens jeweils mit einer Mindestabnahmemenge und einer maximalen Abnahmemenge von Lithiumhydroxid Monohydrat im jeweiligen Vertragszeitraum angegeben (Anhang 3.2). 36.197 t LCE ergeben sich bei Umrechnung der Summe der Mindestabnahmemenge aus den bereits bekannten fünf Abnahmevereinbarungen (210.000 t LiOH·H₂O) pro Jahr (41.133 t LiOH·H₂O) mit dem Faktor 0,88.

Da auch das reduzierte Lithiumangebot (Tab. 3.11) nicht komplett für den deutschen Abnehmermarkt zur Verfügung stehen wird und ggfs. geplante Lithiumförderprojekte nicht (rechtzeitig) realisiert werden können, werden an dieser Stelle drei Annahmen für die zur Verfügung stehende Lithiummenge aus der EU-27 für die Batteriezellenproduktion im Jahr 2030 in Deutschland gemacht (Tab. 3.12). Im ersten Szenario wird angenommen, dass keine Lithiummengen für die Batteriezellenproduktion in Deutschland zur Verfügung stehen werden. Für das zweite und dritte Szenario wird die gesamte geplante Batteriezellenproduktion in Europa herangezogen (Tab. 3.5) und der Anteil der Batteriezellenproduktion in Deutschland im Mittleren und Maximal-Szenario (Tab. 3.4) berechnet (Tab. 3.13).

Tabelle 3.12: Angebotsszenarien der Primärlithiummengen aus der EU-27 für die Batteriezellenproduktion im Jahr 2030 in Deutschland.

Szenario	Erläuterung
Angebotsszenario Primärlithium P ₁	Die europäische Lithiumproduktion wird nicht für den Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion im Jahr 2030 in Deutschland zur Verfügung stehen. (Die Abnahmemengen von Stellantis (ACC) und VW von der VER sind auf der Angebots- wie auch Nachfrageseite berücksichtigt)
Angebotsszenario Primärlithium P ₂	Der Lithiumanteil, der für deutsche Batteriezellenproduktion aus dem Primärlithiumangebot der EU-27 für das Jahr 2030 angenommen wird, entspricht dem Marktanteil, den die Batteriezellenproduktion in Deutschland (ohne ACC & VW) an der europäischen Batteriezellenproduktion hat.
Angebotsszenario Primärlithium P ₃	Der Lithiumanteil, der für deutsche Batteriezellenproduktion aus dem Primärlithiumangebot der EU-27 für das Jahr 2030 angenommen wird, entspricht dem Marktanteil, den die Batteriezellenproduktion in Deutschland an der europäischen Batteriezellenproduktion hat, inkl. jeweils der Kapazitäten von Microvast, Tesla und Varta

Tabelle 3.13: Marktanteile der Batteriezellenproduktion in Deutschland an der Batteriezellenproduktion in Europa im Jahr 2030 in den Batteriezellenproduktionsszenarien S₁ – S₃.

Angebots-szenario	Batteriezellenproduktion	Mindest-Szenario S ₁	Mittleres-Szenario S ₂	Maximum-Szenario S ₃
P ₂	Summe Europa in GWh	804,2	1382,0	1498,0
	Summe Deutschland in GWh	88,1	169,7	285,7
	Prozentualer Anteil Deutschlands in Europa	3,6%	13,7%	15,1%
P ₃	Summe Europa in GWh	828,67	1419,4	1535,4
	Summe Deutschland in GWh	112,62	207,1	323,1
	Prozentualer Anteil Deutschlands in Europa	13,6%	25,0%	21,0%

Entsprechend Tabelle 3.12 und 3.13 werden neun Angebotsszenarien definiert, die von einem Lithiumangebot von 0 – 25 % aus europäischen Ressourcen reichen (Tab. 3.14).

Tabelle 3.14: Angebotsszenarien der Primärlithiummengen aus der EU-27 für die Batteriezellenproduktion im Jahr 2030 in Deutschland entsprechend der Batteriezellenproduktionszenarien.

Angebotsszenario	Batteriezellenproduktionskapazität	%
P ₁	S ₁	0,0 %
	S ₂	0,0 %
	S ₃	0,0 %
P ₂	S ₁	3,6 %
	S ₂	13,7 %
	S ₃	15,1 %
P ₃	S ₁	13,7 %
	S ₂	25,0 %
	S ₃	21,0 %

4.3.2 Lithium aus Recycling

Um den Bedarf an Lithium für die Batterieproduktion zu decken, wird neben einer europäischen Lithiumproduktion auch der Einsatz von Rezyklaten angestrebt (EU Kommission, 2020) und so auch in drei Szenarien für diese Studie angenommen. Gregoir und van Acker (2022) gehen davon aus, dass die Verfügbarkeit von Sekundärlithium für die Verarbeitung in neuen Batterien für die E-Mobilität in Europa erst nach 2030 zunehmen wird. Die IEA und IRENA sehen diese Entwicklung ebenfalls für den globalen Markt (IEA; 2021a; Gielen und Lyons, 2022). Daher wird als erstes Recyclingszenario ein Anteil von 0 % Sekundärlithium für die Deckung der Lithiumnachfrage für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 angenommen. Die DERA (2022) geht davon aus, dass der Anteil an Sekundärlithium für den europäischen Markt im Jahr 2030 zwischen 2,5 % und 10,6 % der Nachfrage liegen könnte, bei einer Batteriezellenproduktionskapazität von 1 TWh und einem Lithiumbedarf von ca. 386.000 t LCE für BEVs in Europa (Schmitt, 2022). Für das zweite Recyclingszenario R2 wird daher angenommen, dass 2,5 % der Nachfrage durch Sekundärlithium gedeckt werden können. Im dritten Recyclingszenario R3 wird angenommen, dass 4 % Sekundärlithium den Bedarf decken werden. Diese Annahme geht zurück auf einen Vorschlag der Europäischen Kommission (2020) (Tab. 3.15).

Tabelle 3.15: Recyclingszenarien jeweils in Abhängigkeit der Batteriezellenproduktionskapazitäten S₁ – S₃.

Recycling-szenario	Batteriezellen-produktionskapazitäten	EOL-RIR	Erläuterung
R ₁	S ₁	0 %	Aufgrund einer verbleibend geringen Collection Rate (CR) und einer nicht ausgeführten EOL-RR gibt es kein Angebot an Sekundärlithium für die Produktion in Deutschland (vgl. Gregoir & van Acker, 2022; IEA, 2021a).
	S ₂		
	S ₃		
R ₂	S ₁	2,5 %	Die europaweite CR beträgt 70 %. Bei einer EOL-RR von 25 % beträgt die EOL-RIR 2,5 %. Dadurch können 2,5 % der Nachfrage nach Lithium in LIBs durch recyceltes Lithium gedeckt werden (Schmidt, 2022).
	S ₂		
	S ₃		
R ₃	S ₁	4,0%	Nach einem Vorschlag der Europäischen Kommission (2020) zu Batterien und Altbatterien, sollen ab dem 01.01.2030 4 % des Lithiums in einer Batterie Sekundärlithium sein, bei einer CR von 70 % und einer EOL-RR von 70 %.
	S ₂		
	S ₃		

4.4 Lithiumbedarfsdeckung

4.4.1 Lithiumbedarfsdeckung für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030

Grundfall

Im Grundfall wird der Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktionskapazitäten S1 – S3 (Tab. 3.4) berechnet. Zunächst werden die ermittelten Lithiumbedarfsmengen (Tab. 3.7) herangezogen. Diesen steht entsprechend der Angebots- und Nachfragegleichung (4) das Primärlithiumangebot aus den EU-27, das noch nicht über Vereinbarungen Abnehmern zugesprochen wurde (Tab. 3.12 – 3.14), und ein Sekundärlithiumangebot gegenüber (Tab. 3.15). Entsprechend Gleichung (5) wird der Lithiumbedarf auf dem außereuropäischen Markt in 27 Szenarien berechnet (Abb. 3.6). Die ausführliche Szenarienaufstellung ist dem Anhang 3.3 zu entnehmen.

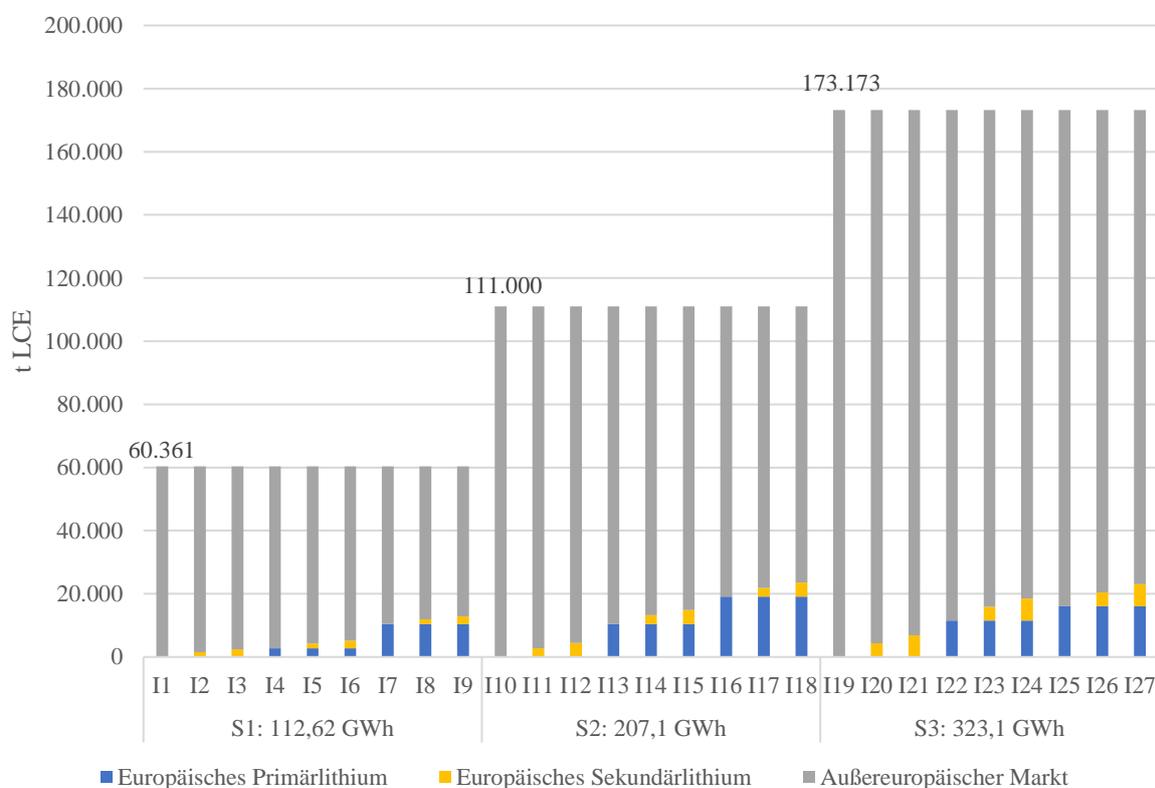


Abbildung 3.6: Lithiumbedarf und Aufteilung der Lithiumnachfragedeckung für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Grundfall.

Aufgrund der Annahmen, dass weder europäisches Primär- noch Sekundärlithium als Angebot zur Verfügung stehen kann, gibt es in jedem Szenario der Batteriezellenproduktionskapazität (S1 – S3) ein Szenario in dem die nachzufragende Menge vom außereuropäischen Markt (I) jeweils der benötigten Gesamtlithiummenge in S1 – S3 entspricht (I1 = 60.361 t LCE, I10 = 111.000 t LCE, I19 = 173.173 t LCE) und damit die Eigenversorgungsmöglichkeit jeweils bei 0 % liegt. Die Szenarien, bei denen am wenigsten Lithium am außereuropäischen Markt nachgefragt werden muss sind I9 in S1, I18 in S2 und I27 in S3:

$I9 = B(Li)S1 - P31 - (R3 * B(Li)S1) = 47.554 \text{ t LCE}$
 (78,8 % vom außereuropäischen Markt, 21,2 % Eigenversorgung),

$I18 = B(Li)S2 - P32 - (R3 * B(Li)S2) = 87.449 \text{ t LCE}$
 (78,8 % vom außereuropäischen Markt, 21,2 % Eigenversorgung),

$I27 = B(Li)S3 - P33 - (R3 * B(Li)S3) = 150.154 \text{ t LCE}$
 (86,7 % vom außereuropäischen Markt, 13,3 % Eigenversorgung).

Da die Verfügbarkeit von Lithium aus den europäischen Projekten in jedem Szenario der Batteriezellenproduktionskapazität S1 – S3 unterschiedlich angenommen wurde (Tab. 3.12 – 3.14), unterscheidet sich der prozentuale Anteil der Nachfrage vom außereuropäischen Markt an der jeweiligen Gesamtnachfrage und entsprechend auch die Quote der Deckung der Nachfrage durch europäisches Primär- und Sekundärlithium (Eigenversorgung).

Praxisfall

In diesem Praxisfall wird angenommen, dass die Lithiumhydroxid Monohydratmengen, die als Mindestabnahmemenge zwischen der VER und Stellantis (ca. 14.256 t LCE) und Volkswagen (ca. 5.984 t LCE) vereinbart wurden dazu verwendet werden, um die Nachfrage für die Batteriezellenproduktion, welche die beiden Abnehmer in Deutschland planen, im Jahr 2030 zu bedienen. Folglich müssen diese dem jährlichen Lithiumbedarf für diese Produktionsstätten abgezogen werden. Mit dieser Annahme sinkt der jeweilige Lithiumbedarf in den Batteriezellenproduktionsszenarien der beiden Unternehmen entsprechend (Tab. 3.16).

Tabelle 3.16: Neu berechneter Lithiumbedarf für die Unternehmen Stellantis und Volkswagen entsprechend den Abnahmemengen mit der VER (Anhang 3.2, 3.4).

Batteriezellenproduzent	ACC (Stellantis, SAFT, Mercedes, Total)	Volkswagen
Jährliche Mindestabnahmemengen in t LCE	14.256	5.984
Kapazität in S ₁ in GWh	13,4	20
Li-Bedarf in S ₁ in t LCE	7.182	10.719
Nicht gedeckt durch Abnahmevertrag in S ₁	0	4.735
Kapazität in S ₂ und S ₃ in GWh	40	40
Li-Bedarf in S ₂ und S ₃ in t LCE	21.439	21.439
Nicht gedeckt durch Abnahmevertrag in S ₂ und S ₃	7.183	15.455

In der Konsequenz nimmt dadurch auch der Gesamtlithiumbedarf und entsprechend die Gesamtbatteriezellenproduktionskapazität in Deutschland für das Jahr 2030 ab. Der neue Lithiumbedarf beträgt 47.234 t LCE

in S1, 90.947 t LCE in S2 und 153.120 t LCE in S3 (Tab. 3.17). Die neuen Batteriezellenproduktionskapazitäten belaufen sich auf 89 GWh in S1neu, 167,9 GWh in S2neu und 285,7 GWh in S3neu (Tab. 3.18). Die Berechnungen sind im Anhang 3.4 zu finden.

Tabelle 3.17: Neu berechneter Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion 2030 in Deutschland für die drei Batteriezellenproduktionskapazitäten S_{1neu} – S_{3neu} (Anhang 3.4).

Kathoden-kürzel	Spezifische Lithiummenge [kg/kWh]	Marktanteil 2030	Minimum-Szenario S_{1neu} : 88 GWh		Mittleres Szenario S_{2neu} : 169,7 GWh		Maximum-Szenario S_{3neu} : 285,7 GWh	
			Lithium [t]	t LCE	Lithium [t]	t LCE	Lithium [t]	t LCE
NMC 811	0,096	45%	3.807	20.265	7.330	39.020	12.342	65.694
NMC 622	0,104	25%	2.291	12.197	4.412	23.484	7.428	39.538
NCA 5	0,095	12%	1.005	5.348	1.934	10.297	3.257	17.336
HE-NMC	0,123	10%	1.084	5.770	2.087	11.110	3.514	18.705
LFP	0,084	5%	370	1.970	713	3.794	1.200	6.387
NMC 532	0,121	2%	213	1.135	411	2.186	691	3.680
NMC 433	0,117	1%	103	549	199	1.057	334	1.779
Summe		100,0%	8.874	47.234	17.086	90.947	28.766	153.120

Tabelle 3.18: Neu berechnete Batteriezellenproduktionskapazitätswerte S_{1neu} – S_{3neu} (Anhang 3.4).

Batteriezellen-produzent	Mindest-Szenario S_{1neu}		Mittleres-Szenario S_{2neu}		Maximal-Szenario S_{3neu}	
	Kapazität zu Beginn [GWh]	Kapazität zu Beginn - neu [GWh]	Maximale Kapazität [GWh]	Maximale Kapazität - neu [GWh]	Maximale Kapazität [GWh]	Maximale Kapazität - neu [GWh]
ACC	13,4	0,0	40,0	13,5	40,0	13,5
Akasol	1	1	5	5	5	5
Blackstone Resources	0,5	0,5	5	5	5	5
CATL	8	8	14	14	14	14
Cellforce (Porsche)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Gotion	3,5	3,5	18	18	18	18
Leclanché + Eneris Group	0,12	0,12	1	1	1	1
Microvast	0	0	0	0	6	6
Northvolt	60	60	60	60	60	60
Svolt	6	6	24	24	24	24
Tesla	0	0	0	0	100	100
VARTA	0	0	0	0	10	10
Volkswagen	20,0	8,9	40,0	29,1	40,0	29,1
Summe	112,62	88,1	207,1	169,7	323,1	285,7

Die Anpassung der Parameter der Angebots-Nachfragegleichung (4) hat zur Folge, dass die Lithiummengen, die am außereuropäischen Markt nachgefragt werden müssten (5), sich entsprechend verändern. Lithium muss weiterhin auf dem außereuropäischen Markt nachgefragt werden, damit alle Batteriezellenproduktionen im Jahr 2030 in Deutschland realisiert werden können (Abb. 3.7).

Wie im Grundfall sind auch im Praxisfall I1 in S1neu, I10 in S2neu und I19 in S3neu die Szenarien, in denen die nachzufragende Menge vom außereuropäischen Markt jeweils der benötigten Gesamtlithiummenge in S1neu – S3neu entspricht und damit die Eigenversorgungsmöglichkeit bei 0 % liegt. Die ausführliche Szenarienaufstellung ist dem Anhang 3.5 zu entnehmen. Die Szenarien, bei denen am wenigsten Lithium am außereuropäischen Markt nachgefragt werden muss, sind ebenfalls I9 in S1neu, I18 in S2neu und I27 in S3neu (Abb. 3.7):

$$I9 = B(\text{Li})S1\text{neu} - P31 - (R3 * B(\text{Li})S1\text{neu}) = 34.952 \text{ t LCE}$$

(74,0 % vom außereuropäischen Markt, 26,0 % Eigenversorgung),

$$I18 = B(\text{Li})S2\text{neu} - P32 - (R3 * B(\text{Li})S2\text{neu}) = 68.198 \text{ t LCE}$$

(75,0 % vom außereuropäischen Markt, 25,0 % Eigenversorgung),

$$I27 = B(\text{Li})S3\text{neu} - P33 - (R3 * B(\text{Li})S3\text{neu}) = 130.903 \text{ t LCE}$$

(85,5 % vom außereuropäischen Markt, 14,5 % Eigenversorgung).

Auch im Praxisfall unterscheidet sich die Eigenversorgungsquote in jedem Szenario aufgrund der unterschiedlich angenommenen Verfügbarkeit von Primärlithium (Tab. 3.12 – 3.14). Die höchsten Eigenversorgungsquoten liegen zwischen 14,5 % in S3neu und 26,0 % in S1neu.

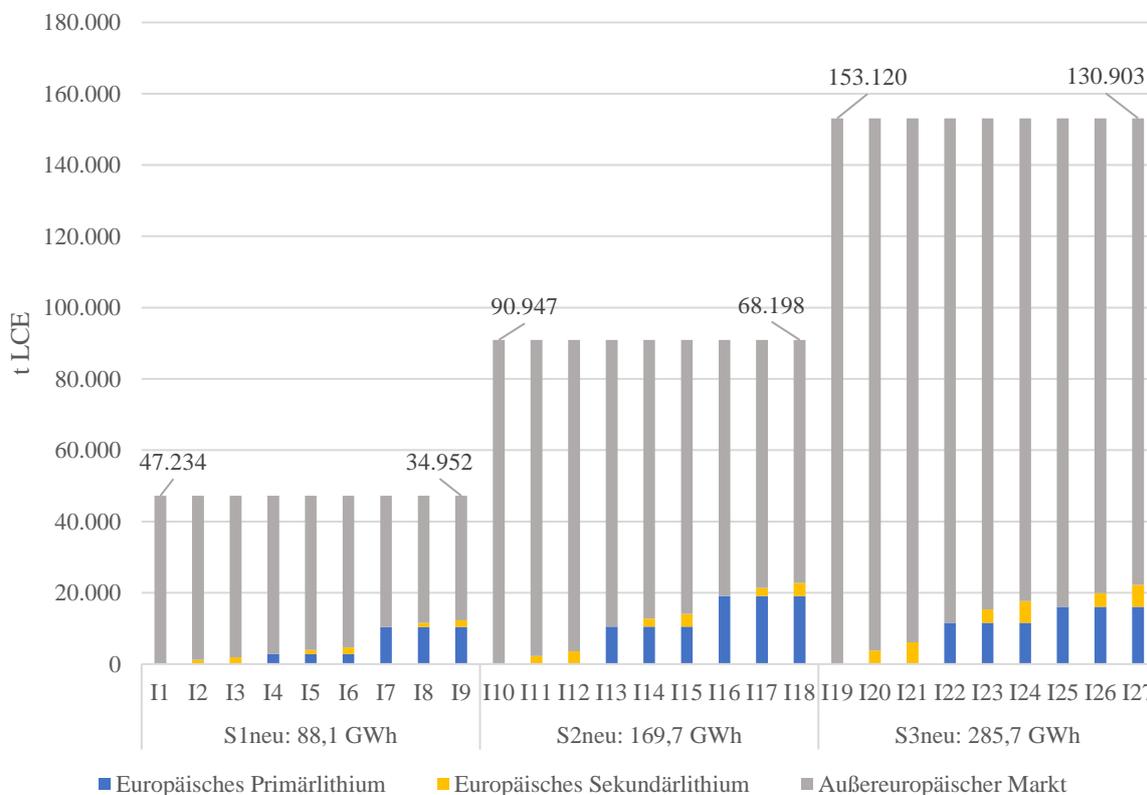


Abbildung 3.7: Lithiumbedarf und Aufteilung der Lithiumnachfragedeckung für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Praxisfall. Das wenigste Lithium vom außereuropäischen Markt muss in den Fällen I₉ (34.952 t LCE) in S_{1neu}, I₁₈ (68.198 t LCE) in S_{2neu} und I₂₇ (130.903 t LCE) in S_{3neu} beschafft werden.

4.4.2 Lithiumbedarfsdeckung für die Batteriezellenproduktion in Europa im Jahr 2030

Für die Berechnung der Lithiumbedarfsdeckung am außereuropäischen Markt für die europäische Batteriezellenproduktion (Tab. 3.5) wird angenommen, dass das Primärlithium aus der EU-27 (Tab. 3.9) komplett zur Verfügung steht und das Angebot an Sekundärlithium auch in diesem Fall bei 0 %, 2,5 % oder 4 % (Tab. 3.15) liegt. Daraus ergeben sich neun Szenarien der Lithiumbedarfsmenge am außereuropäischen Markt (Tab. 3.19, Abb. 3.8). Die Eigenversorgung kann durch das Primär- und Sekundärlithiumangebot aus der EU-27 zwischen 16,2 % (I7) und 34,1 % (I3) liegen.

Tabelle 3.19: Szenarien zur Lithiumbedarfsdeckung für die europäische Batteriezellenproduktion im Jahr 2030.

Batteriezellenproduktionskapazität	Lithiumbedarf [t]	Szenario	Europäisches Primärlithium [t]	Europäisches Sekundärlithium [t]	Bedarf am außereuropäischen Markt [t]	Eigenversorgungsquote
S1: 828,67 GWh	444.145	I1	133.567	0	310.578	30,1 %
		I2	133.567	11.104	299.474	32,6 %
		I3	133.567	17.766	292.812	34,1 %
S2: 1419,40 GWh	760.760	I4	133.567	0	627.193	17,6 %
		I5	133.567	19.019	608.174	20,1 %
		I6	133.567	30.430	596.762	21,6 %
S3: 1535,40 GWh	822.933	I7	133.567	0	689.366	16,2 %
		I8	133.567	20.573	668.792	18,7 %
		I9	133.567	32.917	656.448	20,2 %

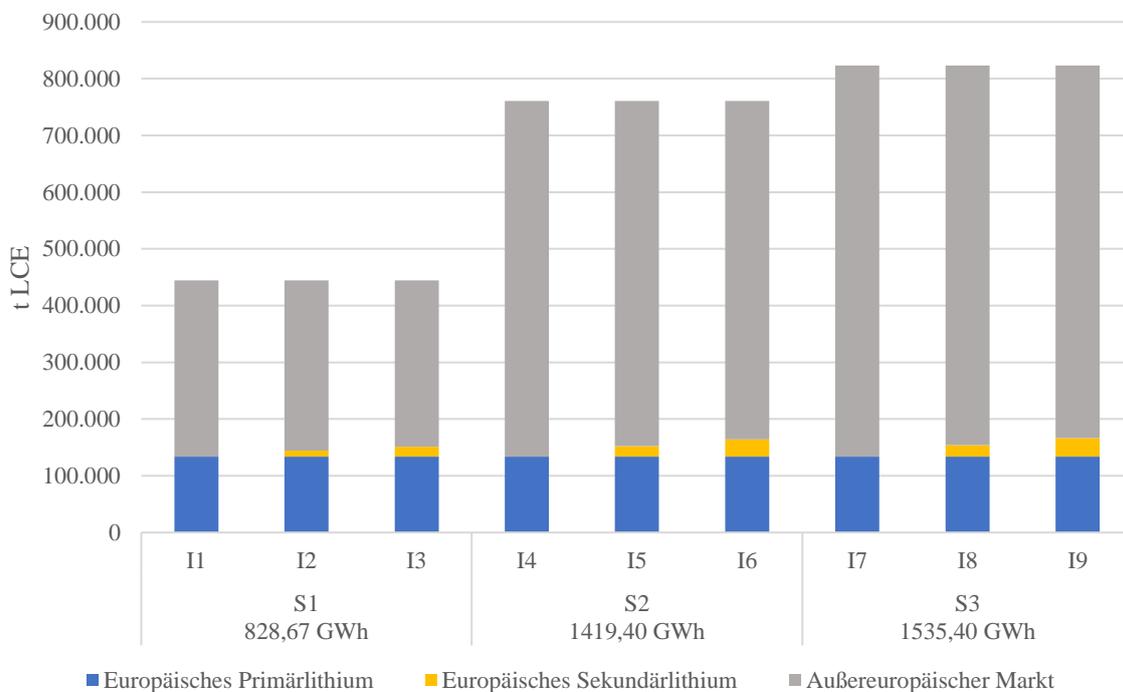


Abbildung 3.8: Eigenversorgung durch europäisches Primär- und Sekundärlithium und Bedarf auf dem außereuropäischen Markt für die europäische Batteriezellenproduktion im Jahr 2030.

4.4.3 Preisannahmen

Lithiumkarbonat und Lithiumhydroxid Monohydrat werden am Referenzmarkt für Spezialchemikalien gehandelt (Schmidt, 2022). In den neunziger Jahren kostete eine Tonne Lithiumkarbonat weniger als 4.000 US\$ (BGR, 2020b). Nachdem die Verwendung von Lithium für Batterien im Jahr 2015 die Verwendung in Keramik und Glas als Hauptendverwendung ablöste und es im Jahr 2016 eine temporäre Verknappung von Australischem Spodumen gab, stieg der Preis für Lithiumkarbonat im Jahr 2016 um 300 % auf über 20.000 US\$/t im Vergleich zum Vorjahr (USGS, 2016, 2017). Im Jahr 2018 fiel der Preis für Lithiumkarbonat aufgrund eines Angebotsüberhangs wieder auf ca. 12.000 US\$/t, um bis zum Jahresende 2019 unter dem Einfluss des Beginns der COVID-19 Pandemie noch unter 10.000 US\$/t zu fallen (Abb. 3.21; USGS, 2016 - 2022). Zu Beginn des Jahres 2021 sank aufgrund eines Angebotsüberhangs nicht nur der Preis für Lithiumkarbonat, sondern auch der für Lithiumhydroxid Monohydrat bis auf ca. 7.000 US\$/t (USGS, 2022). Im Jahr 2021 wurden Lithiumpreisprognosen für das Jahr 2025 für Lithiumhydroxid Monohydrat von ca. 17.000 US\$/t und für Lithiumkarbonat „battery-grade“ von ca. 15.000 US\$/t aufgestellt (Fitch Solutions, 2021). Im November 2021 wurden Preise von 27.400 US\$/t (cif7 North Asia) für Lithiumhydroxid Monohydrat und von 26.200 US\$/t (cif North Asia) für Lithiumkarbonat notiert (USGS, 2022), so dass Ende 2021 Analysten basierend auf der rasch wachsenden Nachfrage bereits für das Jahr 2022 durchschnittliche Preise für Lithiumhydroxid von 20.812 US\$/t und für Lithiumkarbonat von 21.000 US\$/t prognostizierten (Goldinvest, 2021). Die Preissteigerung in 2022, welche zunächst getrieben wurde durch den steigenden Bedarf und dann als Folge des Kriegs Russlands gegen die Ukraine sich weiterentwickelte, lag bis einschließlich August 2022 fast beim Vierfachen des Vorjahres (Tab. 3.19).

Tabelle 3.20: Auflistung verschiedener Preisangaben für Lithiumhydroxid Monohydrat und Lithiumkarbonat im Jahr 2022 (VER, 2022, d, e; Argus Media Group, 2022, 2022a; Schmidt, 2022).

Quelle	Bezugszeitraum	Lithiumhydroxid, min 56.5%, battery grade	Lithiumkarbonat, min 99.5 %, battery grade
VER	Januar 2022	33.000 US\$/t (average from different providers)	
Argus Media Group	29. April 2022	71.500 US\$/t (fob China)	61.000 US\$/t (cif China)
VER	April 2022	80.250 US\$/t (average from different providers)	
DERA	April 2022	ca. 71.812 US\$/t	ca. 71.340 US\$/t
DERA	Mai 2022	ca. 69.250 US\$/t	ca. 68.625 US\$/t
VER	Juli 2022	75.000 US\$/t (spot price, cif China, Japan, Korea)	
Argus Media Group	12. August 2022	78.500 US\$/t (fob China)	61.500 US\$/t (cif China)

Nach Prognosen von Fitch Solutions vom August 2022 könnte für das Jahr 2023 der Preis von Lithiumhydroxid Monohydrat 56.000 US\$/t und für Lithiumkarbonat (99,5 %) 55.000 US\$/t betragen (Goldinvest, 2022).

⁷ Incoterm: International Commercial Terms, von der internationalen Handelsorganisation festgelegte internationale Logistikstandards. cif = cost, insurance and freight; fob = free on board.

Preisprognosen auf dynamischen Rohstoffmärkten erfordern die Einbeziehung zahlreicher Faktoren (Maxwell, 2015; Martin et al., 2017). Für die Berechnung der monetären Größe der notwendigen Lithiumnachfrage auf dem außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 werden drei vereinfachte Preisszenarien angenommen. Es wird im ersten Preisszenario K1 ein Preisumfeld, was den Preisen vom November 2021, vor dem Ausbruch des Russland-Ukraine-Kriegs, entspricht (USGS, 2022), angenommen. Es stellt das niedrigste Preisumfeld der drei Annahmen dar, da es zwischen August 2022 und dem Jahr 2030 weitere marktwirtschaftliche Veränderungen geben kann. Dazu zählen ein (unerwarteter) weiterer Angebotsüberhang, der den Preis nicht weiter steigend oder wieder fallen lassen könnte. Im zweiten Preisszenario K2 wird ein Preisumfeld, welches den Vorhersagen aus August 2022 für 2023 entspricht (Goldinvest, 2022), angenommen. Für das dritte Preisszenario K3 wird ein Preisumfeld, entsprechend den tatsächlichen Preisen am Markt vom August 2022 (Argus Media Group, 2022a), angenommen (Tab. 3.20). Internationale Logistikstandards werden außenvorgelassen. Abbildung 3.9 stellt die Preisentwicklung von Lithiumkarbonat und die angenommenen Preise für das Jahr 2030 dar.

Tabella 3.21: Preisszenarien für die monetäre Bewertung der notwendigen Lithiumnachfrage auf dem außereuropäischen Markt (USGS, 2022; Goldinvest, 2022; Argus Media Group, 2022a).

Preisszenario	Lithiumhydroxid Monohydrat, battery grade	Lithiumkarbonat, battery grade	Bezugszeitraum
Preisszenario K ₁	27.400	26.200	Preisniveau November 2021
Preisszenario K ₂	56.000	55.000	Prognose für 2023
Preisszenario K ₃	78.500	61.500	Preisniveau August 2022

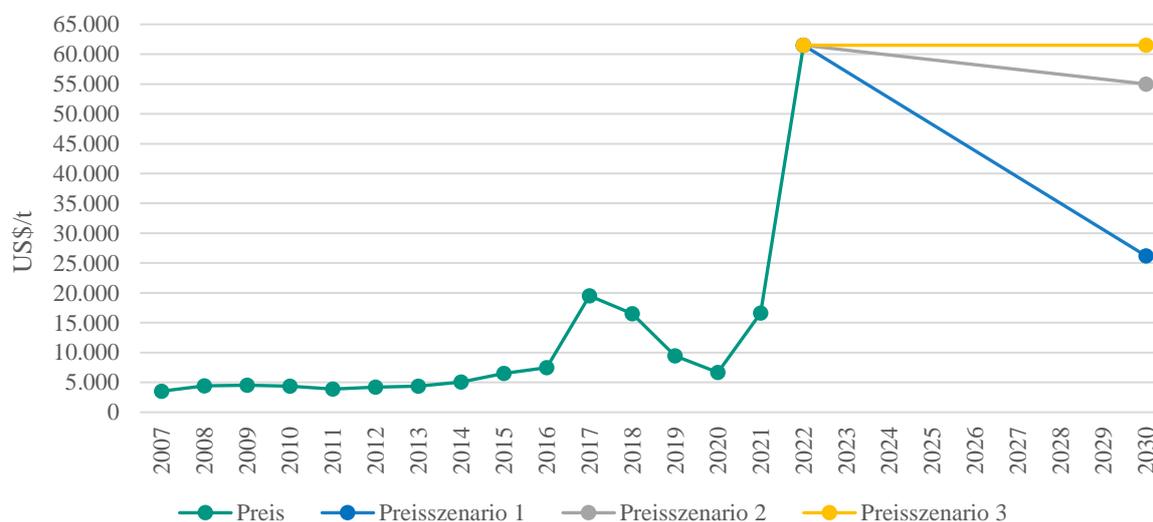


Abbildung 3.9: Preisentwicklung von Lithiumkarbonat (für die Jahre 1991 bis 2002 und 2017 bis 2021: USGS, 1991 – 2022; für die Jahre 2003 bis 2016: Metalary, 2022) und Prognose (aus Tab. 3.20) für das Jahr 2030.

Des Weiteren wird für die Elektrodenproduktion ein Marktverhältnis von 63,4 % der Menge Lithiumhydroxid Monohydrat (min. 56,5 %, battery grade) und 36,6 % der Menge Lithiumkarbonat (min. 99,5 %, battery grade) angenommen. Dieses Marktverhältnis wurde auf Basis von zwei Angaben zur Verwendung der Lithiumchemikalien in den Kathoden aus in der Literatur berechnet. Kelly et al. (2021) beschreiben, dass für die Kathode

NMC811 typischerweise Lithiumhydroxid Monohydrat und für eine NMC622 Lithiumkarbonat verwendet wird. Skaliert man die prognostizierten Marktanteile einer NMC811 (45 %) und einer NMC622 (25 %) für das Jahr 2030 (Tab. 3.6, Marscheider-Weidemann et al. 2021), die in dieser Studie verwendet werden, hoch, ergibt dies ein Lithiumhydroxid Monohydrat zu Lithiumkarbonat Verhältnis von 64,3 % zu 35,7 %. Gielen und Lyons (2022) beschreiben ein aktuelles Marktverhältnis von 62,5 % Lithiumhydroxid Monohydrat und 37,5 % Lithiumkarbonat. Der Durchschnitt aus dem berechneten und veröffentlichten Marktverhältnis ergibt 63,4 % für Lithiumhydroxid Monohydrat und 36,6 % für Lithiumkarbonat. Die Kosten der nachzufragenden Mengen an Lithiumhydroxid Monohydrat und Lithiumkarbonat am außereuropäischen Markt liegen bei dem angenommenen Marktverhältnis von 63,4 % und 36,6 % im Grundfall zwischen 1.183 Mio.US\$ in K1 und 11.482 Mio.US\$ in K3, im Praxisfall zwischen 869 Mio.US\$ in K1 und 10.153 Mio.US\$ in K3. Die Kosten für die Beschaffung auf dem außereuropäischen Markt für den gesamten europäischen Bedarf liegen zwischen 7.284 Mio.US\$ in K1 und 45.709 Mio.US\$ in K3 (Tab. 3.22).

Tabelle 3.22: Kosten des Lithiumbedarfs am außereuropäischen Markt für den Grundfall, den Praxisfall und Europa in den Szenarien mit dem minimalen und dem maximalen Bedarf am außereuropäischen Markt.

Importszenario, in Mio. US\$	Minimaler Bedarf			Maximaler Bedarf		
	I ₉ Grundfall	I ₉ Praxisfall	I ₃ Europa	I ₁₉ Grundfall	I ₁₉ Praxisfall	I ₇ Europa
Kosten in K ₁	1.183	869	7.284	4.308	3.809	17.149
Kosten in K ₂	2.443	1.796	15.043	8.897	7.866	35.415
Kosten in K ₃	3.153	2.318	19.415	11.482	10.153	45.709

4.4.4 Sensitivitätsanalyse

Reduktion des Lithiumverbrauchs

Basierend auf vergangenen und prognostizierten Mengen- und Prozentangaben aus der Literatur werden die Raten der Lithiumreduktion in den Kathodentechnologien bestimmt. Zunächst wird durch einen Vergleich der in dieser Studie verwendeten Mengenangaben (kg/kWh) zum Lithiumverbrauch in den verschiedenen Kathodentechnologien (Marscheider-Weidemann et al., 2021) mit den Mengenangaben (kg/kWh) der IEA (2018) die Reduktion des Lithiumverbrauchs innerhalb von drei Jahren berechnet (Tab. 3.23). Des Weiteren wird die Studie „Minerals for Climate Action“ der Weltbank (Nguyen, 2020) herangezogen. Die Weltbank gibt eine Effizienzsteigerung im Lithiumverbrauch bis zum Jahr 2050 von 23 % an (Nguyen, 2020, S. 64). Nimmt man vereinfacht eine lineare Steigerungsrate zwischen dem Jahr 2020 und 2050 für die Effizienzangaben der Weltbank an, so kann für das Jahr 2030 eine Effizienzsteigerung mit einer Reduktion des Lithiumverbrauchs in den Kathodentechnologien von ca. 8 % kalkuliert werden. Diese Annahme stützt die Annahme, dass es keine Effizienzsteigerung im zweistelligen Bereich bis 2030 im Lithiumverbrauch geben wird. Daher wird beim Vergleich der Zahlen der IEA (2018) mit denen von Marscheider-Weidemann et al. (2021) der geringste Effizienzsteigerungsprozentsatz von 5 % herangezogen. Die Sensitivität „Reduktion des Lithiumverbrauchs“ wird daher für den Grundfall, den Praxisfall und Europa mit 5 % und 8 % untersucht.

Tabelle 3.23: Berechnung der Effizienzsteigerungsraten für den Lithiumverbrauch in unterschiedlichen Kathodentechnologien im Jahr 2030 (Marscheider-Weidemann et al., 2021; IEA, 2018; Nguyen, 2020).

Kürzel	Spezifische Li-Menge [kg/kWh] (Marscheider-Weidemann et al., 2021)	Spezifische Li-Menge [kg/kWh] IEA (2018)	Effizienzsteigerung zwischen 2018 und 2021 [%]	23%ige Effizienzsteigerung bis 2050 [Li/kWh] (Nguyen, 2020)	Min. Effizienzsteigerung mit 5 % bis 2030 = Sensitivität 1 [Li/kWh]	Max. Effizienzsteigerung mit 8 % bis 2030 = Sensitivität 2 [Li/kWh]
NMC 811	0,096	0,110	13%	0,074	0,091	0,088
NMC 622	0,104	0,130	20%	0,080	0,099	0,096
NCA 5	0,095	0,100	5%	0,073	0,090	0,087
HE-NMC	0,123	k.A.	k.A.	0,095	0,117	0,113
LFP	0,084	0,100	16%	0,065	0,080	0,077
NMC 532	0,121	0,140	14%	0,093	0,115	0,111
NMC 433	0,117	0,140	16%	0,090	0,111	0,108
Durchschnitt	0,106	0,120	14%	0,081	0,100	0,097

Grundfall

Bei einer Effizienzsteigerung mit einer Reduktion von 5 % des Lithiumverbrauchs für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 bei gleichbleibendem Angebot an europäischem Primärlithium verringert sich die Lithiummenge, die am außereuropäischen Markt im Grundfall nachgefragt werden muss, zwischen 5 % (in I1, I10 und I19) und maximal 6,1 % in I9, bei einer Reduktion des Lithiumverbrauchs um 8 % zwischen 8 % (in I1, I10 und I19) und maximal 9,7 % in I9 (Abb. 3.10). Die Eigenversorgungsquote kann bei einer Reduktion des Lithiumverbrauchs von 5 % von maximal 21,2 % um 0,9 %-Punkte auf 22,1 % in I9 erhöht werden, bei einer Reduktion des Lithiumverbrauchs von 8 % um 1,5 %-Punkte auf 22,7 % in I9.

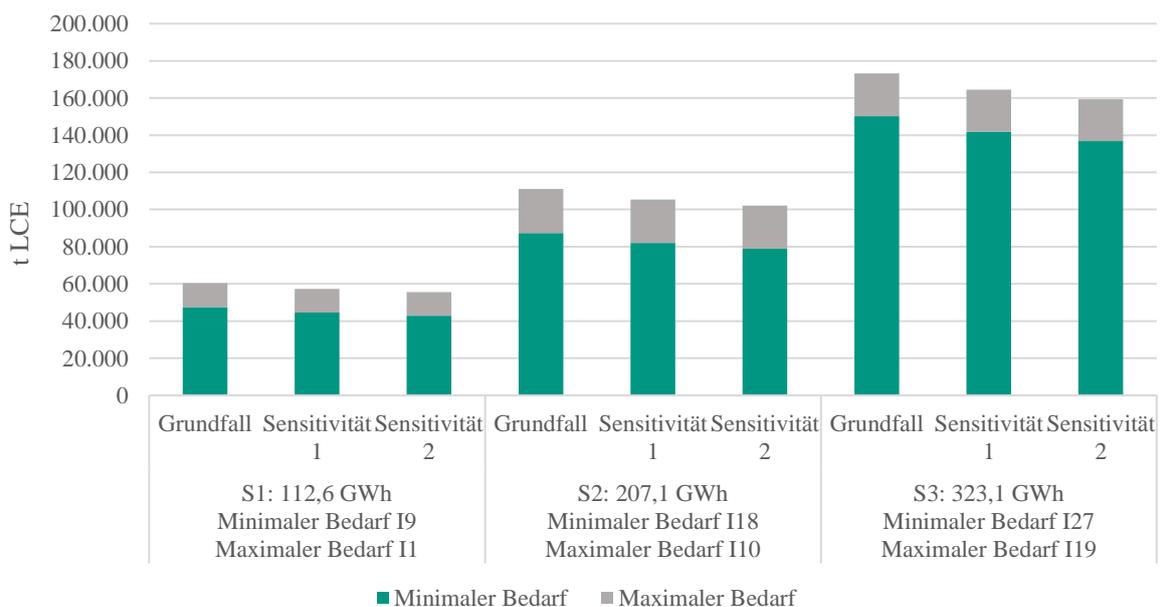


Abbildung 3.10: Durch Effizienzsteigerung mit einer Reduktion des Lithiumverbrauchs (-5 % und -8 %) reduzierte Lithiumbedarfsmenge am außereuropäischen Markt für den Grundfall in den Szenarien des minimalen (I9, I18, I27) und maximalen Bedarfs (I1, I10, I19). Reduktionen für alle 27 Szenarien sind dem Anhang 3.6 zu entnehmen.

Praxisfall

Bei einer Effizienzsteigerung mit einer Reduktion von 5 % des Lithiumverbrauchs für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 aber gleichbleibendem Angebot an europäischem Primärlithium verringert sich die Lithiummenge, die am außereuropäischen Markt im Praxisfall nachgefragt werden muss zwischen 5 % (in I1, I10 und I19) und maximal 6,5 % in I9, bei einer Effizienzsteigerung mit einer Reduktion des Lithiumverbrauchs um 8 % (in I1, I10 und I19) zwischen 8 % und maximal 10,4 % in I9 (Abb. 3.11). Die Eigenversorgungsquote kann bei einer Reduktion des Lithiumverbrauchs von 5 % von maximal 26,0 % um 1,2 %-Punkte auf 27,2 % erhöht werden, bei einer Reduktion des Lithiumverbrauchs von 8 % um 1,9 %-Punkte auf 27,9 %.

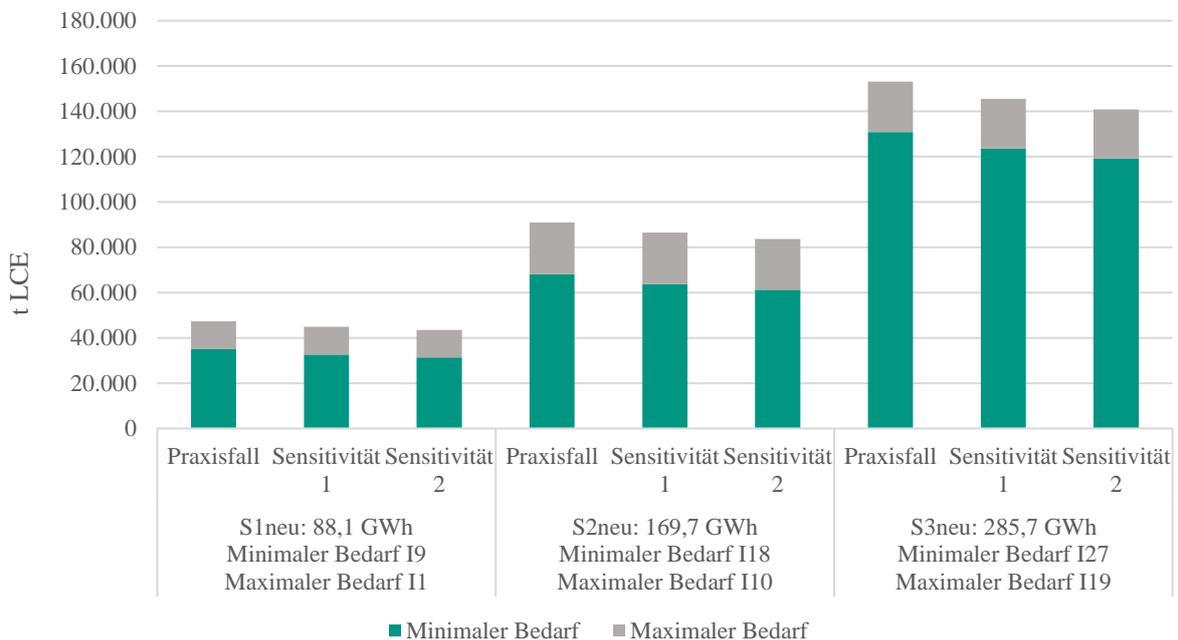


Abbildung 3.11: Durch Effizienzsteigerung mit einer Reduktion des Lithiumverbrauchs (-5 % und -8 %) reduzierte Lithiumbedarfsmenge am außereuropäischen Markt für den Praxisfall in den Szenarien des minimalen (I₉, I₁₈, I₂₇) und maximalen Bedarfs (I₁, I₁₀, I₁₉). Reduktionen für alle 27 Szenarien sind dem Anhang 3.7 zu entnehmen.

Europa

Bei einer Effizienzsteigerung mit einer Reduktion von 5 % des Lithiumverbrauchs für die Batteriezellenproduktion in Europa im Jahr 2030 aber gleichbleibendem Angebot an europäischem Primärlithium verringert sich die Lithiummenge, die am außereuropäischen Markt nachgefragt werden muss zwischen 6 % und 7,3 %, von 689.366 t LCE auf 648.219 t LCE in I7 (maximaler Bedarf) und von 292.812 t LCE auf 271.493 t LCE in I3 (minimaler Bedarf), bei einer Reduktion des Lithiumverbrauchs um 8 % zwischen 9,6 % und maximal 11,6 % von 689.366 t LCE auf 623.531 t LCE in I7 und von 292.812 t LCE auf 258.701 t LCE in I3 (Abb. 3.12). Die Eigenversorgungsquote kann bei einer Reduktion des Lithiumverbrauchs von 5 % von maximal 34,1 % um 1,6 %-Punkte auf maximal 35,7 % in I3 erhöht werden, bei einer Reduktion des Lithiumverbrauchs von 8 % um 2,6 %-Punkte auf maximal 36,7 % in I3.

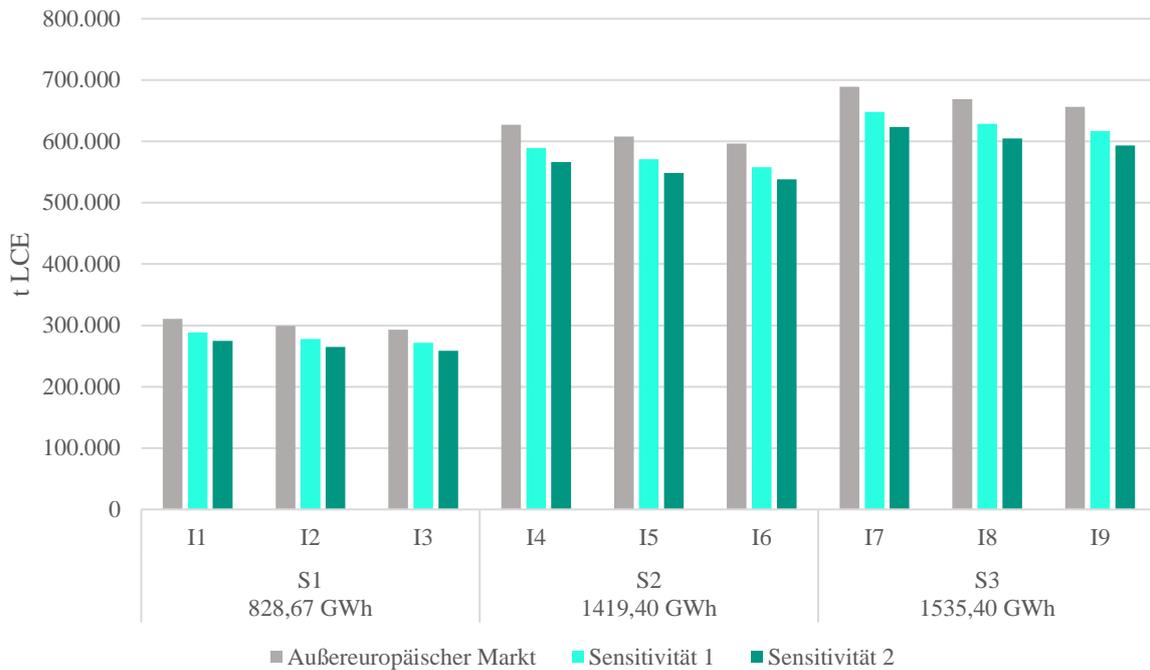


Abbildung 3.12: Durch Effizienzsteigerung mit einer Reduktion des Lithiumverbrauchs (-5 % und -8 %) reduzierte Lithiumbedarfsmenge am außereuropäischen Markt für Europa.

Reduktion des Lithiumverbrauchs und Effizienzsteigerungen im Recycling

In der dritten Sensitivitätsberechnung wird zusätzlich zur Effizienzsteigerung mit einer Reduktion von 8 % im Lithiumverbrauch die Annahme getroffen, dass die EOL-RR sich erhöht und dadurch auch die EOL-RIR. Die Annahme, dass kein europäisches Sekundärlithium zur Verfügung stehen wird, wird ausgeschlossen. Stattdessen wird für R1 die Sekundärlithiumrate von 2,5 % (zuvor R2, mit einer CR von 70 % und einer EOL-RR von 25 %) angenommen und für R2 4,0 % (zuvor R3, mit einer CR von 70 % und einer EOL-RR von 70 %). Als R3 wird nun die Angabe der DERA für den maximalen Beitrag an Sekundärlithium für die Batteriezellenproduktion in Europa von 10,6 % (EOL-RIR), bei einer CR von 70 % und einer EOL-RR von 75 %, herangezogen (vgl. Schmidt, 2022) (Tab. 3.24).

Tabelle 3.24: Recyclingszenarien der Sensitivitätsanalyse.

Recycling-szenario	Batteriezellen-produktionskapazitäten	EOL-RIR	Erläuterung
R ₁	S ₁	2,5 %	Die europaweite CR beträgt 70 %. Bei einer EOL-RR von 25 % beträgt die EOL-RIR 2,5 % (Schmidt, 2022).
	S ₂		
	S ₃		
R ₂	S ₁	4,0 %	Die europaweite CR beträgt 70 %. Bei einer EOL-RR von 70 % beträgt die EOL-RIR 4,0 % (vgl. Europäischen Kommission, 2020)
	S ₂		
	S ₃		
R ₃	S ₁	10,6 %	Die europaweite CR beträgt 70 %. Bei einer EOL-RR von 75 % beträgt die EOL-RIR 10,6 % (Schmidt, 2022).
	S ₂		
	S ₃		

Grundfall

Bei einer Effizienzsteigerung mit einer Reduktion von 8 % des Lithiumverbrauchs für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030, gleichbleibendem Angebot an europäischem Primärlithium und Erhöhung des Sekundärlithiumangebots verringert sich die Lithiummenge, die am außereuropäischen Markt im Grundfall nachgefragt werden muss zwischen 9,4 % (in I2 und I20) und maximal 17,5 % (in I9 und I18). Die minimale Menge, die am außereuropäischen Markt nachgefragt werden muss beläuft sich in I9 auf 39.253 t LCE statt 47.554 t LCE und maximal in I19 auf 155.336 t LCE statt 173.173 t LCE im Grundfall (Abb. 3.13). Die Eigenversorgungsquote kann von maximal 21,2 % um 8,1 %-Punkte auf 29,3 % in I9 erhöht werden.

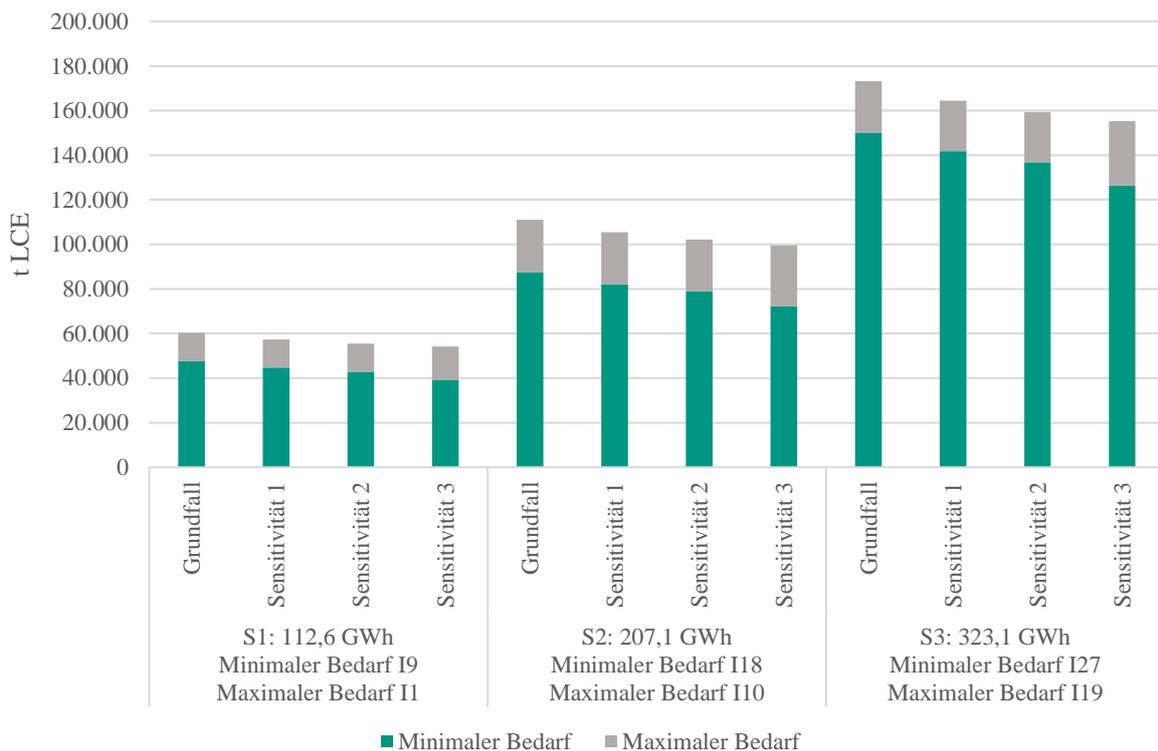


Abbildung 3.13: Reduzierte Lithiumbedarfsmenge am außereuropäischen Markt in den Szenarien des minimalen (I_9 , I_{18} , I_{27}) und maximalen Bedarfs (I_1 , I_{10} , I_{19}) für den Grundfall, Sensitivität 1, 2 und 3 im Vergleich.

Praxisfall

Bei einer Effizienzsteigerung mit einer Reduktion von 8 % des Lithiumverbrauchs für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030, gleichbleibendem Angebot an europäischem Primärlithium und Erhöhung des Sekundärlithiumangebots verringert sich die Lithiummenge, die am außereuropäischen Markt im Praxisfall nachgefragt werden muss zwischen 9,4 % (in I2 und I20) und maximal 18,6 % (in I9). Die minimale Menge, die am außereuropäischen Markt nachgefragt werden muss, beläuft sich in I9 auf 28.457 t LCE statt 47.554 t LCE und maximal in I19 auf 137.348 t LCE statt 173.173 t LCE im Grundfall (Abb. 3.14). Die Eigenversorgungsquote kann von maximal 21,2 % um 8,5 %-Punkte auf 34,5 % in I9 erhöht werden.

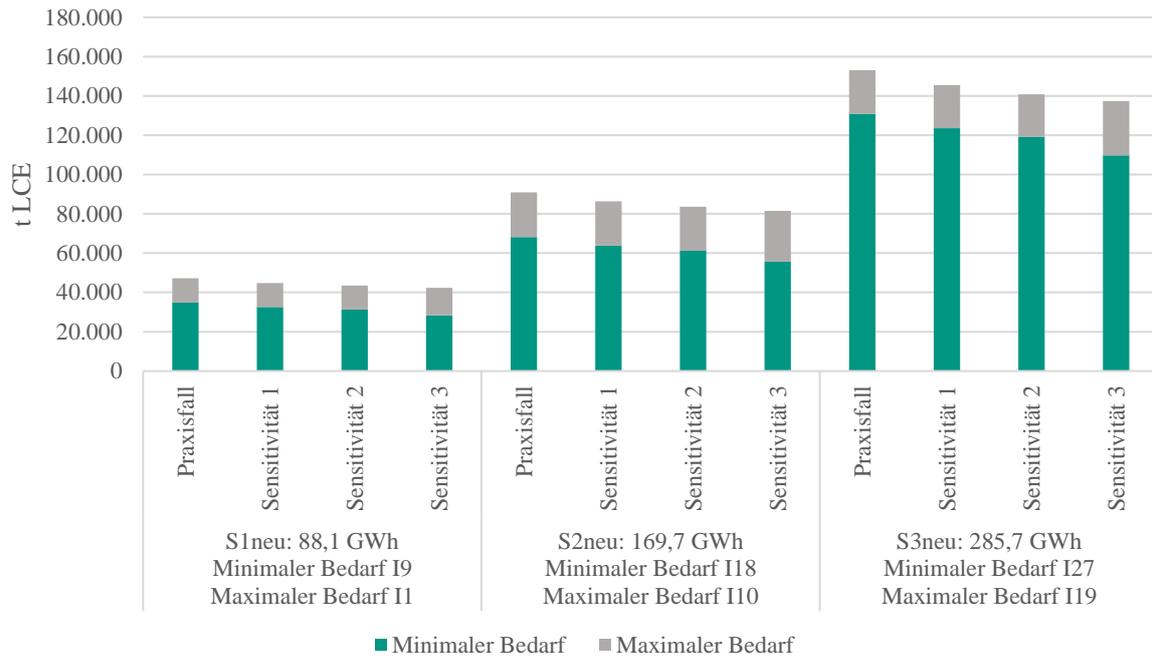


Abbildung 3.14: Reduzierte Lithiumbedarfsmenge am außereuropäischen Markt in den Szenarien des minimalen (I9, I18, I27) und maximalen Bedarfs (I1, I10, I19) für den Praxisfall, Sensitivität 1,2 und 3 im Vergleich.

Kostenreduktionen im Grund- und Praxisfall

Durch eine Reduktion des Lithiumverbrauchs um 8 % und einer Erhöhung der EOL-RIR auf 10,6 % können die Kosten der Beschaffung am außereuropäischen Markt reduziert werden. Im Grundfall können die geringsten Kosten von 1.183 Mio. EUR auf 976 Mio. EUR (I9, K1), die höchsten Kosten von 11.482 Mio. EUR auf 10.300 Mio. EUR reduziert werden (Tab. 3.25).

Tabelle 3.25: Kostenaufstellung im Grund- und Praxisfall jeweils im Vergleich mit der dritten Sensitivität des minimalen (I9, I18, I10) und maximalen Bedarfs (I1, I10, I19).

Mio. US\$		S1 bzw. S1neu		S2 bzw. S2 neu		S3 bzw. S3 neu	
		I9	I1	I18	I10	I27	I19
K1	Grundfall	1.183	1.502	2.175	2.761	3.735	4.308
	Grundfall Sensitivität 3	976	1.347	1.796	2.477	3.143	3.864
	Praxisfall	869	1.175	1.697	2.262	3.256	3.809
	Praxisfall Sensitivität 3	708	1.054	1.385	2.029	2.733	3.417
K2	Grundfall	2.443	3.101	4.493	5.703	7.714	8.897
	Grundfall Sensitivität 3	2.017	2.782	3.708	5.115	6.491	7.980
	Praxisfall	1.796	2.427	3.504	4.672	6.725	7.866
	Praxisfall Sensitivität 3	1.462	2.177	2.861	4.191	5.643	7.056
K3	Grundfall	3.153	4.002	5.798	7.360	9.956	11.482
	Grundfall Sensitivität 3	2.603	3.590	4.786	6.602	8.377	10.300
	Praxisfall	2.318	3.132	4.522	6.030	8.680	10.153
	Praxisfall Sensitivität 3	1.887	2.809	3.693	5.409	7.283	9.107

Europa

Bei einer Reduktion von 8 % des Lithiumverbrauchs für die Batteriezellenproduktion in Europa im Jahr 2030, gleichbleibendem Angebot an europäischem Primärlithium und Erhöhung des Sekundärlithiumangebots verringert sich die Lithiummenge, die am außereuropäischen Markt nachgefragt werden muss zwischen 11,3 % (in I8) und maximal 20,9 % (in I3). Die minimale Menge, die am außereuropäischen Markt nachgefragt werden muss, liegt bei 231.733t LCE statt 292.812 t LCE in I3 und die maximale bei 604.604t LCE statt 689.366t LCE in I7 (Abb. 3.15). Die Eigenversorgungsquote kann von maximal 34,1 % um 9,2 %-Punkte auf 43,3 % in I3 erhöht werden.

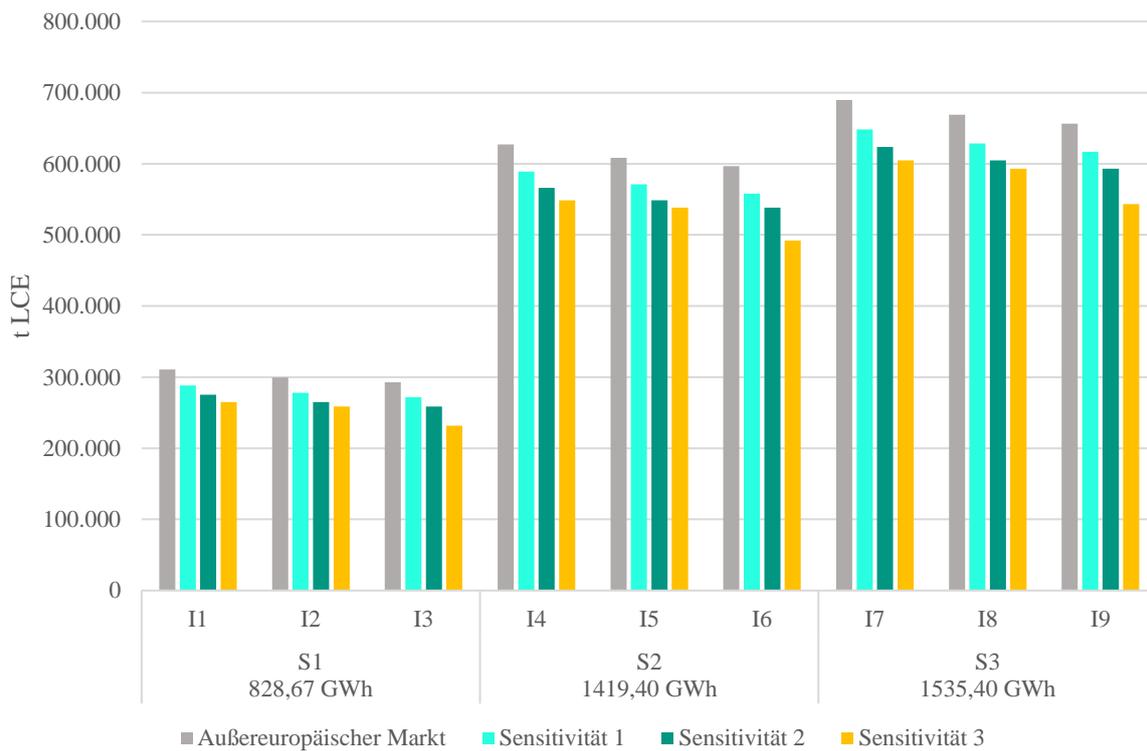


Abbildung 3.15: Durch Effizienzsteigerung mit einer Reduktion des Lithiumverbrauchs (-8 %) und Erhöhung des Sekundärlithiums reduzierte Lithiumbedarfsmenge am außereuropäischen Markt für Europa im Vergleich die Grundannahme und die Sensitivitäten 1-3.

5. Diskussion

5.1 Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa im Jahr 2030

Die deutsche Batteriezellenproduktion für das Jahr 2030 wird auf 80 GWh – 270 GWh prognostiziert (DERA, 2021). Das BMWi (neue Legislaturperiode: BMWK) geht von einer sich etablierenden, inländischen Batteriezellenproduktionskapazität von mehr als 180 GWh aus (BMW, 2021). In der vorliegenden Studie wurde die Batteriezellenproduktionskapazität in Deutschland im Jahr 2030 mittels Recherchen mit 112,62 GWh (S1), 207,1 GWh (S2) und 323,1 GWh (S3) kalkuliert. Der Unterschied kann in der Einbeziehung von drei Batteriezellenproduktionsstandorten, welche noch nicht durch die jeweiligen Unternehmen genau spezifiziert wurden (Tab. 3.3), begründet werden. Außerdem stellt sich bei der Recherche zu den Kapazitäten der Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa für die kommenden Jahre bis 2030 heraus, dass eine genaue Marktabbildung kontinuierlich angepasst werden muss, da Kapazitäts- und Technologieangaben wie auch die beteiligten Produzenten sich fortwährend ändern. Ein Beispiel ist der Widerruf der angekündigten Batteriezellenproduktionsstätte in Bitterfeld-Wolfen von Farasis, einem Produzenten mit Hauptsitz in China (dpa, 2022). Es verbleiben damit drei Produzenten bzw. 17,3 % der Gesamtbatteriezellenproduktionskapazität 2030 in Deutschland unter direkter chinesischer Führung. Laut Fraunhofer ISI sind etwa die Hälfte der geplanten europäischen Batteriezellenproduktionen (250 GWh – 300 GWh) von asiatischen Produzenten geplant (Stand 2020; Thielmann et al., 2020). Die Recherche für die vorliegende Studie ergibt, dass elf Produktionsstandorte in Europa direkt von asiatischen Produzenten errichtet werden, was im Mindest-Szenario ca. 193 GWh (ca. 23 %) und im Maximal-Szenario ca. 347 GWh (ca. 23 %) sind (Stand Juli 2022, Anhang 3.1). Da bislang weder eine etablierte Elektrodenproduktion noch eine Batteriezellenproduktion in Europa existiert und bis 2025 lediglich 4 % der weltweit nachgefragten Kathoden und 2 % der Anoden in Europa produziert werden sollen (IEA, 2022), sind Verträge mit Produzenten aus Asien weiterhin unerlässlich für den wachsenden europäischen E-Fahrzeugabsatzmarkt. Außer mit LG Chemicals und Samsung (Südkorea) haben große deutsche und europäische Autobauer auch mit CATL aus China Langzeitlieferverträge für Batteriezellen geschlossen (Bridge & Faigen, 2022).

Europa und Deutschland wollen ihren Marktanteil zumindest an der globalen Batteriezellenproduktion bis zum Jahr 2030 auf 30 % erhöhen und gleichzeitig eine geschlossene Wertschöpfungskette etablieren, die von der Förderung der Rohstoffe bis hin zum Recycling reicht (cradle to cradle) (BMW, 2021). Unterstützt werden Unternehmen und Forschung durch Fördergelder wie bspw. im Rahmen der IPCEI-Förderprogramme (Important Projects of Common European Interest), auch europäische Allianzen wie die EBA (European Battery Alliance) oder ERMA (European Raw Material Alliance) sollen eine Plattform für den Austausch und die strategische Zusammenarbeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette sein, um Deutschland und Europa wettbewerbsfähig und autarker für den Batterie-Weltmarkt aufzustellen. Dies legte die EU Kommission u.a. in der Aktualisierung ihrer Industriestrategie und im Aktionsplan für kritische Rohstoffe fest (EU Kom-

mission, 2020b, 2020a). Auch das EIT (European Institute of Innovation Technology) mit seiner Unterorganisation RawMaterials, welche die ERMA koordiniert und aus dem Förderprogramm Horizon Europe entstanden ist, hat u.a. zum Ziel, die Konkurrenzfähigkeit Europas in Bezug auf Rohstoffsicherung interdisziplinär und intereuropäisch zu stärken.

Für die Umsetzung der Verkehrswende, welche dazu beitragen soll, dass die Klimaziele des EU Green Deal erreichbar werden, sowie dem Ziel der aktuellen Bundesregierung im Jahr 2030 „15 Mio. vollelektrische PKWs“ in Deutschland zugelassen zu haben, sind LIBs für den Ausbau eines elektrischen Fuhrparks der EU-27 aus heutiger Sicht essentiell. Um sich unabhängiger vom derzeitigen asiatischen Anbietermarkt machen zu können, bedarf es dem Auf- und Ausbau der Batteriezellenproduktionskapazitäten sowie der nach- wie auch vorgelagerten Industrien.

5.2 Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa im Jahr 2030

Die vorliegende Studie sagt einen Bedarf an Lithiumchemikalien für die Batteriezellenproduktion im Jahr 2030 in Deutschland in Höhe von ca. 60,4 kt LCE in S1, 111,0 kt LCE in S2 und 173,2 t LCE in S38 voraus. Damit liegt der Bedarf zwischen ca. 11,3 % und 32,5 % der globalen Lithiumproduktion aus dem Jahr 2021 (ca. 532,3 kt LCE, USGS, 2022). Der aktuelle Bedarf für die bereits bestehende Batteriezellenproduktion des Unternehmens Akasol in Darmstadt liegt bei 0,5 % der globalen Lithiumproduktion (Batteriezellenproduktionskapazität: 5 GWh, Lithiumbedarf: 2,7 kt LCE). Zieht man die Aktualisierung der Lithium-Studie der DERA heran (Schmidt, 2022), entsprechen die in der vorliegenden Studie kalkulierten, notwendigen Lithiummengen für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 zwischen ca. 15,6 % und 44,9 % der prognostizierten, benötigten Lithiummengen für die E-Mobilität 2030 in Europa (386 kt LCE; Schmidt, 2022).

Der berechnete europäische Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion liegt in der vorliegenden Studie bereits im Mindest-Szenario S1 (ca. 444,1 kt LCE) ca. 58,2 kt LCE über den Bedarfsangaben für Europa der DERA für BEV (ca. 385,9 kt LCE, Schmidt, 2022) und 144,1 kt LCE über den Werten (max. 300 kt LCE) von Gregoir und van Acker (2022). Die Unterschiede können mit einer unterschiedlichen Datengrundlage begründet werden. Nach Angaben der DERA (pers. Kom. vom 28.07.2022) wurden für die Aktualisierung der Lithiumstudie nicht die Angaben zur Lithiummenge in den Kathodentechnologien aus dem Bericht „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“ (Marscheider-Weidemann et al., 2021), der in der vorliegenden Studie herangezogen wurden, verwendet, sondern neuere, noch nicht veröffentlichte Zahlen. Hinzu kommt, dass es weder für die globale noch europäische oder deutsche Batteriezellenproduktion eine allgemein gültige Datenbank gibt. Die Kapazitätsangaben beruhen auf eigenen Recherchen, die durch die Dynamik des Marktes je nach Zeitpunkt der Datenerhebung abweichen können. Schmidt (2022) nimmt für seine Szenarien eine Kapazität von 1000 GWh an. Die Studie von Gregoir und van Acker (2022) nimmt eine durchschnittliche Batteriekapazität

⁸ Für den Praxisfall ergab sich durch Abzug der bereits abgesicherten Mengen von VW und Stellantis ein geringerer Bedarf. Jedoch soll in diesem Abschnitt ausschließlich der absolute Bedarf für die Batteriezellenproduktion in Deutschland diskutiert werden.

von 60 kWh an, so dass 3 bis 7 Mio. elektrische Fahrzeuge (300 – 420 GWh) im Jahr 2030 in Europa produziert werden könnten. Folglich liegt die Batteriezellenproduktionskapazität unterhalb der für die vorliegende Studie angenommenen für Europa (828,67 – 1535,4 GWh). Die Studie von Gregoir und van Acker (2022) gibt keine Auskunft darüber, wie hoch die Lithiummenge in den Kathoden für die Berechnung ist. Folglich kann keine Aussage über die Abweichung zu den Lithiummengenangaben, die in der vorliegenden Studie verwendet wurden, getätigt werden und auch keine Einschätzung gegeben werden, wenn eine Abweichung bestünde, welche mehr dem neusten Stand der Technik entspricht. Es kann vermutet werden, da die Mengenangaben zu Lithium (und den anderen notwendigen Batteriemetallen) allgemein nicht einfach frei zugänglich sind, um wirtschaftliche, vor allem wettbewerbsbedingte, Interessen der Industrie zu wahren, dass berechnete Lithiumbedarfe vielmehr eine Größenordnung als eine exakte Angabe darstellen.

Wie in der Sensitivitätsanalyse gezeigt, könnte der Lithiumverbrauch in den Kathoden durch weitere Fortschritte in der Elektroden- und Batterieforschung in den kommenden Jahren nochmals gesenkt werden, allerdings sieht bspw. die IEA trotz technologischer Innovationen einen steigenden Verbrauch, da die angestrebte längere Reichweite von BEV eine höhere Batteriekapazität verlangt (IEA, 2022). Der Materialeinsatz und -verbrauch in Elektroden hängt u.a. von den gewünschten Eigenschaften der Kathoden ab. So sind neben der Energiedichte auch die elektrochemische und thermische Stabilität, die Leitfähigkeit und die Kosten für die Materialien entscheidend (Li et al., 2017).

Globale Betrachtungen (OECD, 2019; Nguyen, 2020; IEA, 2021a; Marscheider-Weidemann et al., 2021) wie auch Berechnungen für den europäischen Raum (Miedema und Moll, 2013; Bobba et al, 2020; Gregoir & van Acker, 2022) prognostizieren eine stark ansteigende Nachfrage nach Rohstoffen für Technologien der Energie- und Mobilitätswende wie auch Digitalisierung (vgl. Öko-Institut, 2017). Besonders der Bedarf an Lithium wird durch den Wechsel vom Verbrennungsmotor zum BEV angetrieben. Auch wenn es Forschungsfortschritte bei den Alternativen zur LIB gibt, werden bis 2030 vermutlich nur wenige vergleichbare Batterietechnologien mit kommerzieller Marktreife, wie die von CATL im Jahr 2021 auf den Markt gebrachte Natrium-Ionen-Batterie, geben, welche die Nachfrage nach Lithium mit schmälern könnten (IEA, 2022).

5.3 Lithiumangebot in Europa

5.3.1 Primärlithium

Die sieben Lithiumförderprojekte im fortgeschrittenen Projektstadium könnten bei rechtzeitiger Umsetzung ab 2026 ca. 133,6 kt LCE (in Form von Spodumenkonzentrat, Lithiumhydroxid Monohydrat, Lithiumkarbonat und Lithiumfluorid) in der EU-27 produzieren. Sollte das Anfang 2022 gestoppte Projekt im Jadar Becken, Serbien, wiederaufgenommen werden, könnte die europäische Lithiumproduktion bei ca. 180 kt LCE liegen. In der Studie „Metals for Clean Energy“ geben Gregoir und van Acker (2022) ebenfalls eine mögliche heimische Primärlithiummenge von ca. 130 kt LCE an. Miteinbezogen werden dabei ebenfalls die Projekte aus Deutschland, Tschechien, Finnland, Portugal und Österreich und auch aus Serbien.

Die Realisation von Rohstoffprojekten ist aus wirtschaftlicher Sicht wahrscheinlicher, wenn die Rohstoffmarktpreise die Projektkosten (OPEX, CAPEX) übersteigen (Sterba et al., 2019). Im Jahr 2022 hat Lithium, vornehmlich aufgrund des Russland-Ukraine-Kriegs, einen preislichen Aufschwung erfahren und stieg im April 2022 auf über 80.000 US\$/t für Lithiumhydroxid Monohydrat (Preis für Lithiumhydroxid Monohydrat im Januar 2022: 33.000 US\$/t, im November 2022: 77.000 US\$/t; VER 2022, d; Argus, 2022b). Damit liegt der Preis für Lithiumhydroxid Monohydrat seit Ende 2021 (November 2021: über 27.000 US\$/t; USGS, 2022) über den Preisannahmen der in der vorliegenden Studie beschriebenen Projekte aus der EU-27 (höchste Preisannahme: 18.350 US\$/t für Lithiumhydroxid Monohydrat aus Wolfsberg, European Lithium Ltd, 2021, 2021a). Derzeit wird der Preis für Lithiumhydroxid Monohydrat für das Jahr 2023 mit 56.000 US\$/t prognostiziert, was alle Projekte mit ihren ursprünglichen Preisannahmen als wirtschaftlich erachten lässt (Goldinvest, 2022). Wegen der gestiegenen Energiepreise in Europa könnten die Projektbetreiber allerdings neue Annahmen treffen müssen, welche sich den Prognosen für die Lithiumhydroxid Monohydratpreise annähern könnten (vgl. DIHK, 2022; DESTATIS, 2022; ewi, 2022). Drei der hier in Betracht gezogenen Projekte zur Lithiumgewinnung in der EU-27 würden unterhalb eines Marktpreises für Lithiumhydroxid Monohydrat von bisher ca. 17.000 US\$/t im Jahr 2025 nicht realisiert werden können (Cinovec 17.000 US\$/t, Wolfsberg 18.350 US\$/t, San José 17.000 US\$/t; European Metals Holding Ltd, 2022; European Lithium Ltd, 2021; Infinity Lithium, 2021). Dies hätte zur Folge, dass das Primärlithiumangebot der EU-27, sollten keine weiteren Projekte etabliert und realisiert werden, sich um 35 % auf ca. 87 kt LCE verringert. Die Preisbildung hängt grundsätzlich von der Nachfrage- und Angebotssituation ab, ist die Nachfrage höher als das Angebot steigt der Preis und umgekehrt (vgl. Kap. 3.5.4.3; Gale, 1955). Die Haupttendanwendung von Lithium liegt seit 2015 in Batterietechnologien, die Nachfrage dafür steigt seither kontinuierlich (Vgl. Kap. 3.3.1) (USGS, 2016 – 2022; Nguyen, 2020). Da verschiedene Quellen davon ausgehen, dass im Jahr 2030 eher ein Lithium-Angebotsdefizit vorliegen wird (Schmidt, 2022; Gregoir & van Acker, 2022), ist anzunehmen, dass der Preis für Lithium von den Anbietern vorgegeben werden kann und somit höhere Kosten für Energie, Logistik oder Exploration an den Kunden weitergegeben werden können. Damit sollten nicht nur die Break-Even-Preise⁹ der Projekte in Zukunft überstiegen werden, sondern gewinnbringende Preise für die Projektbetreiber erzielt werden. Dementsprechend, sollten die geologischen und technischen Bedingungen die Förderung nicht verhindern, erscheint die Fortführung der Lithiumprojekte in den EU-27 aus betriebswirtschaftlicher Sicht als ausführbar.

Neben ökonomischen Gründen ist ein weiterer Grund, der Bergbauprojekte verhindern kann die mangelnde Akzeptanz der Bevölkerung, die auch in Deutschland zunimmt (Nippa, 2015; Weber et al., 2018; Steiger et al., 2022). Ob bei der Lithiumgewinnung aus Festgestein oder aus Geothermalwasser, lokale Bürgerinitiativen und überregionale Interessengruppen leisten Widerstand gegen die Vorhaben. Schon seit Projektbeginn

⁹ Break-Even-Preis: Der Preis an dem die Einnahmen die Kosten decken, allerdings noch keinen Gewinn erwirtschaften (Vgl. Cebesoy, 1997).

steht das Unternehmen Savannah Resources, welches im Norden von Portugal in der Mina do Barroso Lithium abbauen möchte, in der Kritik, weil schwere Schäden an der Umwelt und ein negativer Wandel in der Region befürchtet werden (Faget, 2021). Nun hat im Juli 2022 eine lokale Gemeindegruppe Klage gegen das Unternehmen Savannah Resources, eingereicht, sie werfen dem Unternehmen unrechte Landkäufe vor (Demony, 2022). Auch in Spanien schließen sich lokale Interessengruppen zusammen und protestieren gemeinsam mit internationalen Unterstützern (Netzwerk „Sí a la vida y no a la minería“) gegen den Abbau von Lithium in Cáceres, Extremadura von Infinity Lithium (Netzwerk Yes to Life, No to Mining, 2020). Monatelange Proteste, in denen Tausende Demonstranten in Belgrad und anderen serbischen Städten gegen das Jadar-Projekt von Rio Tinto, in der Nähe von Loznica, Jadar, Serbien, auf die Straßen gingen, resultierten darin, dass die serbische Regierung die bereits erteilten Genehmigungen zurückzog (de Launey, 2022). Auch im Oberrheingraben, Deutschland, stößt die Vulcan Energie Ressourcen GmbH auf Vorbehalte Ihrer Explorationsanträge. Während des Jahres 2021 stimmten die Verantwortlichen in diversen Gemeinden in der Ortenau gegen 3D-seismische Erkundungen des Unternehmens sowie gegen Verlängerung der Genehmigung der Förderung von Erdwärme, Soleförderung und Lithiumgewinnung zu gewerblichen Zwecken. Die Entscheidungen gegen die Vorhaben wurden damit begründet, dass Bedenken bezüglich unvorhersehbarer Umweltauswirkungen bestünden (Moos, 2021; von Gangl, 2021; Meier, 2021). Die Akzeptanz in der Bevölkerung muss durch eine sachlich-neutrale Aufklärung der vielschichtigen Zusammenhänge von Bergbau, Bergbautechnologie und moderner Umweltschutzstandards im Bergbau erreicht werden (vgl. Cousse et al., 2021). Der öffentliche Zuspruch kann durch das Verständnis der Notwendigkeit des Bergbaus zur Gewinnung von Rohstoffen für Technologien und Produkte für die Energie- und Verkehrswende erhöht werden. Auch das Herausheben und Erläutern umweltfreundlicher Vorteile, wie bspw. die Reduktion des CO₂-Fußabdrucks durch gleichzeitige Strom- und Wärmeproduktion (vgl. Minviro, 2020) bei der Lithiumgewinnung aus Geothermalwasser im Vergleich zur Förderung aus Festgestein oder Solen kann dazu beitragen, die Ablehnung in der Bevölkerung zu mindern.

Die Entwicklung und Inbetriebnahme von Projekten zur Lithiumgewinnung in Deutschland und Europa kann dazu beitragen, die inländische und europäische stetig wachsende Nachfrage mit decken zu können. Bis heimischen Projekte Lithium auf den Markt anbieten können, haben die Projektentwickler verschiedene Herausforderungen zu bewältigen. Für die Realisation von Explorationsprojekten sind neben technisch-wirtschaftlichen auch genehmigungsrechtliche Faktoren entscheidend (Steiger et al., 2022). Zu geringe Erzgehalte oder Tonnagen, Lieferengpässe der Ausrüstung, verfehlte Preisannahmen der Abbaukosten und der Absatzpreise, Widerstand der Bevölkerung oder Ungewissheiten in der Finanzierung können Projektvorhaben vorzeitig beenden oder zumindest verzögern. Wie das europäische Primärlithium innerhalb von Europa eingesetzt wird, ist aufgrund der noch nicht ausreichenden Infrastruktur zwischen Mine und Batteriezelle sowie aufgrund von vertraglichen Vereinbarungen der Lithiumproduzenten noch offen. Die genannten Sachlagen können dazu führen, dass das heimische (europäische) Primärlithium nicht in Deutschland weiterverarbeitet

wird und stattdessen zur Weiterverarbeitung den Kontinent verlässt, um später als Lithiumchemikalie, verarbeitet in einer Kathode, wieder importiert oder global andernorts verarbeitet zu werden. Daher ist es für Europa und Deutschland essentiell, ebenso die Infrastruktur der Raffination und der Elektrodenproduktion aufzubauen.

5.3.2 Recycling von LIBs, Sekundärlithium

Neben dem heimischen Abbau ist das Recycling die zweite Säule, durch die Deutschland seine Lithiumnachfrage decken und die EU-Quotenvorgaben einhalten möchte. Stand Ende 2021 befinden sich zwei Drittel der derzeitigen LIB Recyclingkapazitäten (ca. 207,5 kt) in China, Japan und Korea (Baum et al., 2022). Europa liegt im globalen Vergleich mit ca. 92 kt Recyclingkapazitäten hinter dem ostasiatischen Raum, die Anlagen befinden sich in Belgien, Deutschland, Finnland, Frankreich, Norwegen, der Schweiz und dem Vereinten Königreich (Mohr et al., 2020; Baum et al., 2022). Es sind weltweit neue LIB Recyclingkapazitäten geplant, einschließlich dieser werden Ostasien (ca. 219,5 kt) und Europa (ca. 110 kt) die größten Möglichkeiten haben und über 90 % der Kapazitäten (329,5 kt) werden in diesen Regionen angesiedelt sein (Baum et al., 2022). Die BGR und DERA prognostizieren aufgrund von geplanten Erweiterungen und dem Bau von neuen Anlagen eine Recyclingkapazität von max. 380 kt im Jahr 2030 in Europa (Kresse et al., 2022).

Nach einem Vorschlag der EU Kommission für die Überarbeitung der „Batterie Richtlinie“ (RL 2006/66/EC) sollen ab dem Jahr 2030 die CR und die EOL-RR von LIBs bei je 70 % liegen (2020: EOL-RR < 1 %), die EOL-RIR bei 4 % (2020: 0 %) (EU Kommission, 2020; IEA, 2021a; Di Persio et al., 2020). Momentan stellen verschiedene Faktoren eine Herausforderung für die Etablierung eines reibungslosen Recyclingprozesses im industriellen Maßstab dar, u.a. die noch geringe Verfügbarkeit von Lithium aus BEV, die komplexe Zellchemie der jeweiligen Batteriezelltypen, welche die technisch mögliche Rückgewinnungsrate bedingt, die Wirtschaftlichkeit (speziell bei der Rückgewinnung von Lithium) und Umweltbilanz des Recyclingprozesses und auch eine unzureichende Recycling-Infrastruktur (Neumann et al., 2022; Xu et al., 2020; Ziemann et al., 2018; Kresse et al., 2022). Wegen physikochemischer und wirtschaftlicher Gründe liegt der Fokus beim Recycling einer LIB noch auf Nickel oder Kobalt (Stand 2022, Kresse et al. 2022). Die derzeitige durchschnittliche Lebensdauer einer LIB in BEV beträgt 8 Jahre (Abdelbaky et al., 2020). Nach 2030, wenn die LIBs der BEV, die heute neu zugelassen werden, ihr EOL-Stadium erreicht haben, und wenn diese in Europa bleiben, kann die CR, wie auch das EOL-Recycling zunehmen (IEA, 2021a, Schmidt, 2022).

Damit 2030 Sekundärlithium in „battery grade“ Reinheit für die Produktion von neuen Batteriezellen zur Verfügung steht, muss heute der Auf- und Ausbau der notwendigen Recyclinginfrastruktur vorangetrieben und innovative Technologien gefördert werden. In Deutschland und Europa werden Recyclingprozesse (vornehmlich hydro- und pyrometallurgisches Recycling) sowie der Aufbau einer Recyclinginfrastruktur erforscht und durch Initiativen, wie beispielsweise die europäische „Battery 2030+ Initiative“, gefördert (Fichtner et al., 2021).

5.4 Lithiumbedarfsdeckung am außereuropäischen Markt

Die Eigenversorgung durch Primär- und Sekundärlithium aus der EU-27 kann zwischen 0 % und maximal 21,2 % im Grundfall sowie maximal 26,0 % im Praxisfall (je in S1) liegen. Mit der höchst angenommenen Batteriezellenproduktionskapazität (S3) wird die Eigenversorgungsquote im Grundfall nur bei maximal 13,3 % und im Praxisfall bei maximal 14,5 % liegen. Eine Reduzierung des Lithiumverbrauchs in der Kathode kombiniert mit einer Erhöhung der EOL-RIR auf 10,6 % (Sensitivität 3) kann den Anteil der Eigenversorgung im Grundfall auf maximal 29,3 % in S1 und 20,7 % in S3 sowie im Praxisfall auf maximal 34,5 % in S1 und 22,0 % in S3 steigern. Auf europäischer Ebene liegt die Eigenversorgungsquote zwischen 16,2 % (S3) und 34,1 % (S1), gerechnet mit den Annahmen der Sensitivität 3 zwischen 20,1 % und 43,3 %. Laut DERA liegt die Möglichkeit der Eigenversorgung Europas mit Lithium für alle Anwendungen zwischen 27 % und 34 %, damit sieht die DERA eine Importabhängigkeit für Europa im Jahr 2030 (Schmidt, 2022), welche sich durch die Erkenntnisse der vorliegenden Studie auch für Deutschland bestätigen lässt. Die Unterschiede der prozentualen Anteile gehen aus den unterschiedlich zugrundeliegenden Parametern hervor (vgl. Kap. 3.6.2).

Das benannte Ziel bei der Gründung der ERMA des EU Kommissars, Herr Thierry Breton, für den Binnenmarkt, dass „Europa bis 2025 Lithium annähernd autark“ sein wird (EU Kommission 2020c), wird unter den gegebenen globalen Nachfrage- und Angebotsbedingungen nicht zu erreichen sein. Die heimischen Primär- und Sekundärressourcen werden den Bedarf nicht decken können und die Industrie für die weiteren Verarbeitungsschritte wird nicht im ausreichenden Maße existent sein. Die Produzenten von Batteriezellen in Deutschland und Europa, die fertige Kathoden von Zulieferern beziehen, verlagern die Herausforderung der Rohstoffbeschaffung eine Stufe weiter nach vorne in der Wertschöpfungskette ins Ausland, vornehmlich nach China, Südkorea und Japan, wo laut IEA auch in den kommenden Jahren hauptsächlich die Kathodenproduktion stattfinden wird.

6. Schlussfolgerung

Mit dem Verbot von Neuzulassungen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ab 2035 möchte die EU einen Beitrag zur Erreichung der globalen Emissionsreduktionsziele leisten. Für den Ausbau eines elektrischen Fuhrparks in der EU sind nach heutigem Stand LIBs essentiell. Stand 2022 liegt die Wertschöpfungskette einer LIB hauptsächlich in China. China war im Jahr 2021 mit 14 kt Lithiumproduktion der drittgrößte Produzent (13,4 %) von Lithium weltweit, 76 % der Batteriezellen und Batterien, 70 % der Kathoden und 85 % der Anoden werden dort gefertigt, ca. 58 % des derzeitigen LIB-Recyclings findet in China statt (USGS, 2022; Bridge & Faigen, 2022; IEA, 2022; Baum et al., 2022). China hat den Ausbau der Industrie von „new energy vehicles“, sowie einer Batteriekreislaufwirtschaft und das besondere Management der LIB-Industrie in ihrem 5-Jahres-Plan festgehalten (IEA, 2022) und steht damit als heutiger globaler Marktführer entlang der gesamten Wertschöpfungskette gut vorbereitet gegenüber den Vorhaben der EU und Deutschlands des Auf- und Ausbaus einer autarken E-Mobilitätsindustrie. Im November 2022 führte China zum dritten Mal in Folge die Liste des globalen LIB Wertschöpfungskettenrankings von Bloomberg an, Deutschland ist auf Platz sechs von 30 gelistet (BNEF, 2022). Eins von fünf ausschlaggebenden Bewertungskriterien ist die Verfügbarkeit von heimischen Primärressourcen für LIBs, welches für Deutschland kritisch ausfiel, jedoch bei einem noch geringen Bedarf für die existierende Batteriezellenproduktion zu einer Platzierung im oberen Viertel führte (BNEF, 2022).

Auch im Jahr 2030 wird der Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa überwiegend vom außereuropäischen Markt gedeckt werden müssen. Je nach Szenario und Fall bedarf es für die Batteriezellenproduktion in Deutschland zwischen 79,3 % und 100 % des Lithiums vom außereuropäischen Markt und zwischen 56,7 % und 83,8 % für Europa. Zu den sieben Projekten der Lithiumgewinnung im fortgeschrittenen Stadium in der EU-27 können weitere, bereits angefangene oder noch nicht aufgegriffene Lithiumförderprojekte kommen, die die Eigenversorgungsquote erhöhen können. Der Ausbau des heimischen, europäischen Bergbaus und der Kreislaufwirtschaft, unter Einbehaltung der notwendigen Umweltschutz- und sozialen Standards, könnte dazu beitragen, die Abhängigkeit vom außereuropäischen Lithiummarkt zu verringern und einen Beitrag zur Rohstoffversorgung in Deutschland zu leisten. Auch könnten damit die globalen (Übereinkommen von Paris, UNFCCC, 2015), europäischen (EU Green Deal, EU Kommission, 2019) und nationalen Klimaschutzziele (z.B. Bundes-Klimaschutzgesetz, 2019) eingehalten werden während die Nachhaltigkeitsziele der UN (UN, 2020) erreicht werden. Wenn die Industrien von Bergbau, Raffination und Recycling in der EU nicht aus- und aufgebaut werden, wird die Abhängigkeit vom asiatischen Markt in einem hohen Maß über das Jahr 2030 hinaus bestehen bleiben.

Der durch den Russland-Ukraine-Krieg ausgelöste Preisanstieg bei metallischen Rohstoffen kann auf der einen Seite europäische Bergbauprojekte durch einen hohen Lithiumpreis rentabel machen, auf der anderen Seite werden steigende Kosten für Energie die Betriebskosten der verschiedenen Industrien entlang der

Wertschöpfungskette erhöhen und eine Herausforderung für den Geschäftsaufbau oder die Weiterführung darstellen, sofern die Kosten nicht an die Kunden weitergegeben werden können. Demnach werden nicht nur übliche wirtschaftliche, technische, administrative und sozio-ökologische Herausforderungen beim Aufbau einer kompletten „cradle to cradle“ BEV-Wertschöpfungskette zu bewältigen sein, sondern Deutschland und die EU müssen sich neuen wirtschaftlichen Bedingungen stellen, welche die bestehende, nicht ausreichende Infrastruktur noch weiter schwächen und ggf. einen Ausbau und folglich die Erreichung der Klimaziele verhindern können.

Die Erreichung von Klima- und Nachhaltigkeitszielen auf der ganzen Welt hängt von der Verfügbarkeit und Verteilung von Rohstoffen ab. Die Realisation der Batteriezellenproduktion in Deutschland wird nicht nur von der Verfügbarkeit von Lithium abhängen, die der Rohstoffe Kobalt und Graphit ist bereits heute für die EU kritisch, auch hier bestimmt China das Angebot und die Nachfrage. In naher Zukunft werden vermutlich auch Nickel und Mangan folgen, der IEA (2021) zufolge werden BEV bis 2040 Edelstahl als größten Verbraucher von Nickel ablösen.

7. Ausblick

Um die in Europa verfügbaren Lithiumquellen zu diversifizieren, wird an verschiedenen Möglichkeiten geforscht, Lithium zu gewinnen. Im Folgenden werden vier Methoden beschrieben, die potentielle neue Quellen darstellen könnten.

7.1 Lithium aus Bergbauwässern

Das Projekt MERLIN (mining water lithium extraction), ein Forschungsvorhaben des Leibniz Instituts für neue Materialien (INM) in Saarbrücken mit Unterstützung der RAG-Stiftung widmet sich der Extraktion von Elementen wie Strontium, Barium oder Lithium aus den Grubenwässern in den ursprünglichen Steinkohlerevieren Ruhr und Saar. Für die Erforschung wird Grubenwasser aus zwei ehemaligen Bergwerken an der Saar verwendet (dpa, 2021). Die Konzentration von Lithium in den Grubenwässern ist mit 20 mg/l gering, allerdings werden im ehemaligen Saarrevier 18 Mio. m³ Grubenwasser jährlich gepumpt, die ca. 1.900 t Lithium enthalten (Bertram, 2021; dpa, 2021). Im Labor wird das Grubenwasser durch eine Zelle mit zwei unterschiedlich geladenen Elektroden geschickt, so werden die Lithium- und Chlor-Ionen elektrochemisch extrahiert, anschließend wird die Zelle mit Frischwasser gespült (vgl. 3.1.1 Extraktionsmethoden; RAG Stiftung, 2021). Das gewonnene Lithiumchlorid soll dann weiter aufbereitet werden (RAG Stiftung, 2021). Die Ressourcenverfügbarkeit von Lithium aus Grubenwässern in weiteren Ländern Europas soll im Rahmen des Projekts durch weitere geochemische Analysen untersucht werden (INM, 2020).

7.2 Lithium aus geförderten Lagerstättenwässern

Eine weitere innovative Möglichkeit der Lithiumgewinnung stellt die Extraktion aus geförderten Lagerstättenwässern neben der Öl- oder Gasförderungen dar (McEachern, 2017). Da bei der Förderung von Kohlenwasserstoffen abhängig vom Lagerstättentyp und -alter gleichzeitig auch Lagerstättenwässer mitgefördert werden, setzt sich das Produktionswasser aus den Lagerstättenwässern und der Injektionsflüssigkeit zusammen (Neff et al., 2011). In Deutschland wird im Norddeutschen Becken, u.a. aus Rotliegend- und Zechstein-Horizonten, Erdgas gefördert (LBEG, 2020). In eben diesen Horizonten wurden bei Tiefengewässeruntersuchungen Lithiumgehalte von durchschnittlich 58 mg/l gemessen (Stober et al., 2014b). So nimmt Weißenborn an, dass aus den Erdgaslagerstätten des Rotliegend und Zechsteins in Deutschland jährlich ca. 300.000 m³ Produktionswasser gefördert werden und hierdurch die Möglichkeit bestünde, Lithium zu gewinnen (Weißenborn, 2019). Das Formationswasser im Altmark Gasfeld in Sachsen-Anhalt weist eine Lithiumkonzentration von max. 357 mg/l auf (Lüders et al., 2010). In Produktionswässern aus ukrainischen Öl- und Gasfeldern wurden durchschnittlich zwischen 10 und 20 mg/L Lithium gemessen (Reva, 2019). Verschiedene Extraktionstechnologien, wie beispielweise Sorption mittels Ionenaustauscharzen oder Nanofiltration, wären für eine Lithiumextraktion aus diesen Wässern denkbar (vgl. 3.1.1 Extraktionsmethoden) (ACS

Energy, 2019). Außerhalb von Europa, im US-Bundesstaat Pennsylvania haben zwei Unternehmen die Absicht, als Joint Venture aus den Produktionwässern der Schiefergas-Förderung des Marcellus und Utica Shales Lithium zu extrahieren (Produced Water Society, 2021).

7.3 Lithium aus Meerwasser

Das von der Europäischen Union geförderte Projekt Sea4Value hat zum Ziel, bis 2024 ein modulares Solebergbauverfahren zu konzipieren, bei dem verschiedene Minerale und Metalle aus den Solen von Meerwasserentsalzungsanlagen durch Adsorptionsverfahren gewonnen werden können. Fünfzehn Einrichtungen entlang der kompletten Wertschöpfungskette sind daran beteiligt, darunter auch drei aus Deutschland (EU Kommission, 2020b). Extrahiert werden sollen künftig Magnesium, Bor, Scandium, Indium, Vanadium, Gallium, Lithium, Rubidium sowie Molybdän zunächst aus Entsalzungsanlagen auf den Kanarischen Inseln sowie in Denia an der Mittelmeerküste Spaniens (EU-Recycling Magazin 2021). Weltweit wird an verschiedenen Standorten an der Extraktion von Lithium aus Meerwasser geforscht, von Japan über Korea über Saudi-Arabien bis zu den USA (Chitrakar, 2001; Chung et al., 2004; Li et al., 2021; Diallo et al., 2015). Der Lithiumgehalt im Meerwasser variiert, in der Nordsee wurden Lithiumkonzentrationen von ca. 0,1 mg/l (0,1 ppm) gemessen, in japanischen Küstengewässern im Pazifik ca. 1,17 mg/l (1,173 ppm) (Choubey et al., 2017). Die Verfahren, die dabei am häufigsten angewendet werden, sind Adsorptionsverfahren, elektrochemische Verfahren oder Membran-Verfahren (vgl. 3.1.1 Extraktionsmethoden) (Xua et al., 2016; Liu et al., 2020; Li et al., 2021).

7.4 Lithium aus Salzlagerstätten

Lithiumvorkommen wurden auch im europäischen Becken in Salzlagerstätten in Norddeutschland in Gorleben und Morsleben mit max. 401 µg/g in Soleproben und 161 µg/g in Gesteinsproben gefunden. Die größte Konzentration an Lithium wurde in den Solen der anhydritführenden Schichten mit einer Mächtigkeit max. 80 m in Gorleben entdeckt. Diese sind in ihrer Konzentration mit Vorkommen in Kalifornien, USA und Mexiko vergleichbar (Munk et al., 2016). Bereits in den 1960er Jahren haben Untersuchungen von Salzlösungen aus dem deutschen Zechstein Lithium mit einer Konzentration max. 490 µg/g in Steinsalz nachgewiesen (Herrmann, 1961). Im Abbaugbiet Asse waren es durchschnittlich 6,61 mg/l (BGE, 2017). Welchen Ursprung das Lithium in den Salzlagerstätten in Gorleben und Morsleben hat, ist wissenschaftlich noch nicht belegt, Meerwasser als Quelle wird diskutiert, allerdings weist dieses geringere Lithium-Konzentrationen auf (Mertineit und Schramm, 2019).

8. Literatur

- AMG Lithium. (2022). Über uns. Abgerufen am 15. August 2022 von <https://amglithium.com/de/unternehmen/ueber-uns>.
- Argus Media Group. (2022). Prices & data - Lithium prices. Abgerufen am 02. Mai 2022 von <https://www.argusmedia.com/metals-platform/metal/minor-and-specialty-metals-lithium>.
- Argus Media Group. (2022a). Prices & data - Lithium prices. Abgerufen am 12. August 2022 von <https://www.argusmedia.com/metals-platform/metal/minor-and-specialty-metals-lithium>.
- Argus Media Group. (2022b). Prices & data - Lithium prices. Abgerufen am 11. November 2022 von <https://www.argusmedia.com/metals-platform/metal/minor-and-specialty-metals-lithium>.
- Bacarona Lithium. (2019). Feasibility Study. Pressemitteilung vom 05. Juni 2019. Abgerufen am 03. November 2021 von Deutsche Lithium - Investor Relations: <http://www.deuschelithium.de/investor-relations/#nachrichten>.
- Barros, R., Menuge, J. F., & Harrop, J. (2016). Spodumene pegmatites in southeast Ireland: petrogenesis and economic potential as a resource of lithium and rare metals. *Plinius*, 42, 1 S. Abgerufen am 08. Mai 2022 von https://www.researchgate.net/publication/318466407_Spodumene_pegmatites_in_southeast_Ireland_petrogenesis_and_economic_potential_as_a_resource_of_lithium_and_rare_metals.
- BASF. (2021). BASF und Porsche entwickeln gemeinsam leistungsstarke Lithium-Ionen-Batterie für Elektrofahrzeuge. Pressemitteilung vom 21. Juli 2021. Abgerufen am 16. September 2022 von <https://www.basf.com/global/de/media/news-releases/2021/07/p-21-262.html>.
- Bastian, N., Brüggmann, M., Louven, A., & Volkery, C. (2021). Das große Spiel um die Vorräte: Europa will für E-Autobatterien Lithium fördern - doch die Bürger wehren sich. Handelsblatt online vom 27. Juli 2021. Abgerufen am 29. Juli 2021 von <https://www.handelsblatt.com/politik/international/rohstoffe-das-grosse-spiel-um-die-vorraete-europa-will-fuer-e-autobatterien-lithium-foerdern-doch-die-buerger-wehren-sich/27445716.html?ticket=ST-2201589-wY94QZ0qnzEz2z0OnztS-cas01.example.org>.
- Bernhart, W. (2019). Zukunftsmarkt Batterie-Recycling: Verpasst Europa (wieder) den Anschluss? Abgerufen am 03. März 2022 von [https://www.rolandberger.com/de/Insights/Publications/Zukunftsmarkt-Batterie-Recycling-Verpasst-Europa-\(wieder\)-den-Anschluss.html](https://www.rolandberger.com/de/Insights/Publications/Zukunftsmarkt-Batterie-Recycling-Verpasst-Europa-(wieder)-den-Anschluss.html).
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. (2020). Lithium: Informationen zur Nachhaltigkeit. 13 S. Hannover. Abgerufen am 10. Mai 2021 von https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/lithium.pdf?__blob=publicationFile&v=4.
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. (2020a). Rohstoffwirtschaftlicher Steckbrief für Lithium. 6 S. Hannover. Abgerufen am 17. Mai 2021 von https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohstoffsteckbrief_li.html.
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. (2021). Deutschland - Rohstoffsituation 2020. 158 S. Hannover. Abgerufen am 17. Januar 2022 von https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Nachrichten/Aktuelles/2020/2020-12-15_pm_bgr-bericht-rohstoffsituation-deutschland.html.
- BMW Group. (2021). Produktionsstart für Batteriemodule im BMW Group Werk Leipzig. Pressemitteilung vom 30. April 2021. Abgerufen am 21. Juli 2022 von https://www.bmwgroup-werke.com/leipzig/de/aktuelles/Start_Batteriemodulfertigung.html.

- BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2019). Rohstoffstrategie der Bundesregierung, Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nichtenergetischen mineralischen Rohstoffen. 40 S. Berlin. Abgerufen am 07. Dezember 2021 von https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/rohstoffstrategie-der-bundesregierung.pdf?__blob=publicationFile&v=4.
- BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2021). IPCEIs in der Batteriezellfertigung (Mitteilung vom 11. März 2021). Abgerufen am 04. März 2022 von https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/I/ipceis-in-der-batteriezellfertigung.pdf?__blob=publicationFile&v=4.
- BMWK – Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2022). Batterien „made in Germany“ – ein Beitrag zu nachhaltigem Wachstum und klimafreundlicher Mobilität. Abgerufen am 12. Mai 2022 von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/batteriezellfertigung.html>.
- BNEF - BloombergNEF. (2022). China's Battery Supply Chain Tops BNEF Ranking for Third Consecutive Time, with Canada a Close Second. Blog Eintrag vom 12. November 2022. Abgerufen am 13. November 2022 von <https://about.bnef.com/blog/chinas-battery-supply-chain-tops-bnef-ranking-for-third-consecutive-time-with-canada-a-close-second/>.
- Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J., Mathieux, F., & Pavel, C. (2020). Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU – A Foresight Study. European Commission. 100 S. Luxemburg: Publications Office of the European Union. Abgerufen am 10. Dezember 2020 von https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRMs_for_Strategic_Technologies_and_Sectors_in_the_EU_2020.pdf.
- Brauers, J., & Weber, M. (1988). A new method of scenario analysis for strategic planning. *Journal of Forecasting*, 7(1), 31 - 47. doi:<https://doi.org/10.1002/for.3980070104>.
- Breiter, K., Hlozkova, M., Korbelova, Z., & Galiova, M. V. (2019). Diversity of lithium mica compositions in mineralized granite-greisen system: Cínovec-Li-Sn-W deposit, Erzgebirge. *Ore Geology Reviews*, 106, S. 12 - 27.
- BRGM. (2022). EuGeLi: Lithium extraction from geothermal brines in Europe (17. Januar 2022). Abgerufen am 26. Januar 2022 von <https://www.brgm.fr/en/current-project/eugeli-lithium-extraction-geothermal-brines-europe>.
- Bridge, G., & Faigen, E. (2022). Towards the lithium-ion-battery production network: Thinking beyond mineral supply chains. *Energy Research & Social Science*, 89. doi:<https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102659>.
- Bullock, R. L. (2011). Mineral Property Feasibility Studies. In *SME Mining Engineering Handbook* (Dritte Ausg., S. 227 - 262). Peter Darling, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (U.S.).
- Bundesverband Geothermie. (2020). Rittershofen - Geothermieranlage. Abgerufen am 07. November 2022 von <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/r/rittershoffen-geothermieranlage.html>.
- Chitrakar, R., Kanoh, H., Yoshitaka, M., & Ooi, K. (2001). Recovery of Lithium from Seawater Using Manganese Oxide Adsorbent (H1.6Mn1.6O4) Derived from Li1.6Mn1.6O4. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 40(9), S. 2054 - 2058. doi:<https://doi.org/10.1021/ie000911h>.
- CIM Standing Committee on Reserve Definitions. (2014). CIM Definition Standards for Mineral Resources & Mineral Reserves. 12 S. Westmount: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. Abgerufen am 28. Oktober 2022 von https://mrmr.cim.org/media/1128/cim-definition-standards_2014.pdf.
- Cornish Lithium Ltd. (2021). Lithium in Geothermal Waters. Abgerufen am 23. März 2022 von <https://cornishlithium.com/projects/lithium-in-geothermal-waters/>.

- Cornish Lithium Ltd. (2022). United Downs. Abgerufen am 23. März 2022 von <https://cornishlithium.com/projects/lithium-in-geothermal-waters/united-downs/>.
- Cousse, J., Trutnevyte, E., & Hahnel, U. J. (2021). Tell me how you feel about geothermal energy: Affect as a revealing factor of the role of seismic risk on public acceptance. *Energy Policy*, 158. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112547>.
- De Launey, G. (2022). Serbia revokes Rio Tinto lithium mine permits following protests (21. Januar 2022). Abgerufen am 02. Februar 2022 von <https://www.bbc.com/news/world-europe-60081853>.
- Demony, C. (2022). Portuguese community files legal action against lithium mining company. Abgerufen am 26. September 2022 von Reuters online vom 22. Juli 2022: <https://www.reuters.com/article/portugal-lithium-idUSL8N2Z33JZ>.
- DERA - Deutsche Rohstoffagentur. (2021). Batterierohstoffe für die Elektromobilität - DERA Themenheft. 26 S. Berlin. Abgerufen am 02. Februar 2022 von <https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DERA%20Themenheft-01-21.html>
- DESTATIS. (2022). Daten zur Energiepreisentwicklung. Mitteilung vom 04. November 2022. Abgerufen am 05. November 2022 von <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Publikationen/Energiepreise/energiepreisentwicklung-pdf-5619001.html>.
- Di Persio, F., Huisman, J., Bobba, S., Alves Dias, P., Blengini, G. A., & Blagoeva, D. (2020). Information gap analysis for decision makers to move EU towards a Circular Economy for the lithium-ion battery value chain. 92 S. Luxemburg: Publications Office of the European Union. Abgerufen am 30. August 2022 von <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC121140>.
- DIHK. (2022). Wie Unternehmen auf die hohen Strom-, Gas- und Kraftstoffpreise reagieren. Mitteilung vom 02. November 2022. Abgerufen am 05. November 2022 von <https://www.dihk.de/de/themen-und-positionen/wirtschaftspolitik/konjunktur-und-wachstum/konjunkturumfrage-herbst-2022/wie-unternehmen-auf-die-hohen-strom-gas-und-kraftstoffpreise-reagieren-85008>.
- Dpa. (2022). Voerst keine Batteriezellenfabrik in Bitterfeld-Wolfen. ZEIT online vom 23. Mai 2022. Abgerufen am 03. Juli 2022 von <https://www.zeit.de/news/2022-05/23/vorerst-keine-batteriezellenfabrik-in-bitterfeld-wolfen>.
- Duffner, F., Kronemeyer, N., Tübke, J., Leker, J., Winter, M., & Schmuch, R. (2021). Post-lithium-ion battery cell production and its compatibility with lithium-ion cell production infrastructure. *Nature Energy*, 6, S. 123 - 134. doi:<https://doi.org/10.1038/s41560-020-00748-8>.
- DUSD(S&T) - Deputy Under Secretary of Defense for Science and Technology. (2003). Technology Readiness Assessment (TRA) Deskbook. 168 S. Unites States of America: Department of Defense. Abgerufen am 15. September 2022 von <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA418881.pdf>.
- EIT Raw Materials. (2019). EuGeLi - European Geothermal Lithium Brines. Abgerufen am 26. Januar 2022 von <https://eitrawmaterials.eu/project/eugeli/>.
- EIT Raw Materials. (2020). EuGeLi project extracting European Lithium for future electric vehicle batteries (14.09.2020). Abgerufen am 26. Januar 2022 von <https://eitrawmaterials.eu/eugeli-project-extracting-european-lithium-for-future-electric-vehicle-batteries/>.

- EnBW - Energie Baden-Württemberg. (2021). Lithium umweltfreundlich in Deutschland gewinnen. ECO*Journal (09. April 2021). Abgerufen am 01. Juli 2022 von <https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/lithium-umweltfreundlich-gewinnen.html>.
- ERAMET. (2019). EuGeLi project: extracting European Lithium for future electric vehicle batteries. Abgerufen am 26. Januar 2022 von <https://www.eramet.com/en/activities/innovate-design/eugeli-project>.
- EU Kommission. (2018). Report on critical raw materials and the circular economy, 80 S. Luxemburg: Publication Office of the European Union. Abgerufen am 07. März 2020 von <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d1be1b43-e18f-11e8-b690-01aa75ed71a1/language-en>.
- EU Kommission. (2019). Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen (640 final). Der europäische Grüne Deal (11. Dezember 2019), 29 S. Brüssel: EU Kommission. Abgerufen am 07. Juli 2021 von https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/european-green-deal-communication_de.pdf.
- EU Kommission. (2020). Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über Batterien und Altbatterien, zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020 (10. Dezember 2020), 143 S. Brüssel: EU Kommission. Abgerufen am 28. April 2022 von https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:4b5d88a6-3ad8-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0019.02/DOC_1&format=PDF.
- EU Kommission. (2020a). Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen (474 final). Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken (03. September 2020), 27 S. Brüssel: EU Kommission. Abgerufen am 30. November 2020 von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN>.
- EU Kommission. (2020b). Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen (102 final). Eine neue Industriestrategie für Europa (10. März 2020), 21 S. Brüssel: EU Kommission. Abgerufen am 09. Dezember 2020 von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0102&from=EN>.
- EU Kommission. (2020c). Speech by Commissioner Breton at the launch of the European Raw Materials Alliance (Pressemitteilung vom 29. September 2020). Abgerufen am 18. August 2022 von https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/speech_20_1776.
- EU Kommission. (2021). Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/631, 40 S. Brüssel: EU Kommission. Abgerufen am 10. Juni 2022 von https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:870b365e-eecc-11eb-a71c-01aa75ed71a1.0015.02/DOC_1&format=PDF.
- EuroLithium. (2022). Project Euro Lithium+Borates. Abgerufen am 18. Oktober 2022 von <https://www.eurolithium.com/assets1>.
- Europäisches Parlament. (2022). Fit für 55: Abgeordnete unterstützen Ziel der Emissionsneutralität für neue Autos und Lieferwagen ab 2035. Pressemitteilung vom 08. Juni 2022. Abgerufen am 16. September 2022 von <https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20220603IPR32129/fit-fur-55-emissionsneutralitat-fur-neue-pkw-und-lieferwagen-ab-2035>
- European Lithium Ltd. (2021). Wolfsberg Lithium Project, Corporate Presentation February 2021. Abgerufen am 08. März 2022 von https://europeanlithium.com/wp-content/uploads/2021/03/210201-European-Lithium-Presentation_Feb-2021FINAL.pdf.

- European Lithium Ltd. (2022). European Lithium partners with BMW AG to supply battery grade lithium hydroxide. Pressemitteilung vom 05. August 2022. Abgerufen am 15. August 2022 von <https://wcsecure.weblink.com.au/pdf/EUR/02550202.pdf>.
- European Metals Holding Ltd. (2021). Quaterly Report September 2021. Abgerufen am 08. März 2022 von <https://www.londonstockexchange.com/news-article/EMH/quarterly-report/15079423>.
- European Metals Holding Ltd. (2022). PFS Update delivers outstanding results. Pressemitteilung vom 19. Januar 2022. Abgerufen am 08. März 2022 von <https://www.investi.com.au/api/announcements/emh/7381a65f-d0b.pdf>.
- ewi. (2022). Energiepreise in Europa bleiben mittelfristig auf hohem Niveau. Mitteilung vom 14. Juli 2022. Abgerufen am 05. November 2022 von <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/aktuelles/esys/>
- Faget, J. (2021). Portugal: Lithium-Krieg hinter den Berge (01. September 2021). Deutsche Welle online. Abgerufen am 23. September 2021 von <https://www.dw.com/de/portugal-lithium-krieg-hinter-den-bergen/a-59040654>.
- Fatima, H., Zhong, Y., Wua, H., & Shao, Z. (2021). Recent advances in functional oxides for high energy density sodium-ion batteries. *Material Reports: Energy*, 1(2). doi:<https://doi.org/10.1016/j.matre.2021.100022>.
- Fichtner, M., Edström, K., Ayerbe, E., Berecibar, M., Bhowmik, A., Castelli, I. E., . . . Weil, M. (2021). Rechargeable Batteries of the Future—The State of the Art from a BATTERY 2030+ Perspective. *Advanced Energy Materials*, 12, 25. doi:<https://doi.org/10.1002/aenm.202102904>.
- Gale, D. (1955). The law of supply and demand. *Mathematica Scandinavica*, 3(1), 155 - 169.
- GE03. (2021). GeoCubed selects GeoLith's Li-Capt® DLE Technology for United Downs Pilot Plant and Deep Geothermal Water Samples Successfully Obtained Following GEL Pump Test. Pressemitteilung vom 22. Juli 2021. Abgerufen am 23. März 2022 von <https://geocubed.co.uk/news/geocubed-selects-geoliths-li-capt-dle-technology-for-united-downs-pilot-plant-and-deep-geothermal-water-samples-successfully-obtained-following-gel-pump-test/>.
- GE03. (2022). Co-production of geothermal energy and low-carbon lithium. Abgerufen am 23. März 2022 von <https://cornishlithium.com/projects/lithium-in-geothermal-waters/geocubed/>.
- GE03. (2022a). GeoCubed selects RSE (Ross-shire Engineering) to Provide EPCC Support for The United Downs Pilot Plant and Deep Geothermal Assay Results Confirm Expected Lithium Concentrations. Pressemitteilung vom 11. Januar 2022. Abgerufen am 26. Januar 2022 von <https://geocubed.co.uk/news/geocubed-selects-rse-to-provide-epcc-support-for-the-united-downs-pilot-plant-and-deep-geothermal-assay-results-confirm-expected-lithium-concentrations/>.
- Geothermal Engineering Ltd. (2021). Geothermal Engineering Ltd confirms highest global concentration of lithium in geothermal fluid at its United Downs site (Pressemitteilung 11. August 2021). Abgerufen am 15. Januar 2022 von <https://geothermalengineering.co.uk/lithium-august/>.
- Gielen, D., & Lyons, M. (2022). Critical materials for the energy transition: Lithium, 36 S. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. Abgerufen am 23. August 2022 von <https://www.irena.org/Technical-Papers/Critical-Materials-For-The-Energy-Transition-Lithium>.
- Goldinvest. (2021). Fitch: Lithiumpreise werden weiter steigen (16. November 2021). Abgerufen am 30. April 2022 von <https://goldinvest.de/mining-resources/fitch-lithiumpreise-werden-weiter-steigen>.

- Goldinvest. (2022). Trotz aller Herausforderungen: Lithiumpreis wird extrem hoch bleiben (15. August 2022). Abgerufen am 15. August 2022 von <https://goldinvest.de/mining-resources/trotz-aller-herausforderungen-lithiumpreis-wird-extrem-hoch-bleiben>.
- Grant, A., & Goodenough, K. (2021). Is there enough Lithium to make all the Batteries? Abgerufen am 08. September 2021 von Battery Bits: <https://medium.com/batterybits/is-there-enough-lithium-to-make-all-the-batteries-c3a522c01498>.
- Gregoir, L., & van Acker, K. (2022). Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw material challenge, 112 S. KU Leuven. Abgerufen am 09. Mai 2022 von <https://eurometaux.eu/media/rqocjybv/metals-for-clean-energy-final.pdf>.
- Heimes, H. H., Kampker, A., Wessel, S., Kehrer, M., Michaelis, S., & Rahimzei, E. (2018). Produktionsprozesse einer Lithium-Ionen-Batterie zelle, 22 S. RWTH Aachen University Institute for Production Engineering of E-Mobility Components. Abgerufen am 08. August 2022 von https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaabcgujq.
- Herrmann, A. G. (1961). Über das Vorkommen einiger Spurenelemente in Salzlösungen aus dem deutschen Zechstein. Kali Steinsalz, 3, S. 209 - 220.
- Hilgers, C., & Becker, I. (2020). Lokale Verfügbarkeit von Rohstoffen bei steigender globaler Nachfrage – Aspekte zu resilienten Ressourcenstrategien. World of Mining, 72(5), 254 - 263. Von https://www.researchgate.net/publication/349829218_Local_availability_of_raw_materials_and_increasing_global_demand_-_aspects_of_resilient_resource_strategies_Lokale_Verfuegbarkeit_von_Rohstoffen_bei_steigender_globaler_Nachfrage_-_Aspekte_zu_resilient. abgerufen
- Hilgers, C., Kolb, J., & Becker, I. (2021). Ist die deutsche Ressourcenstrategie resilient?, 76 S. THINKTANK für Industrielle Ressourcenstrategien. Von https://www.thinktank-irs.de/wp-content/uploads/2021/05/RZ_THINKTANK_Broschuere_Bergbau_Verhuettung_Recycling_DE_Web_Einzelseiten_NEU.pdf. abgerufen
- IEA - International Energy Agency. (2017). Energy Technology Perspective 2017, 441 S. OECD / IEA. Abgerufen am 16. September 2022 von <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017>.
- IEA - International Energy Agency. (2018). Global EV Outlook 2018. Towards cross-modal electrification, 139 S. OECD / IEA. Abgerufen am 15. August 2022 von https://iea.blob.core.windows.net/assets/387e4191-acab-4665-9742-073499e3fa9d/Global_EV_Outlook_2018.pdf.
- IEA - International Energy Agency. (2021). Global EV Outlook 2021. Accelerating ambitions despite the pandemic, 101 S. OECD / IEA. Abgerufen am 05. August 2022 von <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>.
- IEA - International Energy Agency. (2021a). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. World Energy Outlook Special Report. Revised Version, March 2022, 287 S. IEA. Abgerufen am 10. August 2022 von <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.
- IEA - International Energy Agency. (2021b). World Energy Model. Part of World Energy Outlook. IEA. Abgerufen am 23. August 2022 von https://iea.blob.core.windows.net/assets/932ea201-0972-4231-8d81-356300e9fc43/WEM_Documentation_WEO2021.pdf.
- IEA - International Energy Agency. (2022). Global EV Outlook 2022 - Securing supplies for an electric future, 221 S. IEA. Abgerufen am 18. Oktober 2022 von <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>.

- Infinity Lithium. (2021). Integrated Underground Scoping Study San José Lithium Project (14. Oktober 2021), 29 S. Abgerufen am 04. November 2021 von <https://company-announcements.afr.com/asx/inf/16796ffa-2c6c-11ec-b1a3-762435244423.pdf>.
- Infinity Lithium. (2022). Infinity & LG Energy Solution extend offtake MoU. Pressemitteilung vom 22. Juni 2022. Abgerufen am 18. Juli 2022 von <https://wcsecure.weblink.com.au/pdf/INF/02533964.pdf>
- Iooss, B., & Saltelli, A. (2017). Introduction to Sensitivity Analysis. In R. Ghanem, H. Owhadi, & D. Higdon, Handbook of Uncertainty Quantification (S. S. 1103 - 1122). doi:10.1007/978-3-319-12385-1_31.
- ITG Informationsportal Tiefengeothermie. (2022). Bruchsal. Abgerufen am 02. November 2022 von <https://www.tiefengeothermie.de/projekte/bruchsal>
- JORC. (2012). Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (The JORC Code), 44 S. AusIMM - The Minerals Institute. Abgerufen am 08. August 2022 von https://www.jorc.org/docs/JORC_code_2012.pdf.
- KBA - Kraftfahrtbundesamt. (2022). Fahrzeugzulassungen (FZ) Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umweltmerkmalen, 53 S. Abgerufen am 13. Juni 2022 von https://www.kba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ13/fz13_2022.pdf?__blob=publicationFile&v=4.
- Keliber. (2021). Mineral resources and ore reserves. Abgerufen am 08. August 2021 von <https://www.keliber.fi/en/geology/mineral-resources-and-ore-reserves/>.
- Keliber. (2022). Progress Report Q1, 23 S. Abgerufen am 04. Juli 2022 von https://www.keliber.fi/site/assets/files/2678/keliber_progress_report_january-march_2022-1.pdf
- Kluge, C. (2021). Batterienhersteller Microvast in Ludwigsfelde: Volle Ladung für Elektromobilität aus Brandenburg. Tagesspiegel online vom 12. Februar 2021. Abgerufen am 08. Juni 2022 von <https://www.tagesspiegel.de/berlin/volle-ladung-fur-elektromobilitat-aus-brandenburg-5389213.html>.
- Kosow, H., & Gaßner, R. (2008). Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien, Werkstattbericht Nr. 103, 88 S. IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. Abgerufen am 24. August 2022 von https://www.izt.de/fileadmin/publikationen/IZT_WB103.pdf.
- Kresse, C., Bastian, D., Bookhagen, B., & Frenzel, M. (2022). Commodity Top News Nr. 67. Lithium-Ionen-Batterierecycling in Deutschland und Europa, 13 S. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Von https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/67_Lithium-Ionen-Batterierecycling.html?nn=1542330 abgerufen
- KSG. (2019). Bundes-Klimaschutzgesetz (12. Dezember 2019). Abgerufen am 22. Dezember 2020 von <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/KSG.pdf>.
- Kushnir, D., & Sandén, B. A. (2012). The time dimension and lithium resource constraints for electric vehicles. Resources Policy, 37(1), 93 - 103. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2011.11.003>.
- Land Brandenburg. (2022). Häufig gestellte Fragen zur Tesla-Ansiedlung. Abgerufen am 29. Juni 2022 von <https://www.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.658136.de>

- Lee, T. D. (1984). Planning and mine feasibility study - An owner's perspective. In Proceedings of the 1984 NWMA Short Course "Mine Feasibility—Concept to Completion.". S. 43 - 101. Spokane, WA: Northwest Mining Association.
- Li, J., Du, Z., Ruther, R. E., An, S. J., David, L. A., Hays, K., . . . Wood, D. (2017). Toward Low-Cost, High-Energy Density, and High-Power Density Lithium-Ion Batteries. *JOM*, 69(9), 1484 - 1496 . doi:10.1007/s11837-017-2404-9.
- Livent. (2018). Lithium Hydroxide Monohydrate, Battery Grade. Data Sheet. Abgerufen am 21. Oktober 2022 von <https://livent.com/wp-content/uploads/2018/09/QS-PDS-1021-r3.pdf>.
- Livent. (2022). Lithium Carbonate, Battery Grade. Data Sheet. Abgerufen am 21. Oktober 2022 von <https://livent.com/wp-content/uploads/2022/09/QS-PDS-1059-r4-Lithium-Carbonate-Battery-Grade-Product-Website.pdf>.
- Mackenzie, W., & Cusworth, N. (2007). The Use and Abuse of Feasibility Studies. Project Evaluation Conference (19. - 20. Juni 2007), S. 65 - 76. Abgerufen am 18. Oktober 2022 von <https://enthalpy.com.au/wp-content/uploads/2013/09/The-Use-and-Abuse-of-Feasibility-Studies-Enthalpy.pdf>
- Marscheider-Weidemann, F., Langkau, S., Baur, S.-J., Billaud, M., Deubzer, O., Eberling, E., . . . Tippner, M. (2021). Rohstoffe für Zukunftstechnologien, 366 S. Berlin: DERA Rohstoffinformationen 50. Abgerufen am 01. Juli 2021 von https://www.deutscherohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-50.pdf;jsessionid=1FB721F0EF156157B131AA630B1A9A10.2_cid292?__blob=publicationFile&v=4.
- Meier, P. (2021). Keine Geothermie in Renchen: Gemeinderat erteilt Vulcan Energy Resources eine Absage. BNN - Badische Neuste Nachrichten online vom 20. Oktober 2021.
- Meier, P. (2021). Keine Geothermie in Renchen: Gemeinderat erteilt Vulcan Energy Resources eine Absage. BNN - Badische Neuste Nachrichten online vom 20. Oktober 2021. Abgerufen am 03. November 2021 von <https://bnn.de/mittelbaden/ortenau/renchen/gemeinderat-renchen-erteilt-vulcan-energy-resources-absage>.
- Mertineit, M., & Schramm, M. (2019). Lithium Occurrences in Brines from Two German Salt Deposits (Upper Permian) and First Results of Leaching Experiments. *MDPI Minerals*, 9(12), 766. doi:<https://doi.org/10.3390/min9120766>.
- Meshram, P., Pandey, B. D., & Mankhand, T. R. (2014). Extraction of lithium from primary and secondary sources by pre-treatment, leaching and separation: A comprehensive review. *Hydrometallurgy*, 150, S. 192 - 208.
- Metalary. (2022). Lithium Price. Abgerufen am 02. September 2022 von <https://www.metalary.com/lithium-price/>.
- Michaelis, S., Rahimzei, E., Kampker, A., Heimes, H., Offermanns, C., Locke, M., & et al. (2020). Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030, 153 S. Frankfurt am Main: VDMA. Von https://www.vdma.org/c/document_library/get_file?uuid=6037f526-9679-43a2-35a1-513090abd700&groupId=34570. abgerufen
- Moos, M. (2021). Achern sagt kategorisch Nein zur Lithium-Erkundung. BNN - Badische Neuste Nachrichten vom 15. September 2021, Nr. 214, S. 33.
- Munk, L. A., Bradley, S. A., Boutt, D., Labay, K., & Jochens, H. (2016). Lithium Brines: A global perspective. *Rev. Econ. Geol.*, 18, S. 339 - 365.
- Netzwerk Yes to Life, No to Mining. (2020). Carta en apoyo "Salvemos la Montaña" de Cáceres / Letter in support of the Platform "Salvemos la Montaña de Cáceres". Abgerufen am 08. November 2021 von

<https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdgU7DO-ItBwzqJsuyNIPAWaGloQCI77J9bmLCWaVgKFbiP5g/viewform>.

- Neumann, J., Petranikova, M., Meeus, M., Gamarra, J. D., Younesi, R., Winter, M., & Nowak, S. (2022). Recycling of Lithium-Ion Batteries—Current State of the Art, Circular Economy, and Next Generation Recycling. *Advanced Energy Materials*, 12, 26 S. doi:10.1002/aenm.202102917.
- Nguyen, H. B. (2020). Minerals for Climate Action - The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. World Bank Group. Abgerufen am 16. Oktober 2020 von <https://pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Climate-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition>.
- Northvolt. (2022). Northvolt in 2022: where we stand (part 1). Abgerufen am 21. Juli 2022 von <https://northvolt.com/articles/northvolt-2022-where-we-stand/>.
- OECD. (2019). *Global Material Resources Outlook to 2060. Economic Drivers and Environmental Consequences*, 214 S. Paris: OECD Publishing. Abgerufen am 03. September 2022 von <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>.
- Öko-Institut. (2017). Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität. Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen. Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende, 80 S. Darmstadt.
- Olivetti, E. A., Ceder, G., Gaustad, G., & Fu, X. (2017). Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals. *Joule*, 1(2), S. 225 - 228. Abgerufen am 15. Mai 2022 von <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.08.019>.
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., . . . Soleck, W. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environment Change*, 42, S. 169 - 180. Von <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>. abgerufen
- Peerawattuk, I., & Bobicki, E. R. (2018). Lithium Extraction and Utilization: A Historical Perspective. In B. Davis, & et al., *The Minerals, Metals & Materials Series* (S. 2209 - 2224). Springer. Von https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8_186. abgerufen
- Rat der EU. (2022). Paket „Fit für 55“: Allgemeine Ausrichtungen des Rates zu Emissionsreduktionen und ihren sozialen Auswirkungen. Pressemitteilung vom 29. Juni 2022. Abgerufen am 04. August 2022 von <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2022/06/29/fit-for-55-council-reaches-general-approaches-relating-to-emissions-reductions-and-removals-and-their-social-impacts/>.
- Regierungsparteien – Sozialdemokratische Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / Die Grünen, Freie Demokratische Partei (FDP). (kein Datum). Koalitionsvertrag 2021 - 2025. Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit, 144 S. Berlin. Abgerufen am 27. Juni 2022 von https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf.
- Reinecker, J., Hochschild, T., Kraml, M., Löschan, G., & Kreuter, H. (2019). Experiences and challenges in geothermal exploration in the Upper Rhine Graben. Den Haag: European Geothermal Congress 11. - 14. June 2019. Von <https://europeangeothermalcongress.eu/wp-content/uploads/2019/07/307.pdf>. abgerufen
- Rio Tinto. (2020). Rio Tinto declares maiden Ore Reserve at Jadar. Abgerufen am 03. November 2021 von <https://www.riotinto.com/-/media/Content/Documents/Invest/Reserves-and-resources/RT-Jadar-Reserves-2020.pdf?rev=c31b0fd7047f46dcb39bc3dea49ccb6>.

- Rio Tinto. (2022). Jadar Project Update. Abgerufen am 08. März 2022 von <https://www.riotinto.com/operations/projects/jadar>.
- Rock Tech Lithium. (kein Datum). Rock Tech Lithium startet Genehmigungsverfahren für Europas ersten Lithiumhydroxid-Konverter. Pressemitteilung vom 22. Februar 2022. Abgerufen am 15. August 2022 von https://res.cloudinary.com/rocktech/image/upload/v1645531336/PM_Genehmigungsverfahren_Rock_Tech_h_82f6ace1aa.pdf.
- Roland Berger. (2022). The Lithium-Ion (EV) battery market and supply chain. Market drivers and emerging supply chain risks. Abgerufen am 03. August 2022 von https://content.rolandberger.com/hubfs/07_presse/Roland%20Berger_The%20Lithium-Ion%20Battery%20Market%20and%20Supply%20Chain_2022_final.pdf.
- S&P Global. (2021). European Metals' Cinovec project to produce low carbon lithium. Abgerufen am 08. März 2022 von <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/metals/112321-european-metals-cinovec-project-to-produce-low-carbon-lithium>.
- Sanjuan, B., Millot, R., Innocent, C., Dezayes, C., Scheiber, J., & Brach, M. (2016). Major geochemical characteristics of geothermal brines from the Upper Rhine Graben granitic basement with constraints on temperature and circulation. *Chemical Geology*, 428, S. 27 - 47.
- Savannah Resources. (2021a). Heads of Agreement between Savannah and Galp re. strategic investment & offtake agreement. Pressemitteilung vom 12. Januar 2021. Abgerufen am 18. Juli 2022 von <https://www.savannahresources.com/investors/rns-feed/rns-announcements/?rid=4019399>.
- Savannah Resources Plc. (2018). Scoping Study for the Mina do Barroso Lithium Project Delivers NPV of US\$356m Solid Basis to Fast Track the Project to a Feasibility Study. Pressemitteilung vom 14. Juni 2018. Abgerufen am 03. November 2021 von <https://www.savannahresources.com/investors/rns-feed/rns-announcements/?rid=4019283>.
- Savannah Resources Plc. (2021). Corporate Presentation, September 2021. Europe's leading conventional lithium project, 29 S. Abgerufen am 03. November 2021 von <https://www.savannahresources.com/media/hhffipfp/savannah-corporate-presentation-september-2021.pdf>.
- Savannah Resources Plc. (kein Datum). Enabling Europe's Energy Transition. AGM Presentation 08.06.22. Europe's Leading Conventional Lithium Project. Abgerufen am 01. Juli 2022 von <https://www.savannahresources.com/media/nasaoof0/savannah-corporate-agm-presentation.pdf>.
- Schmidt, M. (2017). Rohstoffrisikobewertung - Lithium, 140 S. Berlin: 33. DERA Rohstoffinformationen.
- Schmidt, M. (2022). Rohstoffrisikobewertung – Lithium 2030, Update, 29 S. Berlin: DERA - Deutsche Rohstoffagentur. Abgerufen am 15. August 2022 von https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/vortrag-lithium-schmidt-22.pdf?_blob=publicationFile&v=2.
- Simon, B., Ziemann, S., & Weil, M. (2015). Potential metal requirement of active materials in lithium-ion battery cells of electric vehicles and its impact on reserves: Focus on Europe. *Resources, Conservation and Recycling*, S. 300 - 310. Von <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.07.011> abgerufen
- Soltani, M., Kashkooli, F. M., Souri, M., Rafiei, B., Jabarifar, M., Gharali, K., & Nathwani, J. (2021). Environmental, economic and social impacts of geothermal energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 140. Abgerufen am 02. Februar 2022 von <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110750>.

- Speirs, J., Contestabile, M., Houari, Y., & Gross, R. (2014). The future of lithium availability for electric vehicle batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, S. 183 - 193. Abgerufen am 03. August 2022 von <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.018>.
- Steiger, K., Hilgers, C., & Kolb, J. (2022). Factsheet. Notwendigkeit einer resilienten Rohstoffversorgung Vol.2. Herausforderungen bei der Rohstoffversorgung für Deutschland – eine holistische Betrachtung durch Experteninterviews, 18 S. Karlsruhe: THINKTANK für Industrielle Ressourcenstrategien. Von https://www.thinktank-irs.de/wp-content/uploads/2022/05/RZ_THINKTANK_Factsheet_Notwendigkeit-einer-resilienten-Rohstoffversorgung_A4_DE_web.pdf abgerufen
- Swain, B. (2017). Recovery and recycling of lithium: A review. *Separation and Purification Technology*, 172, S. 388 - 403.
- Tagesschau. (2021). Der deutsche Lithium-Schatz vom 18. Oktober 2021 17:04 Uhr. Abgerufen am 11. Juli 2022 von <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/der-deutsche-lithium-schatz-101.html>.
- Tarascon, J. M. (2010). Key challenges in future Li-battery research. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 368, S. 3227 - 3241. doi:10.1098/rsta.2010.0112.
- Tarascon, J. M. (2010a). Is lithium the new gold? *Nature Chemistry*, 2. Abgerufen am 11. März 2022 von <https://www.nature.com/articles/nchem.680>.
- Thielmann, A., Sauer, A., & Wietschel, M. (2015). Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030, 40 S. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- UN. (2020). Sustainable Development Goals, 68 S. United Nations Department of Global Communication. Abgerufen am 05. September 2022 von https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2019/01/SDG_Guidelines_AUG_2019_Final.pdf.
- UNFCCC. (2015). Paris Agreement, 27 S. Abgerufen am 23. August 2022 von https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf.
- UnLimited. (2022). Projektbeschreibung. Abgerufen am 23. März 2022 von <https://www.geothermal-lithium.org/projektbeschreibung>.
- UnLimited. (2022a). Erforschung von alternativen Lithiumsorbenzien. Abgerufen am 23. März 2022 von <https://www.geothermal-lithium.org/news/erforschung-von-alternativen-lithiumsorbenzien>.
- USGS. (1996 - 2022). Mineral Commodity Summaries. Abgerufen am 17. April 2022 von <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries>.
- Vanuytrecht, E., Raes, D., & Wilems, P. (2014). Global sensitivity analysis of yield output from the water productivity model. *Environmental Modelling & Software*, 51, S. 323 - 332. doi:10.1016/j.envsoft.2013.10.017.
- Väyrynen, A., & Salminen, J. (2012). Lithium ion battery production. *J. Chem. Thermodynamics*, 46, S. 80 - 85. doi:10.1016/j.jct.2011.09.005.
- VER. (2020). Positive PFS & Maiden JORC Ore Reserve: Zero Carbon Lithium® Project. ASX Release 15. Januar 2020. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 15. Januar 2021 von <https://vul.live.irmau.com/site/PDF/6a9c79d2-5c99-40d7-ba32-72cd6ea3a6f6/PositivePreFeasibilityStudy>.

- VER. (2021). Unternehmenspräsentation vom 12. November 2021. Direct Lithium Extraction (DLE) Technical Update, 26 S. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 02. März 2022 von <https://www.investi.com.au/api/announcements/vul/f52e369a-522.pdf>.
- VER. (2021a). Binding lithium offtake agreement with Umicore. ASX Release vom 18. Oktober 2021, 5 S. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 07. Juli 2022 von <https://www.investi.com.au/api/announcements/vul/07faa4f6-336.pdf>
- VER. (2021b). Binding lithium offtake agreement with Renault. ASX Release vom 22. November 2021, 4 S. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 07. Juli 2022 von <https://www.investi.com.au/api/announcements/vul/970dcad4-ec1.pdf>.
- VER. (2021c). Vulcan Energy signs lithium supply agreement with Stellantis. ASX Release vom 29. November 2021, 4 S. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 07. Juli 2022 von <https://www.investi.com.au/api/announcements/vul/6af825a6-35d.pdf>.
- VER. (2021d). Binding lithium offtake agreement with Volkswagen Group. ASX Release vom 08. Dezember 2021, 4 S. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 07. Juli 2022 von <https://www.investi.com.au/api/announcements/vul/26da5058-1f4.pdf>.
- VER. (2022). Corporate Presentation April 2022, 56 S. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 01. Juli 2022 von <https://v-er.eu/wp-content/uploads/2022/04/Apr-Corp-Preso.pdf>.
- VER. (2022a). Grant of further licenses significantly grows Zero Carbon Lithium™ Project. ASX Release vom 04. Januar 2022. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 26. Januar 2022 von <https://vul.live.irmau.com/site/PDF/cdb9e9e7-e8d6-4fd1-8c0a-b6f77785de41/NewlicencessignificantlygrowsZeroCarbonLithiumProject>.
- VER. (2022b). Agreement with Nobian for the development of the Central Lithium Plant. ASX Release vom 11. Januar 2022. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 26. Januar 2022 von <https://vul.live.irmau.com/site/PDF/8af83d3f-6c26-4a6e-aa42-52315c5f89d2/AgreementwithNobianforthedevelopmentoftheCLP>.
- VER. (2022c). Binding lithium offtake agreement with LG Energy Solution. ASX Release vom 31. Januar 2022, 5 S. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 07. Juli 2022 von <https://www.investi.com.au/api/announcements/vul/81420fef-8a4.pdf>.
- VER. (2022d). Corporate Presentation. February 2022, 58 S. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 01. Juli 2022 von <https://www.investi.com.au/api/announcements/vul/1c6af37b-c1e.pdf>.
- VER. (2022e). Corporate Presentation. July / August 2022, 65 S. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 15. August 2022 von <https://www.investi.com.au/api/announcements/vul/fa49dc9c-01a.pdf>.
- Vikström, H., Davidsson, S., & Höök, M. (2013). Lithium availability and future production outlooks. *Applied Energy*, 110, S. 252 - 266. doi:10.1016/j.apenergy.2013.04.005.
- Volkswagen. (2021). Volkswagen enters into strategic partnerships for the industrialization of battery technology. Pressemitteilung vom 12. August 2021. Abgerufen am 31. August 2022 von <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/volkswagen-enters-into-strategic-partnerships-for-the-industrialization-of-battery-technology-7680>

- Volkswagen. (2022). Batteriezellenfabriken: Neue Kapazitäten in Europa. Abgerufen am 01. Juli 2022 von <https://www.volkswagen.de/de/elektrofahrzeuge/elektromobilitaet-erleben/elektroauto-technologie/batteriezellenfabriken-neue-kapazitaeten-in-europa.html>.
- von Gangl. (2021). Gemeinderat Rheinmünster erteilt Suche nach Lithium und Erdwärme im Boden Absage. 06. Oktober 2021. BNN - Badische Neuste Nachrichten. Abgerufen am 03. November 2021 von <https://bnn.de/mittelbaden/buehl/rheinmuenster/gemeinderat-rheinmuenster-stoppt-suche-nach-lithium-und-erdwaerme-im-boden>.
- Weil, M., & Ziemann, S. (2014). Recycling of Traction Batteries as a Challenge and Chance for Future Lithium Availability. Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications. Lithium-Ion Batteries, S. 509 - 528. doi:10.1016/B978-0-444-59513-3.00022-4.
- Wellmer, F.-W. (2008). Reserves and resources of the geosphere, terms so often misunderstood.1. Is the life index of reserves of natural resources a guide to the future? Z. dt. Ges.Geowiss., 159(4), S. 575 - 590.
- Zinnwald Lithium Plc. (2021). Developing the next lithium producer in the heart of Europe, 25 S. Corporate Presentation. Abgerufen am 08. August 2021 von <https://wp-zinnwald-lithium-2020.s3.eu-west-2.amazonaws.com/media/2021/07/04194422/ZNWD-presentation-05.07.21-2.pdf>
- Zinnwald Lithium Plc. (2022). Focused on becoming an important supplier to Europe's fast-growing battery sector, 18 S. Corporate Presentation. Abgerufen am 07. Juli 2022 von <https://wp-zinnwald-lithium-2020.s3.eu-west-2.amazonaws.com/media/2022/03/Zinnwald-Investor-Presentation-16.03.22-Final.pdf>.

Weitere Informationen:

www.thinktank-irs.de