

Batterierohstoff Lithium

Technologische und ökologische Analyse der
industriellen Lithiumgewinnung



Inhalt

- 1. Einleitung 4
- 2. Globale Lithiumvorkommen 5
- 3. Lithiumhandel und Rohstoffpreise 8
- 4. Lithiumrohstoffe und Lithiumgewinnung 9
- 5. Lithium aus Sole 10
 - 5.1 Förderung in Südamerika 10
 - 5.2 Die Gewinnung von Lithiumcarbonat aus Sole 12
- 6. Lithium aus Festgestein 14
 - 6.1 Mineralische Vorkommen 14
 - 6.2 Pegmatitkonzentratproduktion 15
 - 6.3 Herstellung von Lithiumcarbonat mittels Säureprozess 18
- 7. Geothermale Tiefenwässer als zukünftige Lithiumquellen 20
- 8. Ökologische Rohstoffbetrachtung 21
- 9. Relevanz und Chancen des Recyclings 26
- 10. Zusammenfassung 27
- 11. Appendix / Anhang 28
- 12. Literaturangaben 28
- 13. Autor und Kontakt / Impressum 31

1. Einleitung

Lithium ist aufgrund seines Haupteinsatzbereichs als Rohstoff für die Batteriezellproduktion ein erfolgskritischer Rohstoff für die Energiewende [1-3]. Insbesondere in den letzten zehn Jahren ist der Anteil der Lithiumnutzung für Batterien an der Gesamtförderung stark angestiegen. Im Jahr 2014 lag dieser noch bei 35 Prozent, während er heute bereits 87 Prozent erreicht. Weitere Bedarfsbereiche wie der Einsatz in Glaskeramiken, Schmiermitteln, in der Luftaufbereitung oder im medizinischen Bereich nehmen dementsprechend anteilig ab [4, 5]. Allerdings ist diese Veränderung der

Verwendungszwecke insbesondere der massiv steigenden Nachfrage geschuldet. Entsprechend ist die Lithiumversorgung zunehmend von großer wirtschaftlicher und politischer Relevanz. Diese Problematik geht mit den global limitierten Lithiumreserven einher. Um diese strategische Relevanz, die ökologischen Auswirkungen sowie die Wichtigkeit des Recyclings zum Aufbau von Kreislaufwirtschaft von Lithium im Gesamtkontext betrachten zu können, ist ein Verständnis der derzeit angewandten Fördermethoden und Produktionsprozesse sinnvoll.

Dieses Whitepaper...

I... gibt einen Überblick über die globale Verfügbarkeit der kommerziell nutzbaren Lithiumvorkommen und die großindustriell aktiven Unternehmen in der Lithiumförderung,

II... liefert eine detaillierte Analyse der industriell angewandten Produktionsmethoden von Lithiumverbindungen als Rohstoffe für die Batteriezellherstellung und die damit verbundenen ökologischen Herausforderungen und Potenziale,

III... verknüpft die dynamische Entwicklung des Lithiummarktes mit wachsender Nachfrage im Batteriebereich mit dem zunehmend relevanter werdenden Themenfeld des Lithiumrecyclings als langfristige Ergänzung zur Primärversorgung mit Lithium.

2. Globale Lithiumvorkommen

Weltweit ist Lithium ein mit etwa 0,006 Prozent (60 ppm, parts per million) Anteil an der Erdkruste relativ häufig vorkommendes Element, ähnlich häufig wie Cobalt und sogar häufiger als Blei [2, 6, 7]. Aufgrund seiner hohen Reaktivität tritt es jedoch nicht in elementarer Form auf, sondern ist hauptsächlich in Salzen und Gesteinen gebunden, aus denen es extrahiert werden muss. In vielen Anwendungen, wie auch gängigen Lithium-Ionen-Batterien, ist Lithium oft ebenfalls nicht elementar, sondern ionisch als Bestandteil von Salzen zu finden. Der Lithiumanteil kann dabei entsprechend auf unterschiedliche Art angegeben sein. Differenziert wird hier in Lithium-Äquivalente, also den Gewichtsanteil des elementaren Lithiums, und zum Beispiel Lithiumcarbonat-Äquivalente (LCE) mit reinem Li_2CO_3 als Referenz. In diesem Dokument werden, sofern nicht anders vermerkt, Lithium-Mengen in Lithium-Äquivalenten angegeben.

Für die Bewertung der Verfügbarkeit ist die Unterscheidung zwischen Ressourcen und Reserven relevant. Während Lithiumressourcen die Vorkommen mit ausreichend hoher Konzentration zur prinzipiell möglichen Förderung beschreiben, sind Reserven definiert als die Ressourcen, die unter anderem aufgrund ihrer Reinheit, Lage und Tiefe des Vorkommens mit heute etablierten Methoden bereits förderbar sind [8]. Durch technologische Entwicklungen können sich Ressourcen künftig zu Reserven wandeln.

Global ist Lithium in großer Menge in Form von gelösten Salzen in den Ozeanen mit einer Konzentration von rund

0,18 ppm verteilt, sodass insgesamt ein rechnerisches Vorkommen von etwa 180 Mrd. t Lithium vorliegt, das aufgrund der hohen Verdünnung allerdings heutzutage nicht kommerziell erschließbar ist [6, 9, 10]. An Land sind Lithiumvorkommen auf allen Kontinenten zu finden (siehe Abbildung 1) [3]. Generell wird Lithium aktuell im industriellen Maßstab aus zwei Arten von Vorkommen gewonnen:

- (A) aus konzentrierten wässrigen Salzlösungen, der sogenannten Sole, und
- (B) aus Festgesteinen, ähnlich wie im klassischen Erzbergbau.

Insgesamt wurden die global verfügbaren Reserven im Jahr 2023 auf 28 Mio. bis 44 Mio. t Lithium geschätzt, die Ressourcen auf 105 Mio. t [4, 8]. Für das Jahr 2030 wird von einem jährlichen Bedarf an Lithium von 0,32 bis 0,6 Mio. t ausgegangen [2]. Europa besitzt an den Reserven mit rund 2,5 Prozent allerdings den geringsten Anteil, die Vorkommen haben eine Größe von etwa 950 kt in Serbien, 100 kt in Österreich und 10 kt in Portugal und werden bisher nicht industriell abgebaut. Die Förderung in Serbien befindet sich derzeit jedoch im Entwicklungs- und Aufbaustadium [2, 8]. Die weltweit größten Vorkommen befinden sich mit 43,6 Prozent in Südamerika. Nordamerika verfügt über 25,2 Prozent und Australien und Asien zusammen über 25,4 Prozent [8]. Die Verteilung von Festgesteinsvorkommen ist global breiter gestreut und Solevorkommen sind nur lokal in China, in Südamerika im sogenannten Lithiumdreieck, und in Nordamerika zu finden.



© Alexander Schimmeck / unsplash.com

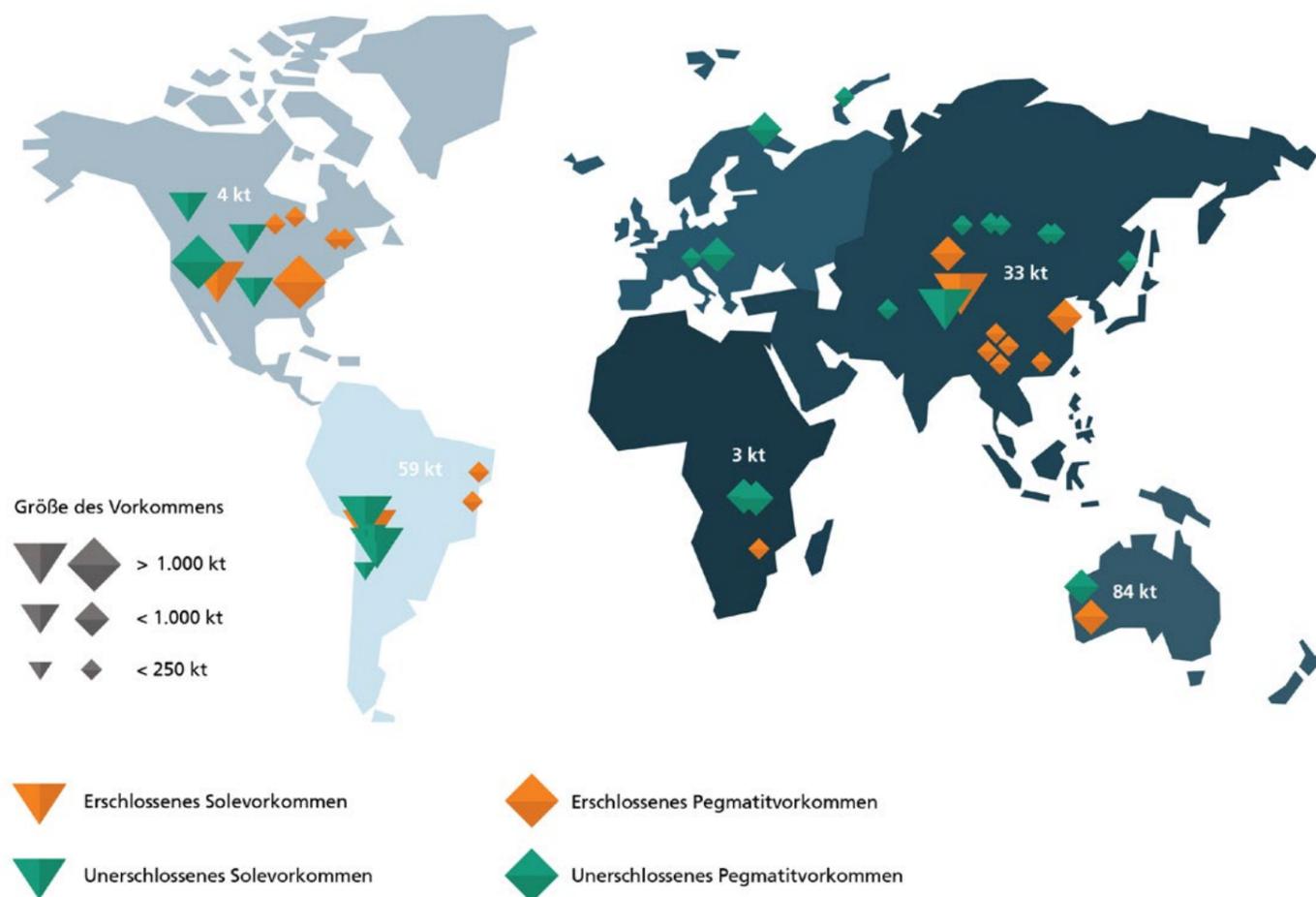


Abbildung 1: Weltweite große Lithiumvorkommen an Land. Die Vorkommen sind an der unteren Spitze der Symbole lokalisiert, die angegebenen Fördervolumen der Kontinente gelten für das Jahr 2023 (Daten für die USA aus 2021) [4, 8, 11, 12]. Die Größe der einzelnen erschlossenen Vorkommen (mit laufender Förderung) korreliert hierbei nicht zwangsläufig mit der jeweiligen Fördermenge, ersichtlich am Beispiel der Fördermengen in Nordamerika verglichen mit den Vorkommensgrößen.

Lithiumförderung in 2024

Wird die aktuelle Lithiumförderung (für das Jahr 2024) betrachtet, entfallen 37 Prozent auf Australien (2023: 48 Prozent), 20 Prozent auf Chile (2023: 26 Prozent), 17 Prozent auf China und 8 Prozent auf Argentinien. Die nordamerikanischen Vorkommen machen, trotz ihrer Größe, kaum Anteile an der Förderung aus [2, 4, 13].

Ermittelt man zudem die wichtigsten Unternehmen in der Lithiumförderung, sind global nur wenige für beinahe den gesamten Rohstoffabbau verantwortlich. Tabellarisch sind im Folgenden die sechs größten Unternehmen mit Firmensitz, Abbauland, Fördervolumen und globalem Marktanteil im Jahr 2020 gelistet (Tabelle 1). Kumuliert machten diese einen Marktanteil von über 71 Prozent aus [2].



Lithium ist weltweit in unterschiedlichen Vorkommen zu finden und durch die steigende Nachfrage ein global begehrter Rohstoff.«

Marktanteile der Lithiumförderer

Die globale Lithiumproduktion ist durch eine starke Marktkonzentration geprägt und lässt sich als Oligopol charakterisieren. Ein Beispiel für die wachsende Bedeutung der Branche: Das »Time Magazine« führt Albemarle, einen der weltweit größten Lithiumproduzenten, unter den 100 einflussreichsten Unternehmen der Welt [17]. Langfristig ist jedoch davon auszugehen, dass mehr Firmen in die

Lithiumwertschöpfungskette investieren und die Produktion sich damit breiter diversifiziert. Insbesondere die bisher nicht geförderten Reserven in Nordamerika oder Afrika bieten dafür ein hohes Potential. Angekündigte Betriebserweiterungen und geplante Neuprojekte bis zum Jahr 2030 würden eine jährliche zusätzliche Produktion von 136 bis 276 kt Lithium-Äquivalent ermöglichen [2].

Tabelle 1: Lithiumförderunternehmen mit Fördermengen für die Jahre 2020 und 2023 sowie den Marktanteilen im Jahr 2020. Angaben in Lithium-Äquivalenten [2, 14-16].

Unternehmen	Firmensitz	Abbauland	Förderung 2020	Marktanteil 2020	Förderung 2023
Albermarle Co.	USA	CHL, AUS	16.400 t	21,2 %	39.000 t
SQM S.A.	Chile (CHL)	CHL	13.200 t	17,0 %	39.500 t
Tiangi Lithium Corp	China (CN)	CN, AUS	8.400 t	10,9 %	16.000 t
Ganfeng Lithium Co.	China	CN, AUS, ARG	6.800 t	8,8 %	30.000 t
Mineral Resources Ltd.	Australien	AUS	5.600 t	7,3 %	-

3. Lithiumhandel und Rohstoffpreise

Lithium wird hauptsächlich in Form von pegmatit- bzw. spodumenhaltigen Festgesteinskonzentraten oder als einer der beiden Batterierohstoffe Lithiumcarbonat oder Lithiumhydroxid gehandelt. Als Pegmatit wird die übergeordnete Gesteinsart bezeichnet, Spodumen ist das für die Lithiumförderung relevanteste Mineral aus dieser Gesteinsart. Es existieren jedoch weitere förderbare, lithiumhaltige Pegmatitgesteine, siehe dazu Kapitel 6.1 [2, 10].

Für die Batterieherstellung ist eine hohe Reinheit des Rohstoffs notwendig, »so weist als »battery grade« charakterisiertes Lithiumcarbonat beispielsweise einen Reinheitsgrad von mehr als 99,5 Prozent auf [2]. Hervorgerufen durch die wachsende Nachfrage im Zuge der Energiewende, dem Hauptverwendungszweck für Lithium als Batterierohstoff und der immer größer werdenden Bedeutung von Energiespeichern, sind die Preise für alle drei Handelsformen in den vergangenen Jahren stark angestiegen. Sie unterliegen aktuell jedoch einem starken Preiskampf, der zu hoher Volatilität führt [18]. Mit Höchstpreisen von über 80.000 US\$/t für Lithiumcarbonat (Reinheit > 99,5 Prozent) und Lithiumhydroxid (in Form von Monohydrat

$\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$, Reinheit > 56,5 Prozent) beziehungsweise über 5900 US\$/t für Spodumenkonzentrate (> 5 Prozent Li_2O -Anteil) im Jahr 2022 wiesen alle diese Produkte Preissteigerungen von 1000 bis 1500 Prozent im Vergleich zu Dezember 2020 auf [2, 18-20]. Abbildung 2 zeigt die Entwicklung für einen Zeitraum von fünf Jahren in China, dem größten Markt für Lithium [19]. Der starke Preisabfall seit Anfang 2023 lässt sich mit der Produktionssteigerung und Kapazitätserweiterung im Zuge der hohen Nachfrage in den Vorjahren und der Lukrativität durch die massiven Preissteigerungen seit 2022, sowie chinesischer Subventionspolitik, erklären. Trotz weiterhin hoher Nachfrage wurde diese durch das neue Angebotsvolumen überkompensiert.

Zur Einordnung des weltweiten Lithiumbedarfs, folgende vereinfachte Rechnung: Ein Tesla Model 3 Standard Range besitzt eine LFP-Batterie mit 60 kWh Kapazität und damit eine im Kathodenmaterial verbaute Lithiummenge von rund 25,6 kg Lithiumcarbonat-Äquivalent (LCE, entspricht 4,8 kg Lithium) [21]. Aus einer Tonne Li_2CO_3 lassen sich folglich die Batterien für 39 Fahrzeuge dieses Typs herstellen.

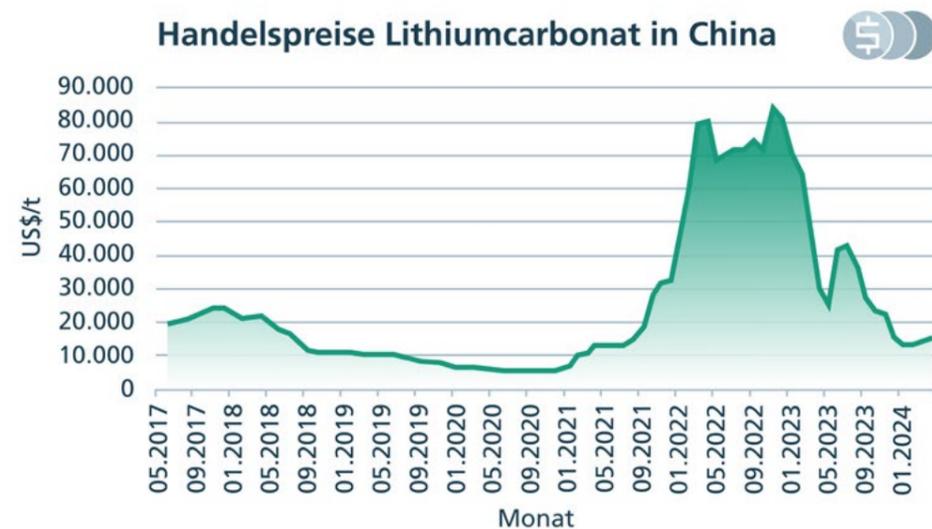


Abbildung 2: Preisentwicklung Lithiumcarbonat in China 2017 bis 2024 [19].

4. Lithiumrohstoffe und Lithiumgewinnung

Mit etwa 60 Prozent der weltweit geförderten Lithiumreserven machen die pegmatit-haltigen Festgesteinsvorkommen vor den Solevorkommen den größten Anteil aus. Die Förderung aus geothermalen Tiefenwässern hat bisher keine industrielle Relevanz, wird aber in den kommenden Jahren zunehmend größer werden [20, 22]. Dies ist insbesondere für den Standort Deutschland interessant, da längerfristig im Gebiet des Oberrheingrabens Lithiumressourcen in Form von geothermalen Tiefenwässern mit einer geschätzten Vorkommensgröße von 2,5 bis 2,8 Mio. t erschlossen werden könnten (siehe Kapitel 7) [2, 20, 23].

Lithium ist hauptsächlich als hochreines Lithiumcarbonat oder Lithiumhydroxid für die Batteriezellproduktion als Rohstoff nutzbar. Außerdem spielen für weitere Anwendungen elementares Lithiummetall, sowie einige

weitere Salze (LiCl , LiBr , Li_2SO_4) eine Rolle. Eine Umwandlung der verschiedenen Rohstoffe ineinander mit geeigneten Reaktionen ist technologisch etabliert (Abbildung 3) [2, 6, 24].

Hauptprodukt der Lithiumgewinnung aus Sole ist Lithiumcarbonat. Da die Produktion sich global auf wenige Standorte in hauptsächlich Südamerika und China beschränkt, machen die Transporte einen signifikanten Anteil an Produktkosten und verursachten Treibhausgasemissionen aus [25].

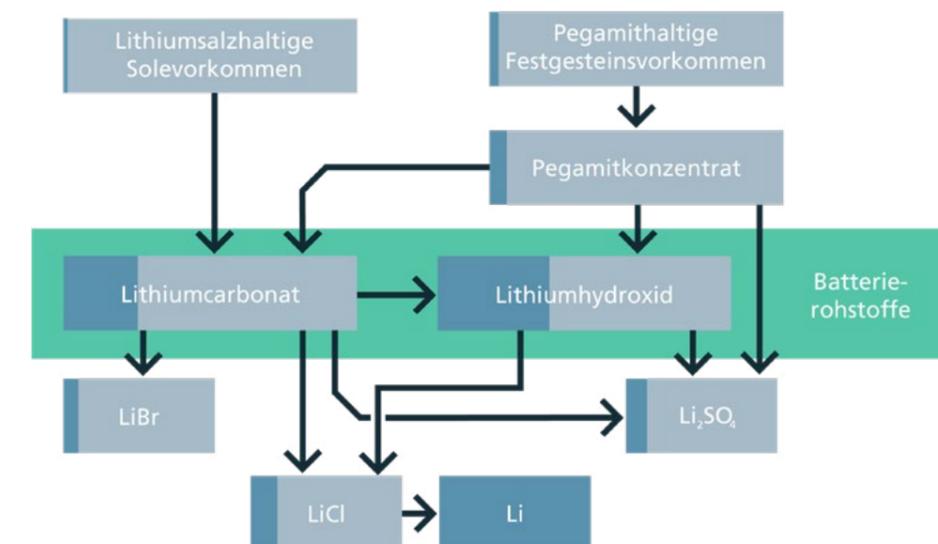


Abbildung 3: Umwandlungen ausgewählter lithiumhaltiger Chemikalien mit industrieller Relevanz. Der Gewichtsanteil an Lithium ist durch die blaue Hintergrundfarbe dargestellt. Für Rohstoffe und Rohstoffkonzentrate wurde ein Näherungswert angenommen. Grün hinterlegt sind die klassischen Batterierohstoffe.

5. Lithium aus Sole

5.1 Förderung in Südamerika

Konzentrierte, lithiumhaltige Salzlösungen, die sogenannte Sole, werden in einem mehrstufigen Prozess zur Gewinnung von Lithiumcarbonat verwendet. Solevorkommen zur effizienten Lithiumgewinnung mit ausreichend hoher Lithiumkonzentration zur Nutzung in der Verdunstungsmethode kommen hauptsächlich in unterirdischen Grundwasserleitern unter eingetrockneten Salzseen vor [10]. Von diesen befinden sich etwa 70 Prozent im sogenannten Lithiumdreieck, der Region um das Dreiländereck von Chile, Argentinien und Bolivien [8]. Allein 38 Prozent der globalen Solevorkommen entfallen auf Bolivien und 25 Prozent auf Chile, der heutigen Hauptfördernation. Es folgen Solevorkommen in China bzw. Tibet mit etwa 19 Prozent. Die geförderte Sole besteht hauptsächlich aus konzentrierter, wässriger Natriumchloridlösung (NaCl, Kochsalz) mit einem Salzgehalt von rund 350 kg/m³, wobei der durchschnittliche Lithiumanteil lediglich etwa 0,17 Prozent (1700 ppm) an der gesamten Sole ausmacht [2, 26, 27]. In den Ozeanen sind zum Vergleich rund 35 kg/m³ Salz mit 0,000018 Prozent (0,18 ppm) Lithiumanteil im Wasser enthalten.

Bei der Lithiumgewinnung werden in den unterschiedlichen Prozessschritten große Mengen an Wasser aufgewendet. Hierbei ist die Unterscheidung in Sole, aufbereitete Industrie- oder Abwässer und Frischwasser notwendig (vgl. Abbildung 4). Die Sole hat aufgrund des hohen Salzgehalts keinen weiteren industriellen oder landwirtschaftlichen Nutzen, macht im Prozess jedoch den Hauptanteil aus. Insbesondere zur Beurteilung der Nachhaltigkeit der Prozesse ist diese Differenzierung relevant, wird jedoch oft in Berichterstattungen über die Lithiumförderung ausgelassen [22, 26]. Eine Vermischung

von Frischwasser und Sole durch Nachfließen in abgepumpte unterirdische Grundwasserschichten ist je nach geologischer Gegebenheit allerdings nicht sicher auszuschließen. Dies könnte ursächlich für einen höheren Frischwasserverbrauch sein, als sich direkt aus dem Prozess, in dem dieses Frischwasser möglichst im Kreislauf geführt wird, erschließen lässt [2, 22]. Die Förderhöchstmengen von Sole und die Nutzungsrechte von Frischwasser sind streng geregelt, beispielsweise durch die Corporación de Fomento de la Producción, Verband zur Produktionsförderung (CORFO) in Chile [20]. Dies ist beispielsweise für den Salar de Atacama, den größten (gemessen am Lithiumvorkommen) kommerziell genutzten Salar zur Lithiumförderung mit 3000 km² Fläche für die beiden ansässigen Firmen SQM und Albemarle der Fall. Anzumerken ist dabei, dass der summierte Anteil dieser Firmen an der Frischwasserförderung nur im einstelligen Prozentbereich liegt [2, 27]. Das meiste Wasser wird von anderen Industriesparten, wie etwa der Kupferindustrie, oder der Landwirtschaft, der Bevölkerung und dem Tourismus genutzt. SQM besitzt eine Genehmigung zur Soleförderung von 1600 L/s und Frischwasserförderung von 331 L/s, bei Albemarle sind es 443 L/s und 24 L/s. Die Frischwasserlizenzen machen dabei 6,9 und 0,5 Prozent der insgesamten Kontingente aus, über 50 Prozent entfallen auf andere Industrien mit der Kupferindustrie als Hauptabnehmer. Chile ist das Land mit der weltweit größten Kupferförderung. Die beanspruchten Flächen am Salar de Atacama zur Evaporation (Verdunstung) zur Aufkonzentrierung und Deponierung von Salzabfällen durch die genannten Firmen betragen 19 km² für SQM und 6 km² für Albemarle, umgerechnet rund 0,8 Prozent des Salars.

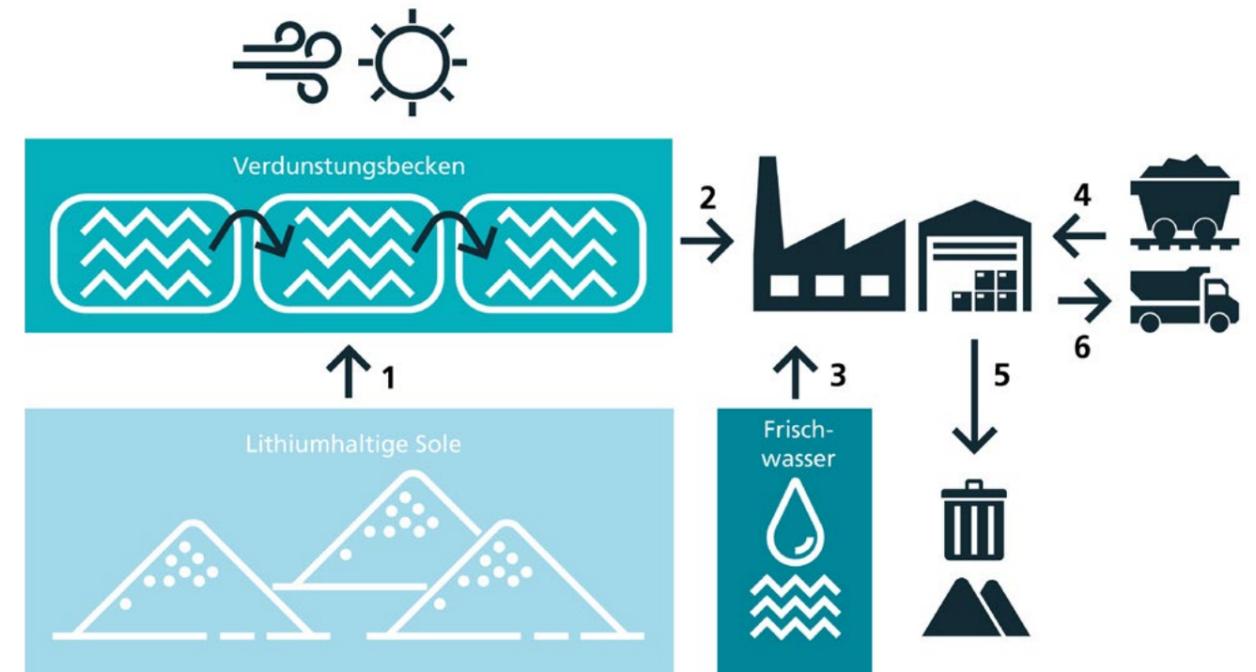


Abbildung 4: Übersicht Lithiumgewinnung aus Sole. 1. Soleförderung in Kaskade oberirdischer Verdunstungsbecken; 2. Einleitung des Solekonzentrats in Produktionsanlage; 3. Frischwasserentnahme aus dem Grundwasser; 4. Anlieferung weiterer Prozesschemikalien; 5. Deponierung von Salzabfällen aus der Produktion; 6. Abtransport des Lithiumcarbonats.

5.2 Die Gewinnung von Lithiumcarbonat aus Sole

Lithium aus Solevorkommen wird global in sieben von acht Firmen im großindustriellen Maßstab durch solare Verdunstung gewonnen (im Folgenden stark vereinfacht als »Soleprozess« bezeichnet) [22]. Eine stark vereinfachte Darstellung des gesamten Prozesses bis zur Lithiumcarbonatgewinnung ist in Abbildung 5 zu finden. Der Prozess basiert im Wesentlichen auf der unterschiedlichen Löslichkeit der in der Sole enthaltenen Salze und dient der gezielten Abtrennung von Alkali- und Erdalkalisalzen sowie weiteren Bestandteilen.

Um die Salzkonzentration zu Beginn des Prozesses zu erhöhen, wird die Lithiumgewinnung mittels Verdunstungsmethode angewendet. Bei dieser Methode wird die Sole aus den unterirdischen Grundwasserleitern in Becken an der Oberfläche gepumpt und dort, begünstigt durch die trockenen klimatischen Bedingungen, durch Wind und Sonne unter Wasserverdunstung konzentriert. Zur Gewinnung einer Tonne Lithiumcarbonat sind je nach Sole 100 bis 800t hiervon notwendig. Der Konzentrationsprozess verläuft über 10–24 Monate und dabei verdampfen etwa 90 Prozent des ursprünglichen Wassers. Der Gehalt an Lithiumchlorid (LiCl) beträgt anschließend rund 6 Prozent [26]. Während der Verdunstung der Sole fallen zunächst große Mengen an Natriumchlorid (NaCl) und Kaliumchlorid (KCl) aus, da sie im Vergleich zu Lithiumchlorid (LiCl) eine geringere Löslichkeit in Wasser aufweisen (bei 20 °C: NaCl = 317 g/L, KCl = 355 g/L, LiCl = 569 g/L [28]) und in höheren Konzentrationen vorliegen. Dies führt zu einer ersten Anreicherung des in Lösung verbleibenden Lithiumanteils in der zunehmend konzentrierten Sole [22, 29]. Ausgefallene Salze werden hierbei oft nicht weiterverwendet und gelten als zu deponierender Abfall, der jedoch nicht giftig oder umweltschädlich ist [29]. Eine Wertschöpfung weiterer Alkalimetalle aus diesen Salzen würde ökologisch vorteilhaft sein, wird zurzeit allerdings aus ökonomischen Gründen nicht umgesetzt.

Das Solekonzentrat wird in Chile in zwei Fabriken zu Li_2CO_3 und in einer weiter zu LiOH verarbeitet, in Argentinien befindet sich neben der Li_2CO_3 -Produktion auch eine Fabrik für die Herstellung von LiCl als Produkt [26]. Wie bereits erwähnt, wird aus Sole zumeist das Carbonat gewonnen, die Gewinnung von metallischem Lithium erfolgt bevorzugt mittels Schmelzflusselektrolyse aus Lithiumchlorid [2, 24]. Die Verarbeitung des Solekonzentrats beginnt in Produktionsanlagen außerhalb des Salars mit der Verdünnung des Konzentrats auf unter 1,2 Prozent Salzkonzentration. Das hierfür aufgewendete Wasser stammt überwiegend aus Aufbereitungsanlagen und/oder einem internen Wasserkreislauf in der Produktionsanlage [2]. Die anschließenden Aufreinigungs- und Fällungsprozesse richten sich nach den spezifischen Eigenschaften der Sole, die je nach Förderstandort variieren. Die Anteile der enthaltenen Ionen unterscheiden sich lokal in Abhängigkeit vom jeweiligen Salar, wodurch individuelle Prozessanpassungen erforderlich werden.

Einige Bestandteile der Sole lassen sich nicht durch einfache Fällungsreaktionen abtrennen und erfordern daher bereits im frühen Stadium des Reinigungsprozesses spezifische Verfahren. Zu diesen zählen insbesondere Borate [24, 29]. Zur industriellen Entfernung dieser Verbindungen wird auf die Flüssig-Flüssig-Extraktion mit organischen Lösungsmitteln zurückgegriffen [22, 26, 30]. Die Herausforderung dabei liegt in der begrenzten Löslichkeit der Borat-Anionen in organischen Medien. Um diese zu erhöhen, werden die Borate chemisch in besser lösliche Borsäureester überführt. Beispielsweise lassen sich dabei Salz- oder Schwefelsäure zur Einstellung des pH-Wertes, 2-Ethylhexanol (großtechnisch hergestellter Alkohol) oder alkylsubstituierte Hexandiole als Alkohol zur Esterbildung und Toluol oder Kerosin als Lösungsmittel verwenden [26, 30–32]. Lösungsmittelreste werden großtechnisch aus der Sole durch Waschen mit Wasser entfernt [22].

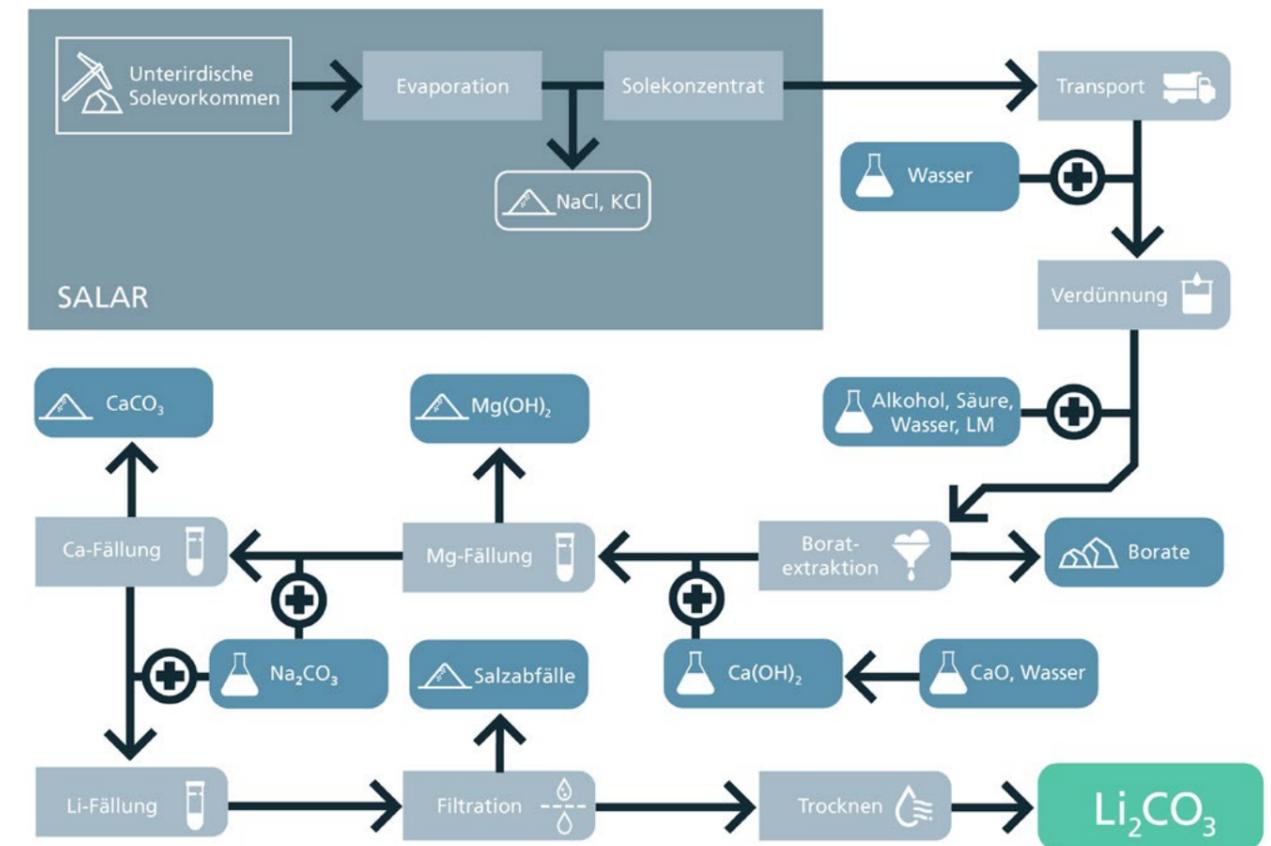


Abbildung 5: Vereinfachtes Prozessschema für die Gewinnung von Lithiumcarbonat aus Sole.

Zur Abscheidung von Magnesiumionen wird Calciumoxid (CaO) eingesetzt, das zunächst durch Reaktion mit Wasser zu Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) umgesetzt wird. In der Sole führt das entstehende Calciumhydroxid bei einem basischen pH-Wert > 9 zur Fällung von Magnesiumhydroxid ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). Generell ist die Trennung von Lithiumionen (Li^+) und Magnesiumionen (Mg^{2+}) schwierig, da beide aufgrund des vergleichbaren Ionenradius chemisch ähnliche Eigenschaften aufweisen (sogenannte Schrägbeziehung im Periodensystem) [6, 10, 29]. Magnesiumhydroxid ist bei 20 °C in Wasser praktisch unlöslich, Lithiumhydroxid hat mit 113 g/L einen vergleichsweise sehr hohen Löslichkeitswert [28]. Die zugeführten Calciumionen des Calciumhydroxids können durch Zugabe von Natriumcarbonat als Calciumcarbonat (CaCO_3) gefällt werden. Die Feststoffe werden jeweils durch Filtration abgetrennt. Calciumcarbonat kann anschließend durch Röstung wieder zu Calciumoxid regeneriert werden und erneut den Prozess durchlaufen.

Das Lithium wird final durch Zugabe von Natriumcarbonat (Na_2CO_3) als Lithiumcarbonat gefällt. Auch hier sind die Unterschiede in der Löslichkeit der Salze ausschlaggebend: Für Na_2CO_3 beträgt die Löslichkeit 217 g/L, für Li_2CO_3 nur 8,4 g/L [28]. Um die gewünschte Reinheit zur Batterieproduktion (»Battery Grade«) von über 99,5 Prozent Lithiumcarbonat zu erhalten, wird das Rohprodukt mehrfach mit Wasser gewaschen und anschließend getrocknet [22, 33].

Die Weiterverarbeitung zu Lithiumhydroxid (LiOH) aus Lithiumcarbonat erfolgt durch die Reaktion mit Calciumhydroxid, bei der neben LiOH dementsprechend CaCO_3 entsteht [34]. Alle Salze mit Ausnahme des LiOH sind in Wasser schlecht löslich, wodurch die Umsetzung eine lange Reaktionszeit benötigt. Die Notwendigkeit von weiteren Reaktions-, Trenn- und Trocknungsschritten wirkt sich negativ auf die ökologische Bilanz des Produktes verglichen mit der des Lithiumcarbonats aus, allerdings kann etwa die bessere Löslichkeit von LiOH in folgenden Anwendungen vorteilhaft sein [26].



© Miningwatch Portugal / unsplash.com

6. Lithium aus Festgestein

6.1 Mineralische Vorkommen

Neben den Solevorkommen mit rund 40 Prozent Förderanteil stammen 60 Prozent des global geförderten Lithiums aus pegmatithaltigem Festgestein. Hierbei liegt das Lithium in diversen Mineralien mit unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen und in Kombination mit sogenanntem »tauben Gestein« vor, als welches Gestein bezeichnet wird, das in diesem Fall kein Lithium beinhaltet [2, 35]. War in der Sole der Hauptbestandteil das leicht zu entfernende Wasser, ist im Falle von Festgesteinsvorkommen eine aufwendigere Trennung von den nicht lithiumhaltigen Gesteinen gefordert. Zur ökonomisch rentablen Gewinnung von Lithium muss das Gestein einen möglichst hohen Lithiumanteil aufweisen. Obwohl die Anzahl an bekannten lithiumhaltigen Mineralien bei über 130 liegt, werden nur fünf zur rentablen industriellen Förderung verwendet [2, 25, 27, 35]. Die sogenannten Pegmatite sind hierbei von besonderer Relevanz, unter diese Gesteinsart fallen unter anderem diese fünf Mineralien:

- Spodumen ($\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2$, 3,7 % Li)
- Petalit ($\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$, 2,3 % Li)
- Lepidolith ($\text{K}(\text{Li},\text{Al})_3[(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2]$, 1,4–3,6 % Li)
- Amblygonit ($(\text{Li},\text{Na})\text{Al}[\text{PO}_4(\text{F},\text{OH})]$, 3,4–4,7 % Li)
- Eucryptit (LiAlSiO_4 , 5,5 % Li) [2, 8, 10, 24, 35, 36]

Neben Lithium enthalten Pegmatitgesteine oft auch andere wertvolle Elemente, wie zum Beispiel Zinn, Tantal, Niob, Beryllium, Wolfram, Caesium und Rubidium. Nennenswert ist in diesem Kontext außerdem das Mineral Jadarit ($\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})$), da es formal einen hohen Lithiumanteil von 3,2 Prozent aufweist und auch europäische Vorkommen bekannt sind, aufgrund seiner Seltenheit jedoch eine untergeordnete Rolle als Lithiumerz spielt. Zudem ist Lithium auch in einigen Sedimentgesteinen vorhanden, allerdings werden diese derzeit nicht kommerziell gefördert und zur Lithiumproduktion genutzt [2, 27].

Pegmatitlagerstätten sind global in Australien, Afrika, Europa, Asien und Nord- und Südamerika zu finden (vergleiche Abbildung 1). An mindestens 13 Standorten weltweit wird Pegmatit gefördert, wobei Australien mit einem Förderanteil von fast 50 Prozent als wichtigstes Förderland aufzuführen ist [2, 11, 24, 27]. Der Gehalt an Lithium im Gestein ist abhängig von der jeweiligen Lagerstätte. Kombiniert mit Solevorkommen werden die weltweiten kontinentalen Lithiumreserven auf etwa 17 Megatonnen (17 Mio. t) geschätzt. Allerdings unterliegen derartige Schätzungen oft hoher Varianz, da zur Bezifferung von Rohstoffreserven die aktuellen Fördertechnologien berücksichtigt werden müssen und unterschiedliche Datenquellen herangezogen werden können [11, 24, 25].

In der folgenden Betrachtung der Prozesse zur Gewinnung von Lithium aus pegmatithaltigem Festgestein wird der Fokus auf die meistverwendeten Technologien und Rohstoffe gelegt. Besonders relevant ist hier die Route von australischer Förderung von Spodumen im Tagebau und anschließender Konzentratproduktion (globaler Marktanteil im Jahr 2021 von 94 Prozent) mit Weiterverarbeitung zu Lithiumcarbonat in China [2, 11, 27].

Für die chinesische Lithiumproduktion machte Spodumen im Jahr 2021 rund die Hälfte der Rohstoffversorgung aus, gefolgt von Lepidolith und Sole mit je 20 Prozent und Lithiumrecycling mit 10 Prozent als Sekundärquelle [35].

6.2 Pegmatitkonzentratproduktion

Die Produktion von Konzentraten aus pegmatithaltigen Mineralien (nachfolgend vereinfacht lediglich als Konzentrate bezeichnet) umfasst eine Reihe von Zerkleinerungs- und Trennverfahren, um taubes Gestein zu entfernen und den Lithiumgehalt zu erhöhen. Um weitere, ebenfalls im Erz enthaltene Rohstoffe wie Zinn und Tantal abzutrennen,

können optional weitere Verfahrensschritte angewandt werden. Im Folgenden soll jedoch nur die Gewinnung des Lithiums betrachtet werden. Es ist außerdem zu beachten, dass, wie bereits im Fall der Solevorkommen, die Zusammensetzung der Pegmatitgesteine ausschlaggebend für die notwendigen Parameter, Prozessschritte und deren Reihenfolge in der Konzentratproduktion sind. Aus diesem Grund ist lediglich eine Reihe von Schritten technisch etabliert. Diese werden im industriellen Maßstab angewendet nachfolgend beschrieben (Abbildung 6).

Das Verhältnis von lithiumhaltigen Mineralien zu taubem Gestein oder Abraum beträgt im in der Mine gewonnenen Material zwischen 1:3 und 1:10 [2]. Dementsprechend müssen in der Konzentratproduktion große Flächen zur Deponierung des Abraums und der Tailings bereitgestellt werden. Im Folgenden wird anhand von Spodumen als beispielhaftes Pegmatitgestein der Produktionsprozess erläutert.

Prozesslauterung der Konzentratproduktion

Nach einer groben Vorzerkleinerung wird ein Großteil des tauben Gesteins mittels DMS abgetrennt. DMS steht für Dense Medium Separation (deutsch »Schwimm-Sink-Trennverfahren«) und ist ein Trennverfahren basierend auf Dichteunterschieden der zu trennenden Komponenten. Hierbei wird in einem dichten Flüssigmedium bzw. einer wässrigen Suspension das leichtere taube Gestein vom absinkenden Spodumen getrennt. In diesem Zusammenhang wird anstelle der Dichte oft das spezifische Gewicht (engl. specific gravity) als einheitsloser Quotient der Dichte des Gesteins und der der Suspension genutzt. Die Suspension kann je nach Bedarf durch die Wahl des suspendierten Feststoffs und seiner Konzentration angepasst werden, sodass die Dichten der Gesteinskomponenten über und unter der Suspensionsdichte liegen. Stoffe mit geringen Dichteunterschieden sind mittels DMS nur schwierig trennbar. Um das Flüssigmedium quantitativ wieder abscheiden und in die DMS zururckfuhren zu können, werden häufig Suspensionen eisenhaltiger Feststoffe, wie beispielsweise Magnetit und Ferrosilicium, gewählt, da diese eine magnetische Abtrennung vom Spodumen und dem tauben Gestein ermöglichen. Je nach Zerkleinerungsgrad kann mittels DMS auch eine feinere Trennung von Spodumen

und Nebenprodukten, die beispielsweise Zinn-, Eisen- oder Tantalzerze umfassen, erreicht werden. Die Trennleistung ist allerdings immer stark abhängig von der Korngröße und der damit verbundenen Freilegung der Spodumenanteile [11].

Neben der Aufbereitung der DMS-Suspension durch magnetische Trennverfahren können diese auch eisenhaltige taube Gesteine abtrennen. Eine solche magnetische Trennung kann vor oder nach Trennung durch Flotation, unter anderem bedingt durch den Eisengehalt des eingesetzten Erzes und dem beabsichtigten Anwendungszweck des finalen Lithiumprodukts, erfolgen. Für Lithiumcarbonat als Rohstoff zur Batterieproduktion ist ein erhöhter Eisenanteil im Konzentrat nicht relevant, da das auch Eisen in der folgenden Lithiumcarbonatherstellung abgetrennt werden kann.

Eine große Relevanz in der Konzentratherstellung besitzt die Flotation, wobei sogenannte Tailings abgetrennt werden [2, 27]. Darunter versteht man meist feinkörnige, schlammige Rückstände, die im Gegensatz zu Abraum oder taubem Gestein nicht nur mechanisch, sondern mittels chemischer Abtrennung, unter die die Flotation fällt, vom Lithiumerz entfernt wurden. Insbesondere die Deponierung dieser Tailings ist häufig mit Umweltrisiken verbunden. So ist es in der

Vergangenheit beispielsweise zu Dammbruchen der Absetzbecken gekommen, wodurch Tailings in die umliegende Landschaft geschwemmt wurden.

Die Trennung mittels Flotation basiert auf den unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften der zu trennenden Materialien in einem wässrigen Medium und ermöglicht auch eine Trennung, falls die Unterschiede in Dichte oder die Korngrößen eine DMS ungeeignet machen. Bei der Flotation werden ionische Zusätze eingesetzt, die selektiv entweder an das Spodumen oder das taube Gestein binden und dadurch eine Veränderung der Oberflächeneigenschaften bewirken. Dabei können anionische (z. B. Oleate, Fettsäurederivate) oder kationische (z. B. langkettige Tetraalkylammoniumsalze) Zusätze bei einem definierten pH-Wert verwendet werden, wodurch das lithiumhaltige Spodumen entweder als aufschwimmendes Tailing anfällt oder in der flüssigen Phase verbleibt [11, 37]. Generell funktioniert das Trennprinzip der Flotation durch das Durchströmen einer meist wässrigen Suspension der Gesteine mit Luft oder einem anderen Gas, wobei die hydrophilen Bestandteile in Lösung verbleiben und die hydrophoben Bestandteile sich an der Luft/Wasser-Grenzfläche anlagern und mit dem Luftstrom aufsteigen. Sie können somit an der Oberfläche abgeschieden werden.

Die Flotation ermöglicht eine hohe Trennleistung und hohe Rückgewinnungsraten und damit eine gute Anreicherung von Spodumen im Konzentrat von über 6 Prozent Li_2O -äquivalent [11, 38]. Die Anwendung der unterschiedlichen Trennverfahren, die Reihenfolge, Häufigkeit der Trennschritte und die eingesetzten Erze für die Konzentratproduktion sind sehr individuell. Allerdings sind bei allen die Rückgewinnungsrate der Lithiumminerale und die finale Lithiumkonzentration die zu optimierenden Kennzahlen, um eine ökonomische Produktion und effiziente Weiterverarbeitung zu ermöglichen.

Am meisten Spodumenkonzentrat wird mit einer Kapazität von 37.600 t Lithium (200.300 t LCE) im Jahr 2022 in Greenbushes, Australien, produziert. Sie wird von Talison Lithium, einem Joint-Venture aus Tianqi Lithium und Albemarle, betrieben. Bereits im Jahr 2020 hatte Talison Lithium einen Marktanteil an der Lithiumförderung von 21,4 Prozent. Bis zum Jahr 2027 ist eine Verdopplung der Produktionskapazität geplant, ebenso wie die Errichtung einer lokalen Produktionsanlage für Lithiumhydroxid. Außerdem soll dort eine Lithium-Recyclinganlage gebaut werden [2, 24, 38].

Ökologisch sind in der Konzentratproduktion insbesondere der hohe Anteil an Abraum und Tailings und der Wasserbedarf in DMS und Flotation problematisch, sowie die Emissionen an Treibhausgasen (THG), die durch den Transport zur Weiterverarbeitung entstehen. Eine Wertschöpfung von Rohstoffen aus den anfallenden Abfallprodukten steht aktuell bereits im Fokus von Unternehmen, die Nutzungspotentiale, wie die Gewinnung seltener Elemente aus den bisherigen Produktionsabfällen, untersuchen [2].

Spodumenkonzentrate werden global gehandelt, wobei die in Australien produzierten Konzentrate derzeit größtenteils nach China exportiert und der dortigen Lithium-Wertschöpfungskette zugeführt werden. Diese Exportroute machte im Jahr 2021 rund 94 Prozent des weltweiten Spodumenkonzentrathandels (HS-Warenguppen 2530.90.93/11) aus [2, 27].

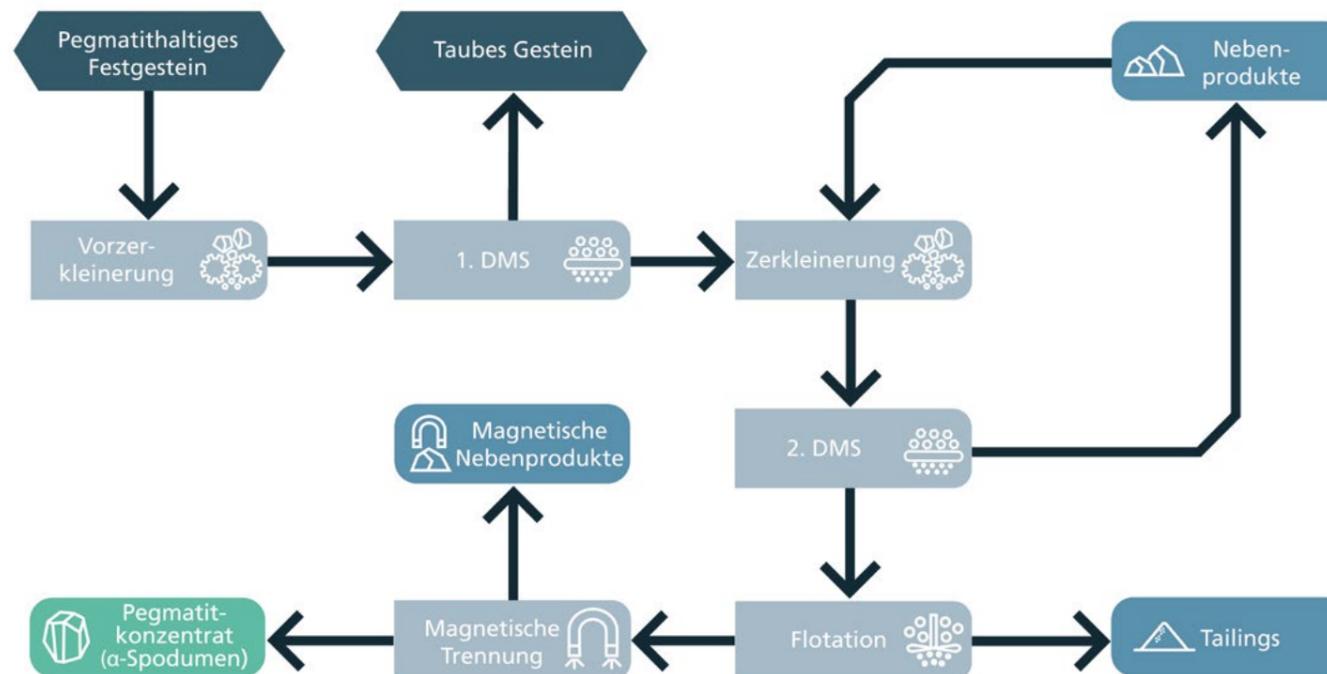


Abbildung 6: Beispielhaftes vereinfachtes Schema der Pegmatitkonzentratproduktion. DMS steht hierbei für Dense Medium Separation [11].

6.3 Herstellung von Lithiumcarbonat mittels Säureprozess

Für die Gewinnung von Lithiumcarbonat aus dem Konzentrat ist ein Herauslösen der Lithiumionen aus dem dichten Kristallgitter des Spodumens erforderlich. Hierfür gibt es unterschiedliche Prozesse, die sich je nach eingesetzten Chemikalien für den

Lithiumaufschluss unterscheiden, so ist die Verwendung von Säuren, Basen, Salzen oder Chlorgas möglich [35, 38]. Das industriell meistverwendete Verfahren ist dabei der »Säureprozess« mit konzentrierter Schwefelsäure und Fällung der Lithiumionen mit Natriumcarbonat, siehe Prozessschema in Abbildung 7 [35, 36, 39]. Zu Übersichtszwecken wird lediglich dieser im Folgenden genauer beschrieben.

Das im Konzentrat enthaltene Spodumen liegt aufgrund seines natürlichen Vorkommens in der stabilen Form des α -Spodumens vor. In dieser Struktur sind die Ionen in einem sehr dichten Kristallgitter gebunden und die Reaktivität des Spodumens ist dadurch sehr niedrig, sodass ein Auflösen des Minerals in den meisten Chemikalien nicht möglich ist. Durch Phasenumwandlung zum β -Spodumen, welche durch Kalzinierung bei rund 1080 °C stattfindet, wird die Kristallstruktur verändert und damit eine höhere Reaktivität des Spodumens erreicht [10, 24, 39]. Unter Kalzinierung versteht man das Erhitzen eines Materials in sauerstoffarmer Umgebung unterhalb seines Schmelzpunktes, wodurch bei Spodumen eine strukturelle Umwandlung erreicht wird. Hierbei verändert sich die oktaedrische Koordination der Aluminiumionen im Kristallgitter durch Oxidation im β -Spodumen zu einer tetraedrischen Koordination. Die Struktur im Kristallgitter wird dadurch aufgeweitet und infolgedessen lassen sich die in den nun größeren Kristalllücken befindlichen Lithiumionen einfacher herauslösen. Die Phasenumwandlung ist anhand der Abnahme der Dichte des Spodumens von 3,15 g/cm³ (α) auf 2,37–2,41 g/cm³ (β) unmittelbar messbar, das Mineral wird zudem spröder und leichter zu zerkleinern [24, 36, 39].

Im nächsten Prozessschritt wird das feingemahlene β -Spodumen mit konzentrierter Schwefelsäure bei 250 bis 300 °C in einem Drehofen geröstet, wobei pro Tonne Spodumen etwa 250 kg konzentrierte Schwefelsäure (H₂SO₄) notwendig sind, bei höheren Säureverdünnungen steigt die benötigte Menge an [24, 35, 36, 38, 40]. Als Rösten wird das Erhitzen eines Materials in sauerstoffreicher Umgebung unterhalb seines Schmelzpunktes bezeichnet, typischerweise in einer Feststoff-Gas-Reaktion. Das Rösten von Spodumen mit flüssiger Schwefelsäure (Säurerösten) stellt damit eine Ausnahme dar, hierbei wird aus dem Spodumen das wasserlösliche Lithiumsulfat (Li₂SO₄) gemäß folgender Reaktionsgleichung gewonnen [36, 41]:



Durch eine Wasserzugabe wird das Lithiumsulfat anschließend aus dem übrigen Gestein gelöst, wobei die verwendete Wassermenge etwa im Verhältnis 2:1 zum Gestein liegt und hohe Ausbeuten von 80 bis über 90 Prozent erreicht werden, welche mit den anderen oben erwähnten Herstellungsprozessen nicht erreichbar sind [35, 38]. Zur Neutralisation wird anschließend beispielsweise Calciumcarbonat zugegeben, allerdings sind auch Basen wie etwa Natriumhydroxid möglich. Mittels Filtration werden unlösliche Feststoffe abgetrennt und dann, analog zum Soleprozess, durch Zugabe von Calciumhydroxid zunächst Magnesiumhydroxid und dann durch Zugabe von Natriumcarbonat Calciumcarbonat gefällt und jeweils abfiltriert. Weiteres Natriumcarbonat wird anschließend zur Ausfällung von Lithiumcarbonat verwendet, welches ebenfalls abfiltriert, mit Wasser zur Entfernung von Natriumionen gewaschen und getrocknet wird. Aus dem Filtrat kann durch Verdampfen des Wassers Natriumsulfat als weiteres Produkt erhalten werden [35, 36].

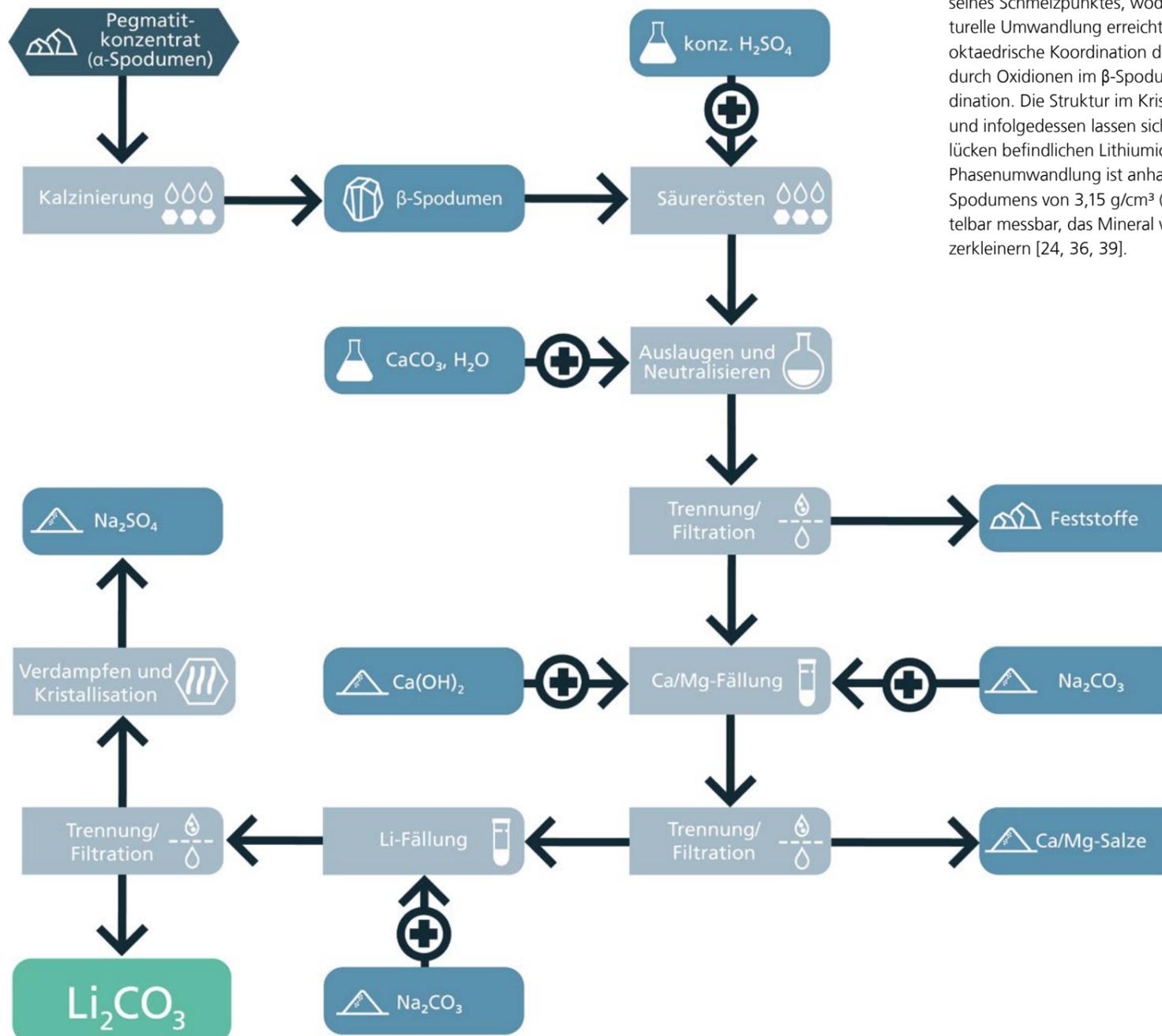


Abbildung 7: Vereinfachtes Säureprozessschema mit Schwefelsäure zur Lithiumcarbonatgewinnung aus Spodumen [35, 36].



7. Geothermale Tiefenwässer als zukünftige Lithiumquelle

Als weitere Lithiumvorkommen sind geothermale Tiefenwässer auch für die direkte Lithiumgewinnung eine denkbare Option [2]. Im Gegensatz zur solaren Verdunstung über lange Zeiträume und die damit verbundene Konzentrierung von lithiumhaltigen Salzen in Sole und Salzseen, ist die Extraktion (Direct Lithium Extraction, DLE) von Lithium mittels Ionentauschern oder Adsorptionsverfahren perspektivisch nutzbar. Problematisch ist dabei hauptsächlich die hohe Verdünnung. Vorteilhaft hingegen wäre beispielsweise die Förderung in Europa im Oberrheingraben, da erste Schätzungen dort Vorkommen von rund 2,5 bis 2,8 Mio. t Lithium im Geothermalwasser vermuten lassen [2, 23]. Diese Einschätzung ist allerdings mit großer Unsicherheit zu bewerten. Ein solches Vorkommen würde Deutschland als Förderstandort eine wirtschaftliche und strategische Relevanz verleihen, allerdings spielt die Lithiumförderung mittels DLE bisher kommerziell kaum eine Rolle und es wird noch Entwicklung und Skalierung benötigen, bis

dies der Fall ist. Extraktionsausbeuten von 40 bis 95 Prozent im kleinen Maßstab sind jedoch vielversprechend [20]. Die Kopplung mit der Energiegewinnung aus Thermalwasser (mittels der die Lithiumförderung versorgt werden könnte) und kurze Transportwege wären weitere Vorteile, der hohe Frischwasserbedarf von 80 m³/t jedoch ein großer Nachteil [2, 22]. Aufgrund des frühen Entwicklungsstandes der Technologie und der sich daraus ergebenden Unsicherheiten wird die Förderung von Lithium aus geothermalen Tiefenwässern in diesem Dokument nicht weiter beschrieben. Ebenso ist die Gewinnung aus Meerwasser, in denen Lithium(chlorid) in noch deutlich geringeren Konzentrationen vorkommt, mittels ähnlicher Extraktionsmethoden theoretisch möglich, allerdings zurzeit noch weitaus weniger wirtschaftlich, wenn auch diese Rohstoffquelle »unerschöpflich« wäre.

8. Ökologische Rohstoffbetrachtung

Für die Bewertung von Lithium und seinen Salzen im Kontext der Nachhaltigkeit, muss zunächst definiert werden, unter welchen Gesichtspunkten der Rohstoff betrachtet werden soll. Der Begriff »Nachhaltigkeit« hat, ebenso wie »grün«, keine einheitliche Definition, wodurch die Aussagekraft einer solchen Bezeichnung nur durch faktenbasierte Kriterien gestützt werden kann. Generell sind einige Punkte im Voraus einer ökologischen Bewertung anzumerken: Lithium ist durch seinen Hauptverwendungszweck als Batterierohstoff direkt mit der Energiewende und der Abkehr von fossilen Energieträgern verbunden. Die Gewinnung von Lithium und seinen Salzen ist nicht »klimaneutral« möglich und damit beeinflusst diese Gewinnung immer den ökologischen Fußabdruck der Produkte, meist der Batterien. Im Gegensatz zu fossilen Energieträgern können die Rohstoffe aus Batterien jedoch recycelt werden, sodass eine Führung im Kreislauf möglich ist. Damit ist die langfristige Nutzung nach einmaliger Förderung aus Gestein oder Sole und die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft erreichbar.

Die Bewertung ökologischer Daten geschieht meist im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse (LCA, life cycle assessment). Dabei werden standardisiert (DIN EN ISO 14040/44) die

Umweltauswirkungen und Energiebilanzen eines Produktes in definierten Systemgrenzen analysiert. Für Lithiumrohstoffe sind hierbei die Förderung, Verarbeitung und Aufreinigung bis hin zum Handelsprodukt, also dem Batterierohstoff, sinnvoll. Anknüpfende Anwendungen oder Produkte werden an dieser Stelle nicht betrachtet.

Durch die Aufstellung eines Lebenszyklusinventars (LCI, life cycle inventory) mit unterschiedlichen Ein- und Ausgängen von Rohstoffen, Energien und Emissionen, lassen sich objektiv die Einflüsse des betrachteten Produktes innerhalb der definierten Systemgrenzen und der betrachteten funktionellen Einheit (beispielsweise eine LFP-Batterie mit 1 kWh Kapazität) quantifizieren (LCIA, life cycle inventory assessment). Diese Daten ermöglichen damit auch den Vergleich der Umwelteinflüsse verschiedener Produkte mithilfe von einheitlichen Kategorien und Äquivalenzeinheiten. Beispielhaft dafür ist die Verwendung von CO₂-Äquivalenten als Maß für das Treibhauspotential und damit des Einflusses auf den Klimawandel. Emissionen verschiedener weiterer Treibhausgase werden hierbei zur besseren Übersicht und Vergleichbarkeit in CO₂ umgerechnet.



Lithium offenbart ein Paradox: Unvermeidliche ökologische Belastungen treffen auf verborgene Chancen – im Lebenszyklus liegt der Schlüssel, den ökologischen Fußabdruck zu minimieren.«

Umweltwirkungskategorien für Lithiumprodukte

Tabellarisch sind im Folgenden einige ausgewählte Umweltwirkungskategorien für je 1 kg Lithiumcarbonat aus Sole, Lithiumcarbonat aus Spodumen und Lithiumhydroxid (aus Lithiumcarbonat und Calciumhydroxid) gelistet (Tabelle 2) [42]. Die entsprechenden Werte sind zudem relativ zueinander in einem Balkendiagramm dargestellt, wodurch die direkte Vergleichbarkeit erleichtert werden soll. Der Wasseranteil an der Sole wird in dem genutzten Datensatz nicht angegeben, was ebenfalls in verschiedenen LCAs in der Literatur auffällig ist [22, 43]. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass es sich bei Solewasser nicht um Frischwasser handelt (siehe Abschnitt 5.1).

Zur besseren Vergleichbarkeit unterschiedlicher betrachteter Produkte sind die Einheiten der Wirkungskategorien häufig in Äquivalenten einer Bezugsgröße angegeben. Der Klimawandel wird dabei in CO₂-Äquivalenten als Referenztreibhausgas notiert, das terrestrische Versauerungspotential in SO₂-Äquivalenten, da Schwefeldioxid in der Atmosphäre zur Bildung sauren Regens führt und damit unmittelbar zur Bodenversauerung beiträgt. Die Nutzung von Landfläche ist durch m²a crop-Äquivalente vereinheitlicht, welche als jährliche Ernteäquivalente die Flächenbelegung bei landwirtschaftlicher Nutzung, Flächentransformation und -regeneration umfassen. Bedarfe fossiler Energie werden in Erdöl-Äquivalenten notiert, die zur Bereitstellung einer Energiemenge durch deren

Verbrennung notwendig sind, die Toxizität für den Menschen ist in Äquivalenten von 1,4-Dichlorbenzol (DCB), einem schwer biologisch abbaubaren und giftigen Stoff, angegeben, wobei zwischen krebserzeugender Toxizität und nicht-krebserzeugender Toxizität unterschieden werden kann. Letztere ist die hier betrachtete Wirkungskategorie. Die Materialressourcen für Metalle und Minerale sind in Kupfer-Äquivalenten angegeben, welche den zukünftig notwendigen Mehrabbau von Erz bedingt durch die Gewinnung des betrachteten Rohstoffs angibt [42].

Das Lithiumhydroxid wird in dieser Betrachtung durch Umsetzung von Lithiumcarbonat mit Calciumhydroxid gewonnen, der Einfluss des Li₂CO₃ ist anteilig aus beiden Lithiumfördererrouten berechnet, dementsprechend ist der Umwelteinfluss geringer als beim Lithiumcarbonat aus ausschließlich Festgesteinsvorkommen. Allerdings ist auch eine direkte Gewinnung von LiOH aus Spodumen technisch möglich und dürfte damit zu weniger hohen Umwelteinwirkungen führen, allerdings fehlen hierfür LCI-Daten in der Literatur [38]. Da es sich jedoch um einen ähnlichen Prozess wie die Lithiumcarbonatgewinnung aus Spodumen handelt, lediglich mit einem Überschuss an CaO nach dem Säurerösten zur Ausfällung des LiOH, sind zumindest sehr ähnliche Werte zu erwarten.

Tabelle 2: Ausgewählte LCIA-Wirkungskategorien für Lithiumprodukte. Datenquelle: ecoinvent Datenbank 3.10 cutoff, LCIA-Methode ReCiPe 2016 v1.03 midpoint (H) no LT. Für Lithiumcarbonat aus Sole wurde der GLO-Datensatz gewählt, für Lithiumcarbonat aus Spodumen der RoW-Datensatz (ohne chinesische Anteile).

Wirkungskategorie pro kg Produkt	Li ₂ CO ₃ aus Sole	Li ₂ CO ₃ aus Spodumen	LiOH	LiCl	Li
Klimawandel [kg CO ₂ -Äq]	2,24	10,1	15,5	9,38	84,3
Frischwasserverbrauch [m ³]	0,04	0,12	0,15	0,10	0,75
Versauerung [kg SO ₂ -Äq]	0,01	0,06	0,08	0,05	0,41
Landfläche [m ² a crop-Äq]	0,17	0,26	0,41	0,25	1,98
Fossile Energie [kg Öl-Äq]	0,57	2,77	3,70	2,25	20,3
Humantoxizität* [kg 1,4-DCB-Äq]	0,74	4,58	5,86	3,67	26,6
Materialressourcen [kg Cu-Äq]	1,40	40,0	43,5	25,0	164

*nicht karzinogen



© Dion Beeton / unsplash.com

Relativer Umweltwirkungsvergleich

Vergleicht man nur die beiden Herstellungsrouten des Lithiumcarbonats, ist ersichtlich, dass in den gewählten Wirkungskategorien der Soleprozess deutlich weniger Umwelteinwirkungen mitbringt, was durch das Fehlen von Hochtemperaturprozessen oder Auslaugen des Lithiums durch hohen Chemikalieneinsatz erklärt werden kann [40]. Die Trenn- und Aufreinigungsschritte bestehen in beiden Herstellungsverfahren größtenteils aus Fällungsreaktionen, die nur einen moderaten Energieeinsatz benötigen.

Durch den möglichen zukünftigen Einsatz von metallischem Lithium in Festkörperbatterien ist auch dieser Rohstoff im Wirkungsvergleich aufgeführt. Lithium wird elektrolytisch aus Lithiumchlorid gewonnen, welches wiederum aus Lithiumcarbonat (Anteilig aus Spodumen

und Sole) durch Umsetzung mit Salzsäure hergestellt wird. Zudem ist, anders als bei den restlichen aufgeführten Produkten, kein Anion mit hohem Gewichtsanteil gebunden. Zur Herstellung von 1 kg Lithiummetall sind 6,5 kg Lithiumchlorid notwendig, bei letzterem werden jedoch über 5,4 kg der Masse (83,6 Prozent) vom Chlorid ausgemacht. Das Metall wird mittels Schmelzflusselektrolyse aus dem Salz gewonnen. Aus diesem Grund ist die hohe Umwelteinwirkung von Lithiummetall in Tabelle 2 erwartbar. Um diese Verzerrung zu berücksichtigen, ist in Abbildung 8 ein relativer Umweltwirkungsvergleich der verschiedenen Lithiumprodukte angegeben, bei dem die Wirkungen auf die Masse des enthaltenen Lithiums berechnet wurden (Details zur Berechnung im Anhang). Der Wert der größten Wirkung wurde entsprechend auf 100 normiert.

Neben der Betrachtung der Wirkungskategorien ist ebenfalls eine Aufschlüsselung der Bedarfe der Produktionschemikalien möglich. Die Produktionsprozesse von Lithiumcarbonat aus Sole und Spodumen lassen sich dabei unmittelbar gegenüberstellen, da in beiden größtenteils die gleichen Chemikalien eingesetzt werden (Tabelle 3).

der Route aus Spodumen. Insbesondere das Kalzinieren des Spodumens und das Säurerösten verursachen den erhöhten Bedarf an Erdgas als fossilem Energieträger bei letzterer [40]. Ebenso wird eine große Menge an Frischwasser und Schwefelsäure direkt beim Säurerösten benötigt und ist mit einer entsprechenden Menge an Calciumoxid zur Neutralisation verbunden, während das CaO im Soleprozess nur zur Fällung von ungewünschten Kationen verwendet wird [35, 38, 40].

Auch diese Gegenüberstellung bestätigt die geringeren Umwelteinwirkungen der Lithiumcarbonatgewinnung aus Sole verglichen mit

Tabelle 3: Prozessrohstoffbedarfe zur Lithiumcarbonatherstellung. Datenquelle: ecoinvent Datenbank 3.10 cutoff. Für Lithiumcarbonat aus Sole wurde der GLO-Datensatz gewählt, für Lithiumcarbonat aus Spodumen der RoW-Datensatz (ohne chinesische Anteile).

Prozessbedarf pro kg Produkt	Li ₂ CO ₃ aus Sole	Li ₂ CO ₃ aus Spodumen
Lithiumrohstoff [kg]	4,19*	8,30
Wärmeenergie aus Erdgas [MJ]	2,96	47,26
Calciumoxid (CaO) [kg]	0,072	0,617
Natriumcarbonat (Na ₂ CO ₃) [kg]	1,73	1,77
Schwefelsäure (H ₂ SO ₄) [kg]	0,022	2,56

*Solekonzentration nach solarer Evaporation 6,7 Prozent.

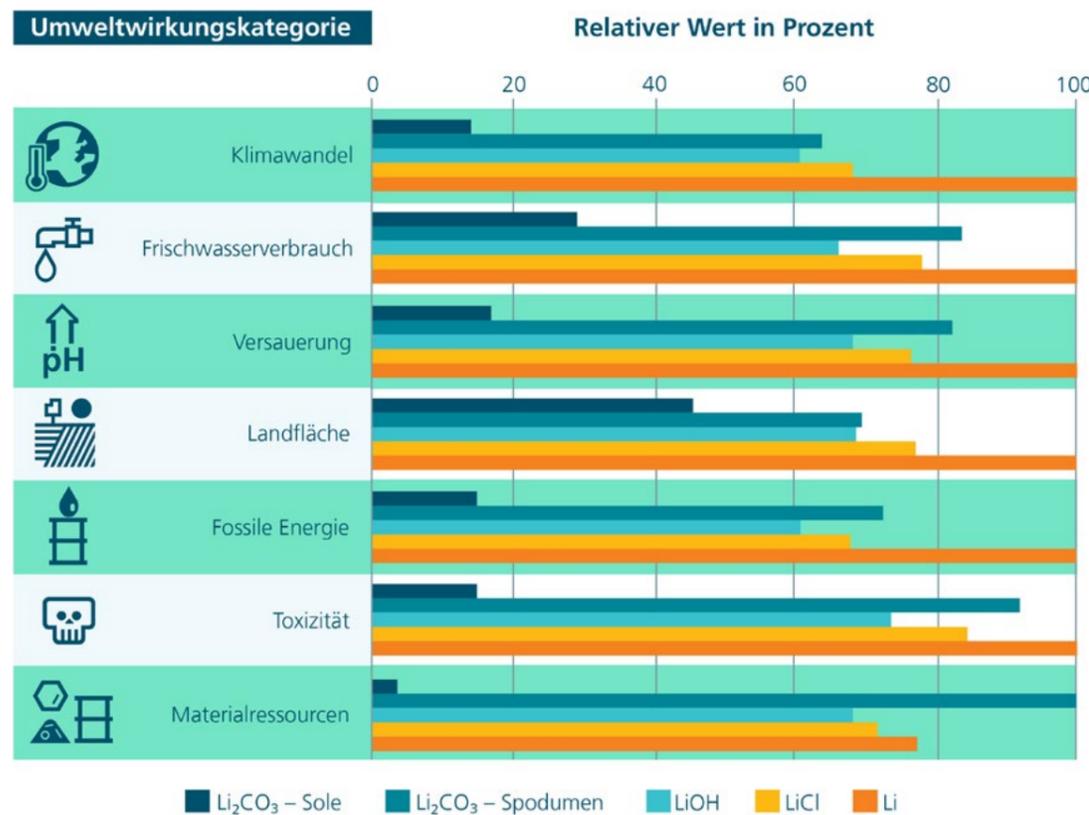


Abbildung 8: Relativer Umweltwirkungsvergleich verschiedener Lithiumprodukte berechnet auf ihren Lithiumanteil.

9. Relevanz und Chancen des Recyclings

Mit dem langfristigen Ziel einer europäischen Kreislaufwirtschaft für Batteriezellen ist das Wiederverwenden der Batterierohstoffe durch Recycling ein strategischer Kerngedanke, um unabhängig von globalen Lieferketten und möglichen Versorgungsengpässen zu sein. Dementsprechend gilt dies insbesondere für Lithium, da es, anders als kritische Rohstoffe wie Cobalt, Nickel oder Mangan nicht nur in NMC-Zellen, sondern auch in LFP-Zellen elementarer Bestandteil ist.

Ein solches Szenario ist jedoch nicht in nächster Zukunft realisierbar, sondern nur langfristig, da bei stetig steigender Nachfrage der Bedarf an neu gewonnenen Rohstoffen aus Primärquellen stets vorhanden sein wird. Da diese heute industriell genutzten Quellen zum Großteil außerhalb Europas liegen, sind Importe der Rohstoffe oder auch der Batterien zur nachgelagerten Verwertung im Recycling unverzichtbar. Erst langfristig wäre durch eine europäische Kreislaufwirtschaft auch eine starke Reduktion der Transportwege möglich. Auch auf gesetzlicher Ebene wird das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien forciert, da die Europäische Union mit der 2023 verabschiedeten EU-Batterieverordnung konkrete und steigende Recyclateile für Industriebatterien, Elektrofahrzeugbatterien, LV-Batterien und Starterbatterien vorschreibt [44].

Allerdings haben heute produzierte Batterien für den Automobilbereich mit einer Lebensdauer von rund 10–15 Jahren eine Latenz in der Rückkehr zum hydrometallurgischen oder pyrometallurgischen Recycling, sodass sie erst ab etwa 2035 als Sekundärrohstoff verfügbar sein werden. Trotzdem werden diese Sekundärrohstoffe den Bedarf mittelfristig nicht decken können, da der Markt für Batteriezellen sich in starkem Wachstum befindet und die Quantität maximal der heutigen Produktion entspricht [45-47].

Das Recycling kann sich neben der strategischen Betrachtung von Lithium als kritischer Batterierohstoff auch aus ökologischer Perspektive lohnen. Da der größte Anteil des neu geförderten und prozessierten Lithiums aus Festgesteinsvorkommen stammt, ist die Wertschöpfungskette insbesondere hierdurch wenig nachhaltig. Der Einsatz von Hochtemperaturprozessen und ein hoher Chemikalienbedarf mit den entsprechenden Produktionsabfällen machen die Lithiumgewinnung aus Festgestein aus Sicht der Nachhaltigkeit deutlich verbesserungswürdig. Da jedoch mittel- oder sogar langfristig im Zuge der Abkehr von fossilen Brennstoffen und der damit einhergehenden Elektrifizierung Batterien in größeren Zahlen benötigt werden, ließe sich der Bedarf an Rohstoffen nicht durch die Solevorkommen allein decken und auf die Festgesteinsvorkommen verzichten. Einige Prognosen gehen schließlich davon aus, dass beide Vorkommen zusammen mit deutlichem Ausbau der Kapazitäten nicht ausreichen, um die Nachfrage an Lithium zu decken [2].

Sollten also zukünftig Recyclingprozesse großtechnisch umsetzbar sein, die weniger Energie- und Chemikalienbedarf aufweisen, könnten diese einen relevanten Beitrag dazu leisten, die Batteriezelle insgesamt nachhaltiger werden zu lassen. Auch verkürzte Transportwege durch die Kreislaufführung in Europa wären hierbei vorteilhaft. Mit der heutigen Recyclingtechnologie »in den Kinderschuhen«, zumindest was die Umsetzung in industriellem Maßstab angeht, ist diese Vision allerdings schwer quantifizierbar.

10. Zusammenfassung

Lithium ist als Rohstoff in Batterien für die Energiewende nicht mehr wegzudenken. Allerdings ist die Gewinnung aufgrund der limitierten globalen Verfügbarkeit der Abbaustätten und zusätzlich der dortigen geringen Konzentrationen in Gewässern und Gesteinen mit immensem Aufwand verbunden. Somit fallen zur Herstellung von Lithium große Mengen an Nebenprodukten, Abraum und verbrauchten Prozesschemikalien an. Die internationalen Transportwege sind lang und häufig ist auch nachgelagert eine lange Wertschöpfungskette, beispielsweise durch die Batteriezellproduktion, mit dem Lithium verknüpft.



Das Batterierecycling ist der Wegweiser für Europas Zukunft – ein strategischer Schritt, der uns von globalen Lieferketten unabhängig macht und den Grundstein für eine nachhaltigere industrielle Wertschöpfung legt, auch wenn der Weg dorthin noch lang ist.«

Es gibt momentan zwei großindustriell angewendete Verfahren zur Produktion von Lithiumcarbonat, dem wichtigsten Handelsprodukt von Lithium. Aus diesem können auch die Kathodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien hergestellt werden. Die Lithiumgewinnung aus Sole, stark konzentrierten Salzlösungen, mittels solarer Verdunstung und anschließender Fällung und Aufreinigung des Lithiumcarbonats, die hauptsächlich in Südamerika und China durchgeführt wird, ist das erste Verfahren. Es erfordert wenig energieintensive Prozesse und Chemikalien, jedoch sind lithiumreichen Salzwässer nur sehr limitiert vorkommend und dies in Regionen, in denen Wasser generell eine limitierte Ressource ist. Das zweite und heutzutage mit rund 60 Prozent Marktanteil größere Herstellungsverfahren ist die Gewinnung von Lithiumsalzen aus Festgesteinsvorkommen. Hierbei sind jedoch lange Transportwege von der Mine zur Verarbeitung, große Mengen an Abraum und

ein hoher Chemikalien- und Energiebedarf notwendig, allerdings sind Festgesteinsvorkommen global weiter verteilt. Die detaillierten Prozessbeschreibungen für beide Herstellungsrouten wurden in diesem Artikel erläutert. Ebenso wurden deren Umweltwirkungen und Bewertungen der Nachhaltigkeit dieser dargestellt und lassen eine ökologische Bewertung anhand von diversen Kennzahlen zu. Insbesondere die Nutzung von Wasser als Ressource in der Lithiumgewinnung, aber auch der Energiebedarf in Hochtemperaturprozessen ist hierbei kritisch zu bewerten. Des Weiteren wurde die steigende Relevanz von Recycling als Sekundärrohstoffquelle durch die weiterhin wachsende Nachfrage nach Lithium trotz weltweiter Vergrößerung der Produktionskapazitäten in den kommenden Jahren verdeutlicht. Hierbei zeigt sich vor allem die Problematik, dass effiziente Recyclingtechnologien und deren industrielle Anwendung einerseits noch nicht etabliert und Gegenstand aktueller Entwicklung sind und andererseits das Lithium erst mit einer mehrjährigen Latenz auf dem Recyclingmarkt verfügbar ist. Ein Ausbau des Primärmarktes, der auch alternative Fördermethoden oder Rohstoffquellen, wie etwa in Deutschland verfügbare geothermale Tiefenwässer, umfasst, ist dementsprechend mittel- und vermutlich auch langfristig unabdingbar.

Obwohl Lithium somit in seiner Gewinnung und Produktion durchaus nicht als unkritisch bewertet werden kann, ist dennoch zu beachten, dass die Alternative insbesondere zu Batteriezellen, die weitere Verwendung fossiler Energieträger und keine Elektrifizierung der Mobilität, mit weitaus drastischen langfristigen Folgen für die Umwelt und die Menschheit einhergeht. Die EU, aber auch die Weltgemeinschaft gibt durch die Ziele des Pariser Klimaabkommens die Richtung vor und Lithium ist im Kern der Energiewende ein kritischer Bestandteil.

11. Appendix / Anhang

Berechnung der relativen Wirkung in
Abbildung 8 gemäß:

Relative Wirkung	W_{rel}
Rohstoffwirkung (aus ecoinvent 3.10)	RW
Rohstoffwirkung pro Lithiumanteil	RW_{Li}
Lithiumanteil	A_{Li}
Molare Masse	M
Relativitätsfaktor	F_{max}
Lithium pro Summenformel	n

$$W_{rel} = RW_{Li} * F_{max}$$

$$F_{max} = \frac{100}{RW_{Li,max}}$$

$$RW_{Li} = \frac{RW}{A_{Li}}$$

$$A_{Li} = \frac{n * M_{Li}}{M_{ges}}$$

12. Literaturangaben

[1] Europäische Union: Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, 2018/1724 and (EU) 2019/1020. (EU) 2023/0079/ COD. 2023.

[2] Schmidt, M., Bastian, D. u. Kresse, C.: Rohstoffrisikobewertung - Lithium. DERA Rohstoffinformationen, Bd. 54. Berlin: DERA 2023.

[3] Vikström, H., Davidsson, S. u. Höök, M.: Lithium availability and future production outlooks. Applied Energy 110 (2013), S. 252–266.

[4] Jaskula, B. W.: Lithium, 2024. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-lithium.pdf>, abgerufen am: 22.04.2024.

[5] Jaskula, B. W.: Lithium, 2014. <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/mineral-pubs/lithium/mcs-2014-lithi.pdf>, abgerufen am: 24.04.2024.

[6] Holleman, A. F. u. Wiberg, E.: Lehrbuch der anorganischen Chemie. Berlin: de Gruyter 2008.

[7] Bolan, N., Hoang, S. A., Tanveer, M., Wang, L., Bolan, S., Sooriyakumar, P., Robinson, B., Wijesekara, H., Wijesooriya, M., Keerthanan, S., Vithanage, M., Markert, B., Fränze, S., Wünschmann, S., Sarkar, B., Vinu, A., Kirkham, M. B., Siddique, K. H. M. u. Rinklebe, J.: From mine to mind and mobiles - Lithium contamination and its risk management. Environmental pollution (Barking, Essex : 1987) 290 (2021), S. 118067.

[8] Grosjean, C., Miranda, P. H., Perrin, M. u. Poggi, P.: Assessment of world lithium resources and consequences of their geographic distribution on the expected development of the electric vehicle industry. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 3, S. 1735–1744.

[9] Liu, C., Li, Y., Lin, D., Hsu, P.-C., Liu, B., Yan, G., Wu, T., Cui, Y. u. Chu, S.: Lithium Extraction from Seawater through Pulsed Electrochemical Intercalation. Joule 4 (2020) 7, S. 1459–1469.

[10] Roskill: The economics of lithium. London: Roskill Information Services 2009.

[11] Tadesse, B., Makuei, F., Albijanic, B. u. Dyer, L.: The beneficiation of lithium minerals from hard rock ores: A review. Minerals Engineering 131 (2019), S. 170–184.

[12] Bhutada, G.: Emerging Technologies. This chart shows which countries produce the most lithium, 2023. <https://www.weforum.org/agenda/2023/01/chart-countries-produce-lithium-world/>, abgerufen am: 22.04.2024.

[13] Jaskula, B. W.: Lithium, 2025. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-lithium.pdf>, abgerufen am: 03.02.2025.

[14] Garside, M.: Production of lithium by Albemarle Corporation worldwide from 2020 to 2023, 2024. <https://www.statista.com/statistics/1421819/global-lithium-production-volume-of-albemarle/>, abgerufen am: 22.04.2024.

[15] Statista: Production capacity of lithium by Sociedad Química y Minera de Chile S.A. in 2022 with a forecast for 2023 and 2025, by type, 2023. <https://www.statista.com/statistics/1383607/sqm-lithium-production-capacity-worldwide-by-type/>, abgerufen am: 22.04.2024.

[16] TrendForce: Global Lithium Production Forecast to Reach 1.21 Million Tons LCE in 2023, US Lithium Producer ALB Leads with a 17% Market Share, 2023. <https://www.trendforce.com/presscenter/news/20230914-11849.html>, abgerufen am: 22.04.2024.

[17] Gonzalez, G.: TIME100 Most Influential Companies 2023. Albemarle Fueling the EV revolution, 2023. <https://time.com/collection/time100-companies-2023/6285119/albemarle/>, abgerufen am: 22.04.2024.

[18] BGR: Rohstoff Preismonitor Dezember 2022, 2022. https://www.bgr.bund.de/DERA/DE/Aktuelles/Monitore/2022/12-22/2022-12-preismonitor.pdf?__blob=publicationFile, abgerufen am: 22.04.2024.

[19] Trading Economics: Lithium, 2024. <https://tradingeconomics.com/commodity/lithium>, abgerufen am: 22.04.2024.

[20] Goldberg, V., Dashti, A., Egert, R., Benny, B., Kohl, T. u. Nitschke, F.: Challenges and Opportunities for Lithium Extraction from Geothermal Systems in Germany—Part 3: The Return of the Extraction Brine. Energies 16 (2023) 16, S. 5899.

[21] Electric Vehicle Database: Tesla Model 3, 2024. <https://ev-database.org/de/pkw/1555/Tesla-Model-3>, abgerufen am: 22.04.2024, aktualisiert: <https://ev-database.org/de/pkw/1555/Tesla-Model-3-RWD>, abgerufen am: 14.07.2025.

[22] Vera, M. L., Torres, W. R., Galli, C. I., Chagnes, A. u. Flexer, V.: Environmental impact of direct lithium extraction from brines. Nature Reviews Earth & Environment 4 (2023) 3, S. 149–165.

[23] Goldberg, V., Nitschke, F. u. Kluge, T.: Herausforderungen und Chancen für die Lithiumgewinnung aus geothermalen Systemen in Deutschland – Teil 2: Potenziale und Produktionsszenarien in Deutschland. Grundwasser 27 (2022) 4, S. 261–275.

[24] Talens Peiró, L., Villalba Méndez, G. u. Ayres, R. U.: Lithium: Sources, Production, Uses, and Recovery Outlook. JOM 65 (2013) 8, S. 986–996.

[25] Alessia, A., Alessandro, B., Maria, V.-G., Carlos, V.-A. u. Francesca, B.: Challenges for sustainable lithium supply: A critical review. Journal of Cleaner Production 300 (2021), S. 126954.

[26] Kelly, J. C., Wang, M., Dai, Q. u. Winjobi, O.: Energy, greenhouse gas, and water life cycle analysis of lithium carbonate and lithium hydroxide monohydrate from brine and ore resources and their use in lithium ion battery cathodes and lithium ion batteries. Resources, Conservation and Recycling 174 (2021), S. 105762.

[27] Gruber, P. W., Medina, P. A., Keoleian, G. A., Kesler, S. E., Everson, M. P. u. Wallington, T. J.: Global Lithium Availability. Journal of Industrial Ecology 15 (2011) 5, S. 760–775.

[28] IFA: GESTIS Stoffdatenbank, 2024. <https://gestis.dguv.de>, abgerufen am: 13.02.2024.

[29] Flexer, V., Baspineiro, C. F. u. Galli, C. I.: Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. The Science of the total environment 639 (2018), S. 1188–1204.

- [30] Liu, X., Xu, C., Chen, P., Li, K., Zhou, Q., Ye, M., Zhang, L. u. Lu, Y.: Advances in Technologies for Boron Removal from Water: A Comprehensive Review. *International journal of environmental research and public health* 19 (2022) 17, S. 10671.
- [31] Xu, Z., Su, H., Zhang, J., Liu, W., Zhu, Z., Wang, J., Chen, J. u. Qi, T.: Recovery of boron from brines with high magnesium content by solvent extraction using aliphatic alcohol. *RSC advances* 11 (2021) 26, S. 16096–16105.
- [32] Fan, X., Yu, X., Guo, Y. u. Deng, T.: Recovery of Boron from Underground Brine by Continuous Centrifugal Extraction with 2-Ethyl-1,3-hexanediol (EHD) and Its Mechanism. *Journal of Chemistry* 2018 (2018), S. 1–8.
- [33] Hou, J., Zhang, H., Thornton, A. W., Hill, A. J., Wang, H. u. Konstas, K.: Lithium Extraction by Emerging Metal-Organic Framework-Based Membranes. *Advanced Functional Materials* 31 (2021) 46, S. 2105991.
- [34] Yuan, B., Wang, J., Cai, W., Yang, Y., Yi, M. u. Xiang, L.: Effects of temperature on conversion of Li₂CO₃ to LiOH in Ca(OH)₂ suspension. *Particuology* 34 (2017), S. 97–102.
- [35] Tian-ming, G., Na, F., Wu, C. u. Tao, D.: Lithium extraction from hard rock lithium ores (spodumene, lepidolite, zinnwaldite, petalite): Technology, resources, environment and cost. *China Geology* 6 (2023) 1, S. 137–153.
- [36] Karrech, A., Azadi, M. R., Elchalakani, M., Shahin, M. A. u. Seibi, A. C.: A review on methods for liberating lithium from pegmatites. *Minerals Engineering* 145 (2020), S. 106085.
- [37] Tian, J., Xu, L., Deng, W., Jiang, H., Gao, Z. u. Hu, Y.: Adsorption mechanism of new mixed anionic/cationic collectors in a spodumene-feldspar flotation system. *Chemical Engineering Science* 164 (2017), S. 99–107.
- [38] Bishimbayeva, G., Zhumabayeva, D., Zhandayev, N., Nalibayeva, A., Shestakov, K., Levanevsky, I. u. Zhanabayeva, A.: Technological Improvement Lithium Recovery Methods from Primary Resources. *Ori-ental Journal of Chemistry* 34 (2018) 6, S. 2762–2769.
- [39] Abdullah, A. A., Oskierski, H. C., Altarawneh, M., Senanayake, G., Lumpkin, G. u. Dlugogorski, B. Z.: Phase transformation mechanism of spodumene during its calcination. *Minerals Engineering* 140 (2019), S. 105883.
- [40] Jiang, S., Zhang, L., Li, F., Hua, H., Liu, X., Yuan, Z. u. Wu, H.: Environmental impacts of lithium production showing the importance of primary data of upstream process in life-cycle assessment. *Journal of environmental management* 262 (2020), S. 110253.
- [41] Salakjani, N. K., Singh, P. u. Nikoloski, A. N.: Acid roasting of spodumene: Microwave vs. conventional heating. *Minerals Engineering* 138 (2019), S. 161–167.
- [42] Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A. u. van Zelm, R.: ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 22 (2017) 2, S. 138–147.
- [43] Porzio, J. u. Scown, C. D.: Life-Cycle Assessment Considerations for Batteries and Battery Materials. *Advanced Energy Materials* 11 (2021) 33, S. 2100771.
- [44] Europäische Union: Verordnung 2023/1542 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2023 über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG. (EU) 2023/1542. 2023.
- [45] Degen, F., Winter, M., Bendig, D. u. Tübke, J.: Energy consumption of current and future production of lithium-ion and post lithium-ion battery cells. *Nature Energy* 8 (2023) 11, S. 1284–1295
- [46] Schmaltz, T.: Mengenszenarien von Lithium-Ionen-Batterien für das Recycling und deren Herkunft. *Recycling von Lithium-Ionen-Batterien wird in Europa stark zunehmen, 2023.* <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update/recycling-lithium-ionen-batterien-europa-starke-zunahme-2030-2040.html>, abgerufen am: 22.04.2024.
- [47] Greim, P., Solomon, A. A. u. Breyer, C.: Assessment of lithium criticality in the global energy transition and addressing policy gaps in transportation. *Nature Communications* 11 (2020) 1, S. 4570.

Impressum

Autoren:

Dr. rer. nat. Daniel Slak
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Dr.-Ing. Florian Degen
Bereichsleiter Strategie- und Unternehmensentwicklung

Kontakt:

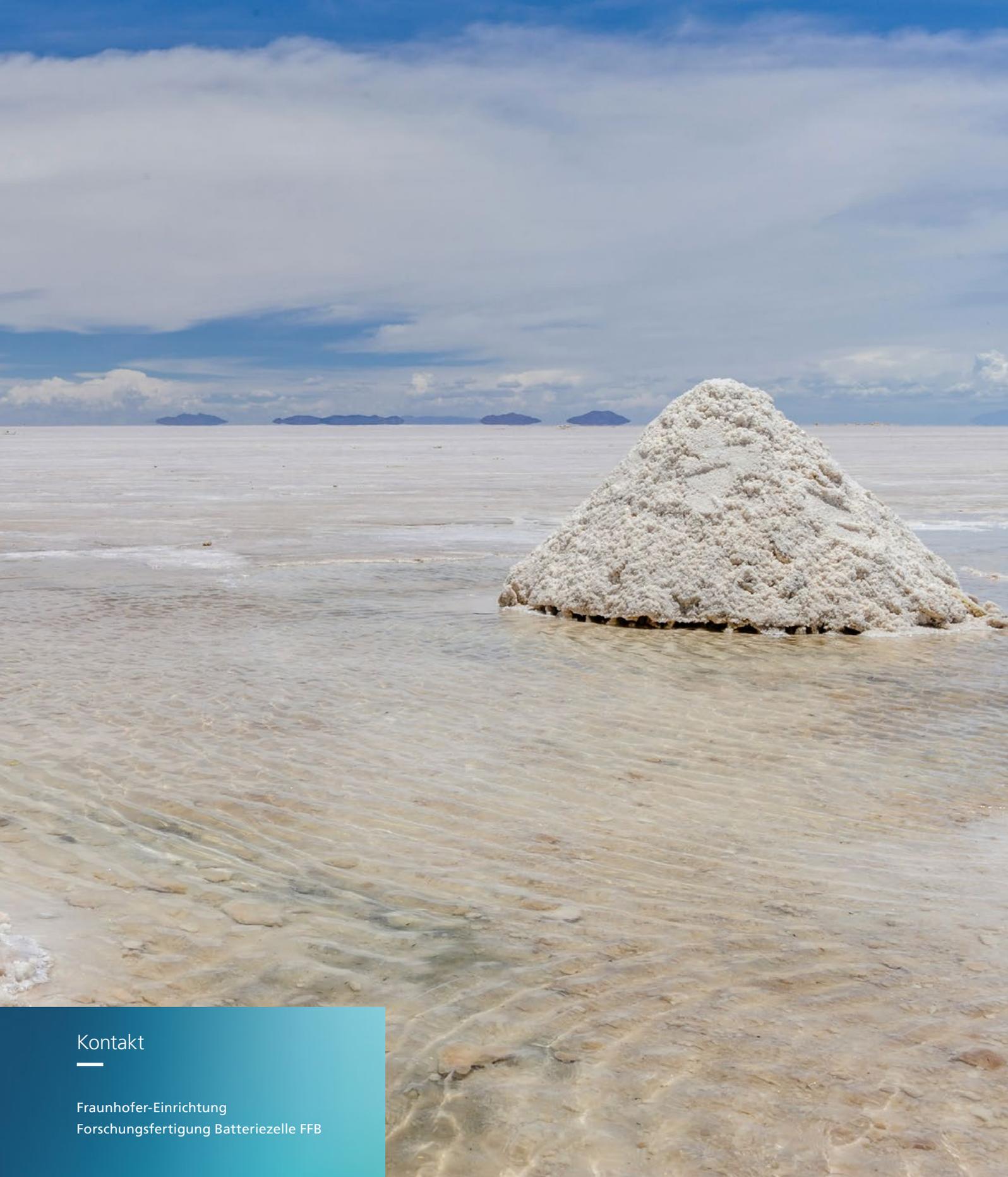
Dr.-Ing. Florian Degen MBA
florian.degen@ffb.fraunhofer.de
Telefon: +49 251 48880290
Mobil: +49 172 234 0517

Herausgeber

Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB
Bergiusstraße 8 | 48165 Münster

DOI: 10.24406/publica-4832

© Fraunhofer FFB, Münster 2025



Kontakt

Fraunhofer-Einrichtung
Forschungsfertigung Batteriezelle FFB

Bergiusstraße 8
48165 Münster
www.ffb.fraunhofer.de

DOI: 10.24406/publica-4832