

Ökologische und sozio-ökonomische Herausforderungen in Batterie- Lieferketten: Graphit und Lithium

Kurzstudie erstellt im Rahmen des BMBF-
Verbundprojektes Fab4Lib - Forschung zu Maßnahmen
zur Steigerung der Material- und Prozesseffizienz bei der
Herstellung von Lithium-Ionen-Batteriezellen entlang der
gesamten Wertschöpfungskette
(FKZ 03XP0142E)

Darmstadt,
29.07.2020

Autoren

Peter Dolega
Dr. Matthias Buchert
Dr. Johannes Betz

Oeko-Institut

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

info@oeko.de
www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Abkürzungsverzeichnis	5
1. Batterie-Lieferketten - auf dem Weg zu einer nachhaltigen Zellenfertigung in der EU	7
2. Graphit	7
2.1. Naturgraphit	9
2.2. Synthetischer Graphit	11
3. Lithium	13
3.1. Salzseen – Das Lithium Dreieck	13
3.2. Spodumen – Lithium aus Australien	14
4. Die Zukunft der Batterie-Lieferketten	22
5. Literatur	22

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Überblick über den Herstellungsprozess von Naturgraphit.	9
Abbildung 2-2: Überblick über den Herstellungsprozess von synthetischem Graphit	12
Abbildung 3-1: Karte der sich derzeit im Abbau befindlichen Lithium-Salzseen im Lithium Dreieck	14
Abbildung 3-2: Globale Lithiumproduktion von 2016 bis 2018 nach Ländern	15
Abbildung 3-3: Karte der australischen Lithiumminen	17
Abbildung 3-4: Lage der australischen Lithiumminen in Gebieten mit kritischen Lebensräumen	20
Abbildung 3-5: Greenbushes und kritischer Lebensraum in der Umgebung	21

Abkürzungsverzeichnis

Al	Aluminium
Co	Kobalt
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
Cu	Kupfer
EPI	Umweltleistungsindex (Environmental Performance Index)
EV	Elektrofahrzeuge (Electric vehicles)
GIS	Geographische Informationssysteme (Geographic Information Systems)
km	Kilometer
ktpa	Kilotonne(n) pro Jahr
Li	Lithium
Li ₂ O	Lithiumoxid
LTO	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂ , Lithiumtitanat
Mt	Mega-Tonne(n)
NG	Naturgraphit
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
NO _x	Stickstoffoxid
PARI	Schutzgebiets-Repräsentativität Index (Protected Areas Representativeness Index)
SG	Synthetischer Graphit
Si	Silizium
SO _x	Schwefeloxide
T	Tonnen
TSF	Tailings Storage Facilities bzw. Schlammteiche, Absetzbecken
THG	Treibhausgase

1. Batterie-Lieferketten - auf dem Weg zu einer nachhaltigen Zellenfertigung in der EU

Die Europäische Kommission setzte sich mit dem Green Deal ein klares Ziel, einen Übergang zu einer nachhaltigen Wirtschaft zu schaffen, wobei der Transportsektor eine der Hauptsäulen ist. Ein wichtiger Bestandteil sind Lithium-Ionen-Batterien, die für die Einführung von Elektrofahrzeugen benötigt werden. Der Green Deal unterstreicht die im Strategischen Aktionsplan für Batterien formulierten Ziele. Die Etablierung einer Batterie-Wertschöpfungskette in Europa einschließlich der Zellherstellung ist ein Schlüsselement auf dem Weg zu einer nachhaltigen Wirtschaft (European Commission 2019a, 2019b).

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Verbundforschungsprojekt Fab4Lib erforscht innovative Lösungen entlang der Wertschöpfungskette der Lithium-Ionen-Technologie und soll diese in Demonstratoren als Vorbereitung für eine Zellfertigung in Deutschland validieren. Im Rahmen des Projekts hat das Öko-Institut bereits einen Bericht über die Entwicklung des Bedarfs an Rohstoffen für die Verbreitung von elektrischen Fahrzeugen (EVs) veröffentlicht (Buchert et al. 2019). In dieser Kurzstudie wird das Öko-Institut einige der ökologischen und sozio-ökonomischen Herausforderungen von Graphit und Lithium im Upstream-Bereich beleuchten.

Eine beträchtliche Anzahl von Projekten, die auf die Herstellung von Li-Ionen-Batteriezellen in Europa abzielen, ist bereits in Planung, einige davon bereits in Produktion. Im Jahr 2019 sind nach einem Bericht von Benchmark Minerals (Benchmark Minerals 2020a) insgesamt 16 Zellfertigungsanlagen in der Pipeline. Für das Ziel einer sauberen Umwelt und nachhaltigen Wirtschaft ist es entscheidend, den Prozess über die gesamte Lieferkette hinweg zu denken. Obwohl sich die Herstellung von Zellen nach Europa verlagern könnte, ist und wird ein großer Teil der Rohstoffversorgung immer noch in Drittländern stattfinden. Das Öko-Institut hat in seiner Kurzstudie im Rahmen von Fab4Lib deutlich gezeigt, dass die Rohstoffmengen, die für die Herstellung von Batterien für Elektrofahrzeuge benötigt werden, deutlich zunehmen werden (Buchert et al. 2019). In dieser Veröffentlichung soll ein Überblick über zwei Rohstoffe gegeben werden, die für die heutigen Generationen von Lithium-Ionen-Batterien von entscheidender Bedeutung sind. Dabei werden Nachhaltigkeitsaspekte in der vorgelagerten Lieferkette beleuchtet, da diese auch zunehmend im Fokus der Öffentlichkeit steht. Für andere Rohstoffe wie bestimmte Konfliktminerale wurden bereits Maßnahmen in der EU ergriffen. Zum Beispiel müssen ab 2021 Unternehmen, die Zinn, Wolfram, Tantal und Gold (3TG) importieren, sicherstellen, dass die Metalle von verantwortungsbewussten und konfliktfreien Lieferanten stammen. Entsprechend rücken Nachhaltigkeitsaspekte in mineralischen Lieferketten zunehmend in den Fokus von Politik, Gesellschaft und Unternehmen.

Das Papier befasst sich zunächst mit Graphit, dem wichtigsten Anodenmaterial, das in Lithium-Ionen-Batterien verwendet wird. Die beiden Hauptproduktionsmethoden - Abbau von Naturgraphit und Herstellung von synthetischem Graphit - werden verglichen. Zweitens wird Lithium untersucht, wobei der Schwerpunkt auf dem Festgesteinsbergbau in Australien liegt, da es in den letzten Jahren zur Hauptquelle für Lithium wurde.

2. Graphit

Anodenmaterialien, die aus Kohlenstoff und insbesondere graphitiertem Kohlenstoff hergestellt werden, sind die mit Abstand am meisten verwendete Anodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien, da sie außergewöhnliche elektrochemische Eigenschaften (hohe Energiedichte und Effizienz) mit

einer langen Lebensdauer verbinden.¹ Darüber hinaus sind sie relativ kostengünstig, insbesondere im Vergleich zum üblicherweise verwendeten Kathodenmaterial, z.B. Übergangsmetallschichtoxide. Historisch gesehen gab es Anfang der 1990er Jahre eine Entwicklung von Anoden auf Koksbasis („Soft-Carbon“) zu „Hard-Carbon“ und insbesondere zu Graphit, die mit einem erhöhten Energiegehalt, aber auch mit einer verringerten Ratenfähigkeit einherging (Dühnen et al. 2020).

Es gibt zwei verschiedene Arten von Graphit, die sich nach ihrer Herkunft unterscheiden lassen, Naturgraphit (NG) und synthetischer Graphit (SG) (siehe Abbildung 2 1 bzw. Abbildung 2 2). Letzterer wird durch Wärmebehandlung eines Präkursors auf Koksbasis synthetisiert. Obwohl die chemische Struktur ähnlich ist, unterscheiden sie sich im elektrochemischen Verhalten und im Preis. Im Allgemeinen wird NG hauptsächlich in China abgebaut (über 60 % im Jahr 2019), (USGS 2020) da China ein großes Interesse an Graphit für seine Batterieproduktion hat und niedrige Umweltauflagen die Verarbeitung billiger als anderswo machen (Robinson et al. 2017). Allerdings nimmt Chinas Marktanteil in letzter Zeit ab, da auch andere Länder ihre Graphitproduktion aufstocken (USGS 2019, USGS 2020). Eines dieser Länder mit der bereits jetzt zweitgrößten Graphitproduktion ist Mosambik (≈9% im Jahr 2018, USGS 2020). Der Hauptanteil seiner Graphitproduktion stammt aus der Balama-Mine, der größten NG-Mine der Welt, gemessen an der jährlichen Produktionskapazität.² Diese Zahlen zu den globalen Marktanteilen beinhalten die Gesamtmenge an NG für alle Industriezweige. Allerdings ist der Anteil des in China hergestellten Anodenmaterials aus NG noch größer im Vergleich zum Abbau von NG. (Pillot 2019) Während im Jahr 2018 der Preis für Anodenmaterial aus natürlichem Graphit zwischen ≈4 und 8 \$ kg⁻¹ lag, war der Preis für synthetischen Graphit fast doppelt so hoch (≈12-13 \$ kg⁻¹). Die Herstellung von SG ist sehr energie- und zeitintensiv, da lange Kalzinierungs- bzw. Graphitierungszeiten (bis zu Wochen einschließlich Abkühlungszeiten) bei Temperaturen ≥2500 °C erforderlich sind (Gomez-Martin et al. 2018). Dennoch werden die Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) aufgrund der ökologisch kritischen Prozessierungsschritte von NG auf ein ähnliches Niveau geschätzt (siehe auch Kapitel 2.2).

Trotz seines höheren Preises wächst der Marktanteil von SG für EV-Batterien mit der Zeit, da die Qualitätsschwankungen geringer sind als bei NG und SG extrem hohe Reinheitsgrade aufweist (Schmuck et al. 2018). Im Jahr 2018 hatte SG bereits einen Marktanteil von ≈56% im Vergleich zu ≈35% für NG. (Pillot 2019) Der Rest besteht aus amorphem Kohlenstoff, Silizium-Verbundwerkstoffen oder Lithiumtitanat (Li₄Ti₅O₁₂, LTO). Dies wird so lange so bleiben, wie der Preis für Graphit nicht der wichtigste Parameter ist, da die Prognosen aufgrund eines Überangebots einen noch stärkeren NG-Preisrückgang vorhersagen im Vergleich zu SG. (Dühnen et al. 2020) Da jedoch der Graphitmarkt im Allgemeinen aufgrund des starken Bestrebens, kraftstoffbetriebene Autos durch EVs zu ersetzen, und aufgrund ihres Bedarfs an großen Batterien schnell wächst, nimmt auch der NG-Markt weiter zu. (Dühnen et al. 2020) Natürlich wird Graphit auch in vielen anderen Anwendungen eingesetzt, insbesondere in der Stahlerzeugung, feuerfesten Materialien und für Bremsbeläge, obwohl man Graphit meist vom Bleistift her kennt. Wie sich die aktuelle Corona-Krise und die daraus resultierende wirtschaftliche Rezession in vielen Ländern auf den Graphitmarkt auswirken wird, ist schwer vorherzusagen. (Benchmark Mineralien 2020b)

Obwohl Graphit als Werkstoff an sich für Mensch und Umwelt ungiftig ist, entstehen bei seiner Herstellung oder beim Abbau und der anschließenden Verarbeitung Emissionen, die - wenn sie nicht durch EHS-Maßnahmen (Umwelt, Gesundheit und Sicherheit) während der Verarbeitung

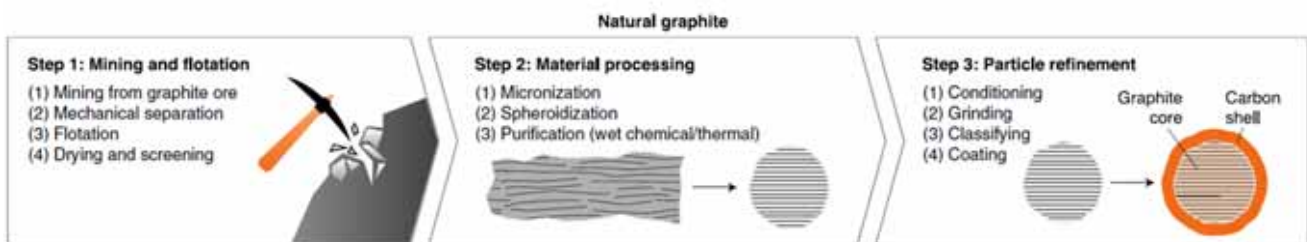
¹ Die Zykluslebensdauer einer Autobatterie wird in der Regel als Anzahl der Lade- und Entladezyklen definiert, bis der Energiegehalt 80% des ursprünglichen Energiegehaltes erreicht hat.

² <https://www.mining-technology.com/projects/balama-graphite-project/>, <http://www.syreresources.com.au/overview>, beides abgerufen am 08.06.2020

ordnungsgemäß kontrolliert werden – negative Auswirkungen auf die Gesundheit und andere Bereiche haben können (USGS 2017), die in den folgenden Kapiteln ausführlicher behandelt werden.

2.1. Naturgraphit

Nach dem Abbau aus dem Erz muss das NG von der umgebenden Matrix getrennt werden, zunächst durch mechanische Trennung und anschließend durch Flotation (Abbildung 2 1). Wichtig ist, dass nur spezielle Fraktionen des NG (d.h. ausgewählte Flockentypen ohne Schwermetallverunreinigungen, z.B. Vanadium) verwendet werden können, um Anodenmaterialien in der erforderlichen Qualität und zu wettbewerbsfähigen Kosten herzustellen, wodurch die Anzahl der nutzbaren Lagerstätten bzw. die verfügbaren Mengen reduziert werden. (SGL Carbon 2020) Nach dem Trocknen und Sieben müssen die Graphitpartikel zerkleinert und dann zu einer "kartoffelförmigen Struktur" verarbeitet werden, wie es für graphitische Anodenmaterialien erforderlich ist. Der Grund dafür liegt in den orientierungsabhängigen Eigenschaften des Graphits. Die Interkalation von Lithium-Ionen - d.h. die Einlagerung von Lithium-Ionen zwischen die einzelnen Graphenschichten³ - findet nur an den Kanten oder Defekten einer Graphitflocke während der Ladephase einer Batterie statt. Rechtwinklig zur Basalebene ist dies nicht möglich. Durch Mahlen wird die Form der Graphitflocken so verändert, dass die Graphitflocken durch Einrollen eine runde Form erhalten. Aus diesem Verfahren ergeben sich mehrere Vorteile. Erstens hat dies zur Folge, dass die für die Einlagerung von Lithium-Ionen zur Verfügung stehenden Flächen zunehmen. Zum anderen wird die erreichbare Packungsdichte bei der Anodenherstellung verbessert und damit die Kapazität der Batterie erhöht. (Lämmerer & Flachberger 2017) Dennoch beträgt die Ausbeute an rundem Graphit nur $\approx 30\%$, wenn dieser aus Graphitflocken hergestellt wird, was runden Graphit dreimal teurer macht. (Jara et al. 2019). Das aus diesem Prozess entstehende Produkt wird anschließend durch chemische oder thermische Behandlung gereinigt (Lämmerer & Flachberger 2017). Der gesamte NG-Produktionsprozess von der Mine bis zum NG-Anodenmaterial führt in der Regel zu einer Gesamtausbeute von weniger als 5% (basierend auf dem NG-Gehalt in der Lagerstätte und den nachfolgenden Verarbeitungsschritten), d.h. es entsteht in hohem Maße Abfall ($>95\%$).



Mit Erlaubnis entnommen aus Schmuch et al. 2018, Copyright 2018, Springer Nature

Abbildung 2-1 Überblick über den Herstellungsprozess von Naturgraphit.

Für die chemische Behandlung werden anorganische Säuren wie Fluss-, Salz- oder Schwefelsäure verwendet. Flusssäure hat günstige Eigenschaften bei der Reinigung von Silikaten, während die anderen für die Kontamination mit Pyrit besser geeignet sind. Dies ist der wichtigste Weg für die Reinigung in China. Als alternative oder zusätzliche Behandlung kann das Graphitpulver unter Inertgasatmosphäre auf über $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ erhitzt werden, um die Verunreinigungen zu verdampfen. Da dieser Prozess energie- und kostenintensiv ist, wird er vor allem für Spezialanwendungen wie die Luft- und Raumfahrt durchgeführt. (Lämmerer & Flachberger 2017) Er könnte in Zukunft aufgrund

³ Graphit besteht aus Graphenschichten, die über relativ schwache van-der-Waals-Bindungen miteinander verbunden sind. Daher kann dazwischen Lithium eingelagert werden.

steigender Umweltauflagen jedoch an Bedeutung gewinnen, dürfte aber auch die Kosten für NG auf ein ähnliches Niveau wie für SG steigen lassen (SGL Carbon 2020).

Nach der chemischen oder thermischen Reinigung werden die Partikel veredelt und die Oberfläche mit Kohlenstoff beschichtet, um die elektrochemische Performanz, wie z.B. die Kapazitätserhaltung, zu verbessern. Dazu werden die Graphitpartikel mit einer Kohlenstoffquelle wie z.B. Poly(vinylalkohol) gemischt und unter inerten Bedingungen erhitzt ($\approx 700\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Nozaki et al 2009). Diese Veredelungsschritte wirken sich positiv auf die Lade- und Entladezeiten sowie die Kapazität der Batterien aus (Lämmerer & Flachberger 2017).

Allerdings ist der Abbau von NG und insbesondere die Aufreinigung mit einer Reihe von ökologischen Herausforderungen verbunden. Erstens führt der Abbau an der Oberfläche (Tagebaubetrieb) ähnlich wie andere Tagebauaktivitäten zu zerstörten Landschaften. Dennoch wird er von Unternehmen gegenüber dem Untertagebetrieb bevorzugt, da er kostengünstiger ist (USGS 2017).

Graphit selbst ist inert und stellt keine direkte Gefahr für die Umwelt dar. Andere Mineralien, wie die Eisensulfide Pyrit und Pyrrhotit, die manchmal Teil der Graphitlagerstätte sind, können jedoch eine Versauerung des Grundwassers verursachen. Wenn sie Wasser und Luft ausgesetzt sind, kann ihre Auflösung und die daraus resultierende Absenkung des pH-Wertes zu schwerwiegenden Folgen für die Umwelt führen. (USGS 2017, Letterman et al. 1978) Außerdem muss für den Zugang zum Graphit in den Bergwerken oft eine große Menge an Gestein entfernt werden, was zu Abraumhalden führt. Je nach Bergwerk können diese Abraumhalden unterschiedliche Mengen an zusätzlichen Mineralien enthalten, was von sich aus zu Problemen führt. Beispiele dafür sind neben Eisensulfid auch Uran, Nickel und Quecksilber (USGS 2017).

Die Flotation als Raffinationsmethode führt zu Tailings, die entsorgt werden müssen. Ihre genaue Zusammensetzung hängt von der Mine ab. Die Tailings nehmen nicht nur eine große Menge an Deponiefläche ein, sondern können auch zu einer schwerwiegenden Kontamination führen. Es ist jedoch auch möglich, sie für andere Zwecke zu verwenden, wie z.B. als Ersatz von Sand in Beton (Kathirvel et al. 2018), wenn die Höchstwerte für kritische Schadstoffe eingehalten werden.

Darüber hinaus führt der Abbau und die anschließende Verarbeitung des abgebauten Erzes zur Gewinnung des Graphits zu einer erheblichen Staubeentwicklung, was zu verschiedenen Problemen führt, da die Staubeindämmung bei der Gewinnung und Verarbeitung der Vorkommen nicht immer vollständig möglich ist. Erstens kann die Gesundheit der Arbeiter und Bewohner der Umgebung beeinträchtigt werden. Nach Angaben des National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) des U.S. Department of Health & Human Services kann die Exposition gegenüber Graphitstaub bei dessen Abbau zu Husten, Dyspnoe (Atembeschwerden), schwarzem Auswurf, verminderter Lungenfunktion und auch Lungenfibrose führen, ähnlich wie bei Kohlestaub (CDC 2019). Es ist jedoch noch nicht endgültig geklärt, ob der Graphitstaub selbst oder andere Bestandteile des Staubes, wie z.B. Quarz, für mehrere der Symptome verantwortlich sein könnten (USGS 2017). Abgesehen von der Schwarzfärbung der Umgebung, zu der Pflanzen, Häuser und Menschen gehören, gibt es wenig Hinweise darauf, dass dies in den gering auftretenden Mengen tatsächlich die Flora und Fauna schädigt. Insbesondere konnte ein Schaden an Pflanzen noch nicht festgestellt werden. Es müssen jedoch noch weitere Studien durchgeführt werden, um in diesem Fall eine Schädigung durch Graphitstaub ausschließen zu können (USGS 2020).

Die größte Sorge bereitet an dieser Stelle die Reinigung von Graphit mit anorganischen Säuren, wenn diese nicht ausreichend zur Umwelt abgetrennt werden. Alle Säuren, die Teil des chemischen Reinigungsprozesses sind, können, wenn sie freigesetzt werden, Umweltschäden verursachen. Insbesondere Flusssäure ist extrem giftig und gefährlich. (Gomez-Martin 2018) Dieses Problem kann in Ländern mit ausreichenden Umweltvorschriften teilweise entschärft werden. In Ländern wie

China, in denen die Umweltvorschriften und die Strafen für ihre Nichteinhaltung vergleichsweise niedrig sind, wird in den Medien über Fälle berichtet, in denen das Trinkwasser dem Abwasser aus den Graphitminen ausgesetzt war. (Washington post, 2017, <https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/graphite-mining-pollution-in-china/>)

Zumindest sollte eine Neutralisation der Säuren durchgeführt werden, was durch stärkere Umweltauflagen zunehmen sollte. (SGL Carbon 2020, Roskill 2019) Um den Problemen zu begegnen, hat China 2013 als Reaktion auf negative Berichte und Proteste der Kommunen gegen Verschmutzungen teils Minen (vorübergehend) geschlossen⁴. Diese Maßnahmen scheinen jedoch keine großen Verbesserungen gebracht zu haben, wie Medienberichte im Nachhinein zeigten.

Thermische Reinigung könnte eine Lösung sein, zumindest was die direkten Emissionen in das Grundwasser betrifft. Aufgrund des hohen Energiebedarfs könnte die Menge der dabei entstehenden Treibhausgase (GHG) jedoch noch höher sein (SGL Carbon 2019), wenn man den stark kohlebasierten Energiemix in China berücksichtigt. Obwohl der Sektor der erneuerbaren Energien schnell wächst, werden in China pro Jahr über 50 neue Kohlekraftwerke installiert.⁵ Da die thermische Behandlung teurer ist, wird sie nach wie vor kaum genutzt (Lämmerer & Flachberger 2017). Dennoch gibt es neue Studien, welche verschiedene Verfahren entwickeln, die zu einer geringeren Umweltbelastung führen, wie z.B. die Mikrowellenbehandlung. (Chehreh Chelgani et al. 2016). Doch selbst für den unwahrscheinlichen Fall, dass sich solche Nischentechnologien durchsetzen können, wird es noch lange dauern, bis sie einen signifikanten Marktanteil entwickeln.

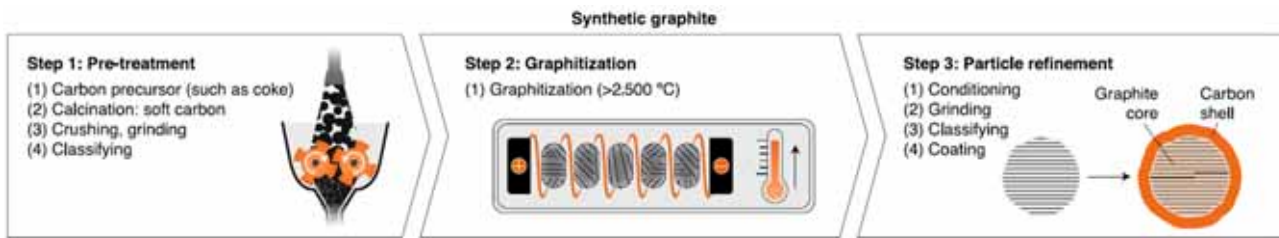
2.2. Synthetischer Graphit

Für die Herstellung von SG, auch als künstlicher Graphit bezeichnet, wird als Ausgangsmaterial eine Kohlenstoffquelle benötigt, die in der Regel als Nebenprodukt der Erdöl- und Kohleindustrie anfällt. Diese Nebenprodukte werden ansonsten in einer Vielzahl von anderen Industriesegmente verwendet, nur ein geringer Anteil (im unteren einstelligen Prozentbereich) der gesamten globalen Produktion wird für die Herstellung von SG eingesetzt. Beispiele hierfür sind Petrolkoks oder Steinkohlenteerpech. Zuerst werden die Ausgangsmaterialien bei niedrigeren Temperaturen (800-1200 °C) in einer inerten Atmosphäre⁶ kalziniert, um Soft-Carbon (amorph) zu erzeugen, was mit einem Gewichtsverlust einhergeht (siehe Abbildung 2 2). Abhängig von den Ausgangsmaterialien und der Prozessreife liegt die Ausbeute bei optimierten Bedingungen bei 90%, kann aber andernfalls auch nur 70% betragen. (SGL Carbon 2019) Diese Vorbehandlung kann in einem Ofen durchgeführt werden, der mit Erdgas oder mit elektrischer Energie betrieben wird, abhängig von den Kosten von Gas vs. elektrischer Energie bzw. dem Energiemix. (Dunn et al. 2015) Die Hauptverarbeitungsschritte sind in Abbildung 2-2 dargestellt.

⁴ <https://www.indmin.com/Article/3290097/Shandong-China-ordered-to-halt-flake-graphite-production.html>, abgerufen am 28.07.2020

⁵ <https://www.welt.de/wirtschaft/article165201633/So-geht-Deutschland-Klima-China-auf-den-Leim.html>, https://www.novo-argumente.com/artikel/chinas_energiehunger_teil_2_kohle_bleibt_kernenergie_kommt, <https://www.industryweek.com/operations/energy-management/article/21964111/china-to-cap-coal-use-at-42-billion-tons-by-2020>, abgerufen am 28.07.2020

⁶ Enthält keinen Sauerstoff, normalerweise Stickstoff oder Argon.



Mit Erlaubnis entnommen aus Schmuch et al. 2018, Copyright 2018, Springer Nature

Abbildung 2-2: Überblick über den Herstellungsprozess von synthetischem Graphit

Nach der Vorbehandlung der Ausgangsmaterialien (Kalzinieren, Zerkleinern, Mahlen und Sichten) wird der entstehende Soft-Carbon graphitisiert, wiederum unter inerter Atmosphäre. Das Verfahren dauert drei bis fünf Tage und benötigt für die Dauer der Wärmebehandlung Temperaturen von bis zu 2500-3000 °C. Das Erreichen dieser hohen Temperaturen ist in einem speziellen Elektroofen möglich und verbraucht eine große Menge an elektrischer Energie. Zusammen mit den Abkühlzeiten kann der gesamte Prozess bis zu drei Wochen dauern (Dunn et al. 2015); beim Abkühlen kann ein Teil der Energie zurückgewonnen werden (SGL Carbon 2020). Die hohen Temperaturen reinigen das Material und führen zu einer perfekten kristallinen Graphitstruktur (Wurm et al. 2018). Nach der Graphitierung sind ähnliche Aufreinigungsschritte wie bei NG notwendig, um ein gut funktionierendes Anodenaktivmaterial für Lithium-Ionen-Batterien zu erhalten (Konditionierung, Mahlung, Klassifizierung und Kohlenstoffbeschichtung, siehe Kapitel 2.1) (Dühnen et al. 2020).

Es gibt einige Forschungsarbeiten, um die Kohlenstoffquelle aus den nicht erneuerbaren Nebenprodukten der Kohle- und Erdölindustrie durch Biomasse zu ersetzen, von besser verwendbaren wie verschiedene Holzarten bis hin zu exotischeren wie menschliches Haar oder Pollen. (Dühnen et al. 2020, Tang et al. 2016). Ein weiterer Ansatz ist die Verwendung von kohlenstoffhaltigen Abfallstoffen wie Plastiktüten oder hölzernen Bambusstäbchen (Dühnen et al. 2020). Abgesehen von der Reproduzierbarkeit und den großen Materialmengen, die notwendig sind, um dem wachsenden Markt für Anodenmaterialien gerecht zu werden, ist es schwierig, tatsächlich einen Soft-Carbon als Präkursor für ein hochgraphitisiertes Material zu gewinnen. Der Prozess kann durch Zugabe eines metallischen Additivs wie z.B. Eisenchlorid verbessert werden, wodurch auch die notwendige Graphitierungstemperatur reduziert wird. (Dühnen et al. 2020, Gomez-Martin et al. 2018) Da das Additiv wieder entfernt werden muss und zu Verunreinigungen führen könnte, ist es für kommerzielle Anwendungen als Batterieanodenmaterial nach unserem Kenntnisstand bisher nicht relevant (SGL Carbon 2020). Alle diese Ansätze befinden sich in einem frühen Forschungsstadium und sind weit von einer industriellen Umsetzung entfernt. Angesichts der sehr niedrigen Kohlenstoffausbeuten, die solchen alternativen Vorläufern inhärent sind (Bengtsson et al. 2018), ist zudem zu erwarten, dass die Gesamtenergie- und Emissionsbilanz des Gesamtprozesses sowie die Kosten im Vergleich zu den heutigen Vorläufern nachteilig ausfallen werden.

Ein Vorteil von SG im Vergleich zu NG ist die Unabhängigkeit von natürlichen Graphitressourcen, da die Ausgangsmaterialien etabliert und leicht verfügbar sind. Dies könnte auch zu einer Unabhängigkeit von Ländern wie China führen, in denen der größte Anteil von Naturgraphit abgebaut wird. China produziert allerdings auch die größte Menge an SG (≈78% im Jahr 2018, Pillot 2019). Angesichts der leichteren Skalierbarkeit des SG-Prozesses sind jedoch Genehmigungsverfahren und die technische Realisierungszeit kürzer (1-2 Jahre im Vergleich zu 8-10 Jahren für einen neuen Bergwerksbetrieb). Außerdem ist die Unabhängigkeit von Bergwerksstandorten wie im Falle von NG ein Vorteil der SG-Produktion.

Während der beiden Wärmebehandlungsschritte entstehen verschiedene Luftemissionen, darunter hauptsächlich CO₂, aber auch NO_x, SO_x und CO, deren Mengen stark von der Kohlenstoffquelle des

Graphits abhängen. Die Gesamtmenge an THG hängt jedoch stark von der Quelle der elektrischen Energie für den Ofen ab. Nach Berechnungen von SGL Carbon, verifiziert von Shariff et al. von Berenberg Thematics, liegen die THG der Gewinnung und Verarbeitung von NG in einem ähnlichen Bereich (4 - 14 t CO₂ / t Graphit). Weitere Daten zum Vergleich der beiden Prozesse bezüglich ihrer Emissionen konnten nicht gefunden werden. Das Potential zur Verbesserung des ökologischen Fußabdrucks, insbesondere bei synthetischem Graphit, ist hoch, wenn nur erneuerbare Energien eingesetzt werden könnten. Dies ist jedoch meist noch nicht der Fall. Die Herstellung von SG ist ein weiteres Beispiel, bei dem die Umweltbelastung weitgehend mit der Verlagerung der Energieproduktion von fossilen Brennstoffen auf erneuerbare Energien zusammenhängt. So produzieren beispielsweise Hersteller von synthetischem Graphit in der Nähe der französischen Alpen bereits SG auf der Grundlage von Elektrizität aus umliegenden Wasserkraftwerken.

Die direkte Vergleichbarkeit zwischen NG und SG ist jedoch aufgrund unterschiedlicher technischer Leistungsprofile eingeschränkt. Darüber hinaus hat NG Produkteigenschaften von einem bestimmten Ursprung / Bergwerk, die durch weitere Verarbeitungsschritte nur begrenzt beeinflusst werden können, während SG durch die Rohstoffauswahl und mögliche Verarbeitungsvariationen eine hohe Vielseitigkeit für das endgültige Anodenmaterial bietet. Verglichen mit dem Abbau und der Verarbeitung von NG ist die Herstellung von SG selbst vermeintlich sauber, jedoch ist die benötigte Menge an (elektrischer) Energie größer. Die SG-Produktion als industrieller Betrieb ermöglicht die Anwendung der hohen EU-EHS-Standards der chemischen Industrie in Bezug auf Handhabung, Gefahren- und Emissionskontrolle, die im Gegensatz dazu bekannte Schwächen des Bergbaubetriebs sind, insbesondere in Ländern, in denen sich die meisten und volumenmäßig wichtigsten Vorkommen an Naturgraphit befinden. Solange die elektrische Energie jedoch weitgehend aus fossilen Quellen erzeugt wird, ist es schwierig, ohne eine detaillierte und spezifische Bewertung festzustellen, inwieweit SG im Allgemeinen mit geringeren Umweltauswirkungen verbunden ist als NG. Glücklicherweise nimmt die Produktion von erneuerbarer Energie in weiten Teilen der Welt zu, was eine deutliche Reduzierung der Emissionen in der Zukunft zur Folge haben wird.

3. Lithium

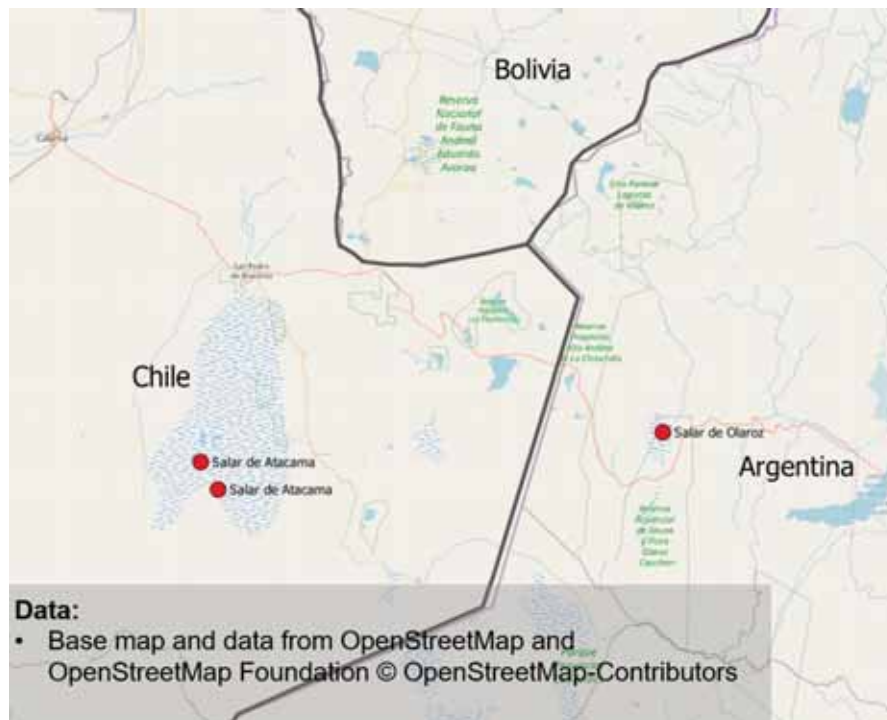
Lithium ist das Schlüsselement in allen Lithium-Ionen-Batterien, unabhängig von der Zellchemie. Die weltweite Nachfrage nach Lithium in Mobilitätsanwendungen könnte bis 2030 auf 240.000 Tonnen und bis 2050 auf bis zu 1,1 Millionen Tonnen steigen, wenn die Ziele des Pariser Klimaabkommens erreicht werden sollen (Buchert et al. 2019). Dieser signifikante Anstieg muss durch die zusätzliche Gewinnung von Rohstoffen gedeckt werden. Lithium wird aus zwei sehr unterschiedlichen Quellen gewonnen. Zum einen wird es vor allem in Südamerika aus Salzsee-Solen produziert. Zum anderen findet der Abbau von Festgestein hauptsächlich in Australien statt. Im Folgenden wird kurz auf die Produktion aus Salzseen eingegangen, gefolgt von einer eingehenderen Untersuchung des Lithiumabbaus in Australien.

3.1. Salzseen – Das Lithium Dreieck

Diskussionen über das Leichtmetall adressieren häufig die Gewinnung aus Salzsee-Solen. Die kommerziell wichtigsten Salzseen befinden sich in im Lithium Dreieck. Das Lithium Dreieck bezieht sich auf die südamerikanischen Länder Chile, Argentinien und Bolivien⁷, in denen sich derzeit mehr als zwei Drittel der weltweiten Reserven befinden (USGS 2020, Agusdinata et al. 2018). Die wichtigsten Solevorkommen befinden sich in der Atacama-Wüste in Chile (vgl. Abbildung 3-1). Häufig wird Bolivien als aufstrebender Global Player im der Lithium-Wertschöpfungskette diskutiert. Bis heute wird

⁷ Bolivien verfügt derzeit nur über Ressourcen.

jedoch in Publikationen der wichtigsten geologischen Dienste (USGS 2020, BGS 2020) keine Produktion gemeldet.



Karte basierend auf OpenStreetMap 2020

Abbildung 3-1: Karte der sich derzeit im Abbau befindlichen Lithium-Salzseen im Lithium Dreieck

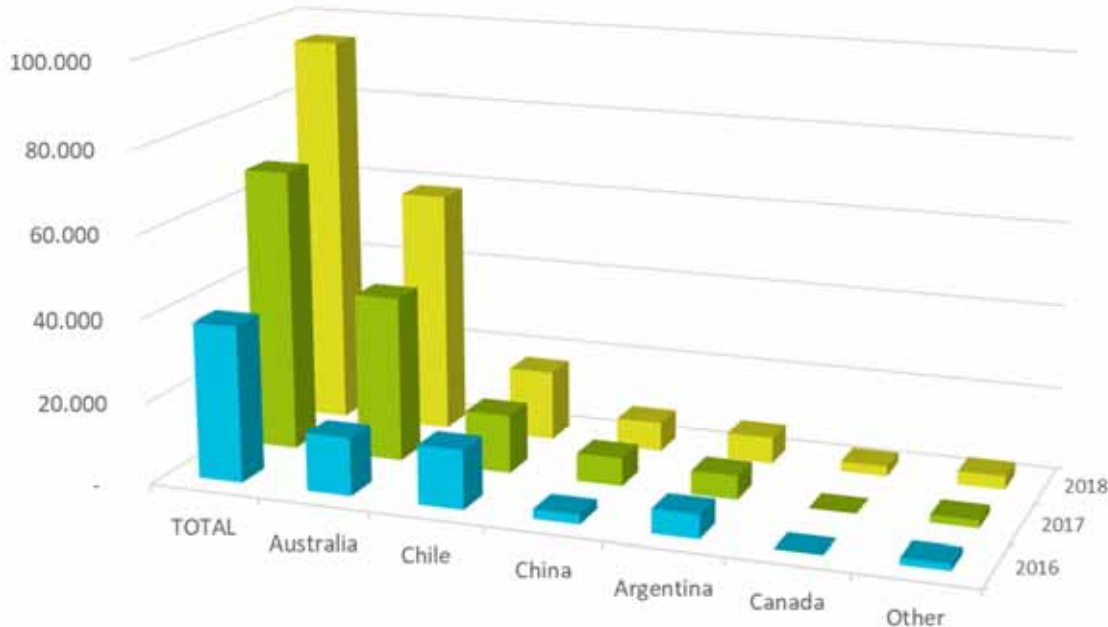
Probleme, die sich aus der Li-Extraktion aus Salzseen ergeben, werden vor allem im Zusammenhang mit Wasserknappheit thematisiert. Bei der Gewinnung von Lithium aus Salzseen wird Sonnenenergie genutzt, um die lithiumhaltigen Sole in großen Becken durch Verdunstung zu konzentrieren. Die Sole wird aus unterirdischen Grundwasserleitern an die Oberfläche gepumpt (Agusdinata et al. 2018). Die Sole wird dann konzentriert, bis eine ausreichend hohe Lithium-Konzentration erreicht ist (z.B. 6 % Lithiumchlorid am Salar de Atacama), um in einem chemischen Aufbereitungsprozess extrahiert zu werden (Evans 2014). Da die Abbaugelände, bspw. in der Atacama-Wüste sehr trocken sind, können Auswirkungen auf die Hydrologie schwerwiegend sein. Liu & Agusdinata (2020) argumentieren, dass die Wasserreserven am Salar de Atacama in Chile zwischen 2002 und 2017 mit einer Rate von 1,16 mm/Jahr zurückgegangen sind. Darüber hinaus wird über soziale Konflikte als Folge der Wasserknappheit in der Region berichtet (Schüler et al. 2018).

Über die Entwicklungen bei der Lithiumgewinnung aus Sole wird in den Medien ausführlich berichtet. Darüber hinaus wurden eine Reihe von Studien, Aufsätzen, Medienartikeln und Publikationen zu verschiedenen Aspekten der Lithium-Extraktion aus Solen veröffentlicht (z.B. Liu & Agusdinata 2020). Das folgende Kapitel wird sich daher auf den Lithium-Festgestein-Bergbau konzentrieren, der in der öffentlichen Diskussion nicht so prominent diskutiert wird.

3.2. Spodumen – Lithium aus Australien

Im Laufe der letzten drei Jahre wurde Australien zum weltweit größten Lieferanten von Lithium. Bis vor kurzem wurde die Lithiumversorgung aufgrund der günstigeren Produktionskosten von der Sol-eproduktion dominiert (Dessemond et al. 2019). Im Jahr 2016 war Chile der Spitzenproduzent und

baute seine Produktion bis 2018 kontinuierlich aus. Australien hingegen verdreifachte seine Produktion zwischen 2016 und 2017 und steigerte sie bis 2018 nochmals um fast 50%. Dementsprechend werden derzeit (2018) fast zwei Drittel des Lithiumvorrats in Australien im Hartgesteinsbergbau und nur etwa ein Drittel aus Solen gewonnen (vgl. Abbildung 3-2).



Li-Gehalt in metrischen Tonnen (Daten USGS 2020)

Abbildung 3-2: Globale Lithiumproduktion von 2016 bis 2018 nach Ländern

Das Mineral Spodumen

Lithiumminerale werden meist aus granitischen Pegmatiten gewonnen. Pegmatite sind vulkanische Gesteine mit einer groben Korngröße, die sich aus einer Vielzahl von Mineralien wie z.B. Granit, Quarz und Feldspat etc. zusammensetzen. Die in Pegmatiten enthaltenen lithiumhaltigen Mineralien sind die Lithium-Aluminium-Silikate Spodumen und Petalit und das Kalium-Lithium-Aluminium-Silikat Lepidolith. Pegmatite enthalten oft auch Tantal-, Cäsium- und Zinnerze. Spodumen ist das Mineral von größtem kommerziellem Interesse und wird hauptsächlich in Australien abgebaut. Pegmatitvorkommen stellen weltweit ca. 26 % aller potenziellen Lithiumlagerstätten dar (Bradely et al. 2017). Spodumen ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$) hat einen theoretischen Gehalt von 7,9 % Li_2O , jedoch liegen die üblicherweise natürlich vorkommenden Gehalte zwischen 1 und 2 %. Eine Ausnahme bildet die Greenbushes-Mine mit Gehalten von über 3 % Li_2O (Dessemond et al. 2019, Evans 2014).

Verfahren zur Gewinnung und Extraktion von Lithium aus Spodumen

Das abgebaute Spodumenerz wird sortiert, zerkleinert, gemahlen, durch Schwerkrafttrennung und Magnetscheidung getrennt, durchläuft dann einen Flotationsprozess und wird gewaschen, gefiltert und getrocknet, wobei ein Spodumenkonzentrat entsteht (Dessemond et al. 2019, DERA 2017). Nach Dessemond et al. (2019) geht das bei den meisten kommerziellen Betrieben angewandte Verfahren zur Lithiumherstellung aus Spodumenkonzentrat auf ein Patent aus dem Jahr 1950 zurück. Das Spodumenkonzentrat wird zunächst gemahlen und dann in einem Ofen eine halbe Stunde lang auf mindestens 1000°C erhitzt. Während des Prozesses setzt sich α -Spodumen in β -Spodumen um, das in Säuren löslich ist. Danach wird das Spodumenkonzentrat mit heißer Schwefelsäure vermischt, in der sich Lithiumsulfat in Wasser löst. Dann wird Natriumcarbonat hinzugefügt, um

Kontaminationen von Eisen, Aluminium und Mangan zu extrahieren. Kalzinierte Soda und Kalziumoxid werden hinzugefügt, und die alkalische Lösung wird mit Schwefelsäure neutralisiert und erhitzt, und schließlich wird Lithiumcarbonat durch Zugabe von Natriumcarbonat ausgefällt (DERA 2017, Dessemond et al. 2019, Evans 2014).

Neben dem etablierten Säure-Röstverfahren gibt es neue Ansätze zur Spodumenverarbeitung, bei denen Lithiumhydroxid-Monohydrat direkt aus Spodumen extrahiert wird (DERA 2017). Spodumen-Erze werden mit Hilfe eines pyrometallurgischen und hydrometallurgischen Raffinationsprozesses aufbereitet, um das Lithiumhydroxid und Natriumsulfat als Nebenprodukt herzustellen (Albemarle 2018). Das Spodumenerz wird kalziniert, gefolgt von einem Sulfat-Röstverfahren, Auslaugung und Reinigung. Dann wird kristallisiert und getrocknet, um hochreines Lithiumhydroxid-Monohydrat herzustellen (Simpec 2020).

Steigendes Produktionsvolumen - Überblick über australische Minen

Wie bereits erwähnt, hat Australien seine Produktion erheblich gesteigert. Dies ist nicht zuletzt auf die Erweiterung der größten australischen Lithiummine Greenbushes zurückzuführen, die 2017 ca. 30% der Weltproduktion lieferte. Darüber hinaus wurden vor kurzem weitere Minen eröffnet oder werden demnächst eröffnet. Derzeit sind die sechs Minen Bald Hill, Greenbushes, Mount Cattlin, Mount Marion, Pilgangoora (Altura) und Pilgangoora (Pilbara) in Betrieb. Eine weitere große Mine, Wodgina, befindet sich derzeit in einem Produktionsstopp (care & maintenance) (Hughes 2020, Champion 2019) (vgl. Abbildung 3-3). Im Folgenden werden die wichtigsten Minen kurz beschrieben.



basierend auf UNEP-WCMC 2017, OpenStreetMap 2020, Hughes 2020

Abbildung 3-3: Karte der australischen Lithiumminen

Greenbushes ist die größte Lithium-Mine weltweit, die ca. 250 km südlich der westaustralischen Hauptstadt Perth liegt und nach einer Stadt in der Nähe benannt ist (Fawthorp 2020). Die Mine ist seit 1888 in Betrieb und produzierte ursprünglich Zinn und Tantal (Evans 2014). Im Jahr 1985 wurde eine Aufbereitungsanlage errichtet, in der auch Lithium gewonnen wird. Die Lagerstätte enthält ca. 1,7 Mio. Tonnen Lithium, was ungefähr 10 % der weltweiten Reserven entspricht, der Li_2O Gehalt liegt bei von 2,8 % (USGS 2020, NS Energy 2017, Fawthorp 2020). Es wird geschätzt, dass die Mine noch weitere 40 Jahre in Betrieb sein wird (Fawthorp 2020). Die beiden Anteilseigner Tianqi und Albemarle haben beide angekündigt, dass sie in Australien auch Lithiumhydroxid in Batteriequalität produzieren werden. Tianqi wird sein Werk in Kwinana ca. 40 km südlich von Perth mit einer Produktionskapazität von 48 ktpa bauen (Champion 2019, Tianqi 2020). Albemarle hat mit dem Bau einer LiOH -Anlage in Kemerton ca. 20 km nordöstlich von Bunbury mit einer Anfangskapazität von 60 bis 75 ktpa begonnen, die auf bis zu 100 ktpa Lithiumhydroxid erweitert werden kann (Albemarle 2020a, 2020b).

Mount Cattlin ist eine Lithium-Tantal-Mine im Tagebau, die zwischen 2010 und 2012 in Produktion war und kürzlich wiedereröffnet wurde (Champion 2019). Der Erzkörper besteht aus flach liegenden Pegmatiten, die einen Abbau zu relativ geringen Kosten ermöglichen (Galaxy Resources Limited 2020, Mining Data Online 2020a). Die Mine befindet sich im Süden von Westaustralien und ca. 500 km südöstlich von Perth. Bei dem abgebauten Erz handelt es sich ebenfalls um Spodumen mit einem Gehalt von 1,08% Li_2O (Champion 2019). Die Mine befindet sich im Besitz von Galaxy Resources, die ein Konzentrat mit einem Gehalt von 6 % Li_2O produziert, das von Esperance Port (an der Südküste Australiens, ca. 600 km südöstlich von Perth) an asiatische Kunden verschifft wird. Die Erzreserven belaufen sich auf ca. 8,2 Mt mit einem Gehalt von 1,29 % Li_2O . Im Jahr 2019 produzierte die Mine 191.570 Tonnen Spodumen-Konzentrat (Galaxy Resources Limited 2020).

Bald Hill ist ein Tagebau, der nördlich von Lake Cowan und ca. 700 km östlich von Perth in Westaustralien liegt. Ähnlich wie bei Greenbushes wurde ursprünglich Tantal abgebaut. Im Jahr 2016 wurde von den Eigentümern bekannt gegeben, dass auch Spodumen in der Lagerstätte vorhanden ist. Im Jahr 2018 wurden erste Lithium-Konzentrat-Lieferungen gemeldet (Champion 2019). Bald Hill hat Reserven von 11,3 Mio. t mit einem Gehalt von 1 % Li_2O und einer Produktionskapazität von 155.000 t Spodumen-Konzentrat pro Jahr gemeldet (Alliance Mineral Assets Limited 2020).

Mount Marion liegt etwa 40 km südwestlich von Kalgoorlie und hat 2016 mit der Produktion begonnen (Champion 2019). Die Mine wurde zwischen 2018 und 2019 aufgerüstet, um die Kapazität der Aufbereitungsanlagen zu erhöhen (Mineral Resources 2020a). Der Tagebau produziert ein 6 prozentiges Li_2O -Konzentrat aus Spodumenerz. Die Lebensdauer der Mine beträgt etwa 20 Jahre (Mining Data Online 2020b) Laut Mining Technology (2020) ist Mount Marion die zweitgrößte Lithiumlagerstätte der Welt.

Pilgangoora (Pilbara) liegt im Norden Westaustraliens ca. 150 km südöstlich von Port Hedland. Es werden sowohl die lithiumhaltigen Minerale Spodumen und Lepidolith abgebaut als auch zinn- und tantalhaltige Mineralien. Im Jahr 2018 wurde die Lebensdauer der Mine auf 17 Jahre geschätzt (Champion 2019). Pilgangoora hat derzeit eine Produktionskapazität von 330.000 t Konzentrat (6 % Li_2O) (Pilbara Minerals 2020).

Pilgangoora (Altura) liegt nördlich von Pilgangoora Pilabara und hat laut Champion (2019) eine geschätzte Lebensdauer von 13 Jahren. Der Tagebau produziert ca. 220.000 t Spodumenkonzentrat und eine Erweiterung auf 440.000 t pro Jahr ist geplant (Altura 2020).

Wodgina liegt ca. 110 km südlich von Port Hedland. Wie das Greenbushes-Bergwerk förderte Wodgina zunächst auch Zinn und Tantal, bis die Mine 2012 geschlossen wurde. Die Lagerstätte zählt zu den größten Tantalvorkommen. Seit 2017 wird in der Lagerstätte Spodumen abgebaut. Es ist geplant, das Erz in in Kemerton weiter zu verarbeiten, um Lithiumhydroxid herzustellen (Champion 2019, Mineral Resources 2020b). Derzeit hat die Mine eine Produktionskapazität von ca. 750.000 t Li₂O-Konzentrat pro Jahr (Mineral Resources 2020b).

Ausblick

Wie der obige Überblick zeigt, haben in den vergangenen Jahren neben Greenbushes auch eine Vielzahl anderer australischer Lithiumminen die Produktion aufgenommen. Darüber hinaus konzentriert die überwiegende Mehrheit der Produzenten das Erz auf ca. 4-6 % Li₂O, welches dann hauptsächlich nach China verschifft wird. Viele der Minen haben Expansionspläne, die eine weitere Steigerung der australischen Produktion vorsehen. Die derzeit ausgewiesenen Reserven deuten darauf hin, dass die Lebensdauer der Minen mittelfristig gesichert ist, was sich natürlich im Zuge der weiteren Exploration ändern kann. In der Übersicht wurden nur Minen berücksichtigt, die bereits produzieren oder bis vor kurzem produziert haben, daher stellen sie nur die reifen und in Betrieb befindlichen Projekte dar. Darüber hinaus wird weiterhin exploriert und vielversprechende Projekte in Australien sind bereits in der Pipeline (siehe z.B. Lithium Australia 2020). Wie das Beispiel von Tianqi und Albemarle bei Greenbushes zeigt, gibt es einen Trend die Wertschöpfungskette in Australien zu vertiefen. Außerdem sind Mineral Resources, die Eigentümer der Wodgina-Mine, über ein Joint Venture an der Chemiefabrik Kemerton beteiligt (Mineral Resources 2020b, Champion 2019).

Umweltauswirkungen des Spodumenabbaus

Die Umweltauswirkungen eines Bergwerks können sehr vielfältig sein. Eine detaillierte Analyse, z.B. eine Umweltverträglichkeitsprüfung, ist daher immer erforderlich. Der folgende Überblick soll allgemein einige Schlüsselherausforderungen des Spodumenabbaus in Australien zusammenfassen. Der Überblick ist nicht erschöpfend und stellt Themen dar, die weiter untersucht werden müssen, um die Umweltauswirkungen der Lithiumgewinnung zu reduzieren.

Tailings Storage Facilities (Schlammteiche oder Absetzbecken)

Bei der Verarbeitung von Spodumenerz zu Konzentrat und der Extraktion von Lithium entstehen feinkörnige Reststoffe (tailings), die in Tailings Storage Facilities (TSF)⁸ gelagert werden. TSFs sind große Absetzbecken oder Schlammteiche, die die nassen Produktionsrückstände (tailings) enthalten und in Form, Größe und Höhe variieren können. Diese Art der Lagerung kann zu einer Vielzahl von Problemen führen, die sich negativ auf die Umwelt auswirken können.

In einem Worst-Case-Szenario kann ein Damm eines Absetzbeckens brechen und die enthaltenen Reststoffe freisetzen (Dolega et. al 2016). Die verheerenden Folgen eines solchen Unfalls wurden nach dem Dammbruch einer Eisenerzmine in Brasilien im Jahr 2019 in den Medien breit diskutiert (z.B. Raman & Liu 2019).

In Wodgina wurde über Durchsickern von Aufbereitungsrückständen (tailings) in das Grundwasser berichtet. Die Grundwasserspiegel vor der TSF steigt rapide an. Auch das im Schlammteich gelagerte Prozesswasser gibt Anlass zur Sorge, da es erhöhte Mengen an Lithium, Wolfram und Uran enthält, welche negative Auswirkungen auf das Gebiet in der Nähe von Wodgina haben können (DWER 2019, S&P Global 2019).

⁸ In diesem Bericht werden die Begriffe Tailings Storage Facility (TSF), Schlammteiche und Absetzbecken synonym verwendet.

Nach der Minen-Erweiterung in Greenbushes werden jedes Jahr ca. 8 Mt aufbereitete Spodumenrückstände in Absetzbecken gelagert. Daher wird derzeit ein weiteres Absetzbecken gebaut, so dass insgesamt vier TSF entstehen, in denen die Verarbeitungsrückstände gelagert werden (Talison Lithium 2018). GHD (2019) verwendete ein Modell zur Bewertung des neuen Absetzbeckens hinsichtlich der Folgen eines Dammbruchs. Im Falle eines Unfalls würde die gefährdete Bevölkerung zwischen 10 und 100 Personen betragen. Die Bewertung der Schwere der Schäden kommt zu dem Schluss, dass die Infrastrukturkosten, die Geschäftskosten, die gesundheitlichen und gesellschaftlichen Auswirkungen sowie die Umweltauswirkungen in hohem Maße betroffen sind. Dieser Überblick soll nicht implizieren, dass das Absetzbecken unsicher ist. Sie zeigt jedoch die Schwere eines Dammbruchs auf und unterstreicht die Notwendigkeit, die Strukturen regelmäßig zu warten und zu überwachen.

Alle für die Herstellung von Spodumenkonzentraten vorgestellten Bergwerke verwenden mindestens eine TSF.

Biodiversität

Die Lage von Minenstandorten ist mit erheblichen Auswirkungen auf die biologische Artenvielfalt verbunden. Minen, die in Wüstengebieten mit besonders geringer Artenvielfalt liegen, weisen eine geringe Wahrscheinlichkeit auf Flora und Fauna negativ zu beeinflussen. Betriebe hingegen, die sich in dicht bewachsenen Tropenwäldern befinden, wirken sich potenziell weitaus negativer auf die Biodiversität aus.

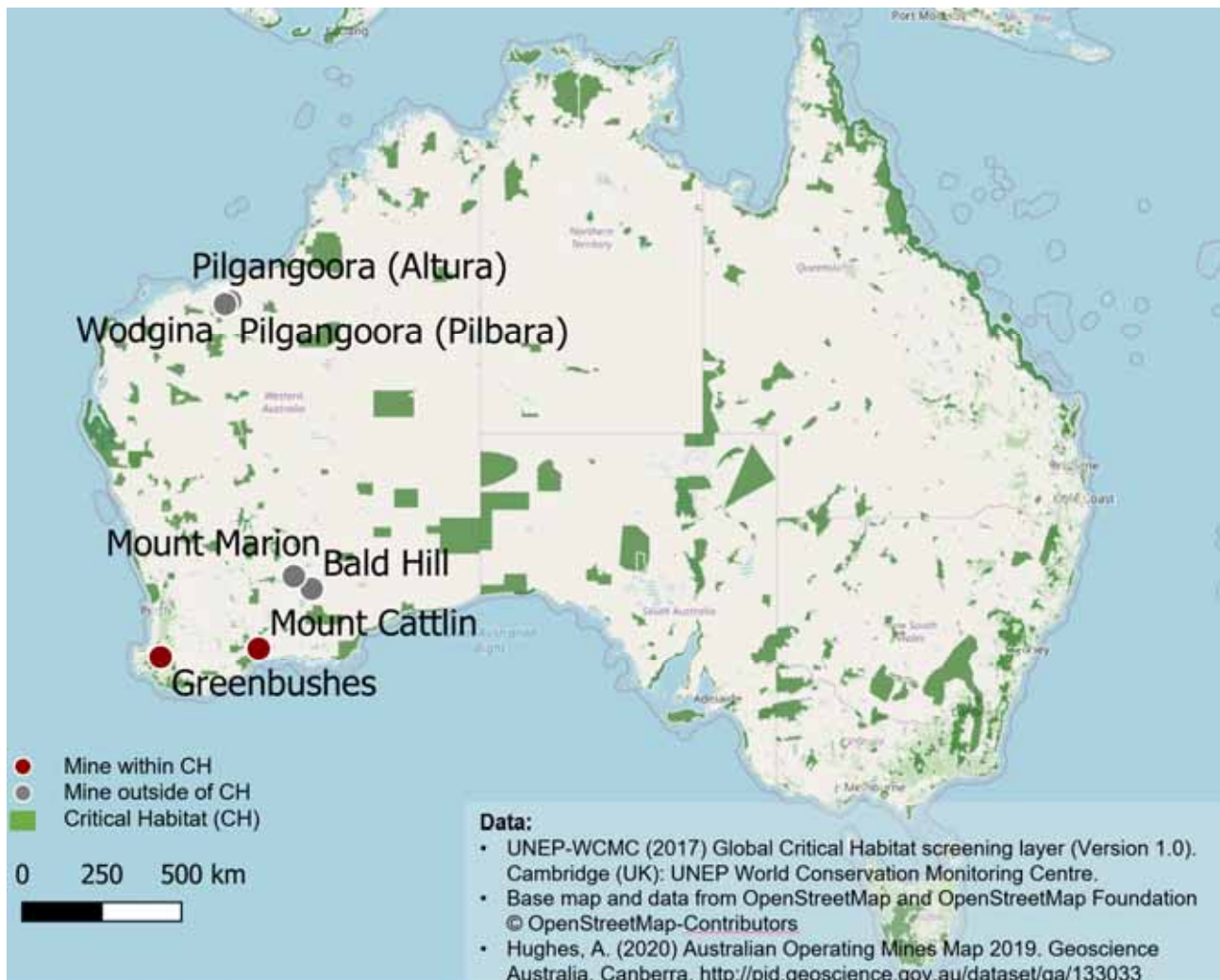
Brauneder et al. (2018) stellten einen GIS-Datensatz zusammen, der Gebiete mit hoher Biodiversität repräsentiert. Der "Global Critical Habitat Screening Layer" bildet ein Screening kritischer Lebensräume ab, welches auf diversen globalen GIS-Datensätzen basiert, die Informationen über Merkmale der Biodiversität enthalten. Die Autoren definieren kritische Lebensräume als Gebiete mit hohem Biodiversitätswert, und umfasst z.B. Gebiete mit erheblicher Bedeutung für kritisch bedrohte oder endemische Arten, Lebensräume, die weltweit bedeutende migrierende Arten unterstützen, Gebiete, die bedrohte und einzigartige Ökosysteme darstellen, Gebiete, die mit wichtigen evolutionären Prozessen verbunden sind, sowie national und/oder international anerkannte Gebiete mit hoher Biodiversität (Brauneder et al. 2018, UNEP-WCMC 2017).

Diese Informationen wurden mit den Standorten der Bergwerke verknüpft, um festzustellen, ob sie sich in Gebieten befinden, die in Bezug auf die biologische Vielfalt sensitiv sind. Diese Analyse ist eine Untersuchung auf Metaebene, die eine Vor-Ort-Beurteilung zur Bestätigung der Existenz kritischer Lebensräume nicht ersetzen kann. Sie ist jedoch geeignet, ein indikatives Bild zu geben, um die Wahrscheinlichkeit einer negativen Auswirkung abzuschätzen. Die Fläche der Minen wurde auf 10 km vom Mittelpunkt der Mine gepuffert, sodass die gesamte Mineninfrastruktur und die Gruben abgedeckt wurden. Die GIS-Analyse zeigt, dass sich alle australischen Lithiumminen mit Ausnahme von Greenbushes und Mount Cattlin außerhalb kritischer Biodiversitätsflächen befinden (vgl. Abbildung 3-4).

Die recht strengen australischen Umweltschutzbestimmungen spiegeln sich in der Analyse wider, da sich die meisten Minen außerhalb eines kritischen Habitats befinden. Das Yale Center for Environmental Law & Policy veröffentlicht jährlich den Environmental Performance Index (EPI), welcher eine datengestützte Zusammenfassung des Zustands der Nachhaltigkeit auf Länderbasis darstellt.

Australien rangiert unter den 180 analysierten Ländern auf Platz dreizehn, was einer Gesamtpunktzahl von 74,9 von 100 entspricht (Wendling et al. 2020). Die Analyse besteht aus 32 Leistungsindikatoren (performance indicator) und 11 Themenkategorien (issue categories). Unter anderem wird

die Biodiversität analysiert. Einer der Indikatoren ist der Protected Areas Representativeness Index (PARI), der misst, wie gut geschützte Gebiete (an Land) die ökologische Vielfalt eines Landes repräsentieren. Australien erreicht bei diesem Indikator nur 40,4 von 100 Punkten. Dies deutet auf einen Mangel an Schutzgebieten hin (EPI 2020).



Karte basierend auf UNEP-WCMC 2017, OpenStreetMap 2020, Hughes 2020 [CH = Critical Habitat, bzw. kritische Lebensräume]

Abbildung 3-4: Lage der australischen Lithiumminen in Gebieten mit kritischen Lebensräumen

Vor allem Greenbushes, die bei weitem größte Lithium-Mine, befindet sich in kritischem Habitat. Bei genauerer Analyse der Situation wird deutlich, dass sich die Einstufung auch auf die angewandte Pufferzone bezieht. Die Wahl einer ziemlich großen Pufferzone von 10 km führt dazu, dass die Grenzen des Polygons die Bereiche des kritischen Habitats schneiden. Auch ein kleineres Gebiet östlich des Bergwerks wird einbezogen. Die Grube selbst befindet sich nicht in einem kritischen Lebensraum (vgl. Abbildung 3-5). Nichtsdestotrotz kann die Bergbautätigkeit Auswirkungen auf die Umgebung haben, wie z.B. Lärmbelästigung, Bergbauinfrastruktur usw. Auch hier handelt es sich nur um eine sehr grobe Einschätzung der Situation, die detaillierte Beurteilungen vor Ort nicht ersetzen kann. Darüber hinaus muss darauf hingewiesen werden, dass das Bergwerk seit 1888 in Betrieb ist, so dass bei der Eröffnung des Bergwerks aller Wahrscheinlichkeit nach noch keine Bewertung in

Bezug auf Fragen der Biodiversität durchgeführt wurde (was keine Rechtfertigung dafür sein sollte, sich heute nicht mit Fragen der Biodiversität zu befassen!)



Karte basierend auf UNEP-WCMC 2017, OpenStreetMap 2020, Hughes 2020

Abbildung 3-5: Greenbushes und kritischer Lebensraum in der Umgebung

Aufforstung

Wie bereits erwähnt, findet Bergbau in Greenbushes schon seit mehr als hundert Jahren statt. Dementsprechend hat auch der historische Bergbau die Gebiete seit der Eröffnung der Mine im Jahr 1888 erheblich gestört. Die Umweltschutzbehörde Western Australia unterstreicht, dass ein Vergleich von Luftbildaufnahmen aus den 1970er Jahren und 2019 zeigt, dass viele Gebiete mit Störungsgeschichte wieder aufgeforstet wurden (EPA WA 2019).

Soziale Auswirkungen

Die sozialen Auswirkungen des Bergbaus sind ein weithin untersuchtes Forschungsgebiet. In Australien sind die Probleme im Zusammenhang mit den negativen sozialen Auswirkungen jedoch etwas anders gelagert als in anderen Ländern. Es gibt sehr hohe Arbeitssicherheitsstandards und die Gehälter in diesem Sektor sind überdurchschnittlich hoch. Themen wie Kinderarbeit oder artisanaler Kleinbergbau finden nicht statt.

Es gibt Berichte über Probleme im Zusammenhang mit dem Bergbau auf Aborigine-Gebiet (siehe z.B. Albeck-Ripka 2020). Auf der anderen Seite ist die Bergbauindustrie einer der wichtigsten Arbeitgeber für die Aborigines. So bietet z.B. Pilabara Minerals Limited, der Eigentümer von Pilangoora (siehe oben), eine bevorzugte Beschäftigung und Beschaffung für indigene Arbeitskräfte und Unternehmen an (NAIF 2018).

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der negative soziale Auswirkungen auf australische Bergleute haben kann, ist das Fly-in-Fly-out-Konzept, bei dem Menschen, die in entlegenen Gebieten arbeiten, nicht dauerhaft am Arbeitsplatz bleiben. Häufig befinden sich die Minen in Australien in Wüstengebieten ohne größere Städte im Umland. Arbeiter fliegen periodisch für längere Zeiträume zum Arbeiten ein und sind von ihren Familien getrennt. Diese Situation kann zu negativen Auswirkungen auf die

psychische Gesundheit der Arbeiter und ihrer Familien beitragen. Es kann bspw. zu Problemen wie Drogenmissbrauch kommen (z.B. Langdon et al. 2016).

Diese kurze Zusammenfassung gibt nur einen sehr groben Überblick über die wichtigsten sozialen Fragen im Zusammenhang mit dem Lithiumbergbau in Australien. Dieses Papier konzentriert sich jedoch hauptsächlich auf die Umweltaspekte von Lithium und beinhaltet diese Kurzübersicht zu sozialen Herausforderungen, um ein vollständigeres Bild der Situation zu zeichnen.

4. Die Zukunft der Batterie-Lieferketten

Batterie- und Elektrofahrzeug-Produzenten werden von der Öffentlichkeit noch stärker als andere Branchen unter die Lupe genommen. Der Sektor treibt den Wandel hin zu einer umweltfreundlicheren Mobilität voran und muss dies daher mit minimalen negativen Auswirkungen auf die Umwelt erreichen. Eine saubere Mobilität auf Kosten vermeidbarer Umweltauswirkungen zu erreichen, ist zumindest sehr fragwürdig. Daher werden die aktuellen Diskussionen um die Transparenz der Lieferkette auch in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Downstream Akteure müssen sich der Probleme im Upstream Bereichen ihrer Lieferketten bewusstwerden. Dieses Papier weist auf einige der Probleme im Zusammenhang mit dem Lithiumbergbau und der Graphitproduktion hin. Die Auswirkungen der Produktion von Batterierohstoffen müssen weiter untersucht werden, um die richtigen Entscheidungen treffen zu können, wenn es darum geht, die ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen zu reduzieren.

Zahlreiche Firmen, Unternehmen und Initiativen haben sich zu einer verantwortungsvollen Beschaffung von Mineralien verpflichtet. Da die Zellenherstellung in Europa sehr wahrscheinlich an Bedeutung gewinnen wird, wird es entscheidend sein, sich mit Problemen entlang der gesamten Batterie-Lieferkette auseinanderzusetzen.

5. Literatur

Agusdinata, D.B., Liu, W., Eakin H. and H. Romero (2018): Socio-environmental impacts of lithium mineral extraction: towards a research agenda. In: Environmental Research Letters, Volume 13, Number 12. URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae9b1> (retrieved 02.03.2020).

Albeck-Ripka, L. (2020): Mining Firm Plans to Destroy Indigenous Australian Sites, Despite Outcry. The New York Times. URL: <https://www.nytimes.com/2020/06/11/world/australia/indigenous-caves-BHP-mining.html> (retrieved 15.07.2020).

Albemarle (2018): Albemarle and Western Australia. URL: https://www.albemarle.com/storage/wysiwyg/alb_kemerton_literature_051618_a4_fnl.pdf (retrieved 27.07.2020).

Albemarle (2020a): Kemerton Project – 2020 Annual Compliance Assessment Report. URL: https://www.albemarle.com/storage/wysiwyg/2020_annual_compliance_assessment_report.pdf (retrieved 13.07.2020).

Albemarle (2020b): Kemerton, Western Australia. URL: <https://www.albemarle.com/businesses/lithium/locations/western-australia/kemerton-western-australia> (retrieved 13.07.2020)

Allah D. Jara; Amha Betemariam; Girma Woldetinsae; Jung Yong Kim (2019): Purification, application and current market trend of natural graphite: A review. In: *International Journal of Mining Science and Technology* 29, S. 671–689

- Alliance Mineral Assets Limited (2020): Bald Hill Mine. URL: <http://www.allianceminerals.com.au/projects/> (retrieved 18.07.2020).
- Altura (2020): Altura Lithium. URL: <https://alturamining.com/pilgangoora-lithium/> (retrieved 19.07.2020).
- Australian Government – Office of the Chief Economist (2019): Resources and Energy Quarterly December 2019. URL: <https://publications.industry.gov.au/publications/resourcesandenergyquarterlydecember2019/documents/Resources-and-Energy-Quarterly-December-2019.pdf> (retrieved 02.03.2020).
- Benchmark Minerals (2020a): The rise of the lithium ion battery megafactories and the raw material impact. Presented at Li4UK: Mapping the UK's future circular economy for lithium-ion batteries on 12 March 2020.
- Benchmark Minerals (2020b): Graphite Special Report. April 2020.
- Bengtsson et al. (2018): Bengtsson, A.; Bengtsson, J.; Olsson, C.; Sedin, M.; Jedvert, K.; Theliander, H.; Sjöholm, E. (2018): Improved yield of carbon fibres from cellulose and kraft lignin. In: *Holzforschung* 72 (12), S. 1007–1016. DOI: 10.1515/hf-2018-0028.
- BGS [British Geological Survey] (2020): World Mineral Statistics 2014 – 2018. URL: <https://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldArchive.html> (retrieved 02.07.2020)
- Bradley, D.C., L.L. Stillings, B.W. Jaskula, L.A. Munk, A.D. McCauley (2017): Lithium - Chapter K of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply. Edited by: K. J. Schulz, J. H. DeYoung, Jr., Robert R. Seal II, and D.C. Bradley. URL: <https://doi.org/10.3133/pp1802K>
- Brauneder, K.M., Montes, C., Blyth, S., Bennun, L., Butchart, S.H.M., Hoffmann M, et al. (2018) Globalscreening for Critical Habitat in the terrestrial realm. *PLoS ONE* 13(3): e0193102., <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193102>
- Buchert, M., Dolega, P., Degreif, S. (2019): Gigafactories für Lithium-Ionen-Zellen – Rohstoffbedarfe für die globale Elektromobilität bis 2050. URL: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Fab4Lib-Rohstoffe-Elektromobilitaet.pdf>
- Buchert, M., Dolega, P., Degreif, S. (2020): igafactories für Lithium-Ionen-Zellen – Rohstoffbedarfe für die globale Elektromobilität bis 2050. Kurzstudie erstellt im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes Fab4Lib -Erforschung von Maßnahmen zur Steigerung der Material- und Prozesseffizienz in der Lithium-Ionen-Batteriezellproduktion über die gesamte Wertschöpfungskette. URL: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Fab4Lib-Rohstoffe-Elektromobilitaet.pdf> (retrieved 15.07.2020)
- CDC - Centers for Disease Control and Prevention (2019): Graphite (natural). URL: <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0306.html>
- Champion, D. (2019): Australian Resource Reviews – Lithium 2018. Geoscience Australia. URL: https://d28rz98at9flks.cloudfront.net/126759/ARR_Lithium_2018.pdf (Retrieved 07.07.2020)
- Chehreh Chelgani, S., et al. "A review of graphite beneficiation techniques." *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 37.1 (2016): 58-68

DERA Deutsche Rohstoffagentur (2017): DERA Rohstoffinformationen 33 – Rohstoffrisikobewertung Lithium: URL: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/Studie_lithium_2017.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (Retrieved 02.03.2020).

Dessemond, C., F. Lajoie-Leroux, G. Soucy, N. Laroche, J.F. Magnan (2019): Spodumene: The Lithium Market, Resources and Processes. In: Minerals 2019, 9, 334; doi:10.3390/min9060334.

Dolega, P., Degreif, S., Buchert, M., Schüler, D. (2016): Outlining Environmental Challenges in the Non-Fuel Mining Sector. STRADE Policy Brief. URL: https://www.stradeproject.eu/fileadmin/user_upload/pdf/PolicyBrief_04-2016_Sep2016_FINAL.pdf (19.07.2020).

Dühnen, S., Betz, J., Kolek, M., Schmuck, R., Winter, M., & Placke, T. (2020). Toward Green Battery Cells: Perspective on Materials and Technologies. *Small Methods*, 2000039

Dunn, Jennifer B., et al. *Material and energy flows in the production of cathode and anode materials for lithium ion batteries*. No. ANL/ESD-14/10 Rev. Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States), 2015.

DWER - Department of Water and Environmental Regulation (2019): Works Approval Number W6132/2018/1. Amendment Notice 4. URL: https://www.der.wa.gov.au/images/documents/our-work/licences-and-works-approvals/Amendment_notices/W6132-2018-1a4.pdf (retrieved 19.07.2020).

Environmental Protection Authority Australia (2019): Report and recommendations of the Environmental Protection Authority. Greenbushes Lithium Mine Expansion. URL: http://www.epa.wa.gov.au/sites/default/files/EPA_Report/EPA%20Report%20-%20Greenbushes%20Lithium%20Mine%20Expansion.pdf (Retrieved 02.03.2020)

EPA WA Environmental Protection Authority Western Australia (2019): Report and recommendations of the Environmental Protection Authority. Greenbushes Lithium Mine Expansion. URL: http://www.epa.wa.gov.au/sites/default/files/EPA_Report/EPA%20Report%20-%20Greenbushes%20Lithium%20Mine%20Expansion.pdf (Retrieved 02.03.2020)

EPI – Environmental Performance Index (2020): Australia. URL: <https://epi.yale.edu/epi-results/2020/country/aus> (retrieved 15.07.2020).

European Commission (2019a): The European Green Deal. COM(2019) 640 final. URL: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF (retrieved 15.07.2020)

European Commission (2019b): Report from The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee, The Committee Of The Regions And The European Investment Bank on the Implementation of the Strategic Action Plan on Batteries: Building a Strategic Battery Value Chain in Europe. COM (2019) 176 final. URL: https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/report-building-strategic-battery-value-chain-april2019_en.pdf (retrieved 15.07.2020)

Evans, K. (2014): Lithium. In: Critical Metals Handbook, edited by Gus Gunn, American Geophysical Union, 2014. ProQuest Ebook Central, <http://ebookcentral.proquest.com/lib/senc/detail.action?docID=1594545>.

- Fawthrop, A. (2020): Profiling the Greenbushes lithium mine in Western Australia. NS Energy. URL: <https://www.nsenerybusiness.com/features/greenbushes-lithium-mine-australia/> (retrieved 08.07.2020).
- Galaxy Resources Limited (2020): Mt Cattlin. URL: <https://gxy.com/mt-cattlin/>
- GHD (2019): Appendix F– Tailings Storage Facility 4 – Detailed Design Report (GHD 2019). URL: https://www.der.wa.gov.au/images/documents/our-work/licences-and-works-approvals/Applications/application_form/W6283/W6283-2019-1-%20TSF%20Design%20Report%201.pdf (retrieved 19.07.2020).
- Gomez-Martin, Aurora; Martinez-Fernandez, Julian; Rutttert, Mirco; Heckmann, Andreas; Martin, Winter; Placke, Tobias; Ramirez-Rico, Joaquin (2018): Iron-Catalyzed Graphitic Carbon Materials from Biomass Resources as Anodes for Lithium-Ion Batteries. In: *ChemSusChem* 11, S. 2776–2787.)
- Hughes, A. (2020) Australian Operating Mines Map 2019. Geoscience Australia, Canberra. <http://pid.geoscience.gov.au/dataset/ga/133033>
- Kathirvel, P., Kwon, S. J., Lee, H. S., Karthick, S., & Saraswathy, V. (2018). Graphite Ore Tailings as Partial Replacement of Sand in Concrete. *ACI Materials Journal*, 115(3), 481-492
- Lämmerer, W. and Flachberger, H. (2017): Wissenswertes Zur Charakterisierung und Aufbereitung von Rohgraphiten. In: BHM (2017) Vol. 162 (8): 336–344. DOI 10.1007/s00501-017-0651-2
- Langdon, R. R., Biggs, H. C.; Rowland, B. (2016). Australian fly-in, fly-out operations: Impacts on communities, safety, workers and their families". Work. 55 (2): 413–427. doi:10.3233/WOR-162412.
- Letterman, Raymond D.; Mitsch, William J. (1978): Impact of mine drainage on a mountain stream in Pennsylvania. In: *Environmental Pollution* (1970) 17 (1), S. 53–73, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0013932778900551?via%3Dihub>, zuletzt geprüft am 22.05.2020.)
- Lithium Australia (2020): Summary of projects and alliances. URL: <https://lithium-au.com/projects-and-alliances/> (retrieved 19.07.2020).
- Liu, W. and D.B. Agusdinata (2020): Interdependencies of lithium mining and communities sustainability in Salar de Atacama, Chile. In: *Journal of Cleaner Production*, Volume 260. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120838>
- Mineral Resources (2020a): Mt Marion Lithium. URL: <https://www.mineralresources.com.au/our-business/commodities/lithium/mt-marion-lithium/> (retrieved 13.07.2020)
- Mineral Resources (2020b): Wodgina Lithium. URL: <https://www.mineralresources.com.au/our-business/commodities/lithium/wodgina-lithium-project-upgrade/> (retrieved 13.07.2020)
- Mining Data Online (2020a): Mt Cattlin Mine. URL: <https://miningdataonline.com/property/4504/Mt-Cattlin-Mine.aspx> (retrieved 18.07.2020).
- Mining Data Online (2020b): Mt Marion Mine. URL <https://miningdataonline.com/property/3359/Mt-Marion-Mine.aspx> (retrieved 18.07.2020).
- Mining Technology (2020): Mount Marion Lithium Project. URL: <https://www.mining-technology.com/projects/mount-marion-lithium-project/> (retrieved 18.07.2020).

NAIF - Northern Australian Infrastructure Facility (2018): Pilbara Minerals Limited - Upgrade Pippin-garra Road, a 70km public road to access the Pilgangoora lithium-tantalum mine (Investment Deci-sion August 2018). URL: <https://naif.gov.au/case-studies/pilbara-minerals-investment-decision/> (re-trieved 15.07.2020).

Nozaki, Hidehiko, et al. "Carbon-coated graphite for anode of lithium ion rechargeable batteries: carbon coating conditions and precursors." *Journal of Power Sources* 194.1 (2009): 486-493

NS Energy (2017): Greenbushes Lithium Mine. URL. [https://www.nsenergybusiness.com/pro-jects/greenbushes-lithium-mine/](https://www.nsenergybusiness.com/projects/greenbushes-lithium-mine/) (retrieved 08.07.2020).

OpenStreetMap (2020): Map data copyrighted OpenStreetMap contributors and available from <https://www.openstreetmap.org>

Pilabara Minerals (2020): Pilgangoora Lithium-Tantalum Project. URL: <http://www.pilbaraminer-als.com.au/site/our-business/pilgangoora-lithium-tantalum-project> (retrieved 19.07.2020).

Pillot, C. (2019): The Rechargeable Battery Market and Main Trends 2018-2030. Avicenne Energy.

Raman, A & F. Liu (2020): An investigation of the Brumadinho Dam Break withHEC RAS simulation. URL: <https://arxiv.org/pdf/1911.05219.pdf> (retieved 19.07.2020).

Robinson, Gilpin R., JR.; Hammarstrom, Jane M.; Olson, Donald W. (2017): Graphite. In: USGS National Minerals Information Center (Hg.): Critical Mineral Resources of the United States—Eco-nomic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, Chapter J. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.

Roskill (2019): Roskill: Graphite market continuously shaped by pollution controls. URL: <https://www.globenewswire.com/news-release/2019/06/12/1867350/0/en/Roskill-Graphite-market-continuously-shaped-by-pollution-controls.html>

S&P Global (2019): Regulator flags tailings seepage at Mineral Resources' Wodgina lithium plant. URL: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/trending/Kpy3R9mpYO9910-cnWuy2Q2> (retrieved 19.07.2020).

Richard Schmuch; Ralf Wagner; Gerhard Hörpel; Tobias Placke; Martin Winter (2018): Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries 3, S. 267–278.

Schüler, D., P. Dolega, S. Degreif (2020): Social, economic and environmental challenges in primary lithium and cobalt sourcing for the rapidly increasing electric mobility sector: https://www.stradepro-ject.eu/fileadmin/user_upload/pdf/STRADE_PB_Li_Co_EMobility.pdf (retrieved 02.07.2020)

SGL Carbon (2019): Graphite anode material overview and sustainability. Fab4LiB Q1 meeting 2019.

SGL Carbon (2020): Personal Communication with Alberto Biancoli, Ivano Galbiati, Peter Roschger, SGL Carbon, 28.07.2020.

Simpec (2020): Tianqi Lithium - Lithium Hydroxide Processing Plant Stage 1 (LHPP1). URL: <https://www.simpec.com.au/projects/tianqi-lithium-hydroxide-processing-plant-stage-1-lhpp1> (re-trieved 27.07.2020).

Talison Lithium (2018): Greenbushes Mine Expansion Environment Protection and Biodiversity Con-servation Act1999. URL: [http://epbcnotices.environment.gov.au/ entity/annotation/138d2f4d-e554-](http://epbcnotices.environment.gov.au/entity/annotation/138d2f4d-e554-)

[e811-886f-005056ba00a8/a71d58ad-4cba-48b6-8dab-f3091fc31cd5?t=1582243200335](http://epbcnotices.environment.gov.au/entity/annotation/138d2f4d-e554-e811-886f-005056ba00a8/a71d58ad-4cba-48b6-8dab-f3091fc31cd5?t=1582243200335) (Retrieved 16.07.2020)

Talison Lithium (2018): Greenbushes Mine Expansion Environment Protection and Biodiversity Conservation Act1999. URL: <http://epbcnotices.environment.gov.au/entity/annotation/138d2f4d-e554-e811-886f-005056ba00a8/a71d58ad-4cba-48b6-8dab-f3091fc31cd5?t=1582243200335> (Retrieved 16.07.2020)

Tang, Jialiang, Vinodkumar Etacheri, and Vilas G. Pol. "From allergens to battery anodes: nature-inspired, pollen derived carbon architectures for room-and elevated-temperature Li-ion storage." *Scientific reports* 6.1 (2016): 1-8.)

Tianqi (2020): Tianqi Lithium in Australia. URL: <https://www.tianqilithium.com.au/site/About-Us/tianqi-lithium-global> (retrieved 13.07.2020).

UNEP-WCMC (2017) Global Critical Habitat screening layer (Version 1.0). Cambridge (UK): UNEP World Conservation Monitoring Centre.

USGS National Minerals Information Center (2019): Graphite Data Sheet - Mineral Commodity Summaries.

USGS [United States Geological Survey] (2020): Mineral Commodity Summaries 2020. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf> (retrieved 26.02.2020).

Wendling, Z.A., Emerson, J.W., de Sherbinin, A., Esty, D.C., et al. (2020). 2020 Environmental Performance Index. New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law & Policy. epi.yale.edu

Wurm, Călin; Oettinger, Oswin; Wittkaemper, Stephan; Zauter, Robert; Vuorilehto, Kai (2018): Anode materials for lithium-ion batteries. In: Reiner Korthauer (Hg.): Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications, Bd. 5, S. 44–57.