

Durchbruch zum Erfolg Lateinamerikas in der Lithiumindustrie

Analyse der
Wertschöpfungskette, der
regionalen Entwicklung und der
öffentlichen Politik

Juni, 2024

■ *Fernando Anaya*



■ *Das von Argentinien, Bolivien und Chile gebildete Lithium-Dreieck könnte der weltweit größte Lieferant des "weißen Goldes" werden, aber die Diskussion in der Region über einen Rechtsrahmen für die Ausweitung der Förderaktivitäten könnte den Fortschritt behindern.*

Inhaltsangabe

	Lithium – Perspektiven von Nutzern und Anbietern zusammenbringen ...	4
I.	Einleitung	7
II.	Globale Impulse für die Lithiumindustrie	8
III.	Lithiumressourcen und -reserven in Lateinamerika	11
IV.	Regionale Wertschöpfungskette	14
	4.1 Installierte Kapazität	15
	4.2 Regionale Produktion	16
	4.3 Lithiumexport	17
V.	Herausforderungen	19
	Der technologische Fortschritt	19
	Langfristige Investitionen mit unzureichender Rendite	20
	Unsicherheit bei den Genehmigungsverfahren	21
	Wenige Anreize, "lokal zu kaufen"	22
	Institutionelle Schwächen und Nachholbedarf bei technischem Wissen ...	23
	Abhängigkeit von ausländischen Zulieferern für Schlüsseltechnologien ..	24
	Schutz von Umwelt- und Sozialstandards	24
VI.	Ansatzpunkte für die öffentliche Politik	26
	6.1 Führungsrolle des Lithiums gegenüber Konkurrenzprodukten	26
	6.2 Exploration und Extraktion	27
	6.2.1 Weiterentwicklung von Technologien für die Lithiumextraktion	27
	6.2.2 Gewinnung von Nebenprodukten	28
	6.3 Weiterverarbeitung von Lithium - Neupositionierung Lateinamerikas in der Lithium-Wertschöpfungskette	29
	6.4 Vermarktung und Nutzung	30
	6.4.1 Öffnung des regionalen Marktes und globale Positionierung	30
	6.4.2 Verbesserung der Effizienz in der Transportlogistik	31
	6.5 Kreislaufwirtschaft	33

Durchbruch zum Erfolg Lateinamerikas in der Lithiumindustrie

Analyse der Wertschöpfungskette, der regionalen Entwicklung und der öffentlichen Politik

VII.	Leitlinien für Strategien und öffentliche Politik	34
	7.1 Erhöhung der Rechtssicherheit und Verbesserung der rechtlichen Rahmenbedingungen	34
	7.2 Entwicklung und Anwendung von innovativer Technologie	34
	7.3 Impuls für lokale Ausbildungsprogramme	35
	7.4 Integration der Lithium-Industrie in die regionalen Wertschöpfungsketten	35
	7.5 Förderung von Recycling und Kreislaufwirtschaft	35
	7.6 Soziale und ökologische Verantwortung	36
VIII.	Bibliografie	37

Vorwort

Lithium – Perspektiven von Nutzern und Anbietern zusammenbringen

Hubertus Bardt, Institut der deutschen Wirtschaft

Die internationalen Wertschöpfungsketten werden in diesen Jahren neu sortiert. Das große Gewicht Chinas und die veränderte Risikowahrnehmung der westlichen Welt führt zu stärkerer Diversifizierung von Vorleistungsbezügen. Technologische Entwicklungen verändern die Struktur der wirtschaftlichen Beziehungen. Die Dekarbonisierung verändert die Rohstoffbasis der Volkswirtschaften. Während fossile Energieträger wie Öl und Gas an Bedeutung verlieren werden, bedürfen die neuen Energietechnologien andere Rohstoffe. Dies gilt sowohl für die Energiegewinnung wie auch die Speicherung. Die Dekarbonisierung treibt die Nachfrage nach einer Reihe von Rohstoffen in bisher unbekannte Höhen.

Für Deutschland und andere Produzenten und Nutzer von Dekarbonisierungstechnologien wird damit die sichere Versorgung mit diesen Rohstoffen zu einem strategisch wichtigen Ziel. Dies gilt für erneuerbaren Wasserstoff als alternativen Energieträger sowie für Metallrohstoffe für klimafreundliche Technologien zur Energieerzeugung, -nutzung und Speicherung. Gerade für die in der deutschen Volkswirtschaft so bedeutsamen Automobilindustrie verlangt eine erfolgreiche Dekarbonisierung nach sicheren Lieferketten für Lithium und andere Batterierohstoffe. Was vor einigen Jahren noch eine Zulieferung unter vielen war, ist für die Unternehmen zum strategischen Faktor geworden. Ohne die sichere Versorgung mit Lithium können die anspruchsvollen Ausbauziele für Elektromobilität nicht erreicht werden. Ein Auto- oder Batteriehersteller, der seine Versorgung nicht sichern kann, ist nicht lieferfähig und wird im Wettbewerb verlieren.

Wenn in den industrialisierten Ländern in der EU, Nordamerika und Asien inklusive China eine stark steigende Nachfrage nach Lithium und anderen Rohstoffen zu erwarten ist, ergeben sich für Lieferländer rasant wachsende Marktchancen. Dem lateinamerikanischen Lithium-Dreieck in Argentinien, Bolivien und Chile bieten sich damit zusätzliche Entwicklungsmöglichkeiten. Entsprechend groß ist das Interesse an einer Erweiterung beziehungsweise dem Einstieg in die Produktion.

Dabei sind die lateinamerikanischen Förderländer nicht allein, vielmehr bemühen sich viele andere Gegenden der Welt um zusätzliche Lithiumproduktion. Dies gilt für etablierte Lithiumlieferanten – hier ist insbesondere Australien zu nennen – wie auch für mögliche neue Anbieter. In aller Welt, auf allen Kontinenten gibt es Lithiumprojekte. Selbst in Deutschland wird nach Lithium gesucht. Wenn die Nachfrage sich so dynamisch entwickelt, dass der Absatz gesichert ist, sind die Anbieter in einer guten Position. Aber über kurz oder lang können mehr und mehr Abbauprojekte realisiert werden, so dass der erhöhte Bedarf gut gedeckt werden kann. Dann stehen die Anbieter im Wettbewerb und müssen sich bewähren. Wer schnell ist, kann früher langfristige Kundenbeziehungen aufbauen und sich als sicherer Lieferant etablieren. Wer spät kommt, teuer produziert und sich als weniger zuverlässig erweist, wird größere Schwierigkeiten bekommen. Preisschwankungen und mögliche technische Entwicklungen, die die Lithiumnachfrage bremsen – weil sich zum Beispiel die Elektromobilität langsamer durchsetzt oder alternative Speichertechnologien mit weniger Lithiumbedarf entwickelt werden, sind weitere Marktrisiken, mit denen sich die (potenziellen) Rohstoffanbieter konfrontiert sehen.

Für die Abnehmerländer beziehungsweise die Unternehmen ist die Beschaffung von Lithium mehr als nur der Einkauf einer beliebigen Commodity. Die Bedeutung für die Aufrechterhaltung automobiler (und weiterer) Wertschöpfungsketten ist so groß, dass den Batterierohstoffen strategische Bedeutung zugemessen werden muss. Die Anforderungen der Nachfrager umfassen damit mehr als nur eine Lieferung bestimmter Mengen (und Qualitäten) zu möglichst geringen Preisen. Vielmehr sind Zuverlässigkeit und Nachhaltigkeit von besonderer Bedeutung.

Langfristige Lieferverträge sind für beide Seiten – industrielle Nachfrager und Rohstoffanbieter – von Vorteil. Für die einen ist sichergestellt, dass der zukünftige Bedarf gedeckt werden kann. Für die anderen ergibt sich daraus die notwendige Sicherheit des Absatzes, um die notwendigen großen und langfristigen Investitionen finanzieren zu können. Neben langfristigen Lieferverträgen wären auch Beteiligungen oder vergleichbare Arrangements denkbar. Gerade langlaufende Verträge gehören zum Standardinstrumentarium der Einkäufer.

Zur Sicherheit der Versorgung gehören aber nicht nur Verabredungen über langfristige Verträge, sondern auch eine entsprechende Verlässlichkeit und Qualität der Versorgung. Dazu gehören stabile Governance-Strukturen, leistungsfähige Infrastrukturen und technische Zuverlässigkeit. Drohende Lieferunterbrechungen gefährden die Wettbewerbsposition möglicher Anbieter. Dass bedeutet auch, dass der politische und gesellschaftliche Rückhalt der Förderprojekte gegeben sein muss. Eine verlässliche Versorgung gegen den Widerstand der lokalen Bevölkerung ist heutzutage kein funktionierendes Geschäftsmodell.

Zur Qualität der Versorgung gehört – zumindest für die westlich geprägten Abnehmer – auch die Einhaltung von Nachhaltigkeitsstandards. Unternehmen in Europa aber auch in Amerika legen zunehmend Wert auf die Erfüllung von Umwelt- und Sozialstandards in ihren Lieferketten. Teilweise ist dies rechtlich vorgegeben, teilweise durch die öffentliche Aufmerksamkeit auf diese Fragen begründet. Ausreichende Vorkehrungen zum Umweltschutz im Rohstoffabbau und den ersten Verarbeitungsstufen wie der Konzentration, akzeptable Sozialstandards und eine angemessene Beteiligung der lokalen Bevölkerung sind zunehmend wichtiger werdende Anforderungen an Lieferanten in den Lieferketten – und damit auch für potenzielle und bestehende Rohstofflieferanten.

Dass Lithiumabbau ein Erfolg werden kann, ist keine Selbstverständlichkeit. Dazu müssen die Marktgegebenheiten ebenso vorliegen wie das regulatorische und infrastrukturelle Umfeld. Investoren und Staaten müssen zusammenwirken, um eine langfristig orientierte und nachhaltige Lithiumwirtschaft aufbauen zu können. Im Interesse an einer solchen kooperativen Entwicklung kann ein Vorteil europäischer Abnehmer gegenüber transaktionalen chinesischen Kunden liegen. Der Wettbewerb herrscht schließlich nicht nur zwischen den Anbietern, sondern auch zwischen den Nachfragern.

Noch unsicherer als der Erfolg im Rohstoffabbau ist der Versuch, die industrielle Wertschöpfung bis hin zur Batterieproduktion auszubauen. Auch hier herrscht ein scharfer Wettbewerb mit zahlreichen Playern in China, anderen asiatischen Ländern, Europa und Nordamerika. Ob die technologische Leistungsfähigkeit und Innovationskraft bestehen, in diesem Wettbewerb erfolgreich zu sein, hängt nicht von den natürlichen Lithiumvorkommen ab. Wenn die Vorkommen aber für nicht wettbewerbsfähige Batterieproduzenten reserviert wird, können die Bodenschätze nicht zum Vorteil des Landes genutzt werden.

Die wirtschaftlichen Beziehungen in der Rohstoffförderung können sich heute nicht darauf beschränken, dass Industrieunternehmen einkaufen, Fördermonopolisten verdienen und das Land davon ansonsten keinen Vorteil hat. Eine nachhaltige Rohstoffwirtschaft kann und muss heute anders aussehen. Ob der Sprung weiter zum Endprodukt – der Batterie – der richtige Weg ist, muss im Einzelfall bewertet werden. Aber selbst wenn nicht, können und müssen die Gesellschaften von der Förderung ihrer Bodenschätze profitieren können. Eine solche Entwicklung ist im beiderseitigen Interesse und erfordert kontinuierliche Kooperation zwischen Förderländern und langfristig und nachhaltig orientierten Abnehmern.

I. Einleitung

Lithium, für die globale Energiewende von entscheidender Bedeutung, ist eine strategische Ressource für Lateinamerika. Insbesondere durch das "Lithium-Dreieck", das sich über Bolivien, Argentinien und Chile erstreckt, verfügt die Region über riesige Reserven. Diese bieten eine einmalige Chance, die wirtschaftliche Entwicklung über den reinen Abbau hinaus zu fördern. Das Mineral ist von wesentlicher Bedeutung für die Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien, welche für die Dekarbonisierung des Verkehrs und für die Speicherung erneuerbarer Energien verwendet werden und könnte als Katalysator für den industriellen und technologischen Wandel der lokalen Wirtschaft genutzt werden.

Die Ausschöpfung dieses Potenzials erfordert eine wirksame Politik und eine stabile Infrastruktur, welche den Ausbau einer umfassenden Lithium-Wertschöpfungskette in der Region ermöglichen. Dies ist ein komplexes Unterfangen, das von der Gewinnung bis hin zur Produktion von Batteriebauteilen reicht. Dadurch können Ausfuhren gesteigert, Arbeitsplätze geschaffen und Steuereinnahmen erhöht werden. Um dieses Potenzial in vollem Umfang zu nutzen, ist es notwendig, dass in den Erzeugerländern Strategien umgesetzt werden, die einerseits den wirtschaftlichen Nutzen maximieren sowie andererseits die ökologischen und sozialen Auswirkungen minimieren.

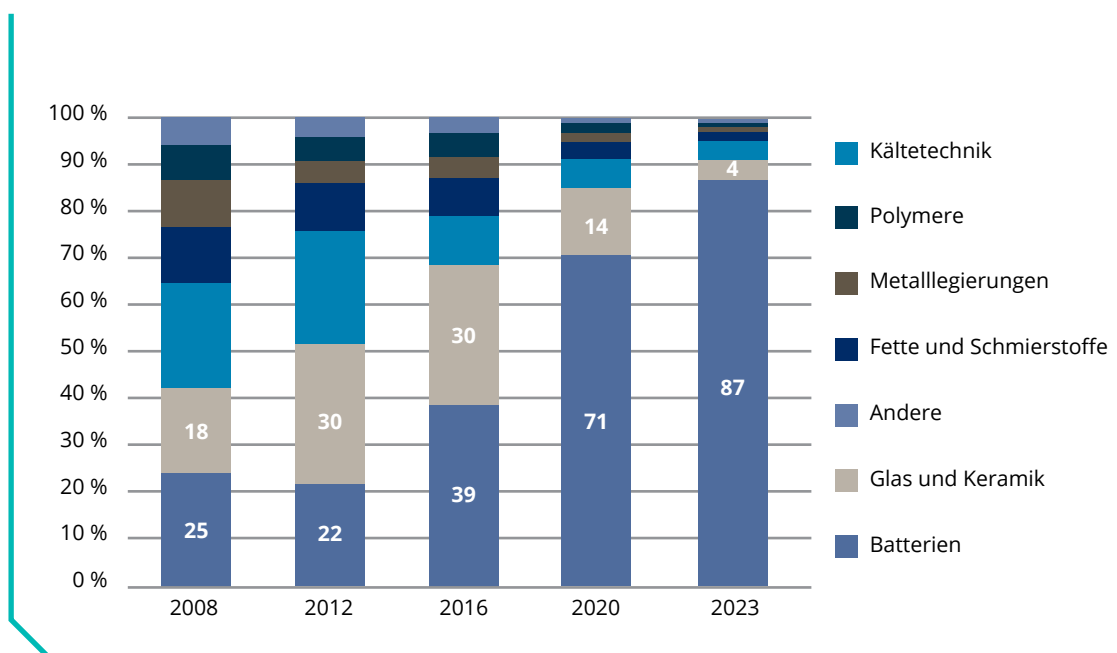
Die Herausforderungen sind beträchtlich und umfassen die Volatilität der weltweiten Nachfrage, technologische Entwicklungen, die zu einer Verlagerung weg vom Lithium führen könnten, sowie die Notwendigkeit nachhaltiger Abfallbewirtschaftungs- und Recyclingpraktiken. Die folgende Abhandlung untersucht die aktuelle Situation der globalen Wertschöpfungskette sowie die gegenwärtige und künftige Beteiligung der Region. Darüber hinaus bietet sie eine Reihe von Empfehlungen, auf denen basierend die politischen Entscheidungsträger gezielte politische Maßnahmen ergreifen können, um die Region erfolgreicher auf dem globalen Lithiummarkt zu positionieren.

II. Globale Impulse für die Lithiumindustrie

Infolge der aktuellen Energiewende wird weltweit ein deutlicher Anstieg der Lithiumnachfrage erwartet. Die Internationale Energieagentur (IEA) rechnet mit einer 42-fachen Erhöhung des Lithiumbedarfs im Zeitraum von 2020 bis 2040, sofern die nachhaltigen Entwicklungsziele im Einklang mit dem Pariser Abkommen weiter vorangetrieben werden. Dies würde eine Nachfrage von 1.160 kt Lithium bis 2040 implizieren, von denen etwa 92 % für Elektrofahrzeuge und Energiespeicher genutzt werden (IEA, 2021a und 2021b).

Der Lithiummarkt wird vor allem durch die steigende Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge und mobile elektronische Geräte bestimmt. Dieser Markt erfüllt die Bedürfnisse von Ländern wie China, Japan und Südkorea, die die weltweit führenden Hersteller von Lithium-Ionen-Batterien sind (Latam Mobility Portal, 2022). Weitere Verwendungszwecke von Lithium sind die Herstellung von Glas und Keramik, Fetten und Schmierstoffen, Stahl- und Aluminiumlegierungen, Trockenmitteln für die Kältetechnik, Elastomeren und Polymeren in der Kunststoffindustrie sowie die Arzneimittelproduktion.

ABBILDUNG 1. Weltweiter Lithiumverbrauch



Quelle: eigene Darstellung; in Anlehnung an USGS (Lithium Statistics and Information; National Minerals Information Center).

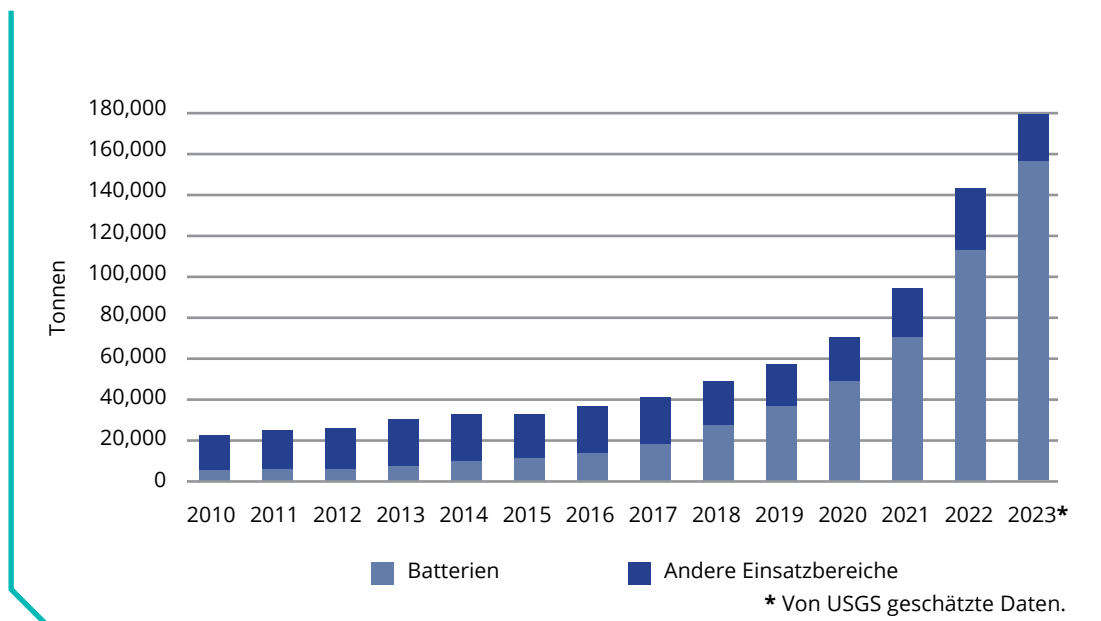
Durchbruch zum Erfolg Lateinamerikas in der Lithiumindustrie

Analyse der Wertschöpfungskette, der regionalen Entwicklung und der öffentlichen Politik

In der Batterie-Industrie wird Lithium sowohl für die Herstellung von nicht wiederaufladbaren Batterien sowie wiederaufladbaren Batterien, insbesondere von lithium-ionen-haltigen Akkus, verwendet. Der Einsatz dieser Batterien reicht von der Stromversorgung elektronischer Geräte wie kabellosen Werkzeugen, Laptops, Smartphones, dem Antrieb von Elektrofahrzeugen bis zur Speicherung im Energiesektor.

Der wachsende Anteil von Lithium an der Batterieproduktion ist vor allem auf die steigende Nachfrage für den Antrieb von Elektrofahrzeugen zurückzuführen. Allein zwischen 2010 und 2022 stieg der weltweite Lithiumverbrauch für die Batterieproduktion um fast 2.000 % und erreichte 2022 113.600 Tonnen. Darüber hinaus stieg die Nachfrage nach Lithium für andere traditionelle Verwendungszwecke im selben Zeitraum um 64 % auf insgesamt 28.400 Tonnen im Jahr 2022.

ABBILDUNG 2. Lithiumverbrauch für die Herstellung von Batterien und andere traditionelle Einsatzbereiche



Quelle: eigene Darstellung; in Anlehnung an USGS (Lithium Statistics and Information; National Minerals Information Center).

Im Bereich der Batterietechnologie könnte die Entwicklung neuer Alternativen die Nachfrage nach Lithium verändern, bspw. durch Batterien, die auf Natrium-Ionen, Zink-Ionen oder Vanadium basieren. Der Vorteil von Natrium-Ionen-Batterien liegt in der Verwendung von kostengünstigeren Materialien als bei Lithium-Ionen-

Batterien, was zu preiswerteren Batterien führt und den Einsatz kritischer Rohstoffe überflüssig macht. Derzeit sind Natrium-Ionen-Batterien die einzige praktikable Alternative, die kein Lithium benötigt. Die von CATL (Contemporary Amperex Technology) in China entwickelte Natrium-Ionen-Batterie ist schätzungsweise um 30 % günstiger als eine aus Lithium-Eisenphosphat hergestellte Batterie (IEA, 2023a).

Im Jahr 2023 präsentierte ein Elektrofahrzeughersteller, der von einem bedeutenden europäischen Automobilkonzern Unterstützung erhält, das erste Elektrofahrzeug mit Natrium-Ionen-Batterien. Darüber hinaus plant eine weitere Automarke ebenfalls, diese Batterien in ihren Elektrofahrzeugen zu verwenden. Ein führender chinesischer Automobilhersteller und Batterielieferant begann 2024 mit dem Bau einer Fabrik für Natrium-Ionen-Batterien mit einer Kapazität von 30 GWh pro Jahr, die hauptsächlich für Fahrzeuge der Mikromobilität bestimmt sind (Johnson, 2024). Marktstudien gehen davon aus, dass die Natriumbatteriebranche im Zeitraum von 2023 bis 2030 um 11,8 % pro Jahr wachsen wird. Dies entspricht einer installierten Leistung von mehr als 100 GWh/Jahr. Bei einem Null-Emissions-Szenario dürfte der Marktanteil von Natriumbatterien für leichte Elektrofahrzeuge bis 2030 zwischen 5 % und 10 % betragen (IEA, 2023b).

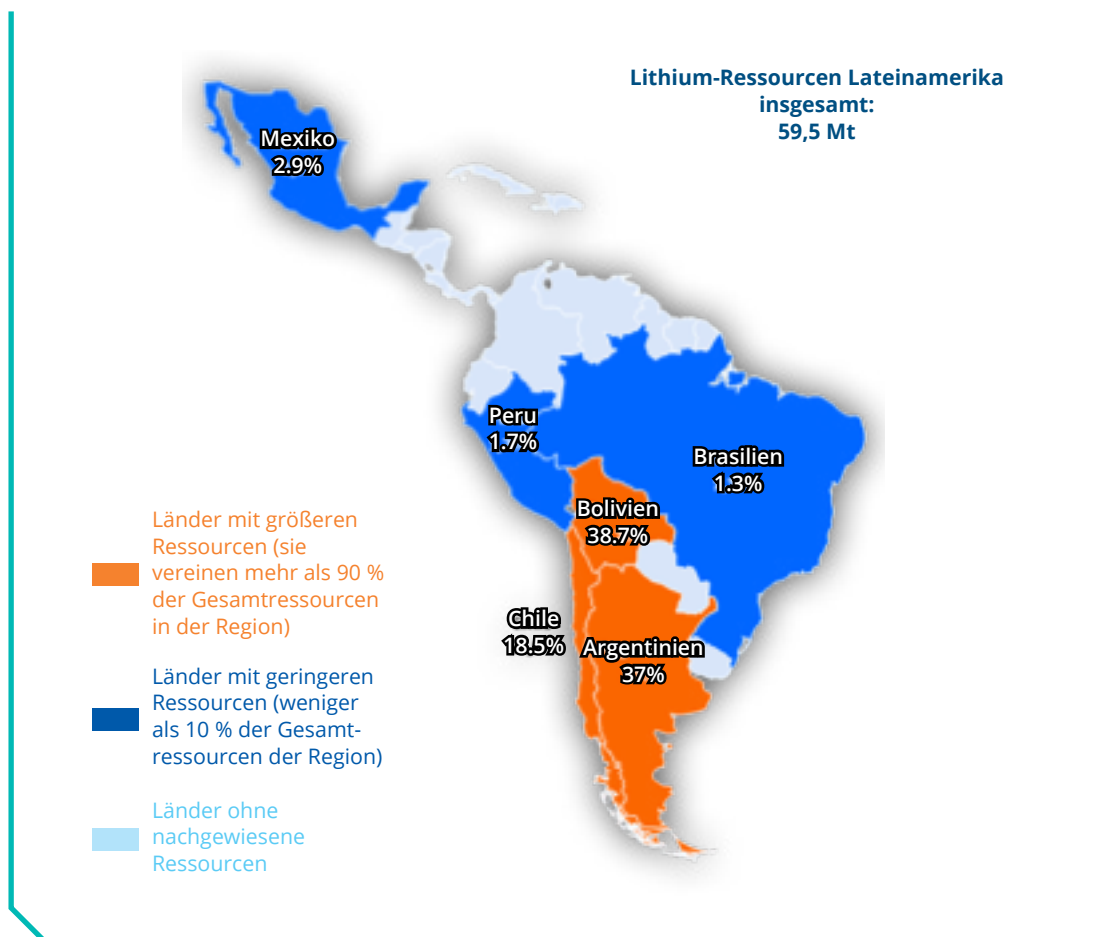
Zink-Ionen-Batterien gewinnen ihrerseits an Aufmerksamkeit im Rahmen verschiedener Anwendungen, die hohe Energiespeicherkapazität erfordern, wie tragbare Elektronik, Elektrofahrzeuge und Speicherung erneuerbarer Energien. Diese Batterien bieten erhebliche Vorteile wie geringe Umweltbelastung, höhere Sicherheit im Vergleich zu Lithium-Ionen-Batterien und gesteigerte Wirtschaftlichkeit aufgrund des reichlichen Vorkommens von Zink (Li & Wang, 2022). Der Zinkverbrauch für die Energiespeicherung wird bis 2030 voraussichtlich 300 kt erreichen (IZA, 2024).

Schließlich gibt es Vanadium-Redox-Flow-Batterien (VRFB), die derzeit in Anwendungen zum Lastausgleich, zur Reduzierung von Spitzen und zur Speicherung erneuerbarer Energien verwendet werden (Skiyas & Menictas, 2022). VRFBs haben den Vorteil einer langen Lebensdauer mit bis zu 20.000 Lade- und Entladezyklen. Des Weiteren fallen niedrige Stromgestehungskosten an und es erübrigen sich die Probleme durch Überladung oder Tiefentladung (González et al., 2023). Durch eine baldige Markteinführung könnte der Vanadium-Bedarf im Vergleich zu 2020 (7,6 kt) auf das 2,5-Fache (2030) bzw. bis auf das 29-Fache (2040) ansteigen (IEA, 2021c).

III. Lithiumressourcen und -reserven in Lateinamerika

Im Jahr 2023 wurden die weltweiten Lithiumressourcen¹ auf 105 Millionen Tonnen (Mt) geschätzt. Davon befinden sich 56,6 % in Lateinamerika, dies entspricht 59,5 Mt (USGS, 2024). Bolivien ist das Land mit dem größten Lithiumvorkommen in der Region, mit insgesamt 23 Mt (38,7 %). Es folgen Argentinien mit 22 Mt (37%) und Chile mit 11 Mt (18,5%). Die folgende Abbildung zeigt die Verteilung der Lithiumressourcen in der Region.

ABBILDUNG 3. Verteilung der Lithiumressourcen in Lateinamerika



Quelle: eigene Darstellung; in Anlehnung an USGS (2024). Mineral Commodity Summaries 2024.

¹ Die Ressourcen umfassen das gesamte Lithium, das gemäß geologischen Untersuchungen existiert. Die wirtschaftlichen oder technologischen Grenzen bei der Gewinnung werden nicht berücksichtigt.

Durchbruch zum Erfolg Lateinamerikas in der Lithiumindustrie

Analyse der Wertschöpfungskette, der regionalen Entwicklung und der öffentlichen Politik

Die obige Abbildung zeigt, dass 94 % der Lithiumressourcen Lateinamerikas in Argentinien, Bolivien und Chile konzentriert sind, welche das sogenannte "Lithium-Dreieck" bilden. Dieses Dreieck erstreckt sich entlang der Andenhochebene vom Südwesten Boliviens bis in den Norden Argentiniens und Chiles (García et al., 2013). Die restlichen 5,9 % der Lithiumvorkommen der Region befinden sich in Mexiko, Peru und Brasilien.

ABBILDUNG 4. Lithium-Dreieck



Quelle: Eigene Ausarbeitung.Referenzbild

Es ist wichtig hervorzuheben, dass die abbaubaren Lithiumreserven² weltweit im Jahr 2023 mit 28 Mt beziffert wurden. Davon entfallen 48,1 % (13,3 Mt) auf die Länder der Region. Chile ist mit den größten Lithiumreserven (9,3 Mt) sowohl regional als auch weltweit führend, während Argentinien mit 3,6 Mt nachgewiesenen Lithiumreserven den zweiten Platz in der Region und den dritten Platz in der Welt belegt (USGS, 2024). Im Gegensatz zu Chile und Argentinien

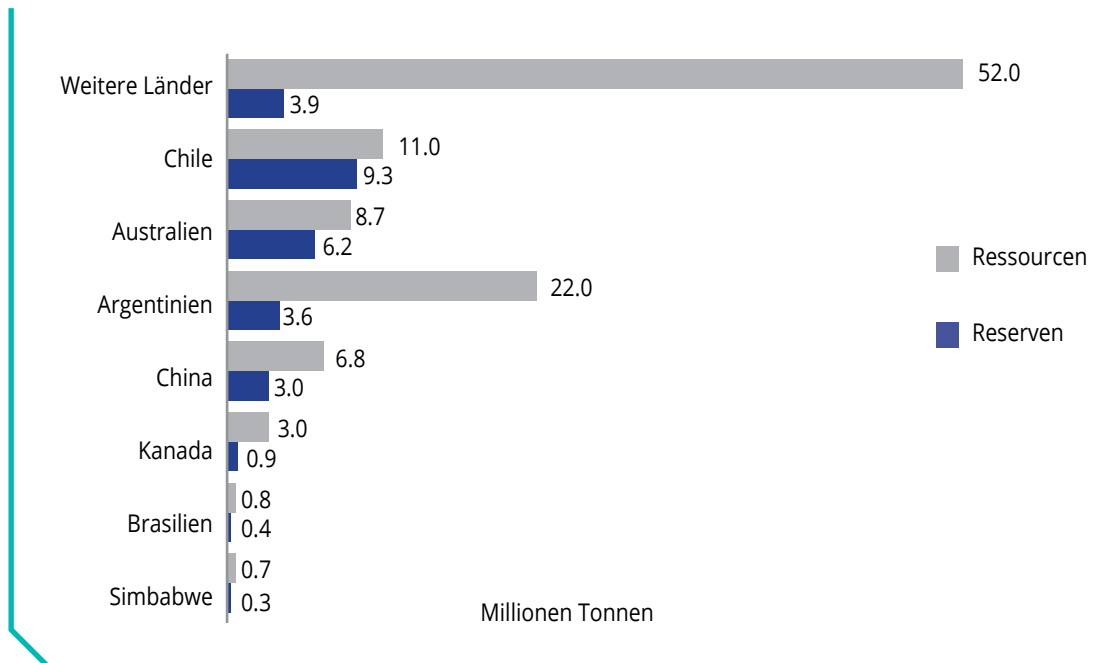
² Die Reserven umfassen das gesamte Lithium, das geologisch und wirtschaftlich hinreichend detailliert als abbaubar bewertet wurde. Diese Einschätzung erfolgt nach dem derzeitigen Stand der Technik und den derzeitigen Kosten für den Abbau.

hat Bolivien das wirtschaftliche Potenzial seiner Lithiumvorkommen noch nicht ermittelt und verfügt daher derzeit nicht über nachgewiesene Reserven.

Die wichtigsten Reserven Chiles befinden sich in der Region Antofagasta, insbesondere im Salar de Atacama und Salar del Carmen. In Argentinien liegen die Reserven in der Provinz Jujuy (Salar de Olaroz, Salar de Cauchari), in der Provinz Salta (Salar Rincón, Salar los Pozuelos, Salinas Grandes, Salar el Cementerio, Salar de Ratonés) und in der Provinz Catamarca (Salar de Hombre Muerto, Salar Antofalla) (Gozalvez et al., 2021; Mosquera et al., 2022). Die folgende Abbildung vergleicht die Lithiumressourcen und -reserven weltweit mit denen Lateinamerikas.

Die wichtigsten Reserven Chiles befinden sich in der Region Antofagasta, insbesondere im Salar de Atacama und Salar del Carmen. In Argentinien liegen die Reserven in der Provinz Jujuy (Salar de Olaroz, Salar de Cauchari), in der Provinz Salta (Salar Rincón, Salar los Pozuelos, Salinas Grandes, Salar el Cementerio, Salar de Ratonés) und in der Provinz Catamarca (Salar de Hombre Muerto, Salar Antofalla) (Gozalvez et al., 2021; Mosquera et al., 2022). Die folgende Abbildung vergleicht die Lithiumressourcen und -reserven der übrigen Länder mit der Region Lateinamerikas.

ABBILDUNG 5. Lithiumressourcen und -reserven



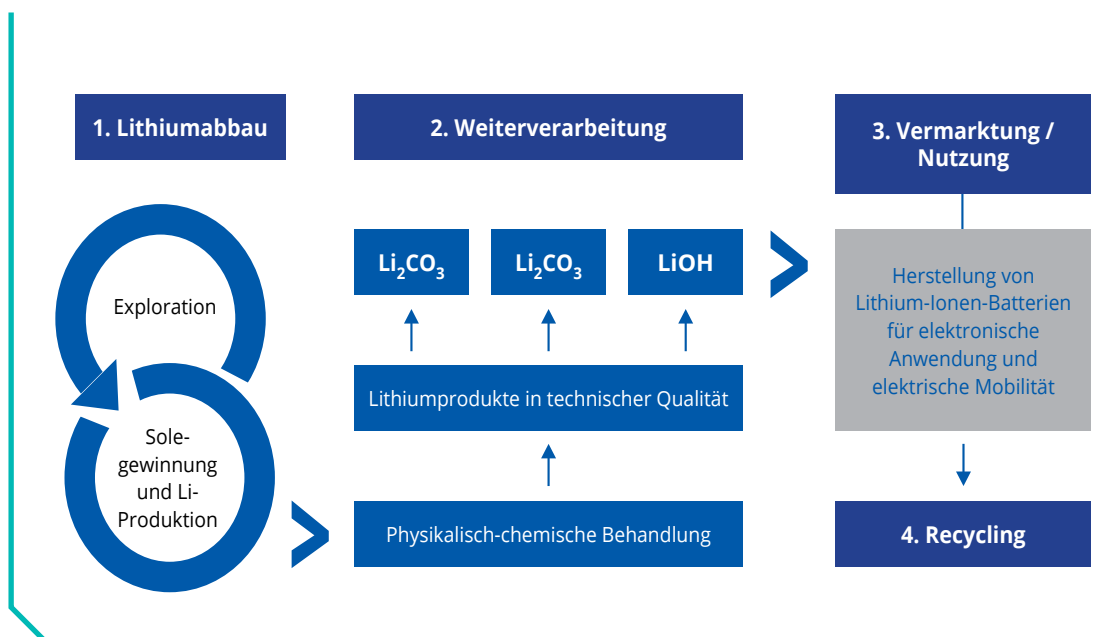
Quelle: eigene Darstellung; in Anlehnung an USGS (2024). Mineral Commodity Summaries 2024.

IV. Regionale Wertschöpfungskette

Die Lithium-Wertschöpfungskette in Lateinamerika beginnt mit der Gewinnung des Lithiums, die aus zwei Hauptphasen besteht: Exploration und Extraktion von Sole. Die Exploration ist der erste Schritt, bei dem die Lithiumreserven durch spezielle Studien geschätzt werden. Beim Extraktionsprozess wird die Sole in Becken gepumpt, wo sie einem natürlichen Verdunstungsprozess unterzogen wird, um eine hohe Lithiumkonzentration zu erhalten (Calvo, 2017).

Sobald das Lithiumkonzentrat hergestellt worden ist, folgen die nächsten Schritte in der Wertschöpfungskette: Verarbeitung des Rohstoffs, Vermarktung, Verwendung und Recycling. Die folgende Abbildung veranschaulicht die gesamte Kette.

ABBILDUNG 6. Lithiumwertschöpfungskette in Lateinamerika



Quelle: eigene Darstellung; in Anlehnung an Lithium-Bericht, Oktober 2021, Ministerium für Produktive Entwicklung (2021).

Wie aus der obigen Abbildung hervorgeht, besteht die Lithiumwertschöpfungskette aus drei Stufen. Die Region Lateinamerika ist hauptsächlich im Abbau tätig. Lithiumverarbeitung und -vermarktung stehen noch am Anfang und sind durch eine begrenzte Anzahl von Akteuren und wenig Infrastruktur gekennzeichnet. Im Folgenden wird die vorhandene Infrastruktur in der Region beschrieben, die mit den einzelnen Phasen verbunden ist.

4.1 Installierte Kapazität

Die Kapazität der Infrastruktur für die Lithiumproduktion in Lateinamerika spiegelt sowohl das Potenzial als auch die Herausforderungen der Region in diesem Sektor wider. Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Lithiumproduktion dargestellt. Dabei werden die Aktivitäten der wichtigsten Unternehmen, die hohe Marktkonzentration und öffentlich-private Partnerschaften beschrieben.

Im bekannten Lithium-Dreieck sind hauptsächlich vier Unternehmen tätig. In Chile begann die Produktion 1984 mit der Sociedad Chilena del Litio, heute Albemarle, in Partnerschaft mit Corfo. 1996 begann SQM mit der Produktion. Zusammen erreichen Albemarle und SQM eine Kapazität von über 300.000 Tonnen Lithiumkarbonat-Äquivalent (LCE) pro Jahr. Für 2024 wird mit zwei neuen Projekten gerechnet, die eine gemeinsame Kapazität von 35.000 Tonnen LCE/Jahr erreichen werden. In Argentinien wurde 1997 mit der Produktion begonnen. Erst kürzlich erfolgte die Fusion von Livent und Allkem zu Arcadium Lithium, was zu einer Kapazität von rund 52.000 Tonnen LCE/Jahr führt. Bolivien hingegen befindet sich in der Anfangsphase mit einer Anlage im Salar de Uyuni mit einer Kapazität von 15.000 Tonnen LCE/Jahr, wobei eine erhebliche Expansion geplant ist. Die nachstehende Tabelle gibt einen Überblick über die Unternehmen, die derzeit in den Ländern des Lithiumdreiecks kommerziell produzieren.

TABELLE 1. Produktionsunternehmen im Lithiumdreieck

LAND	UNTERNEHMEN	OPERATION	STANDORT	PRODUKTIONSKAPAZITÄT (TONNEN LCE/JAHR)	PRODUKTYP
Chile	SQM	Salar de Atacama	Region Antofagasta	70.000	Lithiumcarbonat Lithiumhydroxid
	SQM	Salar del Carmen		180.000	
	Albemarle	Salar de Atacama		85.000	
Argentinien	Arcadium Lithium (Fusion zwischen Livent und Allkem)	Salar de Hombre Muerto Salar de Olaroz	Provinzen: Catamarca y Jujuy	52.000	Lithiumcarbonat Lithiumchlorid
Bolivien	YLB	Salar de Uyuni	Departement Potosí	15.000	Lithiumcarbonat

Quelle: eigene Darstellung; in Anlehnung an: Cochilco (2022). Inversión en la minería chilena, Allkem (2024), Olaroz; Arcadium (2024). Arcadium Lithium (2024).

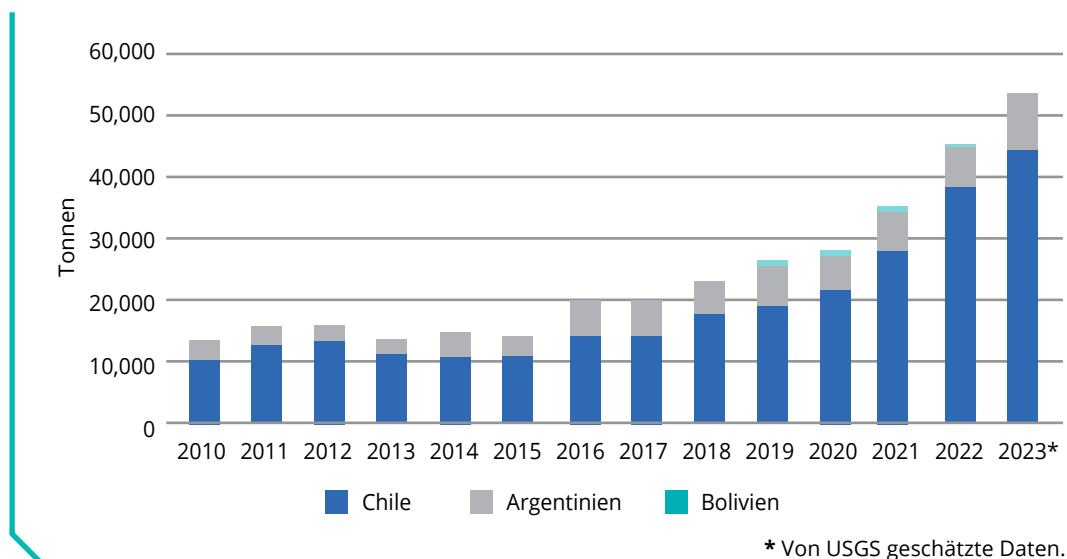
Die obige Tabelle zeigt die begrenzte installierte Kapazität in der Region im Vergleich zu den gegebenen Reserven und dem steigenden weltweiten Bedarf nach Lithium. Die geringe Zahl öffentlich-privater Unternehmen und die hohe Marktkonzentration sind zentrale Herausforderungen. Dies schränkt die Diversifizierung und die Fähigkeit ein, rasch auf Marktveränderungen zu reagieren. In diesem Zusammenhang ist es notwendig, die Inbetriebnahme neuer Projekte zu beschleunigen, um die installierte Kapazität zu erhöhen und den Wettbewerb zwischen den Unternehmen zu fördern.

Der Ausbau der installierten Kapazität ist nicht nur für die Befriedigung der globalen Nachfrage von entscheidender Bedeutung, sondern auch dafür, dass Lateinamerika eine führende Position in der Lithiumproduktion erreichen kann.

4.2 Regionale Produktion

Die Lithiumproduktion in der Region wies in den letzten Jahren ein deutliches Wachstum auf, speziell in Chile und Argentinien. Dieser Anstieg ist auf technologische Fortschritte und Investitionen in effizientere Abbau- und Verarbeitungsverfahren zurückzuführen. Beide Länder führten Technologien zur Gewinnung von Salzlake ein, die einen schnelleren und umweltfreundlicheren Abbau ermöglichen. Dies hat die Erteilung von Genehmigungen für neue Abbauprojekte erleichtert. Die nachstehende Abbildung veranschaulicht die Entwicklung der Produktion in der Region.

ABBILDUNG 7. Lithiumabbau im Länderdreieck (2010- 2023)



Quelle: eigene Darstellung; in Anlehnung an USGS (2024) und Memoria Institucional YLB (2021).

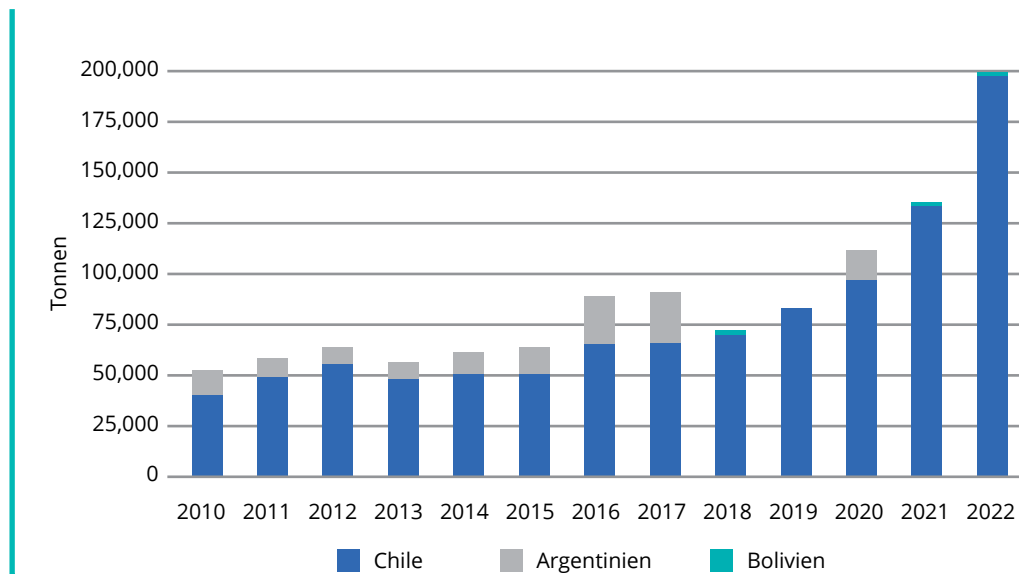
Zwischen 2010 und 2022 stieg die Lithiumförderung in den Ländern des Dreiecks um 236 %, von 13.460 Tonnen im Jahr 2010 auf 45.190 Tonnen im Jahr 2022. Dieses Wachstum wurde vor allem von Chile angetrieben, wo man seit 2015 einen konstanten Anstieg verzeichnete. Damals schrieb die chilenische Regierung Lizenzen für den Abbau und die Produktion von 400.000 Tonnen Lithium aus, die sich ausschließlich auf den Verkauf des Rohstoffs (Lithiumkarbonat und Lithiumhydroxid) im Rahmen von Sonderverträgen mit in- und ausländischen Privatunternehmen bis zum Jahr 2050 beziehen (Gutiérrez, 2021). Im Jahr 2022 entfielen auf Chile 84 % der Gesamtproduktion mit 38.000 t, gefolgt von Argentinien mit 15 % (6.590 t) und Bolivien mit dem restlichen 1 % (600 t). Die Lithiumproduktion in Bolivien befindet sich in der Pilotphase mit einer durchschnittlichen Jahresproduktion von aktuell etwa 420 t.

4.3 Lithiumexport

Der größte Teil des in der Region produzierten Lithiums wird nach China, in die USA und nach Europa exportiert, wo es hauptsächlich für die Herstellung von High-Tech-Batterien bestimmt ist. Chile und Argentinien haben besonders enge Handelsbeziehungen zu China aufgebaut, dem weltweit größten Lithiumimporteure. China hat stark in die Lithiumförderung in der Region investiert. Weitere Abnehmer für Lithium dieser Länder sind Japan, Südkorea, Kanada, Belgien und Mexiko.

Aus der Region wird Lithium sowohl als Karbonat als auch als Hydroxid exportiert. Zwischen 2010 und 2022 stieg die Ausfuhr an Lithiumkarbonat im Länderdreieck um 282 % auf insgesamt 199.240 Tonnen. Davon entfielen 99,7 % auf Chile. Die nachstehende Tabelle zeigt die Ausfuhrmengen von Lithiumkarbonat in diesem Zeitraum.

ABBILDUNG 8. Export von Lithiumkarbonat aus dem Länderdreieck (2010-2022)



Quelle: eigene Darstellung; in Anlehnung an UN comtrade (2024), Handelsdaten.

Die Ausfuhren Argentiniens blieben bis 2017 konstant. Danach traten jedoch Schwankungen auf, die möglicherweise mit Änderungen der Regierungspolitik und veränderten Marktbedingungen zusammenhängen. Bolivien exportierte 2021 erstmals im industriellen Maßstab und lieferte 10.090 Tonnen Lithium nach China, Russland und in die Arabischen Emirate (OEC, 2021).

V. Herausforderungen

Lateinamerika steht unter dem Druck, seine Lithiumindustrie kurzfristig auszubauen, um seine Position auf dem globalen Markt zu verbessern. Für die Entwicklung der Lithiumindustrie in der Region ergeben sich dadurch verschiedene Herausforderungen. Sie reichen von der Gefahr der Verdrängung von Lithium durch andere Materialien bis hin zu den Bedingungen, die ein Wachstum der Lithiumindustrie einschränken und die Region daran hindern, die steigende globale Nachfrage zu erfüllen. Schwachstellen der aktuellen Rahmenbedingungen, insbesondere im Hinblick auf Rechtssicherheit und Mitbestimmungsregeln für den Sektor, schaffen ein unsicheres Klima. Neue Investitionen könnten trotz der großen Reserven der Länder unattraktiv erscheinen. Darüber hinaus wird die Lithiumindustrie von umliegenden Gemeinden und lokalen Akteuren als wasserintensiv wahrgenommen. Da die Gebiete mit großen Lithiumvorkommen häufig von Dürre geplagt sind, wird das Wasser von den Gemeinden vor Ort als knappe Ressource wahrgenommen. Diese Situation erschwert die Genehmigungsverfahren. In Verbindung mit den obligatorischen Umwelt- und Sozialschutzanforderungen kommt es zuweilen zu Überregulierungen. Dies hemmt den Ausbau der Infrastruktur zusätzlich. Im Folgenden werden die wichtigsten Herausforderungen beschrieben:

Herausforderung 1: Der technologische Fortschritt

Lithium könnte als bevorzugtes Material für Batterien verdrängt werden, da der technologische Fortschritt für einen zunehmenden Wettbewerb sorgt. Zu diesen Entwicklungen gehören Festkörperbatterien, Superkondensatoren und neue Batteriechemikalien, die häufiger vorkommende und umweltfreundlichere Materialien verwenden.

Festkörperbatterien verändern den Markt für die Energiespeichertechnologien, indem sie flüssige Elektrolyte durch feste ersetzen, um die Sicherheit und Energiedichte zu verbessern (Takada, 2018). Mehrere führende Unternehmen der Branche entwickeln diese effizienteren Technologien. Zu den Festelektrolyten, die den Lithiumbedarf senken könnten, gehören der "sodium super ionic conductor" (NASICON) und die Schwefel-Elektrolyte (Machín et al., 2024).

Darüber hinaus werden Superkondensatoren, die ein schnelles Laden und Entladen bieten (El-Kady et al., 2016), auf ihr Potenzial zur langfristigen

Energiespeicherung hin untersucht, was ihre Anwendungen über kurze Energieentladungen hinaus erweitern könnte. Auf dem Markt gibt es bereits ein Angebot an Zellen und Modulen für Superkondensatoren, die Anwendungen in der Elektronik, Elektromobilität und erneuerbaren Energien³ finden. Darüber hinaus haben andere Unternehmen das Hauptaugenmerk ihrer Forschung auf die Superkondensator-technologie gelegt und festgestellt, dass die Verbindung von Lithium-Ionen-betriebenen Systemen und Superkondensatoren die Lebensdauer von Batterien verlängern könnte. Ein Unternehmen führte Studien mit einem Hybridsystem aus Lithium-Batterien und Superkondensatoren in einem Bergbau-LKW durch und zeigte eine Verlängerung der Batterie-Lebensdauer um mehr als 20 % gegenüber einer Einzelbatterie und dies zu wettbewerbsfähigen Preisen.⁴

Und schließlich werden neue Chemikalien für Batterien erforscht, die weiter verbreitete Materialien wie Natrium oder Zink verwenden. Natrium-Ionen-Batterien können eine kostengünstigere und nachhaltigere Alternative sein, die die Nachfrage nach Lithium senken könnte (Wan et al., 2018). Zudem wird an Graphen geforscht, das für seine hohe Leitfähigkeit und Leichtigkeit bekannt ist (Cao et al., 2019). Es besitzt das Potenzial, die Herstellung von Elektrofahrzeugbatterien zu revolutionieren, sofern es gelingt, die Herstellungskosten zu senken. Es wurde gezeigt, dass Graphen die Entladungsrate und Leistung sowie die Zyklenbeständigkeit der Lithium-Ionen-Batterien verbessert und auch für Natrium-Ionen-Batterien verwendet werden kann. Zukünftig könnten diese Fortschritte zu Batterien mit einer deutlich verbesserten Leistung führen, was einen innovativen Durchbruch in der Batterieleistung darstellen würde (Joy et al., 2021).

Herausforderung 2: Langfristige Investitionen mit unzureichender Rendite

In Lateinamerika haben Großprojekte für die Gewinnung und Verarbeitung von Lithium Schwierigkeiten, eine ausreichende Rendite zu erzielen, um die Unsicherheit hinsichtlich der Skalierbarkeit, der Genehmigungsfristen sowie die Rechtsunsicherheit für Investitionen auszugleichen. Die Notwendigkeit, hohe Anfangsinvestitionen in die Infrastruktur zu leisten, verbunden mit einem häufig als schwach empfundenen ordnungspolitischen Rahmen

³ <https://maxwell.com/products/ultracapacitors/>

⁴ <https://www.skeletontech.com/skeleton-blog/rd-project-uncovers-innovative-win-win-combinations-of-lithium-ion-batteries-and-supercapacitors>

sowie großem Konfliktpotential mit den umliegenden Gemeinden, macht diese Projekte weniger attraktiv als andere oftmals weniger kapitalintensive Projekte.

Die Volatilität der Lithiumpreise erhöht die Komplexität der Abbauprojekte in Lateinamerika. Trotz des Aufwärtstrends bei den Preisen können Schwankungen die langfristige finanzielle Tragfähigkeit dieser Projekte gefährden. Vor diesem Hintergrund stehen lateinamerikanische Regierungen mit politischer Instabilität und schwachen Regulierungsrahmen vor größeren Herausforderungen, um stabile und berechenbare Bedingungen zu schaffen, die neue Investitionen anziehen.

Hinzu kommt das politische Risiko, das verschiedene Ausprägungen annehmen kann: das reicht von veränderten Prioritäten bei der Politik des Lithiumabbaus in den Förderländern bis hin zur Verstaatlichung von Unternehmensvermögen. Darüber hinaus könnte die Einführung neuer staatlich festgelegter Schürfgeldern die wirtschaftliche Tragfähigkeit von Lithiumprojekten beeinträchtigen und die Entscheidungsfindung der Investoren verzögern.

Herausforderung 3: Unsicherheit bei den Genehmigungsverfahren

Durch bürokratische Verfahren und den Widerstand von Gemeinden werden Projekte in großem Maße verzögert, insbesondere im Bergbau und Tagebau. So kann es bis zu zehn Jahre dauern, eine Genehmigung zu erhalten. Die rechtlichen Rahmenbedingungen in Ländern wie Argentinien und Chile sind häufig nicht spezifisch genug, um den Besonderheiten der Lithiumgewinnung aus Sole gerecht zu werden, was das Genehmigungsverfahren zusätzlich erschwert. Die Unternehmen sehen sich einem komplexen und variablen regulatorischen Umfeld gegenüber, mit häufigen Änderungen der Vorschriften und Verfahren für die Projektgenehmigung. Diese regulatorische Unsicherheit schreckt Investoren ab, da sie erheblichen Risiken ausgesetzt sind, ohne dass eine angemessene Kapitalrendite im Laufe der Zeit gewährleistet ist. Dies beeinträchtigt den Wert und die finanzielle Tragfähigkeit der Projekte und unterstreicht die Notwendigkeit, diese Prozesse zu beschleunigen.

Trotz bestehender Vorschriften muss die Ordnungspolitik gefestigt werden, um ihre Wirksamkeit zu verbessern sowie ihre Auslegung und Umsetzung verständlicher und berechenbarer zu machen. Das

Genehmigungsmanagement beinhaltet vielfältige Interaktionen mit verschiedenen staatlichen Stellen, deren Anforderungen sich häufig überschneiden oder widersprüchlich sind. Diese bürokratische Struktur verlängert die Genehmigungsvorgänge und erhöht die Gesamtkosten der Projekte.

Die Unternehmen müssen beträchtliche Ressourcen für die Einholung der Genehmigungen bereitstellen, einschließlich der Beauftragung von Rechtsanwälten und Beratern. Darüber hinaus erhöht die uneinheitliche Rechtsdurchsetzung die Anfälligkeit für willkürliche Entscheidungen, was die Effizienz und Gleichbehandlung bei der Genehmigung von Lithiumprojekten beeinträchtigt.

Herausforderung 4: Wenige Anreize, "lokal zu kaufen"

Bislang ist es trotz der politischen Maßnahmen in der Region nicht gelungen, den Aufbau lokaler Kapazitäten zu fördern. Obwohl der Abbau von Lithium ein beträchtliches wirtschaftliches Potenzial birgt, steht die Integration in die Wertschöpfungskette für die Herstellung von Batterien und Zwischenprodukten sowie anderen Lithiumderivaten noch aus. Dies schränkt die Fähigkeit der Region ein, sich als wichtiger Technologieanbieter zu positionieren. Folglich wird Lithium größtenteils als unverarbeitetes Rohmaterial exportiert, was den wirtschaftlichen Nutzen und den lokalen technologischen Fortschritt begrenzt.

Es fehlt ein Bindeglied zwischen Lithium als Rohstoff und der anschließenden Produktion, wie zum Beispiel der Herstellung von Batterien oder deren Bauteilen (López-Calva, 2022). Gegenwärtig konzentriert man sich auf die 1. Phase der Wertschöpfungskette, jedoch gibt es Bemühungen, die Zwischenphase auszubauen, wie die chilenische Nationale Lithiumstrategie zeigt. Zum anderen baut Argentinien im Rahmen einer strategischen Partnerschaft zwischen dem Unternehmen Y-Tecnología (Y-TEC), einer Tochtergesellschaft von Yacimientos Petrolíferos Fiscales, S.A. (YPF), und der Universität Nacional de La Plata (UNLP) die erste kommerzielle Batteriefabrik in der Region. Des Weiteren führt Bolivien Pilotprojekte durch, um Kapazitäten für die Herstellung von Zwischenprodukten zu schaffen. Dazu gehören eine Anlage für Kathodenmaterial und die Herstellung von Basiszellen für verschiedene Lithium-Ionen-Batterietechnologien. Es ist wichtig hervorzuheben, dass die Region nach wie vor von der Einfuhr von Endprodukten abhängig ist und ein erhebliches Handelsdefizit aufweist.

Ein Ausbau der regionalen Batterieproduktion könnte dazu beitragen, dieses Gefälle auszugleichen.

Herausforderung 5: Institutionelle Schwächen und Nachholbedarf bei technischem Wissen

Der Ausbau von Kapazitäten in der Lithiumproduktion und die Schaffung von Wertschöpfungsketten für Zwischen- und Endprodukte erfordern eine verstärkte Forschung, Entwicklung, Innovation und Ausbau der fachlichen sowie institutionellen Kapazitäten.

Die Mittel für Forschung, Entwicklung und Pilotprojekte sind unzureichend. Obwohl die argentinische Nationale Agentur zur Förderung von Forschung, technologischer Entwicklung und Innovation (Agencia I+D+i) einen umfangreichen Fond für die Finanzierung dieser Bereiche bereitstellt, reicht dieser nicht aus, um den Bedarf zu decken. 49 % ihrer Mittel hat die Agentur für Projekte im Zusammenhang mit Batterien und ihren Bestandteilen bereitgestellt. Dies zeigt das Interesse an diesem Bereich.

Darüber hinaus ist der Übergang vom Labor zur industriellen Produktion von Technologien mit hohen Kosten und Risiken verbunden. Unternehmen, die neue Technologien vermarkten wollen, haben Schwierigkeiten beim Zugang zu Materialien, Technologie, Arbeitskräften und Ausrüstung, um verschiedene Prototypen für Erprobung und Validierung herzustellen. Gegenwärtig verfügen die Länder des Lithium-Dreiecks nicht über Mechanismen, die gewährleisten, dass Unternehmen diese Kosten erstattet bekommen können, wenn die neue Technologie die Anforderungen des Marktes nicht erfüllt. Programme und Start-ups werden insolvent und scheiden aus dem Markt aus, bevor neue Technologien und Kenntnisse Marktreife erlangen.

Auch in anderen Bereichen wie dem Recycling sind verstärkte Anstrengungen zum Aufbau von Kapazitäten erforderlich. In Lateinamerika befindet sich das Recycling von Batterien noch im Anfangsstadium. Die rechtlichen Rahmenbedingungen und die Verwaltungskapazitäten haben sich nicht im gleichen Maße entwickelt wie die Zahl der Batterien, die das Ende ihrer Lebensdauer erreichen. Nur wenige Länder der Region (Brasilien, Chile, Kolumbien, Costa Rica und Mexiko) verfügen derzeit über Unternehmen, die vor Ort die ersten Verarbeitungsschritte des Recyclings durchführen. Dadurch wird ein Zwischenprodukt erzeugt, das zur

Weiterverarbeitung exportiert werden muss, wodurch das Potenzial für die Lithiumrückgewinnung in andere Länder verlagert wird (López et al., 2024).

Herausforderung 6: Abhängigkeit von ausländischen Zulieferern für Schlüsseltechnologien

Der Mangel an lokalen Zulieferern für die Batterieherstellung benachteiligt die Region gegenüber Wettbewerbern, die Zugang zu engen Partnerschaften mit lokalen Maschinenherstellern haben.

Die Region ist in hohem Maße von ausländischen Zulieferern für Förder- und Verarbeitungsanlagen abhängig. Diese Abhängigkeit schränkt nicht nur die Kontrolle über die Lithium-Wertschöpfungskette ein, sondern wirkt sich auch auf die Verfügbarkeit und Kosten aus. Da es keine lokale oder regionale Produktion von wichtigen Anlagen wie für die Soleextraktion gibt, ist Lateinamerika gezwungen, diese Technologie zu importieren. Einfuhrbeschränkungen oder Preiserhöhungen auf dem Weltmarkt können die Entwicklung des Sektors dadurch unmittelbar beeinflussen. Dieser Faktor stellt eine große Herausforderung für die Unabhängigkeit und die technologische Entwicklung der Region im Lithiumbereich dar.

Herausforderung 7: Schutz von Umwelt- und Sozialstandards

Die rechtlichen Rahmenbedingungen der Länder weisen nach wie vor Schwachstellen auf, um den Umweltschutz zu gewährleisten und gute Beziehungen zu den lokalen Gemeinden zu fördern. Die Adaption von Gesetzen anderer Bergbauindustrien zur Festlegung von Vorschriften für die Lithiumindustrie führt zu Unklarheiten bei der Auslegung des Rechtsrahmens, insbesondere hinsichtlich der Umweltauswirkungen und der Beziehung zu den Gemeinden.

Was die soziale Dimension betrifft, so wird die Industrie mitunter als Verursacher von Territorialstreitigkeiten und Umweltzerstörung wahrgenommen. So gibt es beispielsweise in den Hochanden Hinweise von Gemeinden, dass die Ausbeutung der Salares die Ökosysteme verändert und die seit Generationen praktizierten Tätigkeiten in der Landwirtschaft und Viehhaltung beeinträchtigt. Diese Situation hat zu Sammelklagen geführt, vor allem im Salar de Atacama, bei dem seit mehr als drei Jahrzehnten

Lithium abgebaut wird (Lorca et al., 2023). In Argentinien, im Gebiet von Salinas Grandes und der Lagune von Guayatoyoc, leisteten 33 Gemeinden Widerstand gegen die Ansiedlung eines Lithiumunternehmens auf ihrem Territorium. Die Gemeinden forderten eine Vorabkonsultation gemäß eines von ihnen selbst ausgearbeiteten institutionellen Mechanismus, um ihre Bedenken zum Ausdruck bringen zu können: 1) mögliche negative soziale und ökologische Auswirkungen, 2) lokale und regionale Produktionsmodelle und 3) institutionelle Mängel bei der Gewährleistung des ökologischen und sozialen Schutzes der Projekte und des Beitrags zur Armutsbekämpfung (Pragier, 2019).

Aus ökologischer Sicht ist die Lithiumgewinnung mit Umweltrisiken für die Feuchtgebiete der Anden verbunden, die sich aus der möglichen Übernutzung von Grundwasser und der Versalzung von Süßwasserreserven ergeben. In der Atacama-Wüste beispielsweise führt der Einsatz von Techniken zur Mineralabscheidung durch Wasserverdampfung zu einem hohen Wasserverbrauch, der die verfügbaren Ressourcen übersteigt. Die Wasserknappheit führte bereits zu einer Reduzierung der Vegetation und der Zahl der Wildtiere. Studien zu Vogelwanderungen im Salar de Atacama deuten auf einen möglichen Zusammenhang zwischen der Lithiumgewinnung und dem geringeren Auftreten von zwei der drei Flamingoarten in der Region hin (Gutiérrez et al., 2022).

VI. Ansatzpunkte für die öffentliche Politik

Es müssen die Bereiche ermittelt werden, in denen öffentliche Politik die Beteiligung der Region an der Wertschöpfungskette für Zwischen- und Endprodukte von Lithium stärkt. Politische Initiativen können sich auf Tätigkeiten erstrecken, die von der Exploration und Gewinnung von Lithium bis hin zu dessen Verarbeitung, Nutzung, Vermarktung und Recycling reichen. Im Folgenden werden die Hauptbereiche beschrieben, in denen die Politik ansetzen kann.

6.1 Führungsrolle des Lithiums gegenüber Konkurrenzprodukten

Der zunehmende Wettbewerb mit alternativen Materialien bei der Herstellung von Batterien gefährdet die Bedeutung von Lithium. Dies bietet jedoch auch die Möglichkeit, die Wertschöpfungskette zu stärken und zu diversifizieren, um ihre Wettbewerbsfähigkeit gegenüber anderen aufkommenden Technologien zu gewährleisten. Die Optimierung der Lithiumgewinnung und der Verarbeitungseffizienz, die Verbesserung der Recyclingtechnologie und die Ausweitung der Forschung auf neue Anwendungen können dazu beitragen, seine Position als Schlüsselmaterial in der Batterieindustrie zu behaupten.

In diesem Sinne sollten die politischen Entscheidungsträger Maßnahmen zur Förderung von Innovation und Effizienz in der Lithium-Wertschöpfungskette umsetzen. Dazu gehört auch die Investition in Extraktions- und Verarbeitungstechnologie, welche die Kosten senkt und die Reinheit von Lithium erhöht. Dies wiederum erhöht die Leistung von Lithium-Ionen-Batterien. Durch die Einrichtung von Forschungszentren, die sich mit der Entwicklung fortschrittlicher Recyclingtechnologien und neuer Anwendungen für Lithium befassen, kann sichergestellt werden, dass Lithium in der Batterieindustrie weiterhin relevant bleibt.

Schließlich könnten die Regierungen die Schaffung von Anreizen für Unternehmen in Betracht ziehen, die in die Verbesserung der Lithium-Recyclinginfrastruktur und in die Erforschung von Technologien zur Verlängerung der Lebensdauer von Lithium-Batterien investieren. Auch die Festlegung von Standards und Vorschriften zur Förderung des Prinzips

der Kreislaufwirtschaft in der Batterieproduktion könnte die nachhaltige Nutzung von Lithium begünstigen.

6.2 Exploration und Extraktion

6.2.1 Weiterentwicklung von Technologien für die Lithiumextraktion

Die Entwicklung fortschrittlicher Technologien hat das Potenzial, die Produktionseffizienz zu optimieren und die Umweltauswirkungen zu mindern, die mit der Lithiumgewinnung durch Verdampfungsmethoden verbunden sind. Forschung und Entwicklung spielen daher eine entscheidende Rolle. Für die Länder des Dreiecks ist es von entscheidender Bedeutung, die Machbarkeitsstudien für Technologien wie die direkte Lithium-Extraktion (DLE) sowie die Anwendung von Elektrodialyse und den Einsatz von Elektromembranen zu beschleunigen, mit denen sich Lithium effizienter aus der Sole trennen lässt. So entfällt beispielsweise der Einsatz von Verdampfungsbecken und es verringert sich der Wasserverlust in die Atmosphäre. Gleichzeitig wird weniger Wasser aus der Sole entnommen (Cleantech Lithium, 2022). Darüber hinaus begünstigt DLE die Gewinnung von Rohstoffen in kürzerer Zeit, wodurch die Produktionskapazität erhöht wird. Zu den weiteren Technologien mit innovativen Verfahren gehört die Wasserrückgewinnung aus der Sole. So hat beispielsweise das Advanced Mining Technology Center (AMTC) der Universität von Chile eine neue Methode der Kombination von Membrandestillation und Kristallisatoren entwickelt, die nicht nur die Lithiumgewinnung aus der Sole ermöglicht, sondern auch die Rückgewinnung von Wasser. Dieses Verfahren erlaubt nicht nur die Rückgewinnung von 25% bis 39% des Wassers aus der Sole, sondern erleichtert auch die Extraktion von Nebenprodukten wie Kaliumchlorid. Es verkürzt die Verarbeitungszeit und nutzt für die Prozesse Sonnenenergie (Quilaqueo et al., 2022).

Um die technologischen Möglichkeiten mit konkreten politischen Maßnahmen zu begleiten, müssen die Regierungen klare rechtliche Rahmenbedingungen schaffen. Zunächst wird empfohlen, politische Maßnahmen zu entwickeln, die Anreize für Investitionen in neue Technologien wie die direkte Lithiumgewinnung und Elektrodialysesysteme schaffen. Dies

kann durch Innovationsprogramme, Pilotprojekte und finanzielle Unterstützung für Forschung und Entwicklung sowie durch den Abbau bürokratischer Hürden bei der Inbetriebnahme neuer technologischer Anlagen erreicht werden. Darüber hinaus können politische Entscheidungsträger bei der Bildung von Partnerschaften zwischen Forschungseinrichtungen, Hochschulen und Unternehmen Fortschritte erzielen. Diese Partnerschaften ermöglichen es, die Markteinführung von Technologien zu beschleunigen, die bereits in Laboratorien erprobt wurden. Außerdem gewährleisten sie die rasche Umsetzung technologischer Entwicklungen.

6.2.2 Gewinnung von Nebenprodukten

Einige Länder und Unternehmen sollten die Möglichkeit der Rückgewinnung und Verwertung von Nebenprodukten aus Lithiumlagerstätten wie Kalium, Bor und Magnesium in Betracht ziehen. Lokale Unternehmen verfügen über die Kapazitäten zur Verarbeitung von Nebenprodukten aus Solen mit hohen Konzentrationen von Mineralien, wie der Salar de Uyuni in Bolivien, der einen signifikanten Magnesiumgehalt aufweist. Die Möglichkeit, den wirtschaftlichen Wert durch die Gewinnung von Kaliumsulfat und Natriumsulfat zu steigern, stellt einen Mehrwert dar. Auf der anderen Seite sind Argentinien und Chile für die Rückgewinnung von Nebenprodukten besser gerüstet, da sie über Studien und Techniker verfügen, die auf die Verarbeitung sämtlicher Mineralien ihrer Salzseen/Salares spezialisiert sind (López et al., 2019). In Chile gewinnen zwei Bergbauanlagen in dem Salar de Atacama gemeinsam Lithiumcarbonat und Kaliumchlorid (Albemarle und SQM).

Regierungen können wirtschaftliche Anreize und Vorschriften schaffen, die die Rückgewinnung von Nebenprodukten bei der Lithiumgewinnung fördern. Insbesondere können sie Steuerermäßigungen oder Steuergutschriften für Unternehmen anbieten, die fortschrittliche Technologien zur Abtrennung und Reinigung von Mineralien einsetzen. Darüber hinaus ist es wichtig, Vorschriften festzulegen, die die Bergbauunternehmen verpflichten, die Gewinnung aller wertvollen Ressourcen aus den Lithiumlagerstätten zu maximieren und so einen nachhaltigeren Betrieb zu gewährleisten. Die Einhaltung dieser Standards kann durch regelmäßige Audits überwacht werden, um die Wirksamkeit der verwendeten Technologien und Methoden zu gewährleisten.

6.3 Weiterverarbeitung von Lithium - Neupositionierung Lateinamerikas in der Lithium-Wertschöpfungskette

Anstatt Lithium nur in Form eines Rohstoffs zu exportieren, haben die Länder die Möglichkeit, ihr Angebot zu diversifizieren, indem sie in die Entwicklung von Produkten mit höherer Wertschöpfung investieren. Dies kann von der Herstellung von Bauteilen wie Kathoden, Anoden und Elektrolyten bis hin zur Herstellung von Batterien reichen. Dieser Ansatz erfordert jedoch den Aufbau von Verarbeitungskapazitäten, Investitionen in Infrastruktur, Technologie und die Ausbildung von spezialisierten Fachkräften.

Chile, Argentinien und Bolivien sind dabei, die Beziehung zwischen Bergbau und Entwicklung neu zu gestalten. Hierbei kann Lithium, unter Einbezug von Innovation und Industrie, die Verbindung zwischen den lateinamerikanischen Volkswirtschaften und den globalen Märkten neu definieren. Diese Veränderung sollte von Wissenschaft und Technologie angetrieben werden, damit die Rohstoffe in Zwischenprodukte umgewandelt und die entsprechenden Industrien entwickelt werden können. (Barandiarán, 2019). Die Entwicklungsstrategien dieser drei Länder weisen jedoch erhebliche Unterschiede auf. Argentinien beispielsweise überträgt die Verantwortung für die produktive und technologische Entwicklung in erster Linie dem Privatsektor. Bolivien seinerseits zeichnet sich durch einen zentralisierten Ansatz aus. Hier liegt die Kontrolle über den Lithiumsektor und die Investitionen in den Händen der Zentralregierung. Diese versucht, eine autonome Strategie umzusetzen, um sicherzustellen, dass die mit Lithium verbundene Wertschöpfung auf dem Staatsgebiet verbleibt. Im Falle von Chile werden Elemente beider Systeme kombiniert. Die Nationale Lithiumstrategie der Regierung zielt darauf ab, Allianzen zwischen dem chilenischen Staat und Unternehmen zu fördern, indem sie Lithium als strategische Ressource deklariert hat (Obaya, 2022).

Obwohl die Strategien von Chile, Argentinien und Bolivien für die Entwicklung der Lithiumindustrie erheblich voneinander abweichen, gibt es Gemeinsamkeiten, welche die Position von Lateinamerika in der globalen Wertschöpfungskette dieser Ressource verbessern. Um eine stärkere Beteiligung der Region an diesem Industriezweig zu erreichen, können die drei Länder ihre Forschungs- und Entwicklungsansätze, ihre Investitionspolitik sowie ihre Umwelt- und Sozialvorschriften in Einklang bringen. Insbesondere können Maßnahmen zur direkten Förderung von Investitionen in die Herstellung von Lithium-Batterie-Komponenten und Endbaugruppen ergriffen werden. Dazu gehören Steuerbefreiungen und

Forschungsbeihilfen sowie die Bereitstellung günstiger Finanzierungsmittel für Start-ups und etablierte Unternehmen. Parallel dazu ist es wichtig, bilaterale und multilaterale Abkommen zu schließen, um den Technologie- und Wissenstransfer zu fördern, den Austausch bewährter Verfahren zwischen den Ländern zu erleichtern und die Zusammenarbeit mit Hochschulen und Unternehmen zu koordinieren. Des Weiteren sind Vorschriften zum Schutz des geistigen Eigentums und zur Festlegung von Qualitätsstandards für Produkte erforderlich.

Eine erfolgreiche Regionalstrategie müsste sich die verschiedenen Vorzüge der Modelle zunutze machen: Argentiniens privater Ansatz könnte Investitionen anziehen und Innovationen fördern. Boliviens staatliche Vision könnte eine gerechte Verteilung der wirtschaftlichen Vorteile gewährleisten. Und Chiles gemischtes Modell könnte als Brücke zwischen diesen beiden Ansätzen dienen. Durch die Festlegung gemeinsamer Ziele und die Berücksichtigung der Besonderheiten jedes Landes könnte Lateinamerika nicht nur seine Position in der Lithium-Wertschöpfungskette verbessern, sondern auch einen Präzedenzfall für die regionale Zusammenarbeit schaffen, der den wirtschaftlichen und sozialen Nutzen für die gesamte Region maximiert.

6.4 Vermarktung und Nutzung

6.4.1 *Öffnung des regionalen Marktes und globale Positionierung*

Der lateinamerikanischen Region bietet sich in den kommenden Jahrzehnten eine große Chance, ihre Position auf dem Lithiummarkt zu festigen. Diese Industrie ermöglicht die Diversifizierung der Produktionsstruktur durch die Schaffung von Netzen lokaler Zulieferer und die Förderung der regionalen Integration. In diesem Zusammenhang ist die Koordinierung mit anderen lateinamerikanischen Ländern wie Brasilien oder Mexiko von grundlegender Bedeutung, um regionale Lieferketten in Bereichen wie der Montage von Elektrofahrzeugen aufzubauen und dabei die in diesen Ländern bestehenden Wertschöpfungsketten zu nutzen (Sánchez et al., 2023).

Damit die Region die Chancen auf dem globalen Lithiummarkt nutzen kann, müssen die Regierungen bei der Formulierung ihrer Politik einen proaktiven und gut strukturierten Ansatz verfolgen.

Zunächst ist es von grundlegender Bedeutung, eine klare Investitionspolitik für spezifische Infrastrukturen und Technologien zu entwickeln, die eine effiziente Gewinnung und Weiterverarbeitung von Lithium zu Zwischen- und Endprodukten ermöglichen. Dazu gehört auch die Schaffung steuerlicher und finanzieller Anreize, um sowohl inländische als auch internationale Investitionen anzuziehen.

Zweitens sollten die Regierungen die Bildung regionaler Konsortien fördern, an denen einschlägige Akteure aus dem Privatsektor, akademische Einrichtungen und internationale Partner beteiligt sind. Diese Konsortien können die Entwicklung innovativer Technologien sowie den Ausbau lokaler industrieller Kapazitäten fördern und vorantreiben. So kann eine umfassende und wettbewerbsfähige Entwicklung der Lithium-Wertschöpfungskette gewährleistet werden.

Ein drittes wichtiges Element ist die Schaffung eines Regulierungsrahmens, der die ökologische und soziale Nachhaltigkeit des Lithiumgeschäfts sicherstellt. Diese Rahmenbedingungen sollten Vorschriften für die Wassernutzung, die Abfallwirtschaft und die Auswirkungen auf die lokalen Gemeinden umfassen, um zu garantieren, dass die Industriepraktiken verantwortungsvoll und langfristig nachhaltig sind.

Schließlich muss die internationale Zusammenarbeit prioritär behandelt werden. Die Regierungen können aktiv bilaterale und multilaterale Abkommen zur Förderung des Handels, des Technologietransfers und der Zusammenarbeit in Forschung und Entwicklung anstreben. Dies wird nicht nur den Zugang zu globalen Märkten erweitern, sondern auch die Verhandlungsposition der Länder stärken.

6.4.2 *Verbesserung der Effizienz in der Transportlogistik*

Die Optimierung der Transportlogistik von Lithium ist wichtig, um die steigende Nachfrage nach Lithium sowie Zwischen- und Fertigprodukten zu befriedigen. Durch die Verbesserung der Infrastruktur und der logistischen Vorschriften kann die Region ihre

Exportkapazität steigern und ihre Wettbewerbsfähigkeit auf dem globalen Markt ausbauen sowie ihre Position als Lieferant in der Lithium-Wertschöpfungskette verbessern.

Um die Effizienz der Lithium-Transportlogistik zu steigern, können die politischen Entscheidungsträger der Standardisierung von Sicherheitsmaßnahmen für den Lithium-Transport voranbringen. Solche Standards stellen sicher, dass die Betreiber Protokolle für die Handhabung, den Transport und die Lagerung einhalten, einschließlich der Zertifizierung ihrer Fachkräfte und der Einführung von Überwachungs- und Kontrollsystemen (Litio Argentina, 2024).

Ebenso wichtig ist es, die logistische Infrastruktur auszubauen, um die Produktionsstätten mit den Märkten zu verbinden. Dazu gehört nicht nur die Verbesserung von Straßen und Häfen, sondern auch der Ausbau und die Modernisierung der Schienennetze, die eine umweltfreundlichere und wettbewerbsfähigere Option für den Transport großer Lithiummengen darstellen. Laut López (2022) kann der Schienenverkehr die CO₂-Emissionen im Vergleich zum Lkw-Verkehr um 80 % senken.

Schließlich sind die Integration der Verkehrsträger und die Zusammenarbeit zwischen dem öffentlichen und dem privaten Sektor für die Stärkung der Logistikkette von entscheidender Bedeutung. Die Einführung von Steueranreizen und Subventionen für Unternehmen, die in die Erneuerung von Flotten investieren, kann die Einführung effizienterer und umweltfreundlicherer Lösungen beschleunigen und die Position der Region stärken, neue Anforderungen zur Verringerung des CO₂-Fußabdrucks zu erfüllen, wie z.B. gemäß dem CO₂-Grenzausgleichssystem.

6.5 Kreislaufwirtschaft

Das Wachstum des Marktes für Elektrofahrzeuge und die potenzielle Beteiligung der Region an der Herstellung von Zwischenprodukten bieten die Möglichkeit, neue Märkte zu erschließen, um Lithium-Ionen-Batterien ein zweites Leben zu geben und einige ihrer Komponenten wiederzuverwenden. Die Kreislaufwirtschaft, die über das Recycling hinausgeht, umfasst die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten, ihre Wiederverwendung, ihre Reparatur und ihr Recycling sowie die Rückgewinnung von Materialien. In diesem Zusammenhang können Batterien für andere Zwecke wie zum Beispiel die Speicherung erneuerbarer Energien wiederverwendet werden, bevor sie recycelt werden.

Durch die Wiederverwendung und das Recycling von Batteriekomponenten können die Herstellungskosten neuer Produkte gesenkt, zusätzliche Einnahmen generiert und Steuervorteile erzielt werden, während gleichzeitig die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen verbessert wird (Curtis et al., 2021). Durch die Integration dieser Technologien in die regionale Wirtschaft kann ein erheblicher Beitrag zur Verringerung der Treibhausgasemissionen geleistet werden, was den Zielen der nachhaltigen Entwicklung entspricht.

Um diese Chance nutzen zu können, müssen die politischen Entscheidungsträger Maßnahmen zur Förderung der Entwicklung von Recyclingtechnologien und des Baus von Spezialanlagen für die Behandlung von Altbatterien entwickeln. Es ist von entscheidender Bedeutung, dass diese Strategien Vorschriften beinhalten, die die Hersteller dazu verpflichten, Batterien mit einer höheren Zerlegbarkeit, Wiederverwendung und Recyclingfähigkeit zu entwickeln, und Standards für den sicheren Umgang mit wiederverwertbaren Materialien festlegen. Darüber hinaus können die Regierungen Anreize für Unternehmen schaffen, in Recyclingtechnologien zu investieren, und die Schaffung eines wettbewerbsorientierten Marktes für recycelte Materialien fördern. Preissignale für die Vermarktung dieser Materialien sind von entscheidender Bedeutung, um die langfristige Nachhaltigkeit des Marktes zu gewährleisten.

VII. Leitlinien für Strategien und öffentliche Politik

Angesichts des prognostizierten weltweiten Mangels an kritischen Mineralien und Energiematerialien befinden sich die lateinamerikanischen Unternehmen, die durch öffentlich-private Partnerschaften unterstützt werden, bei der Sicherung dieser Ressourcen in einer besseren Wettbewerbsposition als ihre internationalen Konkurrenten. Die Region steht jedoch vor einer kritischen Phase in der Entwicklung ihrer Lithiumindustrie, in der die festgestellten Hindernisse wirksame staatliche Maßnahmen erfordern, die auf die sozioökonomischen und ökologischen Gegebenheiten des jeweiligen Landes zugeschnitten sind. Mit den vorgeschlagenen Leitlinien sollen die spezifischen Herausforderungen aufgegriffen werden, die der nachhaltigen Entwicklung des Sektors im Wege stehen, und die Chancen maximiert werden, die dieser kritische Rohstoff den Ländern der Region bietet.

7.1 Erhöhung der Rechtssicherheit und Verbesserung der rechtlichen Rahmenbedingungen

Rechtsunsicherheit und mangelnde Klarheit der rechtlichen Rahmenbedingungen schrecken sowohl inländische als auch ausländische Investoren ab. Es muss unbedingt ein klares und stabiles rechtliches Umfeld geschaffen werden, das Investitionen schützt und den Anlegern Sicherheit bietet. Es ist notwendig, neue Vorschriften zu formulieren, die speziell auf die Bedürfnisse und Merkmale der Lithiumindustrie eingehen und die sie von anderen Bergbausektoren wie dem Kupferbergbau unterscheiden. Dies bedeutet, Unklarheiten in Rechtsvorschriften zu beseitigen, die Risiken für potenzielle Investoren mit sich bringen können. Darüber hinaus sollten anpassungsfähige Regulierungsmechanismen vorgesehen werden, die die Projektentwicklung nicht durch zu restriktive Vorschriften einschränken.

7.2 Entwicklung und Anwendung von innovativer Technologie

Angesichts des hohen Wasserbedarfs für die Lithiumgewinnung, den mit der Extraktion verbundenen Kosten und den Umweltauswirkungen ist es wichtig, die Einführung von Technologien zu fördern, die den

Wasserverbrauch und die Auswirkungen auf die Wasserressourcen minimieren und die gleichzeitig die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie auf dem Lithiummarkt erhalten. Innovative Technologien, die es ermöglichen, das aus der Sole gewonnene Wasser wiederzuverwenden oder seine Verdunstung auf ein Mindestmaß zu beschränken, sollten bevorzugt werden. Die aktive Förderung von Unternehmen im Bereich von Forschung, Entwicklung und Innovation ist nicht nur eine Aufgabe des Staates, sondern auch für die Weiterentwicklung dieser Technologien von Bedeutung.

7.3 Impuls für lokale Ausbildungsprogramme

Die meisten lithiumproduzierenden Länder in der Region exportieren diesen Rohstoff in unverarbeiteter Form, was den lokalen wirtschaftlichen Nutzen einschränkt. In diesem Zusammenhang müssen lokale Ausbildungsprogramme eingeführt werden, um qualifizierte Arbeitskräfte vor Ort auszubilden, anstatt auf auswärtige Kräfte oder Dienstleistungen für die Lithiumindustrie angewiesen zu sein. Dazu gehört die Förderung der fachlichen und universitären Bildung sowie des Wissenstransfers zwischen Ländern durch Partnerschaften zwischen Regierungen, Hochschulen und der Industrie.

7.4 Integration der Lithiumindustrie in die regionalen Wertschöpfungsketten

Die Konsolidierung einer regionalen Wertschöpfungskette für Lithium kann die Position Lateinamerikas auf dem Weltmarkt stärken. Dazu bedarf es politischer Maßnahmen zur Förderung der regionalen Wirtschaftsintegration, zur Erleichterung des intraregionalen Handels mit Lithiumerzeugnissen und zur Stärkung der länderübergreifenden Forschungs- und Entwicklungszusammenarbeit. Eine integrierte Wertschöpfungskette würde die Resilienz der Industrie gegenüber globalen Marktschwankungen erhöhen und eine engere Zusammenarbeit bei der Standardisierung von Vorschriften und Handelspraktiken fördern.

7.5 Förderung von Recycling und Kreislaufwirtschaft

Angesichts des prognostizierten Anstiegs der Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien und der Umweltauswirkungen, die mit der Lithiumproduktion

verbunden sind, müssen politische Maßnahmen zur Förderung der Kreislaufwirtschaft ergriffen werden. Dazu gehört die Unterstützung der Entwicklung von Technologien und Verfahren für das Recycling von Batterien sowie die Schaffung von Märkten für Recyclingprodukte. Die Einführung effizienter Sammel- und Recyclingsysteme kann die Abhängigkeit von der Lithiumgewinnung reduzieren und die Umweltauswirkungen der Industrie verringern. Die Schaffung von Märkten für Recyclingprodukte und die Einführung von Technologien zur Maximierung der Verwertung sind Schlüsselemente für die Förderung der Kreislaufwirtschaft.

7.6 Soziale und ökologische Verantwortung

Die Lithiumindustrie muss auf eine Weise arbeiten, die ökologische Nachhaltigkeit gewährleistet und positive Beziehungen zu den lokalen Gemeinden fördert. Dazu gehört die Einhaltung höchster Umweltschutzstandards und die Durchführung von Konsultationen in den Gemeinden gemäß geregelten Verfahren, die einen konstruktiven Dialog zwischen den relevanten Akteuren gewährleisten. Damit die gesellschaftliche Akzeptanz der Unternehmen (licence to operate) erworben und aufrechterhalten werden kann, müssen die Unternehmenstätigkeiten einerseits transparent erfolgen, andererseits müssen die Gemeinden sowohl an der Planung als auch an dem Nutzen der Lithiumgewinnung beteiligt werden.

VIII. Bibliografie

- Albemarle. (2024). Global Specialty Chemicals Company. Nuestra historia. Albemarle Chile. Letzter Abruf am 1. April 2024 unter <https://www.albemarlelithio.cl/products/nuestra-historia>
- Allkem. (2024). Allkem Olaroz. Allkem. Letzter Abruf am 23. Februar 2024 unter <https://www.allkem.co/projects/olaroz>
- Arcadium. (2024). Arcadium Lithium: Global Operations. Letzter Abruf am 23. Februar 2024 unter <https://arcadiumlithium.com/quick-facts/>.
- Barandiarán, J. (2019). Lithium and development imaginaries in Chile, Argentina and Bolivia. World Development, 113, 381-391. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.09.019>.
- Calvo, E. (2017). Procesos de extracción de litio de sus depósitos en salares argentinos. En: Litio un Recurso natural estratégico desde los depósitos minerales a las aplicaciones tecnológicas. Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ANCEFN). Argentina. https://www.ancefn.org.ar/user/FILES/PUBLICACIONES/Recurso_Natural_Estrategico.pdf
- Cao, M., and Xiong, D. (2019). Ultrahigh Electrical Conductivity of Graphene Embedded in Metals. Advance Functional Materials. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adfm.201806792>
- Castello, A., y Kloster, M. (2015). Industrialización del litio y agregado de valor local. Centro Interdisciplinario de Estudios en Ciencia, Tecnología e Innovación (CIECTI). http://www.ciecti.org.ar/wp-content/uploads/2015/10/Litio_DT_v9_final-web.pdf
- CEPAL (2023). Extracción e industrialización del litio. Oportunidades y desafíos para América Latina y el Caribe <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/5c1c160a-557d-42d9-bfa8-929142d2fa21/content>
- Cleantech Lithium. (2022). Extracción directa de litio. Letzter Abruf am 15. Mai 2024 unter <https://ctlithium.com/es/about/direct-lithium-extraction/>.
- Cochilco (2022). Inversión en la minería chilena – Cartera de proyectos 2022-2031. Comisión Chilena del Cobre. Ministerio de Minería. <https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Inversion%20en%20la%20mineria%20chilena%20-%20cartera%20de%20proyectos%202020-2029%20VF.pdf>.

- Curtis, T., Smith, L., Buchanan, H., & Heath, G. (2021). A Circular Economy for Lithium-Ion Batteries Used in Mobile and Stationary Energy Storage: Drivers, Barriers, Enablers, and U.S. Policy Considerations (NREL/TP--6A20-77035, 1768315, MainId:24998; p. NREL/TP--6A20-77035, 1768315, MainId:24998). <https://www.osti.gov/biblio/1768315/>
- Fang Wan, Linlin Zhang, Xi Dai, Xinyu Wang, Zhiqiang Niu & Jun Chen (2018). Aqueous rechargeable zinc/sodium vanadate batteries with enhanced performance from simultaneous insertion of dual carriers. Letzter Abruf im Mai 2024 unter <https://www.nature.com/articles/s41467-018-04060-8>.
- González, J. M., Parrilla, Á. P., & Aguado, J. A. (2023). Chemical energy storage technologies. En J. García (Ed.), Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering (pp. 426-439). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821204-2.00100-8>.
- Gutiérrez, J. S., Moore, J. N., Donnelly, J. P., Dorador, C., Navedo, J. G., & Senner, N. R. (2022). Climate change and lithium mining influence flamingo abundance in the Lithium Triangle. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 289(1970), 20212388. <https://doi.org/10.1098/rspb.2021.2388>.
- Heath, G. A., Ravikumar, D., Hansen, B., & Kupets, E. (2022). A critical review of the circular economy for lithium-ion batteries and photovoltaic modules – status, challenges, and opportunities. Journal of the Air & Waste Management Association, 72(6), 478-539. <https://doi.org/10.1080/10962247.2022.2068878>.
- IEA. (2021a). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions – Analysis. International Energy Agency (IEA). <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.
- IEA. (2021b). Total lithium demand by sector and scenario, 2020-2040 – Charts – Data & Statistics. International Energy Agency (IEA). <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/total-lithium-demand-by-sector-and-scenario-2020-2040>.
- IEA. (2021c). Mineral requirements for clean energy transitions. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. International Energy Agency. Letzter Abruf am 10. Mai 2024 unter <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions/mineral-requirements-for-clean-energy-transitions>.
- IEA. (2023a). Trends in batteries – Global EV Outlook 2023 – Analysis. International Energy Agency (IEA). Letzter Abruf im Mai 2024 unter <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/trends-in-batteries>

- IEA. (2023b). Energy Technology Perspectives 2023. International Energy Agency. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a86b480e-2b03-4e25-bae1-da1395e0b620/EnergyTechnologyPerspectives2023.pdf>.
- IZA. (2024). Energy Storage ZINC. International Zinc Association. Letzter Abruf am 10. März 2024 unter <https://www.zinc.org/energy-storage/>.
- Jerez, B., Garcés, I., & Torres, R. (2021). Lithium extractivism and water injustices in the Salar de Atacama, Chile: The colonial shadow of green electromobility. *Political Geography*, 87, 102382. <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2021.102382>.
- Johnson, P. (2024). BYD breaks ground on its first sodium-ion EV battery plant. *Electrek*. Letzter Abruf im Mai 2024 unter <https://electrek.co/2024/01/05/byd-breaks-ground-first-sodium-ion-ev-battery-plant/>.
- Joy, R., Balakrishnan, N., Das, A. (2021) Graphene: Chemistry and Applications for Lithium-Ion Batteries. *Electrochem*, MDPI. <https://www.mdpi.com/2673-3293/3/1/10>.
- Kazunori Takada (2018). Progress in solid electrolytes toward realizing solid-state lithium batteries <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775318304646>
- Li, W., & Wang, X. (2022). Chapter 24—Recent advances in metal-ion batteries with metal sulfide/selenide. In G. Dalapati, T. Shun Wong, S. Kundu, A. Chakraborty, & S. Zhuk (Eds.), *Sulfide and Selenide Based Materials for Emerging Applications* (pp. 645-678). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99860-4.00027-7>.
- Li-Bridge (2023). Building a Robust and Resilient U.S. Lithium Battery Supply Chain. <https://netl.doe.gov/sites/default/files/2023-03/Li-Bridge%20-%20Building%20a%20Robust%20and%20Resilient%20U.S.%20Lithium%20Battery%20Supply%20Chain.pdf>
- Lithium Statistics and Information | U.S. Geological Survey. (s. f.). <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/lithium-statistics-and-information>.
- Lítio Argentina. (2024). Cómo es la logística de un proyecto de litio. Lítio Argentina. Letzter Abruf im Mai 2024 unter <https://litoargentina.com/produccion/como-es-la-logistica-de-un-proyecto-de-litio/>.

- López, R., Alfaro, P., de la Paz, R., & Azócar, D. (2023). Litio: Una ventana de oportunidades. Revista Beauchef, Universidad de Chile. Letzter Abruf am 02. April 2024 unter <https://ingenieria.uchile.cl/noticias/210777/litio-una-ventana-de-oportunidades>.
- López-Calva, L. (2022). Litio en América Latina: ¿Una nueva búsqueda de “El Dorado”? UNDP. <https://www.undp.org/es/latin-america/blog/graph-for-thought/lithium-latin-america-new-quest-el-dorado>.
- Maher F. El-Kady, Yuanlong Shao & Richard B. Kaner (2016) Graphene for batteries, supercapacitors and beyond <https://www.nature.com/articles/natrevmats201633>.
- Quilaqueo, M., Seriche, G., Barros, L., González, C., Romero, J., Ruby-Figueroa, R., Santoro, S., Curcio, E., & Estay, H. (2022). Water recovery assessment from hypersaline lithium-rich brines using Membrane Distillation-Crystallization. Desalination, 537, 115887. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115887>.
- Skyllas-Kazacos, M., & Menictas, C. (2022). Vanadium Redox Flow Batteries. En L. F. Cabeza (Ed.), Encyclopedia of Energy Storage (pp. 407-422). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819723-3.00050-0>.
- Sojka, R., Pan, Q., & Billmann, L. (2020). Comparative study of Li-ion battery recycling processes. <https://accurec.de/wp-content/uploads/2021/04/Accurec-Comparative-study.pdf>.
- SQM. (2024). Nuestros productos. Carbonato e Hidróxido de Litio. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Letzter Abruf im Mai 2024 de <https://www.sqmlithium.com/en/nuestros-productos/>.
- UN Comtrade Database. (2022). Trade data. Letzter Abruf am 02. April 2024 unter <https://comtradeplus.un.org/TradeFlow>
- USGS. (2024). Mineral Commodity Summaries 2024. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-lithium.pdf>.
- Walter, M., Snyder, V., Balza, L., & Sanin, M. E. (2023). Del litio al vehículo eléctrico en América Latina y el Caribe. IDB Publications. <https://doi.org/10.18235/0005271>.
- Wilson Center (2023) El litio de América Latina: perspectivas sobre minerales críticos y la transición energética global <https://www.wilsoncenter.org/publication/el-litio-de-america-latina-perspectivas-sobre-minerales-criticos-y-la-transicion>.

Durchbruch zum Erfolg Lateinamerikas in der Lithiumindustrie

Analyse der Wertschöpfungskette, der regionalen Entwicklung und der öffentlichen Politik

- Wilson Center (2024) El esquivo desarrollo de la industria del litio para Chile. Letzter Abruf am 02. April 2024 unter <https://www.wilsoncenter.org/publication/el-esquivo-desarrollo-de-la-industria-del-litio-para-chile>
- YLB (2021). Memoria Institucional 2021. Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB). <https://www.ylb.gob.bo/resources/img/Memoria2021YLB.pdf>.

Konrad-Adenauer-Stiftung e.V.

Regionalprogramm Energiesicherheit und Klimawandel Lateinamerika

Leiterin: Julia Sandner

Redaktionelle Koordination: Giovanni Burga / Johanna Pastor

Übersetzung: Silvana Zimmer / Julia Sandner

Steuerliche Adresse: Calle Grimaldo del Solar 162, Oficina 1004, Miraflores, Lima 18 – Perú

Adresse: Calle Cantuarias 160 Of. 202, Miraflores, Lima 18 – Perú

energie-klima-la@kas.de

www.kas.de/energie-klima-lateinamerika/

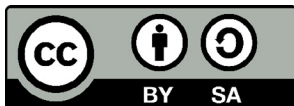
Urheberrecht:

Public domain-CC0 1.0 Universal.

Titelbild: Stellungnahme: Argentinien, Bolivien und Chile brauchen einen verantwortungsvollen Lithium-Boom.

Bild: Enrique Marcarian / Alamy

Quelle: <https://dialogue.earth/en/water/46756-lithium-mining-boom-argentina-bolivia-chile/>



Diese Veröffentlichung ist lizenziert unter den Bedingungen von
Creative Commons

Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0
international", CC BY-SA 4.0

(**abrufbar unter:** [https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/
legalcode.de](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.de)).

Hinweis:

Der Artikel stellt grundsätzlich die Meinung der Autoren
dar und muss nicht grundsätzlich die Meinung der Konrad-
Adenauer-Stiftung wiedergeben.