

Barbara Maria Weißnegger

Globaler Lithiumbedarf in unterschiedlichen Nachfrageszenarien

Modellierung bis 2050 unter besonderer Berücksichtigung
der Elektromobilität

DIPLOMARBEIT

zur Erlangung des akademischen Titels
Diplomingenieurin (Dipl.-Ing.ⁱⁿ)

Studium: Umwelt- und Bioressourcenmanagement
Fachbereich: Energie

Universität für Bodenkultur, Wien

Betreuung und Begutachtung:

Univ.Prof. Dipl.-Phys. Dr.phil.nat. Wolfgang Liebert

Mag. Nikolaus Arnold, MBA

Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüferin/keinem anderen Prüfer als Prüfungsleistung eingereicht.

Mir ist bekannt, dass Zuwiderhandeln geahndet wird („Verwendung unerlaubter Hilfsmittel“) und weitere rechtliche Schritte nach sich ziehen kann. Diese Arbeit wurde neben der gedruckten Version auch in geeigneter digitaler zur Prüfung der o.g. Erklärung bei der zuständigen Prüferin/dem zuständigen Prüfer hinterlegt.

Wien, 19. April 2020

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'B. Weißnegger', with a long, sweeping flourish extending to the right.

Mag. Barbara Weißnegger, Bakk.

Erläuterung zur gendersensiblen Schreibweise¹

Die vorliegende Arbeit verzichtet auf die Verwendung einheitlich maskuliner, femininer oder neutraler Begriffsbezeichnungen. Vielmehr werden sich die Leserinnen und Leser wie im realen Leben mit unterschiedlichen Formen geschlechtlicher Benennungen konfrontiert sehen. Dies entspricht dem Grundverständnis der Autorin eines gleichberechtigten Miteinanders der Geschlechter.

¹ Diese Form einer gendersensiblen Schreibweise wurde bereits für eine wissenschaftliche Arbeit der Autorin verwendet (vgl. Weißnegger 2016). Ein weiteres Mal sei Heike Egnér für diese Anregung zu einer wertschätzenden, aber auch gut lesbaren Umsetzung geschlechtlicher Bezeichnungen im Rahmen einer Abschlussarbeit gedankt.

Danksagung

Folgende Personen waren maßgeblich daran beteiligt, dass die vorliegende Arbeit die Umsetzung von einer Idee in die jetzige Form fand:

Meine Betreuer – Wolfgang Liebert sei für grundlegende Inputs, bahnbrechende Anregungen, großen Handlungsspielraum und viel Vertrauen bei der Verschriftlichung der Arbeit gedankt; ebenso wie Nikolaus Arnold, der mit mir den Kampf gegen die unzähligen Excel-Tabellen aufnahm.

Weite Strecken der widrigen Phasen einer textlichen Verwirklichung teilte ich mit meiner lieben Freundin und Kollegin Francine, der Powerfrau aus dem Ländle. Danke, dass du an meiner Seite bist, danke für deine Motivation und deine aufmunternden Worte. Zahlreiche, meist ungeliebte, aber nichtsdestotrotz unglaublich wertvolle Korrekturen und Verbesserungsvorschläge kamen von Manuel, der immer für mich da ist. Deine Unterstützung war unabdingbar und hat mir geholfen, nicht aufzugeben.

Schlussendlich bin ich dankbar für die ‚Diamanten‘, die mich begleiten: Meine Sweet Caroline, auf die ich mich in jeder Lebenslage verlassen kann; und Anna, Hort der Ruhe, die das Überraschungsmoment stets auf ihrer Seite hat. Eva, Dani und Nina, nach viel zu langer Pause endlich wieder bei mir. Martina und Christian, eng vertraut und ewig konstant. Meine kleinen Sonnenstrahlen Paul, Jakob, Rosina und Tobias. Die Boys mit den roten Herzen, die mich herausfordern, mir den Kopf zurechtrücken, mich anspornen, mein Bestes zu geben; und mir immer ein Lächeln ins Gesicht zaubern: F/F/S/F/A/S/T/B. In dieser stürmischen Zeit macht ihr alle mein Leben schöner, den Stein in meinem Rucksack leichter zu tragen und meine Ziele greifbarer.

Tausend Dank – You let me shine!

Babsi

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	I
Erläuterung zur gendersensiblen Schreibweise	II
Danksagung	III
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungen	VII
Zusammenfassung	VIII
Abstract	IX
1) Einleitung und Fragestellungen	1
2) Basiswissen: Grundlagen zu Lithium	7
2.1) Chemische Eigenschaften	7
2.2) Globale Vorkommen - Reserven und Ressourcen	8
2.3) Anwendungsgebiete	14
3) Lithium in Akkumulatoren	16
3.1) Funktionsprinzip, Aufbau und Materialien	16
3.2) Anforderungen und Einsatzbereiche	21
3.3) Recycling	29
4) Produktion, Preise und Bedarf aus unterschiedlichen Anwendungen	36
4.1) Globale Produktion seit 1999	36
4.2) Preisentwicklung seit 1999	42
4.3) Anteil diverser Anwendungsgebiete an der globalen Nachfrage	44

5) Modellierung der globalen Lithiumnachfrage bis 2050.....	46
5.1) Szenarien und Kennzahlen bisheriger Arbeiten	46
5.2) Generelle Annahmen	54
5.3) Flat-Szenario	57
5.4) Strong-Szenario.....	58
5.5) Ambitious-Szenario.....	58
5.6) Kennzahlen für die Modellierung.....	59
5.7) Ergebnisse der Modellierung	61
5.8) Vergleich der Ergebnisse der Szenarien untereinander	62
5.9) Gegenüberstellung der Ergebnisse mit anderen Studien	64
5.10) Auswertung, Zwischenfazit und Ergebnis Forschungsfrage 1	69
6) Primärproduktionssteigerungen und ihre potenziellen Auswirkungen auf lithiumreiche Länder	75
6.1) Exkurs: Generell mögliche Umweltwirkungen beim Betrieb von Elektrofahrzeugen ..	75
6.2) Status quo in lithiumreichen Regionen.....	76
6.3) Zwischenfazit und Ergebnis Forschungsfrage 2.....	84
7) Resümee und Ausblick.....	87
Literatur	92

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungen:

Abbildung 1: Relativer Anteil von Lithium in unterschiedlichen Lagerstätten.....	10
Abbildung 2: Ressourcen und relativer Anteil der Reserven nach Land in Tausend t.....	12
Abbildung 3: Oxidation und Reduktion in Batterien und Akkumulatoren	17
Abbildung 4: Bauformen unterschiedlicher Lithium-Ionen-Akkumulatoren	19
Abbildung 5: Gegenüberstellung unterschiedlicher Antriebstechnologien.....	26
Abbildung 6: Lebens-, Nutzungs-/Anwendungs- und Hortungsdauer im exemplarischen Zeitstrahl	31
Abbildung 7: Entwicklung der Lithiumgewinnung in Australien, Chile, China und Argentinien, 1999 bis 2018.....	39
Abbildung 8: Globale Lithiumproduktion nach Ländern 2018*)	40
Abbildung 9: Lithiumfördermenge global und Ölpreis/Jahr 1999-2018.....	41
Abbildung 10: Gegenüberstellung Lithiumfördermenge, Lithiumpreis, Ölpreis	43
Abbildung 11: Absoluter Anteil des globalen Li-Bedarfs nach Anwendungsgebieten 2009- 2018	45
Abbildung 12: EV und HEV/PHEV, Stand 2050 und kumulierter Bedarf	71
Abbildung 13: Globaler Lithiumbedarf nach Anwendungsfeld, kumuliert bis 2050	72

Tabellen:

Tabelle 1: Globale Lithiumreserven und -ressourcen, Stand 2019.....	11
Tabelle 2: Anteile von Lithium in unterschiedlichen chemischen Verbindungen.....	14
Tabelle 3: Akkumulatoren-Typen mit Energiedichte, Wirkungsgrad und Nennspannung	18
Tabelle 4: Globale Lithiumproduktion nach Ländern in t, 1999 bis 2018	37
Tabelle 5: US-amerikanische Lithiumpreise 1999 bis 2018	42
Tabelle 6: Relativer Anteil des globalen Li-Bedarfs nach Anwendungsgebieten 2009-2018 ..	44
Tabelle 7: Absoluter Anteil des globalen Li-Bedarfs nach Anwendungsgebieten 2009-2018 ..	44
Tabelle 8: Gegenüberstellung von Kennzahlen zu unterschiedlicher Elektromobilitäts- Ausbauszenarien für 2050.....	52
Tabelle 9: Festgelegte Kennzahlen zu Flat-, Strong- und Ambitious-Szenario.....	60
Tabelle 10: Ergebnisse der Modellierung im Flat-, Strong- und Ambitious-Szenario.....	61
Tabelle 11: : Globaler Lithiumbedarf nach Anwendungsfeld in Mio. t, kumuliert bis 2050	72
Tabelle 12: Wasserzehrung durch Akkuproduktion und Lithiumabbau.....	78

Abkürzungen

AgZn	Silber-Zink
bbf	Barrel, Maßeinheit für Rohöl
BEV	Battery Electric Vehicle, reines Elektrofahrzeug (auch EV)
BGS	British Geological Survey
BP	British Petroleum
CNG	Compressed Natural Gas, Erdgas
CO ₂	Kohlendioxid, Treibhausgas
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EoL	End of Life, Produkte am Ende ihres Lebenszyklus
EV	Electric Vehicle, reines Elektrofahrzeug (auch BEV)
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle, Brennstoffzellen-Fahrzeug
HEV	Hybrid Electric Vehicle, Hybridfahrzeug
ICE	Internal Combustion Engine, klassische Verbrennungsmotoren in Benzin- oder Dieselfahrzeugen
IEA	International Energy Agency
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
kWh	Kilowattstunde
Li	Lithium, chemisches Zeichen
LiCoO ₂	Lithium-Cobalt-Dioxid
LiFePO ₄	Lithium-Eisen-Phosphat
Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	Lithium-Titanat
LPG	Liquified Petroleum Gas, flüssiges Erdgas
NiMH	Nickel-Metallhydrid
NO _x	Stickoxide, Treibhausgase
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development; Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
Pb	Blei, chemisches Zeichen
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle, Plug-In Hybridfahrzeug
USD	US-Dollar
USGS	United States Geological Survey
VDA	Verband der Automobilindustrie
Wh/kg	Wattstunden pro Kilogramm

Zusammenfassung

Die hinreichend bekannten Herausforderungen des globalen Klimawandels sind unter anderem auf umfassende CO₂-Emissionen aus dem Verkehrssektor zurückzuführen. Als effektive Gegenmaßnahme erscheint der Umstieg von fossil auf elektrisch betriebene Fahrzeuge. Die Speicherung der benötigten Antriebsenergie erfolgt zumeist in Lithium-Ionen-Akkumulatoren.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Frage, wie sich der weltweite Lithiumbedarf bis 2050 unter verschiedenen Ausbaupfaden für Elektromobilität entwickeln kann. Für die Modellierung wurden die drei Szenarien Flat, Strong und Ambitious entwickelt. Sie unterscheiden sich beispielsweise in Elektrifizierungsgrad, Effizienzsteigerung, Recyclingraten und dem Anteil von Fahrzeugakkus an der weltweiten Nachfrage. Die errechneten Ergebnisse zeigen einen starken Anstieg des globalen Lithiumbedarfs. Recycling kann nur einen geringen Anteil zur Deckung beitragen. Damit muss die Bereitstellung größtenteils aus primären Lagerstätten erfolgen.

Entsprechend untersuchte ein weiterer Abschnitt mögliche Auswirkungen in lithiumreichen Ländern, die ein verstärkter Abbau mit sich bringen kann. Prinzipiell gilt es, anstehende Profite gegen potenzielle Umweltfolgen abzuwägen. Es zeigt sich, dass eine Rohstoffgewinnung ökologische Tragfähigkeiten, lokale Biotope und somit die Lebensgrundlage der Bevölkerung beeinträchtigen kann. Zudem können Widerstände entstehen, sofern Ortsansässigen nicht an Entscheidungsprozessen und Gewinnen beteiligt werden.

Maßnahmen wie standortangepasste Förderbedingungen, verstärktes Recycling oder die Suche nach Substituten werden diese Herausforderungen voraussichtlich nicht lösen, sondern nur zu einem anderen Rohstoff hin verschieben. Statt der reinen Forcierung von Elektrofahrzeugen zur Eindämmung von CO₂-Emissionen schlägt die Autorin daher breit gefächerte Alternativen zum motorisierten individuellen Transport vor, die vom Ausbau öffentlicher Verkehrsmittel bis hin zu Remote Working reichen.

Abstract

Amongst others, well known challenges of global climate change are attributed to CO₂ emissions from the transport sector. Switching from fossil fueled to electric vehicles seems to be an effective countermeasure. The required electric energy is mostly stored in lithium ion accumulators.

The present master thesis deals with the question of how global lithium demand is going to develop until 2050 regarding different expansion paths for electric cars. Three scenarios, namely 'Flat', 'Strong' and 'Ambitious' are designed for modeling. They are based on diverse degrees of electrification, efficiency gains, recycling rates and share of vehicle accumulators in global lithium demand. Calculated results show a strong increase of worldwide demand for lithium. Most of the raw material has to be provided by primary deposits as recycling can only generate small amounts of lithium.

Following, another section examines potential effects of expanded production on countries with extensive lithium deposits. At first, feasible profits need to be compared with potential impacts on the environment. Results show that extraction of raw material can affect ecological capacity, local biotopes, and thereby livelihoods of residents. Furthermore, local populations are likely to oppose extraction if they are not involved in decision-making processes and do not get shares of generated profits.

Measures like local customized extraction conditions, reinforcing recycling systems or research for substitutes will only shift these challenges from lithium to another raw material. Instead of simply promoting electric vehicles to reduce CO₂ emissions, the author recommends diversified alternatives for motorized individual traffic, from expanded public transport to remote working.

1) Einleitung und Fragestellungen

Der globale Energiebedarf steigt - dass dies Auswirkungen auf das Klima hat, weil aktuell noch ein hohes Maß an fossilen Energieträgern zu seiner Abdeckung verwendet wird, ist mittlerweile hinreichend bekannt. Verschärft wird die Herausforderung steigender Treibhausgasemissionen durch die Abkehr von Kernenergie in einigen Industrieländern sowie das starke ökonomische Wachstum diverser Schwellenländer. Die logische Folge scheint die Hinwendung zu erneuerbarer Energie, die weniger Kohlendioxid emittiert, beispielsweise aus Sonne oder Wind. Der mangelnde Einfluss auf den Erzeugungszeitpunkt erfordert für diese Energiequellen jedoch die Speicherung der gewonnenen elektrischen Energie, wobei die Kapazitäten für Pumpspeicherkraftwerke und Druckluftspeicher bereits nahezu ausgeschöpft sind (vgl. Brandt 2013: 383). Darüber hinaus machen nicht nur Umweltfaktoren wie die globale Erderwärmung und damit verbundene Klimaänderungen, sondern auch Rohstoffknappheiten und Preissteigerungen bei fossilen Energieträgern ein Umdenken notwendig. Hinzu kommen durch Megastädte steigende Bevölkerungszahlen auf geringen Flächenausmaßen und infolgedessen eine sich wandelnde Infrastruktur und steigende Emissionen in diesen Gebieten (vgl. Lamp 2013: 394).

Die Mobilität der Weltbevölkerung, für einen großen Anteil klimawirksamer Emissionen verantwortlich, steht unter diesen Vorzeichen auf dem Prüfstand (vgl. Brandt 2013: 383). Ein Bewusstseinswandel ist bereits zu beobachten: nachhaltige Mobilität und soziale Verantwortung gewinnen an Bedeutung. Ein Umdenken in Mobilitätsbelangen erfordert dementsprechend unbedingt die Integration der Themengebiete Emissionen, Verringerung des CO₂-Ausstoßes, Effizienz und Nachhaltigkeit (vgl. Lamp 2013: 394). An dieser Stelle bieten sich ganz offensichtlich elektrisch betriebene Fahrzeuge als Alternative zu herkömmlichen Verbrennungsmotoren an; denn sie sind auf den ersten Blick als emissionsarm, klimaschonend und umweltfreundlich einzustufen.

Doch mit einer so einfachen Lösung ist dieser Herausforderung nicht zu begegnen: Es ist eine strittige Frage, ob die Vorteile von neuen Technologien im Hinblick auf Umweltbelange überwiegen oder ob ihre negativen Auswirkungen diese aufheben, weil sie beispielsweise auf energieintensiv produzierte, seltene Metalle zurückgreifen (vgl. Stamp/Lang/Wäger 2012: 104). Im Hinblick auf Elektrofahrzeuge muss wie bei jedem anderen alternativen Antriebskonzept der gesamte Lebenszyklus des betrachteten Trans-

portmittels berücksichtigt werden, um valide Aussagen über deren ökologische Nachhaltigkeit treffen zu können. Während die Verwendung von möglicherweise knappen Metallen besonders in der Herstellungs- und Entsorgungsphase berücksichtigt werden muss, spielt in der Nutzungsphase vor allem die Energie, mit dem das Fahrzeug betrieben wird, eine wesentliche Rolle. Sie muss aus regenerativen Quellen stammen, um die Umweltwirkungen in dieser Zeitspanne so gering wie möglich zu halten (vgl. Dallinger et al. 2011: 8).

Wenn es ein postfossiles Zeitalter geben soll, muss nach Vogel dafür ein technologischer Wandel in die Wege geleitet werden. Dabei gehören das Handeln in der Gegenwart und der gewünschte Output in der Zukunft eng zusammen. Im Hinblick auf die Energiewende bedeutet dies, dass Rohstoffe von heute als Energieträger der Zukunft in Erscheinung treten und dass mit ihrer Verwendung sowohl neue globale Beziehungen einhergehen, aber auch auf lokaler Basis neues Wissen, Identitäten und Verflechtungen entstehen (vgl. Vogel 2016: 197).

Aktuell gewinnen klassische Verbrennungsmotoren den Vergleich mit elektrischen Antriebstechnologien, da sie wegen der größeren Energiedichte über eine viel höhere Reichweite pro Tank in der Gegenüberstellung mit einer elektrischen Akkuladung verfügen - am besten von allen elektrischen Systemen schneiden derzeit Lithium-Speichertechnologien ab. Eine Zwischenlösung bilden Hybridfahrzeuge, die elektrische und fossile Antriebssysteme miteinander kombinieren (vgl. Brandt 2013: 383f.). Indem wichtige Stakeholder aus der Automobil- und Energieversorgungsbranche Elektromobilität forcieren, gewinnt das Thema zumindest an Aktualität. Neue Wege der Mobilität auf Basis von Fahrzeugen mit Elektro- und Hybridantrieben erfordern jedoch unbedingt die Absicherung der stofflichen Voraussetzungen. Dies beruht auf Primärgewinnung von Rohstoffen, schließt aber die Wiedergewinnung von Sekundärrohstoffen, also Recycling, auf ökonomisch und ökologisch nachhaltige Art unbedingt mit ein (vgl. Treffer 2013: 345).

Um einen Beitrag zur Beantwortung der Frage zu liefern, inwieweit es unter Berücksichtigung der weltweiten Rohstofflage aus heutiger Sicht überhaupt möglich ist, von konventionellen Verbrennungsmotoren auf elektrisch betriebene Fahrzeuge umzusteigen, untersucht die vorliegende Arbeit, wie sich unterschiedliche Ausbaupfade für elektrisch betriebene Fahrzeuge auf die weltweite Nachfrage nach Lithium bis 2050 auswirken könnten:

Forschungsfrage 1:

Wie entwickelt sich der globale Lithiumbedarf bis 2050 auf Basis unterschiedlicher Elektromobilitäts-Ausbaupfade?

Für die Klärung dieser Frage werden unterschiedliche Nachfrageszenarien auf Basis von abweichenden Elektromobilitäts-Ausbauszenarien entworfen. Mithilfe dieser werden die entsprechenden potenziellen Bedarfsszahlen an Lithium errechnet und infolgedessen die erforderliche Jahresproduktionsmenge abgeleitet. Diese wird in Relation zu den vorhandenen globalen Reserven und Ressourcen gestellt.

Prinzipiell geht die Autorin davon aus, dass Produktion und Nachfrage weltweit einander die Waage halten. Für die Entwicklung der auf diversen Ausbaupfaden beruhenden Bedarfsszenarien wurden historische Szenarien aus der Literatur herangezogen, kritisch betrachtet und mit wichtigen Entwicklungen abgeglichen. Kombiniert mit aktuellen Kennzahlen wird damit eine mögliche Nachfrage nach Lithium bis 2050 quantifiziert und den vorhandenen Mengen des Rohstoffes gegenübergestellt. Somit kann zum Ersten schon festgestellt werden, ob und wenn ja, in welchem Ausmaß die Forcierung elektromobiler Anwendungen als Alternative zu fossil betriebenen Verbrennungsmotoren dienen kann.

Zu den genannten historischen Szenarien zum Lithiumbedarf wurden die folgenden Arbeiten anderer Autorinnen in den Blick genommen:

- Eine Studie von Angerer et al. aus dem Jahr 2009 setzte sich mit ähnlichen Fragen wie die vorliegende Arbeit auseinander: Von zentralem Interesse war die Klärung eines möglichen Lithiumengpasses bis zum Jahr 2050, der sich aufgrund der steigenden Verkaufszahlen von Elektrofahrzeugen ergeben könne. Dabei wurden die Verbräuche in den Lithium-Hauptanwendungsgebieten auf der Basis der Nachfragezahlen von 2008 und des prognostizierten Wachstums modelliert. Das Anwendungsfeld Lithium-Akkumulatoren wurde detaillierter in den Blick genommen und der mögliche Bedarf bis 2050 mit Hilfe zweier unterschiedlicher Nachfrageszenarien aufgezeigt. Darüber hinaus wurden potenzielle Mengen von durch Recycling bereitgestelltem Sekundärlithium ermittelt. Die Ergebnisse dieser Modellrechnungen ergaben für ein Szenario mit gemäßigter Lithiumnachfrage eine ausreichende Versorgung; wohingegen es im anderen Szenario, das von einer umfassenden Durchdringung des Fahrzeugmarktes mit Elektroautos ausgeht, um 2045 zu einer Verknappung der Reserven an Lithium kommt - bei umfassendem Recycling sei von einer Verlängerung dieser Reichweite um vier Jahre, also bis zumindest 2049, auszugehen. Als kritisch beurteilten die Autorinnen vor allem die Verteilung der Lithiumreserven auf wenige, teilweise geopolitisch instabile Staaten; sowie die massiven Eingriffe in bislang intakte Ökosysteme, vor allem in Südamerika und

China. Aus diesen Ergebnissen wurde die Empfehlung zur Forcierung eines umfassenden Recyclingsystems abgeleitet; desweiteren sollten alternative Speichertechnologien entwickelt werden. Hierbei seien jedoch Engpässe bei anderen verwendeten Rohstoffen in den Blick zu nehmen, namentlich etwa Cobalt, Kupfer, Indium oder Neodym (vgl. Angerer et al. 2009).

- Gegenstand einer Publikation von Vikström, Davidsson und Höök aus dem Jahr 2013 waren die Betrachtung der weltweiten Lithiumlagerstätten sowie Angaben über die globalen Reserven und Ressourcen. Darüber hinaus wurde die künftige Produktion abgeschätzt und der prognostizierten Nachfrage bei Umsetzung des IEA-Blue Map-Szenarios zur Elektrifizierung der globalen Fahrzeugflotte gegenübergestellt. Aus der Sicht der Autorinnen wäre eine adäquate Lithiumversorgung unter den vorliegenden Rahmenbedingungen nicht gewährleistet, sofern die Speichertechnologien für Elektrofahrzeuge weiterhin vorrangig auf Lithium-Ionen-Akkumulatoren beruhen (vgl. Vikström/Davidsson/Höök 2013).
- Erwähnenswert ist auch die Arbeit von Speirs und Mitautorinnen aus dem Jahr 2014. Sie untersuchten die künftige Lithiumverfügbarkeit für Fahrzeugakkumulatoren und betrachteten dabei unterschiedliche Berechnungsarten. Ihre Ergebnisse zeigten eine steigende Nachfrage mit ausreichender Deckung derselben (vgl. Speirs et al. 2014).

Die Arbeit von Vikström, Davidsson und Höök kommt somit zu einem ganz anderen Ergebnis als jene von Angerer et al. bzw. Speirs et al. - demnach seien sehr wohl Lithiumengpässe zu befürchten. Aufgrund der Bedarfsentwicklung der letzten Jahre unterliegt die vorliegende Arbeit der Prämisse, dass die Nachfrage auch künftig steigen wird - ob dies auch zu einer unzureichenden Versorgung mit dem Rohstoff führen kann, klärt unter den für diese Arbeit angenommenen Voraussetzungen das Kapitel 4. Obwohl auch die mögliche Nachfrageentwicklung aus anderen Anwendungsfeldern berücksichtigt werden muss, liegt der Forschungsfokus der vorliegenden Arbeit klar auf dem Bedarf, der durch Akkumulatoren für elektrisch betriebene Fahrzeuge ausgelöst wird. Mit dem Terminus ‚Fahrzeuge‘ sind hier Personenkraftwagen gemeint, nicht berücksichtigt werden Lastkraftwagen oder Zweiräder. Wenn eine künftig höhere Nachfrage nicht ausschließlich über gesteigerte Recyclingquoten gedeckt werden kann, muss naturgemäß ein Ausbau der primären Produktion erfolgen.

Dementsprechend widmet sich eine zweite Fragestellung weniger quantitativen Parametern und untersucht, in welcher Form sich ein Anstieg der Primärproduktion in lithiumreichen Staaten auswirken könnte. Berücksichtigt werden dabei ökonomische, ökologische und soziale Dimensionen:

Fragestellung 2:

Welche potenziellen Auswirkungen hätte ein Ausbau der Produktionskapazitäten auf lithiumreiche Länder?

Weil jene Staaten, in deren Gebiet sich große Lithiumvorkommen befinden, sich nicht vollständig mit den Hauptproduzentinnen decken, geht die Autorin bei der Abhandlung von Fragestellung 2 vor allem auf die jeweiligen Besonderheiten von Ländern in unterschiedlichen Produktionsstufen ein. Der Fokus wird dabei einerseits auf Bolivien gelegt, dass trotz umfassender Lithiumvorräte bisher noch über keine erwähnenswerten Produktionsstrukturen verfügt. Gegenübergestellt werden die Wirkungen der Lithiumgewinnung in Staaten, die bereits hohe Abbauraten aufweisen, wie etwa Chile und China.

Bevor eine neuerliche Prüfung der oben genannten Schlüsse anderer Autorinnen unter Berücksichtigung der Entwicklung der letzten Jahre erfolgt, erscheint es angemessen, grundlegende Fakten zum Rohstoff Lithium aufzuzeigen. Dies umfasst in Kapitel 2 die Beschreibung der chemischen Eigenschaften, die Kartierung globaler Vorkommen und die Darstellung der nach derzeitigem Stand berechneten Reserven und Ressourcen. Darüber hinaus erfolgt ein kurzer Abriss der Anwendungsgebiete von Lithium.

Kapitel 3 geht näher auf die Verwendung von Lithium in Akkumulatoren ein. Nach der Erklärung des Funktionsprinzips, Aufbaus und der verwendeten Materialien in Lithium-Ionen-Speichern stehen die Anforderungen an diese sowie ihre Einsatzbereiche im Blickfeld. Zudem werden die Möglichkeiten der Wiedergewinnung von Lithium aus Akkumulatoren mittels unterschiedlicher Recyclingtechnologien betrachtet.

Aufbauend auf diesen wichtigen grundsätzlichen Informationen rund um den Rohstoff Lithium zeigt Kapitel 4 die historische Entwicklung von Produktion, Nachfrage und Preis und skizziert die Entwicklung der Anteile unterschiedlicher Anwendungen am weltweiten Verbrauch.

Im anschließenden Kapitel 5 geht es an die Modellierung der globalen Lithiumnachfrage bis 2050. Dafür werden Szenarien aus bisheriger Forschung dargestellt und daraufhin die

Kennzahlen für drei unterschiedliche Szenarien, namentlich Flat, Strong und Ambitious, abgeleitet. Die Ergebnisse der Modellierung werden untereinander verglichen und den Resultaten anderer Studien gegenübergestellt, worauf ein Zwischenfazit die Bearbeitung der ersten Forschungsfrage abrundet.

Kapitel 6 widmet sich der Beantwortung der zweiten Fragestellung. Nachdem in den ersten Abschnitten der Arbeit klar aufgezeigt wurde, dass Recycling unter den getroffenen Annahmen keinen nennenswerten Beitrag zur Absicherung der Lithiumversorgung leisten kann, steht ein Ausbau der Primärrohstoffgewinnung zur Abdeckung des Bedarfs zur Debatte. Verschiedene Staaten schöpfen ihren Reichtum an dem Rohstoff bisher in abweichenden Ausmaßen aus. Entsprechend werden mögliche Wirkungen einer Ausweitung der Produktionskapazitäten an unterschiedlichen Standorten in den Blick genommen.

Das abschließende Kapitel 7 zieht Bilanz über die wichtigsten Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit und gibt einen Ausblick über mögliche Maßnahmen und Entwicklungen der Zukunft.

2) Basiswissen: Grundlagen zu Lithium

Bevor die Beantwortung der ersten Forschungsfrage erfolgt („Wie entwickelt sich der globale Lithiumbedarf bis 2050 auf Basis unterschiedlicher Elektromobilitäts-Ausbaupfade?“), wird mit dem Kapitel 2 zum untersuchten Rohstoff Lithium eine inhaltliche Grundlage gesetzt. So werden auf den nächsten Seiten die chemischen Eigenschaften, globale Vorkommen und deren jeweilige Konzentration sowie vorhandene Reserven und Ressourcen erörtert. Darüber hinaus erfolgt eine Darstellung der Hauptanwendungsgebiete von Lithium.

2.1) Chemische Eigenschaften

Lithium hat im Periodensystem der Elemente die Ordnungszahl 3 und gehört zur 1. Hauptgruppe der Alkalimetalle. Es ist ein silbrig weiß glänzendes Metall und wurde 1817 in Schweden entdeckt. In der Erdkruste kommt es mit einem Massenanteil von 60 ppm, also 0,006 % vor. Seine Atommasse beträgt 6,94; die Elektronegativität wird mit 0,98 beziffert. Das Normalpotenzial ist -3,04 V, die Dichte beträgt 0,534 g/m³ (vgl. Sicius 2016: 19f.).

Im Hinblick auf die Dichte ist zu sagen, dass dies unter Standardbedingungen die geringste Dichte unter allen Metallen ist. Da Lithium sehr reaktionsfreudig ist, kommt es in Lagerstätten nicht elementar vor. Auf der Haut führt es wegen der Reaktion mit der Hautfeuchte zur Freisetzung von Wärme und kann somit Verätzungen und Verbrennungen verursachen. Reaktionen erfolgen nicht nur mit Wasser, sondern auch mit zahlreichen anderen Verbindungen, immer unter Freisetzung von teilweise großen Wärmemengen. Das Normalpotenzial von -3,04 V ist das niedrigste aller Elemente. Prinzipiell weist es starke Ähnlichkeiten zu Magnesium, dem zweiten Element der zweiten Hauptgruppe auf, wobei sich natürlich die Oxidationszahl unterscheidet (vgl. Sicius 2016: 22f.).

Nach ersten chemischen Basisinformationen skizziert der nächste Abschnitt 2.2 die weltweiten Vorkommen. Dabei wird auf die Menge der Reserven und Ressourcen eingegangen, sowie auf ihre globale geographische Verteilung in primären und sekundären Lagerstätten. Darüber hinaus wird das Verhältnis von pro Staat verfügbaren Ressourcen zu den jeweils wirtschaftlich abbaubaren Reserven in den Blick genommen, das je nach Land teilweise sehr stark voneinander abweicht.

2.2) Globale Vorkommen - Reserven und Ressourcen

Prinzipiell gilt zu sagen, dass alle natürlichen Rohstoffe aufgrund von physischen, technischen oder wirtschaftlichen Rahmenbedingungen endlich sind; die gewinnbare Menge eines Materials variiert im Laufe der Zeit, liegt aber definitiv unter dem quantifizierten physischen Volumen (vgl. Vikström/Davidsson/Höök 2013: 258).

Für die Ausführungen auf den folgenden Seiten ist es nötig, die Begriffe ‚Material/Rohstoff‘, ‚Vorkommen/Lagerstätten‘, ‚Reserven‘ und ‚Ressourcen‘ zu definieren. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden sie im folgenden Sinne verwendet:

- ‚Material/Rohstoff‘ - Dies bezeichnet hier das Element Lithium in all seinen unterschiedliche auftretenden natürlichen Vergesellschaftungen und als Bestandteil für die Herstellung unterschiedlicher Endprodukte. Die Verwendung dieser Begriffe bezieht Aspekte wie Konzentration, wirtschaftliche Gewinnbarkeit oder Reinheitsgrad NICHT mit ein.
- ‚Vorkommen/Lagerstätten‘ - Im Rahmen der vorliegenden Arbeit meinen diese beiden Begriffe alle Medien und geographischen Punkte, in und an denen der untersuchte Rohstoff Lithium vorhanden ist. Damit wird keine Aussage über Konzentration oder die Wirtschaftlichkeit eines Abbaus getroffen.
- ‚Ressourcen‘ - Der Terminus ‚Ressourcen‘ bezeichnet jenen Teil eines natürlich in der Erdkruste vorhandenen Rohstoffs, der in einer solchen festen, flüssigen oder gasförmigen Konzentration qualitativ und quantitativ verfügbar ist, dass er prinzipiell ökonomisch sinnvoll gewonnen werden kann – egal ob zum Bestimmungszeitpunkt oder in der Zukunft (vgl. USGS 2018: 195).
- ‚Reserven‘ - Damit ist jener Teil der Ressourcen gemeint, der zum aktuellen Zeitpunkt wirtschaftlich gewonnen werden kann. Dies schließt nicht zwangsläufig ein, dass an dem fraglichen Standort Produktionseinrichtungen verfügbar oder in Betrieb sind (vgl. USGS 2018: 196).

Große Lithiumlagerstätten befinden sich beispielsweise in folgenden Ländern (vgl. Kurzweil/Dietlmeier 2018: 256):

- Argentinien, Bolivien, Chile, China, Tibet: hoch gelegene Salzwasserregionen
- Australien, Kanada, USA, Zimbabwe: kristalline Weich- und Hartgesteine
- USA außerdem: geothermische Solen, Ölfelder

Als Lagerstätte besonders hervorzuheben ist der bolivianische Salar de Uyuni, der sich über 10.500 km² des Andenhochlands Altiplano erstreckt. In der Lauge, die sich an der Oberfläche der Salzkruste des Sees befindet, sind unterschiedliche Mineralien gelöst (vgl. Vogel 2016: 199). Darüber hinaus ist die chilenische Atacama-Wüste zu nennen, deren Lithiumchlorid mit Stand 2008 die Hälfte der weltweiten Reserven bildete und wo etwa 37 % der Produktion erfolgen (vgl. Kurzweil/Dietlmeier 2018: 256). Die genannten Salzseen sind Sekundärlagerstätten und weisen Konzentrationen von maximal 1 % Lithiumgehalt auf (vgl. Adler 2017: 168). Anders dazu sind Primärlagerstätten, bei denen Lithium in unterschiedlichen Mineralien eingelagert ist, zum Beispiel in Amblygonit, Lepidolith, Petalit, Spodumen oder seltener in Kryolithionit, Triphylin oder Zinnwaldit (vgl. Sicius 2016: 20). Dazu gehören Pegmatit-Hartgesteine aus Westaustralien, die 2008 27 % des weltweit produzierten Lithiums lieferten; zu nennen ist auch Spodumen aus China als Lithiumquelle. Ein noch nicht wirtschaftlich nutzbares Lithiumlager bildet Meerwasser, das 0,14 bis 0,25 mgL⁻¹ Lithium enthält und absolut damit auf eine Menge von 230 Mrd. t des Rohstoffes umfasst (vgl. Kurzweil/Dietlmeier 2018: 256). Kleinere Lagerstätten haben aktuell kaum Bedeutung, da eine wirtschaftliche Produktion von Lithium daraus nicht möglich ist. Dies könnte sich mit steigender Nachfrage jedoch ändern (vgl. Sicius 2016: 20).

Die folgende Abbildung 1 zeigt den relativen Anteil der globalen Lithiumvorkommen in unterschiedlichen primären und sekundären Lagerstätten:

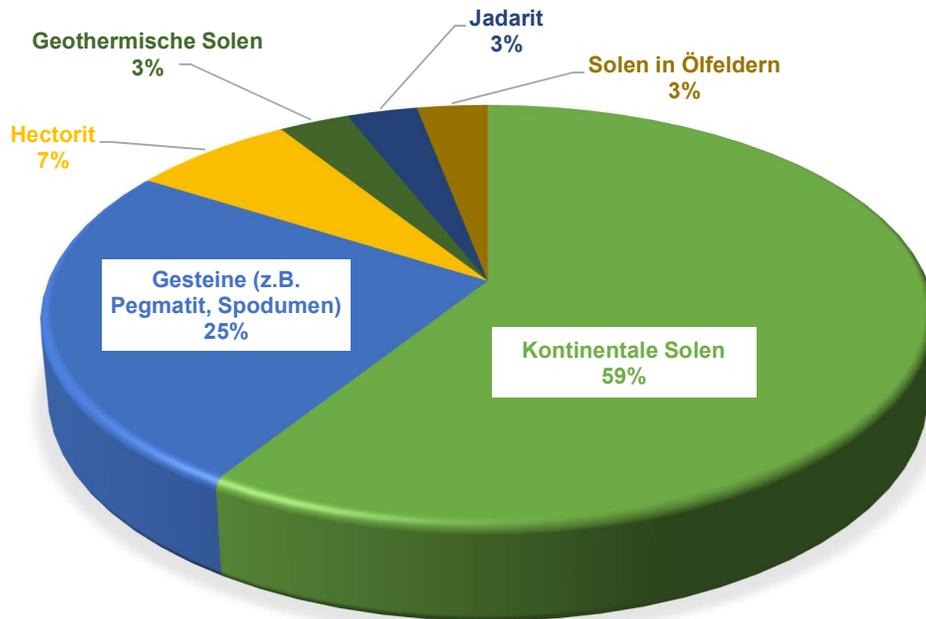


Abbildung 1: Relativer Anteil von Lithium in unterschiedlichen Lagerstätten

Quelle: Swain 2017: 391, Darstellung: B.W.

Aus Abbildung 1 wird ersichtlich, dass etwa 65 % der globalen Lithiumvorräte in Solen und damit in sekundären Vorkommen zu finden sind. Die Primärlagerstätten umfassen einerseits Gesteine wie Pegmatit und Spodumen mit einem Anteil von 25 % und darüber hinaus auch Tone wie Hectorit und Jadarit mit insgesamt 10 % der Lagerstätten (vgl. Swain 2017: 391).

Generell ist zu sagen, dass im Durchschnitt Salzlagerstätten etwa zehn Mal so viel Lithium enthalten wie Pegmatit-Lagerstätten; auch die absolute Menge an Lithium aus Salzlagerstätten ist um ein Vielfaches höher als jene aus anderen Vorkommen. Dies bedeutet auch ein größeres Potenzial für großvolumige und langfristig angelegte Produktion von Lithium aus derartigen Depots. Starken Einfluss haben jedoch Parameter wie der Grad der Kompartimentierung und der Eintrag von Wasser oder salzhaltigem Trägergestein; aber auch eine Erschwerung des Abbaus durch Kalium, Magnesium, Brom oder Bor. Im Gegensatz dazu bieten Pegmatit-Lagerstätten höhere Flexibilität bei nachfragebedingten Änderungen, dass sie geographisch nicht so konzentriert auftreten und darüber hinaus höhere

relative Lithiumgehalte aufweisen. Eine bislang eher untergeordnete Rolle spielen Depots, in denen sich Mineralien und Gestein durch hydrothermale Aktivitäten und den Kontakt mit Sole mit Lithium angereichert haben, wie es beispielsweise in Serbien und den USA der Fall ist. Derartige Lagerstätten könnten wegen ihrer Größe und Zusammensetzung interessant für den Abbau werden, erfordern jedoch neue Produktionsmethoden (vgl. Kesler et al. 2012: 55).

Tabelle 1: Globale Lithiumreserven und -ressourcen, Stand 2019

Land	Reserven in Tausend t	Ressourcen in Tausend t
Argentinien	2.000	14.800
Australien	2.700	7.700
Bolivien	n.a.	9.000
Brasilien	54	180
Chile	8.000	8.500
China	1.000	4.500
Demokratische Republik Kongo	n.a.	1.000
Deutschland	n.a.	180
Finnland	n.a.	40
Kanada	n.a.	2.000
Kasachstan	n.a.	40
Mali	n.a.	400
Mexico	n.a.	1.700
Namibia	n.a.	9
Österreich ²	n.a.	75
Peru	n.a.	130
Portugal	60	130
Russland	n.a.	1.000
Serbien	n.a.	1.000
Spanien	n.a.	400
Tschechien	n.a.	1.300
USA	35	6.800
Zimbabwe	70	540
Summe global (gerundet)	14.000	62.000

n.a....nicht angegeben

Quelle: Jaskula 2019: 99.

² Eine österreichische Lithium-Lagerstätte ist auf der Koralpe, im Grenzgebiet zwischen den Bundesländern Kärnten und Steiermark, angesiedelt. Angestrebt wird laut European Lithium, dem Unternehmen, das über die Schürfrechte verfügt, ein Abbauvolumen von 10.000 t Lithiumhydroxid pro Jahr für einen Zeitraum von zehn bis 20 Jahren, wobei der Produktionsbeginn, vormals für 2013 vorgesehen, noch von einer fehlenden Machbarkeitsstudie verzögert werde. Das Vorkommen wird mit rund 53.000 t Lithiumoxid beziffert (vgl. Wiener Zeitung 2018: o.S.). Umgerechnet in reines Lithium ergäbe dies ein Lagerstättenvolumen von rund 24.600 t Lithium, also ein Drittel der für Österreich in der USGS-Aufstellung angegebenen Ressourcen, sowie eine jährlich abgebaute, reine Lithiummenge von 1.650 t (vgl. Jaskula 2019: 99; Umrechnungsfaktoren 0,464 für Li₂O und 0,165 für LiOH·H₂O, vgl. BGS 2016: 2 und Abschnitt 2.3). Diese Menge würde Österreich mit dem Stand der Produktionsmengen von 2018, nach Australien, Chile, China und Argentinien zwar weit abgeschlagen, jedoch trotzdem auf ähnlichem Niveau mit Zimbabwe auf den globalen Platz 5 der Förderländer bringen (vgl. Abschnitt 4.1).

Im Vergleich zu den in Tabelle 1 aufgeführten, per Definition zum aktuellen Zeitpunkt wirtschaftlich gewinnbaren Reserven von rund 14 Millionen Tonnen belaufen sich die momentan ermittelten globalen Lithiumressourcen auf etwa 62 Millionen Tonnen (vgl. Jaskula 2019: 99). Die Verhältnismäßigkeiten zwischen den beiden Rohstoffklassifizierungen seien in Abbildung 2 nochmals nach Staaten geordnet graphisch veranschaulicht:

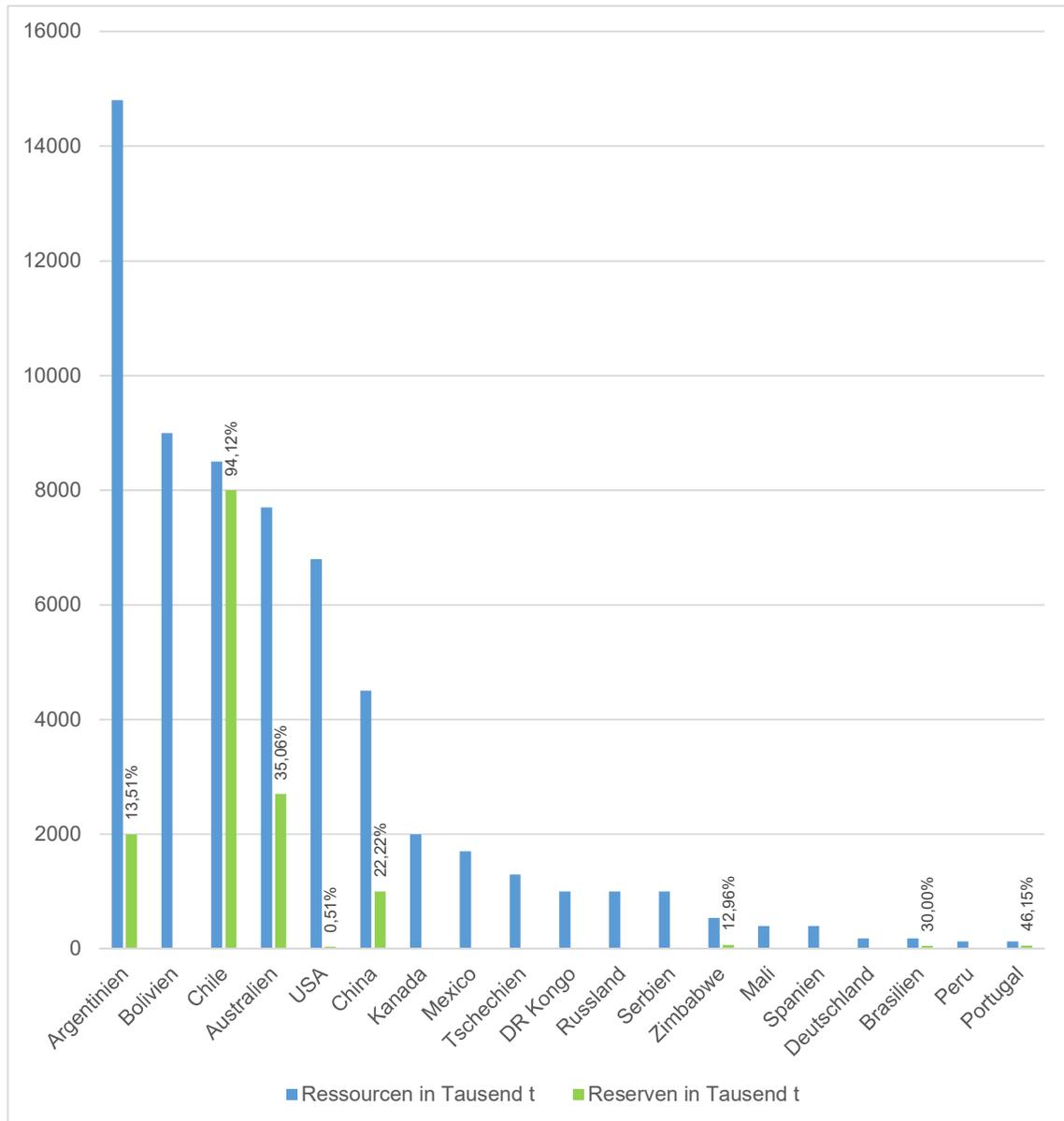


Abbildung 2: Ressourcen und relativer Anteil der Reserven nach Land in Tausend t

Quelle: Jaskula 2019: 99, Bearbeitung: B.W.

Obwohl es in einer Vielzahl von Staaten Lithiumlagerstätten gibt, sind die meisten Ressourcen für die Länder Argentinien (14,8 Mio. t), Bolivien (9 Mio. t), Chile (8,5 Mio. t), Australien (7,7 Mio. t), die USA (6,8 Mio. t) und China (4,5 Mio. t) zu verzeichnen. Etwas abgeschlagen, jedoch noch immer beachtlich, sind Kanada mit 2 Mio. t Lithiumressourcen, Mexico mit 1,7 Mio. t, Tschechien mit 1,3 Mio. t sowie die Demokratische Republik Kongo, Russland und Serbien mit jeweils 1 Mio. t an Ressourcen. Deutlich unter einer Million t an Ressourcen liegen die Länder Zimbabwe, Mali, Spanien, Deutschland, Brasilien, Peru, Portugal, (zwischen 540.000 und 130.000 t Lithiumressourcen, absteigende Reihenfolge) sowie Österreich, Finnland, Kasachstan und Namibia (zwischen 75.000 und 9.000 t Ressourcen, absteigend; vgl. Jaskula 2018: 99, siehe auch Tabelle 1).

In Bezug auf Lithium, das in naher Zukunft für die Verwendung in unterschiedlichen Applikationen zur Verfügung stehen wird, sticht ins Auge, dass dieses von vergleichsweise wenigen Ländern gestellt werden kann: So ist beispielsweise ein Großteil des Lithiums in Chile mit jetzigem Stand wirtschaftlich aus den bestehenden Ressourcen extrahierbar (94 %), dies sind weltweit gesehen mit 8 Mio. t auch die umfangreichsten Reserven. Im Fall von Australien kann nur gut ein Drittel der verfügbaren Ressourcen (35 %), nämlich rund 2,7 Mio. t, wirtschaftlich gewonnen werden. Trotz der umfassenden Ressourcen in Argentinien ist nur ein vergleichsweise geringer Anteil von knapp 14 % in Form von schnell extrahierbaren Reserven verfügbar, jedoch noch immer etwa 2 Mio. t. Weitere nennenswerte Reserven sind mit etwa 1 Mio. t in China zu finden, dies sind rund 22 % der dort vorliegenden Ressourcen. In weiteren Ländern sind zwar große Mengen an Ressourcen zu finden, die jedoch erst zu späteren Zeitpunkten für den Markt zur Verfügung gestellt werden können, etwa in Bolivien oder den USA, um nur einige zu nennen (vgl. Jaskula 2019: 99 und Abbildung 2).

Abschnitt 2.2 beleuchtete nach der Festlegung grundsätzlicher Begriffsdefinitionen umfassend die Zahlen und den aktuellen Wissensstand um die weltweit erhobenen Lithiumreserven und -ressourcen in verschiedenen primären und sekundären Lagerstätten (Gesteine bzw. Solen) sowie ihre geographische Verteilung auf einzelne Staaten³. Im Folgen-

³ Als kleiner Exkurs zur obigen Aufstellung der Ressourcen und Reserven auf der Ebene von einzelnen Nationalstaaten ist anzumerken, dass die Rohstoffverfügbarkeit in der Vergangenheit fast ausschließlich mit diesem räumlichen und organisatorischen Bezug eingeschätzt wurde. Darüber hinaus ist der Aspekt der Verfügbarkeit jedoch auch auf Unternehmensebene ein wichtiger, da der Zugriff auf die für eine Produktion notwendigen Rohstoffe essentiell für ein erfolgreiches Wirtschaften des jeweiligen Betriebes ist. Unternehmen haben völlig andere Bedürfnisse an Informationen über die Verfügbarkeit von Rohstoffen als Nationalstaaten: Bei ersteren steht vorrangig eine gute Performance des Unternehmens im Fokus; die generelle Verfügbarkeit eines Materials spielt vor allem im Zeitrahmen der strategischen Planungsintervalle der Firma, beispielsweise

den geht es nun an einen kurzen Abriss der wichtigsten Anwendungsfelder für den Rohstoff, die breit gefächert sind und vom Einsatz in Medikamenten bis hin zur Verwendung als essentielle Komponente in unterschiedlichen Akkutechnologien reichen.

2.3) Anwendungsgebiete

Lithium findet sowohl als Metall als auch in unterschiedlichen Verbindungen Anwendung: Als Metall dient es zur Gewinnung von organischen Lithiumverbindungen, von Lithiumhydrid, Lithiumaluminiumhydrid und Lithiumamid. Üblicher ist der Einsatz als Lithiumcarbonat, Lithiumhydroxid oder Lithiumchlorid. Wegen seinen reduzierenden Eigenschaften dient es dazu, Sauerstoff, Schwefel oder Kohle aus Metallen, bzw. Stickstoff oder Spuren davon aus Gasen zu entfernen. In Legierungen mit anderen Metallen steigert Lithium Zugfestigkeit, Härte und Elastizität. Das Metall wird auch in der Medizin verwendet, konkret zur Behandlung von Depressionen, Manie oder Affektstörungen (vgl. Sicius 2016: 26f.). Mengengmässiger sind allerdings die Verwendung in Akkumulatoren, Keramiken und Gläsern, als Schmierfett, in der Polymer-Produktion oder als Strangguss-Pulver (vgl. Jaskula 2018: 98). Besonders mit dem Einsatz von Lithium in Energiespeichern beschäftigt sich Kapitel 3.

Je nach chemischer Verbindung sind unterschiedliche Mengen von Lithium enthalten:

Tabelle 2: Anteile von Lithium in unterschiedlichen chemischen Verbindungen

Bezeichnung	Chemische Formel	Relativer Lithiumgehalt
Lithium	Li	1
Lithiumoxid	Li ₂ O	0,464
Lithiumchlorid	LiCl	0,163
Lithiumbromid	LiBr	0,080
Lithiumhydroxidmonohydrat	LiOH.H ₂ O	0,165

Quelle: BGS 2016: 2, Darstellung: B.W.

für 10 Jahre, eine Rolle. Auch die Substituierbarkeit eines Rohstoffes durch einen anderen mag in Unternehmensentscheidungen kaum wichtig sein, ebenso wenig wie die völlige Transparenz von Materialflüssen. Ganz anders erfolgt die Bereitstellung von Rohstoffinformationen auf staatlicher Ebene. Hier werden die generelle Knappheit eines Rohstoffes und die Auswirkungen für Mensch und Weltwirtschaft in den Blick genommen. Elemente von zentraler strategischer Bedeutung für das jeweilige Land sind Gegenstand von Untersuchungen, die wiederum die Basis für Rohstoffstrategien und staatliche Förderprogramme, beispielsweise zur Erhöhung von Recyclingraten oder zur Erforschung möglicher Substitute, bilden kann. Eine große Rolle spielt auch die Abschätzung oder Berechnung nationaler Materialflüsse (vgl. Mieke et al. 2016: 1f.).

Die hier genannten Anwendungsbereiche geben eine erste Vorstellung davon, wie vielfältig der Rohstoff eingesetzt werden kann. Im Abschnitt 4.3 erfolgt darüber hinaus eine detaillierte Darstellung der unterschiedlichen Anwendungsgebiete und ihres Anteils an der weltweiten Nachfrage, was besonders für die Festlegung stichhaltiger Kennzahlen für die folgende Modellierung unterschiedlicher Bedarfsszenarien von Bedeutung ist.

Davor geht aber Kapitel 3 in die Tiefe und untersucht den Einsatz von Lithium in Akkumulatoren.

3) Lithium in Akkumulatoren

Die folgenden Seiten geben einen Überblick über die Funktionsweise von Akkumulatoren, ihren Aufbau sowie über die verwendeten Materialien. Dabei wird auch auf den quantitativen Rohstoffbedarf eingegangen. Hier wird deutlich, dass die derzeit gebräuchlichste Form eines auf Lithium basierenden Speichers die Lithium-Ionen-Technologie ist. An dieser Stelle werden auch Anforderungen an Lithiumspeicher aufgezeigt und ihre Einsatzbereiche vorgestellt. Abschließend erfolgt eine Darstellung von aktuell verfügbaren Recyclingtechnologien speziell für Lithium-Ionen-Akkumulatoren.

3.1) Funktionsprinzip, Aufbau und Materialien

Das Funktionsprinzip von Batterien und Akkumulatoren basiert auf Redoxreaktionen - in einem Redoxsystem gelten zwei Stoffe des gleichen Elements, vorliegend in verschiedenen Oxidationsstufen, als Redoxpaar, das miteinander im Elektronenaustausch steht. Dabei ist das Reduktionsmittel elektropositiv, gibt somit Elektronen ab, während das elektro-negative Oxidationsmittel Elektronen aufnimmt, um einen Zustand des Gleichgewichts herzustellen. Typische Reduktionsmittel sind etwa Natrium, Calcium oder Aluminium; als Oxidationsmittel dienen beispielsweise Sauerstoff, Fluor oder Chlor (vgl. Kurzweil/Scheipers 2012: 185). Taucht man also zwei Elektroden, die Elektronen leiten, in einen Elektrolyten, der wiederum Ionen leitet, entsteht eine elektrochemische Zelle, besser bekannt als galvanische Zelle. Dabei können die Elektroden aus metallischen Leitern wie Kupfer, Platin oder Silber; aus Kohlenstoff, Grafit, Metalloxiden oder Halbleitern bestehen. Durch das Eintauchen der Elektroden in einen Elektrolyten erfolgt eine Ionenwanderung, elektrischer Strom fließt. Als Elektrolyte dienen wässrige Lösungen von Salzen, Säuren oder Basen; möglich sind auch Festelektrolyte oder Salzschnmelzen. Im Gegensatz dazu kann reinstes Wasser als Isolator herangezogen werden, da wegen den fehlenden gelösten Ladungsträgern keine Ionenwanderung erfolgt. Nun wird zwischen den beiden Elektroden, der Kathode und der Anode, eine elektrische Spannung angelegt; die positiv geladenen Kationen wandern zum Minuspol, der Kathode, die negativ geladenen Anionen zur Anode, dem Pluspol, wo wiederum die Elektroden aus dem äußeren Leiterkreis abgegeben bzw. in diesen aufgenommen werden. An der Kathode werden Kationen als kathodische Ströme von der Elektrode ins Elektrolyt entladen (Reduktion); an der Anode erfolgt die Oxidation, es fließen also vom Elektrolyten anodische Ströme mit Anoden in die Elektrode (siehe Abbildung 3; vgl. Kurzweil/Scheipers 2012: 187).

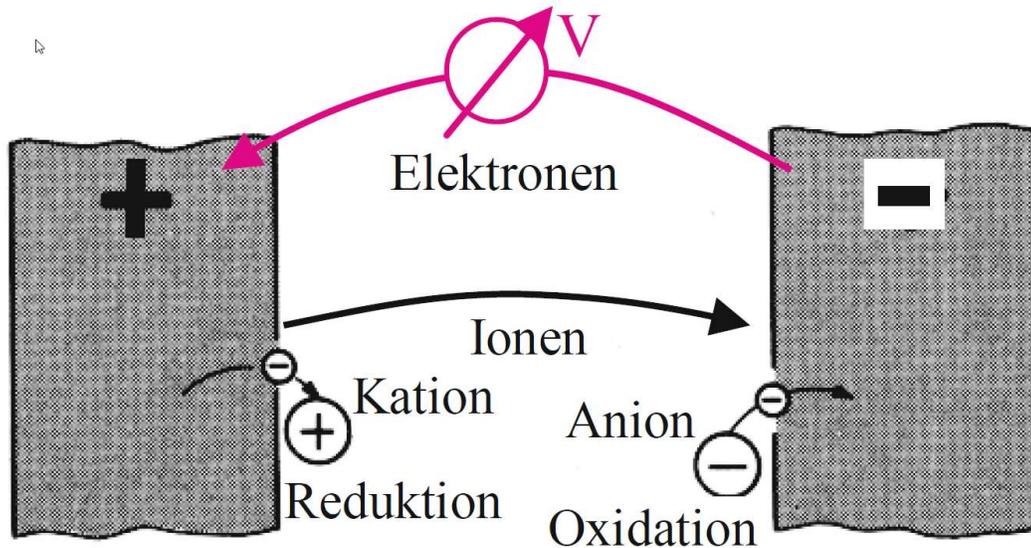


Abbildung 3: Oxidation und Reduktion in Batterien und Akkumulatoren

Quelle: Kurzweil/Scheipers 2012: 187.

Die Differenz zwischen dem Elektroden- und dem Elektrolytinneren wird als Elektrodenpotential bezeichnet; wobei unedle Stoffe einen hohen Lösungsdruck und somit ein negatives Potenzial haben, also dazu tendieren, Ionen in wässrigen Lösungen zu bilden. Im Gegensatz dazu haben edle Stoffe ein positives Potenzial und damit einen geringen Lösungsdruck. Das Elektrodenpotential ist nicht absolut messbar, sondern kann nur als Potentialdifferenz zwischen den beiden Elektroden ausgedrückt werden (vgl. Kurzweil/Scheipers 2012: 187f.).

Prinzipiell unterscheidet man zwischen Batterien (Primärelementen) und Akkumulatoren (Sekundärelementen), wobei bei ersteren die Umwandlung von chemischer zu elektrischer Energie und Wärme irreversibel ist. Akkumulatoren hingegen sind wiederaufladbar, die Energieumwandlung ist reversibel, erst durch den Vorgang des Ladens entsteht per se ein galvanisches Element (vgl. Kurzweil/Scheipers 2012: 193). Die in der Literatur sehr häufig verwendete Bezeichnung einer ‚Batterie‘ in Zusammenhang mit der Speicherung von Energie, beispielsweise in Elektrofahrzeugen (vgl. dazu exemplarisch Dallinger et al. 2011; Natkunarajah/Scharf/Scharf 2015; Wuschke et al. 2016; Vikström/Davidsson/Höök 2013; Angerer et al. 2009), ist demnach irreführend, weshalb in der vorliegenden Arbeit in diesem Kontext auf den Terminus ‚Akkumulator‘ zurückgegriffen wird.

Im Vergleich zu Blei-, Silber-Zinn- oder Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren fallen bei Lithiumspeicher vor allem hohe Energiedichten und Wirkungsgrade sowie gesteigerte Nennspannungen auf (siehe Tabelle 3, vgl. Adler 2017: 95).

Tabelle 3: Akkumulatoren-Typen mit Energiedichte, Wirkungsgrad und Nennspannung

Akku-Typ (chem. Formel)	Akku-Typ (Langform)	Energiedichte in Wh/kg	Wirkungsgrad in %	Nennspannung in V	Bemerkung
Pb	Blei	30	60-70	2	
AgZn	Silber-Zink	65-210	83	1,5	Hohe Kapazität
NiMH	Nickel-Metallhydrid	60-110	70	1,2	
LiCoO ₂	Lithium-Cobalt-Dioxid	120-210	90	3,6	Schnellladefähig
LiFePO ₄	Lithium-Eisen-Phosphat	80-140	94	3,3	Schnellladefähig
Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	Lithium-Titanat	70-90	90-95	3,2	Schnellladefähig

Quelle: Adler 2017: 95; Darstellung: B.W.

In den wichtigsten Komponenten eines Lithium-Ionen-Akkus kommen unter anderem folgende Materialien zum Einsatz: die Basis für Anoden bilden meist unterschiedliche Kohlenstoffverbindungen, Lithiumlegierungen oder Nitride (vgl. Kurzweil/Dietlmeier 2018: 176f.). Bei der Wahl der Kathode spielt vor allem die Struktur des Basiswerkstoffs eine Rolle – Olivin-Gitter, Schichtstruktur und Spinellgitter ermöglichen eine ein-, zwei- bzw. dreidimensionale Bewegung der Lithiumkationen, wobei die Parameter Sicherheit, Zyklenstabilität, Kosten, spezifische Kapazität und Spannung jeweils variieren. Die aktuell für Kathoden in kommerzieller Verwendung stehenden Rohstoffe sind Lithiumcobaltoxid und Lithiummanganoxid (vgl. Kurzweil/Dietlmeier 2018: 190). Als Elektrolyte werden Salzlösungen in flüssiger Form oder feste Stoffe wie keramische oder polymere Elektrolyte verwendet. Wichtig ist, dass ein Ionentransport begünstigt wird. Die Basis flüssiger Elektrolyte bilden zwei bis vier Lösemittel, ein Leitsalz und so wenige Zusatzstoffe wie möglich. Dabei kommen beispielsweise Ethylencarbonat und organische Carbonate und Ester zum Einsatz (vgl. Kurzweil/Dietlmeier 2018: 206 und 208). Eine weitere wichtige Komponente von Lithium-Ionen-Akkumulatoren ist der Separator, für den z.B. Polyolefin, Vliesstoffe oder anorganische Komposite zum Einsatz kommen, sofern nicht eine Separation über unterschiedliche Oberflächenbehandlungen erreicht wird (vgl. Kurzweil/Dietlmeier 2018: 223f.).

Je nach Anwendung kommen bei Lithium-Ionen-Akkus verschiedene Bauformen zum Einsatz, es gibt sie beispielsweise als (a) Knopf-, (b) Flach-, (c) Zylinder- und (d) prismatische

Zellen; wobei die Komponenten in der Rundzelle im zylindrischen Wickel vorliegen. Prismazellen dagegen bestehen aus Flachwinkeln oder gestapelten Einheiten, die von einem Hardcase oder einer Folie (Softpack) umschlossen sind (vgl. Kurzweil/Dietlmeier 2018: 225). Dies verdeutlicht Abbildung 4.

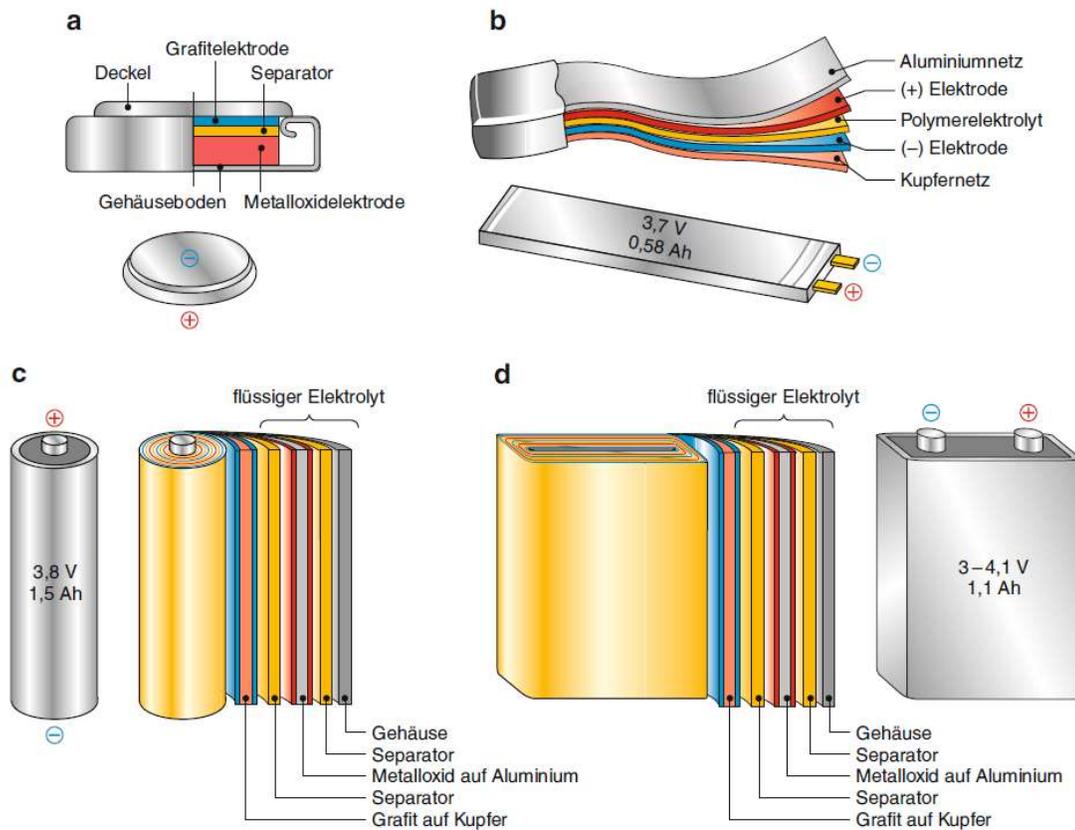


Abbildung 4: Bauformen unterschiedlicher Lithium-Ionen-Akkumulatoren

Quelle: Kurzweil/Dietlmeier 2018: 225.

Problematisch bei Lithium-Ionen-Akkumulatoren sind Überladungen, dies kann dazu führen, dass sich der Speicher selbst entzündet. Ein kontinuierlicher Ladestrom bei voll geladenem Akku wirkt sich negativ aus, im Gegensatz dazu steigern zahlreiche teilweise Ladevorgänge statt weniger voller Ladevorgänge die Lebensdauer. Eine Entladung unter die untere Abschaltspannung verursacht vermehrte Selbstentladung und eine Verringerung der Kapazität. Ausgleichend werden elektronische Schutzschaltungen, die den Akkumulator bei Annäherung an Belastungsgrenzen vom Last- bzw. vom Ladekreis trennen, eingesetzt. Ebenfalls problematisch können unvorhergesehene chemische Reaktionen, etwa bei Materialfehlern, Unfällen oder unsachgemäßer Bedienung werden; in der Folge kann

es zu Abbrand, Explosion oder Kurzschluss kommen. Dagegen steuern Sicherheitsventile, der Separator, Additive oder Schmelzsicherungen. Alterungs- und Leistungskontrolleinrichtungen verhindern Performanceabfälle, die von einzelnen defekten Zellen verursacht werden (vgl. Kurzweil/Dietlmeier 2018: 243ff.).

Eine große Gefahr geht bei Lithium-Ionen-Akkumulatoren auch von möglichen Selbstentzündungen, die oft durch unsachgemäßen Gebrauch oder Überladung verursacht werden, aus. Durch die Reaktionsfreudigkeit und leichte Brennbarkeit nimmt die potenzielle Gefährdung mit steigender Verbreitung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren zu. Kommt es in einem Speicher zum Kurzschluss, wandelt sich die gebundene chemische Energie rasch und unkontrolliert zu thermischer Energie um, schlussendlich wird so das enthaltene Lithium in Brand gesetzt. Vom Löschen mit Wasser muss abgesehen werden, da dieses wiederum mit dem Lithium reagiert und zusätzliche Wärme freisetzt. Als Reaktionsprodukte entstehen Lithiumlauge, ätzend; sowie leicht brennbarer Wasserstoff. Ein Lithiumbrand wirkt wegen dem ständig erzeugten Sauerstoff selbstverstärkend. Dies erfordert besondere Umsicht beim Sammeln und Transportieren von Akkumulatoren und elektrischen Altgeräten (vgl. Giern 2018: 435ff.).

Akkumulatoren sind nicht immer effizient in ihrem Einsatz, darüber hinaus sind oftmals Materialien verbaut, die stark negative Umweltwirkungen haben oder die, wie Lithium, als prinzipiell endliche natürliche Rohstoffe gelten. Dies ist auf jeden Fall zu berücksichtigen, wenn eine Abkehr von konventionellen fossilen Energieträgern stattfinden soll und die Umstellung auf derartige, scheinbar umweltfreundlichere Technologien erfolgt (vgl. McManus 2012: 288). In einer Studie von McManus werden unterschiedliche Akkutypen im Hinblick auf Energie, Rohstoffe und Treibhausgasemissionen untersucht. Im Fall von lithiumbasierten Speichertechnologien zeigt sich eine besonders starke Umweltwirkung bei der Herstellung (vgl. McManus 2012).

Der Preis für eine Lithium-Ionen-Zelle basiert zu etwa 40 % auf den eingesetzten Rohstoffen; die restlichen 60 % werden von den Zellkomponenten bestimmt. Während die Komponentenpreise stark von Kommerzialisierung, Wettbewerb und dem Anteil an Massenproduktion abhängen, wird wegen global höherer Produktionskapazitäten ein fallender Preis für Lithium erwartet (vgl. Kurzweil/Dietlmeier 2018: 253).

Aktuelle Forschungsbereiche in Bezug auf Lithium-Ionen-Akkus zielen beispielsweise auf eine Steigerung von Zellspannung und Leistung, Kapazität sowie absolute und zyklische Lebensdauer ab (vgl. Kurzweil/Dietlmeier 2018: 175f.).

Mit dem Lithium-Titanat-Akku wurde der klassische Lithiumspeicher weiterentwickelt. Dabei bestehen die Elektroden nicht mehr aus Graphit, sondern aus nanostrukturiertem Lithium-Titanat $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$. Wegen der Spinell-Oberfläche verlangsamt sich der Alterungsprozess des Akkus, die Lebensdauer erhöht sich auf etwa 12 Jahre mit 15.000 Ladezyklen. Noch wichtiger erscheint jedoch die Tatsache, dass höhere Ladeströme eingesetzt werden können und sich die Dauer eines 90 %igen Aufladevorganges von zwei bis drei Stunden auf zehn Minuten verkürzt (vgl. Adler 2017: 94). Dennoch werden momentan hauptsächlich Lithiumcobaltoxid und Lithiummanganoxid als Kathodenmaterial verwendet (vgl. Kurzweil/Dietlmeier 2018: 190).

Andere Weiterentwicklungen des klassischen Lithium-Ionen-Akkumulators stellen beispielsweise Lithium-Schwefel- oder Lithium-Luft-Speicher dar. Ihre Zellchemie weicht stark von der ursprünglichen des Lithium-Ionen-Akkus ab. Erreichen diese Technologien Marktreife, würde dies einen starken Anstieg der spezifischen Energiedichten bedeuten. Darüber hinaus könnten die günstigeren Rohstoffe auch eine Preisreduktion für Akkumulatoren auslösen (vgl. Janek/Adelhelm 2013: 200ff.).

Nach der umfassenden Erörterung des Funktionsprinzips von Akkus, ihres Aufbaus und der verbauten Materialien geht es im nachfolgenden Abschnitt 3.2 um die Anforderungen, denen Lithiumspeicher nach derzeitigem Stand genügen müssen. Im Anschluss seien auch jene Gebiete aufgezeigt, die aktuell die hauptsächlichen Einsatzbereiche dieser Speicher bilden - dies sind neben elektronischen Anwendungen und stationären Speichern vor allem die Akkumulatoren von elektrisch betriebenen Fahrzeugen.

3.2) Anforderungen und Einsatzbereiche

Nach den Ausführungen von Kurzweil und Dietlmeier (2018: 174) müssen Lithium-Ionen-Akkus in der heutigen Zeit folgenden Ansprüchen genügen:

- Geringes Gewicht in kompakter Form, keine schweren metallischen Ummantelungen
- Verzicht auf toxische Bestandteile
- Hohe Verlässlichkeit und größtmögliche Sicherheit
- Unterschiedliche Ausführungen und Größen
- Lange Lebensdauer mit mindestens 90.000 Ladezyklen
- Hohe Energiedichten

- Günstiger Preis
- Funktionstüchtigkeit innerhalb einer breiten Temperaturspanne
- Selbstentladung <1 %/Jahr
- Hohes Maß an Leistungsdichte und Entladespannung

In Bezug auf Lithium-Ionen-Akkumulatoren gilt es über diese technischen Anforderungen hinaus unterschiedliche Dimensionen von Sicherheit abzudecken (vgl. Korthauer 2013b: 271ff.):

- Arbeitssicherheit - Dies betrifft beispielsweise den Umgang der Produktionsmitarbeiter mit Gefahrenstoffen und im Hinblick auf die bereits während der Herstellung hohen Energiepotenziale der Lithiumzellen.
- Chemische Sicherheit - Hier ist die Wirkung der Umgebung auf die Speicher gemeint; wo unterschiedliche Ereignisse elektrische, thermische oder mechanische Einflüsse ausüben, zum Ansteigen der Zelltemperatur und somit zur Zerstörung führen können.
- Elektrische Sicherheit - Hohe Betriebsspannungen erfordern einen umsichtigen Umgang während Wartung und Einsatz des Akkumulators.
- Funktionale Sicherheit - Dies wird durch die ISO 26262-Norm abgedeckt. Sie stellt sicher, dass elektrische Speicher in Fahrzeugen im Falle eines Fehlers möglichst keine kritischen Fahrsituationen verursachen.
- Funktions- und Sicherheitstest - Sämtliche Komponenten werden von der Entwicklung bis hin zur Serienreife umfassend getestet, da wegen der prinzipiellen Möglichkeit einer Explosion ein hohes Gefährdungspotenzial durch Lithiumspeicher besteht.
- Transport - Weil Lithium-Ionen-Akkumulatoren als Gefahrgut gelten, müssen entsprechende Vorschriften sowohl bei Straßen-, Wasser- als auch bei Lufttransporten eingehalten werden.
- Recycling - Die Lebensdauer hängt sowohl von den Umwelteinflüssen als auch von der Handhabung des Speichers ab. Um eine optimale Wiederverwertung der verbauten Rohstoffe zu gewährleisten, ist sicherzustellen, dass größtmögliche Transparenz über Aufbau und Zusammensetzung herrscht. Dadurch lassen sich verfahrenstechnische Schritte und rezyklierbare Materialien einfacher bestimmen. Generell sollte die Tendenz hin zu geschlossenen Produktions- und Verwertungskreisläufen gehen.
- Bildung - Lithium-Ionen-Speicher als Hochtechnologie-Anwendung erfordert gut ausgebildete Mitarbeiterinnen. In der Branche tätige Unternehmen setzen daher

zumeist auf eine entsprechende Förderung von betriebs- und prozessspezifischer Aus- und Weiterbildung.

- Normung - Sie geben dem Anwender Sicherheit in Bezug auf den Einsatz von Lithium-Ionen-Speichern in den unterschiedlichsten Verwendungen und regeln Transport- und Prüfungsrichtlinien. Wichtig ist ihre ständige Revision und Anpassung.

Eine große Rolle spielen desweiteren Nachhaltigkeitsaspekte in Bezug auf Rohstoffverfügbarkeit, Umweltbelange und Rezyklierbarkeit (vgl. Kurzweil/Dietlmeier 2018: 243).

Bei der Wahl eines Speichers für eine bestimmte Anwendung sind folgende Parameter zu berücksichtigen:

- Anzahl von Lade- und Entladezyklen
- Performance bei unterschiedlichen Temperaturen
- Bedarf von schneller Entladung (vgl. McManus 2012: 293f.)

Verschiedene Akkumulatoren dienen somit unterschiedlichen Zwecken; und für jede Anwendung sind die Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus des Speichers mit zu berücksichtigen (vgl. McManus 2012: 294).

Weil Lithium im Besonderen in Akkumulatoren hohe Leistungs- und Energiedichten ermöglicht und zudem nur ein geringes Gewicht aufweist, eignet es sich sehr gut für den Einsatz in tragbaren Anwendungen sowie in Elektrofahrzeugen (vgl. Angerer et al. 2009: 5). Dementsprechend sind die Hauptanwendungsbereiche für Lithium-Ionen-Akkus aktuell

- (i) elektrische Kleingeräte wie etwa Laptops;
- (ii) Elektro-Fahrzeuge sowie darüber hinaus auch
- (iii) die stationäre Speicherung von Energie aus Photovoltaik- oder Windkraftanlagen unterschiedlichster Größe (vgl. Adler 2017: 95).

Die Speicher für tragbare Anwendungen nehmen aktuell den größten Teil des Marktes ein, jedoch wächst der Anteil an Akkumulatoren, die für Antriebs- und Speichertechnologien eingesetzt werden. Technologische Entwicklungen werden vor allem von Energiespeichern getrieben, eine große Rolle spielen aber auch Datenkommunikation und mobile Werkzeuge (vgl. Kurzweil/Dietlmeier 2018: 255). Darüber hinaus können Lithium-Ionen-

Akkumulatoren in industriellen Anwendungen zum Einsatz kommen, beispielsweise in Häfen bei Kran- und Schleppersystemen; auf Flughäfen oder in der Notstromversorgung (vgl. Brandt 2013: 384).

Die Lithium-Ionen-Technologie boomt für (i) kleine Elektrogeräte wie Handies, Laptops, Kameras oder elektrischen Zahnbürsten - inzwischen werden rund 3 Milliarden Lithiumzellen pro Jahr für derartige Anwendungen produziert. Damit erfolgte die Substitution der bisher vorherrschenden Nickel-Metallhydrid-Speicher (vgl. Kurzweil/Dietlmeier 2018: 239). Die Spannungsbereiche der in Reihe oder parallel geschalteten Zellen in den Akkupacks variieren in portablen Geräten von 3,6 bis 36 V (vgl. Leuthner 2013: 14).

Wenn der Einsatz von (ii) elektrisch betriebenen Fahrzeugen CO₂-Emissionen reduzieren soll, ist es essentiell, diese mit Strom aus erneuerbaren Quellen, also möglichst kohlenstoffarmer Energie, zu betreiben. Elektroautos bieten darüber hinaus hohes Potenzial, auch periodisch verfügbare erneuerbare Energien dauerhaft in die Stromversorgung zu integrieren und erleichtern damit die Energiewende. Obwohl sich Elektromobilität positiv auf die CO₂-Emissionen auswirkt, haben eine Einsparung von kohlenstoffintensivem Strom oder der Ersatz fossiler Heizsysteme einen ungleich höheren Effekt (vgl. Felgenhauer et al. 2016: 380 und 389). Ziel soll es in jedem Fall sein, dass eine erhöhte Nachfrage nach Strom, ausgelöst durch Elektrofahrzeuge, auch zu einem Ausbau erneuerbarer Energieträger führt. Obwohl elektrisch betriebene Fahrzeuge im Hinblick auf ihre Klimawirksamkeit besser zu bewerten sind als Verbrennungsmotoren, können sie aktuell wegen der verursachten Schadstoffemissionen im Strombereich nicht als treibhausgas-neutral eingestuft werden (vgl. Öko-Institut 2017a: 8f.).

Der Grundgedanke des Einsatzes von Lithium-Ionen-Akkus in Fahrzeugen umfasst einerseits das Streben nach einer Steigerung der Performance im Vergleich mit Verbrennungsmotoren, andererseits das Ziel, erneuerbare Energie für den Personen- oder Gütertransport zur Verfügung zu stellen (vgl. Brandt 2013: 387). Konventionelle Verbrennungsmotoren (conventional combustion engine, ICE⁴) als etablierte Technologie weisen hohe Effizienzgrade auf und können mit unterschiedlichen Energieträgern betrieben werden. Neben klassischem Benzin und Diesel finden auch Erdgas (compressed natural gas, CNG), flüssiges Erdgas (liquified petroleum gas, LPG) und Agro- oder Biokraftstoffe Anwendung (vgl. Novinsky et al. 2014: 3). In elektrisch betriebenen Fahrzeugen nimmt der Energiespeicher eine Schlüsselrolle ein, weil er über die Parameter Energie- und Leistungsdichte nicht nur

⁴ ICE = Internal Combustion Engine (vgl. IFEU 2015: 69).

das Antriebskonzept, sondern damit auch wesentlich den CO₂-Ausstoß und die Nutzerinnenakzeptanz bestimmt (vgl. Lamp 2013: 393). Lithium macht in Fahrzeugakkumulatoren vor allem Sinn, weil es im Vergleich zu Blei nicht nur leichter ist, sondern auch eine höhere Energiedichte aufweist und größere Wirkungsgrade sowie eine hohe Nennspannung erzielt (vgl. Adler 2017: 93). Im Fall von Elektroautos finden sowohl Hybrid-; Plug-In-Hybrid- als auch rein auf Elektroantrieb basierende Konzepte Anwendung. Lithium-Ionen-Akkus werden aber auch für E-Fahrräder, Pedelecs und Elektroroller als Energiespeicher verwendet. Transportmittel für Güter oder Personen greifen aktuell noch eher auf hybride Antriebslösungen zurück (vgl. Leuthner 2013: 14). Hybridantriebe arbeiten mit Energierückgewinnung aus dem Bremsvorgang und mit Motor-Start-Stopp, und verfügen immer über einen Akkumulator, je nach Ausprägung (Mild- bis Full-Hybrid) auch über einen reinen Elektromotor sowie über elektrische Fahranteile (HEV). Plug-In-Hybriden kann darüber hinaus nicht nur über den Fahrzeuggenerator, sondern auch über externe Ladeeinrichtungen elektrische Energie zugeführt werden (PHEV). Elektrofahrzeuge dagegen werden ohne Verbrennungsmotoren, also rein elektrisch betrieben, ihre Reichweite wird ausschließlich über die Akkukapazität bestimmt (BEV oder EV⁵; vgl. Lamp 2013: 394f.). Darüber hinaus werden in zahlreichen Studien neben konventionellen und verschiedenen elektrischen Antriebstechnologien auch Brennstoffzellenfahrzeuge (fuel cell electric vehicle, FCEV) berücksichtigt. Die hier angewendete Technologie basiert auf der Umwandlung von Wasserstoff in elektrische Energie. Die zum Einsatz kommende Brennstoffzelle wird meist mit Elektroantrieben kombiniert und könnte Fahrzeugakkumulatoren langfristig ersetzen. Derzeit sieht sich diese Technologie jedoch noch mit hohen Investitions- und Anschaffungskosten konfrontiert, desweiteren muss der Fahrzeugtank wegen der niedrigen Dichte von Wasserstoff entsprechend ausgelegt sein, um dem hohen Druck auch in sicherheitstechnischen Belangen genügen zu können (vgl. Novinsky et al. 2014: 4). Für die vorliegende Arbeit werden FCEVs nicht berücksichtigt.

Die nachfolgende Abbildung 5 zeigt eine schematische Gegenüberstellung der soeben genannten Antriebstechnologien:

⁵ HEV = Hybrid Electric Vehicle; PHEV = Plug-In Hybrid Electric Vehicle; BEV/EV = (Battery) Electric Vehicle (vgl. IFEU 2015: 69).

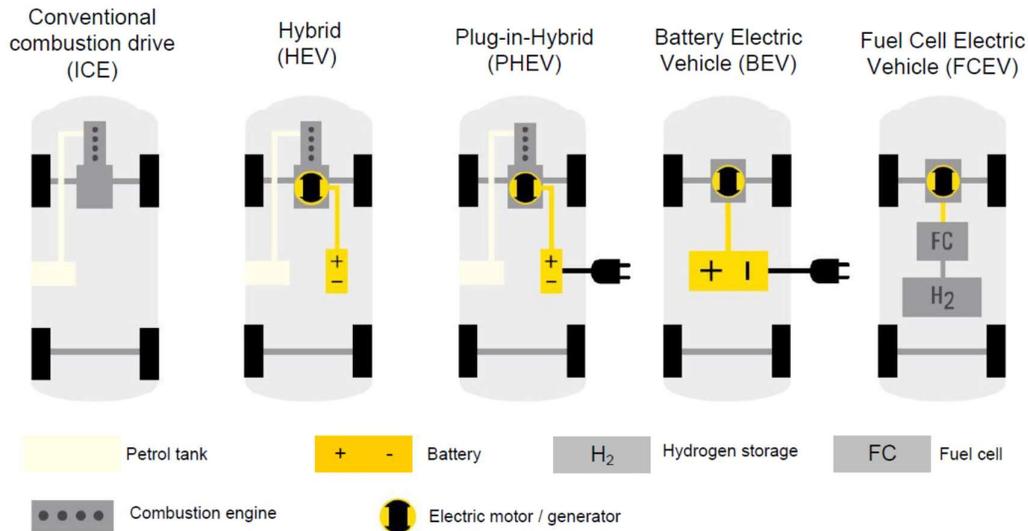


Abbildung 5: Gegenüberstellung unterschiedlicher Antriebstechnologien

Quelle: Spath et al. 2011: 8; zit. n. Novinsky et al. 2014: 4, bearbeitete Darstellung.

Je größer der Akku, desto eher wird rein elektrisches Fahren möglich. Dabei stellt 1kWh Akkuladung die Energie für 5-10 km Fahrbetrieb zur Verfügung. Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge arbeiten meist mit 10 kWh-Akkus, somit beträgt die rein elektrische Reichweite um die 50 km. Reine Elektro-PKW's erfordern 20- bis 60 kWh-Akkus, um das reibungslose Bewältigen alltäglicher Wege gewährleisten zu können (vgl. Brandt 2013: 387). Dabei liegen aktuelle Reichweiten bei etwa 160 bis 240 km; Langstreckenfahrten mit gleichbleibenden Geschwindigkeiten erhöhen diese (vgl. Kurzweil/Dietlmeier 2018: 241). Einzelne Herstellerinnen geben sogar Reichweiten bis 300 km (vgl. Renault 2019: o.S.) oder sogar 350 km an (vgl. Nissan 2019: o.S.).

Vergleicht man beispielsweise elektrisch betriebene- und Brennstoffzellenfahrzeuge; so liegen zwar beide Technologien im Hinblick auf verursachte CO₂-Emissionen gleichauf und deutlich unter den von klassischen Verbrennungsmotoren emittierten Schadstoffen. Jedoch benötigen mit Brennstoffzellen betriebene Transportmittel rund zwei Mal so viel Energie wie Elektroautos, und dieser Nachteil kann auch nicht mit Synergieeffekten, die durch die Wasserstoff-Netzspeicherung oder Power2Gas entstehen könnten, aufgewogen werden. Zu diesem selben Ergebnis kamen zwei unterschiedliche Studien, eine durchgeführt in süddeutschen, die andere in einer kalifornischen Gemeinde (vgl. Felgenhauer et al. 2016).

Eine wesentliche Rolle nehmen unterschiedliche Ladekonzepte ein; davon hängt es maßgeblich ab, inwieweit Elektromobilität eine ernst zu nehmende Alternative zu fossil betriebenen Fahrzeugen werden kann (vgl. Brandt 2013: 387f.). Die Ladung der Akkumulatoren kann beispielsweise via Kabel mit Gleich- oder Wechselstrom, bzw. kabellos/induktiv erfolgen; darüber hinaus besteht die Möglichkeit, den Akku einfach zu wechseln, um ohne Zeitverzögerung elektrisch weiterfahren zu können (vgl. Dallinger et al. 2011: 14f.). Der Ladevorgang von Akkumulatoren in Elektrofahrzeugen kann derart gesteuert werden, dass sie dann Energie aufnehmen, wenn fluktuierende Erzeugungsanlagen Strom produzieren. Dies stellt eine interessante Möglichkeit dar, den bei günstigen Sonnen- oder Windbedingungen erzeugten Strom zwischenspeichern und gegebenenfalls bedarfsorientiert ins Netz zurückzuspeisen. Damit könnten bei entsprechender Menge elektrisch betriebene Fahrzeuge einen relevanten Baustein eines auf erneuerbaren Quellen basierenden Energiesystems darstellen (vgl. Dallinger et al. 2011: 7).

Elektrisch betriebene Fahrzeuge sollten nicht nur für ihren Einsatz im Individualverkehr, sondern auch für den ökonomischen Flottenverkehr in Betracht gezogen werden. Dies betrifft beispielsweise Logistikunternehmen im Rahmen urbaner Transportwege, die aufgrund ihrer betrieblichen Strukturen sowohl den jeweiligen Fahrzeugeinsatz und damit auch die Zusammensetzung ihrer Flotte gut planen können. Zudem kann die Beladung über die Schaffung der erforderlichen Infrastruktur am Betriebsgelände erfolgen. Begünstigt würde eine Entwicklung in diese Richtung durch steigende Öl- sowie durch sinkende Akkumulatorenpreise, die einen Einsatz von Elektrofahrzeugen in dieser Sparte ökonomisch sinnvoll machen würden (vgl. Dallinger et al. 2011: 22).

Der Kapazitätsverlust von Lithium-Ionen-Akkumulatoren stellt ein wichtiges Kriterium für die Einsatzdauer in Elektrofahrzeugen dar: Sobald die nominale Kapazität des Speichers unter 80 % fällt, ist es sinnvoller, diese einer Sekundärnutzung in anderen Anwendungen zuzuführen (vgl. Natkunarajah/Scharf/Scharf 2015: 744).

Die Einteilung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren in (iii) stationären Anwendungen erfolgt nach drei Kriterien (vgl. Brandt 2013: 384f.):

- Inselbetrieb vs. Netzanbindung: Ein vom Stromnetz abgekoppelter Betrieb erfolgt vor allem in entlegenen Gegenden.
- Entladerate: Zeitspanne der Abgabe gespeicherter Energie.
- Speichergröße.

Die Bedeutung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren als stationäre Speicher hängt besonders von ihrer Wirtschaftlichkeit ab. In Kombination mit Photovoltaikanlagen können derartige Systeme für private Haushalte aktuell bereits wirtschaftlicher sein als ausschließlicher Bezug von Strom über das Netz; jedoch korreliert dies stark mit den Kosten für deren Anschaffung sowie mit der Speicherperformance und -qualität (vgl. Munzke et al. 2017: 1). Lithium-Ionen-Akkus werden als stationäre Speicher mit Kapazitäten von ca. 2 kWh bis 5 MWh angeboten (vgl. Leuthner 2013: 14). Pro installierter kWp PV-Anlage macht eine Akkukapazität von 1 kWh Sinn; die Kosten belaufen sich mittlerweile auf unter 1.000 €/kWh Speicherkapazität (vgl. Kurzweil/Dietlmeier 2018: 240). Das Karlsruhe Institute of Technology, das derartige Heimspeichersysteme in einer Studie bewertete und verglich, kam dabei zu folgenden Ergebnissen: Einflussfaktoren auf die gesamte Performance und damit auch auf den zur erreichenden Grad an Autarkie sind vor allem Wirkungsgrade einzelner Komponenten, der Verbrauch im Standby, die Reaktionszeit bei Last- oder Produktionsänderungen sowie eine intelligente Systemsteuerung (vgl. Munzke et al. 2017: 1).

Eine Steigerung des individuellen Speichers in einzelnen Haushalten bilden smart grids, intelligente Netze, bei denen Plug-In-Hybride, also bidirektionale Lade-Entlade-Akkumulatoren, verteilt an zahlreichen Standorten, einen virtuellen Großspeicher bilden. Dies kann nicht nur stationäre Speicher, sondern beispielsweise auch die Akkus in Elektrofahrzeugen umfassen und zielt auf eine bedarfsorientierte Abdeckung der Stromnachfrage sowie auf eine optimale Steuerung des Einsatzes von Kraft-Wärme-Kopplungs-Kraftwerken ab. Wesentliche Voraussetzung dafür sind der Einsatz von smart meters, also intelligenten Stromzählern, sowie eine umfassende Netzüberwachung (vgl. Kurzweil/Dietlmeier 2018: 240f.).

Die vorhergehenden Seiten behandeln die technischen und sicherheitsrelevanten Anforderungen an Lithiumspeicher und gehen auf ihre vorherrschenden Anwendungsbereiche ein. Dabei wurde im Hinblick auf Fragestellung 1 (,Wie entwickelt sich der globale Lithiumbedarf bis 2050 auf Basis unterschiedlicher Elektromobilitäts-Ausbaupfade?') vor allem dem Einsatz in Akkus für Elektrofahrzeuge umfassende Aufmerksamkeit gewidmet. Der nächste Abschnitt 3.3 beschäftigt sich mit einer möglichen Wiedergewinnung von Lithium aus Akkus und zeigt sowohl beeinflussende Faktoren als auch Forschungsarbeiten zu diesem Thema auf.

3.3) Recycling

Obwohl historisch eher unbedeutend, wird dem Recycling von Lithium in den letzten Jahren erhöhte Priorität zugewiesen. Dies ist auf die steigende globale Nachfrage, die vor allem aus der, auch anteilmäßig wachsenden, Verwendung in Lithium-Ionen-Akkumulatoren resultiert, zurückzuführen. Die USA subventionierte etwa 2009 den Bau einer Lithium-Recyclingeinrichtung auf heimischem Boden (vgl. Jaskula 2018: 98) – dies zeigt sich jedoch (noch) nicht in nennenswerten Recyclinganteilen. Die derzeit noch kaum vorhandene Wiedergewinnung von Lithium müsste in jedem Fall weltweit abgestimmt weiterentwickelt werden, um einen angemessenen Beitrag zur Lithiumversorgung leisten zu können (vgl. Swain 2017: 401).

Über einen langen Zeitraum wurden Lithium-Ionen-Speicher nur für die Wiedergewinnung von Metallen wie Cobalt, Nickel und Kupfer herangezogen, während das enthaltene Lithium nicht rezykliert wurde (vgl. Luidold/Antrekowitsch 2010: 68). Mit dem Stand von 2017 hat sich daran kaum etwas geändert - rund 3 % der anfallenden End of Life-Akkus werden Recyclingprozessen zugeführt, während wiederum nur andere Metalle aufbereitet werden. Der Anreiz, Lithium wiederzugewinnen, ist ein geringer; weltweit liegen die Recyclingwerte unter 1 % (vgl. Swain 2017: 388).

Dieser Status quo in Bezug auf das Recycling von Lithium erscheint definitiv als negativ zu beurteilen; vor allem, wenn man wie Swain (2017: 401) davon ausgeht, dass die Nachfrage in den kommenden Jahren aufgrund des Bedarfs für die Verwendung in Gläsern, Elektronik, in Speichern und in elektrischen Anwendungen stark steigen könnte.

Nachdem, wie McManus (2012: 292ff.) ausführt, Lithium als Metall per se zu den wiedergewinnbaren Materialien gehört, sollte Recycling definitiv gefördert werden. Statt sich ausschließlich von Primärrohstoffen abhängig zu machen, die sowohl starken Preissteigerungen ausgesetzt als auch von Lagerstättenerschöpfung betroffen sein können, könne es Sinn machen, mit recyceltem Sekundärmaterial seine Lithiumquellen zu diversifizieren. Gerade bei Speichertechnologien wurde mit Stand im Jahr 2012 vorrangig Lithium aus Primärabbau eingesetzt; das wiedergewonnene Lithium finde eher Einsatz in anderen Anwendungen. Dies erfordert eine verstärkte Forcierung von Recyclinganstrengungen in Bezug auf Lithiumspeicher. Der Abbau der für Lithium-Ionen-Akkumulatoren nötigen Rohstoffe hat starke Auswirkungen in Bezug auf Treibhausgasemissionen und auf die Erschöpfung von Lagerstätten; der Einfluss des sei Lithiumabbaus ein sehr umfassender (vgl. McManus 2012: 292ff.). Stärkeres Recycling dagegen verringert den Energiebedarf,

die emittierten Treibhausgase und schont die natürlichen Vorkommen (vgl. Boyden/Soo/Doolan 2016: 188).

Generell kann Recycling von EoL-Akkumulatoren einen wesentlichen Beitrag zur Ressourcenschonung leisten: Im Fall von Lithium-Ionen-Speichern, deren Rohstoffe in einem Cradle-to-Cradle-Kreislauf wiedergewonnen werden, beziffern Unterreiner, Jülch und Reith in einer Studie aus 2016 das Einsparungspotenzial des gesamten verwendeten Materials prinzipiell mit 62 %, wobei nur 49 % zum Untersuchungszeitpunkt tatsächlich rezykliert wurden. Für die Ressource Lithium fand kein Recyclingprozess statt (vgl. Unterreiner/Jülch/Reith 2016).

Besonders die Wiedergewinnung von Lithium aus Akkumulatoren sei sinnvoll und bedürfe neuer und wirkungsvoller Prozesse. Nur damit werde es möglich sein, in Anbetracht der steigenden Nachfrage eine ausreichende Versorgung mit dem Rohstoff zu gewährleisten. Aus der Sicht und mit dem Ziel einer nachhaltigen Entwicklung seien Cradle-to-Grave-Lebenszyklen nicht mehr tragbar; Recycling könne helfen, Cradle-to-Cradle-Prozesse umzusetzen. Darüber hinaus würden mögliche Versorgungsengpässe abgewendet und die Anforderung einer nachhaltigen Energiebereitstellung, der Schonung der Umwelt sowie die Implementierung einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft weiter gefördert. In diesem Sinne sei in Bezug auf wirkungsvolles Recycling von pyrometallurgischen Verfahren Abstand zu nehmen, die nur großmaßstäbig und unter hohen Investitionen sowie mit stärkeren Umweltwirkungen und einem höheren Energiebedarf umzusetzen seien. Dagegen könnten hydrometallurgische Wiedergewinnungsprozesse auch in kleineren Betriebsstätten implementiert werden; die Energieintensität sei bei geringen Kohlendioxid-Emissionen eine niedrigere, und die Anlage könne je nach anfallendem zu rezyklierendem Material dimensioniert werden (vgl. Swain 2017: 401).

Mit dem Stand von 2015 ist zu sagen, dass die Wiedergewinnungsprozesse von Lithium aus Akkumulatoren nicht dazu geeignet sind, ausreichende Mengen bereitzustellen, um den prognostizierten Materialbedarf von Fahrzeugspeichern abzudecken. Werden die Verfahren von energie- und abfallintensiven, komplizierten Vorbehandlungsstufen durch Zerlegung und anschließende hydro- und pyrometallurgische Prozesse im industriellen Maßstab umgestellt, könne dies dazu führen, dass auch das Recycling von Lithium wirtschaftlich sinnvoll wird (vgl. Sonoc/Jeswiet/Soo 2015: 756).

Welche Menge an Fahrzeug-Akkumulatoren für eine potenzielle Wiedergewinnung von Lithium zur Verfügung stehen wird, hängt nicht nur von der Zahl der verkauften Elektrofahrzeuge ab. Wie Meisenzahl, Sittig und Höck zeigten, spielt auch eine mögliche Zeitverzögerung von der Herstellung bis zum Wiedereintritt in den Stoffstrom eine wesentliche Rolle. Die genannten Autorinnen untersuchten dies für die Speicher in tragbaren Anwendungen. Demnach sind hier die kalendarische Lebensdauer, die Zeit von Nutzung und Anwendung sowie die Hortungsdauer zu berücksichtigen. Als kalendarische Lebensdauer wird somit die Lebenszeit eines Akkumulators unter vorgegebenen Bedingungen bezeichnet; während Nutzungs- und Anwendungszeit erfolgt ein aktiver Einsatz des Speichers. Mit dem Terminus ‚Hortungsdauer‘ wiederum misst man die Spanne zwischen Kaufzeitpunkt und der Rückführung des Akkus in ein Sammelsystem (vgl. Meisenzahl/Sittig/Höck 2014: 1183). Dies sei in der folgenden Abbildung 6 verdeutlicht:

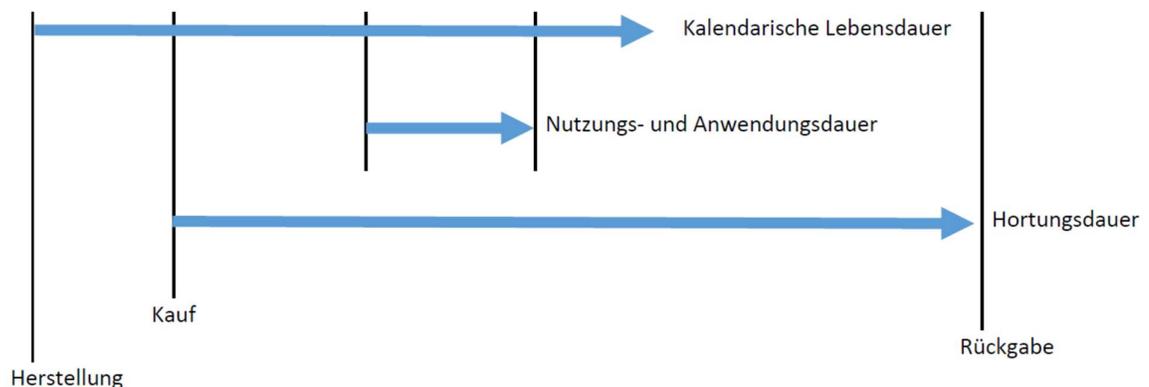


Abbildung 6: Lebens-, Nutzungs-/Anwendungs- und Hortungsdauer im exemplarischen Zeitstrahl

Quelle: Meisenzahl/Sittig/Höck 2014: 1184; Bearbeitung: B.W.

Es stellt sich die Frage, inwieweit eine derartige Zeitverzögerung auch bei den Stoffströmen aus Fahrzeugakkus zum Tragen kommt. Sonoc, Jeswiet und Soo knüpfen in jedem Fall Wachstum und Nachhaltigkeit des Elektrofahrzeugmarktes an eine hohe Recyclingquote von Lithium aus Lithium-Ionen-Speichern. Die zum Zeitpunkt ihrer Studie nicht stattfindende Wiedergewinnung sei auf die niedrigen Rohstoffpreise zurückzuführen; zudem seien Recyclingverfahren oft unnötig energieintensiv und aufwändig. Als Alternative zu aktuell praktizierten Prozessen, bei denen das Material verbrannt, kryogen gekühlt oder

unter Schutzatmosphäre bearbeitet werde, um eine sichere Öffnung der Zellen zu gewährleisten, sollten automatisierte Demontageverfahren etabliert werden. Dabei blieben wertvolle Elektronikkomponenten erhalten, die Entladung könne Hand in Hand mit der Wiedergewinnung die Restenergie erfolgen, und die anschließende Öffnung der Zellen könne ohne Schutzatmosphäre erfolgen (vgl. Sonoc/Jeswiet/Soo: 2015: 752).

Die Lebensdauer eines Lithium-Ionen-Akkumulators wird mit rund 10 bis 15 Jahren beziffert. Je nachdem, wie schnell sich neue Technologien durchsetzen, kann es aber auch schon vor Ablauf der Lebensdauer zum Austausch kommen (vgl. Giern 2018: 326).

Obwohl es auch Bestrebungen gebe, Recycling gesetzlich zu regulieren, werde es vor allem durch folgende Umstände erschwert (vgl. Dewulf et al 2010: 230):

- zahlreiche Akteurinnen am internationalen Markt
- fehlende oder nicht zugängliche Informationen
- Allokationsprobleme

Elektro-Altgeräte, in denen unter anderem Lithium-Ionen-Akkus verbaut sind, stellen einen wesentlichen Stoffstrom dar, der europaweit um 3 bis 5 % wächst. In Österreich werden aktuell aber nur 28 bis 31 % der eingesetzten Rohstoffe wiedergewonnen (vgl. Unger/Beigl/Salhofer 2017: 428).

Durch die Verbundbauweise, in der die meisten Speicher für Elektro- und Hybridfahrzeuge derzeit ausgeführt sind, wird die wirtschaftliche Trennung und Wiedergewinnung der verwendeten Materialien oft stark erschwert und sind nur mit fortgeschrittenen Technologien und ganzheitlichen Ansätzen erreichbar. Andererseits wird durch gesteigerte Nachfrage auch Recycling wieder wirtschaftlicher. Die Implementierung von funktionierende Wiedergewinnungsmechanismen und somit die Sicherung einer ausreichenden Rohstoffversorgung trägt entscheidend zur Umsetzbarkeit von elektrischen Transportmitteln in großem Maßstab bei (vgl. Treffer 2013: 346).

Recyclingverfahren von Lithium-Ionen-Akkus stehen in den letzten Jahren vermehrt auf dem Prüfstand. Zahlreiche Wissenschaftlerinnen beschäftigten sich mit diesen Themen, wobei Aspekte wie potenzielle Rücklaufquoten; Umweltwirkungen von Wiedergewinnungsverfahren oder auch technische Weiterentwicklungen von Recyclingprozessen untersucht wurden.

Nachfolgend seien einige Beispiele dafür genannt:

- Eine Arbeit von Natkunarajah, Scharf und Scharf aus 2015 beschäftigt sich mit der Entwicklung unterschiedlicher Szenarien für Rücklaufquoten von Lithium-Ionen-Akkumulatoren, um Aussagen über die zum Recycling zur Verfügung stehenden Mengen treffen zu können. Eine wichtige Rolle in der Untersuchung spielte der Demontage-Prozess, der zu diesem Zeitpunkt manuell durchgeführt wurde. Weitere Faktoren, die in den Blick genommen wurden, waren beispielsweise unterschiedliche Akkusysteme, Gefahren bei der Zerlegung, potenzielle Verkaufszahlen von elektrisch betriebenen Fahrzeugen sowie die Lebensdauer der verschiedenen Speichersysteme in ihrer Primärnutzung als Akkus von Elektroautos sowie in einem möglichen Sekundäreinsatz, der an die Erstverwendung folgen kann, sobald die Akkus eine Kapazität von ca. 80 % unterschreiten. Aufgrund der Modellierung befanden die Autorinnen für das Jahr 2040 die Sättigung des Marktes mit einer Prognose von rund 70 Mio. kg rücklaufenden Lithium-Ionen-Speichern pro Jahr im Minimalszenario, während für das Maximalszenario etwa 550 Mio. kg Akkumaterial an Rücklauf vorhergesagt wurde (vgl. Natkunarajah/Scharf/Scharf 2015).
- Boyden, Soo und Doolan untersuchten in einer Studie die Umweltauswirkungen des Recyclings von Lithium-Ionen-Akkumulatoren und stellten dazu unterschiedliche Wiedergewinnungsverfahren für tragbare Speicher in diversen Betrieben weltweit gegenüber. Wie sich zeigte, waren die am häufigsten rezyklierten Rohstoffe, Kupfer, Nickel und Cobalt, die gleichzeitig auch als am wertvollsten einzustufenden. Aus prozesstechnischer Sicht kamen die Autorinnen zu dem Ergebnis, dass aus hydrometallurgischen Verfahren im Durchschnitt mehr Material gewonnen werden konnte als aus pyrometallurgischen. Von acht befragten Unternehmen führten nur zwei ein umfassendes Plastikrecycling durch. Aus der Perspektive eines Life Cycle Assessments haben pyrometallurgische Prozesse vor allem durch die Verbrennung von Plastik ein hohes Erderwärmungspotenzial. Hydrometallurgische Verfahren wirken eher durch Deponierung auf den Anstieg der Temperatur; aber auch mögliche Ökotoxizität bzw. potenzielle Humantoxizität sind durch die Stromerzeugung während der Prozesse gegeben. Darüber hinaus haben nach den Ergebnissen auch die unterschiedlichen Transportwege der Altspeicher einen starken Einfluss auf Höhe der ermittelten Umweltwirkungen. Demnach zeichnet eine Überführung von Recyclingmaterial von Australien nach Europa im Fall von pyrometallurgischen Verfahren zu einer Erhöhung des Erderwärmungspotenzials um 45 %; bei hydrometallurgischen Prozessen steigt die mögliche Humantoxizitätsrate

dadurch sogar um 550 %. Die Autorinnen leiten aus den Erkenntnissen eine Empfehlung für Verfahren mit niedrigen Prozesstemperaturen ab; bei denen zudem Plastik wiedergewonnen werden kann. Weitere Verbesserungen können über die Verkürzung von Transportwegen zwischen Sammel- und Recyclingort der Altspeicher erreicht werden (vgl. Boyden/Soo/Doolan 2016).

- Ein mechanischer Prozess, entwickelt von der TU Bergakademie Freiberg/Sachsen könnte die bisher energieaufwändigen pyro- und hydrometallurgischen Aufbereitungsverfahren für Lithium-Ionen-Akkus aus Elektrofahrzeugen ergänzen oder gar ersetzen. Über die Einhaltung gesetzlicher Bestimmungen wie der EU-Batterierichtlinie 2006/66EG, die eine stoffliche Verwertung von mindestens 50 % vorsieht, hinaus, stand dabei vor allem die Wirtschaftlichkeit des entwickelten Verfahrens im Vordergrund. Die Wiedergewinnung der metallischen Bestandteile, beispielsweise aus Elektrodenfolie, Gehäuse, Zellen, Modulen und Packs sei relativ einfach, nun müsse auch die Recycling- und Rücklaufquote erhöht werden, um nachhaltige Erfolge beim Betrieb derartiger Anlagen erzielen zu können (vgl. Wuschke et al. 2016).

Eine wesentliche Rolle beim Recycling von Lithium-Ionen-Akkus kommt deren Herstellern zu: Werden sie an der Entwicklung von Wiedergewinnungsverfahren beteiligt, sollte es möglich werden, den Aufbau von Akkumulatoren so zu gestalten, dass die enthaltenen Rohstoffe leichter recycelt werden können. Dies entspricht dem Streben nach geschlossenen Stoffkreisläufen und der nachhaltigen Schonung von Primärlagerstätten durch den Einsatz von Sekundärmaterial (vgl. Wuschke et al. 2016: 276).

Abschnitt 3.3 beschäftigte sich explizit mit der Wiedergewinnung von Lithium aus den Akkumulatoren in Fahrzeugen mit unterschiedlichen elektrischen Antrieben. Dabei lag der Fokus auf dem Status quo, auf politischen Interventionen in diese Richtung sowie auf der Rolle von Recycling bei der Absicherung einer ausreichenden Rohstoffversorgung. Als wichtigen Einflussfaktor auf die für die Sekundärgewinnung zur Verfügung stehende Abfallmenge wurden neben der gängigen Lebensdauer auch Aspekte wie die davon abweichende Hortungsdauer in den Blick genommen. Studien, die sich mit Recyclingverfahren auseinandersetzen, zeigten unterschiedliche Aspekte von Wiedergewinnungsprozessen auf. So wurde mögliche Rücklaufquoten ermittelt; unterschiedliche Recyclingverfahren wurden auf Energiebedarf und Umweltwirkungen untersucht und ein mechanischer Prozess zur Verringerung des energetischen Aufwandes wurde entwickelt.

Im nun folgenden Kapitel 4 fließen die Ausführungen der Kapitel 2 und 3 zusammenfassend in eine Modellierung der potenziellen Lithiumnachfrage bis 2050 ein. Dafür wird zuerst die weltweite Lithiumproduktion zwischen 1999 und 2018 aufgezeigt und analysiert, anschließend werden die Preisentwicklung und der Anteil unterschiedlicher Anwendungen am Bedarf in den Blick genommen. Unter Bezugnahme auf geeignete Zahlen aus der Literatur werden drei Szenarien zu möglichen Ausbawegen von elektrischen Fahrzeugen bis 2050 entworfen; auf deren Grundlage die Berechnung der potenziellen Nachfrage nach Lithium erfolgt. Die generierten Ergebnisse werden abschließend jenen aus anderen Studien und Bezugsjahren gegenübergestellt und bestmöglich interpretiert.

4) Produktion, Preise und Bedarf aus unterschiedlichen Anwendungen

Bevor inhaltlich in die Modellierung gestartet wird, erscheint es unabdingbar, wichtige Kennzahlen zur Entwicklung von Produktion, Nachfrage und Preis der vergangenen Jahre aufzuzeigen. Eine weitere wichtige Kennzahl, die auf den folgenden Seiten in den Blick genommen wird, ist die Verteilung des weltweit eingesetzten Lithiums auf unterschiedliche Anwendungsgebiete.

4.1) Globale Produktion seit 1999

Die weltweite Lithiumgewinnung gestaltete sich in den Jahren zwischen 1999 und 2018 wie folgt:

Tabelle 4: Globale Lithiumproduktion nach Ländern in t, 1999 bis 2018

	Argentinien	Australien	Brasilien	Chile	China	Kanada	Namibia	Portugal	USA	Zimbabwe	Summe global
1999	200	2 200	32	5 300	2 300	710	-	140	Z	700	14 000
2000	200	2 400	30	5 300	2 400	710	-	140	Z	740	14 000
2001	200	2 000	220	6 800	2 400	700	-	200	Z	700	15 100
2002	946	3 140	224	5 920	2 400	707	-	190	Z	640	14 200
2003	960	3 450	240	6 580	2 500	710	-	190	Z	480	15 100
2004	1 970	3 930	242	7 990	2 630	707	-	320	Z	240	20 200
2005	1 980	3 770	242	8 270	2 820	707	-	320	Z	260	20 600
2006	2 900	5 500	242	8 200	2 820	707	-	320	Z	600	23 500
2007	3 000	6 910	180	11 100	3 010	707	-	570	Z	300	25 800
2008	3 170	6 280	160	10 600	3 290	690	-	700	Z	500	25 400
2009	2 220	6 280	160	5 620	3 760	310	-	-	Z	400	18 800
2010	2 950	9 260	160	10 510	3 950	-	-	800	Z	470	28 100
2011	2 950	12 500	320	12 900	4 140	-	-	820	Z	470	34 100
2012	2 700	12 800	150	13 200	4 500	-	-	560	Z	1 060	35 000
2013	2 500	12 700	400	11 200	4 700	-	-	570	870	1 000	34 000
2014	3 200	13 300	160	11 500	2 300	-	-	300	Z	900	31 700
2015	3 600	14 100	200	10 500	2 000	-	-	200	Z	900	31 500
2016	5 800	14 000	200	14 300	2 300	-	-	400	Z	1 000	38 000
2017	5 700	40 000	200	14 200	6 800	-	-	800	Z	800	69 000
2018*)	6 200	51 000	600	16 000	8 000	-	500	800	Z	1 600	85 000

*) ... geschätzt

Z ... Information aus strategischen Gründen zurückgehalten

Quellen: Ober 2001: 97; Ober 2002: 99; Ober 2003: 101; Ober 2004: 99; Ober 2005: 99; Ober 2006: 101; Ober 2007: 97; Ober 2008: 99; Jaskula 2009: 95; Jaskula 2010: 93; Jaskula 2011: 95; Jaskula 2012: 95; Jaskula 2013: 95; Jaskula 2014: 95; Jaskula 2015: 95; Jaskula 2016: 101; Jaskula 2017: 101; Jaskula 2018: 99; Jaskula 2019: 99.

Die wichtigsten Player am globalen Lithiummarkt sind demnach Australien mit einer Jahresproduktionsmenge von 51.000 t, gefolgt von Chile, das 16.000 t pro Jahr gewinnt. Große Mengen kommen auch aus China und Argentinien mit 8.000 bzw. 6.200 t. Diese vier Staaten stellten damit im Jahr 2018 gut 95 % der Jahresmenge, allein aus Australien kamen 60 % der Jahresmenge. Stark abgeschlagen mit jährlich gewonnenen Lithiummengen von weniger als 2000 t sind Zimbabwe, Portugal, Brasilien, und Namibia, für die USA liegen keine Werte vor (vgl. Tabelle 4). An dieser Stelle sei auch nochmals an die Verteilung der globalen Lithiumreserven und -ressourcen verwiesen, besonders auf Bolivien – obwohl es im Ressourcen-Ranking an zweiter Stelle steht, wird dort aktuell kein Lithium gewonnen (vgl. Jaskula 2019: 99; Abbildung 2).

Die Zahlen aus Tabelle 4 seien in der folgenden Abbildung 7 nochmals graphisch für die vier Länder mit den höchsten Produktionsmengen verdeutlicht:

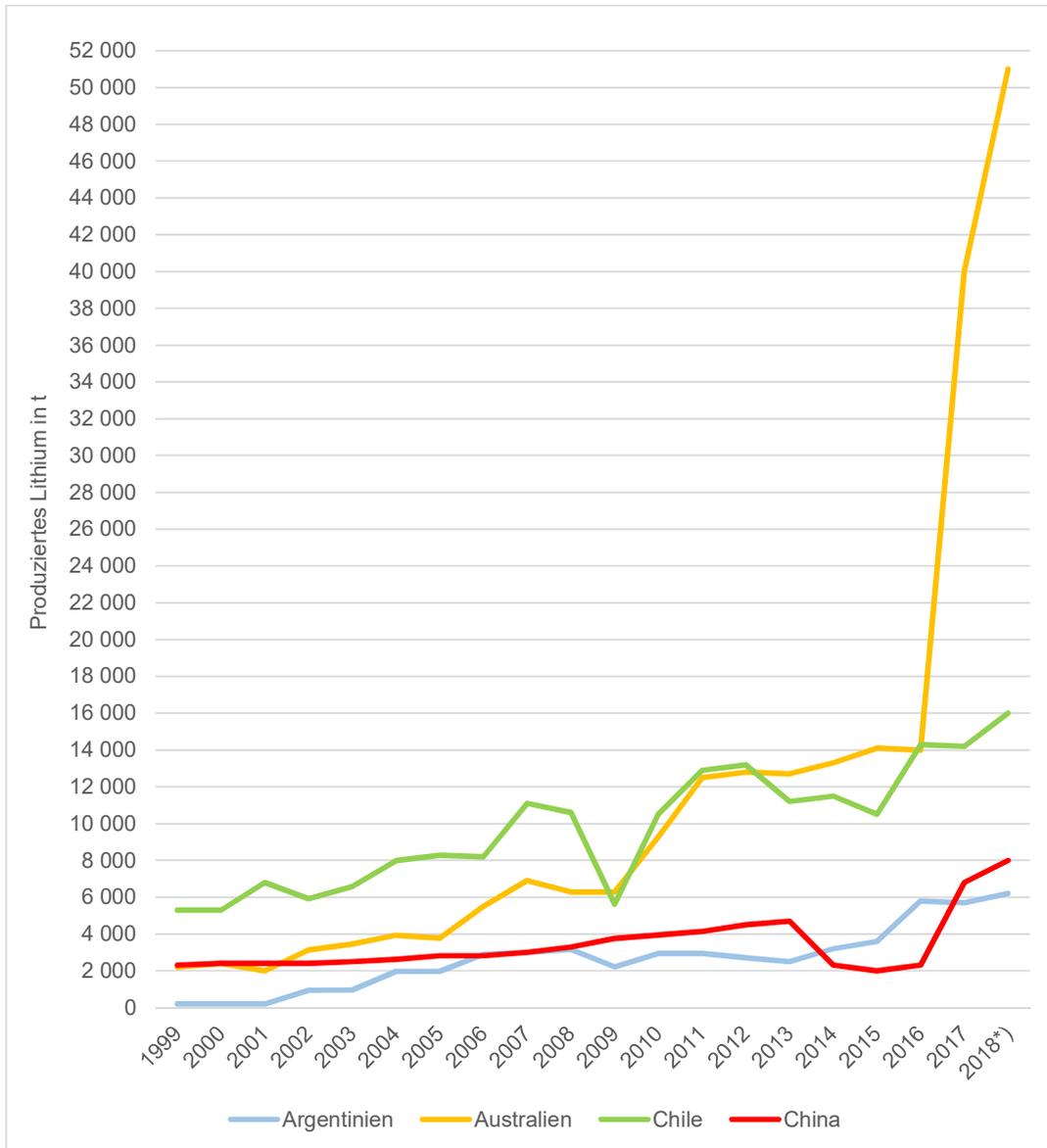


Abbildung 7: Entwicklung der Lithiumgewinnung in Australien, Chile, China und Argentinien, 1999 bis 2018

Quellen: Ober 2001: 97; Ober 2002: 99; Ober 2003: 101; Ober 2004: 99; Ober 2005: 99; Ober 2006: 101; Ober 2007: 97; Ober 2008: 99; Jaskula 2009: 95; Jaskula 2010: 93; Jaskula 2011: 95; Jaskula 2012: 95; Jaskula 2013: 95; Jaskula 2014: 95; Jaskula 2015: 95; Jaskula 2016: 101; Jaskula 2017: 101; Jaskula 2018: 99; Jaskula 2019: 99.

Tabelle 4 und Abbildung 7 zeigen für die Jahre 1999 bis 2008 eine vergleichsweise stabile, konstant steigende Jahresproduktion von Lithium. Die weltweite Finanzkrise scheint sich in dem Produktionseinbruch von 2009 zu zeigen; ab 2010 erholen sich die Werte wieder, um 2014/2015 leicht zurückzugehen. Danach gibt es starke Anstiege der weltweit hergestellten Lithiummengen: die Gewinnung erhöhte sich von 2015 auf 2016 um 20,6 %; von

2016 auf 2017 betrug das Wachstum sogar 81,6 %. Auch für 2018 schätzt Jaskula (2019: 99) eine Mehrproduktion von 23,2 % ab.

Auf Länderebene heruntergebrochen, entwickelten sich die vier Hauptproduzentinnen Australien, Chile, China und Argentinien bis 2008 konstant. Auffällig sind danach ein Einbruch in der Zahlen 2009 in Chile und darauffolgend 2010 bis 2012 starke Anstiege der gewonnenen Lithiummenge sowohl in Chile als auch in Australien⁶. Weiters hervorzuheben sind der Produktionsabfall 2014 bis 2016 in China und eine umfassende Ausweitung der gewonnenen Lithiummengen in Australien seit 2017.

Damit stellen sich die bereitgestellten Lithiummengen pro Land für 2018 im relativen Verhältnis wie folgt dar (siehe Abbildung 8):

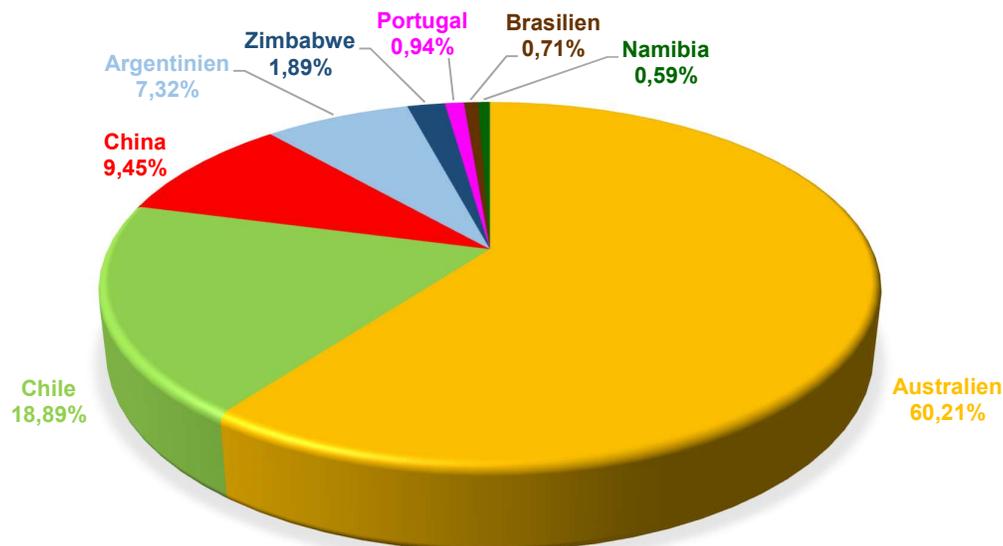


Abbildung 8: Globale Lithiumproduktion nach Ländern 2018*)

*) geschätzt

Quelle: Jaskula 2019: 99, Darstellung: B.W.

Da in der vorliegenden Arbeit eine mögliche Entwicklung der Lithiumnachfrage untersucht wird und der Fokus dabei auf dem potenziellen Bedarf für Elektrofahrzeuge liegt, sei an dieser Stelle eine mögliche Korrelation mit der Entwicklung des Ölpreises in den Blick

⁶ Dies lässt sich auf die damaligen sinkenden Absatzzahlen und folglich fallende Preise zurückführen (vgl. Jaskula 2010: 92).

genommen, da Öl noch immer die Hauptenergiequelle für konventionell betriebene Fahrzeuge darstellt. Abbildung 9 zeigt die Entwicklung der weltweit geförderten Lithiummenge und den Verlauf des Ölpreises zwischen 1999 und 2018:

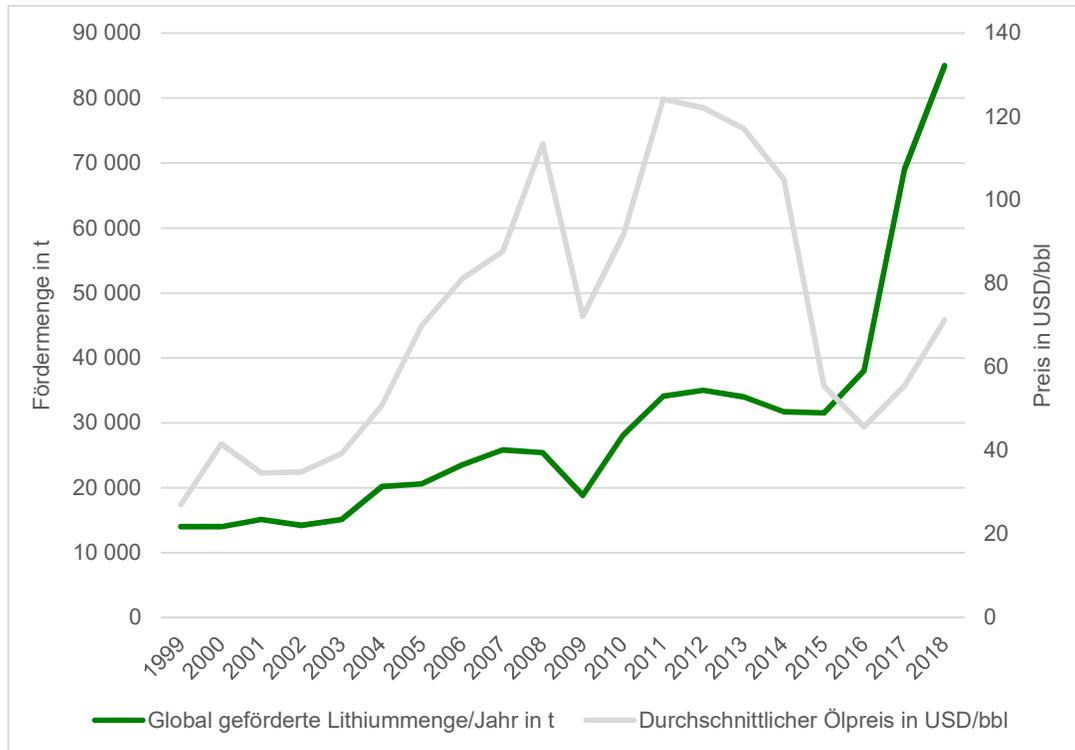


Abbildung 9: Lithiumförderung global und Ölpreis/Jahr 1999-2018

Quellen: Ober 2001: 97; Ober 2002: 99; Ober 2003: 101; Ober 2004: 99; Ober 2005: 99; Ober 2006: 101; Ober 2007: 97; Ober 2008: 99; Jaskula 2009: 95; Jaskula 2010: 93; Jaskula 2011: 95; Jaskula 2012: 95; Jaskula 2013: 95; Jaskula 2014: 95; Jaskula 2015: 95; Jaskula 2016: 101; Jaskula 2017: 101; Jaskula 2018: 99; Jaskula 2019: 99; BP 2020: o.S.

Aus der obigen Abbildung 9 kann bis 2014 ein grober Zusammenhang zwischen Ölpreis und Lithiumförderung abgeleitet werden – beide Kurven folgen dem selben Trend, wobei die Ausschläge für die Lithiumproduktion nicht so stark ausfallen. Der Preiseinbruch für Öl 2008//2009 lässt sich auf die weltweite Finanzkrise zurückführen (vgl. dazu exemplarisch Welt 2008; Glebe 2008). Auch 2015/2016 fällt der Ölpreis stark ab, was mit der Gewinnung unkonventioneller Ölvorräte in Zusammenhang gebracht werden kann (vgl. dazu exemplarisch Frondel et al. 2015; Oberhuber 2015). Ab diesem Zeitpunkt lässt sich erstmals auch ein gegenläufiger Trend beobachten – der Ölpreis fällt, die Lithiumproduktion stagniert, bzw. steigt 2016 an. Von 2017 weg sind wiederum für beide Kurven Anstiege zu verzeichnen, wobei die Lithiummenge nun erstmals steiler wächst als der Ölpreis. Abbildung 9

deutet somit an, dass die Produktion von Lithium in groben Zügen mit der Höhe des Ölpreises korreliert. Diese Prämisse wird ebenfalls für die Modellierung in Kapitel 5 angewendet.

Kapitel 4.1 behandelt die weltweite Lithiumproduktion zwischen 1999 und 2018. Dabei stechen nicht nur vier Hauptproduzenten heraus, es scheint auch einen Zusammenhang zwischen Lithiumgewinnung und der Entwicklung des Ölpreises zu geben. Auf Basis dieser Informationen werden nachfolgend die Lithiumpreise in den Blick genommen.

4.2) Preisentwicklung seit 1999

Für Lithium wurden in den USA zwischen 1999 und 2018 folgende Preise erzielt:

Tabelle 5: US-amerikanische Lithiumpreise 1999 bis 2018

Jahr	Preis in USD/t
1999	4470
2000	4470
2001	4470
2002-2009	keine Angaben
2010	5180
2011	5180
2012	6060
2013	6800
2014	6690
2015	6500
2016	8650
2017	15000
2018	17000

Quellen: Ober 2001: 96; Ober 2002: 98; Jaskula 2015: 94; Jaskula 2018: 98; Jaskula 2019: 98; Darstellung: B.W.

Die ermittelten Preise für Lithium blieben in den Jahren von 1999 bis 2001 vergleichsweise konstant; für die Zeit bis 2009 sind keine Daten verfügbar. Aber auch der Preisunterschied zwischen 2001 und 2010 erscheint nicht gravierend, obwohl angenommen werden kann, dass die globale Finanzkrise auch hier fallende Preise verursacht hat (vgl. dazu exemplarisch Abschnitt 4.1; Glebe 2008). Dies ändert sich in den nachfolgenden Jahren: nach leichten Steigerungen bis 2015 brachten sowohl 2016 als auch 2017 und 2018 deutliche Preisanstiege (vgl. Tabelle 5).

Nun erscheint es über die bloße Skizzierung der Preisentwicklung für Lithium hinaus auch interessant, diese der weltweiten Fördermenge sowie den durchschnittlichen Jahres-Ölpreisen in diesem Zeitraum gegenüberzustellen. Dies erfolgt in Abbildung 10:

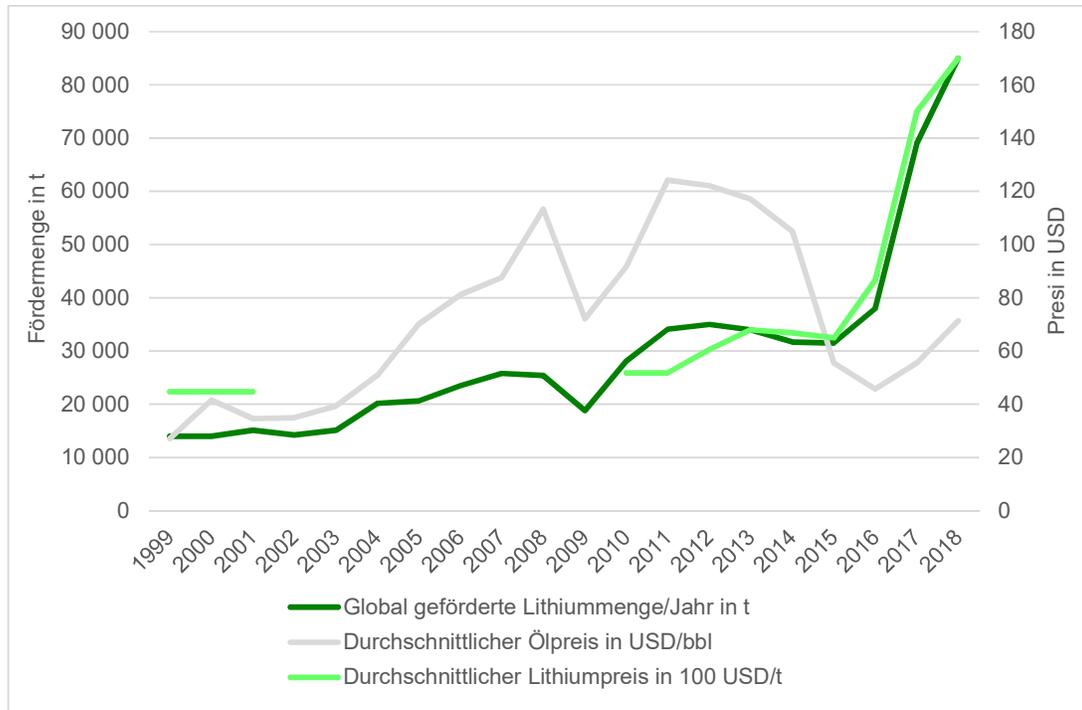


Abbildung 10: Gegenüberstellung Lithiumfördermenge, Lithiumpreis, Ölpreis

Quellen: Ober 2001: 97; Ober 2002: 99; Ober 2003: 101; Ober 2004: 99; Ober 2005: 99; Ober 2006: 101; Ober 2007: 97; Ober 2008: 99; Jaskula 2009: 95; Jaskula 2010: 93; Jaskula 2011: 95; Jaskula 2012: 95; Jaskula 2013: 95; Jaskula 2014: 95; Jaskula 2015: 95; Jaskula 2016: 101; Jaskula 2017: 101; Jaskula 2018: 99; Jaskula 2019: 99; BP 2020: o.S.

Wie bereits in Abbildung 9 festgestellt, kann eine grobe Korrelation zwischen Zu- und Abnahme der weltweiten Lithiumfördermenge und des Ölpreises festgestellt werden. Für das Verhältnis von Lithiumpreis zu -fördermenge zeigen sich bis 2012 ebenso ähnliche Trends; ab 2013 steigen die Preise gar in dem selben Verhältnis wie die gewonnenen Mengen.

Die Veranschaulichung der weltweiten Lithiumfördermenge und der Preisentwicklung für den Rohstoff legt es nahe, auch für die kommenden Jahre von einer steigenden Tendenz für beide Parameter auszugehen, da die Preise trotz zunehmender Mengen nach oben gehen.

Für die Festlegung valider Basiszahlen für die Modellierung nimmt das folgende Kapitel die Anwendungen in den Blick, die auf den Rohstoff Lithium zurückgreifen.

4.3) Anteil diverser Anwendungsgebiete an der globalen Nachfrage

Im Zeitverlauf zwischen 2009 und 2018 stellt sich die Verteilung des Lithiumverbrauchs nach Anwendungsgebieten wie folgt dar, wobei die relativen Anteile auch in absoluten Zahlen ausgedrückt seien:

Tabelle 6: Relativer Anteil des globalen Li-Bedarfs nach Anwendungsgebieten 2009-2018

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Akkumulatoren	23%	23%	27%	22%	29%	31%	35%	39%	46%	56%
Keramik/Glas	31%	31%	29%	30%	35%	35%	32%	30%	27%	23%
Schmierfette	10%	9%	12%	11%	9%	8%	9%	8%	7%	6%
Pharmazie/Polymer-Prod.	-	6%	5%	5%	5%	5%	4%	5%	5%	4%
Strangguss-Pulver/Metallurgie	4%	4%	5%	4%	6%	6%	5%	5%	4%	3%
Klimaanlagen/Luftbehandlung	5%	6%	4%	4%	5%	5%	5%	3%	2%	2%
Aluminium-Prod./Metallurgie	3%	6%	2%	1%	1%	1%	1%	-	-	-
Andere Anwendungen	24%	15%	16%	23%	10%	9%	9%	10%	9%	6%

Quellen: Jaskula 2010: 92; Jaskula 2011: 94; Jaskula 2012: 94; Jaskula 2013: 94; Jaskula 2014: 94; Jaskula 2015: 94; Jaskula 2016: 100; Jaskula 2017: 100; Jaskula 2018: 98; Jaskula 2019: 98; Darstellung: B.W.

Tabelle 7: Absoluter Anteil des globalen Li-Bedarfs nach Anwendungsgebieten 2009-2018

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Akkumulatoren	4.324	6.463	9.207	7.700	9.860	9.827	11.025	14.820	31.740	47.600
Keramik und Glas	5.828	8.711	9.889	10.500	11.900	11.095	10.080	11.400	18.630	19.550
Schmierfette	1.880	2.529	4.092	3.850	3.060	2.536	2.835	3.040	4.830	5.100
Pharmazie/Polymer-Produktion	0	1.686	1.705	1.750	1.700	1.585	1.260	1.900	3.450	3.400
Strangguss-Pulver/Metallurgie	752	1.124	1.705	1.400	2.040	1.902	1.575	1.900	2.760	2.550
Klimaanlagen/Luftbehandlung	940	1.686	1.364	1.400	1.700	1.585	1.575	1.140	1.380	1.700
Aluminium-Prod./Metallurgie	564	1.686	682	350	340	317	315	0	0	0
Andere Anwendungen	4.512	4.215	5.456	8.050	3.400	2.853	2.835	3.800	6.210	5.100
GESAMT	18.800	28.100	34.100	35.000	34.000	31.700	31.500	38.000	69.000	85.000

Quellen: Jaskula 2010: 92f.; Jaskula 2011: 94f.; Jaskula 2012: 94f.; Jaskula 2013: 94f.; Jaskula 2014: 94f.; Jaskula 2015: 94f.; Jaskula 2016: 100f.; Jaskula 2017: 100f.; Jaskula 2018: 98f.; Jaskula 2019: 98f.; Berechnung und Darstellung: B.W.

Wie aus Tabelle 6 ersichtlich wird, geht die Zunahme der für Akkumulatoren verwendeten Rohstoffmenge eindeutig zulasten aller anderer Anwendungen. Obwohl für 2018 der relative Anteil anderer Verwendungsbereiche sinkt, steigen absolut gesehen der Umfang des eingesetzten Lithiums (vgl. Tabelle 7). Dies soll auch im Rahmen der Modellierung in Kapitel 5 Berücksichtigung finden.

Die Entwicklung der absoluten Anteile der unterschiedlichen Anwendungsbereiche sei in Abbildung 11 nochmals graphisch verdeutlicht:

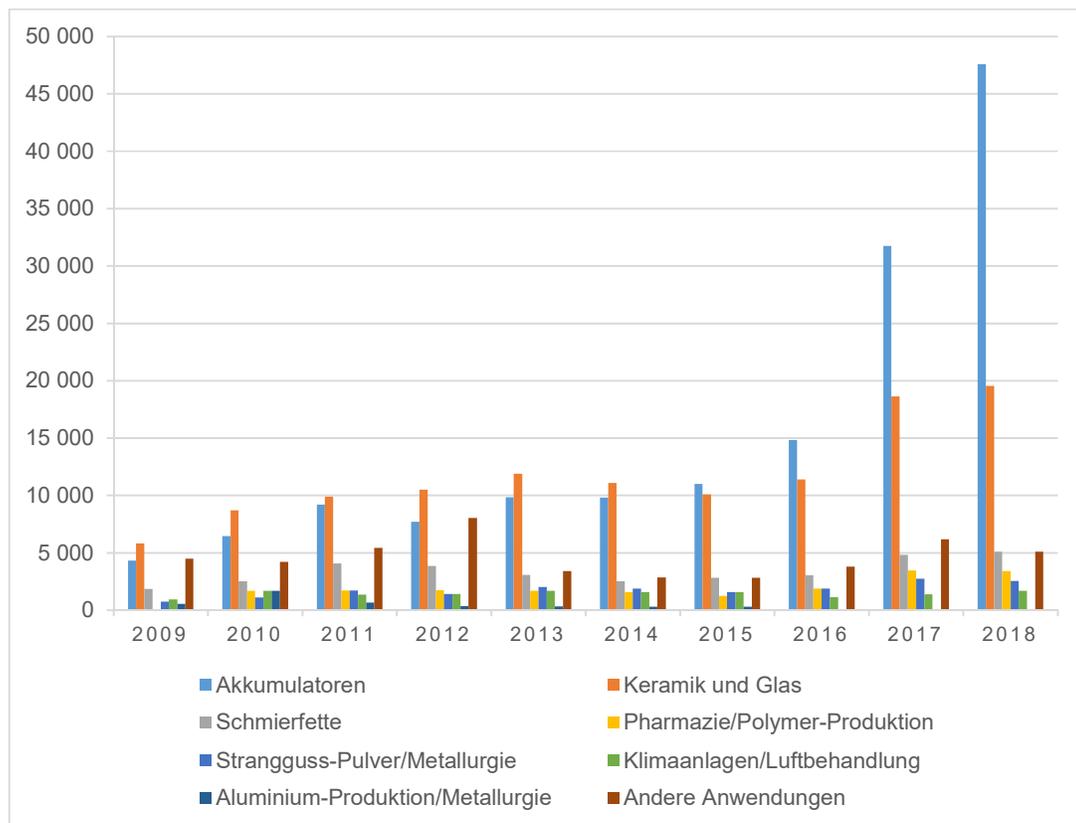


Abbildung 11: Absoluter Anteil des globalen Li-Bedarfs nach Anwendungsgebieten 2009-2018

Quellen: Jaskula 2010: 92; Jaskula 2011: 94; Jaskula 2012: 94; Jaskula 2013: 94; Jaskula 2014: 94; Jaskula 2015: 94; Jaskula 2016: 100; Jaskula 2017: 100; Jaskula 2018: 98; Jaskula 2019: 98; Darstellung: B.W.

Nachdem in den Kapiteln 4.1 bis 4.3 auf die Entwicklung der globalen Lithiumproduktion; der Preise und der Anteile diverser Anwendungsgebiete eingegangen wurde, geht es im folgenden Kapitel 5 an Entwicklung dreier Elektromobilitäts-Ausbauszenarien sowie an die Modellierung.

5) Modellierung der globalen Lithiumnachfrage bis 2050

Im folgenden Abschnitt erfolgt die Modellierung der globalen Nachfrage bis 2050 aufgrund von drei aus den bisherigen Ausführungen entworfenen Szenarien. Nach einer Gegenüberstellung der Ergebnisse mit jenen von Autorinnen, die ähnliche Fragestellungen bearbeitet haben, kann die erste Forschungsfrage nach einer möglichen Entwicklung des künftigen Lithiumbedarfs beantwortet werden.

5.1) Szenarien und Kennzahlen bisheriger Arbeiten

An dieser Stelle werden die bisherigen Ausführungen in Bezug zu bestehenden Szenarien aus der Literatur gesetzt, um so eigene Szenarien entwerfen zu können, auf deren Basis die potenzielle weltweite Lithiumnachfrage sowie die Aufteilung auf unterschiedliche Anwendungsfelder bis 2050 modelliert werden können. Wie bereits bemerkt werden dabei unterschiedliche Ausbaupfade und Verbreitungen von elektrisch betriebenen Fahrzeugen angedacht. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist nicht vorgesehen, mögliche Entwicklungen anderer Anwendungsfelder und ihre Wirkung auf die weltweite Nachfrage nach Lithium bis 2050 im Detail zu untersuchen, jedoch werden grobe Trends, wie beispielsweise ein Anstieg der absolut eingesetzten Lithiummenge, jedoch unter sinkenden relativen Anteile für alle Anwendungsbereiche außer Akkus, in die Modellierung mit einbezogen (siehe Tabellen 6 und 7, Abbildung 11).

Zu den von unterschiedlichen Autorinnen entworfenen Ausbaupfaden für Elektrofahrzeuge gehören unter anderem jene beiden von Angerer et al. (2009) vorgestellten:

- Im so genannten Dominanz-Szenario gehen die Autorinnen davon aus, dass bis 2050 der größte Teil von bisher mit konventionellen Verbrennungsmotoren betriebenen Fahrzeugen durch elektrisch betriebene- und Plug-In-Hybridautos ersetzt wird. Wichtige Rollen spielen dabei hohe Ölpreise und eine gesteigerte Wirtschaftlichkeit durch Vehicle-To-Grid-Anwendungen. Das Szenario zeigt für das Jahr 2050 Nachfragezahlen von etwa 590.000 t Lithium, wovon etwa ein Drittel durch rezyklierte Rohstoffe bereitgestellt wird. Die Basis dafür bilden die starken Anteile von elektrisch betriebenen und Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen am Markt, durch die umfassende Mengen an Recyclingmaterial zur Verfügung gestellt wird. Der größte Teil des produzierten Lithiums wird für Akkumulatoren von Fahrzeugen aufgewendet; gefolgt von Geräteakkus sowie Glas und Keramiken. Eine weitere wesentliche

Rolle spielt der Einsatz des Rohstoffes für dissipative und sonstige Anwendungen (vgl. Angerer et al. 2009: 26f.; 37ff.).

- Das Pluralismus-Szenario steht im Gegensatz dazu und nimmt an, dass Elektromobilität nur eine Möglichkeit für den individualisierten Personenverkehr ist, nur Hybridfahrzeuge gewinnen starke Anteile am Markt. Auch hier gilt die Prämisse hoher Ölpreise; Alternativen bilden Biokraftstoffe und gasbetriebene Autos. Modelliert wurde hierfür eine jährliche Lithiumnachfrage von rund 178.000 t, wovon etwa 28 %, also rund 50.500 t, aus Recycling stammen. Im Hinblick auf die lithiumbasierten Anwendungen nehmen erwartungsgemäß Akkumulatoren und Batterien für tragbare Anwendungen und Fahrzeuge den größten Anteil ein. Ebenfalls wichtig sind die Verwendung in Glas und Keramiken sowie in Schmierfetten. Durch die angenommene Nutzungsdauer für Fahrzeugakkus von rund 10 Jahren stehen diese Basismaterialien erst nach dieser Verzögerung zur Rohstoffaufbereitung und -wiedergewinnung zur Verfügung, was sich deutlich an der Recyclingkurve widerspiegelt (vgl. Angerer et al. 2009: 28f.; 34ff.).

Die International Energy Agency entwickelt im Rahmen ihrer Studie ‚Energy Technology Perspectives‘ aus dem Jahr 2010 ebenfalls zwei Szenarien, deren Grundannahmen in Bezug auf die Entwicklung der Elektromobilität stark voneinander abweichen:

- Das Baseline-Szenario einerseits geht davon aus, dass kaum neue Energie- und Klimapolitiken eingeführt werden. Im Hinblick auf den Transport werden Ölpreise von rund 120 USD/bbl für das Jahr 2050 angenommen; darüber hinaus ein hoher Urbanisierungsgrad in Entwicklungsländern und große Einkommensdisparitäten zwischen ihnen und den OECD-Ländern. Dies zieht geringere Fahrzeugzahlen in Entwicklungsländern nach sich. Die angenommenen Verkaufszahlen von Neufahrzeugen weisen hauptsächlich konventionelle Verbrennungsmotoren auf; einzig bei HEVs und bei gasbetriebenen KFZs werden leichte Anstiege verzeichnet. In absoluten Zahlen ausgedrückt, bedeutet dies einen Anstieg der Fahrzeuge von 750 Mio. im Jahr 2007 auf 2,2 Mrd. für 2050 (vgl. International Energy Agency 2010: 47, 263, 276, 281).
- Im Gegensatz dazu steht das Blue Map-Szenario: Seine zielorientierten Ansätze verfolgen bis 2050 die Halbierung der weltweiten CO₂-Emissionen, die auf die Ge-

nerierung von Energie zurückzuführen sind, Basisjahr ist 2005. In Bezug auf Transportbelange geht das Blue Map-Szenario davon aus, dass neue, kohlenstoffsparende Antriebstechnologien zum Einsatz kommen werden, namentlich HEVs, PHEVs, EVs und FCVs, die zudem auch energieeffizienter als die herkömmlichen Verbrennungsmotoren sind. Für 2050 prognostiziert das Szenario eine Gleichverteilung der Verkaufszahlen von FCVs, EVs und PHEVs. Die angenommenen absoluten Zahlen an Fahrzeugen belaufen sich für das Jahr 2050 auf 1,8 Mrd. KFZ (vgl. International Energy Agency 2010: 263, 282ff.).

Ein Update zu diesen Zahlen stellt der Global EV Outlook der International Energy Agency aus dem Jahr 2018 dar. Hier nennen die Autorinnen in Bezug auf die zum Publikationszeitpunkt in Elektrofahrzeugen verbauten Akkumulatoren Kapazitäten zwischen 20 und 100 kWh, je nach Fahrzeuggröße. Demnach seien die meistverkauften EVs in China mit Akkukapazitäten zwischen 18,3 und 23 kWh ausgestattet; für europäische und nordamerikanische Mittelklassewagen könne eine Spanne von 23 bis 60 kWh angegeben werden. Großfahrzeuge und SUVs hingegen benötigten Akkus mit Größen zwischen 75 und 100 kWh. Für das Jahr 2030 wird eine Reichweite von 350 bis 400 km bei 70 bis 80 kWh Akkukapazität in EVs angenommen, für PHEVs werden Kapazitäten von 15 kWh mit Reichweiten von 60 bis 70 km vorhergesagt. Im Hinblick auf die Lebensdauer geht man von acht bis zehn Jahren aus (vgl. International Energy Agency 2018: 62, 82 und 84). Auch in dieser Publikation erfolgt eine Modellierung aufgrund zweier unterschiedlicher Szenarien:

- Das New Policies Scenario berücksichtigt die aktuellen politischen Rahmenbedingungen und modelliert eine Zukunft, die diese nach sich ziehen würden. Es geht von 125 Millionen EVs im Jahr 2030 aus, das sind ca. 6 % der PKWs weltweit: mit einem Überhang von PHEVs im Vergleich zu BEVs (Verhältnis ca. zwei Drittel zu einem Drittel). Diese höhere Zahl an Elektrofahrzeugen werde auch Risiken für die Versorgung mit Cobalt und Lithium bergen. Konkret sei eine Verzehnfachung des weltweiten Cobaltbedarfes bis 2030 anzunehmen, ebenso wie eine Steigerung des Rohstoffpreises (vgl. International Energy Agency 2018: 11, 13, 75, 77, 78).
- Das Szenario EV30@30 hingegen zielt auf einen 30 %igen Marktanteil von EVs im Jahr 2030 in allen Mitgliedsländern der Electric Vehicles Initiative⁷ ab. Nach

⁷ Dies sind die Staaten China, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Indien, Japan, Kanada, Mexiko, Niederlande, Norwegen, Schweden, Großbritannien und die USA (vgl. International Energy Agency 2018: 15).

dessen Annahmen werden 2030 etwa 220 Millionen Elektrofahrzeuge, davon 130 Millionen EVs und 90 Millionen PHEVs, auf den globalen Straßen zu finden sein. Die nachgefragte Cobaltmenge werde sich global gesehen um das 25-fache erhöhen; auch hier sei von Preiserhöhungen auszugehen (vgl. International Energy Agency 2018: 11, 13, 15, 16, 75, 78).

Eine weitere wertvolle Grundlage für die Modellierung in der vorliegenden Arbeit stellt die Studie von Speirs et al. aus 2014 dar: Sie zeigen wichtige, hierfür erforderliche Kennzahlen auf.

Auf der Angebotsseite seien dies:

- Abschätzungen von Reserven und Ressourcen
- Prognostizierte Produktion
- Generierung von Sekundärrohstoffen durch Recycling (vgl. Speirs et al. 2014: 183)

Im Hinblick auf Nachfragekennzahlen besonders wichtig sind:

- Größe des Marktes
- durchschnittliche Akkumulatorenkapazität
- vorherrschende Materialintensität (vgl. Speirs et al. 2014: 183)

Da sich Forschungsfrage 1 eher mit den nachfrageseitigen Aspekten beschäftigt („Wie entwickelt sich der globale Lithiumbedarf bis 2050 auf Basis unterschiedlicher Elektromobilitäts-Ausbaupfade?“), seien an dieser Stelle auch die von den Autorinnen dementsprechend aufgezeigten Parameter genannt, welche für eine annähernde Berechnung der Nachfrage herangezogen werden können (vgl. Speirs et al. 2014: 184):

- Gewählter Zeithorizont
- Anzahl von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Zukunft
- Angenommene Größe des Akkumulators in den Fahrzeugen
- Anteil von Elektrofahrzeugen in der künftigen globalen Fahrzeugflotte bzw. Marktzusammensetzung
- Menge des eingesetzten Lithiums pro Einheit Akkukapazität

Über die oben genannten Szenarien hinaus seien hier einige weitere Zahlen aus aktuelleren Arbeiten angeführt, die dabei helfen sollen, valide Grundlagen für die Entwicklung von zwei Basisszenarien zu schaffen:

- Swain (2017: 388) geht davon aus, dass 2025 66 % des weltweiten Bedarfs für Lithium-Ionen-Speicher aufgewendet werden wird.
- Angerer et al. (2009: 38) nennen eine Bedarfsmenge von 3 kg Lithium/Fahrzeug mit 20 kWh, die im Jahr 2040 erreicht werden soll.
- Ein PHEV mit einer Akkukapazität von 10 kWh verfügt nach Dallinger et al. (2011: 12) über eine elektrische Reichweite von 50 km; für EVs mit 24 kWh wird eine Reichweite von unter 150 km angegeben.
- Herstellerinnen von EVs geben folgenden Akkukapazitäten und Reichweiten für ihre Autos an:
 - Renault Zoe: 41 kWh/300 km (vgl. Renault 2019: o.S.)
 - VW e-Golf: 35,8 kWh/200-231 km (vgl. Volkswagen 2018: 12)
 - Citroen C-Zéro: 16 kWh/100 km (vgl. Citroen 2019: o.S.)
 - Nissan Leaf: 40 kWh/350 km (vgl. Nissan 2019: o.S.)
- Für PHEVs wurden folgende aktuelle Hersteller-Kennzahlen ermittelt:
 - Kia Niro: 8,9 kWh/58 km (vgl. Kia 2018: 51)
 - Hyundai IONIQ: 8,9 kWh/63 km (vgl. Hyundai 2019: o.S.)
 - BMW 225xe iPerformance: 7,6 kWh/45 km (vgl. BMW 2019: o.S.)
- Eine Studie des Umweltbundesamtes aus dem Jahr 2014 zeigt folgende Bedarfswerte für Lithium in unterschiedlichen Elektrofahrzeugen auf: 20 kg Lithium für EVs mit 20-25 kWh; 12 kg für PHEVs mit 10 kWh; 2,5 kg Lithium für HEVs mit 2 kWh (vgl. Umweltbundesamt 2014: 118).
- Für PHEVs werden laut IFEU (2015: 74 und 125) etwa 7 kg Lithium pro Fahrzeug verwendet, für EVs sind es 12 kg (bei 13,5 bzw. 26,7 kWh Akkukapazität).

Die genannten Zahlen und Annahmen werden im Folgenden in der Tabelle 8 zusammengefasst; im Anschluss werden auf Basis der angeführten Arbeiten die für die Modellierung relevanten Zahlen abgeleitet und in die drei Szenarien Flat, Strong und Ambitious übergeführt.

Tabelle 8: Gegenüberstellung von Kennzahlen zu unterschiedlicher Elektromobilitäts-Ausbauszenarien für 2050

Datenart	Dateninhalt	Szenarien						
		Pluralismus (Angerer et al. 2009)	Dominanz (Angerer et al. 2009)	Baseline (IEA 2010)	BLUE Map (IEA 2010)	New Policies (IEA 2018)	EV30@30 (IEA 2018)	Andere*)
Marktgröße und -zusammensetzung	Anzahl Fahrzeuge 2050			2,2 Mrd. (Basisjahr 2007: 750 Mio.)	1,8 Mrd. (Basisjahr 2007: 750 Mio.)			
	Verhältnis Verbrennungs- vs. Elektrofahrzeuge	ca. 50/50	ca. 9/91	80/20	20/80	2020: 99/1 2030: 94/6 2050: 84/16 (berechnet)	2020: 99/1 2030: 88/12 2050: 66/34 (berechnet)	
	Anteile unterschiedlicher Antriebe	Konventionelle Verbrennungsmotoren: 50% HEV: 38 %	PHEV und BEV mit Aus-tauschakku: 74 %	Konventionelle Verbrennungsmotoren: 80 %	HEV, PHEV, EV und FCV: 80 %	2030: 125 Millionen Elektrofahrzeuge am Markt, davon 67% HEVs und PHEVs, 33 % BEVs	2030: 220 Millionen Elektrofahrzeuge am Markt, davon 40 % PHEVs und 60 % EVs (90 Mio. bzw. 130 Mio.)	
	Hauptanwendungsbereich Lithium 2050	Fahrzeugakkumulatoren	Fahrzeugakkumulatoren					Akkumulatoren
	Relativer Anteil Hauptanwendung am gesamten Lithiumverbrauch 2050	46 %	84 %					66 %
	Relativer Anteil von Sekundärrohstoffen an der Lithiumproduktion 2050	28 %	31 %					

Quellen: Angerer et al. 2009; International Energy Agency 2010; International Energy Agency 2018.

*) Quellen: Speirs et al. 2014; Swain 2017; Dallinger et al. 2011; Renault 2019; Volkswagen 2018; Citroen 2019; Nissan 2019; Kia 2018; Hyundai 2019; BMW 2019; Umweltbundesamt 2014; Öko-Institut 2017b; IFEU 2015; SignumBOX 2012, zit. n. BGS 2016.

Darstellung: B.W.

Fortsetzung Tabelle 8: Gegenüberstellung von Kennzahlen zu unterschiedlicher Elektromobilitäts-Ausbauszenarien für 2050

Datenart	Dateninhalt	Szenarien						
		Pluralismus (Angerer et al. 2009)	Dominanz (Angerer et al. 2009)	Baseline (IEA 2010)	BLUE Map (IEA 2010)	New Policies (IEA 2018)	EV30@30 (IEA 2018)	Andere*)
Kenndaten zu Fahrzeugen	<i>Lithiumbedarf pro Fahrzeug</i>	3 kg Lithium bei 20 kWh (150 g/kWh)	3 kg Lithium bei 20 kWh (150 g/kWh)					EVs: 20 kg - 20- 25 kWh; 12 kg – 26,7 kWh PHEVs: 12 kg - 10 kWh; 7 kg – 13,5 kWh HEVs: 2,5 kg - 2 kWh
	<i>Energiegehalt des Akkus und Reichweite pro Fahrzeug</i>					2030: EV: 350-400 km bei 70-80 kWh PHEV: 60-70 km elektrisch bei 15 kWh	2030: EV: 350-400 km bei 70-80 kWh PHEV: 60-70 km elektrisch bei 15 kWh	EV: 150 km (24 kWh); 300 km (41 kWh); 200- 231 km (35,8 kWh), 100 km (16 kWh); 350 km (40 kWh) PHEV: 50 km (10 kWh); 58 bzw. 63km (8,9 kWh); 45 km (7,6 kWh)
	<i>Lebensdauer Akku</i>	10 Jahre					2030: 8-10 Jahre	2030: 8-10 Jahre

Quellen: Angerer et al. 2009; International Energy Agency 2010; International Energy Agency 2018.

*) Quellen: Speirs et al. 2014; Swain 2017; Dallinger et al. 2011; Renault 2019; Volkswagen 2018; Citroen 2019; Nissan 2019; Kia 2018; Hyundai 2019; BMW 2019; Umweltbundesamt 2014; Öko-Institut 2017b; IFEU 2015; SignumBOX 2012, zit. n. British Geological Survey 2016.

Darstellung: B.W.

Auf der Grundlage der Daten aus Tabelle 8 und in Anlehnung an die Ausführungen von Speirs et al. (2014: 183f.) seien im Folgenden die wichtigsten Parameter für drei im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Szenarien abgeleitet. Aus diesen sollen die potenzielle Lithiumnachfrage bis 2050 modelliert werden. Es seien dies folgende Eckdaten, die für das Basisjahr und im Anschluss als Zielzahlen 2050 für das jeweilige Szenario definiert werden:

- Anzahl der Fahrzeuge weltweit
- relativer Anteil der elektrisch betriebenen Fahrzeuge
- Verhältnis von HEV/PHEV zu EV
- Lithiumbedarf pro kWh Akkukapazität jeweils für HEV, PHEV, EV
- Durchschnittliche Größe des Akkus je HEV, PHEV oder EV
- Anteil des Anwendungsfeldes Akkumulatoren (alle), bzw. des Anwendungsfeldes Fahrzeugakkumulatoren am weltweiten Lithiumbedarf
- Lebensdauer des Akkus
- Recyclingrate für Lithium aus Fahrzeug-Akkumulatoren.

5.2) Generelle Annahmen

Nachfolgend einige generelle Überlegungen, die allen drei entwickelten Szenarien Flat, Strong und Ambitious zugrunde liegen:

- Die Anzahl an Elektrofahrzeugen betrug 2018 5,12 Mio. (vgl. International Energy Agency 2019: 32f.); gemessen an etwa 1,131 Mrd. PKWs weltweit⁸ (ohne Nutzfahrzeuge, Stand 2018, vgl. Fachverband der Fahrzeugindustrie Österreichs 2019: o.S., zit. n. VDA 2019), was einen relativen Anteil von weniger als 0,46 % darstellt⁹. Aus diesem Grund wird der aktuelle Bestand an Elektroautos nicht in die Modellierung einbezogen und diese beginnt praktisch bei einem Stand von 0.
- Der Modellierungszeitraum reicht vom Jahr 2021 bis 2050 und umfasst somit 30 Jahre. Es wird ein linearer Zuwachs an Elektroautos pro Jahr angenommen, was eine konstante Erhöhung bis zur Erreichung der jeweiligen Zielzahl in 2050 bedeutet.
- Je nach Quelle wurden für unterschiedliche Elektrofahrzeuge (HEV/PHEV/EV) große Spannen in Bezug auf die verwendete Menge an Lithium pro PKW angegeben. In einem ersten Schritt wurden auf Basis der Daten aus Tabelle 8 für das Basisjahr 2021

⁸ An dieser Stelle sei nochmals betont, dass die Art von Fahrzeugen, die in der vorliegenden Arbeit untersucht werden, ausschließlich PKWs, jedoch keine Nutzfahrzeuge umfasst.

⁹ Die International Energy Agency (2019: 32f.) berücksichtigt in ihren Angaben nur EVs und PHEVs, jedoch keine HEVs. Ginge man davon aus, dass global zumindest gleich viele HEVs wie PHEVs am Markt wären, würden sich die Zahlen auf 6,94 Mio., bzw. 0,61 % elektrisch betriebene PKWs an der weltweiten Fahrzeugflotte erhöhen. Auch diese Zahl wäre für die Modellierung zu vernachlässigen. An weiteren Stellen dieser Arbeit wurden PHEVs und HEVs in einer Gruppe zusammengefasst und von gleichen Anteilen innerhalb dieser Gruppe ausgegangen.

durchschnittliche Bedarfsmengen pro kWh Akkukapazität festgelegt. Sie gestalten sich wie folgt¹⁰:

- EV – 0,725 kg/kWh
- PHEV – 0,809 kg/kWh
- HEV – 1,250 kg/kWh

Daraus ergeben sich für das Basisjahr 2021 folgende Bedarfsmengen pro PKW¹¹:

- EV – 20,71 kg/Fahrzeug (28,56 kWh, Reichweite ca. 223 km)
- PHEV – 7,94 kg/Fahrzeug (9,82 kWh, Reichweite ca. 54 km)
- HEV – 2,50 kg/Fahrzeug (2 kWh)

Natürlich stellt sich die Frage, inwieweit diese Zahlen von 2021 bis zum Modellierungsjahr 2050 aufgrund eines verbesserten Materialeinsatzes adaptiert werden müssen.

Hierzu gibt es zwei unterschiedliche Ansätze:

- Eine Studie des Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung zeigt auf, dass die Rohstoffintensität durch den Einsatz weniger reiner Grundmaterialien gesenkt werden könnte. Diese verringerten Reinheiten hätten jedoch negative Einflüsse auf Lebensdauer und Energiedichte (vgl. Thielmann/Sauer/Wietschel 2015: 34).
- Dem entgegen steht die Annahme von Angerer et al. (2009: 38), wonach sich die Bedarfsmenge für PHEV und EV bis zum Jahr 2040 auf 0,15 kg Lithium/kWh Akkukapazität verringert.
- Von den oben ermittelten Bedarfswerten ausgehend, erscheint diese Reduktion sehr umfassend. Sie wird dementsprechend für das Strong-Szenario übernommen und für Flat und Ambitious angepasst – die reduzierte Menge wird in Flat erst 2050 erreicht; in Ambitious bereits 2030.
- Weiters ist auch fraglich, inwieweit sich die durchschnittlichen Akkukapazitäten pro Fahrzeugtyp verändern werden. Die International Energy Agency (2018: 82) geht für 2030 im Schnitt von 75 kWh Kapazität bei EVs und von 15 kWh bei PHEVs aus. Diese Werte wurden als Zielwerte für 2050 (Flat); 2040 (Strong) und 2030 (Ambitious) in die Modellierung übernommen und stabilisieren sich ab dem fraglichen Jahr auf diesem Niveau. In Bezug auf HEVs geht die Autorin von einer weiterhin bestehenden Akkukapazität von 2 kWh aus. Die Überlegung an dieser Stelle war, dass in Flat die Elektromobilität nur eine kleine Ergänzung zu fossil betriebenen PKWs bleibt, vor allem im Stadtverkehr, und dass die Kapazitäten daher erst langsam gesteigert werden. In

¹⁰ Durch die große Bandbreite der in unterschiedlichen Quellen angegebenen Bedarfsmengen von Lithium pro Fahrzeugtyp ist es schwierig, durchschnittlich eingesetzte Mengen pro kWh Akkukapazität für die Modellierung festzulegen. Aus diesem Grund stellen die angegebenen Zahlen jeweils die Mittelwerte der in den vorliegenden Quellen genannten Bedarfsmengen dar.

¹¹ Auch hier wurden pro Fahrzeugtyp die Mittelwerte für Akkukapazität und Reichweite der aus der Literatur vorliegenden Zahlen errechnet.

Strong gibt es eine stärkere Verbreitung von elektrisch betriebenen Fahrzeugen und damit auch eine schnellere Erweiterung der Kapazitäten. Am umfassendsten erfolgt die Kapazitätssteigerung im Ambitious-Szenario, wo es schon 2030 zur Erreichung der Zielwerte kommt. Dies beruht auf starken urbanen Verkehrsinfrastrukturen. Im ländlichen Gebiet wird zwar auf elektrisch betriebene Fahrzeuge zurückgegriffen, jedoch müssen größere Distanzen überbrückt werden, weshalb sich auch größere Kapazitäten und höhere Reichweiten ergeben.

- In Hinblick auf das Verhältnis von HEVs und PHEVs zu EVs werden für die Modellierung zwei Gruppen gebildet: HEVs/PHEVs und EVs. Das Verhältnis von HEVs zu PHEVs innerhalb der Gruppe beträgt 50:50.
- In Bezug auf die Lebensdauer der Akkus wird angenommen, dass sich diese in Anlehnung an die Zahlen aus Tabelle 8 bis 2050 auf durchschnittlich zehn Jahre einpendeln wird. Prinzipiell wäre es möglich, das Fahrzeug weiter zu verwenden und nur den auszumusternden Energiespeicher zu tauschen, was für die vorliegende Modellierung jedoch nicht unbedingt von Bedeutung ist. Wichtig ist, dass die Akkus aus dem Modellierungsjahr 1 im Modellierungsjahr 11 getauscht werden und dies einen zusätzlichen Bedarf zu den Speichern für die neu produzierten Fahrzeuge des fraglichen Jahres verursacht. Dies setzt sich ab dem Modellierungsjahr 11 so fort. Diese Tauschzyklen müssen in die Ermittlung des Lithiumbedarfes mit einbezogen werden.
- Gleichzeitig wird die Prämisse festgelegt, dass die Akkus am Ende der zehn Jahre keiner Nachnutzung in stationären Anwendungen unterzogen werden und daher sofort für die Lithiumwiedergewinnung zur Verfügung stehen.
- Derzeit findet praktisch kein Recycling von Lithium aus Akkumulatoren statt (vgl. Swain 2017: 388). Die vorliegende Arbeit nimmt an, dass sich dies künftig ändern wird, wenn auch für die entworfenen Szenarien Recyclingraten unterschiedlicher Ausmaße im Anwendungsfeld Lithium-Ionen-Akkumulatoren angenommen wurden. Hier wird ein linearer Anstieg der Recyclingraten, von Null in 2020 ausgehend bis zur Zielquote im Jahr 2050, angenommen. Zu berücksichtigen ist, dass aufgrund der Lebensdauer der Akkus Material für die Wiedergewinnung von Lithium erst ab dem ersten Tauschzyklus im Modellierungsjahr 11, also 2031, zur Verfügung stehen. Bis dahin muss der Bedarf aus Primärabbau gedeckt werden.

In Anlehnung an und auf der Grundlage der vorhergehend beschriebenen Szenarien und Basisüberlegungen werden nun die drei eigenen Szenarien Flat, Strong und Ambitious entworfen. Die Nachfrage wird im Anschluss auf Basis der Zielzahlen für 2050 modelliert.

5.3) Flat-Szenario

Das Flat-Szenario geht für das Jahr 2050 von einem nach wie vor starken Vorhandensein des motorisierten Individualverkehrs mit hohen Zahlen von Fahrzeugen in privatem Besitz sowie von einem eher zögerlichen Umstieg von konventionellen Verbrennungsmotoren auf elektrisch angetriebene Fahrzeuge aus. Gründe dafür sind einerseits fehlende politische Anreize und Vorgaben sowie das Festhalten der Automobilindustrie an bewährten Antriebskonzepten; andererseits auch mangelnde Veränderungsbereitschaft der Konsumenten. Im Detail nimmt das Szenario zwar hohe Ölpreise an, gleichzeitig fehlen jedoch Politiken, die die Abkehr von Fahrzeugen mit Antrieben auf Basis fossiler Energieträger anreizen, wie beispielsweise entsprechende Besteuerungen von kohlenstoffintensiven Transportmitteln. Damit verbunden ist auch der nur langsam voranschreitende Paradigmenwechsel in der Automobilbranche, der zur Folge hat, dass noch immer große Teile der angebotenen Modelle mit konventionellen Kraftstoffen angetrieben werden.

Die für das Flat-Szenario angenommenen Kennzahlen für 2050 gestalten sich wie folgt: Die Anzahl von PKWs weltweit beträgt 2,5 Mrd. (vgl. Schätzung United Nations Environment Programme o.J.: o.S.); davon seien 28,7 % elektrisch betrieben¹². In Anlehnung an das New Policies-Szenario wird davon ausgegangen, dass 2050 etwa 67 % der Elektrofahrzeuge PHEVs und HEVs sind, die restlichen 33 % belaufen sich auf reine EVs (vgl. International Energy Agency 2018: 78). Der relative Anteil von Fahrzeugspeichern am globalen Lithiumbedarf umfasst 47 %; für alle Speicheranwendungen beträgt die relative Nachfrage 73,6 %¹³. In Bezug auf die Lithiumwiedergewinnung wird eine Recyclingrate von 28 % herangezogen (vgl. Angerer et al. 2009: 34ff.). Für die eingesetzte Materialmenge wurden bereits in Abschnitt 5.2 auf Basis der Tabelle 8 die folgenden Startwerte für 2021 festgelegt: EV – 20,71 kg/Fahrzeug, PHEV – 7,94 kg/Fahrzeug, HEV – 2,5 kg/Fahrzeug. Sie reduzieren sich bis 2050 linear auf 11,25; 2,25 bzw. 0,3 kg/Fahrzeug (EV vs. PHEV vs. HEV).

Die dem Flat-Szenario zugrunde gelegten Kennzahlen finden sich zusammengefasst in Tabelle 9.

¹² Dies stellt den Mittelwert der drei gemäßigten Szenarien Pluralismus (Angerer et al. 2009), Baseline (IEA 2010) und New Policies (IEA 2018) dar.

¹³ Die beiden Werte von 47 und 73,6 % wurden aus der Abbildung „Verbrauchsmengen der einzelnen Verwendungsarten [in t Li] – Pluralismus“ (Angerer et al. 2009: 36) errechnet.

5.4) Strong-Szenario

Im Gegensatz zum Flat-Szenario nimmt das Strong-Szenario für 2050 eine deutlich geringere individuelle Motorisierung und einen höheren Anteil an Elektrofahrzeugen an. Dies könnte auf hohe Ölpreise sowie auf starke politische Interventionen zurückgeführt werden, die hohe Besteuerungen von kohlenstoffintensiven Fahrzeugen sowie zahlreiche Investitionen in Ladeinfrastruktur, Bewusstseinsbildung und Forschung im Bereich von effizientem Rohstoffeinsatz in Akkumulatoren und bei Recyclingtechnologien umfassen könnten. Der boomende Markt für Elektrofahrzeuge sowie politische Interventionen führen unter diesen Annahmen zu einer Verstärkung der Forschung in Bereich der Speichertechnologien für Elektroautos, was in einer umfassenden Senkung der Materialintensität und erhöhter Effizienz resultiert.

Im Strong-Szenario wird die Zahl der PKWs weltweit mit 1,7 Mrd.¹⁴ angenommen, wovon 68,3 %¹⁵ elektrisch betrieben werden. Auf Basis des EV30@30-Szenarios wird für die Verteilung innerhalb der Elektroautos das Verhältnis von 40 % PHEVs und HEVs zu 60 % reinen EVs festgelegt (vgl. International Energy Agency 2018: 78). Der globale Lithiumbedarf stammt größtenteils aus der hohen Nachfrage für Speichertechnologien, die mit der Adaption des Dominanz-Szenarios auf 92,2 % festgelegt wird; insgesamt werden 84 %¹⁶ des weltweit produzierten Lithiums 2050 für Fahrzeugakkumulatoren verwendet. Demnach beläuft sich die weltweite Recyclingrate für Lithium auf 31 % (vgl. Angerer et al. 2009: 37ff.). Die Basiszahlen für 2021 in Bezug auf den Lithiumbedarf pro Fahrzeug (EV – 20,71 kg/Fahrzeug, PHEV – 7,94 kg/Fahrzeug, HEV – 2,5 kg/Fahrzeug) sinken bis 2040 auf die Werte von 11,25; 2,25 bzw. 0,3 kg/Fahrzeug (EV/PHEV/HEV) und stabilisieren sich dann auf diesem Niveau (siehe Tabelle 9).

Auch hier sind die für die Modellierung relevanten Kennzahlen in Tabelle 9 aufgeführt.

5.5) Ambitious-Szenario

Das Ambitious-Szenario dient als ‚Gedankenexperiment‘ und geht von einer, im Vergleich zu Strong, nochmals stärkeren Reduktion der globalen PKW-Flotte, einem höheren Elektrifizierungsgrad und mehr rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen aus. Der Lithiumbedarf pro PKW

¹⁴ Die IEA geht davon aus, dass durch den Einfluss entsprechender politischer Maßnahmen die Anzahl an PKWs 2030 um 12 % unter dem Level ohne einer solchen Politik liegen würde (New Policies Scenario vs. EV30@30 Scenario; vgl. International Energy Agency 2018: 78). Nimmt man eine weitere lineare Abnahme bis 2050 an, ist die Zahl der PKWs im Strong-Szenario mit 32 % geringer anzusetzen als im Flat-Szenario (Basisjahr 2018, 1% Abnahme des PK-Bestandes pro Jahr, entsprechend der Publikation).

¹⁵ Dieser Elektrifizierungsgrad der globalen Autoflotte errechnet sich als Mittelwert aus den Szenarien Dominanz (Angerer et al. 2009), BLUE Map (IEA 2010) und EV30@30 (IEA 2018).

¹⁶ Die Werte von 92,2 und 84 % wurden aus der Abbildung „Verbrauchsmengen der einzelnen Verwendungsarten [in t Li] – Dominanz“ (Angerer et al. 2009: 39) errechnet.

sinkt bereits früher auf ein geringes Niveau, wobei aber die Akkukapazitäten pro PKW schneller ansteigen als in den vorhergehenden Szenarien. Dies ist einer dichten Struktur des öffentlichen Verkehrs in den Ballungsräumen geschuldet, wodurch weniger Autos in den Städten vorzufinden sind. In peripheren Lagen sind die höheren Kapazitäten erforderlich, um die entsprechend größeren Distanzen überbrücken zu können. Infolgedessen reduziert sich der Anteil von Fahrzeugspeichern am weltweiten Lithiumbedarf, ebenso wie der gesamte Anteil von Speichertechnologien, hier im Vergleich zu Strong wieder auf das Level des Flat-Szenarios. Der tiefgreifende Bewusstseinswandel, der Ambitious zugrunde liegt, umfasst sowohl das Nutzerinnenverhalten als auch die Schaffung entsprechender politischer Rahmenbedingungen, was sich beispielsweise in dem gut ausgebauten öffentlichen Verkehrsnetz, dem hohen Urbanisierungsgrad sowie in einer rigorosen Gesetzgebung zeigt.

Entsprechend wird die Anzahl der Autos 2050 mit 1,156 Mrd.¹⁷ PKWs festgesetzt, davon greifen 88,1 % auf elektrische Antriebsarten zurück¹⁸. Das Verhältnis von EVs zu PHEVs und HEVs beträgt 87 % zu 13 %¹⁹. Wie in den bisherigen Szenarien gelten auch hier für das Modellierungsjahr 1 in 2021 Bedarfszahlen von 20,71 kg/EV, 7,94 kg/PHEV und 2,5 kg/HEV. Die Ziel-Bedarfswerte von 11,25 kg/EV, 2,25 kg/PHEV bzw. 0,3 kg/HEV werden bereits im Jahr 2030 erreicht, wo sie sich stabilisieren. Wegen der geringeren absoluten Anzahl an Autos und der höheren Rohstoffeffizienz sinkt der Anteil der Nachfrage aus Fahrzeugspeichern am weltweiten Bedarf auf das Niveau des Flat-Szenarios und ergibt somit 47 %; für alle Speicheranwendungen sind es 73,6 %²⁰, ebenfalls wie im Flat-Szenario. Der Recyclinganteil steigt wie im Verhältnis von Flat zu Strong um 3 % auf 34 %.

Im folgenden Abschnitt 5.6 geht es nun an die Zusammenfassung der Kennzahlen der drei entworfenen Szenarien.

5.6) Kennzahlen für die Modellierung

Tabelle 9 stellt die Kennzahlen für alle drei Szenarien nochmals gegenüber.

¹⁷ Eine nochmalige Verringerung der Autozahl aus dem Strong-Szenario um 32 %; entsprechend der Senkung von Flat auf Strong (vgl. International Energy Agency 2018: 78; Fußnote 14).

¹⁸ Die Höhe des Elektroanteils an der globalen Fahrzeugflotte betrug für Flat 28,7 %; für Strong waren es 68,3 %. Für Ambitious wird die letztere Zahl nochmals um die Hälfte dieser Differenz erhöht.

¹⁹ Die Differenz des EV-Anteils zwischen Flat und Strong beträgt 27 %. Die Zahl für Ambitious addiert diese 27 % zu den 60 % aus dem Strong-Szenario.

²⁰ Die beiden Werte von 47 und 73,6 % wurden aus der Abbildung „Verbrauchsmengen der einzelnen Verwendungsarten [in t Li] – Pluralismus“ (Angerer et al. 2009: 36) errechnet.

Tabelle 9: Festgelegte Kennzahlen zu Flat-, Strong- und Ambitious-Szenario

Datenart	Dateninhalt	Ausgangslage	Szenarien		
		Status quo 2021	Flat 2050	Strong 2050	Ambitious 2050
Marktgröße und -zusammensetzung	Anzahl der PKWs weltweit	1,259 Mrd. ²¹	2,5 Mrd.	1,7 Mrd.	1,156 Mrd.
	Davon elektrisch betrieben (HEV/PHEV/EV)	0 %	28,7 %	68,3 %	88,1 %
	Verteilung HEV/PHEV/EV	/	33 % EV 67 % PHEV/HEV	60 % EV 40 % PHEV/HEV	87 % EV 13 % PHEV/HEV
Kenndaten zu Fahrzeugen	Lithiumbedarf pro PKW jeweils für HEV/PHEV/EV	Basiswerte 2021: EV: 0,725 kg/kWh PHEV: 0,809 kg/kWh HEV: 1,250 kg/kWh	Zielwerte 2050: Lineare Abnahme auf 0,15 kg/kWh für alle Fahrzeugtypen bis zum Zielwert-Jahr; danach Stabilisierung.	Zielwerte 2040:	Zielwerte 2030:
		Bedarf pro PKW 2021: EV: 20,71 kg/Fahrzeug (28,56 kWh, Reichweite ca. 223 km) PHEV: 7,94 kg/Fahrzeug (9,82 kWh, Reichweite ca. 54 km) HEV: 2,5 kg/Fahrzeug (2 kWh)	Zielbedarf 2050: EV: 11,25 kg/Fahrzeug (75 kWh, Reichweite ca. 585 km ²²) PHEV: 2,25 kg/Fahrzeug (15 kWh, Reichweite ca. 82 km) HEV: 0,3 kg/Fahrzeug (2 kWh)	Zielbedarf 2040:	Zielbedarf 2030:
Generelle Kennzahlen	Anteil Fahrzeug-Akkumulatoren am globalen Lithiumbedarf	39,4 % ²³	47 %	84 %	47 %
	Anteil aller Akkumulatoren am globalen Lithiumbedarf	57,1 % ²⁴	73,6 %	92,2 %	73,6 %
	Recyclingrate für Fahrzeug-speicher	0 %	28 %	31 %	34 %

Quelle: Daten aus Tabelle 8, Ableitung geeigneter Szenarien und Darstellung: B.W.

²¹ Errechneter Wert auf Basis folgender Kennzahlen: 1,131 Mrd. PKWs weltweit ohne Nutzfahrzeuge im Jahr 2018 (vgl. Fachverband der Fahrzeugindustrie Österreichs 2019: o.S., zit. n. VDA 2019); 2,5 Mrd. PKWs im Jahr 2050 (vgl. Schätzung United Nations Environment Programme o.J.: o.S.). Annahme eines linearen Zuwachses.

²² In der Publikation der International Energy Agency (2018: 82) ergeben die Kapazität von 75 kWh bei EVs und von 15 kWh bei PHEVs Reichweiten von 350 bis 400 km, bzw. von 60 bis 70 km. Das wäre eine im Vergleich zu heutigen Elektrofahrzeugen eine höhere Materialintensität, weshalb die Reichweiten mit den Materialintensitäten aus 2021 hochgerechnet wurden.

²³ Von 2017 auf 2018 erhöhte sich die globale Anzahl an EVs um 1,19 Mio., jene der PHEVs um 0,81 Mio. (vgl. International Energy Agency 2018: 19; International Energy Agency 2019: 32f.). Geht man davon aus, dass entsprechend der Gleichverteilung von PHEVs und HEVs, die für die gesamte Arbeit angenommen wird, ebenfalls 0,81 Mio. HEVs neu in die weltweite PKW-Flotte eingetreten sind, ergäbe dies auf Basis der ermittelten Bedarfszahlen für die unterschiedlichen Fahrzeugtypen einen Jahresbedarf von 33.100 t Lithium für Fahrzeug-Akkus im Jahr 2018, das wären 38,9 % der lt. Jaskula (2019: 99) gewonnenen 85.000 t Lithium. Nimmt man einen linearen Anstieg bis zur Zielzahl in 2050 im Flat-Szenario an, ergibt sich für 2021 ein prozentueller Anteil am gesamten globalen Lithiumbedarf von 39,4 %.

²⁴ Errechnet auf Basis der Angabe von 56 % für das Jahr 2018 (vgl. Jaskula 2019: 98), Annahme des linearen Anstieges bis 2050 im Flat-Szenario.

Auf Basis dieser Kennzahlen wurden die im folgenden Abschnitt dargestellten Ergebnisse errechnet.

5.7) Ergebnisse der Modellierung

Tabelle 10: Ergebnisse der Modellierung im Flat-, Strong- und Ambitious-Szenario

	Flat	Strong	Ambitious
Absolute Zahl der E-Fahrzeuge 2050	717,5 Mio.	1,1611 Mrd.	1,018 Mrd.
Davon EV bzw. PHEV/HEV	236,78 Mio. EV; 480,72 Mio. PHEV/HEV	696,66 Mio. EV; 464,44 Mio. PHEV/HEV	886,94 Mio. EV; 131,06 Mio. PHEV/HEV
Kumulierter E-Fahrzeugbedarf 2021-2050	1,4350 Mrd.	2,3222 Mrd.	2,036 Mrd.
Globaler Lithiumbedarf kumuliert bis 2050 für Fahrzeugspeicher	9,74 Mio. t	20,33 Mio. t	21,75 Mio. t
Globaler Lithiumbedarf kumuliert bis 2050 für alle Speichertechnologien	14,77 Mio. t	24,68 Mio. t	33,06 Mio. t
Globaler Lithiumbedarf kumuliert bis 2050 für alle Anwendungsfelder	22,40 Mio. t	33,27 Mio. t	49,79 Mio. t
Lithiummenge aus Fahrzeug-Akku-Recycling kumuliert bis 2050	1,16 Mio. t	1,68 Mio. t	1,80 Mio. t

Quelle: Daten aus Tabelle 9, Modellierung und Berechnung: B.W.

Hier seien folgende ergänzenden Anmerkungen angefügt:

Absolute Zahl der E-Fahrzeuge 2050: Bezieht sich auf den prozentuellen Anteil der Elektroautos an der errechneten absoluten globalen Zahl der PKWs für das Jahr 2050.

Davon EV bzw. PHEV/HEV: Aufteilung nach den jeweilig festgelegten relativen Anteilen in die Gruppen. Das Verhältnis von PHEV zu HEV wurde wie bereits erwähnt mit 50:50 festgelegt.

Kumulierter E-Fahrzeugbedarf 2021-2050: Summe aus dem jährlichen Zuwachs an E-PKWs und dem Bedarf, der durch die E-Fahrzeuge entsteht, die am Ende ihrer Lebensdauer angelangt sind und getauscht werden.

Globaler Lithiumbedarf kumuliert bis 2050 für Fahrzeugspeicher: Jeweiliger Bedarf für die kumulierte Anzahl an EV/PHEV/HEV unter Berücksichtigung der festgelegten jährlichen Effizienzsteigerungen im Materialeinsatz²⁵.

Globaler Lithiumbedarf kumuliert bis 2050 für alle Speichertechnologien: Jeweiliger kumulierter Bedarf für Fahrzeugspeicher plus für alle anderen Speichertechnologien (z.B. stationäre und Speicher für tragbare Anwendungen); unter Berücksichtigung der Entwicklung der relativen Anteile im Modellierungszeitraum.

²⁵ Jeweils linear sinkender Materialeinsatz bis zur Erreichung der Zielzahlen: In Flat im Jahr 2050, in Strong im Jahr 2040, in Ambitious 2030. Nach Erreichung der Zielzahlen bleibt der Materialeinsatz stabil.

Globaler Lithiumbedarf kumuliert bis 2050 für alle Anwendungsfelder: Menge an Lithium, die im jeweiligen Szenario kumuliert bis 2050 weltweit nachgefragt wird.

Lithiummenge aus Fahrzeug-Akku-Recycling kumuliert bis 2050: Gesamte Menge an Lithium, die bis 2050 kumuliert durch Sekundärgewinnung aus EoL-Fahrzeugspeichern bereitgestellt werden kann, in Abhängigkeit der je nach Szenario festgelegten Recyclingraten.

5.8) Vergleich der Ergebnisse der Szenarien untereinander

Ein Vergleich der drei Szenarien untereinander stellt sich wie folgt dar:

- Die Anzahl der elektrisch betriebenen Fahrzeuge, die 2050 nach den Ergebnissen der Modellierung vorhanden sein, liegt im Flat-Szenario bei 717,5 Mio.; ist aber in Strong und Ambitious deutlich höher (1,16 respektive 1,02 Mrd. Fahrzeuge; also rund 62 bzw. 42 % höher). Dies ist auf den hohen Grad der Motorisierung in Flat mit jedoch geringen Anteilen an E-Fahrzeugen zurückzuführen, während für Strong und Ambitious kleinere weltweite Fahrzeugflotten angenommen wurden, die allerdings hoch elektrifiziert sind. Interessant erscheint das Verhältnis der absoluten Autozahlen zwischen Flat und Ambitious: Obwohl in Flat 2050 mehr als doppelt so viele Fahrzeuge auf der Straße sind (2,5 Mrd. vs. 1,16 Mrd.), gibt es in Ambitious 300 Mio. mehr Elektroautos.
- Die errechneten absoluten Zahlen von reinen EVs liegen in Flat bei 237 Mio. und steigen im Strong-Szenario trotz verringerter globaler Gesamtflotte mit 697 Mio. beinahe auf die dreifache Menge an. In Ambitious erhöht sich die Anzahl weiter und erreicht mit 887 Mio. E-Autos beinahe die Summe aus Flat plus Strong, bzw. die fast vierfache Menge aus Flat. In Bezug auf HEVs und PHEVs sticht heraus, dass von dieser Antriebsart im Flat- und Strong-Szenario ähnlich viele Fahrzeuge zu finden sind (481 vs. 464 Mio.); während in Ambitious nur 27 bzw. 28 % davon, nämlich 131 Mio. HEVs/PHEVs, auf den Straßen verkehren.
- Die durch die Tauschzyklen bedingte kumulierte Anzahl aller E-Fahrzeuge, die für die Erreichung der Zielzahl 2050 über den Modellierungszeitraum hinweg produziert werden müssen, beläuft sich im Szenario Flat auf etwa 1,44 Mrd. und liegt in Strong und Ambitious mit 2,32 Mrd. bzw. mit 2,04 Mrd. in weit höheren Bereichen, also rund 62 bzw. 42 % darüber. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass in den beiden letztgenannten Szenarien relativ gesehen viel mehr E-Autos auf der Straße sind, obwohl die globale Fahrzeugflotte zurückgeht.
- Der gesamte weltweite Bedarf an Lithium, das nur für die Bereitstellung von Akkumulatoren für elektrisch betriebene Fahrzeuge vonnöten ist, beläuft sich in Flat auf etwa 9,74 Mio. t. Der Wert für das Strong-Szenario liegt mit 20,33 Mio. t mehr als doppelt so

hoch, steigt in Ambitious jedoch nur noch um knapp 7 % auf 21,75 Mio. t an. Damit beträgt das Verhältnis dieser drei Werte zueinander 1 : 2,08 : 2,23.

- Daraus abgeleitet errechnen sich die globalen kumulierten Bedarfswerte für alle Speichertechnologien bis zum Jahr 2050 und können für Flat mit 14,77 Mio. t, für Strong mit 24,68 Mio. t und für Ambitious mit 33,06 Mio. t beziffert werden. Dies entspricht einem Verhältnis von 1 : 1,67 : 2,24.
- Für den Lithiumbedarf weltweit für alle Anwendungsfelder wurden dementsprechend Werte von 22,4 Mio. t (Flat); 33,27 Mio. t (Strong) bzw. 49,79 Mio. t (Ambitious) errechnet. Diese Bedarfswerte stehen in einem Verhältnis von 1 : 1,48 : 2,22.
- Dies entspricht folgenden Verhältnismäßigkeiten des weltweiten Lithiumbedarfs bis 2050 (Fahrzeugspeicher : alle Speicher : alle Anwendungen):
 - Flat: 1 : 1,52 : 2,30
 - Strong: 1 : 1,21 : 1,64
 - Ambitious: 1 : 1,52 : 2,29
- Unter Berücksichtigung der angenommenen Recyclingraten von Lithium-Ionen-Akkumulatoren ergibt dies bis 2050 weltweit eine kumulierte Bereitstellung von 1,16; 1,68 bzw. 1,8 Mio. t Lithium aus sekundären Quellen, namentlich EoL-Fahrzeugspeichern. Dies sind in Strong um 45 % höhere Lithiummengen als in Flat, in Ambitious um 55 % größere Mengen.

An dieser Stelle seien folgende Fakten und Annahmen nochmals betont und in Kontext zu den Modellierungsergebnissen gesetzt:

- Für 2018 wurden global 14 Mio. t wirtschaftlich gewinnbaren Reserven und 62 Mio. t Ressourcen an Lithium ermittelt (vgl. Jaskula 2019: 99); die den errechneten Bedarfswerten von 22,4; 33,27 bzw. 49,79 Mio. t an Lithium gegenüberstehen. Dies bedeutet, dass eine Abdeckung des Bedarfs bis 2050 allein aus den Reserven nicht möglich wäre. Vielmehr müsste für die Nachfrage auch auf Ressourcen zurückgegriffen werden, die derzeit nicht unter ökonomisch sinnvollen Rahmenbedingungen produziert werden können. Die kumulierten Bedarfswerte für Flat, Strong und Ambitious würden einen Verbrauch von 36,1; 53,7 bzw. 80,3 % der weltweiten Lithiumressourcen bedeuten. Dazu müssten schnellstmöglich neue Produktionsmethoden etabliert werden (siehe Definitionen Reserven/Ressourcen im Abschnitt 2.2).
- Mögliche Nachfrageänderungen aus Anwendungsbereichen abseits von Lithium-Ionen-Speichern sind in der Berechnung nicht im Detail berücksichtigt. Jedoch wurden die Verhältnisse der Nachfrage aus Speichertechnologien zu anderen Anwendungen je nach Szenario unterschiedlich angenommen (in Anlehnung an Kennzahlen aus bestehenden Studien, Details siehe Tabellen 6-8)

- Wegen der angenommenen Lebensdauer des Akkus von 10 Jahren stehen erst ab dem 11. Jahr der Modellierung EoL-Speicher zum Recycling zur Verfügung. Es wird davon ausgegangen, dass für EoL-Produkte aus anderen Anwendungsbereichen keine Lithiumwiedergewinnung erfolgt, was für die ersten zehn Modellierungsjahre eine Bedarfsdeckung durch Lithium aus primären Quellen erfordert. Bei steigender Nachfrage müsste dies auch die Schaffung neuer Produktionsanlagen nach sich ziehen.
- Für die Modellierung wurden nach bestem Ermessen realistische Lithiumbedarfswerte von Fahrzeugen mit unterschiedlichen elektrischen Antrieben festgelegt, die Ausbauszenarien wurden unter Bezugnahme auf aktuelle Forschungsergebnisse und Literatur entworfen. Trotzdem lagen große Spannen vor, aus denen die Determinanten für die Modellierung zu ermitteln waren. Kennzahlen, die auch nur leicht von den gewählten abweichen, würden daher unter Umständen zu stark abweichenden Ergebnissen führen.

Die sich aus der Modellierung ergebenden Zahlen deuten darauf hin, dass eine Hinwendung zur Elektromobilität in einem Ausmaß und unter den Rahmenbedingungen wie in den drei entworfenen Szenarien nur schwer umsetzbar sein wird und daher kaum die alleinige Lösung für die CO₂-Problematik, verursacht durch den Transportsektor, sein kann.

Vor einem ausführlichen Zwischenfazit und der Beantwortung der ersten Forschungsfrage sei im nächsten Abschnitt ein Vergleich der Modellierungsergebnisse mit ausgewählten Aspekten jener Studien angestellt, auf deren Basis die Szenarien für die vorliegende Arbeit entworfen wurden.

5.9) Gegenüberstellung der Ergebnisse mit anderen Studien

(i) Wie Angerer et al. am Ende ihrer Arbeit ausführen, sei um 2040 (Dominanz-Szenario) bzw. um 2050 (Pluralismus-Szenario) mit Lithiumengpässen zu rechnen, was Preissteigerungen, verstärkten Abbau und eine Forcierung von Explorations- und Substitutionsbemühungen zur Folge haben werde. Darüber hinaus spiele in beiden Szenarien die Forcierung von Alternativen zu Lithium-Ionen-Akkumulatoren eine wesentliche Rolle (vgl. Angerer et al. 2009: 45ff.).

Mit dem Stand des Jahres 2008 sei kaum zu erwarten, dass Lithium bis 2050 in funktionierenden Recyclingsystemen wiedergewonnen werde. Da allerdings Lithium-Ionen-Speicher zum Forschungszeitpunkt als vielversprechendste Technologie angesehen wurden, seien einerseits die Produktionskapazitäten und die Explorationsanstrengungen zu erhöhen; andererseits

müssten kommerzielle Verfahren zur Wiedergewinnung von Lithium aus EoL-Speichern forciert und über die gesamte Herstellungskette hinweg Prozessoptimierungen unterzogen werden. Dies schließe auch die Erhöhung der Effektivität von Sammelsystemen mit ein. Auch geopolitische Belange zwischen produzierenden und verarbeitenden Ländern müssten berücksichtigt und harmonisiert werden (vgl. Angerer et al. 2009: 50f.).

Die Ergebnisse der Modellierung für die Szenarien Flat, Strong und Ambitious lassen ebenfalls Knappheiten für den Rohstoff Lithium erwarten. So wären die weltweiten Lithiumreserven mit Stand des Jahres 2019 (14 Mio. t; vgl. Jaskula 2019: 99, siehe auch Tabelle 1) in den Szenarien der vorliegenden Arbeit im Jahr 2041 (Flat); 2033 (Strong) bzw. 2032 (Ambitious) aufgebraucht. Dabei macht es keinen Unterschied, ob Recycling wie vorgesehen stattfindet oder gar nicht: Durch die Annahme, dass erste EoL-Speicher erst 2031 zur Lithiumwiedergewinnung zur Verfügung stehen, und durch die wegen der modellierten Recyclingraten nur geringen daraus gewonnenen Mengen an sekundär bereitgestelltem Lithium treten Engpässe in genau den selben Jahren ein, wie sie ohne Recycling aufkommen würden.

Die Forderung von Angerer et al. (2009) nach der Forcierung alternativer Speichertechnologien bzw. besserer Lithiumwiedergewinnungsprozesse kann somit aus heutiger Sicht bekräftigt werden.

(ii) Kurzweil und Dietlmeier (2018: 255f.) gehen davon aus, dass auch bei einem globalen Umstieg auf Elektrofahrzeuge bis ins 21. Jahrhundert genügend Lithium vorhanden sein wird.

Unter den Annahmen der hier entworfenen Szenarien ist das Gegenteil der Fall, es ist sehr wohl mit Versorgungsengpässen zu rechnen, und zwar je nach Elektrifizierungsgrad der globalen Fahrzeugflotte bereits ab dem Jahr 2032 (siehe Abschnitte 5.7 und 5.8).

(iii) Die Studie von Vikström, Davidsson und Höök (2013) gibt einen Überblick über Lithiumreserven und -ressourcen; prognostiziert die jährliche Produktion und stellt sie der Nachfrage gegenüber, die aufgrund des Blue Map-Szenarios der International Energy Agency in Bezug auf die Elektrifizierung der globalen Fahrzeugflotte abgeleitet wird. Aufgrund des modellierten Produktionsvolumens gelangten die Autorinnen zu dem Schluss, dass die Versorgung mit Lithium mittelfristig problematisch werden könnte, sofern keine funktionierenden Recyclingmechanismen greifen. Dies wirke vor allem auf die Anzahl und Produktionsgeschwindigkeit von Elektrofahrzeugen. Erste Engpässe für Lithium könnten bereits um 2020 auftreten, wenn Prozesse zur Wiedergewinnung erst etabliert werden und die Nachfrage bereits die produzierte Menge übersteige. Dies hänge natürlich nicht zuletzt von der aktuell gewinnbaren Menge an

Lithium ab, die sich im Zeitablauf mit steigenden Preisen und besseren Technologien ändern könne. Erschwerend komme die geographische Konzentration des Rohstoffes und auch der Produktion sowie sinkende Rohstoffgehalte in weiter ausgebauten Produktionsstätten hinzu. Die Autorinnen empfehlen aus diesem Grund, Recycling- sowie alternative Akkutechnologien, die weniger Lithium benötigen oder auf andere Rohstoffe zurückgreifen, zu forcieren. Sie zeigen die Gefahr einer Abhängigkeit von Lithium auf, die an die Stelle jener von Öl treten könne (vgl. Vikström/Davidsson/Höök 2013).

Auch in den Ergebnissen der vorliegenden Modellierung zeichnet sich ein drohender Versorgungsengpass ab, der jedoch stark von der Intensität des künftigen Anteils an elektrisch betriebenen PKWs abhängt. Zum Erhebungszeitpunkt 2019/2020 gab es noch keine Knappheiten, entgegen der Prognose von Vikström, Davidsson und Höök (2013). Die Rahmenbedingungen für Recycling haben sich in den Folgejahren zudem kaum verbessert und lagen 2017 unter 1 % (vgl. Swain 2017: 388). Dies bekräftigt unter anderem die Empfehlung zur Suche nach alternativen Technologien zu Lithium-Ionen-Speichern (vgl. Vikström/Davidsson/Höök 2013: 264).

(iv) Einen wesentlichen Einfluss auf die Verbreitung von Elektrofahrzeugen hat das Nutzerverhalten und seine Entscheidungen. Eine Studie von Döring und Aigner-Waldner aus dem Jahr 2017 nimmt dieses näher in den Blick und untersucht jene Faktoren, die bestimmen, inwieweit Menschen bereit sind, im motorisierten Individualverkehr von Verbrennungs- auf Elektromotoren umzusteigen. Die Autorinnen kommen zu dem Schluss, dass vor allem die Entwicklungen im Hinblick auf die eingesetzten Energiespeichertechnologien darauf Einfluss nehmen werden, in welchem Ausmaß sich Elektrofahrzeuge künftig verbreiten werden. Auch Rohstoff- und Energiepreise und damit einhergehend das Ausmaß der Wirtschaftlichkeit solle die Akzeptanz und somit auch das Nutzerverhalten prägen. Der Einsatz von monetären Förderanreizen seitens des Staates wird eher als negativ beurteilt, obwohl kurzfristig zwar die Beschaffungskosten gesenkt werden, mindere dies den Anreiz zu Innovationen und somit zu Kostensenkungen durch Fahrzeugproduzenten. Insgesamt sei eine umfassende Verbreitung von elektrisch betriebenen Fahrzeugen und somit eine Verdrängung konventioneller Verbrennungsmotoren kurzfristig eher unwahrscheinlich (vgl. Döring/Aigner-Waldner 2017: 351).

Die in der obigen Studie angesprochene Wirtschaftlichkeit, die die Verbreitung von elektrisch betriebenen Fahrzeugen begünstige, spielt auch nach Einschätzung der Autorin der vorliegenden Arbeit eine große Rolle. Staatliche Interventionen sollten sich vor allem auf die Forcierung von Forschung und Entwicklung konzentrieren, um über Kostensenkungen, Effizienzsteigerungen und neue Technologien Elektromobilität ökonomisch noch attraktiver zu machen. Es

ist zu erwarten, dass die gesetzliche Regulierung von CO₂-Emissionen aus dem Verkehrsbereich starken Einfluss auf die Etablierung von elektrisch betriebenen Fahrzeugen haben wird.

(v) In einer Studie aus 2014 untersuchten Novinsky und Mitautorinnen die potenziellen Effekte einer gesteigerten Nachfrage nach Akkumulatoren auf den Markt für Cobalt und hinterfragten die Auswirkungen möglicher Rohstoffengpässe auf die Weiterentwicklung von Speichertechnologien sowie auf die Verbreitung von alternativen Antriebstechnologien. Obwohl hier nicht Lithium, sondern der Rohstoff Cobalt zum Forschungsgegenstand wird, sind die von den Autorinnen gewonnenen Erkenntnisse durchaus von Interesse für die Fragestellungen der vorliegenden Arbeit. Auch hier werden zwei unterschiedliche Szenarien der Diffusion angewendet, um potenzielle Entwicklungen aufzuzeigen. Die Autorinnen kommen zu dem Schluss, dass die steigende Nachfrage nach Fahrzeugakkumulatoren den Cobaltmarkt stark beeinflusst; bereits im Erhebungsjahr würden 40 % der globalen Cobaltmenge für den Einsatz in unterschiedlichen Speichertechnologien herangezogen, diese seien abhängig von der Cobalt-Verfügbarkeit. Bei weiter ansteigendem Bedarf für elektromobile Anwendungen sei zumindest temporär mit Beeinträchtigungen des Cobaltmarktes zu rechnen; vor allem dann, wenn die Produktionskapazitäten nicht exponentiell ausgeweitet würden. Das Ausmaß der weltweiten Reserven hänge stark von der Wirtschaftlichkeit der aktuell verwendeten Explorationstechniken ab. Verschärfend wirke zudem die Vorlaufzeit von fünf bis zehn Jahren, bis neue Minenprojekte in die Produktionsphase übergehen könnten. Trotz der kurzfristigen Einschnitte im Angebot sei nicht damit zu rechnen, dass dies die Verbreitung alternativer Antriebe stärker beeinflussen werde; vielmehr sei davon auszugehen, dass ein effizienterer Rohstoffeinsatz und die Suche nach Alternativen forciert würde. Die Autorinnen weisen abschließend darauf hin, dass mehr als die Hälfte des weltweit gewonnenen Cobalts aus der Demokratischen Republik Kongo stamme, welche politisch als instabil gelte; und dass ein Bürgerkrieg vor Ort Versorgungsengpässe auslösen könne, die die Automobilindustrie hart treffen könnten (vgl. Novinsky et al. 2014: 13-16).

Diese Studie kann in ihrer Ergebnisfindung nicht nur zu großen Teilen auf den Rohstoff Lithium umgelegt werden. Auch im Fall von Lithium beeinflusst die Nachfrage für die Anwendung in Akkumulatoren den Markt wesentlich; und auch hier könnte, wie unter anderem die vorliegende Arbeit zeigt, ein massiver Ausbau zu Engpässen in der Versorgung führen. Darüber hinaus ruft die Cobalt-Studie auch ins Gedächtnis, dass die Herstellung von Akkumulatoren für Elektrofahrzeuge von mehreren Materialien abhängt, deren Verfügbarkeit nicht immer in ausreichendem Maß gewährleistet sein muss. Bei der Einschätzung der Tragfähigkeit einer Technologie wie Lithium-Ionen-Akkus muss dies berücksichtigt werden, um realistische Ergebnisse generieren zu können.

(vi) Nach der Einschätzung von Sonoc, Jeswiet und Soo (2015: 752) werde die Lithiumnachfrage bereits 2023 das Angebot übersteigen, falls keine funktionierenden Recyclingprozesse etabliert würden.

Ähnlich wie für die Annahme von Kurzweil und Dietlmeier (2018: 255f.; siehe Punkt ii), zeigt sich auch beim Vergleich der Ergebnisse von Sonoc, Jeswiet und Soo (2015: 752) mit jenen der vorliegenden Arbeit, dass erst zu einem späteren Zeitpunkt mit Lithiumengpässen zu rechnen ist. Wie bereits ausgeführt, wird dieser Zeitpunkt stark vom Ausbaugrad von Elektrofahrzeugen abhängen.

(vii) Eine Studie des DLR und des Wuppertal Institutes aus dem Jahr 2015 ermittelt den globalen Lithiumbedarf grob auf Basis von vier verschiedenen Ausbauszenarien für Elektromobilität. Der kumulierte Bedarf für Elektrofahrzeuge erreicht demnach bis 2050 Werte zwischen 0,86 und 4,95 Mio. t Lithium. Unter Annahme einer vollständigen Kreislaufführung des Rohstoffes würden etwa 0,5 bis 2,6 Mio. t Lithium benötigt. Die Autorinnen schlussfolgern aus diesen Zahlen, dass die Versorgung aus den zum Forschungszeitpunkt ermittelten Reserven von 13 Mio. t möglich, aber nicht gewährleistet sei. Die Steigerung der Recyclingquoten werde den Druck auf primär bereitgestelltes Lithium jedoch verringern, dessen Gewinnung außerdem negative Umweltfolgen nach sich ziehe (vgl. DLR/Wuppertal Institut 2015: 338f., 359f. und 366).

Diese Zahlen stehen in starkem Widerspruch zu jenen, die aus der Modellierung der vorliegenden Arbeit ermittelt wurden und die sich je nach Szenario auf 9,74; 20,33 bzw. 21,75 Mio. t belaufen. Verringert um die aus den angenommenen Recyclingquoten gewonnenen Mengen an sekundärem Lithium würde der Bedarf allein für elektrisch betriebene PKWs noch immer 8,58; 18,65 bzw. 19,95 Mio. t Lithium umfassen und die globalen Lithiumreserven, die derzeit mit 14 Mio. t beziffert werden (vgl. Jaskula 2019: 99), zu 61,3 % ausschöpfen (Flat), bzw. im Fall von Strong die Reserven um 33,2 bzw. im Ambitious-Szenario um 42,5 % überschreiten, ohne die Nachfrage aus anderen Anwendungsbereichen überhaupt zu berücksichtigen. Somit bestünde für die vorliegend entworfenen Szenarien ein ungleich höheres Bedenken zur Versorgungssicherheit als schon für die vom DLR angenommenen Zahlen. Selbst wenn die Recyclinganteile innerhalb kürzester Zeit auf 100 % gesteigert werden könnten, müssten neue Verfahren entwickelt werden, um auch Ressourcen wirtschaftlich gewinnen zu können; oder die Materialeffizienz müsste gravierend gesteigert werden.

(viii) Für den Rohstoff Lithium sei eine gesteigerte Nachfrage zu erwarten; die jedoch von erhöhten Produktionskapazitäten in Chile, Australien, Brasilien und Argentinien abgedeckt werde (vgl. International Energy Agency 2018: 84-87).

Prinzipiell stellen die vier genannten Länder mit Stand im Jahr 2018 bereits wesentliche Mengen an Lithium; neben China, Namibia, Portugal, den USA und Zimbabwe (vgl. Jaskula 2019: 99; Abschnitt 4.1). Eine geographische Differenzierung des Primärabbaus macht in jedem Fall Sinn und trägt tendenziell zu einer besseren Absicherung der Versorgung bei. Jedoch gilt es bei der Schaffung und beim Ausbau von Förderkapazitäten die jeweilige Situation vor Ort in Bezug auf lokale Bevölkerung und Ökosysteme zu berücksichtigen, um nachhaltig abgestimmte und verträgliche Abbaubedingungen zu gewährleisten. Die Gewährleistung derartiger Rahmenvoraussetzungen muss entlang der gesamten Produktionskette eingefordert und sichergestellt werden. Dies gilt natürlich auch für die Etablierung von Produktionseinrichtungen in Ländern, in denen bisher noch kein Lithium abgebaut wird, wie etwa in Bolivien.

Nachdem die gewonnenen Erkenntnisse aus Abschnitt 5.8 nun in Bezug zur Forschung anderer Autorinnen gestellt wurden, kann nachfolgend zur finalen Beantwortung von Forschungsfrage 1 übergegangen werden (‚Wie entwickelt sich der globale Lithiumbedarf bis 2050 auf Basis unterschiedlicher Elektromobilitäts-Ausbaupfade?’).

5.10) Auswertung, Zwischenfazit und Ergebnis Forschungsfrage 1

Zu den Ausführungen der vorangegangenen Seiten sei Forschungsfrage 1 nochmals in Erinnerung gerufen und im Folgenden beantwortet:

Forschungsfrage 1:

Wie entwickelt sich der globale Lithiumbedarf bis 2050 auf Basis unterschiedlicher Elektromobilitäts-Ausbaupfade?

Generell zeigen die vorherigen Abschnitte, dass sowohl die Produktion und der Preis von Lithium als auch der relative Anteil des Anwendungsgebietes Akkumulatoren in den letzten Jahren gestiegen sind, besonders seit 2015, wo auch die Nachfrage aus Speichertechnologien erstmals jene aus dem Verwendungsbereich Keramiken und Gläser überstieg. Der Großteil des weltweit hergestellten Lithiums, konkret mehr als 95 %, wird in Australien, Chile, China und Argentinien gewonnen.

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurden drei verschiedene Szenarien entworfen, die unterschiedliche Ausbaupfade für Elektrofahrzeuge bis 2050 vorsehen. Das Flat-Szenario geht für das Zieljahr von einer hohen Anzahl an PKWs weltweit aus, jedoch nur von einem geringen Elektrifizierungsgrad und niedrigen Recyclingraten. Im Strong-Szenario gibt es weniger Fahrzeuge, aber einen größeren Teil an Elektroautos; die Wiedergewinnung von Lithium steigt leicht an. Die radikalste Abweichung zu heutigen Bedingungen nimmt das Ambitious-Szenario an. Hier geht die Anzahl der Fahrzeugte bis 2050 weiter zurück, jedoch werden über 88 % davon elektrisch betrieben. Die Einführung schlagkräftiger Recyclingmechanismen schreitet allerdings weiterhin nur langsam voran.

In der folgenden Abbildung 12 zeigt sich nun das Verhältnis von EV zu HEV und PHEV je nach Szenario im Jahr 2050, sowie der kumulierte Bedarf bis dahin. Dafür wurden Kennzahlen wie die absolute Zahl der PKWs weltweit, der Elektrifizierungsgrad sowie der Anteil an EV bzw. PHEV und HEV je nach Szenario festgelegt und zur Berechnung herangezogen.

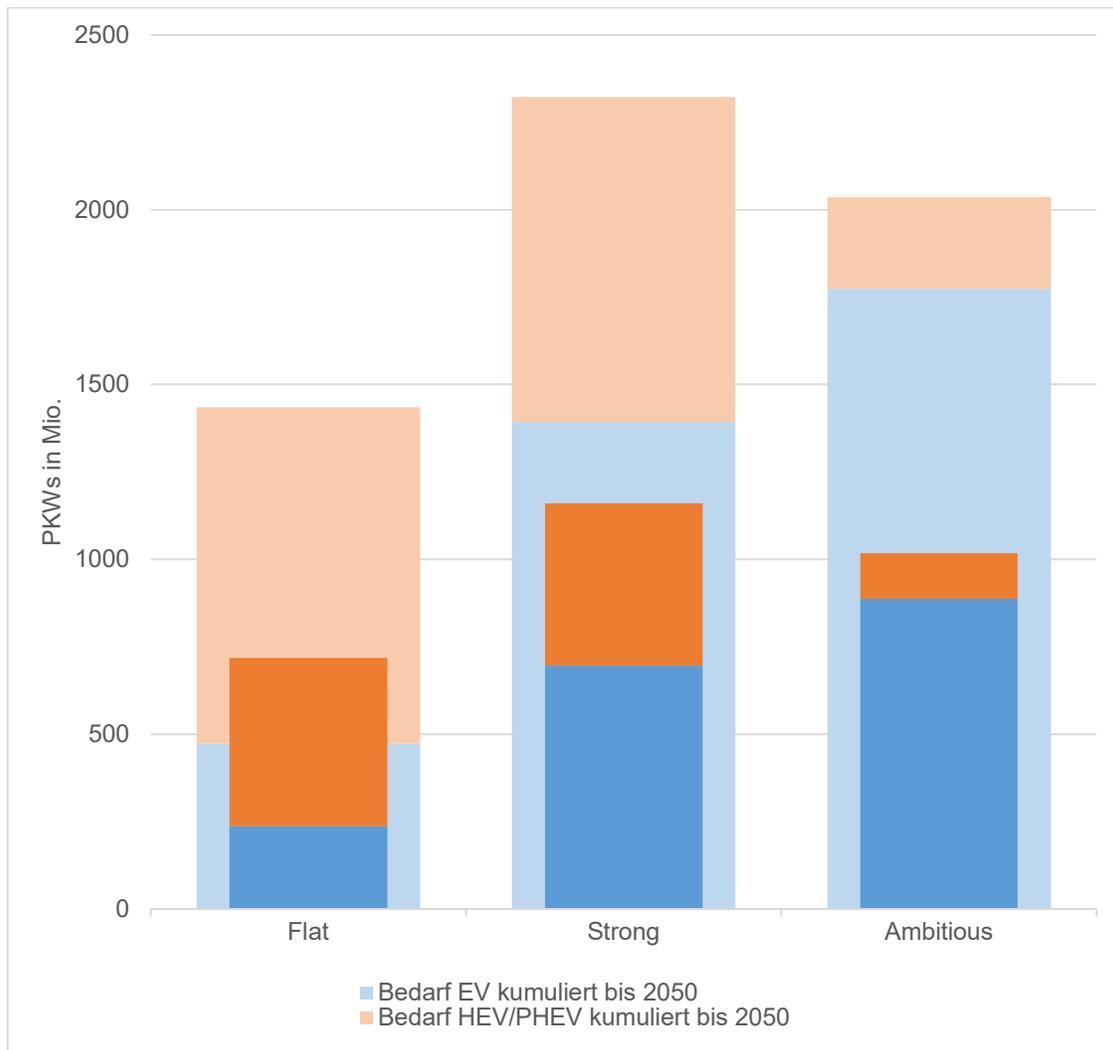


Abbildung 12: EV und HEV/PHEV, Stand 2050 und kumulierter Bedarf

Quelle: Daten aus Modellierung, Darstellung: B.W.

Die Ergebnisse der Modellierung zeigen für alle Szenarien hohe Bedarfszahlen an Elektrofahrzeugen bis 2050, wobei die kumulierte Nachfrage des Strong-Szenario jene aus Flat um etwa 62 % übersteigt; für Ambitious sind es immerhin noch 42 %. Dass die absolute Zahl an Elektro-PKWs in Strong jene in Ambitious überschreitet, spiegelt wider, dass es im erstgenannten Szenario weltweit auch deutlich mehr Autos gibt.

Für die Modellierung der absoluten Bedarfsmengen wurden Parameter wie die eingesetzte Menge Lithium pro EV/PHEV/HEV, eine allfällige Effizienzsteigerung, der Anteil von Fahrzeugspeichern bzw. aller Akkutechnologien an der weltweiten Nachfrage sowie festgelegte Recyclingraten herangezogen, die je nach Szenario variierten. Nachfolgend werden die benötigten

Mengen für Fahrzeugspeicher, für sonstige Akkutechnologien sowie für alle weiteren Anwendungsfelder gegenübergestellt:

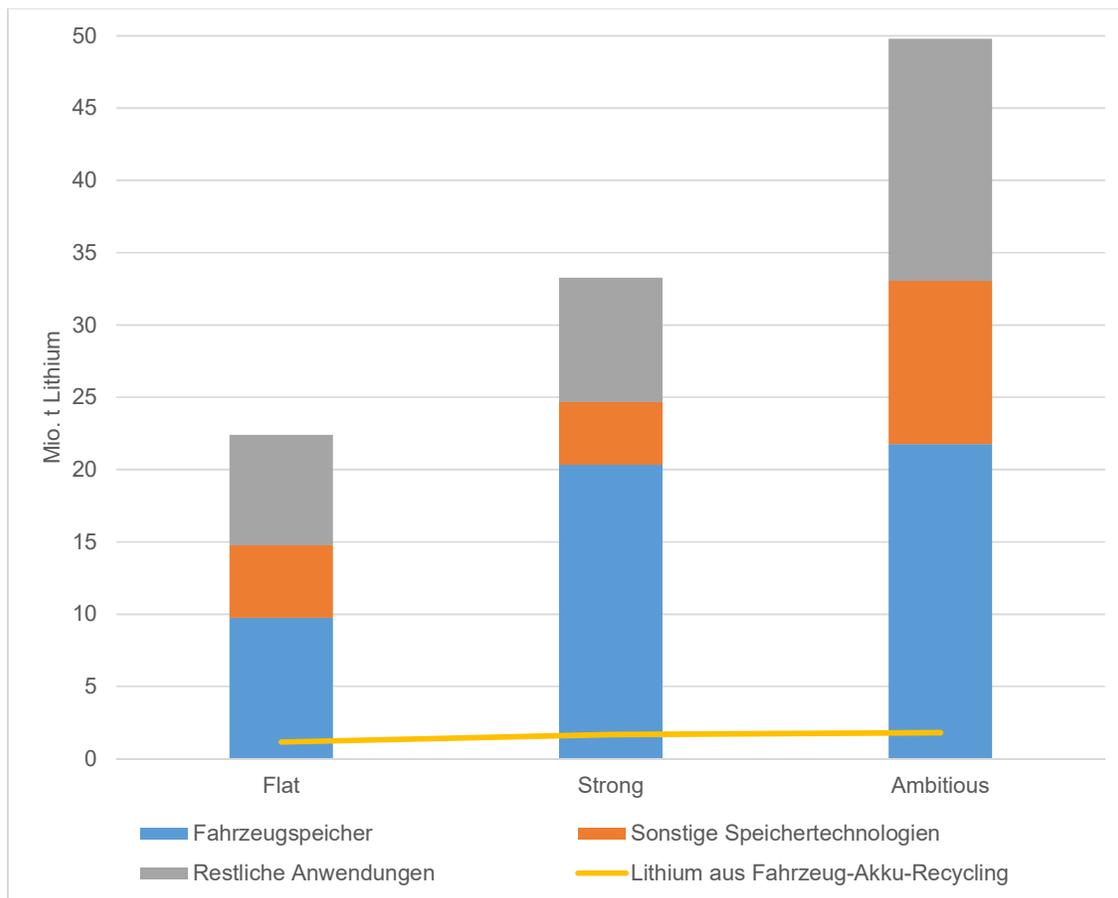


Abbildung 13: Globaler Lithiumbedarf nach Anwendungsfeld, kumuliert bis 2050

Quelle: Daten aus Modellierung, Darstellung: B.W.

Zur Verdeutlichung seien die Zahlen nochmals in der folgenden Tabelle 11 festgehalten:

Tabelle 11: Globaler Lithiumbedarf nach Anwendungsfeld in Mio. t, kumuliert bis 2050

	Flat	Strong	Ambitious
Fahrzeugspeicher	9,74	20,33	21,75
Sonstige Speichertechnologien	5,03	4,35	11,31
Restliche Anwendungen	7,63	8,59	16,73
GESAMT	22,40	33,27	49,79
Lithium aus Fahrzeug-Akku-Recycling	1,16	1,68	1,8

Quelle: Daten aus Modellierung, Darstellung: B.W.

Aus Abbildung 13 und Tabelle 11 geht hervor, dass unter den Annahmen der drei entworfenen Szenarien bis 2050 mit starken Anstiegen der weltweiten Lithiumnachfrage zu rechnen ist. Im Detail betrachtet ähneln sich die kumulierten Bedarfszahlen von sonstigen Speichern und allen weiteren Anwendungsfeldern in Flat und Strong sehr stark; auffällig ist die mehr als doppelt so hohe Nachfrage für Auto-Akkus in Strong. Ein Vergleich von Flat und Ambitious zeigt für alle drei gegenübergestellten Kategorien grob eine Verdoppelung der Bedarfszahlen. In der Betrachtung von Strong und Ambitious ist der Bedarf für Fahrzeugspeicher beinahe gleich hoch, allerdings fragen alle anderen Akkutechnologien und Anwendungen gesamt gesehen in Ambitious mehr als die zweifache Menge nach. Durch die von Flat über Strong bis Ambitious nur langsam ansteigenden Recyclingraten ist der Beitrag von Lithium aus sekundären Quellen extrem gering und dient kaum dazu, die Ausbeutung primärer Quellen abzufedern.

Darüber hinaus erschweren folgende Herausforderungen die Gewährleistung einer adäquaten Lithiumversorgung unter den modellierten Bedingungen:

- Den ermittelten Bedarfszahlen von 22,4; 33,27 bzw. 49,79 Mio. t an Lithium (kumuliert bis 2050) stehen Reserven von 14 Mio. t und Ressourcen von 62 Mio. t gegenüber (Stand 2018, vgl. Jaskula 2019: 99). Somit würden im Szenario Flat 36,1 %, in Strong 53,7 % und in Ambitious sogar 80,3 % der weltweiten Lithiumressourcen benötigt, um die Nachfrage bis 2050 zu decken. Es müssten daher in einem ersten Schritt schnellstmöglich wirtschaftlichere Verfahren zur Lithiumproduktion entwickelt werden, um ausreichend hohe Zahlen der bisher als Ressourcen eingestufte Rohstoffmengen zu ökonomisch gewinnbaren Reserven umzuwandeln (zur Begriffsdefinition siehe nochmals Kapitel 2.2).
- Da aufgrund der angenommenen Lebensdauer der Akkus in Elektrofahrzeugen von 10 Jahren erste EoL-Speicher für Recyclingprozesse erst ab dem Modellierungsjahr 11 zur Verfügung stehen, muss die Versorgung vorerst über primären Abbau erfolgen.
- Sofern der Bedarf in sonstigen Anwendungsfeldern umfassender als modelliert steigt, könnte dies die Versorgungssituation weiter verschärfen.

Maßnahmen wie die anschließend aufgeführten könnten dabei helfen, die Lithiumversorgung bis 2050 auszubauen und abzusichern:

- Forcierung eines effizienteren Materialeinsatzes von Lithium in Speichertechnologien, besonders in Fahrzeugspeichern
- Ermittlung geeigneter Weiterentwicklungen, Alternativen und Substitute von und zu Lithium-Ionen-Speichern
- Eindämmung dissipativer Anwendungsfelder, z.B. Schmiermittel

- stärkere Beforschung und Entwicklung geeigneter Verfahren zur Gewinnung von Lithium aus Meerwasser. Im Vergleich zu den am Festland vorliegenden, prinzipiell gewinnbaren Ressourcen von 62 Mio. t (vgl. Jaskula 2019: 99) enthalten die Weltmeere Lithium im Ausmaß von etwa 230 Mrd. t; wobei eine durchschnittliche Konzentration von 0,14 bis 0,25 mgL⁻¹ vorliegt (vgl. Kurzweil/Dietlmeier 2018: 256). Die Rohstoffgewinnung aus Meerwasser darf aus der Sicht der Autorin in jedem Fall nur im Anschluss an eine umfassende Technikfolgenabschätzung und nach Ausschluss schwerwiegender ökologischer Folgen in Betracht gezogen werden.
- umfassende Etablierung funktionierender Sammelsysteme für lithiumhaltige Abfallstoffe
- Entwicklung effizienter und kostengünstiger Recyclingverfahren
- Erschließung neuer Lithiumlagerstätten und Errichtung von Produktionsanlagen.

Den letztgenannten Punkt nimmt das folgende Kapitel in den Blick und untersucht, welche möglichen Wirkungen eine Ausweitung der Produktionskapazitäten in Staaten mit großen Lithiumvorräten haben könnte.

6) Primärproduktionssteigerungen und ihre potenziellen Auswirkungen auf lithiumreiche Länder

Nach der erfolgreichen Beantwortung der ersten Forschungsfrage ist klar, dass die bedarfsgerechte Lithiumversorgung aus primären Quellen unter allen drei entwickelten Elektromobilitäts-Ausbauszenarien zur Herausforderung werden kann. Die Wiedergewinnung von Sekundärlithium aus Abfallströmen scheitert aktuell mangels geeigneter Recyclingverfahren (vgl. dazu exemplarisch Swain 2017: 388) und nimmt auch in den Szenarien bis 2050 nur mäßig an Fahrt auf. Damit rückt zunächst die adäquate Bedarfsdeckung durch den Ausbau primärer Abbaukapazitäten in den Fokus. Wie die folgenden Ausführungen zeigen, entsprechen die Länder mit den größten Lithiumproduktionsmengen nicht immer jenen Staaten, die über die umfassendsten Vorräte verfügen. Nachfolgend wird die Situation in lithiumreichen Ländern in den Blick genommen, die sich oft sehr unterschiedlich gestaltet. Während Australien, Chile, China und Argentinien beispielsweise bereits große Umsätze aus der Lithiumproduktion erzielen, findet in Bolivien praktisch noch kein Abbau statt. Das vorliegende Kapitel geht auf potenzielle Herausforderungen ein, die ein Ausbau von Produktionseinrichtungen in lithiumreichen Staaten mit sich bringen könnte (Forschungsfrage 2 – ‚Welche potenziellen Auswirkungen hätte ein Ausbau der Produktionskapazitäten auf lithiumreiche Länder?‘) Zunächst wird jedoch noch ein kurzer Blick auf mögliche Umweltwirkungen beim Betrieb von Elektrofahrzeugen allgemein geworfen.

6.1) Exkurs: Generell mögliche Umweltwirkungen beim Betrieb von Elektrofahrzeugen

Generell kann der Betrieb von Elektrofahrzeugen unterschiedliche Umweltwirkungen nach sich ziehen. Im Fall der hier untersuchten Transportmittel mit elektrischen Antriebssträngen sind dies zum Beispiel die folgenden (vgl. International Energy Agency 2010: 636-645):

- **Lärm:** Die beinahe geräuschlosen Elektroantriebe und Reifen mit wenig Rollwiderstand verursachen im Betrieb zwar kaum Lärmemissionen und sparen Einiges an Energie ein, jedoch erhöht dies auch die Gefahr von Unfällen mit Fußgängern.
- **Treibhausgase:** Elektrisch betriebene- oder Brennstoffzellen-Fahrzeuge verursachen nur dann Treibhausgas-Emissionen, wenn der hierfür verwendete Strom auf Basis nicht erneuerbarer Quellen gewonnen wurde. Hierbei kann eine Emissionsverschiebung stattfinden, wenn Elektroautos in urbanen Bereichen eingesetzt werden und der

CO₂-Ausstoß in ländlichen Gegenden, wo die stromliefernden Kraftwerke angesiedelt sind, stattfindet.

- Wasser: Wird die verwendete elektrische Energie auf Kohlebasis generiert, wird beinahe die selbe Wassermenge benötigt, die auch dem Betrieb konventioneller Verbrennungsmotoren zugrunde gelegt wird. Dies ergibt sich aus den hohen Wasserverbräuchen bei Minenextraktion, Bearbeitung und der schlussendlichen Verbrennung des Energieträgers.
- Rohstoffe: Eine gesteigerte Nachfrage nach Lithium erfordert die Etablierung neuer Technologien zur kosteneffizienten Gewinnung, einen effizienteren Einsatz desselben bzw. die Substitution mit anderen Technologien, in denen der Rohstoff nicht zum Einsatz kommt. Darüber hinaus sei auch die Verfügbarkeit einiger Seltenerde-Metalle, die für die Akkus verwendet werden, nicht gegeben.

Diese potenziellen Umweltwirkungen betreffen die Nutzungsphase von Elektrofahrzeugen, noch nicht den gesamten Lebenszyklus derselben. Ein kleiner Teil dessen wird im folgenden Abschnitt in den Blick genommen – die möglichen Umwelteinflüsse während der Phase der Lithiumgewinnung.

6.2) Status quo in lithiumreichen Regionen

Die Gewinnung von Lithiumcarbonat Li₂CO₃ bleibt nicht ohne Umweltwirkungen. Stamp, Lang und Wäger (2012) untersuchten in einer Studie, wie diese bei Lithiumcarbonat, das in Akkumulatoren von Elektrofahrzeugen verwendet wird, auf der Stufe der Rohstoffbereitstellung und von dort aus auf die Produkt- und die Serviceebene wirken - also wie sehr der Einsatz von Lithiumcarbonat aus unterschiedlichen Vorkommen und unter abweichenden Produktionsbedingungen die Performance eines Elektrofahrzeuges im Hinblick auf Umweltauswirkungen im Vergleich zu einem klassischen Verbrennungsmotor beeinflusst. Betrachtet wurde die Gewinnung aus Salzlagerstätten, aus Erzen sowie aus Meerwasser. Dabei wurden jeweils günstige und ungünstige Produktionsbedingungen angenommen. Die Autorinnen kamen im Rahmen ihrer Untersuchung zu folgenden Ergebnissen: Aus jenem Blickwinkel, der den gesamten Lebenszyklus eines Produktes mitberücksichtigt, ruft ein elektrisch betriebenes Fahrzeug im Vergleich mit einem fossil betriebenen nur dann schlechtere Umweltauswirkungen hervor, wenn das Lithiumcarbonat für seinen Energiespeicher unter ungünstigen Bedingungen aus Meerwasser gewonnen wurde. In diesem Fall sei der Energieaufwand so hoch, dass die negativen Impacts für die Umwelt jene eines Verbrennungsmotors übersteigen würden (vgl. Stamp/Lang/Wäger 2012).

Trotz diesem Untersuchungsergebnis, das Elektrofahrzeuge in Bezug auf Umweltwirkungen generell besser bewertet als fossil betriebene, sind die potenziellen negativen Aspekte der Lithiumgewinnung vielfältig und teilweise schwerwiegend für lokale Ökosysteme: Zu nennen sind vor allem der hohe Bedarf an Wasser und die Verwendung von Chemikalien, die oft nicht fachgerecht entsorgt werden. Darüber hinaus werden mit Verdunstungs- und Verarbeitungsanlagen große Flächen verbaut. Besonders bei der Produktion aus Salzseen können deren empfindliche Ökosysteme über eine Veränderung des Wasserhaushaltes beeinträchtigt werden (vgl. Brot für die Welt 2018: 14).

Die soeben genannte Herausforderung eines hohen Wasserverbrauchs bestätigt auch eine Studie des IFEU (2015: 120f.) – generell für die Herstellungsphase von EVs, im Besonderen aber durch die Akkuerzeugung. Er liegt in der Gegenüberstellung mit der Produktion konventionell betriebener Fahrzeuge mehr als doppelt so hoch und beträgt rund 0,6 Liter pro Fahrzeugkilometer (respektive 0,29 l/km bei ICEs). Für EVs mit höheren Reichweiten von rund 250 km werden sogar Wasserverbrauchswerte von 1,2 l/km in der Herstellung angegeben. Dies zeigt, dass die Produktion von Akkumulatoren sehr wasserintensiv ist, laut IFEU vor allem für die enthaltenen Elektrolyten aus Lithiumhexafluorphosphat.

Wie das IFEU (2015: 121f.) weiter ausführt, ist auch der Produktionsort von Akkumulatoren wesentlich für die Schwere ökologischer Beeinträchtigungen. Demnach ist der selbe Wasserbedarf in Ländern wie den USA, Japan, China und Korea negativer zu beurteilen als etwa in Deutschland, weil in diesen Staaten generell weniger Wasser zur Verfügung steht. Die Entnahme verursacht hier eine höhere Wasserzehrung²⁶. Heruntergebrochen auf Regionen, in denen Lithium gefördert wird, hat beispielsweise die Lithiumgewinnung am Salar de Atacama in Chile stark negative Konsequenzen auf den lokalen Wasserhaushalt, wie die folgende Tabelle 12 zeigt.

²⁶ Der Begriff ‚Wasserzehrung‘ bezieht sich auf die Wasserentnahme sowie den Water Stress Index WSI, der von Pfister/Koehler/Hellweg (2009) für 10.000 Wassereinzugsgebiete errechnet wurde. Der WSI wiederum errechnet sich über das Verhältnis von Wasserverfügbarkeit zur -entnahme (vgl. IFEU 2015: 121f.).

Tabelle 12: Wasserzehrung durch Akkuproduktion und Lithiumabbau

Land/Region	Wasserzehrung pro 1 Wasserentnahme
<i>Staaten mit Produktion von Akkumulatoren</i>	
Korea	597 ml
USA	499 ml
China	477 ml
Japan	323 ml
Deutschland	120 ml
<i>Regionen mit Abbau von Lithium</i>	
Salar de Atacama, Chile (Salzsee)	1000 ml
Salar del Hombre Muerto, Argentinien (Salzsee)	17 ml
Greenbushes Mine, Australien (Bergwerk)	11 ml

Quelle: Pfister/Koehler/Hellweg 2009, zit. n. IFEU 2015: 122²⁷; Darstellung: B.W.

Tabelle 12 verdeutlicht die obigen Ausführungen zu unterschiedlichen ökologischen Wirkungen der Produktion an abweichenden Standorten und lenkt den Blick nach Südamerika. Im Fall des Salar de Atacama hat der Lithiumabbau bereits zu einem gesteigerten Salzgehalt im Umfeld der Produktionsanlagen geführt; der Grundwasserspiegel sinkt, wodurch die verfügbaren Mengen an Wasser zurückgehen. Lokal angesiedelte Arten, insbesondere verschiedene Flamingos, werden in ihren Lebensräumen gestört (vgl. Brot für die Welt 2018: 14).

Im so genannten ‚Lithiumdreieck‘ - den Ländern Argentinien, Bolivien und Chile - findet bereits seit langer Zeit ein Abbau von Rohstoffen wie Kupfer, Zink, Gold oder Silber statt. Hier leben indigene Bewohnerinnen von Viehzucht, Obst- und Ackerbau sowie von der Salzgewinnung und der Produktion von Wollerzeugnissen. Der Lithiumreichtum dieser Länder wird je nach Staat unterschiedlich gehandhabt: Während Lithium in Chile staatlich kontrolliert abgebaut wird und schon 1979 als strategischer Rohstoff eingestuft wurde, gibt es in Argentinien kaum Regulierungen, was starke Präsenz internationaler Unternehmen hervorruft. Bolivien strebt hingegen danach, die Wertschöpfung und den Rohstofftertrag im eigenen Land zu behalten (vgl. Brot für die Welt 2018: 17).

Der Abbau in Chile konzentriert sich auf das Gebiet um den Salar de Atacama, das zunehmend von Wasserknappheiten betroffen ist. Darüber hinaus strebt die ansässige Bevölkerung danach, Profite aus dem Lithiumabbau in der Region zu halten. Die vor Ort aktiven Bergbauunternehmen nehmen sich dieser Herausforderung unterschiedlich an: Während das US-amerikanische Unternehmen Albemarle den Konsens mit den Einwohnern sucht, scheint der chile-

²⁷ Die ETH Zürich (2020) stellt jeweils aktuelle Daten zur Verfügung.

nisch-kanadische Konzern SQM nicht an einer partizipativen Lösung interessiert, was den Widerstand der Ansässigen und regionaler Umweltorganisationen hervorruft (vgl. Brot für die Welt 2018: 18ff.).

In Argentinien findet die Lithiumgewinnung verteilt an kleineren Salzseen statt. Die historisch gewachsene Salzproduktion fand bisher mit Bedacht auf den Erhalt des ökologischen Gleichgewichts statt – im Fall der Lithiumproduktion wird der Fokus eher darauf gelegt, das Land bis 2020 zum wichtigsten Erzeugerstaat von Lithium zu machen. Auch hier werden negative Folgen für lokale Wasserkreisläufe befürchtet, was mittelfristig eine Bedrohung der Lebensgrundlagen der von Viehzucht abhängigen ansässigen Bevölkerung bedeuten kann. Eine Initiative lokaler indigener Gemeinschaften formierte sich bereits, um gegen Missstände anzukämpfen (vgl. Brot für die Welt 2018: 21ff.).

Lithium wurde vom Staat Bolivien ebenfalls zum strategischen Rohstoff erklärt - Ziel ist es hier jedoch, die Gewinnung auf nationaler Ebene zu regulieren und die Wertschöpfung im Land zu belassen. Während die lokale Bevölkerung diese Bestrebungen größtenteils mitträgt, beanstanden NGOs vor allem eine intransparente Informationspolitik der Regierung sowie ein fehlendes Aufzeigen möglicher Folgen für lokale Ökosysteme (vgl. Brot für die Welt 2018: 24ff.).

Für Bolivien ortet Ströbele-Gregor (2012: 13f.) mehrere Ebenen der Ungleichheiten, die durch den Rohstoffabbau möglicherweise verstärkt werden könnten:

- Globale Ungleichheiten: Damit sind beispielsweise die Schwierigkeiten gemeint, die Bolivien dabei hat, sich am globalen Markt zu positionieren. Dafür müsste es sich gegen etablierte Mitbewerberinnen durchsetzen, verfügt jedoch nicht über die hierfür nötige Technologie und Infrastruktur. Unsicherheiten in Bezug auf die politische Stabilität könnten sich negativ auf potenzielle Investitionen dritter Akteure auswirken.
- Nationale Ungleichheiten: Das lithiumreichste Departement Potosí gilt gleichzeitig als ärmstes innerhalb des Landes. Das Wissen um die Vorkommen ist mit Erwartungen der ansässigen Bevölkerungen an die Regierung für zur Behebung dieses Missstandes verbunden.
- Subnationale Ungleichheiten: Die rückständigen ökonomischen Strukturen in der Region werden durch gegenläufige Interessen von lokal agierenden Stakeholdergruppen verschärft. Zudem verfügen nicht alle Akteurinnen über die selbe Durchsetzungskraft.
- Lokale Ungleichheiten: Die ansässige Bevölkerung weist eine sehr gegenläufige Struktur auf – indigene Dorfgemeinschaften stehen Gruppen von Bergleuten gegenüber. Während die Lebensgrundlagen der ersten Gruppe in erster Linie von einer intakten

natürlichen Umwelt abhängen, kann man davon ausgehen, dass Zweitere diese Anliegen nicht als oberste Priorität auf ihrer Agenda haben.

Im Fall von Bolivien zielt die nationale Abbaustrategie darauf ab, dass nicht ausländische Unternehmen von dem im Land vorhandenen Lithiumressourcen profitieren; vielmehr ist die Zusammenarbeit zwischen Staat und privaten bzw. transnationalen Firmen geplant, um die Gewinne aus dem Abbau möglichst im Land zu halten. Dieses Bestreben geht auf die noch immer stark ausgeprägten postkolonialen Strukturen in der bolivianischen Gesellschaft zurück. Die Regierung hat zum Ziel, die noch immer fortbestehenden Ungleichheiten und Abhängigkeiten, die sich sowohl in ökonomischen, sozialen und politischen Strukturen und von der internationalen über die staatliche bis hin zu lokalen Ebenen manifestieren, abzubauen. Im konkreten Fall des lithiumreichen Salar de Uyuni soll dies über die Verteilung der Gewinne auf Departement- und Munizipienebene geschehen (vgl. Vogel 2016: 202).

Mit Stand 2016 gab es an dem genannten Salzsee, in Llipi, eine Pilotanlage, wo in großen Becken die Salzlauge verdunstet wird und wo einige gering qualifizierte Arbeitsplätze verfügbar sind. Einheimische finden auch Arbeit über den Transport von ausländischen Technikerinnen, die in der Pilotanlage arbeiten und die sie von ihren Unterkünften in Uyuni nach Llipi fahren. In starkem Gegensatz zu dem touristisch geprägten Uyuni und zu Llipi, das zumindest über die Lithium-Pilotanlage verfügt, stehen kleine Dörfer im Norden des Salzsees, die der Provinz Daniel Campos und in der Verwaltungsebene darüber, dem Departement Potosí, zugehörig sind. Potosí gilt als ärmste Region Boliviens an der Grenze zu Chile (vgl. Vogel 2016: 202f.).

Erschwerend wirkt im Fall von Bolivien, dass Extraktionsmethoden aus etablierten Lithium-Abbaugebieten wie Chile mit dem Salar de Atacama oder Argentinien mit dem Salar de Hombre Muerto nicht einfach ohne Weiteres übernommen werden können - am Salar de Uyuni dauert die Niederschlagsperiode viel länger an, es herrscht eine höhere Feuchtigkeit vor. Somit muss eine eigene, angepasste Art zur Verdunstung der lithiumreichen Salzlauge eingeführt werden (vgl. Ströbele-Gregor 2012: 35).

Die Wahrnehmung von und das Wissen um den Rohstoff Lithium gestaltet sich unterschiedlich entlang der Wertschöpfungskette: Im Sinne des globalen Nordens gilt der Salar als Rohstoffquelle, die essentiell für den Fortgang des technologischen Wandels sind. Am Salzsee selbst verschmelzen die diversen Ebenen der Wertschöpfungskette, indem nördliche Wissenschaftlerinnen in ihrer Arbeit auf die Hilfe der lokalen Bevölkerung angewiesen sind. Je weiter die

fraglichen Ebenen aber auch räumlich vom Salar entfernt sind, desto eher tritt die lokale Expertise in den Hintergrund und der Salzsee erscheint als unberührtes Gebiet (vgl. Vogel 2016: 206f.).

Aber auch innerhalb der ansässigen Bevölkerung wird der Salar unterschiedlich wahrgenommen. Dies beginnt schon bei der Namensgebung: Politische Amtsträger aus Llica nennen ihn Salar de Tunupa, um seine Zugehörigkeit zur Provinz Daniel Campos zu betonen; zählt die Stadt Uyuni doch zur Provinz Daniel Quijarro. Grundsätzlich ist diese Zuschreibung aber bedeutungslos, da natürliche Rohstoffe als Volkseigentum gelten, das von der Regierung so zu verwalten ist, dass die Interessen der Bevölkerung gewahrt werden (vgl. Vogel 2016: 207f.).

In der ortsansässigen Bevölkerung besteht nichtsdestotrotz die Hoffnung, den Rohstoffreichtum mit positiven Auswirkungen auf die Region nutzen zu können. Konkret geht es dabei um die Gründung einer ‚Lithiumuniversität‘ in Llica, wofür sich im Jahr 2010 eine lokale Initiative gründete. Die ‚Universidad Boliviana de Lito‘ (UBL) könnte somit die Manifestierung einer Zukunft der Lithiumnutzung werden. Der Rohstoff bildet die Grundlage für das Streben nach kulturellen Werten wie Bildung. Damit würde sich der Probleme von Urbanisierung und Landflucht angenommen, weil vor Ort sowohl Ausbildungsmöglichkeiten als auch höher qualifizierte Arbeitsplätze geschaffen werden würden. Genauer gesagt würde die Etablierung der UBL in Llica nach Vorstellung der Initiatorinnen den Ort zu einem entwicklungstechnisch wichtigen Punkt im Südwesten des Landes machen. Die Möglichkeit einer universitären Ausbildung solle demnach zur Befreiung aus ungleichen Strukturen führen (vgl. Vogel 2016: 208f.).

In Bezug auf mögliche Umweltwirkungen ist an erster Stelle ein potenzieller negativer Einfluss auf die Wasserreserven im fraglichen Lithium-Abbaugbiet zu nennen. Im Fall von Bolivien könnten dies ähnliche Folgen sein, wie sie bereits in nordchilenischen Extraktionsregionen auftraten (vgl. Molina Carpio 2007; zit. n. Ströbele-Gregor 2012: 57):

- sinkender Grundwasserspiegel; Minderung von in Aquiferen gespeichertem Wasser
- Degradation bzw. Austrocknen von Bofedales²⁸
- Austrocknen hochandiner Seen
- negative Einflüsse auf die Fauna, die ihren Lebensraum an Seen oder Bofedales hat, z.B. Vögel
- Verringerung oder Aussterben von Kamelidenherden, die ihre Lebensräume in Bofedales haben

²⁸ Bofedales sind Zonen mit Feuchtgebietsvegetationen und Torfuntergründen. Sie dienen als Weideland und für die Wasserversorgung und weisen eine hohe Artenvielfalt auf. Damit bilden sie eine wichtige Ressource für die ansässige landwirtschaftliche Bevölkerung (vgl. Maldonado Fonkén 2014: 1).

- potenzielle sozioökonomische oder kulturelle Wirkungen auf die lokal ansässige Bevölkerung, deren Lebensgrundlagen auf der Zucht von Kameliden basieren, die wiederum von den Bofedales abhängig sind
- Degradation oder Versiegen von Quellen, die für den menschlichen Bedarf genutzt werden. Dies betrifft vor allem Brunnen und Quellen, die sich in der Nähe von Entnahmorteorten befinden oder sich direkt aus Aquiferen speisen.

Weil die hochandinen Seen im fraglichen bolivianischen Gebiet mit ihrer gesamten Fauna, vor allem aber beispielsweise mit unterschiedlichen Flamingoarten zu den wichtigsten touristischen Anziehungspunkten gehören, besteht hier die Gefahr von indirekten negativen Wirkungen, sofern durch einen Abbau von Lithium die Menge und/oder Qualität des zur Verfügung stehenden Wassers leidet. Davon betroffen sind naturgemäß auch die heißen und kalten Quellen, die ebenfalls touristische Ziele bilden und darüber hinaus auch die damit verbundene Infrastruktur sicherstellen (vgl. Molina Carpio 2007; zit. n. Ströbele-Gregor 2012: 57):

Desweiteren bietet der Salar Lebensraum für unterschiedliche Prokaryoten - eine Arbeit von Haferburg et al. (2017) identifizierte insgesamt 26 Gattungen von Halobakterien, von denen einige erst kurz zuvor entdeckt worden waren. Die Autorinnen gehen davon aus, dass es in dem besonderen Biotop dieses Salzsees zur Entdeckung weiterer, bislang unbekannter Gattungen kommen wird. Das Vorliegen dieser Mikroorganismen wird auf die Kombination der Parameter von Hypersalinität, intensiver UV-Bestrahlung, der hohen Konzentration von Lithium sowie dem leicht sauren pH-Wert zurückgeführt.

Positive Auswirkungen des Lithiumabbaus auf den Tourismus könnten etwa durch einen starken Infrastrukturausbau zum Tragen kommen. Dabei wurden gegenüber Ströbele-Gregor (2012: 69) in persönlichen Gesprächen mit ortsansässigen Personen beispielsweise ein Flughafen, asphaltierte Straßen und die Stabilisierung von Elektrizitäts- und Kommunikationsnetzen genannt. In diesen Wahrnehmungen erfolgt ein starker Aufschwung von Uyuni; Lithiumabbau und Tourismus stellen hier keine Gegensätze dar. Jedoch gilt es zu beachten, dass Touristinnen oft in diese Region anreisen, um unberührte Landschaften vorzufinden; wo die Errichtung von Abbauanlagen und die damit einhergehende Betriebsamkeit keinen Platz finden.

Im Gegensatz zum noch kaum erschlossenen Bolivien gilt China als bedeutender Lieferant von Lithium-Ionen-Akkumulatoren, vor allem für tragbare Anwendungen und für Elektrofahrzeuge. Es baut große Mengen der im Land vorhandenen Lithiumvorräte ab, was eine Verrin-

gerung der Tragfähigkeit der vorhandenen Lagerstätten²⁹ nach sich zieht, die durch die steigende Lithiumnachfrage verschärft wird. Eine Besserung der Situation im Hinblick auf die Tragfähigkeit der chinesischen Lithiumlagerstätten steht auch durch vollständige Wiedergewinnung aus EoL-Anwendungen nicht in Aussicht. Unter Annahme eines jährlichen Wachstums von 7 % für Lithium in Speichertechnologien sei eine Recyclingrate von 90 % vonnöten, um die Lagerstätten nicht vollständig zu erschöpfen. Dies könne vor allem mit der Einführung eines wirkungsvollen Sammelsystems und geschlossenen Recyclingkreisläufen erreicht werden; langfristig seien die Verringerung des Lithiumanteils in Akkumulatoren und eine bessere industrielle Struktur sehr sinnvoll (vgl. Zeng/Li 2013: 58).

Mit dem Stand von 2013 wurde für Chinas Lithiumvorräte eine Reichweite bis 2028 prognostiziert, was selbst bei hundertprozentiger Wiedergewinnung von Lithium aus EoL-Produkten nicht ausgedehnt werden könne (vgl. Zeng/Li 2013: 62).

Um im jeweiligen Land eine Rohstoffgewinnung zu gewährleisten, die möglichst im Einklang mit der lokalen Umwelt steht, gilt es nach Brot für die Welt (2018: 27) folgende Punkte zu erfüllen:

- koordinierte und angemessene Gewinnung unter Einbeziehung der ansässigen Bevölkerung; abgestimmte Raumnutzungskonzepte
- Beteiligung der Bevölkerung an den erwirtschafteten Gewinnen
- Überwindung der reinen Funktion von Rohstoffbereitstellern, partnerschaftliche Verbindung mit lithiumreichen Staaten und Aufbau von Wertschöpfungsketten vor Ort
- Langfristig: Eindämmung der Lithiumnachfrage und Etablierung funktionierender Recyclingmechanismen
- Verhinderung von Menschenrechtsverletzungen und transparente Informationen über die gesamte Produktkette hinweg, möglichst durch gesetzliche Verpflichtungen
- statt Verkehrswende mit alternativen Antrieben hin zur Mobilitätswende mit Reduktion von motorisiertem Individualverkehr und Ausbau von öffentlichem Verkehr und nicht-motorisierten Transportmitteln (vgl. Brot für die Welt 2018: 27f.).

Zusammenfassend kann aus den obigen Ausführungen geschlossen werden, dass die potenziellen Umweltwirkungen einer möglichen Verstärkung der Lithiumextraktion vermehrt negative lokale Impacts befürchten lässt. Im folgenden Abschnitt werden die Kernergebnisse aufgezeigt und die Forschungsfrage 2 beantwortet.

²⁹ Dies zeigt sich beispielsweise recht deutlich in den jährlich erscheinenden Mineral Commodity Summaries des U.S. Geological Survey: Wurden Chinas Reserven und Ressourcen für das Jahr 2018 noch mit 3,2 Mio. bzw. 7 Mio. t beziffert, so waren es für 2019 nur noch 1 Mio. bzw. 4,5 Mio. t Lithium (vgl. Jaskula 2018: 99; Jaskula 2019: 99).

6.3) Zwischenfazit und Ergebnis Forschungsfrage 2

Aus Abschnitt 6.2 kann die zweite Forschungsfrage der vorliegenden Arbeit nun beantwortet werden.

Fragestellung 2:

Welche potenziellen Auswirkungen hätte ein Ausbau der Produktionskapazitäten auf lithiumreiche Länder?

Wie Kapitel 6 deutlich aufzeigt, sehen sich lithiumreiche Staaten mit vielschichtigen Auswirkungen von möglichen Produktionssteigerungen konfrontiert, die folgend in ökonomische, ökologische und soziale Themenbereiche eingegliedert werden:

Ökonomisch herausfordernd könnte es werden, mögliche Profite aus der Rohstoffgewinnung gegen potenzielle Umweltfolgen abzuwägen. Vor allem in Ländern, in denen die Bevölkerung der rohstoffreichen Regionen arm ist, wird diese Entscheidung schwierig zu treffen sein. Gleichzeitig ist mit starken Widerständen zu rechnen, wenn die Lithiumgewinnung die Lebensgrundlagen der Ortsansässigen beeinträchtigt, beispielsweise durch übermäßig hohe Wasserverzehrung. Darüber hinaus sind bei unklaren Ansprüchen auf die Nutzungsrechte, oder wenn ein Abbau ohne Partizipation, Gewinnbeteiligung und partnerschaftliche Bündnisse mit der lokalen Bevölkerung erfolgt, Konflikte sehr wahrscheinlich. Positiv könnte sich eventuell ein Ausbau der Infrastruktureinrichtungen, etwa auf den Tourismus, auswirken.

Der bereits genannte hohe Wasserbedarf bei der Herstellung von Akkumulatoren könnte negative ökologische Folgen bei einer Ausweitung der Produktionskapazitäten für Lithium in den rohstoffreichen Ländern nach sich ziehen. Lokal betrachtet sind hier vor allem Chile und Bolivien zu nennen, wo dieser Impact sehr ausgeprägt auftreten könnte. Die starke Wasserverzehrung und die Versalzung könnten lokale Biotope zum Kippen bringen, etwa die Bofedales, Weideflächen für Kameliden. Damit würde eine Lebensgrundlage der ansässigen Bevölkerung zerstört. Auch der Lebensraum für Prokaryoten bzw. Halobakterien, der durch ein spezielles Mikroklima in Salzseen entsteht, ist damit gefährdet. Darüber hinaus mindert der hohe Wasserverbrauch die Menge an Trinkwasser, die zur Verfügung steht. Zu nennen sind desweiteren mögliche Verunreinigungen mit Chemikalien sowie umfassende Flächenverbräuche. Im Fall von China hat die exzessive Nutzung der Vorkommen bereits zu einer verringerten Tragfähigkeit derselben geführt, was durch fehlende Altstoffsammelsysteme verschärft wird und auch durch umfassendes Recycling nicht mehr abgedeckt werden kann (siehe Abschnitt 6.2).

In sozialer Hinsicht sind vor allem Ungleichgewichte der fraglichen Länder auf internationaler, regionaler und/oder lokaler Ebene zu nennen. Dies kann beispielsweise Schwierigkeiten bei der Marktpositionierung oder gegenläufige Interessen unterschiedlicher Stakeholdergruppen, aber auch ungleich verteilte Informationsflüsse bedeuten. Im Fall von Bolivien ist eine Gewinnung von Lithium mit der Hoffnung auf den Abbau postkolonialer Strukturen verbunden. Darüber hinaus strebt die ansässige Bevölkerung nach Verbesserung ihrer Lebensbedingungen durch den Rohstoff, beispielsweise mittels Gründung einer ‚Lithiumuniversität‘ und die Schaffung höher qualifizierter Arbeitsplätze. Dies würde bedingen, dass die umfassenden Vorkommen so genutzt werden müssten, dass diese Erwartungen erfüllt werden, da anderenfalls mit Widerständen gerechnet werden kann.

Wie sich zeigt, gibt es also bereits in starken Produktionsländern negative Impacts, beispielsweise in China mit übermäßiger Ausbeutung der Vorkommen oder in Chile durch die hohe Wasserzehrung. Auch in Bolivien, das aktuell noch kein Lithium gewinnt, stehen Herausforderungen an, deren Handling im Fall eines Rohstoffabbaus sorgfältig abgewogen werden müssen.

Das Ergebnis von Forschungsfrage 1 zeigt, dass unter allen modellierten Szenarien mit unterschiedlichen Ausbaugraden für Elektromobilität die Versorgung mit Lithium als nicht gesichert erscheint. Dies ist dem hohen Bedarf, aber auch den nur geringen Anteilen von Lithium aus sekundärer Bereitstellung geschuldet. Entsprechend gilt abzuwägen, in welchem Ausmaß jahrelang gewachsene anthropogene Strukturen und Ökosysteme wie am Beispiel von Bolivien einem massiven und unkontrollierten Ausbau der Lithiumproduktion geopfert werden sollen.

Um negativen Impacts des Ausbaus von Produktionskapazitäten vorzubeugen, müssten einerseits Alternativen zu Lithium-Ionen-Speichern gefunden werden, die auf andere Rohstoffe zurückgreifen. Dies erfordert umfassende Investitionen in Forschung und Entwicklung und birgt darüber hinaus wiederum die Gefahr der Verschiebung der Rohstoffproblematik. Andere Technologien müssten also auch dahingehend kritisch geprüft werden.

Als zweite Option zur Abfederung negativer Auswirkungen einer gesteigerten Lithiumnachfrage an den Standorten primärer Produktion könnte ein deutlich umfassenderer Beitrag von Lithium aus Recycling dienen. Dazu müsste stärker als in den entworfenen Szenarien in die Erforschung geeigneter Verfahren sowie in die rasche Etablierung geeigneter Sammelsysteme und Einrichtungen investiert werden. Hier gilt ein Zeitraum von 10 Jahren, bis zur Ausschöpfung der Lebensdauer der ersten Fahrzeugakkus aus der Modellierung, der zur Verfügung

steht, um möglichst effiziente Recyclingeinrichtungen an den Start zu bringen. Bis dahin muss die Deckung des Bedarfs aus primären Quellen erfolgen.

Zuletzt sollen, sofern sich eine Erweiterung der Produktionseinrichtungen in diversen Abbau-ländern nicht vermeiden lässt, standortangepasste, individuelle Nutzungskonzepte gefunden werden. Diese müssen es ermöglichen, den Rohstoff Lithium unter Partizipation der ansässigen Bevölkerung mit möglichst geringen negativen ökologischen und sozialen Auswirkungen abzubauen.

Im abschließenden Resümee werden diese Erkenntnisse nochmals ausführlich erörtert (vgl. Kapitel 7).

7) Resümee und Ausblick

Angesichts der hinreichend bekannten Problematiken in Bezug auf die weltweit steigende Belastung mit Kohlendioxid und den damit verbundenen Herausforderungen für das Klima erscheint es hoch an der Zeit, den Transportsektor, der für einen großen Anteil der CO₂-Emissionen verantwortlich zeichnet, in die Verantwortung zu nehmen. Die Lösung erscheint auf den ersten Blick einfach: werden Fahrzeuge vom Antrieb mit konventionellen Verbrennungsmotoren auf elektrische Antriebsstränge umgestellt, verringert sich automatisch der Ausstoß klimaschädlicher Gase, sofern der verwendete Strom aus erneuerbaren Energieträgern gewonnen wird.

Jedoch ist diese, scheinbar offensichtliche und einfache Lösung zu kurz gegriffen. So wird für die Herstellung der, hier meist verwendeten, Lithium-Ionen-Akkumulatoren zur Speicherung der elektrischen Antriebsenergie im jeweiligen Fahrzeug eine große Menge an Lithium benötigt. Die Versorgung damit muss gewährleistet sein, um die Treibhausgasemissionen über eine groß angelegte Umstellung auf elektrisch betriebene Fahrzeuge senken zu können.

In einem ersten Schritt untersuchte die vorliegende Arbeit die Frage, inwiefern sich unterschiedliche Ausbaupfade für elektrisch betriebene Fahrzeuge auf die globale Lithiumnachfrage bis 2050 auswirken.

Dazu wurden nach einer umfassenden Darstellung des Rohstoffes selbst, der weltweiten Lagerstätten sowie der Anwendungsgebiete auf die Akku-Technologie eingegangen. Im Anschluss erfolgte eine Analyse der Entwicklung von Produktion und Preisen in den Jahren von 1999 bis 2018. Dabei wurden auch die Verschiebungen der Anteile unterschiedlicher Anwendungsgebiete genauer in den Blick genommen und Parallelen und Zusammenhänge mit der Entwicklung des weltweiten Ölpreises hergestellt. Auf Basis der vorangegangenen Ausführungen sowie bestehender Studien zu diesem Thema wurden drei Szenarien entwickelt, die die Grundlage für die Modellierung des weltweiten Lithium-Bedarfs bis 2050 bildeten.

Im gemäßigten Flat-Szenario wurde von einer moderaten Durchdringung des Marktes mit elektrisch betriebenen Fahrzeugen ausgegangen, vorrangig zurückzuführen auf fehlende politische Rahmenbedingungen. Der Anteil von Fahrzeugspeichern an der globalen Lithiumnachfrage wurde für dieses Szenario mit 47 % angenommen, die Recyclingquoten mit 28 % angesetzt. Das Strong-Szenario nahm eine stärkere Marktdurchsetzung mit unterschiedlichen Elektroautos an, die Nachfrage durch diese stellte in diesem Szenario immerhin 84 % des

globalen Bedarfs dar und die Sekundärgewinnung wurde mit 31 % beziffert. Da für Ambitious, das dritte Szenario, eine noch geringere globale Fahrzeugzahl angenommen wurde, waren hier nur 47 % des globalen Lithiumbedarfs auf die Verwendung in Fahrzeugspeicher zurückzuführen; aber nur 34 % des in den Autoakkus eingesetzten Lithiums wurde wiedergewonnen.

Unter Bezugnahme auf diese Kennzahlen kam die Modellierung zu folgenden Ergebnissen, die nochmals in Form der Tabelle 11 dargestellt werden:

Tabelle 11: Globaler Lithiumbedarf nach Anwendungsfeld in Mio. t, kumuliert bis 2050

	Flat	Strong	Ambitious
Fahrzeugspeicher	9,74	20,33	21,75
Sonstige Speichertechnologien	5,03	4,35	11,31
Restliche Anwendungen	7,63	8,59	16,73
GESAMT	22,40	33,27	49,79
Lithium aus Fahrzeug-Akku-Recycling	1,16	1,68	1,8

Quelle: Daten aus Modellierung, Darstellung: B.W.

Die ermittelten kumulierten Nachfragemengen für alle Anwendungen bis 2050 variierten also je nach Szenario von 22,40 über 33,27 bis hin zu 49,79 Mio. t an Lithium. Dem stehen aktuell wirtschaftlich gewinnbare Reserven von 14 Mio. t und Ressourcen von 62 Mio. t gegenüber (Stand im Jahr 2018, vgl. Jaskula 2019: 99). Kombiniert mit den nur geringen Mengen, die durch Recycling bereitgestellt werden können (1,16; 1,68 bzw. 1,8 Mio. t), wären die globalen Reserven in den Jahren 2041 (Flat); 2033 (Strong) bzw. 2032 (Ambitious) aufgebraucht.

Die Preisentwicklung der letzten Jahre (siehe Tabelle 5) lässt hoffen, dass in den kommenden Jahren zumindest ein Teil der aktuell noch als prinzipielle Ressourcen eingestufte Vorkommen zu bei der Gewinnung wirtschaftlich extrahierbaren Reserven³⁰ umwandeln lässt. Eine andere Möglichkeit wäre die Entwicklung günstigerer Produktionsverfahren, um die Herstellungskosten zu senken. In jedem Fall aber würde die ermittelte Menge große Teile der weltweiten Lithiumvorräte aufbrauchen, falls eine so geringe Menge an sekundärem Material wiedergewonnen wird wie aus der Modellierung errechnet. Zudem steht aus Fahrzeugspeichern rezykliertes Lithium erst ab dem Modellierungsjahr 11, also 2031, zur Verfügung, da die Akku-Lebensdauer von 10 Jahren mit einbezogen wird.

³⁰ Zur detaillierten Begriffsdefinition für 'Reserven' und 'Ressourcen' sei nochmals auf Abschnitt 2.2 verwiesen. Kurz gefasst – höhere Preise ergeben auch eine größere Menge an Rohstoffen, die ökonomisch sinnvoll produziert werden können.

Bei den errechneten Bedarfswerten hätte eine erhöhte Recyclingrate zwar deutliche, jedoch offensichtlich zu geringe Auswirkungen: Würde kaum realisierbare 95 % des in Fahrzeugakkus verwendeten Lithiums wiedergewonnen, würde dies folgende Mengen ergeben:

- Flat – 9,25 Mio. t
- Strong – 19,31 Mio. t
- Ambitious – 20,66 Mio. t

Gesetzt den Fall, dass das wiedergewonnene Lithium eher in anderen Anwendungsbereichen als für Akkumulatoren zum Einsatz käme (vgl. McManus 2012: 292f.), könnte der Bedarf für andere Einsatzbereiche als Speichertechnologien aus recyceltem Material gedeckt werden (siehe Tabelle 11). Jedoch bliebe die Nachfrage für sämtliche Speicher trotzdem derart hoch, dass die aktuell verfügbaren Reserven nicht ausreichen würden, sondern dass auf die Lithiumressourcen zurückgegriffen werden müsste (14,77 Mio. t für Flat; 24,68 Mio. t für Strong; 33,06 Mio. t für Ambitious; siehe auch Tabelle 10). Sofern sich die Nachfrage aus sonstigen Anwendungsgebieten nicht wie in der Modellierung entwickelt, sondern umfassender ausfällt, würde das die Situation im Hinblick auf die Ressourcenlage wiederum verschärfen³¹.

Ausgehend von diesen Annahmen würde dies bedeuten, dass es für die Sicherung einer stabilen Lithiumversorgung für alle Szenarien angemessen wäre, die Kapazitäten für die primäre Gewinnung von Lithium auszubauen.

Entsprechend wurden in einem weiteren Abschnitt der vorliegenden Arbeit die möglichen Auswirkungen von Produktionssteigerungen in lithiumreichen Ländern in den Blick genommen. Mit China, Chile, Argentinien und Bolivien wurden hier Informationen aus Staaten gesammelt, die sich in völlig unterschiedlichen Stufen der Lithiumgewinnung befinden. Während in China vor allem eine Ausreizung der Tragfähigkeit der lokalen Lithiumvorkommen zu beklagen ist, drohen bei einer stärkeren Ausbeutung der südamerikanischen Vorräte vielfältige Herausforderungen wie die Beeinträchtigung lokaler Wasserkreisläufe mit Störungen der vorhandenen Ökosysteme; aber auch soziale Auswirkungen wie etwa lokale Ungleichheiten zwischen den verschiedenen Regionen des Landes, divergierende Interessen von zahlreichen Stakeholdern oder der herausfordernde Abbau postkolonialer Strukturen. Nichtsdestotrotz erhofft sich die Bevölkerung in den lithiumreichen Staaten Südamerikas tendenziell eher positive Wirkungen wie den Ausbau der lokalen Infrastruktur sowie die Nutzung des Ressourcenreichtums zur

³¹ Hier sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Verhältnismäßigkeiten von Fahrzeugakkus zu allen weiteren Speichertechnologien bzw. zu sonstigen Lithium-Anwendungsfeldern entsprechend den Angaben von Angerer et al. (2009: 36 und 39) errechnet wurden.

Erreichung einer höheren Bildung und bessere Lebensbedingungen. Nur wenige Interessensgruppen kämpfen zum aktuellen Zeitpunkt gegen die Lithiumproduktion großer Konzerne in ihrem lokalen Umfeld an.

Ein Ausbau der Lithiumförderung sollte in Staaten mit bisher geringer Produktion aus der Sicht der Autorin nur dann in Erwägung gezogen werden, wenn dies ökologisch, ökonomisch und sozial nachhaltig erfolgen kann. Dies bedeutet viel Vorarbeit, beispielsweise im Sinne von Technikfolgenabschätzungen und Verträglichkeitsprüfungen vor Ort, bzw. die Beteiligung der ansässigen Bevölkerung.

Ansätze, die der Sicherung einer adäquaten Versorgung mit Lithium unter den ermittelten Nachfragezahlen dienen, erscheinen durchwegs als nicht zufriedenstellend:

- Recycling kann keine ausreichenden Mengen bereitstellen.
- Die Expansion von Fördereinrichtungen in lithiumreichen Staaten wird durch ökologische, ökonomische und soziale Herausforderungen erschwert.
- Eine Suche nach Substituten oder alternativen Technologien würde die Anforderung einer gesicherten Rohstoffversorgung voraussichtlich nur von einem Material zum anderen verschieben.

Demnach müssen Lithium-Ionen-Akkus als Speicher für die Energie in Elektroautos entweder als Übergangstechnologie dienen, bis eine besser geeignete Technologie für die Speicherung oder gar den individuellen Transport gefunden wird. Alternativ dazu kann der Personentransport via Elektroauto in ein weit umfassenderes Maßnahmenbündel integriert werden. Ein solches erscheint in seiner Vielfalt besser geeignet, um die Senkung von CO₂-Emissionen aus dem Verkehrssektor nicht allein der erfolgreichen Implementierung einer einzigen Technologie unterzuordnen. In Anbetracht des gewählten Rahmens der vorliegenden Arbeit, die rein Personenkraftwagen, nicht aber alle anderen elektrisch betriebenen Fahrzeuge untersucht, beziehen sich die folgenden Ideen für weitere Maßnahmen auf die Ebene des individuellen motorisierten Transports. Dabei sind sowohl politische Akteure und Arbeitgeberinnen als auch einzelne Personen in ihrem individuellen Handeln gefragt.

Ideen für Alternativen und Ergänzungen zum motorisierten Individualverkehr sind beispielsweise etwa:

- Stärkung öffentlicher Verkehrsmittel
- Schaffung einer ausreichenden Infrastruktur, auch in peripheren Lagen
- Adäquate Raumplanung (z.B. im Hinblick auf bestehende Versorgungsinfrastrukturen, leerstehende Gebäude und Siedlungsverdichtung)
- Nutzung alternativer Transportmittel zum motorisierten Verkehr, z.B. Fahrrad, Tretroller, Zu-Fuß-Gehen
- Bildung von Fahrgemeinschaften
- Carsharing-Konzepte
- Remote Working und Homeoffice statt täglichem Pendeln
- Bewusstseinsbildung von frühem Alter an, Sensibilisierung für den Einfluss individueller Lebensstile auf das große Ganze

Diese Vorschläge sollen Denkanstöße sein und müssten jeweils für sich auf ihre Eignung als Alternative, bzw. Ergänzung zum Transport mit Elektroautos geprüft werden. Es ist jedoch anzunehmen, dass wie in vielen Bereichen unseres Daseins einzelne Maßnahmen nicht geeignet sein, um Missstände einer jahrelangen exzessiven Fehlentwicklung schnell und umfassend zu bereinigen, ohne an anderer Stelle neue Herausforderungen mit sich zu bringen. Vielmehr ist ein Paradigmenwechsel weg von Wachstum hin zu einem angepassten, die Tragfähigkeit der Erde respektierenden Lebensstil vonnöten, um die Lebensgrundlagen auch für kommende Generationen auf einem adäquaten Qualitätslevel zu halten.

Literatur

- Adler, Bernhard (2017): Strategische Metalle - Eigenschaften, Anwendung und Recycling. Berlin [u.a.]: Springer.
- Angerer, Gerhard/Marscheider-Weidemann, Frank/Wendl, Matthias/Wietschel, Martin (2009): Lithium für Zukunftstechnologien. Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität. PDF-Dokument online verfügbar unter http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/n/de/publikationen/Lithium_fuer_Zukunftstechnologien.pdf (Zugriff am 20.07.2017).
- BGS – British Geological Survey (2016): Lithium. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=3100> (Zugriff am 06.01.2019).
- BMW (2019): BMW 225xe iPerformance Active Tourer. Eckdaten zum Modell online verfügbar unter <https://www.bmw.at/de/all-models/2-series/activetourer/2018/technische-daten.html#tab-10> (Zugriff am 05.01.2019).
- Boyden, Anna/Soo, Vi K./Doolan, Matthew (2016): The Environmental Impacts of Recycling Portable Lithium-Ion Batteries. In: Procedia CIRP 48. Jg., S. 188-193.
- BP (2020): Statistical Review of World Energy – all data, 1965-2018. Excel-Dokument online verfügbar unter <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/xlsx/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-all-data.xlsx> (Zugriff am 18.01.2020).
- Brandt, Klaus (2013): Einsatzfelder für Lithium-Ionen-Batterien. In: Korthauer, Reiner (Hg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin [u.a.]: Springer, S. 383-392.
- Brot für die Welt (2018): Das weiße Gold. Umwelt- und Sozialkonflikte um den Zukunftsrohstoff Lithium (=Analyse 84). PDF-Dokument online verfügbar unter https://info.brot-fuer-die-welt.de/sites/default/files/blog-downloads/bfdw_analyse_lithium-broschuere_report.pdf (Zugriff am 06.01.2019).
- Citroen (2019): C-Zéro. Eckdaten zum Modell online verfügbar unter <https://www.citroen.at/modelle/citroen/c-zero.html> (Zugriff am 05.01.2019).
- Dallinger, David/Doll, Claus/Gnann, Till/Held, Michael/Kley, Fabian/Lerch, Christian/Marscheider-Weidemann, Frank/Mattes, Katharina/Peters, Anja/Plötz, Patrick/Schröter, Marcus/Wietschel, Martin (2011): Gesellschaftspolitische Fragestellungen der Elektromobilität. PDF-Dokument online verfügbar unter http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/x/de/publikationen/elektromobilitaet_broschuere.pdf (Zugriff am 28.04.2017).
- Dewulf, Jo/Van der Vorst, Geert/Denturck, Kim/Van Langenhove, Herman/Ghyoot, Wouter/Tytgat, Jan/Vandeputte, Kurt (2010): Recycling rechargeable lithium ion batteries: Critical analysis of natural resource savings. In: Resources, Conservation and Recycling 54. Jg., H. 4, S. 229-234.

- DLR/Wuppertal Institut (2015): Begleitforschung zu Technologien, Perspektiven und Ökobilanzen der Elektromobilität. STROMbegleitung im Rahmen der Förderbekanntmachung Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM) des BMBF. Abschlussbericht des Verbundvorhabens an das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Förderkennzeichen: 13N11855 & 13N11856. PDF-Dokument online verfügbar unter https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/5966/file/5966_STROMbegleitung.pdf (Zugriff am 06.01.2019).
- Döring, Thomas/Aigner-Walder, Birgit (2017): Verkehrs-, umwelt- und raumbezogene Aspekte der Elektromobilität aus der Sicht des Nutzerverhaltens. In: Raumforschung und Raumordnung 75. Jg., H. 4, S. 339-353.
- ETH Zürich – Eidgenössische Technische Hochschule (2020): Water stress index (WSI) for use in water footprinting and endpoint characterization factors of water consumption for use in LCA. Excel-Dokument online verfügbar unter https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ifu/eco-systems-design-dam/documents/downloads/ei99/ifu-esd-EI99-CF_wat09.xlsx (Zugriff am 11.04.2020).
- Fachverband der Fahrzeugindustrie Österreichs (2019): Weltproduktion, -bestand (5.24) - Stand: April 2019. PDF-Dokument online verfügbar unter https://www.fahrzeugindustrie.at/fileadmin/content/Zahlen___Fakten/Statistikjahrbuch/Seite5.24_2019.pdf (Zugriff am 03.01.2020).
- Felgenhauer, Markus F./Pellow, Matthew A./Benson, Sally M./Hamacher, Thomas (2016): Economic and environmental prospects of battery and fuel cell vehicles for the energy transition in German communities. In: Energy Procedia 99. Jg., S. 380-391.
- Frondel, Manuel/Sommer, Stephan/Barabas, György/Schmidt, Torsten (2015): Niedrige Ölpreise: Ursachen, Wirkungen und Risiken. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 65. Jg., H. 5, S. 26-31.
- Giern, Sandra (2018): Lithiumbatterien. In: Kurth, Peter/Oexle, Anno/Faulstich, Martin (Hg.): Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Wiesbaden: Springer, S. 435-450.
- Glebe, Dirk (2008): Börse verstehen: Die globale Finanzkrise. Alle Informationen zur Wirtschaftskrise 2007-2009, dazu Geschichte und umfassendes Gesamtwissen zu den bisherigen Finanzkrisen dieser Welt. Ursachen, Auswirkungen, Reaktionen. Norderstedt: Books on Demand.
- Haferburg, Götz/Gröning, Janosch A./Schmidt, Nadja/Kummer, Nicolai-Alexeji/Erquicia, Juan C./Schlömann, Michael (2017): Microbial diversity of the hypersaline and lithium-rich Salar de Uyuni, Bolivia. In: Microbiological Research 199 Jg., S. 19-28.
- Hyundai (2019): IONIQ Plug-In. Eckdaten zum Modell online verfügbar unter <https://www.hyundai.at/Showroom/Cars/IONIQ-Plug-In.aspx> (Zugriff am 05.01.2019).
- IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung (2015): Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. Endbericht. PDF-Dokument online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3711_96_113_elektrofahrzeuge_umweltbilanz_bf.pdf (Zugriff am 05.01.2019).
- International Energy Agency (2010): Energy Technology Perspectives 2010. Scenarios & Strategies to 2050. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/etp2010.pdf> (Zugriff am 27.11.2018).

- International Energy Agency (2018): Global EV Outlook 2018. Towards cross-modal electrification. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://webstore.iea.org/global-ev-outlook-2018> (Zugriff am 05.01.2019).
- International Energy Agency (2019): Global EV Outlook 2019. Scaling-up the transition to electric mobility. PDF-Dokument online verfügbar unter https://webstore.iea.org/download/direct/2807?fileName=Global_EV_Outlook_2019.pdf (Zugriff am 27.01.2020).
- Janek, Jürgen/Adelhelm, Philipp (2013): Zukunftstechnologien. In: Korthauer, Reiner (Hg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin [u.a.]: Springer, S. 199-217.
- Jaskula, Brian W. (2009): Lithium. In: USGS – U.S. Geological Survey (Hg.): Mineral commodity summaries 2009. Washington: U.S. Geological Survey, S. 94-95. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2009/mcs2009.pdf> (Zugriff am 22.11.2018).
- Jaskula, Brian W. (2010): Lithium. In: USGS – U.S. Geological Survey (Hg.): Mineral commodity summaries 2010. Washington: U.S. Geological Survey, S. 92-93. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2010/mcs2010.pdf> (Zugriff am 22.11.2018).
- Jaskula, Brian W. (2011): Lithium. In: USGS – U.S. Geological Survey (Hg.): Mineral commodity summaries 2011. Reston: U.S. Geological Survey, S. 94-95. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2011/mcs2011.pdf> (Zugriff am 19.11.2018).
- Jaskula, Brian W. (2012): Lithium. In: USGS – U.S. Geological Survey (Hg.): Mineral commodity summaries 2012. Reston: U.S. Geological Survey, S. 94-95. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2012/mcs2012.pdf> (Zugriff am 19.11.2018).
- Jaskula, Brian W. (2013): Lithium. In: USGS – U.S. Geological Survey (Hg.): Mineral commodity summaries 2013. Reston: U.S. Geological Survey, S. 94-95. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2013/mcs2013.pdf> (Zugriff am 19.11.2018).
- Jaskula, Brian W. (2014): Lithium. In: USGS – U.S. Geological Survey (Hg.): Mineral commodity summaries 2014. Reston: U.S. Geological Survey, S. 94-95. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2014/mcs2014.pdf> (Zugriff am 19.11.2018).
- Jaskula, Brian W. (2015): Lithium. In: USGS – U.S. Geological Survey (Hg.): Mineral commodity summaries 2015. Reston: U.S. Geological Survey, S. 94-95. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2015/mcs2015.pdf> (Zugriff am 19.11.2018).
- Jaskula, Brian W. (2016): Lithium. In: USGS – U.S. Geological Survey (Hg.): Mineral commodity summaries 2016. Reston: U.S. Geological Survey, S. 100-101. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2016/mcs2016.pdf> (Zugriff am 19.11.2018).
- Jaskula, Brian W. (2017): Lithium. In: USGS – U.S. Geological Survey (Hg.): Mineral commodity summaries 2017. Reston: U.S. Geological Survey, S. 100-101. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2017/mcs2017.pdf> (Zugriff am 19.11.2018).

- Jaskula, Brian W. (2018): Lithium. In: USGS – U.S. Geological Survey (Hg.): Mineral commodity summaries 2018. Reston: U.S. Geological Survey, S. 98-99. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2018/mcs2018.pdf> (Zugriff am 14.10.2018).
- Jaskula, Brian W. (2019): Lithium. In: USGS – U.S. Geological Survey (Hg.): Mineral commodity summaries 2019. Reston: U.S. Geological Survey, S. 98-99. PDF-Dokument online verfügbar unter https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/mcs2019_all.pdf (Zugriff am 17.01.2020).
- Kesler, Stephen E./Gruber, Paul W./Medina, Pablo A./Keoleian, Gregory A./Everson, Mark P./Wallington, Timothy J. (2012): Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. In: *Ore Geology Reviews* 48. Jg., S. 55-69.
- Kia (2018): Niro. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://www.kia.com/at/prospekte-und-preislisten.ec07054c-1c8a-4b8b-9dea-3773594f2914/#> (Zugriff am 05.01.2019).
- Korthauer, Reiner (Hg.) (2013a): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Berlin [u.a.]: Springer.
- Korthauer, Reiner (2013b): Randbereiche in Entwicklung, Fertigung und Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. In: Korthauer, Reiner (Hg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Berlin [u.a.]: Springer, S. 271-273.
- Kurzweil, Peter/Dietlmeier, Otto K. (2018): *Elektrochemische Speicher. Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Rahmenbedingungen*. 2., akt. und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Kurzweil, Peter/Scheipers, Paul (2012): *Chemie. Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente*. 9., erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Lamp, Peter (2013): Anforderungen an Batterien für die Elektromobilität. In: Korthauer, Reiner (Hg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Berlin [u.a.]: Springer, S. 393-415.
- Leuthner, Stephan (2013): Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien. In: Korthauer, Reiner (Hg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Berlin [u.a.]: Springer, S. 13-19.
- Luidold, Stefan/Antrekowitsch, Helmut (2010): Lithium - Rohstoffquellen, Anwendung und Recycling. In: *World of Metallurgy - ERZMETALL* 63.Jg., H.2, S. 68-76.
- Maldonado Fonkén, Monica S. (2014): An introduction to the bofedales of the Peruvian High Andes. In: *Mires and Peat* 15. Jg., Art. 4, S. 1-13.
- McManus, M.C. (2012): Environmental consequences of the use of batteries in low carbon systems: The impact of battery production. In: *Applied Energy* 93. Jg., S. 288-295.
- Meisenzahl, Sonja/Sittig, Peter-Paul/Höck, Michael (2014): Zukunftstechnologie Lithium-Batterien - Technologie-Roadmap für Lithium-Gerätebatterien. In: *Chemie Ingenieur Technik* 86. Jg., H. 8, S. 1180-1186.
- Miehe, Robert/Schneider, Ralph/Baaij, Ferdinand/Bauernhansl, Thomas (2016): Criticality of Material Resources in Industrial Enterprises - Structural Basics of an Operational Model. In: *Procedia CIRP* 48. Jg., S. 1-9.

- Molina Carpio, Jorge (2007): Agua y recursos hidricos en el sudoeste de Potosí. PDF-Dokument online verfügbar unter [file:///C:/Users/weisbar/OneDrive%20-%20Hilti/Babsi%20Privat/Masterarbeit%20BOKU/Molina_AguaRH-SOPotosiFOBO-MADE%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/weisbar/OneDrive%20-%20Hilti/Babsi%20Privat/Masterarbeit%20BOKU/Molina_AguaRH-SOPotosiFOBO-MADE%20(1).pdf) (Zugriff am 17.04.2020).
- Munzke, Nina/Schwarz, Bernhard/Büchle, Felix/Barry, James (2017): Lithium-Ionen Heimspeichersysteme: Performance auf dem Prüfstand. Konferenz-Paper zum 32. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 08.-10.03.2017. PDF-Dokument online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/327202464_Li-Ionen_Heimspeichersysteme_Performance_auf_dem_Prufstand (Zugriff am 22.10.2018).
- Natkunarajah, Nirugaa/Scharf, Matthias/Scharf, Peter (2015): Scenarios For The Return Of Lithium-Ion Batteries Out Of Electric Cars For Recycling. In: Procedia CIRP 29. Jg., S. 740-745.
- Nissan (2019): Leaf. Eckdaten zum Modell online verfügbar unter <https://www.nissan.at/fahrzeuge/neuwagen/leaf/reichweite-aufladen.html> (Zugriff am 05.01.2019).
- Novinsky, Patrick/Glöser, Simon/Kühn, André/Walz, Rainer (2014): Modeling the Feedback of Battery Raw Material Shortages on the Technological Development of Lithium-Ion-Batteries and the Diffusion of Alternative Automotive Drives. A System Dynamics Approach. Im Rahmen der 32nd International Conference of the System Dynamics Society, Delft. PDF-Dokument online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Simon_Gloeser/publication/264556006_Modeling_the_Feedback_of_Battery_Raw_Material_Shortages_on_the_Technological_Development_of_Lithium-Ion-Batteries_and_the_Diffusion_of_Alternative_Automotive_Drives/links/53e737e90cf2fb74872187a1/Modeling-the-Feedback-of-Battery-Raw-Material-Shortages-on-the-Technological-Development-of-Lithium-Ion-Batteries-and-the-Diffusion-of-Alternative-Automotive-Drives.pdf?origin=publication_detail (Zugriff am 09.05.2017).
- Ober, Joyce A. (2001): Lithium. In: USGS – U.S. Geological Survey (Hg.): Mineral commodity summaries 2001. Washington: U.S. Geological Survey, S. 98-96. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2001/mcs2001.pdf> (Zugriff am 22.11.2018).
- Ober, Joyce A. (2002): Lithium. In: USGS – U.S. Geological Survey (Hg.): Mineral commodity summaries 2002. Washington: U.S. Geological Survey, S. 98-99. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2002/mcs2002.pdf> (Zugriff am 22.11.2018).
- Ober, Joyce A. (2003): Lithium. In: USGS – U.S. Geological Survey (Hg.): Mineral commodity summaries 2003. Washington: U.S. Geological Survey, S. 100-101. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2003/mcs2003.pdf> (Zugriff am 22.11.2018).
- Ober, Joyce A. (2004): Lithium. In: USGS – U.S. Geological Survey (Hg.): Mineral commodity summaries 2004. Washington: U.S. Geological Survey, S. 98-99. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2004/mcs2004.pdf> (Zugriff am 22.11.2018).
- Ober, Joyce A. (2005): Lithium. In: USGS – U.S. Geological Survey (Hg.): Mineral commodity summaries 2005. Washington: U.S. Geological Survey, S. 98-99. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2005/mcs2005.pdf> (Zugriff am 22.11.2018).

- Ober, Joyce A. (2006): Lithium. In: USGS – U.S. Geological Survey (Hg.): Mineral commodity summaries 2006. Washington: U.S. Geological Survey, S. 100-101. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2006/mcs2006.pdf> (Zugriff am 22.11.2018).
- Ober, Joyce A. (2007): Lithium. In: USGS – U.S. Geological Survey (Hg.): Mineral commodity summaries 2007. Washington: U.S. Geological Survey, S. 96-97. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2007/mcs2007.pdf> (Zugriff am 22.11.2018).
- Ober, Joyce A. (2008): Lithium. In: USGS – U.S. Geological Survey (Hg.): Mineral commodity summaries 2008. Washington: U.S. Geological Survey, S. 98-99. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2008/mcs2008.pdf> (Zugriff am 22.11.2018).
- Oberhuber, Nadine (2015): Der hohe Preis des billigen Öls. Zeit Online, 14.8.2015. Artikel online verfügbar unter <https://www.zeit.de/wirtschaft/2015-08/oelpreis-preissturz-china-konjunktur-erdoel-foerderlaender-gewinner-verlierer-venezuela-iran-russland-usa-saudi-arabien/komplettansicht> (Zugriff am 18.01.2020).
- Öko-Institut (2017a): Klimavorteil Elektromobilität? Handlungsempfehlungen zur Gestaltung des Beitrages der Elektromobilität zum Klimaschutz. Policy Paper. PDF-Dokument online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Klimavorteil_Elektromobilitaet_Diskussionspapier_2017.pdf (Zugriff am 05.01.2019).
- Öko-Institut (2017b): Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität. Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen. Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende. PDF-Dokument online verfügbar unter https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Synthesepapier_WEB.pdf (Zugriff am 31.10.2018).
- Pfister, Stephan/Koehler, Annette/Hellweg, Stephanie (2009): Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA. In: Environmental Science & Technology 43. Jg., H. 11, S. 4098-4104.
- Renault (2019): ZOE. Eckdaten zum Modell online verfügbar unter <https://www.renault.at/modellpalette/renault-modelluebersicht/zoe.html> (Zugriff am 05.01.2019).
- Sicius, Hermann (2016): Wasserstoff und Alkalimetalle: Elemente der ersten Hauptgruppe. Eine Reise durch das Periodensystem. Wiesbaden: Springer Spektrum.
- SignumBOX (2012): Signals for Decision Makers. Lithium-Consulting. Website verfügbar unter <http://www.signumbox.com/> (Zugriff am 06.01.2019).
- Sonoc, Alexandru/Jeswiet, Jack/Soo, Vie K. (2015): Opportunities to Improve Recycling of Automotive Lithium Ion Batteries. In: Procedia CIRP 29. Jg., S. 752-757.
- Spath, Dieter/Rothfuss, Florian/Herrmann, Florian/Voigt, Simon/Brand, Marius/Fischer, Susanne/Ernst, Thomas/Rose, Hannes/Loleit, Martha (2011): Strukturstudie BWe Mobil 2011. Baden-Württemberg auf dem Weg in die Elektromobilität. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://wiki.iao.fraunhofer.de/images/studien/strukturstudie-bwe-mobil-2011.pdf> (Zugriff am 05.12.2018).

- Speirs, Jamie/Contestabile, Marcello/Houari, Yassine/Gross, Robert (2014): The future of lithium availability for electric vehicle batteries. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 35. Jg., S. 183-193.
- Stamp, Anna/Lang, Daniel J./Wäger, Patrick A. (2012): Environmental impacts of a transition toward e-mobility: the present and future role of lithium carbonate production. In: *Journal of Cleaner Production* 23. Jg., H. 1, S. 104-112.
- Ströbele-Gregor, Juliana (2012): Lithium in Bolivien: Das staatliche Lithium-Programm, Szenarien sozio-ökologischer Konflikte und Dimensionen sozialer Ungleichheit. Research Network on Interdependent Inequalities in Latin America (=Working Paper Series; 13). PDF-Dokument online verfügbar unter http://www.diss.fu-berlin.de/docs/servlets/MCR-FileNodeServlet/FUDOCs_derivate_00000001977/13_WP_Stroebele_Gregor_online_dt.pdf (Zugriff am 19.06.2017).
- Swain, Basudev (2017): Recovery and recycling of lithium: A review. In: *Separation and Purification Technology* 172. Jg., S. 388-403.
- Thielmann, Axel/Sauer, Andreas/Wietschel, Martin (2015): Gesamt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/GRM-LIB.pdf> (Zugriff am 05.01.2020).
- Treffer, Frank (2013): Lithium-Ionen-Batterie-Recycling. In: Korthauer, Reiner (Hg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Berlin [u.a.]: Springer, S. 345-355.
- Umweltbundesamt (Hg.) (2014): Ökobilanz alternativer Antriebe - Elektrofahrzeuge im Vergleich. PDF-Dokument online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0440.pdf> (Zugriff am 05.01.2019).
- Unger, Nicole/Beigl, Peter/Salhofer, Stefan (2017): Elektrokleingeräte - Von der Sammlung zur Sekundärressource. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 69. Jg., H. 11-12, S. 428-436.
- United Nations Environment Programme (o.J.): Electric light duty vehicles. Artikel online verfügbar unter <https://www.unenvironment.org/explore-topics/transport/what-we-do/electric-mobility/electric-light-duty-vehicles> (Zugriff am 04.01.2020).
- Unterreiner, Lea/Jülch, Verena/Reith, Sören (2016): Recycling of Battery Technologies - Ecological Impact Analysis Using Life Cycle Assessment (LCA). In: *Energy Procedia* 99. Jg., S. 229-234.
- USGS - U.S. Geological Survey (2018): Mineral commodity summaries 2018. Reston: U.S. Geological Survey. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2018/mcs2018.pdf> (Zugriff am 07.11.2018).
- VDA – Verband der Automobilindustrie (2019): *Tatsachen und Zahlen (=83. Folge 2019)*.
- Vikström, Hanna/Davidsson, Simon/Höök, Mikael (2013): Lithium availability and future production outlooks. In: *Applied Energy* 110. Jg., S. 252-266.
- Vogel, Katrin (2016): Ein Stoff macht Zukunft. Zum sozialen Leben von Lithium am Salar de Uyuni, Bolivien. In: Exner, Andreas/Held, Martin/Kümmerer, Klaus (Hg.): *Kritische Metalle in der Großen Transformation*. Berlin [u.a.]: Springer, S. 197-216.
- Volkswagen (2018): Preisliste e-Golf & technische Daten. PDF-Dokument online verfügbar unter <https://www.volkswagen.at/e-golf/infomaterial> (Zugriff am 05.01.2019).

- Weißnegger, Barbara M. (2016): Seltene Erden und staatliche Rohstoffstrategien. Ein Vergleich von Export- und Importländern. Masterarbeit im Studienfach Geographie und Regionalforschung, Alpen-Adria-Universität Klagenfurt.
- Welt (2008): Finanzkrise drückt Ölpreis kräftig nach unten. Welt, 16.9.2008. Artikel online verfügbar unter <https://www.welt.de/finanzen/article2451374/Finanzkrise-drueckt-Oelpreis-kräftig-nach-unten.html> (Zugriff am 18.01.2020).
- Wiener Zeitung (2018): Kein Ertrag, aber börsennotiert. 20.1.2018, 22.29 Uhr. Artikel online verfügbar unter https://www.wienerzeitung.at/nachrichten/wirtschaft/unternehmen/1003411_Kein-Ertrag-aber-boersennotiert.html (Zugriff am 06.01.2019).
- Wuschke, Lutz/Jäckel, Hans-Georg/Borsdorff, Dennis/Werner, Denis/Peuker, Urs A./Gellner, Martha (2016): Zu mechanischen Aufbereitung von Li-Ionen-Batterien. In: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 161. Jg., H. 6, 267-276.
- Zeng, Xianlai/Li, Jinhui (2013): Implications for the carrying capacity of lithium reserve in China. In: Resources, Conservation and Recycling 80. Jg., S. 58-63.