

Dr.-Ing. Gerhard Angerer
Dr. Frank Marscheider-Weidemann
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Matthias Wendl
Prof. Dr. Martin Wietschel

Lithium für Zukunftstechnologien

Nachfrage und Angebot unter besonderer
Berücksichtigung der Elektromobilität

Karlsruhe, Dezember 2009

Projektergebnisse aus den Projekten

Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität FSEM

und

Innovationsallianz - Lithium-Ionen-Batterie (LIB2015)

Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Kontakt:

Fraunhofer ISI

Breslauer Str. 48

76139 Karlsruhe

Telefon 0721 / 6809-0

<http://www.isi.fraunhofer.de/>

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Abstract	3
1 Einleitung.....	5
2 Lithium-Synopse.....	7
3 Lithium-Bedarf in den einzelnen Verwendungen.....	12
3.1 Glas & Keramiken.....	12
3.1.1 Aktuelle Bedarfssituation	12
3.1.2 Künftiger Lithium-Bedarf für Glas & Keramiken.....	12
3.2 Batterien	13
3.2.1 Aktuelle Bedarfssituation	13
3.2.2 Künftiger Lithium-Bedarf in Batterien.....	14
3.3 Schmierfette	16
3.3.1 Aktuelle Bedarfssituation	16
3.3.2 Künftiger Lithium-Bedarf für Schmierfette	17
3.4 Aluminiumschmelzen.....	17
3.4.1 Aktuelle Bedarfssituation	18
3.4.2 Künftiger Lithium-Bedarf für das Aluminiumschmelzen	18
3.5 Luftaufbereitung.....	18
3.5.1 Aktuelle Bedarfssituation	18
3.5.2 Künftiger Lithium-Bedarf für die Luftaufbereitung	18
3.6 Künftiger Bedarf an Lithium aus den Hauptverwendungen	19
4 Recycling von Lithium-Batterien	20
4.1 Effizienz der Recycling-Kette.....	20
4.2 Künftige Entwicklung im Batterierecycling.....	22
4.3 Entwicklung künftiger Sammel- und Recyclingquoten.....	22

5	Angebotspotenzial von Sekundärlithium aus der Wiederverwertung Li-haltiger Abfallstoffe	24
5.1	Modellbeschreibung.....	24
5.2	Modellergebnisse.....	34
5.2.1	Szenario: Pluralismus	34
5.2.2	Szenario: Dominanz.....	37
6	Entwicklung von Lithium-Angebot und -Nachfrage.....	40
6.1	Analyse des Pluralismus-Szenarios.....	40
6.2	Analyse des Dominanz-Szenarios	42
6.3	Szenarien-Vergleich.....	45
6.4	Einordnung der Ergebnisse	47
7	Zusammenfassung & Ausblick	50
	Literaturverzeichnis	53
	Anhang.....	57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Lithium-Reserven nach Ländern (in 1000t Li), verändert nach (Roskill, 2009, S. 11)	8
Tabelle 2-2:	Versorgungssituation bei Lithium 2008	10
Tabelle 4-1:	Recycling-Effizienzen beschriebener Prozesse	21
Tabelle 5-1:	Senken der einzelnen Verwendungsarten.....	25
Tabelle 5-2:	Annahmen zum Recycling.....	31
Tabelle 5-3:	Verwendete Wachstumswerte [in % p.a.].....	32
Tabelle A-1:	Fahrzeugbestandsdaten 2000-2050, (wbc-sd, 2004).....	57
Tabelle A-2:	Neuzulassungen 2008-2033.....	58
Tabelle A-3:	Neuzulassungen 2034-2050.....	59

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Offene Fragen, Zahlen aus (Roskill, 2009, S. 157), (USGS, 2009)	6
Abbildung 2-1:	Lithium-Verwendungen in 2008, verändert nach (Roskill, 2009, S. 156)	11
Abbildung 4-1:	Berechnung der Effizienz der Recyclingkette, verändert (Umicore, 2009, S. 18)	20
Abbildung 5-1:	Neuzulassungsanteile – Szenario Dominanz	27
Abbildung 5-2:	Neuzulassungsanteile – Szenario Pluralismus.....	28
Abbildung 5-3:	Studien zu Neuzulassungen weltweit	29
Abbildung 5-4:	Fahrzeuganteile am Gesamtbestand [in %] – Pluralismus-Szenario	34
Abbildung 5-5:	Gesamt-Lithium-Verbrauch, Nachfrage nach Primärlithium und Anfall von Sekundärlithium [in t Li] – Pluralismus	35
Abbildung 5-6:	Verbrauchsmengen der einzelnen Verwendungsarten [in t Li] – Pluralismus	36
Abbildung 5-7:	Fahrzeuganteile am Gesamtbestand [in %] – Dominanz-Szenario	37
Abbildung 5-8:	Gesamt-Lithium-Verbrauch, Nachfrage nach Primärlithium und Anfall von Sekundärlithium [in t Li] – Dominanz	38
Abbildung 5-9:	Verbrauchsmengen der einzelnen Verwendungsarten [in t Li] – Dominanz	39
Abbildung 6-1:	Verwendungsarten kumuliert [in t Li] – Pluralismus.....	43
Abbildung 6-2:	Verwendungsarten kumuliert [in t Li] – Dominanz	44

Abkürzungsverzeichnis

bbf	Barrel
BEV	Battery-Electric-Vehicle
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
EPBA	European Portable Battery Association
Fz-Batterien	Fahrzeugbatterien
GM	General Motors
GRS	Gemeinsames Rücknahmesystem
HEV	Hybrid-Electric-Vehicle
ICE	Internal Combustion Engine
kWh	Kilowattstunde
OECD	Organisation for Economic Co-Operation and Development
PHEV	Plug-In-Hybrid-Electric-Vehicle
ppm	parts per million
PVDF	Polyvinylidenfluorid
UBA	Umweltbundesamt
USGS	U.S. Geological Survey
V2G	Vehicle to Grid

Verwendete chemische Elemente und Formeln

Al	Aluminium
Co	Kobalt
Cu	Kupfer
Fe	Eisen
H ₂ SO ₄	Schwefelsäure
HC	Kohlenwasserstoff
HCl	Salzsäure
K	Kalium
Li	Lithium
Li ₂ CO ₃	Lithium-Karbonat
Li ₂ O	Lithium-Oxid
LiCl	Lithium-Chlorid
LiCoO ₂	Lithium-Kobaltoxid
Mg	Magnesium
N	Stickstoff
NaNiCl	Natrium-Nickel-Chlorid
NaOH	Natriumhydroxid
Ni	Nickel
NiMH	Nickel-Metallhydrid
NO _x	Stickstoffoxide
Zn	Zink

Zusammenfassung

Im Zusammenhang mit den hohen Marktwachstumswerten für Elektrofahrzeuge wird immer wieder die Frage nach der Verfügbarkeit der hierfür notwendigen Rohstoffe kontrovers diskutiert. Im besonderen Interesse steht dabei der Rohstoff Lithium, der für die Fahrzeugbatterien benötigt wird. In der vorliegenden Arbeit wurde eine Abschätzung zum weltweiten Lithium (Li)-Verbrauch und -Angebot bis zum Jahr 2050 getätigt mit der Zielsetzung zu analysieren, ob hier tatsächlich signifikante Ressourcenengpässe zu erwarten sind.

Hierfür wurde ein Berechnungsmodell entwickelt, das ausgehend von den Verbräuchen der Haupt-Lithium-Verwendungsarten, wie in der Glas- und Keramik-Industrie oder bei Schmierfetten, im Jahr 2008 und deren jeweiligen Wachstumsprognosen, den künftigen Lithium-Bedarf abschätzt. Die Bedarfsentwicklung im Fahrzeugbatteriemarkt wurde mittels zweier Marktpenetrationsszenarien sehr detailliert betrachtet, weil diese die künftige Nachfrage nach Lithium dominieren kann. Ferner wurde die Menge des durch Recycling wiedergewonnenen Sekundärlithiums mit Hilfe von Sammel- und Recyclingquoten ermittelt. Im von der künftigen Anzahl an Elektrofahrzeugen gesehen gemäßigeren Pluralismus-Szenario werden, unter Berücksichtigung der Verwendung von recyceltem Material, bis 2050 ca. 51 % der weltweit vorhandenen Lithium-Reserven verbraucht sein. Dabei wurde auf eine niedrige Abschätzung der noch verfügbaren Lithium-Reserven zurückgegriffen. Die verwendete Menge an Sekundärlithium deckt hierbei etwa 25 % des Gesamtbedarfs, was die Relevanz von Recycling unterstreicht. Im zweiten Szenario, dem eine sehr schnelle und hohe Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen zugrunde liegt, kommt es trotz Wiederverwendung des Sekundärlithiums im Jahr 2045 zu einer Erschöpfung der Lithium-Reserven.

Die Reserven sind die mit heutigen Rohstoffpreisen und technischen Mitteln wirtschaftlich ausbeutbaren Lithium-Vorräte in der Erdkruste. Sie betragen nach Schätzung des (USGS, 2009) 6 Mio. t Lithium. Die Ressourcen dagegen erfassen auch bekannte Vorkommen, deren Ausbeutung gegenwärtig noch nicht wirtschaftlich ist. Sie betragen nach der gleichen Quelle etwa 14 Mio. t Lithium, andere renommierte Quellen schätzen sie noch deutlich höher ein auf 28 bis 30 Mio. t Lithium. Bezogen auf die geologischen Ressourcen nach der USGS-Schätzung werden im Pluralismus-Szenario gerade 20 % der geologischen Vorräte ausgebeutet, im Dominanz-Szenario 49 %.

Die Schlussfolgerung ist, dass selbst unter extremen Annahmen in den nächsten vier Jahrzehnten nicht mit einer Knappheit der Lithium-Reserven zu rechnen ist. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Lithium-Reserven sich auf wenige Länder fokussieren und einige wichtige davon derzeit nicht zu den geopolitisch stabilen Regionen zu zäh-

len sind (z. B. Bolivien). Auch wird beim Abbau von Lithium in bislang weitgehend unberührte Ökosysteme, beispielsweise die Salzseen in Südamerika und China, eingegriffen.

Aus Gründen des Erhalts der Rohstoffbasis sollte frühzeitig ein Recyclingsystem für Lithium etabliert werden. Aus einer längerfristigen Perspektive gesehen sollte weiterhin an der Entwicklung alternativer Batteriesysteme gearbeitet werden. Zusätzlich sind andere Rohstoffe im Rahmen der Elektromobilität darauf hin zu analysieren, ob es hier möglicherweise Engpässe gibt. Beispielsweise sind Kobalt, Kupfer, Indium oder Neodym Rohstoffe, die problematisch werden könnten. Hier besteht Forschungsbedarf.

Abstract

The availability of the necessary commodities for electric vehicles with regard to their high market growth predictions is currently a frequent theme of controversial discussions. At this the mineral Lithium, which is used in vehicle batteries, is in the point of interest. An estimation of the worldwide Lithium (Li)-consumption and –supply to the year 2050 was established in this study with the goal of analysing whether significant resource shortages are in fact to be expected.

A calculation model was therefore developed, which estimates the future Li-demand using the 2008 consumption of the main Li-consumers such as the glass- und ceramics-industry or lubricants and their respective industry growth rate predictions. As the vehicle battery market can dominate the future Li-demand its development was examined in detail using two market penetration scenarios. Moreover the amount of secondary Lithium which can be recovered through recycling was determined via collection- and recycling-quotas. In the, concerning the future number of electric vehicles, moderate Pluralismus-scenario about 51 % of the world Lithium-reserves will be consumed in 2050 under consideration of the employment of recycled material. At this a rather low assumption of the Li-reserves was applied. The gained amount of secondary Lithium covers about 25 % of the total Li-demand which underlines the importance of recycling. In the second scenario which displays a quick and thorough market penetration of electric vehicles the Lithium-reserves are already exhausted in 2045 in spite of the recirculation of secondary-material.

The reserves comprise the Li-supplies within the lithosphere which can be recovered under current commodity prices and state-of-the-art technical possibilities. Based on a (USGS, 2009) estimation they amount to 6 Mio. t. Lithium. The resources on the other hand also contain known sources which can't be economically exploited at the moment. They amount to approx. 14 Mio. t Lithium according to the above source whereas other noted sources, with (Roskill, 2009) among them, state them at 28 – 30 Mio. t Lithium. With regard to the geological resources of the USGS estimation just about 20 % of the geological occurrence is exploited in the Pluralismus-scenario, 49 % in the Dominanz-scenario.

The bottom line of this study is that even under extreme assumptions a Lithium-shortage is not to be anticipated within the next four decades. On the other hand the fact that the world Li-reserves are concentrated on very few countries of which some currently don't belong to geopolitically stable regions (e.g. Bolivia) has to be considered. Furthermore the mining of Lithium intervenes in up to now mostly untouched ecosystems such as the salt-lakes in South America and China.

For the preservation of the commodity base a working recycling system for Lithium has to be established in time. In a long-term perspective the development of alternative battery systems has to be promoted further. Additionally other raw materials have to be analysed on possible future shortages in the context of electro-mobility. Cobalt, copper, indium or neodymium for example are commodities which could cause trouble in future. At this research remains to be conducted.

1 Einleitung

Die globale Umstellung der Fahrzeug-Antriebskonzepte im Individualverkehr von den klassischen Verbrennungsmotoren hin zu alternativen Kraftstoffen und Antriebssystemen wird von großen Teilen der Politik als auch von Wissenschaft und Wirtschaft als sehr wahrscheinlich angesehen. Mit der schrittweisen Abkehr vom Verbrennungsmotor wird versucht, sich aus der Abhängigkeit vom Erdöl zu lösen. Weiterhin liegt gerade der politische Fokus bezüglich des Klimawandels und der immer größer werdenden Debatte um CO₂-Ausstoß und Abgas-Grenzwerte auf den Potenzialen umweltschonender Alternativen. Elektromobilität wird hier als eine sehr wichtige und vielversprechende Alternative angesehen.

Grundbaustein aller Fahrzeuge der Elektromobilität ist die Batterie. Sie liefert die Energie für das Starten und den Fahrbetrieb und kann zudem die beim Bremsvorgang freiwerdende Energie speichern. Gerade Lithium-Batterien werden für diese Anwendungen als am besten geeignet angesehen. Aufgrund seiner hohen Energie- und Leistungsdichte und dem damit verbundenen geringen Gewicht, eignet sich Lithium speziell um die Masse der Batterie, welche den Hauptfaktor beim Gewicht der Elektro- und Hybridfahrzeuge darstellt, auf ein Minimum zu reduzieren. Aus demselben Grund werden Lithium-Ionen-Batterien bevorzugt in Elektrokleingeräten, Laptops und Akku-Werkzeugen verwendet, deren Märkte derzeit enorme Zuwachsraten verzeichnen. Darüber hinaus findet Lithium aufgrund seiner chemischen Eigenschaften in einer Vielzahl weiterer Produkte Verwendung, wie z. B. in Glaskeramiken, Autoreifen, Pharmazeutika oder im Flugzeugleichtbau. Diesen stark wachsenden Bedarf für Lithium und Lithium-Komponenten gilt es künftig mit einem begrenzten Angebot aus natürlichen Ressourcen sowie aus dem Recycling zu decken. Lithium ist zwar überall auf der Erde in Gesteinen, Salzseen und im Meerwasser zu finden, jedoch ist eine kommerzielle Gewinnung derzeit hauptsächlich in Südamerika, Australien und China wirtschaftlich sowie technisch möglich.

Aufgrund des sich abzeichnenden künftig hohen Lithium-Bedarfs gibt es bereits zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Hinblick auf eine ökonomische Lithium-Gewinnung aus den natürlichen Ressourcen als auch durch das Recycling.

Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

Die oben genannten Aspekte geben Anlass zu folgenden Fragen (siehe Abbildung 1-1):

- Wie wird der künftige Lithium-Verbrauch verteilt sein?

- Kann man den stark steigenden Bedarf nach Lithium mit den vorhandenen Reserven decken?
- Welche Rolle kann hierbei aus Recycling gewonnenes Sekundärlithium einnehmen?

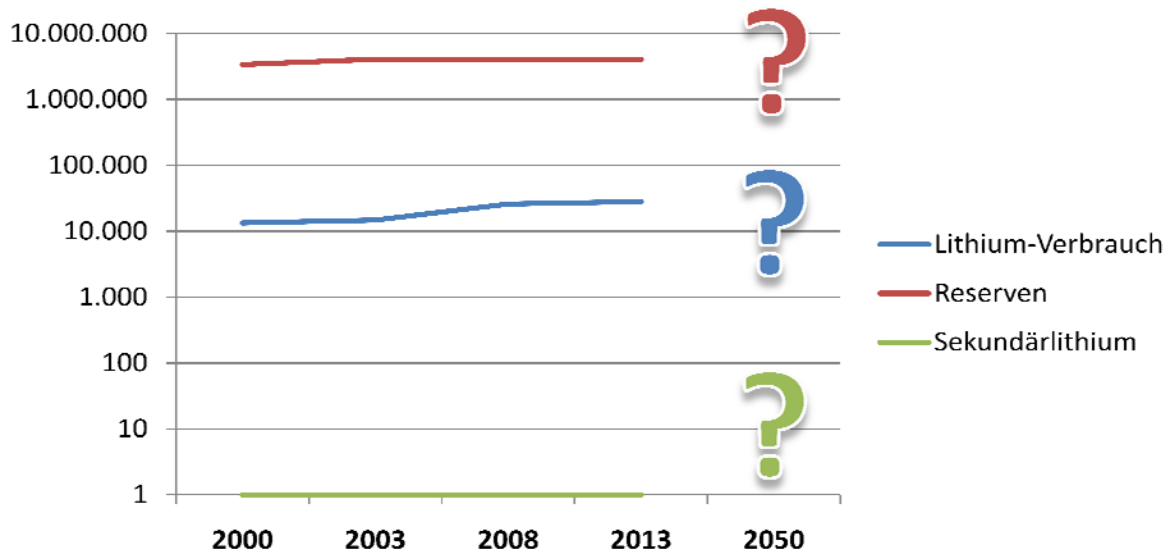


Abbildung 1-1: Offene Fragen, Zahlen aus (Roskill, 2009, S. 157), (USGS, 2009)

In der vorliegenden Arbeit soll daher der künftige Lithium-Bedarf sowie das Potenzial der Gewinnung von Sekundärlithium aus dem Recycling abgeschätzt werden. Es wird ein Modell entwickelt, welches die künftigen Verbrauchsmengen aus den aktuellen Lithium-Verwendungen und aus Vorhersagen zur weiteren Wirtschaftsentwicklung berechnet und den aus dem künftig zu erwartenden Abfall erhältlichen Anteil an Sekundärrohstoff kalkuliert.

Da die Batterien den Hauptanteil des Lithium-Verbrauchs ausmachen werden, wird die Entwicklung der Nachfrage nach Fahrzeugbatterien, welche große Lithium-Mengen benötigen, gesondert betrachtet. Hierfür werden Prognosen für die künftige Entwicklung der Neufahrzeugzulassungen herangezogen. Als Reichweite der Berechnungen wird der Zeitraum von 2008 bis 2050 gewählt.

2 Lithium-Synopse

Ein kurzer Überblick zu Eigenschaften und Produktion von Lithium wird in (Wendl, 2009) gegeben. Die Lithium-Vorkommen in der Erdkruste werden zwischen 20 und 60 ppm (parts per million) angegeben, während die Lithium-Konzentration im Meerwasser 0,18 ppm beträgt. Lithium kann in vielen Gesteinen und Lösungen gefunden werden, allerdings meist in geringer Konzentration.

Kommerziell abgebaut wird Lithium heute hauptsächlich in Form von Mineralen oder Solen in Minen bzw. Salzseen. Die Nutzung von Lithium-haltigem Lehm, sowie die Lithium-Gewinnung aus dem Abwasser von Geothermie-Kraftwerken sind derzeit lediglich im Entwicklungsstadium.

In der Bewertung der Rohstoff-Vorkommen unterscheidet man zwischen Reserven, Reservebasis und Ressourcen:

Die Ressourcen umfassen die Menge eines festen, flüssigen oder gasförmigen Materials in der Erdkruste, aus welcher der wirtschaftliche Abbau des Rohstoffs aktuell oder potenziell möglich ist. Diese setzt sich sowohl aus verifizierten Messungen als auch aus Schätzungen, basierend auf geologischen Hinweisen, zusammen.

Die Reservebasis ist der Teil der Ressourcen, der festgelegte, durch die aktuellen Abbau- und Produktionsmethoden hervorgerufene, physikalische und chemische Mindestanforderungen erfüllt. Sie muss durch eine Mindestanzahl an Proben und Messungen nachgewiesen werden, deren gegenseitige Entfernung eine Gewissheit über gleichbleibende Bedingungen zwischen den Messpunkten sicherstellt.

Die Reserven sind der Teil der Reservebasis, die zum Betrachtungszeitpunkt mit aktuellen wirtschaftlichen und technischen Mitteln gefördert werden kann. Dies muss jedoch nicht heißen, dass bereits die notwendige Infrastruktur zum Abbau vorhanden sein muss. Sie bezieht sich lediglich auf förderbares Material. (USGS, 2009, Appendix C).

Verglichen mit der aktuellen Lithium-Produktion sind die gefundenen Reserven sehr hoch. So liegen z. B. in Bolivien bisher nicht abgebaute Sole-Reserven von beträchtlicher Größe und auch in China befindet sich der kommerzielle Lithium-Abbau gerade erst im Anfangsstadium. Unterirdische Solen bzw. das Meer haben zwar einen geringen Lithium-Gehalt, jedoch ist deren Masse und somit die Masse des eingeschlossenen Lithiums sehr groß. Des Weiteren wurden in Australien, Frankreich, Indien, Mozambique, Schweden und der Ukraine Lithium-Mineralen gefunden und bereits abgebaut.

In Tabelle 2-1 sind die Lithium-Reserven und die Reservebasis der einzelnen Länder, wie sie in (USGS, 2009) angegeben werden, aufgeführt. Diese werden den in (Roskill, 2009) genannten Werten gegenübergestellt.

Tabelle 2-1: Lithium-Reserven nach Ländern (in 1000t Li), verändert nach (Roskill, 2009, S. 11)

Land	USGS Reserven	USGS Reservebasis	Roskill Reserven
Argentinien	2.000 ²	2.000 ²	6.000
Australien	170	220	190
Bolivien		5.400	5.500
Brasilien	190	910	50
Chile	3.000	3.000	6.800
China	540	1.100	5.400
Finnland			13
Irland			6 ¹
Israel			2.500 ¹
Kanada	180	360	151
Österreich			113
Portugal			10
Russland			81
Serbien			957 ¹
Spanien			72
USA	38	410	
Zimbabwe	23	27	
Gesamt	6.141	13.427	27.843

¹ – Ressourcen

² – Annahme analog (Tahil, 06, S. 3)

Hierbei ist zu beachten, dass die Werte der Länder Irland, Israel und Serbien als Ressourcen ausgewiesen sind. Somit betragen die „bereinigten“ Reserven bei Roskill 24.380 (in 1.000t Li). Weiterhin sind die Mengenangaben zu den Reserven in Argentinien bei (USGS, 2009) als nicht verfügbar aufgeführt. Da es sich hier jedoch um eine beträchtliche Menge handelt, welche für die späteren Berechnungen durchaus von Aussagekraft ist, werden sie, analog zu (Tahil, 06, S. 3), mit 2 Mio. t angenommen. Diese Zahl korrespondiert auch zu dem bei (Evans R. K., 2008, S. 9) angegebenen Wert von ca. 1,8 Mio. t Lithium.

In (Evans K. , 2008) werden die Lithium-Ressourcen auf 29.790 (in 1.000t Li) angegeben. Da es sich hierbei um die Ressourcen handelt, rechnet Evans auch z. B. Abwässer aus Geothermie-Kraftwerken und den Abbau von Jadarit mit ein.

Man erkennt in Tabelle 2-1, dass gerade in Bolivien und China noch beträchtliche, derzeit nicht förderbare Mengen Lithium als Reservebasis lagern. In Bolivien wird eine kommerzielle Ausbeutung der vorhandenen Lithium-Vorkommen bisher hauptsächlich von den geopolitischen Spannungen vor allem zwischen Bolivien als Rohstoffland und den USA als Technologielieferant und Importeur verhindert. Die Vorkommen in China liegen in schwer zugänglichen Gebieten im tibetischen Hochplateau, was eine Förderung bislang verhindert.

In diesen beiden Ländern sowie in Argentinien und Chile liegen die Lithium-Vorkommen in hochgelegenen Salaren, bisher weitgehend unberührten Ökosystemen deren Reaktion auf einen kommerziellen Lithium-Abbau bisher wenig erforscht ist.

Lithium-Metall wird mittels einer Elektrolyse aus geschmolzenem Lithium-Chlorid gewonnen. Der theoretische Energieverbrauch dieses Elektrolysevorgangs liegt bei 14,2 kWh pro kg Li, allerdings liegt die tatsächlich benötigte Energiemenge bei ca. 28-32 kWh pro kg Li. Die Effizienz dieses Prozesses liegt derzeit bei ca. 90 % (Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 2005)

Eine steigende Nachfrage und die daraus folgenden steigenden Preise werden zu einer vermehrten Suche und Erschließung neuer Lithium-Abbaugebiete führen, so dass die Kalkulation der Reserven in der Zukunft erneut überarbeitet werden muss. (Roskill, 2009, S. 10)

So könnten Spodumen und andere, bislang als unökonomisch eingestufte Lithium-Quellen, künftig durchaus wirtschaftlich nutzbare Lithium-Vorräte darstellen. (Amadee + Company, 2009, S. 45)

Betrachtet man z. B. die in den Mineral Commodity Summaries in (USGS, 2009) angegebenen Werte für die Lithium-Vorräte, so kann man eine Erhöhung des als Reservebasis angegebenen Wertes von 12 % zwischen dem Jahr 1996 und 2002 und dann erneut von 17 % zwischen 2002 und 2008 erkennen.

Die Versorgungssituation für Lithium im Basisjahr 2008 ist Tabelle 2-2 dargestellt. Mit dem Herfindahlindex misst man, wie stark die vorhandenen Reserven auf einzelne Länder konzentriert sind. Ein Index von $>0,18$ steht bereits für eine sehr starke Konzentration. Für seine Berechnung werden die Zahlen, die in (Roskill, 2009, S. 11) als Reserven angegeben sind, hergenommen. Hierbei werden die Länder Irland, Israel und Serbien aus der Berechnung ausgenommen, da deren Lithium-Vorkommen in (Roskill, 2009, S. 11) als Ressourcen ausgewiesen sind. Der Index verdeutlicht eine starke Konzentration der großen Reserven auf wenige Länder. Bei einer gleichbleibenden jährlichen Produktion von 22.810 t wie im Basisjahr würde die statistische Res-

sourcenreichweite, basierend auf den Ressourcenangaben von(USGS, 2009), 614 Jahre betragen.

Tabelle 2-2: Versorgungssituation bei Lithium 2008

Reserven:	6.141.000 t (USGS, 2009), (Tahil, 06)
Ressourcen:	13.800.000 t (USGS, 2009)
Statistische Reservenreichweite:	270 Jahre
Statistische Ressourcenreichweite:	614 Jahre
Wichtige Förderländer:	Argentinien, Australien, Chile, China, USA
Länderkonzentration der Reserven:	0,18 (Herfindahlindex)

Um den antizipierten, steigenden Lithium-Bedarf decken zu können wurden bereits in vielen Ländern Maßnahmen zur Erweiterung der bestehenden Produktion bzw. zur Erschließung neuer Produktionsstätten getroffen. So werden für die Lithium-Gewinnung aus Solen die Kapazitäten in Argentinien, Chile und China erweitert und neue Minen in China erschlossen. In Australien, China und Finnland wird zudem der Abbau von Lithium-Mineralen gesteigert. Laut (Anderson, 2009, S. 17) werden diese „Pipeline Projekte“ in der Summe bis zum Jahr 2017 ca. 18 % der gesamten Lithium-Produktion abdecken.

Die Nutzung von Lithium ist vielfältig. Es wird direkt in der Glas & Keramikproduktion, als Kathode und Leitsalz in Sekundärbatterien, in Aluminiumlegierungen im Flugzeugbau oder in Pharmazeutika zur Behandlung von Depressionen verwendet. Für den weltweiten Lithium-Verbrauch wird eine Steigung um 6 % vom Jahr 2000 bis 2008 geschätzt. Hauptsächlich wurde Lithium in 2008 in der Glas- & Keramikindustrie verwendet (37 %). An zweiter Stelle steht die Batterieherstellung, die 20 % des genutzten Lithiums verbrauchte, gefolgt von Schmierfetten mit 11 %. Abbildung 2-1 zeigt die prozentualen Anteile weiterer Produkte, die am Lithium-Verbrauch beteiligt sind.

Blickt man auf die Steigerung des Verbrauchs der einzelnen Verwendungen seit dem Jahr 2000, so kann man feststellen, dass in Zukunft die Batterien der Haupt-Lithium-Verbraucher sein werden. So stieg der Lithium-Verbrauch für Batterien um 22,1 % im betrachteten Zeitraum, wohingegen der für Glas & Keramiken lediglich um 2,8 % stieg. (Roskill, 2009, S. 157)

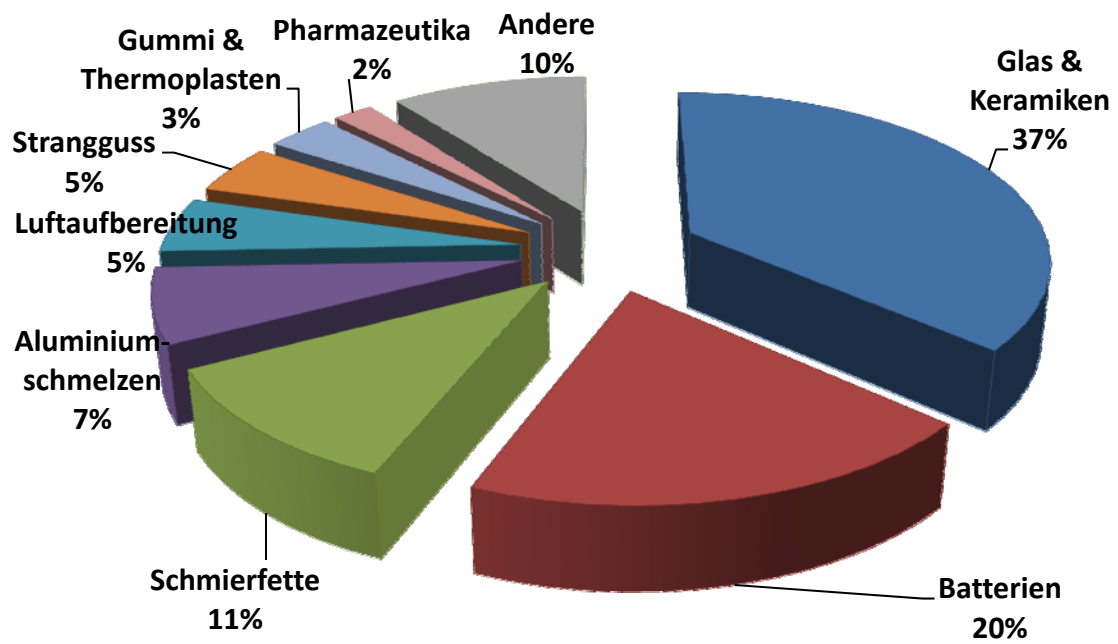


Abbildung 2-1: Lithium-Verwendungen in 2008, verändert nach (Roskill, 2009, S. 156)

3 Lithium-Bedarf in den einzelnen Verwendungen

Wie aus Abbildung 2-1 hervorgeht, fielen 80 % des weltweiten Lithium-Bedarfs im Jahr 2008 auf die fünf Verwendungen Glas & Keramiken, Batterien, Schmierfette, Aluminiumschmelzen und Luftaufbereitung. Aus diesem Grund wird im folgenden Kapitel näher auf diese eingegangen. Es wird jeweils die aktuelle Bedarfssituation skizziert sowie eine Prognose für die künftige Entwicklung der Lithium-Verwendung abgegeben.

3.1 Glas & Keramiken

Der Bereich Glas & Keramiken mit seinem Verbrauchsanteil von 37 % lässt sich weiter verfeinern in die Bereiche Glas, Keramik und Glas-Keramik. Glas umfasst die Produktion von Flaschenglas, Flachglas, Fiberglas und Spezialglas für LCD- bzw. CRT-Monitore. Zusammen machen diese vier Sparten 14 % des gesamten Lithium-Verbrauchs aus. Bei Keramik, mit einem Verbrauchsanteil von 16 %, handelt es sich um Sanitärprodukte, Fliesen und Geschirr. Der Bereich Glas-Keramik bezieht sich z. B. auf die Produktion von Ceran-Feldern, hitzebeständigen Ofenfenstern oder auch von Teleskopglas und umfasst weitere 7 % des gesamten Lithium-Verbrauchs.

3.1.1 Aktuelle Bedarfssituation

Derzeit werden sowohl Lithium-Mineralen als auch Lithium-Karbonat in der Glas-, Keramik- und Glas-Keramikherstellung verwendet. Mit einem Verbrauch von 10.000 t Li_2O (Li-Oxid) wurden im Jahr 2008 ca. 90 % der weltweit geförderten Lithium-Mineralen in diesem Sektor genutzt. Hinzu kommen weitere 16.600 t Li_2CO_3 (Li-Karbonat), was sich zusammen mit dem Li_2O auf einen reinen Lithium-Verbrauch von 7.760 t im Jahr 2008 beläuft. (Roskill, 2009, S. 194-195)

3.1.2 Künftiger Lithium-Bedarf für Glas & Keramiken

In den letzten zehn Jahren stieg die Glasproduktion um durchschnittlich 4,4 % p.a. und die Keramikproduktion sogar um 6,2 % p.a. Verglichen mit dem Wachstum des Welt-Bruttoinlandsprodukt (BIP) von rund 4,0 % p.a. verdeutlicht dies das überdurchschnittliche Wachstum dieses Sektors. Dies lässt sich auf den steigenden Wohlstand und die daraus folgende steigende Nachfrage nach Glas- und Keramikprodukten in Asien, Südamerika und im Mittleren Osten zurückführen.

Der zukünftige Lithium-Verbrauch für Glas & Keramiken hängt von einer Reihe unterschiedlicher Faktoren ab: (Roskill, 2009, S. 196-199)

- Generelle Entwicklung des weltweiten Wirtschaftswachstums

- Entwicklung der Energiekosten: Einsatz von Lithium senkt den Energiebedarf in der Herstellung
- Entwicklung der Umweltauflagen: Einsatz von Lithium senkt Energiebedarf und somit CO₂-Ausstoß
- Entwicklung der Lithium-Nachfrage: höhere Nachfrage führt zu höheren Preisen und somit zu geringerer Verwendung von Lithium in der Glas- und Keramikherstellung
- Neuentwicklungen in der Glas-, Keramik- und Glas-Keramik-Industrie

Je nach Kombination obiger Faktoren lassen sich unterschiedliche Szenarien für den künftigen Lithium-Bedarf für Glas- und Keramikprodukte erstellen. Geringes Wirtschaftswachstum kombiniert mit Lithium-Mangel aufgrund höherer Nachfrage in anderen Sektoren (wie z. B. Batterien) würde zu geringem Wachstum in der Lithium-Nachfrage für Glas- & Keramikprodukte führen. Erholt sich das Wirtschaftswachstum schneller als erwartet und gibt es zusätzliche neue Verwendungsarten von Lithium in Glas- & Keramikprodukten, würde dies den Lithium-Bedarf in diesem Sektor erhöhen.

(Roskill, 2009, S. 199) gehen in ihrer Studie von einem Wachstum des Lithium-Verbrauchs in der Glas & Keramikherstellung bis 2013 von 1,5 % p.a. im Worst-case-Szenario und von 5,5 % p.a. im besten Fall aus.

In einer weiteren bis auf das Jahr 2020 ausgelegten Studie von (Anderson, 2009, S. 14) wird von einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum des Lithium-Verbrauchs in der Glas- & Keramikindustrie von 2,3 % ausgegangen.

3.2 Batterien

Im Jahr 2008 machten Batterien 20 % des gesamten Lithium-Bedarfs aus und waren damit die Anwendung mit dem zweitgrößten Lithium-Bedarf. Aufgrund des enormen Wachstums der entsprechenden Märkte und dem großen Einsatzpotenzial von Batterien in Elektronik und im Fahrzeugbau wird dies jedoch künftig der Haupt-Lithium-Verbraucher werden.

Unterschieden wird zwischen Primär- und wiederaufladbaren Sekundärbatterien, wobei letztere 90 % des Lithium-Bedarfs für Batterien in 2008 ausmachten. (Roskill, 2009, S. 211)

3.2.1 Aktuelle Bedarfssituation

In Primärbatterien wird Lithium-Metall als Kathode verwendet. Laut einer Schätzung von (Roskill, 2009, S. 211) wurden im Jahr 2008 hierfür 245 t Lithium-Metall verbraucht.

Für die Herstellung der Anode und der Kathode in Lithium-Ionen Sekundärbatterien werden Li-Karbonat oder Lithium-Hydroxid verwendet. Li-Salze kommen bei der Herstellung des Elektrolyts zum Einsatz. Nach Betrachtung der jeweiligen Verbrauchsmengen für 2007 und Umrechnung auf die verbrauchte Menge an reinem Lithium, wurde von (Roskill, 2009, S. 234) für die Sekundärbatterien ein Lithium-Verbrauch von 3.940 t für das Jahr 2008 geschätzt.

3.2.2 Künftiger Lithium-Bedarf in Batterien

Bei der Bedarfsprognose für Batterien muss zwischen Primär- und Sekundärbatterien unterschieden werden.

Obwohl die Sekundärbatterien immer mehr Marktanteile von den Primärbatterien abgewinnen, haben letztere einen klaren Vorteil, der auch in Zukunft gewisse Marktanteile sichern wird: Primärbatterien verlieren wenig Energie bei der Langzeitlagerung und sind somit von besonderem Interesse für militärische Anwendungen und kommerzielle Energie-Backup-Systeme.

Der Verbrauch von Lithium-Metall in Primärbatterien steigt seit dem Jahr 2000 um jährliche 4 %, obwohl die pro Batterie eingesetzte Lithium-Menge aufgrund besserer Technologien sinkt.

Folgende Faktoren beeinflussen den künftigen Lithium-Verbrauch für Primärbatterien: (Roskill, 2009, S. 213)

- Generelle Entwicklung des weltweiten Wirtschaftswachstums
- Höherer Marktanteil im Zuge der Ersetzung von Alkali- und Zink-Karbon-Batterien durch Li-Metall Primärbatterien
- Ersetzung der Lithium-Primär- durch Lithium-Sekundärbatterien
- Weitere Verringerung der eingesetzten Lithium-Menge pro Zelle

In ihrem Worst-case-Szenario sowie im besten Fall gehen (Roskill, 2009, S. 213) in ihrer Prognose bis zum Jahr 2013 von einem Wachstum des Lithium-Bedarfs für die Primärbatterien von 1,2 % p.a. respektive 4,8 % p.a. aus. (Anderson, 2009, S. 11) geht bis 2020 von einem jährlichen Wachstum von 8 % in der Primärbatterie-Sparte aus.

Will man die künftige Entwicklung bei Sekundärbatterien betrachten, so muss man zwischen den bisherigen Verwendungen und den antizipierten Hauptverwendungen v.a. in der Elektromobilität unterscheiden.

Im Jahr 2007 machten Handys 47 % des Li-Ionen-Batteriemarktes aus, wohingegen Laptops mit 34 %, Akku-Werkzeuge mit 5 % und Digitalkameras mit 4 % auf den fol-

genden Rängen lagen. Der gesamte Lithium-Ionen-Batteriemarkt wuchs aufgrund des enormen Wachstums bei tragbaren Elektro-Artikeln in den Jahren 2000-2007 um 15 % p.a.. (Roskill, 2009, S. 226)

Trotz weltweiter Wirtschaftskrise sagen (Roskill, 2009, S. 235) ein weiteres Wachstum dieser Sparte von 7 % p.a. bis zum Jahr 2013 voraus. Hervorgerufen wird dies vor allem durch steigende Verkäufe von Netbooks, MP3-Playern und Handys, deren Märkte in Ländern wie China und Indien bislang noch nicht gesättigt sind. Ein noch stärkeres Wachstum von 12 % p.a. prognostiziert (Anderson, 2009, S. 11) in seiner bis 2020 ausgelegten Studie.

Einen entscheidenden Einfluss auf den künftigen Lithium-Verbrauch werden die Elektro- und Hybridfahrzeuge haben. Dies beruht auf der Tatsache, dass hier einerseits viel größere Lithium-Mengen pro Batterie benötigt werden und dass es sich andererseits um eine enorme Menge an Fahrzeugen handelt, die künftig mit Lithium-Technologie betrieben werden könnten.

Zunächst sind drei unterschiedliche Varianten an mit Lithium-Batterien ausgerüsteten Fahrzeugen zu unterscheiden:

- BEVs: Reine Elektrofahrzeuge, die komplett mit Hilfe einer Batterie angetrieben werden.
- HEVs: Hybridfahrzeuge, bei denen ein Elektromotor für den Stadtverkehr sowie ein Verbrennungsmotor für Spitzenlasten und Langstrecken eingebaut ist.(z. B. Toyota Prius)
- PHEVs: Plug-In Hybridfahrzeuge, bei denen die Batterie mittels eines Steckers von außen aufgeladen werden kann. Sie kombinieren einen zusätzlichen Verbrennungsmotor (wie bei HEVs) mit einer externen Auflademöglichkeit (wie bei BEVs).

Auf welcher der vorherrschenden drei Varianten in Zukunft der Schwerpunkt liegen wird, ist in verschiedenen Szenarien in der Literatur unterschiedlich dargestellt. Generell ist davon auszugehen, dass reine BEVs aufgrund ihrer geringen Reichweite lediglich in Nischenanwendungen wie z. B. innerhalb von Städten oder im Flottenverkehr (Postdienst) eine breite Anwendung finden werden. Da die PHEVs gerade erst in der Markteinführungsphase sind, dominieren zurzeit die HEVs den Elektromobilitäts-Markt. Allerdings geht z. B. (Anderson, 2009, S. 12) davon aus, dass der PHEV-Markt ab 2019 der Haupt-Lithium-Verbraucher im Transportsektor sein wird. (Roskill, 2009, S. 239) schätzen, dass bis 2013 BEVs, PHEVs und Elektro-Roller den Elektromobilitätsmarkt unter sich aufteilen, wobei hier die PHEVs den größten Anteil ausmachen werden. Ab dem Jahr 2017/2018 kommen, laut Expertenmeinungen, zusätzlich die Brennstoffzellenfahrzeuge auf den Markt (Geschka & Partner, 2009, S. 5). Diese können zusätzlich

mit einem Elektro- oder Verbrennungsmotor als Range-Extender ausgestattet sein, um die Reichweite zu erhöhen.

(Frost & Sullivan, 2009) beschreiben in ihrem Bericht zur BEV/HEV-Marktentwicklung folgende generelle positive und negative Einflussfaktoren auf die künftige Marktentwicklung:

- + weiterer Preisfall bei Lithium-Ionen-Batterien stärkt die Nachfrage
- + Entwicklung leistungsstarker Lithium-Ionen-Systeme schafft Möglichkeiten für Autofirmen
- + kontinuierliche Ablösung von Nickel-Metallhydrid(NiMH)- durch Lithium-Ionen-Batterien
- Sicherheitsbedenken bei großen Lithium-Ionen-Zellen
- Wirtschaftskrise beeinflusst Marktwachstum
- ungenügende Infrastruktur beeinflusst weitere Ausbreitung

Aufgrund dieser zahlreichen unterschiedlichen Gesichtspunkte, die den Einsatz von Lithium-Sekundärbatterien in der Elektromobilität beeinflussen, ist es schwierig eine eng eingegrenzte Prognose der künftigen Entwicklung abzugeben. (Roskill, 2009, S. 240) gehen deshalb bis zum Jahr 2013 im Worst-case-Szenario von einem Wachstum des Li-Bedarfs im Transportsektor von 44 % p.a. und im besten Fall von 69 % p.a. aus. Bringt man diese Werte mit den Prognosen für die tragbaren Elektrogeräte zusammen, so kommt man auf Wachstumsraten im Sekundärbatteriemarkt zwischen 10 % p.a. und 20 % p.a. Diese Zahlen spiegeln auch die Einschätzung von (Anderson, 2009, S. 11) wieder, der ein jährliches Wachstum, allerdings für den gesamten Batteriesektor, von 16 % bis zum Jahr 2020 vorhersagt. Als gesichert gilt allgemein jedoch, dass die Batterien künftig der Haupt-Lithium-Verbraucher sein werden. Ihr Anteil am Gesamtverbrauch, momentan bei 20 %, wird auf 27 % in 2013 (Roskill, 2009, S. 239) und sogar auf 42 % in 2018 (SQM, 2008, S. 31) geschätzt.

3.3 Schmierfette

Die Verwendung von Lithium als Additiv in Schmierfetten machte 11 % des gesamten Lithium-Verbrauchs im Jahr 2008 aus. Bei Lithium-Schmierfetten wird unterschieden zwischen konventionellen (einfachen) oder komplexen Fetten.

3.3.1 Aktuelle Bedarfssituation

Zur Produktion von Lithium-Schmierfetten wird Li-Hydroxid verwendet. Bei Annahme einer durchschnittlichen Lithium-Konzentration in den einfachen und komplexen Lithium-Fetten errechnete (Roskill, 2009, S. 250) für das Jahr 2008 einen Li-Hydroxid-

Verbrauch von ca. 14.500 t. Geht man von ca. 16.000 t gehandeltem Lithium-Hydroxid im Welthandel 2008 aus, so fallen demnach 90 % des gesamten Lithium-Hydroxid-Verbrauchs auf Schmierfette.

3.3.2 Künftiger Lithium-Bedarf für Schmierfette

Seit dem Jahr 2000 ist eine jährliche Steigerung von 5,8 % im Li-Hydroxid-Verbrauch festzustellen, was sich hauptsächlich auf die erhöhte Nachfrage in den BRIC-Ländern (Brasilien, Russland, Indien, China) zurückführen lässt.

Da Lithium-Schmierfette hauptsächlich in Fahrzeugen, Flugzeugen und Schiffen sowie in Maschinen, die diese produzieren, benötigt werden, ist deren Verbrauch stark an das Weltwirtschaftswachstum gekoppelt. Folgende Faktoren spielen für den künftigen Lithium-Hydroxid-Verbrauch in Schmierfetten eine Rolle: (Roskill, 2009, S. 250)

- Generelle Entwicklung des weltweiten Wirtschaftswachstums (entscheidend)
- Erhöhter Einsatz von komplexen Lithium-Fetten mit höherem Lithium-Hydroxid-Gehalt aus Qualitäts- und Haltbarkeitsgesichtspunkten
- Einsatz von Ersatzstoffen in Schmierfetten (wie z. B. Harnstoff) bei steigenden Lithium-Hydroxid-Preisen

Mit einem Wachstum des Lithium-Hydroxid-Bedarfs für Schmierfette von 2 % p.a. bzw. 4 % p.a. gehen (Roskill, 2009, S. 251) in ihrer Prognose bis zum Jahr 2013 in ihrem Worst-case-Szenario sowie im besten Fall von einem geringen Wachstum aus. Das von (Anderson, 2009, S. 14) geschätzte Wachstum um 3,0 % p.a. bis zum Jahr 2020 entspricht ebenso dieser Aussage.

Aufgrund der engen Kopplung des Bedarfs an Lithium-Schmierfetten mit dem Weltwirtschaftswachstum kann man eine zuverlässige Prognose bis zum Jahr 2030 abgeben: laut (OECD, 2008, S. 76) wird das Welt-BIP bis 2030 jährlich um durchschnittlich 2,8 % steigen. Diese Steigerung kann auch für den Lithium-Schmierfett-Bedarf angenommen werden.

3.4 Aluminiumschmelzen

Die Verwendung von Lithium-Karbonat bzw. Li-Chlorid beim Aluminiumschmelzen verursachte im Jahr 2008 einen Verbrauchsanteil von 7 % am gesamten Lithium-Verbrauch.

3.4.1 Aktuelle Bedarfssituation

Für das Jahr 2008 schätzte (Roskill, 2009, S. 262) den Verbrauch von Lithium-Karbonat für das Aluminiumschmelzen auf 8.000 t. Viele Schmelzwerke nutzten Lithium-Karbonat-Additive hauptsächlich um die Effizienz des Schmelzens zu erhöhen, wohingegen die Reduktion der Fluorid-Emissionen aufgrund des Einsatzes fortschrittlicher Filtersysteme immer mehr an Bedeutung verliert.

3.4.2 Künftiger Lithium-Bedarf für das Aluminiumschmelzen

Der Bedarf für Lithium-Karbonat beim Aluminiumschmelzen ist stark gekoppelt an den generellen weltweiten Aluminiumbedarf. Da der gesamte Lithium-Karbonat-Bedarf im Moment jedoch lediglich durch 12 % der Aluminium-Schmelzanlagen hervorgerufen wird, könnte es zu starken Bedarfssteigerungen kommen, falls die Anwendung von Lithium häufiger favorisiert werden sollte.

Nichtsdestotrotz geht (Anderson, 2009, S. 14) bei seiner Abschätzung bis zum Jahr 2020 von einem negativen Wachstum des Lithium-Verbrauchs beim Aluminiumschmelzen um -2,6 % aus. Dies ist womöglich auf den Einsatz besserer Filtersysteme für die Fluor-Abgase zurückzuführen, was die Anwendung von Lithium zur Fluorid-Emissions-Reduzierung überflüssig werden lässt.

3.5 Luftaufbereitung

Unter dem Oberbegriff Luftaufbereitung werden drei Teilbereiche zusammengefasst, die zusammen 5 % des Lithium-Bedarfs in 2008 ausmachten: die Absorptionskühlung unter Verwendung von Li-Bromid, die Luftentfeuchtung mit Lithium-Chlorid und die Luftreinigung mittels Lithium-Hydrid oder Lithium-Peroxid.

3.5.1 Aktuelle Bedarfssituation

Rechnet man den Verbrauch von Lithium-Bromid, Lithium-Chlorid und Lithium-Peroxid in Tonnen reines Lithium um, so kommt man auf einen geschätzten Gesamtverbrauch für Luftaufbereitung im Jahr 2008 von 1.100 t. (Roskill, 2009, S. 290)

3.5.2 Künftiger Lithium-Bedarf für die Luftaufbereitung

Aufgrund des Einsatzes nachwachsender Rohstoffe und neuer Technologien geht der Lithium-Verbrauch für die Luftentfeuchtung stetig zurück. Die Luftreinigung spielt ausschließlich in Nischenanwendungen eine Rolle und stellt deshalb nur einen geringen Teil des Lithium-Bedarfs. Die Absorptionskühlanlagen konnten jedoch seit dem Jahr

2001 ein Wachstum von 4,1 % aufweisen. Der Haupttreiber dieses Wachstums ist China, wo ca. 50 % aller Kühlanlagen auf Lithium-Bromid-Basis funktionieren. (Roskill, 2009, S. 280) Nur für den Teilbereich der Absorptionskühlanlagen sagt (Anderson, 2009, S. 14) bis zum Jahr 2020 ein Wachstum von 3,4 % voraus.

3.6 Künftiger Bedarf an Lithium aus den Hauptverwendungen

Tabelle 3-1 fasst die Wachstumsprognosen der künftigen Bedarfe in den Haupt-Lithium-Verwendungen aus den beiden betrachteten Studien zusammen. Geht man von einem Lithium-Verbrauch der fünf Hauptverwendungen von 16.925 t Li in 2008 aus (Roskill, 2009) und rechnet man dies mit den prognostizierten Wachstumsraten der einzelnen Verwendungen auf die Jahre 2013 bzw. 2020 hoch, so erreicht man im Jahr 2013 eine minimale Lithium-Nachfrage von 20.245 t und eine maximale Nachfrage von 26.561 t. Für das Jahr 2020 lassen sich mit den Wachstumsprognosen von (Anderson, 2009) 41.099 t als Lithium-Bedarf für die Hauptverwendungen errechnen. Daraus ergibt sich eine Nachfragesteigerung vom Basisjahr 2008 bis 2020 um durchschnittlich 7,67 % p.a.

Tabelle 3-1 Wachstumsprognosen der Hauptverwendungen [in %]

Verwendung	2008-2013 (Roskill, 2009)	2007-2020 (Anderson, 2009)
Glas & Keramiken	1,5-5,5	2,3
Batterien	k. A.	16,0
Primärbatterien	1,2-4,8	8,0
Gerätebatterien	7,0	12,0 ¹
Fahrzeuggbatterien	44,0-69,0	136,0
Schmierfette	2,0-4,0	3,0
Aluminiumschmelzen	0-4,6	-2,6
Luftaufbereitung	-1,4-2,6	3,4

k. A. – keine Angabe

¹Bei Anderson als Sekundärbatterien zusammen mit den Rundzellen betrachtet.

4 Recycling von Lithium-Batterien

Zwar hat Lithium eine Vielzahl unterschiedlicher Verwendungen, jedoch ist das Recycling des verarbeiteten Metalls am Ende der jeweiligen Lebensdauer nur in seltenen Fällen möglich bzw. wirtschaftlich. So gibt es z.Z. Recyclingkonzepte lediglich für Batterien und Geräte der Absorptionskühlung. Im letzteren Fall ist das Recycling des dort verwendeten Lithium-Bromids bereits gängige Praxis. Hierbei handelt es sich allerdings um so geringe Mengen an Lithium, dass dies in der vorliegenden Arbeit nicht gesondert betrachtet wird und die Konzentration im Folgenden auf der Gewinnung von Sekundärlithium aus Batterien und Akkumulatoren liegt. Im Batterierecycling gibt es zahlreiche unterschiedliche Vorgehensweisen. Prinzipiell wird unterschieden zwischen physikalischen Prozessen wie Zerkleinern, Wärmebehandlung, etc. und chemischen Prozessen wie z. B. Säurebehandlung. Diese einfachen Prozesse können jedoch lediglich einzelne Komponenten aus der Batterie gewinnen. Ein vollständiger Recyclingprozess besteht somit immer aus einer Kombination der einzelnen Verfahren. (Xu, 2008, S. 514)

4.1 Effizienz der Recycling-Kette

Will man die tatsächlich aus dem Recycling gewonnene Lithium-Menge bestimmen, ist die Effizienz der gesamten Recyclingkette zu betrachten. Hierbei spielt eine Vielzahl von Faktoren eine Rolle. Dr. Hagelücken aus der Recyclingfirma Umicore stellt dies in (Umicore, 2009) übersichtlich dar (siehe Abbildung 4-1).



Abbildung 4-1: Berechnung der Effizienz der Recyclingkette, verändert (Umicore, 2009, S. 18)

Zunächst ist die Sammelquote zu betrachten. Diese wird gemäß der EU-Richtlinie 2006/66/EG als „der Quotient aus dem Gewicht aller im betrachteten Kalenderjahr vom Mitgliedsstaat zurückgenommenen Geräte-Alt-Batterien und dem Durchschnitt der Ge-

wichte aller im betrachteten Kalenderjahr sowie in den zwei vorangegangenen Jahren an den Endnutzer verkauften Batterien“ definiert (Europäische Union, 2006, S. 5).

Für die Sammlung von Batterien und Akkus gibt es innerhalb der Europäischen Union klar vorgegebene Richtlinien (z. B. 2006/66/EG), die sukzessive bereits durch die einzelnen Mitgliedsstaaten in nationales Recht umgesetzt wurden. In Deutschland lag die Sammelquote für Batterien im Jahr 2008 laut (Stiftung GRS Batterien, 2009) bei 42 %.

Von der Menge an gesammelten Batterien müssen im Anschluss diejenigen abgezogen werden, die als nicht identifizierbar bzw. nicht recycelbar (Spezialbatterien) eingestuft werden. Hieraus ergibt sich die Verwertungsquote. Diese lag in Deutschland im Jahr 2008 bei 99 % (Stiftung GRS Batterien, 2009).

Die so zum Recycling freigegebenen Batterien und Akkus werden verschiedenen Recyclingverfahren unterzogen. Tabelle 4-1 gibt einen Überblick zu den Recycling-Effizienzen unterschiedlicher aktueller Verfahren. Weiterhin ist dargestellt, ob bereits eine kommerzielle Umsetzung des jeweiligen Prozesses besteht.

Tabelle 4-1: Recycling-Effizienzen beschriebener Prozesse

Recyclingverfahren	Recyclingeffizienz	kommerzielle Umsetzung
VAL'EAS-Prozess (Umicore)	80 %	ja
Tieftemperaturzerlegung (Toxco)	k.A.	ja
Verfahren der RWTH Aachen	80-90 %	in Planung
Verfahren von Shin et al. (2005)	bis zu 100 %	nein
Verfahren von Paulino et al. (2008)	90 %	nein
Europäisches Patent EP 1 981 115 A1	k.A.	nein

k. A. – keine Angabe

Die hier angegebenen Recycling-Effizienzen umfassen jeweils das Lithium-Rückgewinnungspotenzial des gesamten Prozesses, incl. Vorbereitung, Zerkleinern, Materialgewinnung etc.

Bei der Betrachtung der hohen Prozentzahlen für die Recyclingeffizienz fällt auf, an welcher Stelle in der Recyclingkette das größte Verbesserungspotenzial zu finden ist: um eine hohe Gewinnung von Sekundärlithium bzw. anderen Sekundärrohstoffen aus Batterien und Akkus zu gewährleisten, muss die Sammelquote weiter erhöht werden.

Für die großen Batterien der Elektro- bzw. Hybridfahrzeuge, welche auch große Mengen an Lithium enthalten, ist jedoch ein Verfahren ähnlich zu dem bereits bestehenden Austauschverfahren bei den bleihaltigen Starterbatterien denkbar. Hierbei werden europaweit bereits Sammelquoten von über 95 % erzielt. (Schmidt, 2005)

4.2 Künftige Entwicklung im Batterierecycling

Das Recycling von Lithium-Batterien zu kommerziellen Zwecken befindet sich im Moment erst in einem frühen Stadium. In Europa werden zwar bereits Lithium-haltige Batterien recycelt, wie z. B. bei Umicore in Belgien oder Battrec in der Schweiz, allerdings primär um das darin enthaltene wertvollere Kobalt zu gewinnen. Umicore verwendet z.Z. die bei ihrem VAL'EAS-Prozess gewonnene Lithium-haltige Schlacke in der Betonherstellung wieder, allerdings ist ein weiterer Ausbau der Anlagen und die Weiterentwicklung des Prozesses geplant, um auch Batterie-fähiges Lithium gewinnen zu können. (Tytgat, 2009)

Lediglich die Firma Toxco Inc. in British Columbia, Kanada, recycelt Lithium-Batterien mit dem ausschließlichen Ziel, das darin enthaltene Lithium wiederzugewinnen.

Betrachtet man jedoch das enorme Entwicklungspotenzial in der Elektromobilität und die damit verbundenen Nachfragemengen für Lithium, so scheint ein gezieltes Recycling der hier verwendeten Batterien sowohl ökonomisch als auch ökologisch unabdingbar. Aus diesem Grund werden die Forschungsanstrengungen diesbezüglich sowohl seitens der Industrie als auch seitens der Universitäten derzeit intensiviert. Hierbei sind allerdings künftig keine bahnbrechenden technologischen Neuerungen zu erwarten, was ein Blick auf die bereits sehr hohen Recycling-Effizienzen verrät. Vielmehr wird versucht, unterschiedliche schon bestehende Prozesse neu zu kombinieren, um ein möglichst effizientes und wirtschaftliches Ergebnis zu erlangen. (Georgi-Maschler, 2009)

4.3 Entwicklung künftiger Sammel- und Recyclingquoten

Die von (Stiftung GRS Batterien, 2009) mit 99 % für Deutschland angegebene Recyclingquote könnte auch weltweit zum Ziel der Länder und Batteriehersteller werden. Erste Schritte in diese Richtung wurden bereits in Japan mit einer einheitlich festgelegten Kennzeichnung der Batterietypen mittels eines Farbcodes getroffen. (Renz, 2001, S. 48)

Dieser ermöglicht die maschinelle Sortierung der Batterien vor dem Recycling und die durchgängige Identifizierbarkeit einzelner Batterietypen, was jeweils einen positiven Einfluss auf die Recyclingquote hat.

Die Sammelquote ist, wie bereits oben erwähnt, ein entscheidender Faktor bei der Wiedergewinnung von Lithium aus Batterien. Kampagnen, die das Bewusstsein der Bevölkerung im Hinblick auf Rückgabe und Recycling alter Akkus und Gerätebatterien schärfen und das Horten von Alt-Batterien vermeiden sollen, werden bereits von den

einzelnen gemeinsamen Rücknahmesystemen der Industriestaaten mit Hilfe unterschiedlicher Medien und Informationsveranstaltungen durchgeführt.

Im Zuge des immer größer werdenden Anteils von Elektro- und Hybridfahrzeugen am Gesamtmarkt müssen für die hier verwendeten großen Lithium-Batterien (sie enthalten je nach Batteriekapazität zwischen 2 und 6 kg Lithium) eigene Sammelkonzepte entwickelt werden. Denkbar wäre die bei Starterbatterien bereits gängige Methode des Austauschs unter Bezahlung eines Pfandbetrages.

Ein anderes, innovatives Projekt geht in eine völlig neue Richtung: so ist in dem vom ehemaligen SAP-Manager Shai Agassi gegründeten Projekt „Better Place“ ein Austausch entladener Batterien an Tankstellen vorgesehen. So umgehen die Nutzer den langwierigen Auflade-Prozess der Batterien und diese können nach entsprechender Alterung von den Tankstellen auch durch neue ersetzt werden. Dieses Projekt sieht den ausschließlichen Einsatz von Elektrofahrzeugen vor und ist bereits in Israel, Australien und Dänemark in der Testphase. (Better Place, 2009)

5 Angebotspotenzial von Sekundärlithium aus der Wiederverwertung Li-haltiger Abfallstoffe

5.1 Modellbeschreibung

Zur Berechnung des Angebotspotenzials von Sekundärlithium aus dem Recycling wird in der vorliegenden Arbeit die System Dynamics Methodik herangezogen. Diese dient zur Analyse von komplexen und dynamischen Systemen und wird bei wirtschaftswissenschaftlichen, naturwissenschaftlichen und gesellschaftlichen Problemstellungen angewendet. (Jochem, Schön, & al., 2004, S. 154-155)

„Das Konzept System Dynamics basiert auf der Erfahrung, dass bestimmte sozio-ökonomische Systeme in ihrer Komplexität intuitiv nicht zu verstehen sind. Um Handlungsfolgen besser abschätzen zu können, werden formale Modelle entwickelt, die das Verhalten aus den Wechselwirkungen der endogenen Variablen erzeugen (geschlossene Systeme). Die Ziele der Untersuchung sind dabei Auswirkungen gegenwärtiger Entscheidungen auf die zeitliche Entwicklung des künftigen Systems und dessen Umfeld aufzudecken sowie die Identifikation von nichtlinearen, dynamischen Verhaltensänderungen.“ (Jochem, Schön et al., 2004, S. 155)

Als Implementierungsprogramm wird hierbei das Ventana Simulation Environment, kurz Vensim verwendet. Es schafft die Möglichkeit, ausgehend von übersichtlichen Ablaufdiagrammen, komplizierte mathematische Gleichungen darzustellen, unterschiedliche Rahmenbedingungen zu berücksichtigen und dynamisch im Zeitverlauf zu verändern. Hierfür werden die vorgegebenen Modelle oder Ablaufschemas in aufeinanderfolgenden Abläufen vom Start- bis zum Zielpunkt (hier: vom Jahr 2008 bis 2050) durchgerechnet und die so errechneten Zwischenwerte in voreingestellten regelmäßigen Abständen (hier: jährlich) angegeben.

Für die vorliegende Arbeit werden zunächst die Abläufe und Funktionszusammenhänge des darzustellenden Modells in einem Flussdiagramm erarbeitet. Dafür werden die einzelnen Variablen durch Pfeile, welche Mengenströme bzw. Beziehungen zwischen den Endpunkten darstellen, logisch miteinander verknüpft. Anschließend werden für jede Variable ihre Funktion (Hilfs- oder Basisvariable), ggf. ihr Ausgangswert und ggf. eine Gleichung zu ihrer dynamischen Berechnung im Zeitverlauf definiert.

Das Modell nimmt die acht Hauptverwendungen von Lithium im Jahr 2008 als Ausgangspunkt der Berechnungen. Dies sind Glas & Keramiken, Aluminiumschmelzen, Strangguss, Gummi & Thermoplasten, Luftaufbereitung, Batterien, Schmierfette und Pharmazeutika. Die Batterien sind wiederum in Fahrzeugbatterien, Gerätebatterien, Rundzellen und Primärbatterien untergliedert. Alle restlichen Verwendungsarten, wie

z. B. Einsatz im Flugzeugleichtbau oder in Farbstoffen, werden unter Sonstige zusammengefasst. Die aufgezählten Verwendungen lassen sich zunächst in drei Kategorien unterteilen:

1. Produkte werden nach Ablauf der Lebensdauer beseitigt; eine Gewinnung von Lithium ist technisch oder/ und wirtschaftlich nicht realisierbar: *Glas & Keramiken, Aluminiumschmelzen, Strangguss, Gummi & Thermoplasten* und *Sonstige*.
2. Nach Ablauf der Lebensdauer kann Lithium durch Recycling wiedergewonnen werden: *Luftaufbereitung* und *Batterien*.
3. Produkte und das in ihnen enthaltene Lithium werden bei der Verwendung verbraucht: *Schmierfette* und *Pharmazeutika*.

Im Modell werden generell Mengen (in t Li) betrachtet. Lediglich bei der Anzahl an Fahrzeugen werden Stückzahlen zur Berechnung herangezogen (siehe unten).

Aus den oben definierten Kategorien folgen direkt die drei unterschiedlichen Senken für das verwendete Lithium: „Beseitigung“, „Sekundärlithium“ und „dissipative Nutzung“ (siehe Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1: Senken der einzelnen Verwendungsarten

Verwendungsart	Senke
Aluminiumschmelzen	Beseitigung
Glas & Keramiken	
Gummi & Thermoplasten	
Sonstige	
Strangguss	
Batterien	Sekundärlithium
Luftaufbereitung	dissipative Nutzung
Pharmazeutika	
Schmierfette	

Ausgehend von der Verbrauchsmenge im Jahr 2008 werden die jeweiligen Mengen für die einzelnen Verwendungen in den Folgejahren bis 2050 berechnet. Hierbei wird auf die Wachstumswerte zurückgegriffen, die in Tabelle 5-3 aufgeführt sind.

Für die Berechnungen des in Fahrzeugbatterien verwendeten Lithiums mit Vensim werden zwei verschiedene Szenarien entwickelt. Ausgehend von den für Europa am Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) entwickelten Marktpenetrationsszenarien werden künftige Fahrzeug-Zulassungszahlen für den Weltmarkt bestimmt.

Hierfür werden folgende Annahmen getroffen:

- Bildung von drei Fahrzeugklassen:
 - Hybridfahrzeuge (HEV) mit 1,4 kWh Batteriekapazität
 - Stadt-Elektrofahrzeuge (Stadt-BEV) mit 20 kWh. Diese beinhalten die ganze Bandbreite des Kurzstreckentransports vom Elektroroller bis hin zu Kleintransportern mit einer Reichweite von 70-150 km
 - Plug-In-Hybrid- und Elektrofahrzeuge (mit Austauschbatterie) mit größerer Reichweite (PHEV+BEV) mit 20 kWh Batteriekapazität
- Die Brennstoffzelle wird bei ausreichender technischer Entwicklung Marktanteile von den Verbrennungsmotoren übernehmen. Es werden günstige politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen angenommen, so dass die Brennstoffzelle bei der im jeweiligen Szenario dominierenden Fahrzeugklasse anstelle des Verbrennungsmotors zum Laden der Batterien eingesetzt werden wird. Somit wird von einer gesonderten Betrachtung reiner Brennstoffzellenfahrzeuge bei der Szenarien-Entwicklung abgesehen.
- Die Entwicklung der Elektromobilität in Nordamerika, Japan und China verläuft parallel zu der in Europa.
- Der Rest der Welt (RoW) wird im Bezug auf die Verbreitung der Elektromobilität mit fünf Jahren Verzögerung im Vergleich zu Europa eingerechnet.
- Die künftige Entwicklung der Gesamtfahrzeugbestände in den einzelnen Weltregionen wird aus dem IEA-Transport-Spreadsheet-Modell des World Business Council for Sustainable Development (wbc-sd, 2004) entnommen.
- Zur Berechnung der Neuzulassungszahlen wird eine Lebensdauer von 10 Jahren für alle Fahrzeugtypen angenommen.

Die Betrachtung der Fahrzeugzahlen schließt ausschließlich PKW bzw. bei Stadt-BEVs auch Elektroroller und Kleintransporter ein. Auf die Einbeziehung von LKWs und Bussen wird in dieser Arbeit verzichtet, da die Reichweiten der verwendeten Batterien für diese Anwendungen ungenügend groß sind.

In Anlehnung an die als Basis verwendeten Szenarien des Fraunhofer Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI) werden die zwei entwickelten Szenarien „Dominanz“ bzw. „Pluralismus“ genannt (Wietschel & Dallinger, 2008):

Das erste, sehr optimistische Szenario prognostiziert eine nahezu komplette Substitution des konventionellen Fuhrparks bis 2050 durch Hybrid- und Elektro-Fahrzeuge. Dieses Szenario wird im Folgenden als Dominanz-Szenario bezeichnet. Das Szenario wird folgendermaßen plausibilisiert:

- Die Hybridisierung setzt sich weitgehend durch
- Technische und ökonomische Entwicklungsziele werden erreicht:
 - ~ 200 Euro/ kWh Lithium-Ionen Batteriepreis

+ 1.000 Euro zusätzlich für den restlichen Antriebsstrang

- Sicherheitsprobleme werden gelöst
- Die gravimetrische Energiedichte wird deutlich gesteigert
- Sehr hohe Rohölpreise (über 180 \$/ bbl)
- V2G¹-Dienstleistungen und Arbitragegeschäfte tragen zur Wirtschaftlichkeit bei (mehrere 100 Euro/ Jahr)
- Der überwiegende Teil der Konsumenten trägt die Mehrkosten in der Anschaffung
- Es besteht eine Dominanz der Elektromobilität beim Individualverkehr
- Elektroroller und -fahräder setzen sich weitgehend durch
- Plug-In Hybride und innerstädtische Kleinwagen setzen sich ab Mitte 2015 durch
- ab Mitte 2025 dann auch reine Batteriefahrzeuge, ebenfalls aufgrund technologischer Entwicklungen in der Batterietechnologie

¹Vehicle-to-Grid: Rückspeisung überschüssiger Energie aus der Fahrzeugbatterie ins Stromnetz

In diesem Szenario liegt der Schwerpunkt auf den Plug-In-Hybriden und BEVs. Diese gewinnen immer mehr Marktanteile und lösen bis 2030 die Hybridfahrzeuge als Marktführer in der Elektromobilität ab. Für die Stadt-BEVs wird nur eine kleine Rolle für Nischenanwendungen gesehen (siehe Abbildung 5-1).

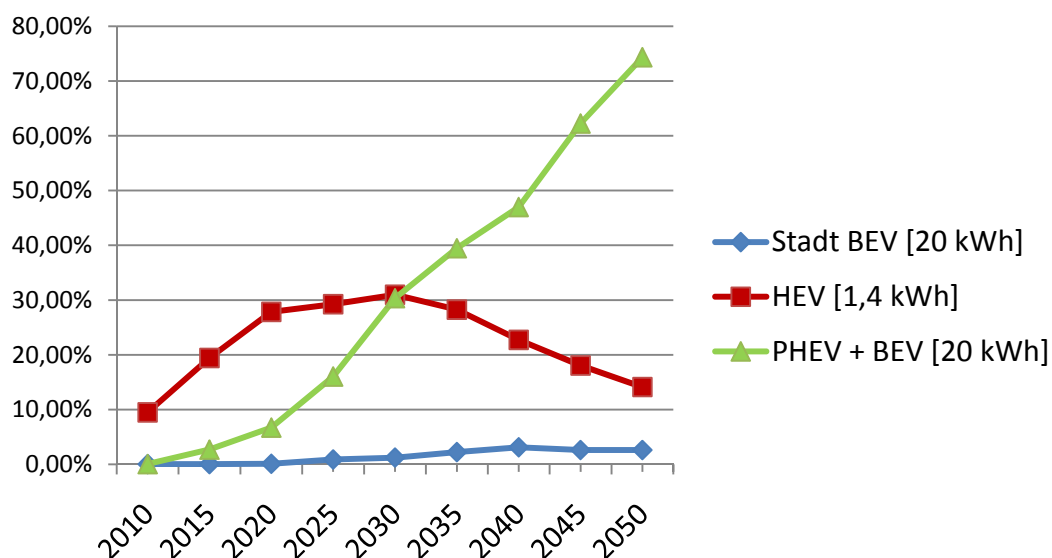


Abbildung 5-1: Neuzulassungsanteile – Szenario Dominanz

Das zweite Penetrationsszenario, das als Pluralismus-Szenario bezeichnet wird, prognostiziert eine restriktivere Marktpenetration, wie in Abbildung 5-2 zu sehen ist. Die zugrunde liegenden Annahmen sind:

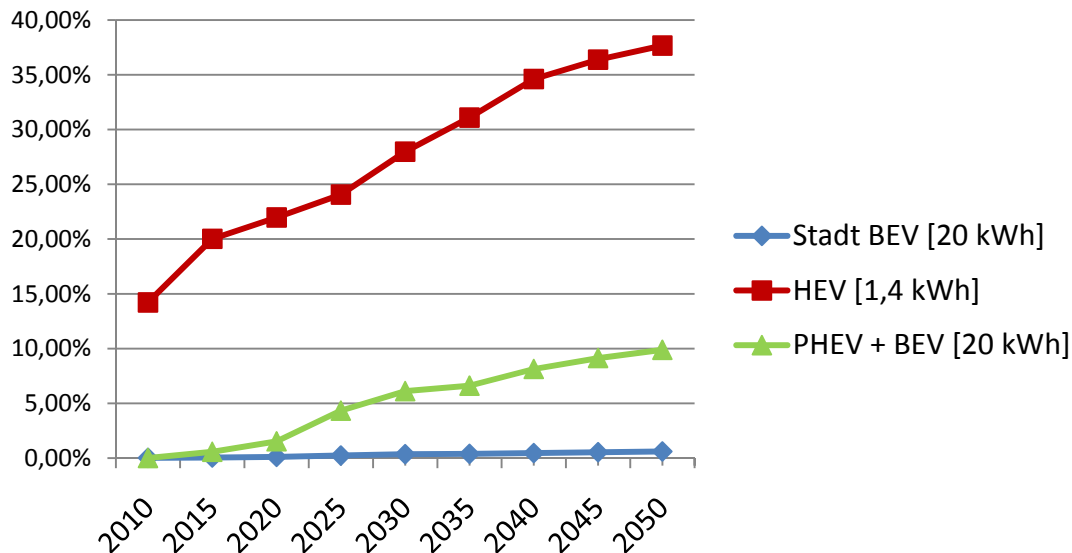


Abbildung 5-2: Neuzulassungsanteile – Szenario Pluralismus

- Die Elektromobilität ist eine unter vielen Optionen zur Effizienzsteigerung im Individualverkehr (Diversifikation an Kraftstoffen und Antriebssystemen)
- Die Hybridisierung gewinnt relevante Marktanteile
- Technische und ökonomische Entwicklungsziele werden erreicht
 - ~ 200 Euro/ kWh Lithium-Ionen Batteriepreis
 - + 1.000 Euro zusätzlich für den restlichen Antriebsstrang
- Sicherheitsprobleme werden gelöst
- Die gravimetrische Energiedichte wird gesteigert
- Hohe Rohölpreise (über 130 \$/ bbl)
- Elektroroller und Fahrräder gewinnen deutlich an Marktanteilen (u. a. ordnungspolitisch unterstützt durch Verzicht auf Mineralölsteuer)
- Ökologisch und ordnungsrechtlich (Entlastung Innenstadtzonen, CO₂-Grenzwerte) motiviert:
 - Plug-In Hybride werden von einer kleinen Konsumentenschicht gefahren.
 - Innerstädtische Kleinwagen werden in der Mehrheit reine Batteriefahrzeuge sein.
 - Im innerstädtischen Wirtschaftsverkehr setzt sich die Elektromobilität (PHEV und BEV) teilweise durch.

Das Pluralismus-Szenario ist das gemäßigte Szenario. Im Gegensatz zum Dominanz-Szenario machen Hybrid- und Elektrofahrzeuge nur einen Teil des gesamten Fahrzeugparks aus. Neben den konventionellen Kraftstoffen haben auch Biokraftstoffe sowie Gasfahrzeuge wesentliche Marktanteile. Plug-In-Hybridfahrzeuge spielen nur eine untergeordnete Rolle und Stadt-Elektrofahrzeuge kommen lediglich in Nischenanwendungen zum Einsatz

Eine Einordnung der obigen Szenarien im Vergleich zu Studien anderer renommierter Analysefirmen gibt Abbildung 5-3. Die hier betrachteten Studien stellen eine Abschätzung der weltweiten Neuzulassungszahlen von PHEVs und BEVs in den Jahren 2015-2030 dar. Es ist erkennbar, dass die ISI-Penetrationsszenarien ungefähr im mittleren Bereich der betrachteten Studien angesiedelt sind.

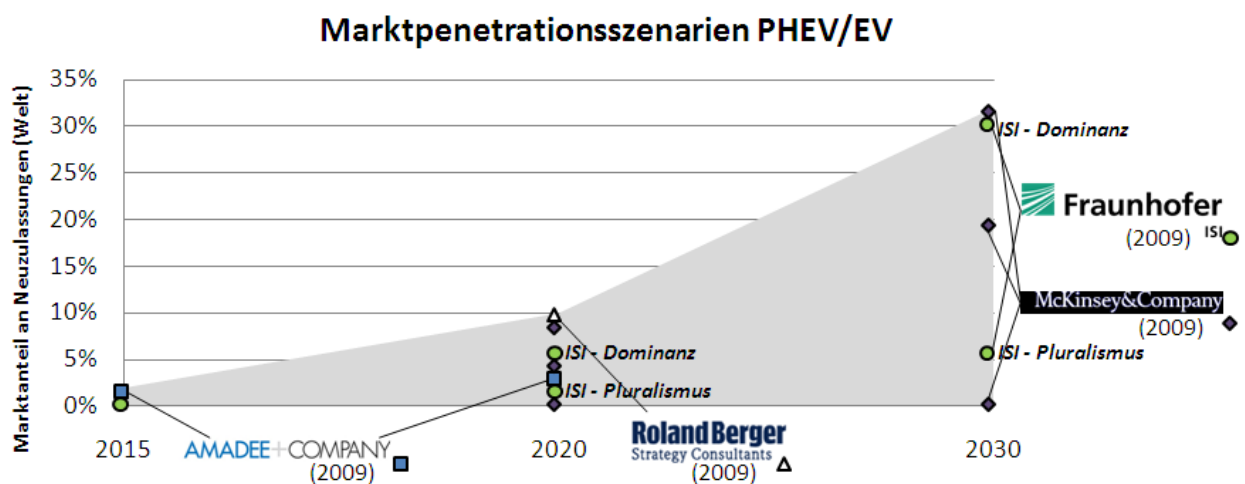


Abbildung 5-3: Studien zu Neuzulassungen weltweit

Im Modell werden feste Startwerte zusammen mit zwei unterschiedlichen Arten von Variablen in den Rechnungen kombiniert: Variablen, deren Werte sich im Zeitverlauf ändern und solche mit als fix angenommenen Werten.

Die Startwerte repräsentieren die Ausgangssituation im Jahr 2008. Die Lithium-Mengen, die in 2008 in den einzelnen Verwendungen verbraucht wurden, werden aus (Roskill, 2009) entnommen und stellen sich folgendermaßen dar:

- Glas & Keramiken: 7.760 t
- Aluminiumschmelzen: 1.500 t
- Strangguss: 990 t
- Gummi & Thermoplasten: 730 t
- Luftaufbereitung: 1.100 t
- Primärbatterien: 245 t
- Rundzellen: 1.440 t

- Gerätebatterien: 2.500 t
- Schmierfette: 2.395 t
- Pharmazeutika: 435 t
- Sonstige: 2.200 t

Die Anzahl der Fahrzeuge sowie die Anzahl der Neuzulassungen in 2008 werden mit 797,51 Mio. Stück respektive 82,74 Mio. Stück aus den Prognosen von (wbc-sd, 2004) berechnet.

Die Variablen mit im Zeitverlauf unveränderten Werten sind:

- Sammelquote Batt
- Sammelquote Fz
- Sammelquote Luft
- Recyclingquote Batt
- Recyclingquote Luft
- Recyclingeffizienz Batt
- Recyclingeffizienz Luft
- Wachstum Fahrzeuge
- Lithium-Anteil Stadt-BEV
- Lithium-Anteil HEV
- Lithium-Anteil PHEV+BEV

Die Definition der Sammelquote wird bereits in Kapitel 4.1 gegeben. In der Modellrechnung wird für die Batterien eine Sammelquote von 0,42 verwendet. Dies entspricht der Quote für Deutschland im Jahr 2008 (Stiftung GRS Batterien, 2009). Betrachtet man den Rest der Welt, ist dieser Wert im Moment zwar überhöht, da er jedoch bis 2050 konstant gehalten wird, doch realistisch. Für die Sammlung von Fahrzeugbatterien sind Konzepte ähnlich den bereits bei Starterbatterien eingesetzten in der Diskussion. Hier könnte ein Pfandsystem mit dem Austausch von Alt- gegen Neubatterien eingesetzt werden. Dadurch können hohe Sammelquoten erreicht werden (bei Starterbatterien liegt die Quote bei nahezu 100 % (Volkswagen, 2006)), weswegen die Sammelquote Fz weltweit auf 0,85 gesetzt wird. Da das in Absorptionskälteanlagen verwendete Lithium-Bromid nahezu vollständig wiederverwendet wird (Roskill, 2009, S. 285), wird die Sammelquote Luft mit 0,95 angenommen. Die Recyclingquote bei Batterien lag in Deutschland im Jahr 2008 laut (Stiftung GRS Batterien, 2009) bei 0,99. Weltweit ist von einer etwas geringeren, aber dennoch sehr hohen Recyclingquote von 0,9 auszugehen, da in der Berechnung der Quote lediglich bereits gesammelte aber nicht identifizierbare Batterien abgezogen werden. Bei der Luftaufbereitung gibt es dieses Problem der Identifizierung nicht, weswegen eine Recyclingquote von 1 angenommen wird. Für die Recyclingeffizienz Batt wird mit 0,85 ein Mittelwert der derzeit kommerziell angewendeten Lithium-Recyclingprozesse angenommen (siehe Tabelle 4-1). Das in Ab-

sorptionskühlanlagen verwendete Lithium-Bromid wird eins zu eins wiederverwendet (Roskill, 2009, S. 285), was auf eine Recyclingeffizienz Luft von 1 schließen lässt. Das Fahrzeugwachstum wird mit 2,18 % p.a. aus den Prognosen für den weltweiten Gesamtfahrzeugbestand bis 2050 von (wbc-sd, 2004) errechnet. Die Entwicklung der eingesetzten Kathodenmaterialien bei Fahrzeugbatterien ist im Moment schwer vorher-sagbar. Deshalb wird für den Lithium-Anteil pro Fahrzeug angenommen, dass das Verhältnis von eingesetzten Kobalt- zu Eisenphosphatkathoden in etwa bei 50:50 liegt. Daraus ergibt sich ein Lithium-Gehalt von 150 g/kWh (Angerer & al., 2009, S. 171). Sowohl Stadt-BEVs als auch PHEV+BEVs werden mit 20 kWh und somit die pro Fahrzeug verwendete Lithium-Menge mit 0,003 t eingerechnet. Bei HEVs, die eine Batteriekapazität von 1,4 kWh besitzen, liegt dieser Wert bei 0,00021 t.

Einen Überblick zu den einzelnen das Recycling betreffenden Annahmen gibt Tabelle 5-2.

Tabelle 5-2: Annahmen zum Recycling

Annahme		Wert
Sammelquote	Batterien	0,42
	Fahrzeug-Batterien	0,85
	Luftaufbereitung	0,95
Recyclingquote	Batterien (alle)	0,9
	Luftaufbereitung	1
Recyclingeffizienz	Batterien (alle)	0,85
	Luftaufbereitung	1

Die Variablen, die sich im Zeitverlauf ändern, werden im Modell über eine Excel-Tabelle eingelesen und sind folgende:

- Wachstum für Glas & Keramiken, Aluminiumschmelzen, Strangguss, Gummi & Thermoplasten, Luftaufbereitung, Primärbatterien, Rundzellen, Gerätebatterien, Schmierfette, Pharmazeutika und Sonstige
- Lebensdauern der obigen Verwendungen
- Anteil Stadt-BEV
- Anteil HEV
- Anteil PHEV+BEV
- Anteil konv

Die Wachstumswerte für die einzelnen Verwendungen werden bis 2013 aus (Roskill, 2009), bis 2020 aus (Anderson, 2009) entnommen und sind in Tabelle 5-3 dargestellt. Für die Werte ab 2020 werden eigene sowie Expertenannahmen herangezogen.

Tabelle 5-3: Verwendete Wachstumswerte [in % p.a.]

Verwendungsart	2008-2013	2013-2020	2020-2030	2030-2050
Glas & Keramiken	3,5	2,3	2,3	2,0
Aluminiumschmelzen	2,4	0,0 ¹	0,0	0,0
Strangguss	2,5	2,5 ²	2,5	2,5
Gummi & Thermoplasten	4,2	2,8	2,8	2,5
Luftaufbereitung	1,7	3,4	3,0	2,0
Primärbatterien	3,1	8,0	4,0	3,0
Rundzellen	4,0	4,0 ³	4,0	4,0
Gerätebatterien	6,9	8,0 ³	7,0	6,0
Schmierfette	3,0	3,0	2,8	2,5
Pharmazeutika	4,5	3,0	2,0	1,5
Sonstige	4,9	8,3	2,8	2,5

¹ Bei Anderson Wachstum von -2,6 % p.a., im Modell wird kein Wachstum angenommen

² keine Prognose bei Anderson; Übernahme der Roskill-Schätzung

³ bei Anderson gemeinsam als Sekundärbatterien betrachtet.

Im Glas- & Keramikmarkt kann ab 2020 von einer Sättigung in den Industrieländern ausgegangen werden, die Nachfrage wird dann hauptsächlich durch die weniger entwickelten Länder angetrieben. Beim Aluminiumschmelzen ist ein weiteres Wachstum der Lithium-Verwendung nicht abzusehen. Durch verbesserte Filtertechnik können die hier anfallenden Fluorgase gebunden werden, was somit den Lithium-Einsatz überflüssig macht. Lediglich aus Gründen der Energieeinsparung ist eine weitere Verwendung von Lithium im Aluminiumschmelzen denkbar. Die Verwendung von Lithium als Zusatz zum Gießpulver im Strangguss wird mit einem gleichbleibenden Wachstum angenommen. Hier sind derzeit keine technischen Neuerungen im Produktionsablauf abzusehen. Die größte Menge an Lithium im Bereich Gummi & Thermoplasten wird in Autoreifen verbraucht. Aus diesem Grund wird ein Wachstum des Lithium-Verbrauchs analog zum Weltwirtschaftswachstum angenommen. Dieses wird laut (OECD, 2008) bis zum Jahr 2030 mit 2,8 % p.a. wachsen. Für die Jahre 2030-2050 sagen (Lindh & Malmberg, 2007) ein weltweites Wirtschaftswachstum von 2-3 % p.a. voraus. Deshalb werden für diesen Zeitraum 2,5 % p.a. angenommen. Das Wachstum bei der Luftaufbereitung wird hauptsächlich durch die Nachfrage nach Absorptionskälteanlagen im asiatischen Raum bestimmt. Hier wird bis 2030 eine Sättigung angenommen, weswegen dann mit geringeren Wachstumswerten gerechnet wird. Der Batteriesektor unterliegt einem starken Wachstum. In den Industrieländern ist eine Sättigung bei Gerätebatterien abzusehen, allerdings können Neuentwicklungen bei Elektrokleingeräten die Nachfrage auch hier erneut ankurbeln. Das starke Wachstum in diesem Sektor wird vor allem durch den Rest der Welt verursacht. Ein geringeres Wachstum bei Primärbatterien lässt sich

durch ihre zunehmende Substitution mit Sekundärbatterien erklären. Das Wachstum bei Schmierfetten ist, wie bereits in Kapitel 3.3.2 beschrieben, eng mit dem Weltwirtschaftswachstum gekoppelt, weswegen hier 2,8 % p.a. respektive 2,5 % p.a. angenommen werden. Da die Patente für Lithium-haltige Pharmazeutika abgelaufen sind und somit günstigere Varianten auf den Markt kommen, werden von den Marktführern zunehmend alternative Produkte ohne Lithium-Gehalt zur Behandlung von manisch-depressiven Erkrankungen entwickelt. Dieser Tatsache wird im Modell mit geringeren Wachstumsraten für den Lithium-Bedarf bei Pharmazeutika Rechnung getragen. Das starke Wachstum bei Sonstige bis 2020 beruht hauptsächlich auf dem Einsatz von Lithium bei Aluminiumlegierungen im Flugzeug- bzw. Raumfahrtleichtbau. Allerdings wird in diesem Sektor ab 2020 von einer Sättigung ausgegangen, welche auf dem Einsatz alternativer Werkstoffe beruht. Daher wird das Wachstum für Sonstige im Modell ab 2020 an das Weltwirtschaftswachstum gekoppelt. Die Lebensdauern werden jeweils über den gesamten Betrachtungszeitraum konstant gehalten. So wird für Glas & Keramiken nach Rücksprache mit der Firma SCHOTT Technical Glass Solutions GmbH eine mittlere Lebensdauer von acht Jahren angenommen. Für die Fahrzeugbatterien wird, analog zur Betrachtung der Neuzulassungen, eine Nutzungsdauer von 10 Jahren festgelegt (General Motors Europe, 2009, S. 10). Beim Aluminiumschmelzen wird das verwendete Lithium durch Nachbearbeitungsschritte aus dem Material entfernt, um die Reinheit des Aluminiums zu gewährleisten, weshalb hier eine Lebensdauer von Null angesetzt wird (Roskill, 2009, S. 256). Dies gilt auch für den Strangguss. Hier wird das verwendete Gießpulver direkt der Beseitigung zugeführt. Eine mehrmalige Verwendung des Pulvers ist nicht möglich, da es spezielle Eigenschaften besitzt (entfernt z. B. Unreinheiten wie Aluminiumoxid aus dem Stahl), die nach dem Guss nicht mehr nutzbar sind (Roskill, 2009, S. 297). Das in Gummi & Thermoplasten verwendete Lithium unterliegt ganz unterschiedlichen Lebensdauern. So wird es z. B. in Autoreifen bis zu 10 Jahre lang genutzt, im Gegensatz dazu in Schuhsohlen lediglich zwei Jahre. Deshalb wird für die Modellrechnung ein Mittelwert von fünf Jahren gewählt. In der Luftaufbereitung muss das Absorptionsmittel Lithium-Bromid alle fünf Jahre ausgetauscht werden (Roskill, 2009, S. 285). Für Primär-, Gerätebatterien und Rundzellen wird eine durchschnittliche Lebensdauer von fünf Jahren festgelegt. Dies beinhaltet bereits den gerade bei Gerätebatterien wie Handy-Akkus gängigen Batterie-Hortungs-Effekt. Im Bereich Sonstige ist es schwierig eine einheitliche Lebensdauer festzulegen. Einerseits gibt es bei Aluminiumlegierungen im Flugzeug- und Raumfahrtleichtbau sowie beim Einsatz in Zement sehr hohe Lebensdauern von 10-20 Jahren, andererseits wird das in Bleichmitteln verwendete Lithium direkt, also nach Null Jahren, verbraucht. Als Mittelwert wird für die Berechnungen eine Lebensdauer von 10 Jahren für Sonstige angesetzt. Die Neuzulassungsanteile von Stadt-BEVs, HEVs und PHEV+BEVs werden mit den oben beschriebenen Szenarien bestimmt.

5.2 Modellergebnisse

5.2.1 Szenario: Pluralismus

Zunächst soll das gemäßigte Pluralismus-Szenario betrachtet werden. Hier stellen sich die Anteile der einzelnen Fahrzeugklassen am Gesamtfahrzeugbestand wie in Abbildung 5-4 dar. Wie bereits oben beschrieben, ist eine Aufteilung des Fahrzeugmarktes zwischen konventionellen Motoren und der Elektromobilität bis zum Jahr 2050 zu erkennen, wobei die Hybridfahrzeuge mit einem Anteil von 38 % am Gesamtfahrzeugbestand eindeutig die dominierende Rolle spielen.

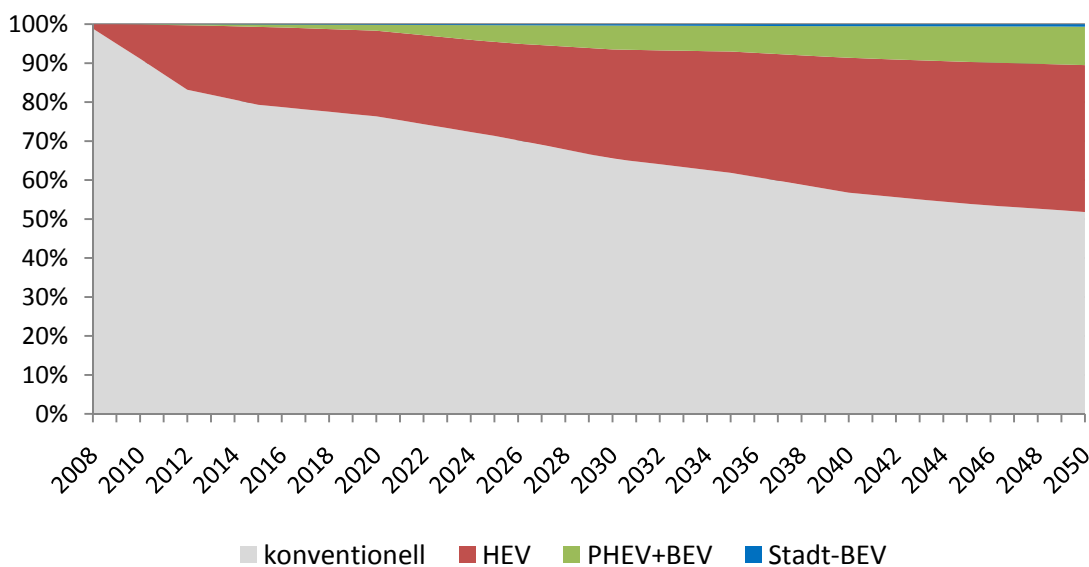


Abbildung 5-4: Fahrzeuganteile am Gesamtbestand [in %] – Pluralismus-Szenario

Bei einem Gesamt-Lithium-Verbrauch von 21.295 t im Jahr 2008, unter Einbeziehung der in Kapitel 5.1 getroffenen Annahmen und angenommenen Werte, stellt sich die Entwicklung des weltweiten Lithium-Verbrauchs im Pluralismus-Szenario wie in Abbildung 5-5 dar. Dargestellt sind hier die jährlichen weltweiten Verbrauchsmengen in Tonnen (Lithium-Verbrauch gesamt) sowie der Bedarf an Primärlithium, der sich aus Gesamtverbrauch minus durch Recycling gewonnenem Material ergibt. Es lässt sich erkennen, dass die jährliche Nachfrage nach Lithium bis zum Jahr 2050 auf ca. 178.000 t steigen und sich somit ungefähr verachtfachen wird. Zusätzlich ist die Menge des pro Jahr durch Recycling gewonnenen Sekundärlithiums abgetragen. So können mit 50.535 t im Jahr 2050 ca. 28 % des weltweiten Lithium-Bedarfs aus Sekundärmaterial gedeckt werden.

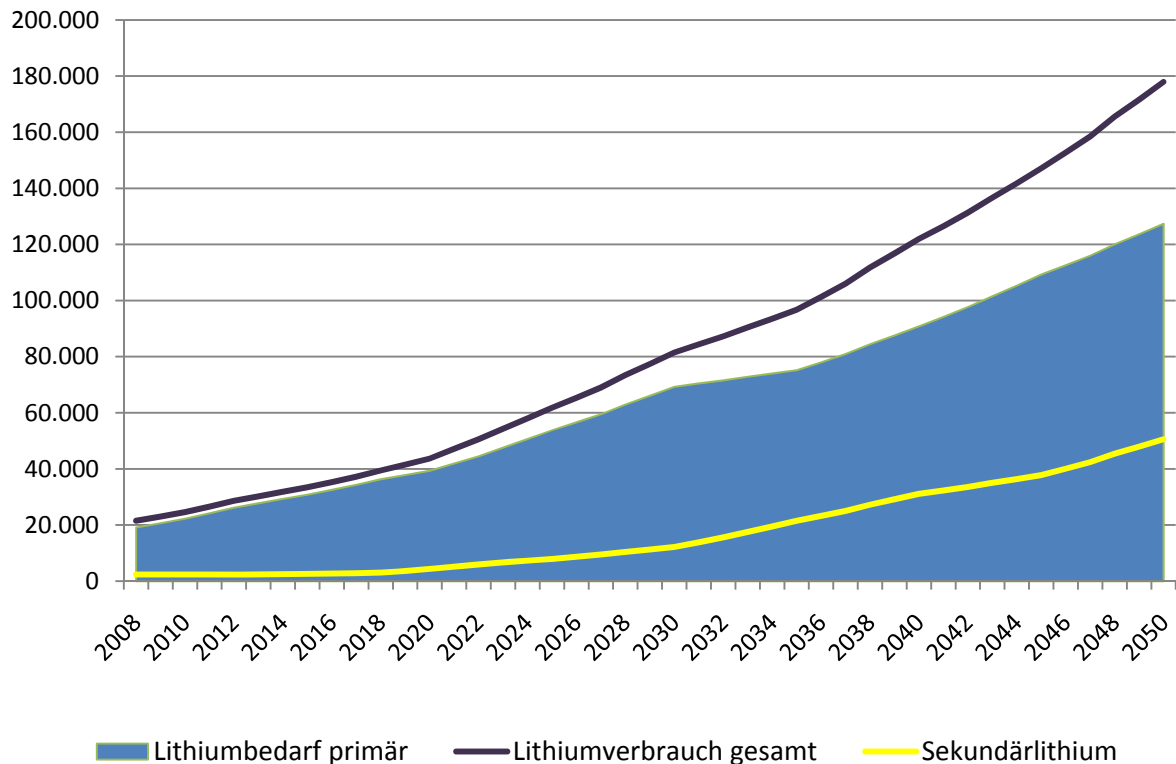


Abbildung 5-5: Gesamt-Lithium-Verbrauch, Nachfrage nach Primärlithium und Anfall von Sekundärlithium [in t Li] – Pluralismus

Einen detaillierteren Überblick zur Lithium-Nachfrage gibt Abbildung 5-6. Hier sind die jährlichen Verbrauchsmengen der einzelnen Lithium-Verwendungsarten abgetragen. In der Graphik ist das zu erwartende starke Wachstum bei Fahrzeug- und Gerätebatterien ab 2020 klar zu erkennen. Einen weiteren großen Bestandteil des Verbrauchs machen Glas & Keramiken aus. Zwar wird in den Annahmen ab dem Jahr 2031 ein relativ geringes Wachstum von 2 % p.a. angenommen, jedoch befanden sich die Verbrauchsmengen im Jahr 2008 bereits auf einem sehr hohen Niveau (Glas & Keramiken war mit 37 % in 2008 der Haupt-Lithium-Verbraucher), welches stetig steigt. Die hohen Verbrauchsmengen für Lithium-haltige Schmierfette begründen den großen Anteil am Gesamtverbrauch, welchen die dissipative Nutzung einnimmt. Die stetig steigende Kurve für Sonstige wird hauptsächlich bedingt durch das starke Wachstum im Flugzeugleichtbau.

Erneut ist die durch Recycling gewonnene Menge an Sekundärlithium abgetragen. Diese Kurve beginnt zunächst auf einem niedrigen Niveau bevor dann ab dem Jahr 2020 eine Steigerung zu erkennen ist. Dies ist auf die abgenommene Lebensdauer von zehn Jahren für die Fahrzeugbatterien zurückzuführen, deren Verwendung in der Mo-

dellrechnung ab dem Jahr 2008 stetig steigt. Somit spiegelt die Sekundärlithium-Kurve Veränderungen im Lithium-Verbrauch für Fahrzeugbatterien immer mit zehn Jahren Verspätung wieder. Zudem lässt sich erkennen, dass sich die Verbrauchs-Kurven von Aluminiumschmelzen, Strangguss, Gummi & Thermoplasten sowie Luftaufbereitung auf einem stetig niedrigen Niveau bewegen. Dies beruht auf den relativ geringen Wachstums- und Startverbrauchswerten, die bei diesen Verwendungen angenommen werden.

Folglich sind für den künftigen Lithium-Verbrauch hauptsächlich die unterschiedlichen Batterie-Typen (incl. Fahrzeugbatterien), die Schmierfette sowie Glas & Keramiken verantwortlich. Zusammen machen sie im Jahr 2050 ca. 90 % des gesamten Lithium-Verbrauchs aus. Im Vergleich dazu betrug ihr Anteil in 2008 lediglich 68 %.

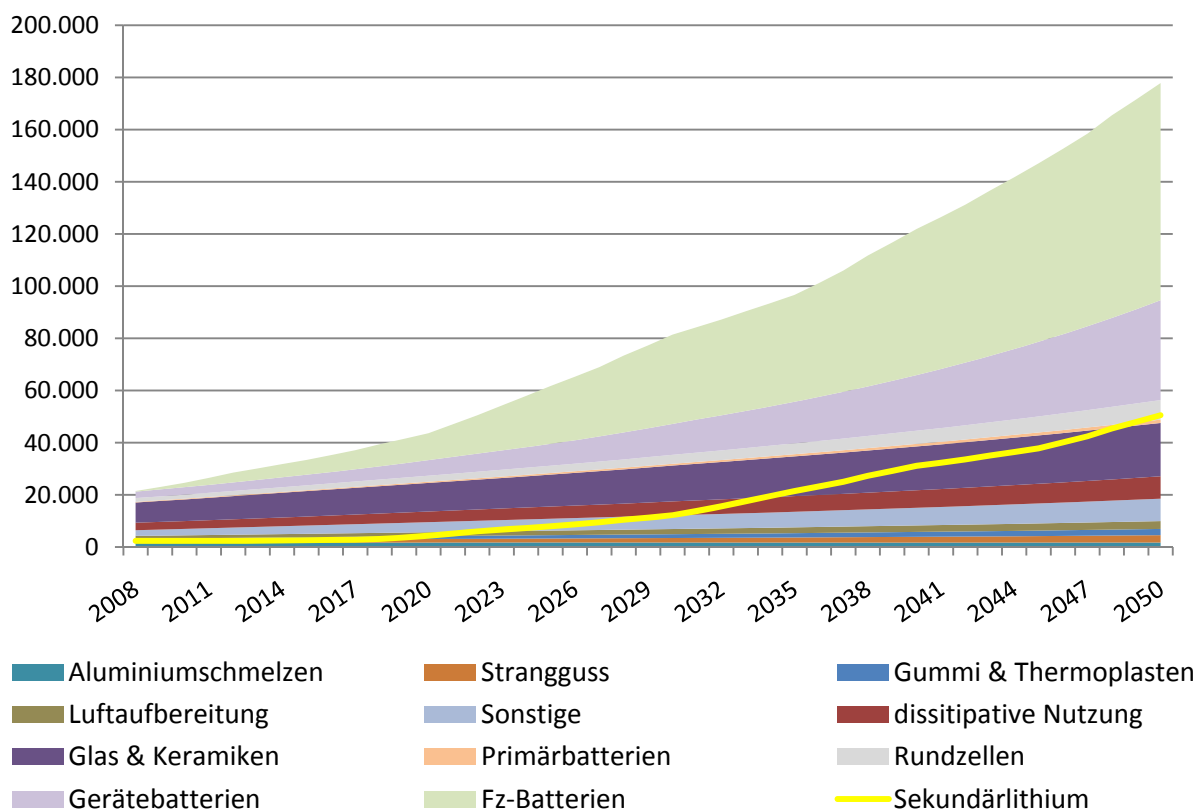


Abbildung 5-6: Verbrauchsmengen der einzelnen Verwendungsarten [in t Li] – Pluralismus

5.2.2 Szenario: Dominanz

Im Dominanz-Szenario wird der Fahrzeugmarkt bis 2050 klar von der Elektromobilität beherrscht. Wie Abbildung 5-7 zeigt, machen herkömmliche Verbrennungsmotoren in 2050 lediglich einen Anteil von 9 % des Gesamtbestandes aus. Die dominierende Fahrzeugklasse mit 74 % Bestandsanteil sind die Plug-In-Hybriden und die Batterie-fahrzeuge mit Austauschbatterie. Die Stadt-BEVs spielen erneut nur eine kleine Rolle.

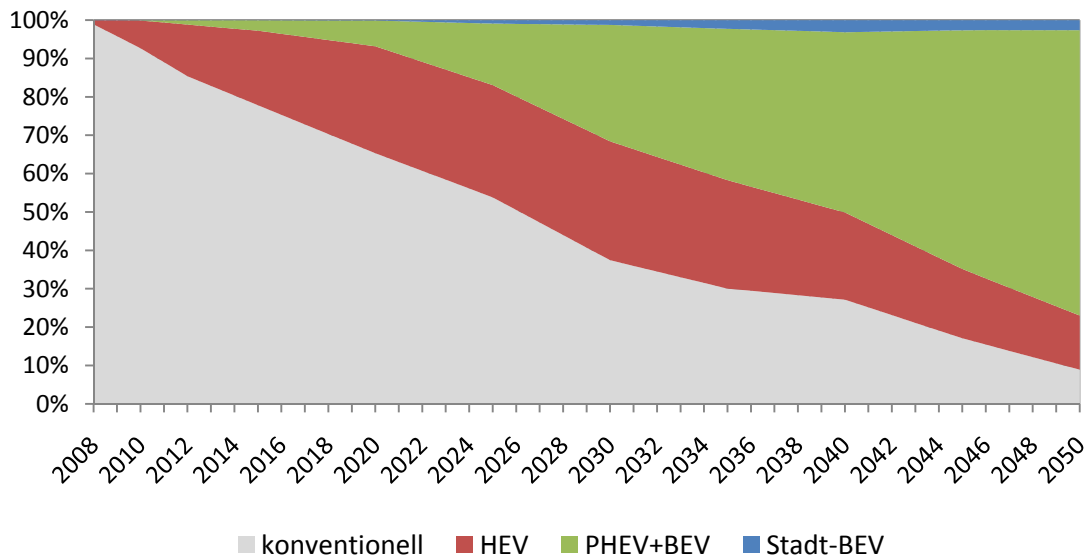


Abbildung 5-7: Fahrzeuganteile am Gesamtbestand [in %] – Dominanz-Szenario

Die jährlichen Lithium-Verbrauchswerte sowie das Angebot an Sekundär- und die Nachfrage nach Primärlithium im Dominanz-Szenario sind in Abbildung 5-8 dargestellt. Aufgrund der höheren Bedarfe für Fahrzeugbatterien werden hier im Jahr 2050 ca. 590.000 t Lithium verbraucht. Diese Menge setzt sich zu einem Drittel (185.000 t) aus wiedergewonnenem Sekundärlithium und zu zwei Dritteln (405.000 t) aus Primärlithium zusammen. Somit nimmt die Gewinnung von Lithium aus dem Recycling in diesem Szenario noch einen größeren Stellenwert ein als im Pluralismus-Szenario. Dies lässt sich vor allem auf die hohen Bestandszahlen von Elektro- und (Plug-In)-Hybridfahrzeugen zurückführen, aus deren Batterien das Lithium im großen Stil recycelbar ist.

Betrachtet man die Kurve für den Bedarf nach Primärlithium genau, so erkennt man, dass sie an zwei Stellen (siehe Pfeile), welche Änderungen im Bedarfs-Wachstum repräsentieren, von einer stetigen Steigung abweicht. Das ab 2008 ständig steigende Wachstum flacht ungefähr im Jahr 2030 etwas ab. Dies erklärt sich aus dem Erreichen einer Sättigung im Hybridfahrzeugmarkt (siehe Abbildung 5-1) und der darauf folgenden sinkenden Nachfrage nach HEVs. Diese Nachfrage-Einbußen übertragen sich

auch auf die Lithium-Nachfrage und lassen diese somit weniger stark wachsen. Ab dem Jahr 2040 ist jedoch eine erneute Wachstumssteigerung festzustellen. Hier wird von einem starken Anziehen des Marktes für PHEVs+BEVs ausgegangen, welche mit 20 kWh eine Lithium-Menge von 3 kg pro Fahrzeug nachfragen.

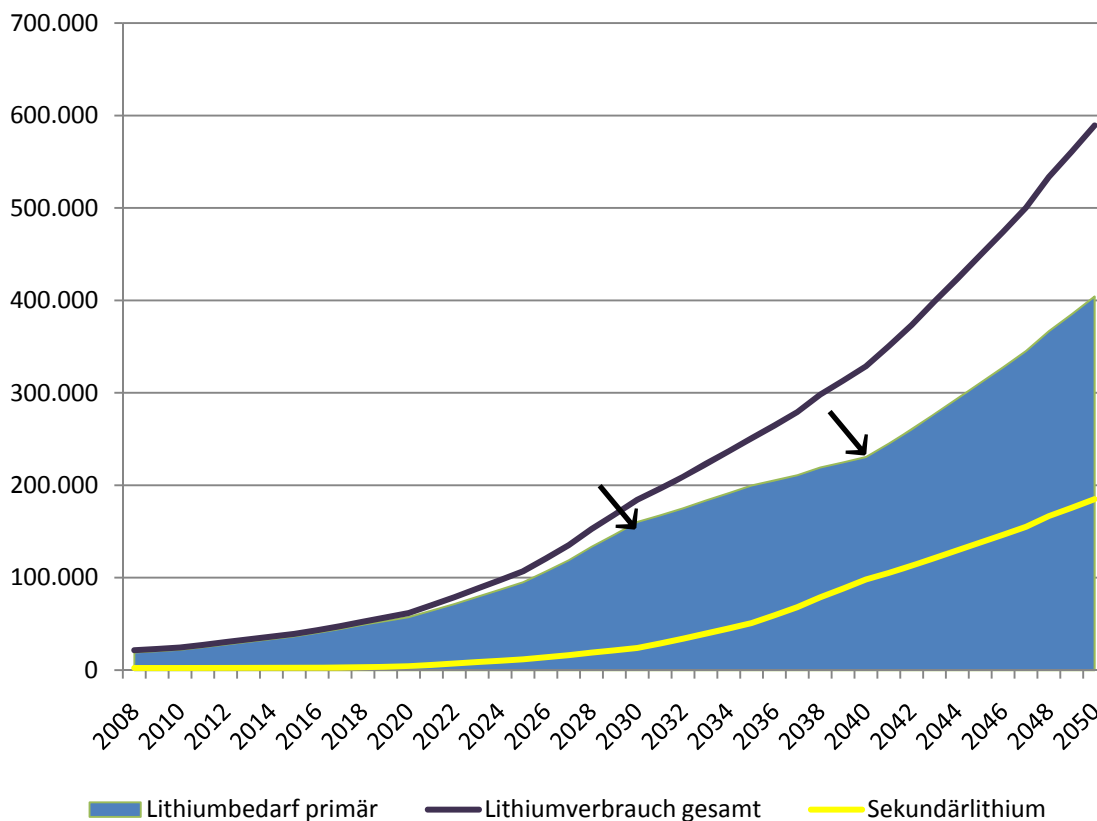


Abbildung 5-8: Gesamt-Lithium-Verbrauch, Nachfrage nach Primärlithium und Anfall von Sekundärlithium [in t Li] – Dominanz

Betrachtet man die jährlichen Verbrauchsmengen der einzelnen Lithium-Verwendungsarten, welche in Abbildung 5-9 dargestellt sind, so fällt deutlich auf, dass für Fahrzeugbatterien am meisten Lithium nachgefragt wird. Der Verbrauch steigt von nahezu Null Tonnen im Jahr 2008 bis auf ca. 495.000 t in 2050. Für Gerätebatterien sowie für Glas & Keramiken werden mit 38.000 t respektive 20.000 t in 2050 wie im Pluralismus-Szenario große Mengen Lithium verbraucht. Die jährlichen Verbräuche für die dissipative Nutzung und für Sonstige wachsen relativ gleichmäßig auf zusammen 17.000 t im Jahr 2050 an. Dies lässt sich durch ähnliche Wachstumswerte erklären, welche für die beiden Verwendungsarten angenommen werden. Wie beim Pluralismus-Szenario bewegen sich die Verbrauchs-Kurven von Aluminiumschmelzen, Strangguss, Gummi & Thermoplasten sowie Luftaufbereitung auf einem stetig niedrigen Niveau.

Deutlich erkennbar ist das Wachstum der Sekundärlithium-Kurve, welche nahezu parallel zur Verbrauchskurve für Fz-Batterien verläuft. Im Jahr 2050 können in diesem Szenario die Jahresbedarfe aller Lithium-Verwendungen sowie ca. ein Fünftel des Fahrzeugbatterie-Bedarfs durch recyceltes Sekundärlithium gedeckt werden.

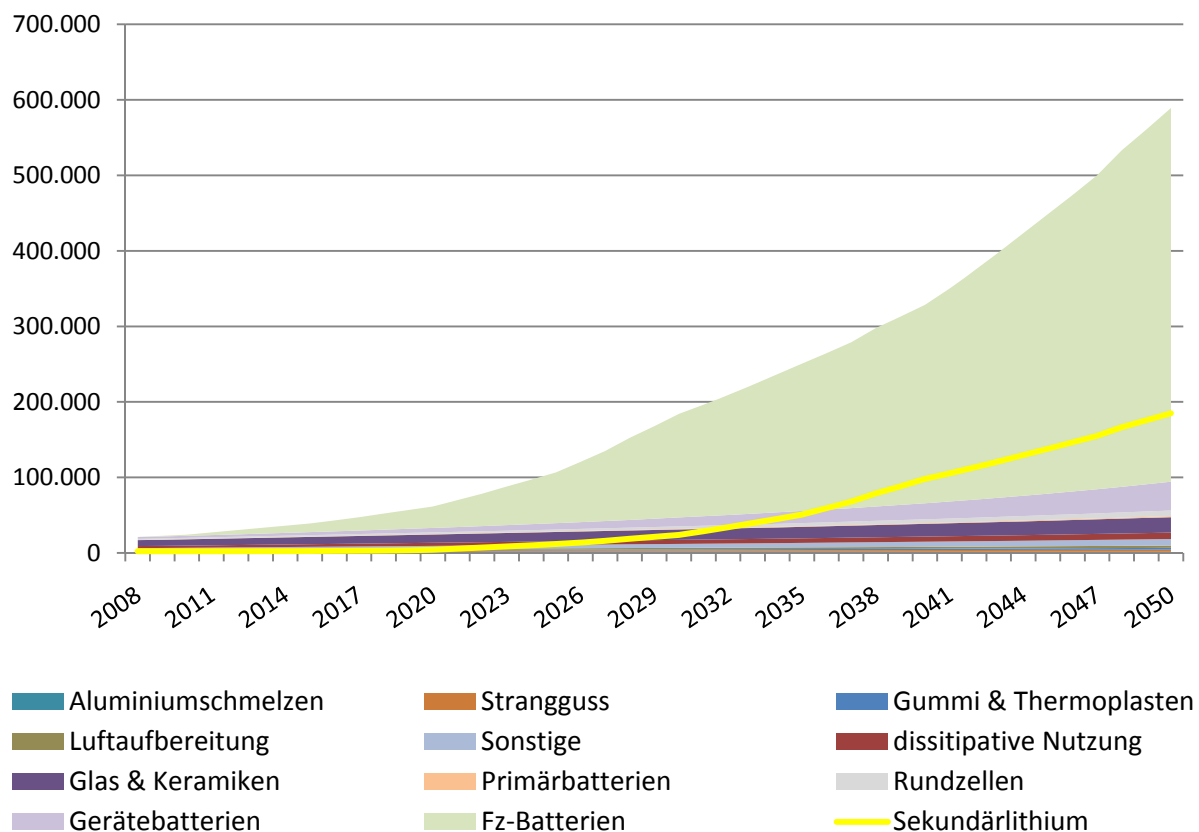


Abbildung 5-9: Verbrauchsmengen der einzelnen Verwendungsarten [in t Li] – Dominanz

6 Entwicklung von Lithium-Angebot und -Nachfrage

Im Kapitel 6 werden die mit Hilfe des Modells in Vensim errechneten Lithium-Verbrauchsmengen dem vorhandenen Lithium-Angebot gegenübergestellt. Dieses besteht aus der Summe der Reserven und der Menge an durch Recycling wiedergewonnenem Sekundärlithium. Als Reserven werden 6,1 Mio. Tonnen Lithium – die in (USGS, 2009) genannten 4,1 Mio. t zusätzlich zu den für Argentinien in (Tahil, 06) genannten 2,0 Mio. t – angenommen, auch wenn davon auszugehen ist, dass die bis zum Jahr 2050 verbesserten technischen Möglichkeiten weitere Lithium-Vorkommen abbaubar machen und somit die verfügbaren Reserven erhöhen werden. Die von (USGS, 2009) angenommenen Lithium-Ressourcen belaufen sich auf 13,8 Mio. t (siehe Tabelle 2-2).

Da die Sekundärlithium-Menge stark von der Anzahl der recycelten Fahrzeugbatterien abhängt, ist hier eine getrennte Betrachtung der zwei verwendeten Szenarien sinnvoll.

6.1 Analyse des Pluralismus-Szenarios

Im Pluralismus-Szenario wird von einem gemäßigten Wachstum der Elektromobilität ausgegangen. Aus diesem Grund ist hier die Lithium-Nachfrage für Fahrzeugbatterien weniger hoch (siehe Abbildung 6-1). Im Diagramm sind die jährlichen Verbrauchswerte der einzelnen Verwendungsarten aufsummiert und ergeben diese kumulierte Darstellung. Somit spiegelt der Wert von 3,57 Mio. Tonnen im Jahr 2050 den gesamten weltweiten Lithium-Verbrauch von 2008-2050 wieder.

Die Fahrzeugbatterien, für die insgesamt ca. 1,4 Mio. t Lithium verbraucht werden, dominieren sogar in diesem gemäßigten Szenario in der Betrachtung des Lithium-Verbrauchs der Verwendungsarten. Mit ca. 600.000 Tonnen wird bis 2050 für Gerätebatterien am zweitmeisten Lithium verbraucht. Dies beruht auf den hohen Wachstumszahlen, v.a. bedingt durch die zu erwartende hohe Nachfrage nach Elektrokleingeräten in den Entwicklungsländern. Nahezu gleichviel Lithium wird bis 2050 für Glas & Keramiken verbraucht werden. Obwohl die Wachstumsraten hier gering sind, kumulieren sich die bereits in den Startjahren hohen Verbrauchsmengen zu insgesamt etwa 590.000 t.

Vor allem die weit verbreitete Nutzung von Lithium in Schmierfetten trägt dazu bei, dass die dissipative Nutzung insgesamt ca. 230.000 t Lithium bis 2050 verbraucht. Ihr Anteil am Lithium-Verbrauch durch dissipative Nutzung beträgt bis 2050 ca. 84 %.

Bedingt durch die zahlreichen Verwendungen wie Alu-Legierungen, Bleichmittel oder Zementhärtungsmittel, die unter Sonstige zusammengefasst sind, ergibt sich bis 2050 ein kumulierter Verbrauch von ungefähr 223.000 t.

Die restlichen Verwendungen wie Aluminiumschmelzen, Gummi & Thermoplasten, Luftaufbereitung und Strangguss spielen nur eine untergeordnete Rolle, da sie mit geringen Verbrauchswerten sowie geringem Wachstum eingerechnet werden. Zusammen werden bis zum Jahr 2050 ca. 300.000 t Lithium für diese Verwendungen verbraucht.

Zusätzlich wird das im Betrachtungszeitraum durch Recycling wiedergewonnene Sekundärlithium kumuliert abgetragen. So können im Pluralismus-Szenario bis 2050 insgesamt ca. 746.000 t Lithium durch Recycling gewonnen werden. Dies sind 21 % der gesamten Lithium-Verbrauchsmenge. Mit dieser Menge ließe sich z. B. der gesamte weltweite Lithium-Bedarf für Aluminiumschmelzen, dissipative Nutzung, Gummi & Thermoplasten, Luftaufbereitung, Sonstige und Strangguss ausreichend decken.

Weiterhin sind die Lithium-Reserven aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass im Pluralismus-Szenario bis zum Jahr 2050 ca. 59 % der vorhandenen Reserven verbraucht sein werden.

Die Kurve Reserven+Sekundärlithium stellt das weltweit bis 2050 vorhandene Lithium-Angebot dar. Durch zunehmenden Verbrauch von Lithium in recycelbaren Anwendungen und Erreichen hoher Sammel- und Recyclingquoten wird das vorhandene Lithium-Angebot durch die zunehmende Menge an Sekundärlithium deutlich vergrößert. Zusätzlich ist hier zu beachten, dass die Rückgewinnung von Lithium über den Recycling-Weg eine Verzögerung in Höhe der Lebensdauer der jeweiligen Verwendung beinhaltet und somit in den Folgejahren nach 2050 mit hohen Mengen an rückgewonnenem Sekundärlithium zu rechnen ist. Rechnet man das Sekundärlithium mit ein, werden somit bis 2050 lediglich 52 % der Lithium-Reserven des Jahres 2008 verbraucht sein.

Betrachtet man die weltweit vorhandenen Lithium-Ressourcen, so werden in diesem Szenario bis 2050 lediglich 20 % durch die globale Lithium-Nachfrage aller Nutzungen verbraucht sein.

6.2 Analyse des Dominanz-Szenarios

Aus der kumulierten Darstellung der Verbrauchswerte der einzelnen Verwendungen im Dominanz-Szenario in Abbildung 6-2 lässt sich ein Gesamt-Lithium-Verbrauch im Zeitraum 2008-2050 von ca. 8,95 Mio. t ablesen. Mit 6,82 Mio. t wird hier für die Fahrzeugbatterien am meisten Lithium verbraucht. Diese Menge entspricht einem Anteil am Gesamtverbrauch von 76 %. Die übrigen Batteriearten machen mit zusammen ca. 800.000 t Lithium-Verbrauch in etwa 9 % der Gesamtmenge aus. Die Verwendungsart mit der drittgrößten Verbrauchsmenge ist Glas & Keramiken mit einem kumulierten Verbrauch von 587.000 t Lithium bis zum Jahr 2050. Die dissipative Nutzung sowie Sonstige gehen mit jeweils knapp über 230.000 t in den Gesamtverbrauch ein. Die übrigen vier Verwendungsarten spielen, wie schon im Pluralismus-Szenario, aufgrund ihrer geringen Startverbrauchs- und Wachstumswerte nur eine untergeordnete Rolle.

Der hohe Verbrauchsanteil der Batterien sorgt dafür, dass, verglichen mit dem Pluralismus-Szenario, eine erheblich größere Menge an Sekundärlithium gewonnen werden kann. Mit ca. 2,2 Mio. t können 25 % des weltweiten Lithium-Verbrauchs in den Jahren 2008-2050 durch Sekundärrohstoffe gedeckt werden.

Betrachtet man jedoch die Reserven, so lässt sich erkennen, dass unter der Annahme einer starken Dominanz der Elektromobilität die Grenze der Lithium-Reserven des Jahres 2008 bereits im Jahr 2045 erreicht sein wird. Durch Verwendung von recyceltem Sekundärlithium kann die Erschöpfung des Lithium-Angebots um vier weitere Jahre bis 2049 verzögert werden. Bei der Betrachtung dieser Zahlen ist allerdings immer zu beachten, dass die als Reserve verwendete Lithium-Menge auf einer im Jahr 2008 getätigten Schätzung mit den zu diesem Zeitpunkt gängigen Abbau- und Produktionsverfahren beruht.

Betrachtet man die von (USGS, 2009) auf 13,8 Mio. t geschätzten Lithium-Ressourcen, so sind im Jahr 2050 selbst unter den extrem hohen Annahmen des Dominanz-Szenarios für das Wachstum der Elektromobilität erst knapp die Hälfte (49 %) der geologischen Vorräte an Lithium in der Erdkruste verbraucht. Die Lithiumvorkommen in den Ozeanen sind dabei nicht berücksichtigt.

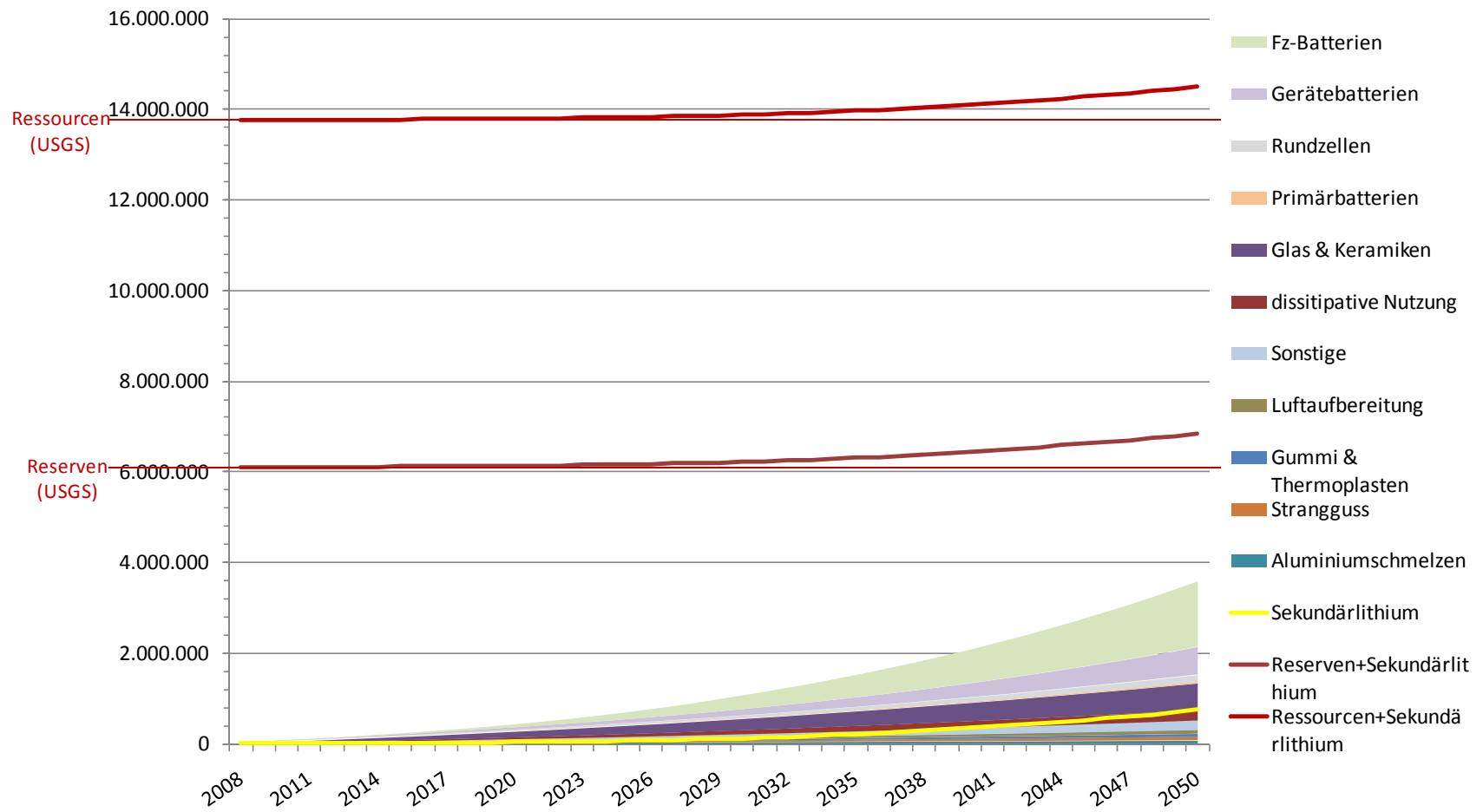


Abbildung 6-1: Verwendungsarten kumuliert [in t Li] – Pluralismus

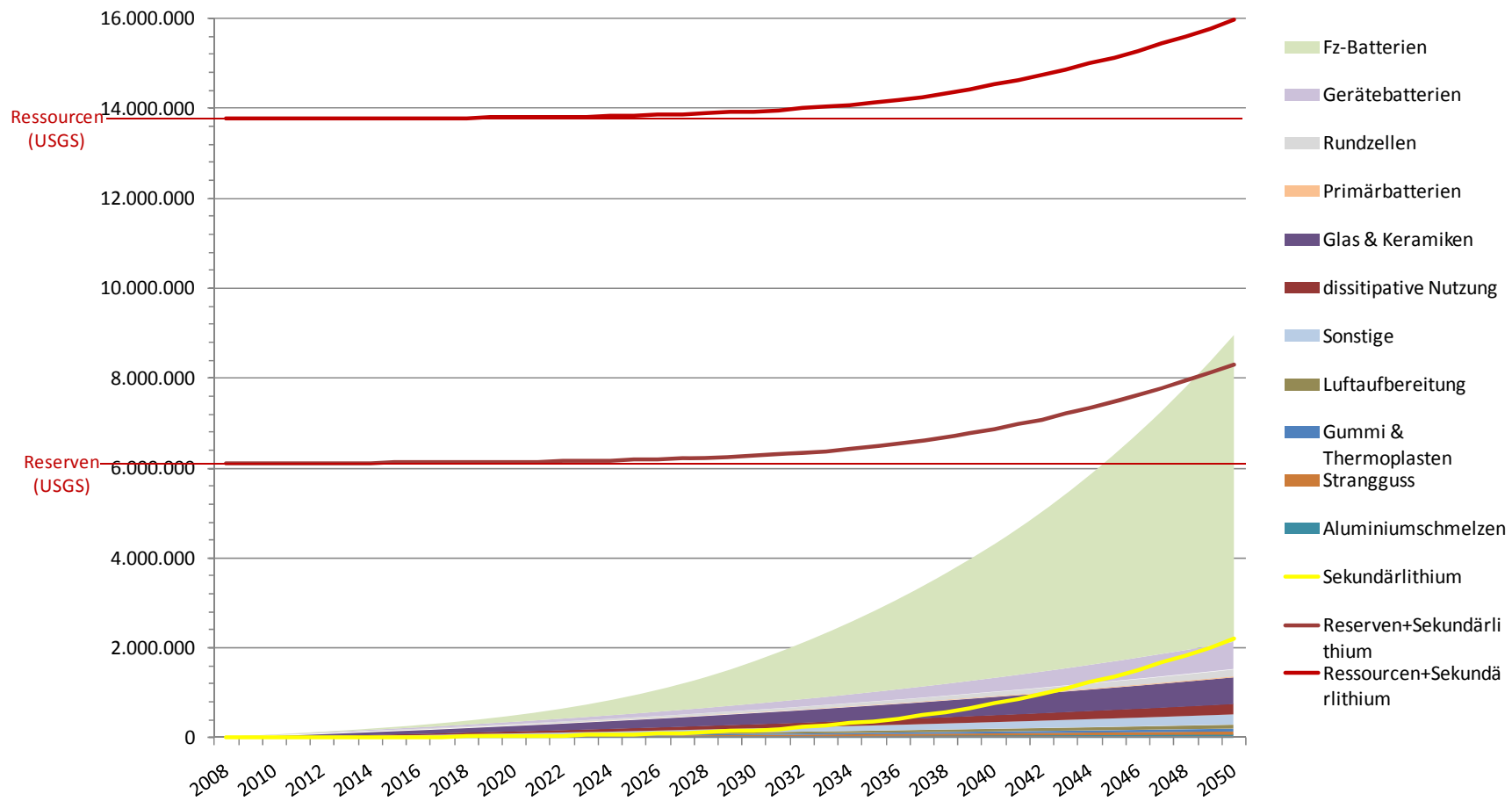


Abbildung 6-2: Verwendungsarten kumuliert [in t Li] – Dominanz

6.3 Szenarien-Vergleich

Die unterschiedlichen Grundannahmen der beiden verwendeten Szenarien werden bereits in Kapitel 5.1 eingehend besprochen. In diesem Kapitel sollen die Szenarien nun ausgehend von den oben dargelegten Ergebnissen und Analysen im Hinblick auf ihre Vor- und Nachteile verglichen werden. Hierfür werden wirtschaftliche, ökologische sowie politische Aspekte in Betracht gezogen.

Aus wirtschaftlicher Sicht kommt es im Dominanz-Szenario zu einschneidenderen Veränderungen. Aufgrund der Tatsache, dass sich die Hybridisierung hier weitgehend durchsetzt, unterziehen sich die Unternehmen einem großen Wandel in ihrer Produktpalette. Hierbei ist jedoch kaum zu erwarten, dass völlig neue Firmen große Marktanteile im (Plug-In-) Hybrid-Markt beanspruchen werden, vielmehr kommt es zu einem Kurswechsel bei den etablierten Herstellern, der sich schon zur heutigen Zeit andeutet. So spielte die Elektromobilität auf der diesjährigen internationalen Automobil Ausstellung (IAA) in Frankfurt bei nahezu allen Ausstellern eine tragende Rolle im Angebot. Es ist davon auszugehen, dass diese Veränderungen gerade bei kleinen Zulieferern im Bereich der herkömmlichen Verbrennungsmotoren bzw. Abgasanlagen zu starken Umsatzeinbußen führen wird, da die Nachfrage nach dieser bis dahin veralteten Technik zurückgehen wird. Gesamt-volkswirtschaftlich gesehen kann dieser Schaden jedoch durch die neu entstehenden Batterie- bzw. Brennstoffzellen-Zulieferer bzw. -Hersteller aufgefangen werden. Sowohl die Firmen als auch die Länder, die am Lithium-Abbau und der Weiterverarbeitung direkt oder indirekt beteiligt sind, profitieren ebenso stärker im Dominanz-Szenario von der höheren Lithium-Nachfrage. Die hohen Lithium-Bedarfe im Dominanz-Szenario führen allerdings zu einer sich bereits in 2040 abzeichnenden weltweiten Lithium-Knappheit. Die wirtschaftlichen Folgen hiervon werden in steigenden Rohstoffpreisen für Lithium, Erhöhung der Abbauquoten und stärkeren Anstrengungen bei der Suche nach neuen Lithium-Quellen bzw. nach Alternativen zum Lithium abzulesen sein. Eine direkte Folge steigender Lithium-Preise könnte zudem eine Veränderung der Wachstumsraten anderer Lithium-Verwendungen sein, da es hier zur vermehrten Suche nach Substituten bzw. zu Einsparungen im Lithium-Verbrauch kommen wird. Im Pluralismus-Szenario hingegen wird diese Knappheit im Lithium-Angebot erst später (nach 2050), mit all ihren oben beschriebenen Auswirkungen auszumachen sein.

Für die Fahrzeughersteller bedeutet die in den Fahrzeug-Penetrationszahlen angegebene Aufteilung des Marktes zwischen konventionellen Antrieben und Hybridfahrzeugen die Anwendung einer zweigleisigen Strategie in Forschung, Entwicklung und Marketing. Einerseits müssen die konventionellen Motoren effektiver und umweltfreundli-

cher gestaltet werden, andererseits muss Forschung und Entwicklung bei den neuen Elektromobilitätstechnologien vorangetrieben werden.

Ein weiterer Punkt bei der Betrachtung der wirtschaftlichen Aspekte ist das mit der Nachfragesteigerung einhergehende Vergrößern des Lithium-Produktionsvolumens in den verschiedenen Abbaugebieten. (Anderson, 2009, S. 23) geht in seiner Studie davon aus, dass es auf Grund der Weltwirtschaftskrise und der darauf folgenden Rezession zu einem Überangebot an Lithium aus den aktuellen Produktionskapazitäten kommen wird. Angebot und Nachfrage werden ca. bis 2017-2018 im Gleichgewicht sein. Erst danach wird die Nachfrage das Angebot übersteigen und es wird zu Preissteigerungen kommen. Diese Nachfragesteigerung muss jedoch seitens der Lithium-Förderländer frühzeitig antizipiert werden. Gerade das Verdampfen des Lithiumhaltigen Wassers in den hochgelegenen Salaren benötigt eine gewisse Vorlaufzeit. Diese beträgt zurzeit in etwa sechs Monate, könnte aber durch speziell entwickelte Trocknungspyramiden deutlich verkürzt werden (Spiegel online, 2009).

Betrachtet man die beiden Szenarien aus ökologischer Sicht, so sind die Vorteile klar beim Dominanz-Szenario festzuhalten. Gerade die ‚grüne Komponente‘, d.h. weniger CO₂-, HC- und NO_x-Ausstoß, ist derzeit ein Hauptargument für den vermehrten Einsatz der Elektromobilität. Wirkliche ökologische Vorteile haben die Fahrzeuge, die elektrischen Strom als (zusätzliches) Antriebsmittel benutzen, allerdings nur, wenn dieser auch mit Technologien hergestellt wird, die wenig oder keine Schadstoffe ausstoßen, wie z. B. Windkraft, Solar- oder Geothermie. Besteht der Strommix, wie im Jahr 2008 in Deutschland, zu über 50 % aus Kohle und Erdgas (Wikipedia, 2009), bringt der Einsatz von Batterie- oder Hybridfahrzeugen wesentlich geringere ökologische Vorteile. Zwar werden die konventionellen Motoren im Pluralismus-Szenario durch weitere Entwicklungen schadstoffarmer gestaltet werden, jedoch werden sie damit dennoch nicht mit ‚grünen Strom tankenden‘ Elektrofahrzeugen konkurrieren können.

Weiterhin sind aus ökologischer Sicht auch die einschneidenden Eingriffe in die bislang unberührten Ökosysteme der hochgelegenen Salare in Südamerika und China zu beachten. Will man die explosionsartig wachsende Nachfrage nach Lithium decken, so werden diese Salzseen gerade im Dominanz-Szenario als Hauptabbaugebiet in der Lithium-Gewinnung großen Zerstörungen ausgesetzt werden. (Spiegel online, 2009)

Politisch gesehen, muss es gerade im Dominanz-Szenario zu einem starken Umdenken innerhalb der Weltbevölkerung kommen, da eine der Annahmen ist, dass die Konsumenten Mehrkosten in der Anschaffung tragen werden. Dieses Umdenken kann nur über gemeinsame Anstrengungen von Politik, Automobil-Lobbys und Firmen-Marketing erreicht werden. So sind z. B. steuerliche Anreize für Käufer von (Plug-In-) Hybriden

und Elektrofahrzeugen gerade im Dominanz-Szenario ein wichtiges Mittel, um eine Marktdurchdringung dieser Technologien zu erreichen. Die Politik kann zudem durch eine Verschärfung der Schadstoff-Emissions-Richtlinien entscheidenden Einfluss auf den Erfolg der Elektromobilität nehmen. Diese politischen Anstrengungen müssen genauso im Pluralismus-Szenario getätigt werden, allerdings ist der Druck hier, bedingt durch den niedriger angenommenen Ölpreis, zum Erreichen effektiver politischer Lösungen und Pläne geringer.

Weiterhin ist es in beiden Szenarien sowohl für die Politik als auch die Wissenschaft wichtig, langfristig nach Alternativen für die Lithium-Batterien zu suchen, was die Abbildung 6-2 unterstreicht.

6.4 Einordnung der Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt sollen die bei der Untersuchung der beiden Szenarien erhaltenen Ergebnisse mit anderen, in der Literatur kontrovers diskutierten Studien verglichen werden.

Die zu diesem Vergleich herangezogenen Studien sind jeweils die beiden Berichte von Tahil ((Tahil, 06), (Meridian International Research, 2008)), sowie von Evans ((Evans R. K., 2008), (Evans K. , 2008)), wobei Tahil, wie bereits oben beschrieben, davon ausgeht, dass es zu einer Lithium-Knappheit kommen wird und Evans einen Lithium-Überfluss prognostiziert. Diese Berichte sind jeweils Antworten und Kommentare zum aktuellen Bericht der anderen Seite und gehen sehr detailliert auf die Annahmen und Berechnungen der Gegenpartei ein. Hier werden lediglich die getroffenen Annahmen betrachtet und können so mit den in dieser Arbeit verwendeten Werten verglichen werden.

In seinem ersten Bericht „The Trouble with Lithium“ aus dem Jahr 2006 geht (Tahil, 06) von einem Übergang von der Öl-Abhängigkeit zur Lithium-Abhängigkeit aus. Im Folgenden werden einige seiner Annahmen dargelegt:

- Nur Lithium aus Sole-Vorkommen kann für die Batterieherstellung verwendet werden
- Jedes Neufahrzeug wird ein PHEV sein
- Die Batteriekapazität wurde mit 8 kWh berechnet und die pro kWh benötigte Lithium-Menge mit 300 g veranschlagt
- Batterie-Recycling wird vernachlässigt

Im März 2008 nahm (Evans R. K., 2008) in seinem Bericht „An abundance of Lithium“ zu obigem Bericht Stellung. Die Kernaussagen waren

- Die Sorgen über eine Lithium-Knappheit sind unbegründet
- Li-Quellen für die Batterieherstellung: Lithium-Mineraie, -Solon, Abwässer aus Ölfeldern und Geothermie-Kraftwerken sowie Lithium-haltiger Lehm
- „Potenzielle Groß-Nutzer müssen wissen, wie viel Lithium langfristig vorhanden ist, egal ob die Quelle als Reserve bewiesen wurde oder nicht.“ (nach Evans R. K., 2008, S. 12)
- Die mit 28,5 Mio. t Lithium als Reserven aufgeführte Menge repräsentiert noch nicht *alle* verfügbaren Lithium-Vorräte

Daraufhin nahm Tahil in seinem zweiten Bericht „The Trouble with Lithium 2“ (Meridian International Research, 2008) mit folgenden Punkten Stellung:

- Korrektur der weltweit nutzbaren Lithium-Reserven auf ca. 4 Mio. t (abbaubare Vorkommen in Südamerika kleiner als zunächst angenommen)
- 20 – 50 % der in Chile vorhandenen Reserven sind bereits abgebaut
- Reserven in Bolivien werden auf ca. 300.000 t herunter korrigiert
- Berechnung der mit vorhandenem Lithium produzierbaren PHEVs mit folgenden Parametern:
 - Batteriekapazität analog General Motors(GM) Volt: 16 kWh
 - Lithium-Menge pro kWh: 263 g
- Antizipierte Folgen:
 - Die vorhandene Lithium-Menge kann die Produktion bis 2015 nur unter hohen Umweltschäden decken
 - Es kommt zu geopolitischen Spannungen aufgrund der Lithium-Abhängigkeit (v.a. zwischen Bolivien und USA)

Im Juli 2008 reagierte (Evans K. , 2008) erneut mit „An abundance of Lithium Part 2“:

- Spodumen kann zur Batterieherstellung verwendet werden, wie bereits in China gängige Praxis
- Die geschlossenen Abbaugelände in Nord-Amerika können bei höheren Lithium-Preisen reaktiviert werden
- Korrektur der bei (Meridian International Research, 2008) gemachten Angaben zur Höhe der Lithium-Reserven in allen Abbaugeländen
- Nicht jedes Neufahrzeug wird ein GM Volt (mit dem damit verbundenem Lithium-Bedarf) sein
- Gemäßigte Nachfrage nach Fahrzeugbatterien (20 % der Neufahrzeuge in 2020 werden eine Lithium-Ionen Batterie haben)

Aufgrund der oben zusammengefassten Aussagen und Annahmen lassen sich die in dieser Arbeit erhaltenen Ergebnisse in der Mitte zwischen diesen beiden Extrempositionen einordnen. Durch die Verwendung zweier unterschiedlicher Szenarien können verschiedene Marktpenetrations-Situationen simuliert werden, wobei in beiden Szenarien die Elektromobilität über einen Zeitraum gesehen an Zuwachs gewinnt und somit nicht auf einmal jegliche Neufahrzeuge in die Lithium-Berechnungen eingehen.

Während im Pluralismus-Szenario noch keine Lithium-Knappheit bis 2050 in Sichtweite ist, werden die derzeit bekannten Reserven im Dominanz-Szenario bereits in 2045 verbraucht sein. Die bei (Tahil, 06) früh angenommene Lithium-Knappheit beruht zum einen auf den in seinem zweiten Bericht stark herunter korrigierten Reserven, vor allem aber auf den angenommenen Lithium-Mengen pro kWh der Fahrzeugbatterien. So wurden in (Tahil, 06) 300 g/kWh angenommen, in (Meridian International Research, 2008) waren es 263 g/kWh. Dies ist die doppelte bzw. 1,75-fache Menge der in dieser Arbeit angenommenen 150 g/kWh. Letztere Zahl beruht auf den Angaben aus (Angerer & al., 2009), unter der Annahme eines Verhältnisses von eingesetzten Kobalt- zu Eisenphosphatkathoden von ca. 50:50.

Auf die Annahme des Anwachsens der abbaubaren Reserven bei steigenden Lithium-Preisen, analog zu (Evans K. , 2008), wird in dieser Arbeit verzichtet, weswegen auch im moderaten Pluralismus-Szenario ein Aufbrauchen der vorhandenen Reserven nach 2050 absehbar ist.

Das Batterie-Recycling und das damit gewonnene Sekundärlithium gehen in dieser Arbeit mit in die Betrachtungen ein und repräsentieren in beiden Szenarien einen nicht zu verachtenden Anteil am Lithium-Verbrauch.

7 Zusammenfassung & Ausblick

Zu Beginn dieser Arbeit werden drei einleitende Fragen zur künftigen Entwicklung des Lithium-Verbrauchs, des Abnehmens der Lithium-Reserven und -Ressourcen sowie der Gewinnung des Sekundärlithiums gestellt. Zusammenfassend sollen diese Fragen nun beantwortet und zusätzlich ein Ausblick auf den nötigen Handlungs- bzw. Untersuchungsbedarf in Industrie, Politik und Wissenschaft gegeben werden.

Ausgehend vom jeweils in der Modellrechnung gewählten Szenario fällt diese Beantwortung unterschiedlich aus. Im gemäßigten Pluralismus-Szenario, bei dem der Automobilmarkt bis 2050 ca. 50:50 zwischen konventionellen Motoren und Hybrid- bzw. Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen aufgeteilt sein wird, stellt der Gesamt-Lithium-Verbrauch bis zum Jahr 2050 keine Gefahr der Erschöpfung der Reserven des Jahres 2008 dar, da bis zu diesem Jahr lediglich 59 % der in 2008 als Reserven eingeschätzten Lithium-Menge verbraucht sein werden. Da in diesem Szenario weniger Fahrzeuge die Lithium-Batterien verwenden, spielt auch das durch Recycling dieser Batterien gewonnene Sekundärlithium eine kleinere Rolle, macht aber immerhin schon 21 % des Gesamt-Lithium-Verbrauchs aus.

Im Dominanz-Szenario hingegen kommt es, verursacht durch die hohen Lithium-Bedarfe für Fahrzeug-Batterien, bereits im Jahr 2045 zum Erschöpfen der Lithium-Reserven des Jahres 2008. Die in großen Mengen recycelten Batterien sorgen zwar für eine hohe Menge an rückgewonnenem Sekundärlithium von 25 % des Gesamt-Verbrauchs, allerdings verlängert dies die Reservenreichweite lediglich um ca. vier Jahre. Somit kann man in diesem Szenario bereits ab dem Jahr 2049 von einer Lithium-Knappheit sprechen, welche zu steigenden Lithium-Preisen und politischen Spannungen führen könnte. Die Tatsache, dass im Jahr 2050 bereits 64 % der vorhandenen Lithium-Ressourcen verbraucht sein werden, entkräftet auch die Argumentation von steigenden Reserven bei steigenden Preisen.

In den nächsten vier Jahrzehnten ist somit zwar nicht von einer Knappheit an Lithium auszugehen, allerdings sollte aus einer längerfristigen Perspektive das Ziel von Industrie, Politik und Wissenschaft das Etablieren von alternativen Batterie-Typen sein, die wie z. B. die ZnAir- oder die NaNiCl-Batterie wenig bzw. kein Lithium benötigen und deren metallische Bausteine keiner Reserven-Knappheit unterliegen.

Generell ist bis 2050 noch nicht absehbar, dass sich ein eingeschwungenes System aus Lithium-Verbrauch und -Recycling einstellen wird, d.h. dass der jeweils neue Bedarf mit Sekundärmaterial gedeckt werden kann. Um dies zu erreichen, müssten die starken Wachstumsraten im Verbrauch zurückgehen, damit die um die Lebensdauer

verzögerte Menge an Sekundärlithium auf ein ähnliches Niveau wie der Lithium-Verbrauch ansteigen kann.

Da die Lithium-Batterien zur Zeit als die Technologie mit dem meisten Potenzial angesehen werden, sind zum Erreichen der in obigen Szenarien angenommenen Marktpenetrationszahlen sowie zur Gewinnung ausreichender Sekundärlithium-Mengen folgende kurzfristige Ziele für Industrie, Politik und Wissenschaft herauszustellen. Um die stark steigende Lithium-Nachfrage befriedigen zu können, muss es einerseits zum Ausbau der vorhandenen Minen- und Abbaukapazitäten sowie zum Erschließen neuer Reserven kommen. Andererseits sollte das kommerzielle Recycling von Lithium-Batterien zur Gewinnung von Sekundärlithium weltweit vorangetrieben und etabliert werden (siehe Kapitel 4.2 Künftige Entwicklung im Batterierecycling). Um eine möglichst große durch Recycling gewonnene Lithium-Menge zu erhalten, muss der politische Fokus auch auf eine Erhöhung der weltweiten Sammel- und Recyclingquoten gerichtet sein, welche großen Einfluss auf die Sekundärlithium-Gewinnung haben. Um einen erhöhten Lithium-Abbau zu gewährleisten, muss es zu geopolitischer Einigkeit zwischen den Förder- und Abnehmerländern kommen. Die Lithium-Reserven konzentrieren sich auf wenige Länder (Bolivien, Chile,...), von denen einige derzeit nicht als geopolitisch stabile Regionen anzusehen sind. Gerade die derzeitigen politischen Spannungen zwischen den USA und Bolivien mit seinen großen Lithium-Vorkommen stehen hier im Fokus.

Aktueller Forschungsbedarf in der Wissenschaft besteht in der Gewinnung von Primär- bzw. Sekundärlithium. Um einen maximalen Ertrag zu erhalten, sollten die Lithium-Abbau- und Gewinnungs-Prozesse optimiert, sowie die Effizienz der Recyclingverfahren und -Prozesse weiter erhöht werden. Eine genauere Untersuchung der weltweiten Lithium-Vorräte würde zudem für mehr Planungssicherheit und eine höhere Abschätzungsgenauigkeit sorgen.

Zusätzlich zur Betrachtung von Lithium verursacht der zu erwartende Einzug der Elektromobilität in den Alltag auch erhöhte Nachfrage bei anderen Rohstoffen. Im Folgenden sollen eine Reihe dieser Rohstoffe kurz aufgezählt und ihre Verwendung in der Elektromobilität umrissen werden.

Neben der Anwendung in Elektrofahrzeugen werden Kobalt, Kupfer und Indium für zahlreiche andere Endprodukte benötigt, was zu einer erhöhten Nachfrage nach diesen Rohstoffen führt. Kobalt wird für Batterien, magnetische Legierungen für Elektromotoren oder auch Superlegierungen für verschleißbeständige Bauteile benötigt. Kupfer wird in Elektromotoren, Batterien, Aktuatoren und Leitungen verwendet und Indium in jeglichen Displays.

Ein weiterer wichtiger Aspekt beim Bau von Fahrzeugen der Elektromobilität ist das Streben nach Gewichtseinsparung durch Leichtbauweise um die Fahrzeugreichweiten zu erhöhen. Aus diesem Grund könnten Rohstoffe wie Titan, Magnesium, Aluminium oder Scandium mit ihren jeweiligen Eigenschaften im Leichtbau von Fahrzeugen künftig vermehrt nachgefragt werden. Mit der zunehmenden Verbreitung der Brennstoffzellen-Fahrzeuge würde eine erhöhte Nachfrage nach Platin einhergehen, welches dort als Katalysator den Elektronenfluss bei der chemischen Reaktion in Gang setzt.

Als eine der seltenen Erden unterliegt Neodym, welches in den sehr leistungsstarken Neodym-Eisen-Bor(NdFeB)-Magneten verwendet wird, ebenfalls einer hohen Nachfrage. Magnete spielen bei Elektromotoren eine wichtige Rolle. Da über 90 % der seltenen Erden für die Magnet-Produktion in China abgebaut werden, sind hier potenzielle Engpässe zu erwarten (Roskill, 2007, S. 198).

Es besteht noch weiterer Forschungsbedarf, um die Auswirkungen der starken Nachfrage nach Elektro- und Hybridfahrzeugen auf die hierfür benötigten Rohstoffe genauer zu untersuchen. Die hier genannten Stoffe sind lediglich ein erster Vorschlag und müssen jeweils genauer untersucht werden. Hierfür würde sich eine Untersuchung analog zu der hier für Lithium durchgeführten Art und Weise anbieten.

Literaturverzeichnis

- Amadee + Company. (2009). Lithium-Ion and Nickel-Metal Hydride Batteries, Lithium, Rare Earth Lanthanum and the future of hybrid electric vehicles, plug-in hybrid electric vehicles and electric vehicles. Bay Harbor Islands, FL., USA: Amadee+Company Inc.
- Anderson, E. R. (01 2009). TRU Group. Abgerufen am 18. 05 09 von Presentation Lithium Supply & Markets IM Conference Santiago 2009 Slide Show: <http://trugroup.com/whitepapers/TRU-Lithium-Outlook-2020.pdf>
- Angerer, G., & al., e. (2009). Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Better Place. (2009). Better Place. Abgerufen am 30. 07 2009 von <http://www.betterplace.com/>
- Bonhoff, D. K. (2009). Market Preparation for Future Drivetrain Technologies in Germany. Stuttgart: Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie.
- Bundesministerium der Justiz. (02. 07 2001). BattV – Einzelnorm. Abgerufen am 22. 06 09 von http://bundesrecht.juris.de/battv/___1.html
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. (21. 01 2009). Kabinett beschließt Neuregelung für Altbatterien. Abgerufen am 22. 06 09 von Entwurf der Bundesregierung für ein Gesetz zur Neuregelung der abfallrechtlichen Produktverantwortung für Batterien und Akkumulatoren: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/battg_entwurf.pdf
- Center for Transportation Research. (2000). Costs of Lithium-Ion Batteries for Vehicles. Oak Ridge, TN: University of Chicago.
- Cheret, D., & Santén, S. (2008). Patentnr. EP 1 589 121 B1. Europa.
- Enghag, P. (2004). Encyclopedia of the Elements. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA.
- EPBA. (2007). Compliance Blueprint A guidance document for setting up a Battery Compliance Organisation. Brüssel: European Portable Battery Association and RECHARGE aisbl.
- Europäische Union. (06. 09 2006). Richtlinie 2006/66/EG des europäischen Parlaments und des Rates über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren und zur Aufhebung der Richtlinie 91/157/EWG. Richtlinie 2006/66/EG . Amtsblatt der europäischen Union.
- EUWID Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH. (2008). Bundesumweltministerium legt Entwurf für ein Batteriegesetz vor. Europäischer Wirtschaftsdienst: Recycling & Entsorgung (21), 1-2.
- EUWID Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH. (2006). Wirtschaft begrüßt Batterie-Richtlinie und fordert Änderungen im Detail. Europäischer Wirtschaftsdienst: Recycling & Entsorgung , 9.

- Evans, K. (Juli 2008). An abundance of Lithium 2. Abgerufen am 05. 05 2009 von http://www.worldlithium.com/AN_ABUNDANCE_OF_LITHIUM_-_Part_2.html
- Evans, R. K. (03 2008). An abundance of Lithium. Abgerufen am 01. 10 2009 von <http://www.worldlithium.com/Abstract.html>
- Frost & Sullivan. (2009). World Hybrid Electric/ Electric Vehicle Battery Market. San Antonio, Tx, USA.
- General Motors Europe. (2009). Brennstoffzellen- oder Batteriefahrzeug? Ähnliche Antriebe, unterschiedliche Infrastruktur. Vortrag auf der f-cell 2009, Stuttgart.
- Georgi-Maschler, T. (15. 06 2009). Recycling von Li-Batterien. (M. Wendl, Interviewer)
- Geschka & Partner. (2009). Perspektiven für die Brennstoffzelle. Darmstadt: Geschka & Partner Unternehmensberatung.
- Jochem, E., Schön, M., & al., e. (2004). Werkstoffeffizienz. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Kakuta, T., & Yamazaki, S. (2006). Patentnr. EP 1 981 115 A1. Europa.
- Lindh, T., & Malmberg, B. (2007). Demographically based global income forecasts up to the year 2050. *International Journal of Forecasting* 23 , S. 553-567.
- Mantuano, & a. (2006). Analysis of a hydrometallurgical route to recover base metals from spent rechargeable batteries by liquid-liquid extraction with Cyanex 272. *Journal of Power Sources* , 1510-1518.
- MBM Fundamentals. (September 2007). Lithium. *Metal Bulletin Monthly* , 46-47.
- Meridian International Research. (2008). The Trouble with Lithium 2. Martainville, France: Meridian International Research.
- OECD. (2008). OECD environmental outlook to 2030. OECD Publishing.
- Paulino, e. a. (2008). Recovery of valuable elements from spent Li-batteries. *Journal of Hazardous Materials* , 843-849.
- Q. Zhang, e. a. (2000). Room temperature acid extraction of Co from LiCo_{0.2}Ni_{0.8}O₂ scrap by a mechanochemical treatment. *Advanced Powder Technology* , 353–359.
- Renz, O. (2001). Untersuchung von Batterieverwertungsverfahren und -anlagen hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Relevanz unter besonderer Berücksichtigung des Cadmiumproblems. Karlsruhe: Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung Universität Karlsruhe (TH).
- Roskill. (2009). The Economics of Lithium, 2009. London: Roskill Information Services Ltd.
- Roskill. (2007). The Economics of Rare Earths and Yttrium. Roskill Information Services Ltd.

- Saeki, e. a. (2004). Co-grinding LiCoO₂ with PVC and water leaching of metal chlorides formed in ground product. *International Journal of Mineral Processing* , 373–378.
- Schmidt, A. (2005). Situationsanalyse zum Batterierecycling. Erlangen: Umweltamt Erlangen – Team Abfallberatung.
- Shin, e. a. (2005). Development of a metal recovery process from Li-ion battery wastes. *Hydrometallurgy* , 172-181.
- Spiegel online. (18. 09 2009). Spiegel online – Wissenschaft. Abgerufen am 30. 09 2009 von Rares Element – Lithium-Mangel bedroht die Auto-Revolution: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/0,1518,649579,00.html>
- SQM. (2008). SQM: Results for 1H08 and Market Outlook. Santiago, Chile: Sociedad Química y Minera de Chile.
- Stiftung GRS Batterien. (2009). Jahresbericht/Dokumentation 2008. Hamburg.
- Stiftung GRS Batterien. (15. 05 2009). Rechtliche Grundlagen. Abgerufen am 23. 06 09 von Erläuterungen des Bundesrates: http://www.grs-batterien.de/fileadmin/user_upload/Download/Recht/BattG_2009/Er%4uterung.pdf
- Tahil, W. (Dezember 06). the trouble with lithium. Abgerufen am 05. 05 09 von www.evworld.com/library/lithium_shortage.pdf
- TOXCO Inc. (2003). TOXCO Inc – Safe Recycling Processes. Abgerufen am 26. 06 2009 von <http://www.toxco.com/processes.html>
- Tytgat, J. (02. 07 2009). General Manager Umicore Research. (M. Wendl, Interviewer)
- Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. (2005). Lithium and Lithium Compounds. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Umicore. (2009). Closing the loop for rare metals in consumer products – opportunities & challenges. Hanau: Umicore.
- Umicore. (2008). The Val'Eas Process. B-2250 Olen, Belgium: Umicore Recycling Solutions.
- USGS. (22. 06 2009). USGS Minerals Information – Lithium. Abgerufen am 18. 08 2009 von <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/>
- USGS. (22. 06 2009). USGS Minerals Information. Abgerufen am 18. 08 09 von Lithium Statistics and Information: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/>
- Volkswagen. (2006). Volkswagen Original Teile. Abgerufen am 04. 09 2009 von Verwertungswege: <http://www.volkswagen-originalteile.de/umwelt/verwertungswege/master2.html>

- wbc-sd. (06 2004). World Business Council for Sustainable Development. Abgerufen am 02. 09 09 von IEA/SMP Transport Model (incl. Documentation & Reference Case Projection):
<http://www.wbcd.org/plugins/DocSearch/details.asp?type=DocDet&ObjectId=MT E0Njc>
- Wendl, M. (2009). Lithiumnachfrage für Zukunftstechnologien. Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI).
- Wietelmann, U., & Bauer, R. J. (2005). Lithium and Lithium Compounds. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Wietschel, M., & Dallinger, D. (12 2008). Quo vadis Elektromobilität? Energiewirtschaftliche Tagesfragen 58 , S. 8-15.
- Wikipedia. (29. 07 2009). Stromkennzeichnung. Abgerufen am 21. 09 2009 von <http://de.wikipedia.org/wiki/Stromkennzeichnung>
- Wikipedia, Absorptionskältemaschine. (09). Wikipedia Deutschland. Abgerufen am 25. 05 09 von Absorptionskältemaschine:
<http://de.wikipedia.org/wiki/Absorptionsk%C3%A4ltemaschine>
- Xu, e. a. (2008). A review of processes and technologies for the recycling of lithium-ion secondary batteries. Journal of power sources , 512-527.
- Zhang, e. a. (1998). Hydrometallurgical process for recovery of metal values from spent lithium-ion secondary batteries. Hydrometallurgy , 259-271.

Anhang

Tabelle A-1: Fahrzeugbestandsdaten 2000-2050, (wbc-sd, 2004)

Total vehicle stock												
	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	
OECD North America	250,4	261,0	276,8	297,5	318,0	334,2	349,3	363,7	377,8	391,8	405,9	
OECD Europe	200,5	215,7	235,1	256,9	263,9	266,9	267,5	267,8	267,8	267,8	267,8	
OECD Pacific	86,4	89,1	95,2	103,0	108,0	110,0	110,8	112,3	114,3	116,5	118,9	
FSU	25,4	30,3	36,7	45,2	56,6	65,2	75,8	86,2	95,5	103,9	111,5	
Eastern Europe	20,0	21,3	23,4	26,3	29,9	32,6	36,0	39,2	42,0	44,6	46,9	
China	16,5	23,1	33,5	49,2	71,5	95,2	127,3	167,0	214,5	271,1	338,6	
Other Asia	18,7	22,9	29,0	37,5	49,1	59,7	74,6	93,7	118,5	150,2	190,5	
India	10,1	13,3	18,1	24,9	34,4	43,7	56,1	72,3	94,3	124,4	165,1	
Middle East	7,0	8,1	9,8	12,3	15,7	18,8	22,6	26,5	30,6	34,8	39,2	
Latin America	32,4	40,4	50,6	63,5	79,4	90,2	106,1	125,3	148,8	176,6	208,5	
Africa	15,9	19,2	24,7	32,5	42,2	53,3	62,5	71,8	83,1	97,5	116,6	
World Total	683,4	744,3	833,0	948,6	1.068,6	1.169,8	1.288,6	1.425,7	1.587,4	1.779,3	2.009,4	

Tabelle A-2: Neuzulassungen 2008-2033

PLURALISMUS													
Anteil an Neuzulassungen [%]	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
HEV [1,4 kWh]	0,01082684	0,04945084	0,08807484	0,12669884	0,16532284	0,17694685	0,18857085	0,20019485	0,20410511	0,20801537	0,21192563	0,21583589	0,21974615
PHEV + BEV [20 kWh]	0	0	1,7672E-05	0,001156	0,00229432	0,00343264	0,00457097	0,00570929	0,00762714	0,00954498	0,01146283	0,01338067	0,01529852
Stadt BEV [20 kWh]	0,00012797	0,00018238	0,00023679	0,0002912	0,00034561	0,00040003	0,00045444	0,00050885	0,00063489	0,00076093	0,00088697	0,00101301	0,00113905
Summe	0,01095481	0,04963322	0,08832931	0,12814604	0,16796278	0,18077952	0,19359625	0,20641299	0,21236713	0,21832128	0,22427543	0,23022957	0,23618372
DOMINANZ													
Anteil an Neuzulassungen [%]	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
HEV [1,4 kWh]	0,01049209	0,04149713	0,07250217	0,10350722	0,13451226	0,15441011	0,17430796	0,19420581	0,21105936	0,22791291	0,24476646	0,26162	0,27847355
PHEV + BEV [20 kWh]	0	0	0,00041044	0,00571355	0,01101666	0,01631977	0,02162289	0,026926	0,03494438	0,04296276	0,05098114	0,05899953	0,06701791
Stadt BEV [20 kWh]	0,00024138	0,00024698	0,00025258	0,00025817	0,00026377	0,00026937	0,00027496	0,00028056	0,00041811	0,00055566	0,00069321	0,00083077	0,00096832
Summe	0,01073347	0,04174411	0,07316519	0,10947894	0,1457927	0,17099925	0,19620581	0,22141237	0,24642185	0,27143133	0,29644081	0,3214503	0,34645978
PLURALISMUS													
Anteil an Neuzulassungen [%]	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
HEV [1,4 kWh]	0,22391298	0,2280798	0,23224663	0,23641346	0,24058029	0,24841804	0,25625579	0,26409354	0,27193129	0,27976903	0,2859972	0,29222536	0,29845352
PHEV + BEV [20 kWh]	0,02089209	0,02648566	0,03207923	0,0376728	0,04326637	0,04683032	0,05039427	0,05395822	0,05752216	0,06108611	0,06208739	0,06308867	0,06408995
Stadt BEV [20 kWh]	0,00137851	0,00161797	0,00185742	0,00209688	0,00233633	0,00258601	0,00283569	0,00308537	0,00333505	0,00358472	0,00364477	0,00370483	0,00376488
Summe	0,24618357	0,25618343	0,26618329	0,27618314	0,286183	0,29783437	0,30948575	0,32113712	0,33278849	0,34443987	0,35172936	0,35901886	0,36630835
DOMINANZ													
Anteil an Neuzulassungen [%]	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
HEV [1,4 kWh]	0,28126004	0,28404654	0,28683303	0,28961952	0,29240601	0,29586634	0,29932078	0,30277816	0,30623555	0,30969293	0,30423509	0,29877726	0,29331942
PHEV + BEV [20 kWh]	0,08568821	0,10435852	0,12302882	0,14169913	0,16036943	0,18897157	0,21757371	0,24617585	0,27477799	0,30338013	0,32161951	0,3398589	0,35809828
Stadt BEV [20 kWh]	0,00252065	0,00407299	0,00562532	0,00717766	0,00872999	0,00943026	0,01013053	0,01083079	0,01153106	0,01223132	0,01424077	0,01625021	0,01825966
Summe	0,36946891	0,39247804	0,41548717	0,4384963	0,46150544	0,49426523	0,52702502	0,5597848	0,59254459	0,62530438	0,64009538	0,65488637	0,66967736

Tabelle A-3: Neuzulassungen 2034-2050

PLURALISMUS									
Anteil an Neuzulassungen [%]	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
HEV [1,4 kWh]	0,30468168	0,31090985	0,31795995	0,32501005	0,33206015	0,33911026	0,34616036	0,34969875	0,35323715
PHEV + BEV [20 kWh]	0,06509123	0,06609251	0,06914018	0,07218786	0,07523553	0,0782832	0,08133087	0,08332814	0,08532542
Stadt BEV [20 kWh]	0,00382493	0,00388498	0,00402979	0,00417461	0,00431943	0,00446424	0,00460906	0,00476348	0,00491789
Summe	0,37359784	0,38088733	0,39112993	0,40137252	0,41161511	0,4218577	0,43210029	0,43779037	0,44348046
DOMINANZ									
Anteil an Neuzulassungen [%]	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
HEV [1,4 kWh]	0,28786158	0,28240374	0,27135802	0,2603123	0,24926658	0,23822085	0,22717513	0,21783951	0,20850388
PHEV + BEV [20 kWh]	0,37633767	0,39457705	0,40961392	0,42465079	0,43968767	0,45472454	0,46976141	0,50028121	0,53080101
Stadt BEV [20 kWh]	0,02026911	0,02227855	0,0240558	0,02583305	0,02761029	0,02938754	0,03116479	0,03012816	0,02909153
Summe	0,68446835	0,69925935	0,70502774	0,71079614	0,71656453	0,72233293	0,72810133	0,74824887	0,76839641
PLURALISMUS									
Anteil an Neuzulassungen [%]	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	
HEV [1,4 kWh]	0,35677554	0,36031394	0,36385233	0,36641438	0,36897643	0,37153848	0,37410053	0,37666258	
PHEV + BEV [20 kWh]	0,08732269	0,08931996	0,09131724	0,09281698	0,09431672	0,09581646	0,0973162	0,09881594	
Stadt BEV [20 kWh]	0,00507231	0,00522673	0,00538115	0,0055174	0,00565366	0,00578991	0,00592617	0,00606242	
Summe	0,44917054	0,45486063	0,46055072	0,46474876	0,46894681	0,47314485	0,4773429	0,48154095	
DOMINANZ									
Anteil an Neuzulassungen [%]	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	
HEV [1,4 kWh]	0,19916825	0,18983263	0,180497	0,17262166	0,16474632	0,15687097	0,14899563	0,14112029	
PHEV + BEV [20 kWh]	0,5613208	0,5918406	0,6223604	0,64657652	0,67079263	0,69500875	0,71922487	0,74344098	
Stadt BEV [20 kWh]	0,0280549	0,02701827	0,02598164	0,02599179	0,02600193	0,02601207	0,02602221	0,02603235	
Summe	0,78854396	0,8086915	0,82883905	0,84518996	0,86154088	0,87789179	0,89424271	0,91059362	