

# Diplomarbeit

## **Abschätzung des künftigen Angebot-Nachfrage-Verhältnisses von Lithium vor dem Hintergrund des steigenden Verbrauchs in der Elektromobilität**

Vorgelegt von:

**Matthias Wendl**

Karlsruhe, im Oktober 2009

Betreuer:

**Prof. Dr. Martin Wietschel**

**Dr. Frank Marscheider-Weidemann**

**Dr.-Ing. Gerhard Angerer**

Fraunhofer-ISI  
Competence Center N:  
Nachhaltigkeit und Infrastruktursysteme

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Abschätzung zum weltweiten Lithium-Verbrauch und –Angebot bis zum Jahr 2050 getätigt. Hierfür wurde ein Berechnungsmodell entwickelt, das ausgehend von den Verbräuchen der Haupt-Lithium-Verwendungsarten im Jahr 2008 und deren jeweiligen Wachstumsprognosen den künftigen Lithium-Bedarf errechnet. Die Bedarfsentwicklung im Fahrzeugbatteriemarkt wurde mittels zweier Marktpenetrationsszenarien gesondert betrachtet. Ferner wurde die Menge des durch Recycling wiedergewonnenen Sekundärlithiums mit Hilfe von Sammel- und Recyclingquoten ermittelt. Aus diesem Grund wurden zunächst der aktuelle Stand, sowie die derzeitige Gesetzeslage im Li-Batterie-Recycling dargestellt.

Im gemäßigten Pluralismus-Szenario werden, unter Berücksichtigung der Verwendung von recyceltem Material, bis 2050 ca. 51 % der weltweit vorhandenen Lithium-Reserven verbraucht sein. Die verwendete Menge an Sekundärlithium deckt hierbei etwa 25 % des Gesamtbedarfs. Im zweiten Szenario, dem eine weltweite Dominanz der Elektromobilität zugrunde liegt, kommt es trotz Wiederverwendung des Sekundärlithiums bereits im Jahr 2049 zu einer Erschöpfung der Lithium-Reserven.

Unabhängig vom betrachteten Marktszenario spielt die Verwendung von Sekundärlithium beim Decken des steigenden Lithium-Bedarfs eine große Rolle, da sie die Reichweite der vorhandenen geologischen Reserven streckt.

## **Abstract**

This thesis incorporates an assessment of the worldwide Lithium consumption and supply until the year 2050. Based on the consumption of the main Li-applications in the year 2008 and their respective forecasted growth rates a model has been developed to evaluate the future Lithium demand. The developments in the demand of the vehicle-battery-market have been contemplated separately. Furthermore the amount of recycled secondary Lithium was determined using specific collection and recycling quotas. For this reason the state of the art and the current legislation in Lithium-battery-recycling was illustrated beforehand.

Under the assumption of the application of recycled secondary Lithium approx. 51 % of the worldwide Lithium-reserves will be consumed in the moderate Pluralismus-scenario. At this the secondary material covers nearly 25 % of the total Li-demand. In the second scenario, which contains the dominance of the electric powered vehicles, the Lithium-reserves will already be exhausted in the year 2049 even if secondary material is used to reach the high Li-demand.

As the deployment of recycled secondary Lithium stretches out the range of the geological reserves, recycling plays an important role irrespective of the chosen scenario.

# I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis .....	1
II.	Abbildungsverzeichnis .....	
III.	Tabellenverzeichnis.....	
IV.	Abkürzungsverzeichnis.....	
V.	Verwendete chemische Elemente und Formeln .....	
<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	<i>Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit.....</i>	<i>2</i>
1.2	<i>Vorgehensweise.....</i>	<i>3</i>
<b>2</b>	<b>Lithium-Synopse .....</b>	<b>4</b>
2.1	<i>Eigenschaften .....</i>	<i>4</i>
2.2	<i>Vorkommen .....</i>	<i>4</i>
2.2.1	<i>Lithium-Mineralen .....</i>	<i>5</i>
2.2.2	<i>Lithium-Solen.....</i>	<i>6</i>
2.2.3	<i>Reserven vs. Ressourcen .....</i>	<i>6</i>
2.3	<i>Produktion .....</i>	<i>9</i>
2.4	<i>Aktuelle Verwendungen .....</i>	<i>12</i>
<b>3</b>	<b>Lithium-Bedarf in den einzelnen Verwendungen.....</b>	<b>13</b>
3.1	<i>Glas &amp; Keramiken .....</i>	<i>13</i>
3.1.1	<i>Einsatz von Lithium in Glas &amp; Keramiken .....</i>	<i>13</i>
3.1.2	<i>Aktuelle Bedarfssituation .....</i>	<i>14</i>
3.1.3	<i>Künftiger Li-Bedarf für Glas &amp; Keramiken .....</i>	<i>14</i>
3.2	<i>Batterien.....</i>	<i>15</i>
3.2.1	<i>Einsatz von Lithium in Batterien.....</i>	<i>15</i>
3.2.2	<i>Aktuelle Bedarfssituation .....</i>	<i>15</i>
3.2.3	<i>Künftiger Lithium-Bedarf in Batterien .....</i>	<i>15</i>
3.3	<i>Schmierfette .....</i>	<i>18</i>
3.3.1	<i>Einsatz von Lithium in Schmierfetten.....</i>	<i>18</i>
3.3.2	<i>Aktuelle Bedarfssituation .....</i>	<i>19</i>
3.3.3	<i>Künftiger Lithium-Bedarf für Schmierfette .....</i>	<i>19</i>
3.4	<i>Aluminiumschmelzen.....</i>	<i>19</i>

3.4.1	Einsatz von Lithium beim Aluminiumschmelzen .....	20
3.4.2	Aktuelle Bedarfssituation .....	20
3.4.3	Künftiger Lithium-Bedarf für das Aluminiumschmelzen .....	20
3.5	<i>Luftaufbereitung</i> .....	20
3.5.1	Einsatz von Lithium in der Luftaufbereitung .....	21
3.5.2	Aktuelle Bedarfssituation .....	21
3.5.3	Künftiger Lithium-Bedarf für die Luftaufbereitung .....	21
3.6	<i>Künftiger Bedarf an Lithium aus den Hauptverwendungen</i> .....	21
<b>4</b>	<b>Stand der Technik im Recycling von Lithium-Batterien</b> .....	<b>22</b>
4.1	<i>Physikalische Prozesse</i> .....	23
4.1.1	Mechanische Zerteilung .....	23
4.1.2	Thermische Behandlung.....	23
4.1.3	Mechano-chemischer Prozess.....	23
4.1.4	Auflösung.....	23
4.2	<i>Chemische Prozesse</i> .....	24
4.2.1	Säure-Extrahierung.....	24
4.2.2	„Bioleaching“ .....	24
4.2.3	Lösungsmittlextraktion.....	24
4.2.4	Chemische Ausscheidung .....	25
4.3	<i>Kombinationen</i> .....	25
4.3.1	VAL'EAS™ Prozess, Umicore (Tytgat, 2009), (Cheret & Santén, 2008), (Umicore, 2008) 25	
4.3.2	Tiefemperaturzerlegung, Toxco Inc. (Center for Transportation Research, 2000, S. 45-48), (Renz, 2001, S. 138-139).....	27
4.3.3	Prozess der RWTH Aachen (Georgi-Maschler, 2009) .....	28
4.3.4	Prozess zur Metallwiedergewinnung aus Lithium-Ionen-Batterie-Abfällen [Shin et al. 2005]	30
4.3.5	Mechanisches Trennen, Kalzinierung, Ausspülen mit Wasser [Paulino et al. 2008].....	31
4.3.6	Europäisches Patent EP 1 981 115 A1: Methode zur Wiedergewinnung wertvoller Substanzen von einer Lithium-Ionen Batterie.....	32
4.4	<i>Effizienz der Recycling-Kette</i> .....	34
4.5	<i>Künftige Entwicklung im Batterierecycling</i> .....	35

<b>5</b>	<b>Anfall von Li-haltigen Abfallstoffen aus Batterien .....</b>	<b>36</b>
5.1	<i>Gesetzeslage, aktuelle Sammel- und Recyclingquoten .....</i>	36
5.2	<i>Entwicklung künftiger Sammel- und Recyclingquoten .....</i>	40
<b>6</b>	<b>Angebotspotential von Sekundärlithium aus der Wiederverwertung Li-haltiger Abfallstoffe..</b>	<b>40</b>
6.1	<i>Methodik .....</i>	40
6.2	<i>Modell.....</i>	43
6.2.1	<i>Modellbeschreibung.....</i>	43
6.2.2	<i>Modellergebnisse .....</i>	59
6.2.2.1	<i>Szenario: Pluralismus.....</i>	59
6.2.2.2	<i>Szenario: Dominanz.....</i>	62
<b>7</b>	<b>Entwicklung von Lithium-Angebot und -Nachfrage.....</b>	<b>64</b>
7.1	<i>Analyse des Pluralismus-Szenarios .....</i>	65
7.2	<i>Analyse des Dominanz-Szenarios .....</i>	68
7.3	<i>Szenarien-Vergleich .....</i>	70
7.4	<i>Sensitivitätsanalysen .....</i>	72
7.5	<i>Einordnung der Ergebnisse .....</i>	77
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung &amp; Ausblick.....</b>	<b>80</b>
<b>VI.</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>83</b>
<b>VII.</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>86</b>

## II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Offene Fragen, Zahlen aus (Roskill, 2009, S. 157), (USGS, 2009).....	2
Abbildung 2-1 Einteilung der Rohstoffvorkommen, verändert nach (USGS, 2009).....	8
Abbildung 2-2 Überblick über die Lithium-Produktion, verändert nach (Roskill, 2009, S. 12) .....	10
Abbildung 2-3 Welt-Lithium-Produktion nach Ländern (in t Li), verändert nach (Roskill, 2009, S. 22)	11
Abbildung 2-4 Lithium-Verwendungen in 2008, verändert nach (Roskill, 2009, S. 156) .....	12
Abbildung 3-1 Verwendung der Fahrzeugtypen, aus (Bonhoff, 2009, S. 25).....	17
Abbildung 4-1 Der VAL'EAS™ Prozess von Umicore, (Umicore, 2008, S. 5).....	26
Abbildung 4-2 Vereinfachte Darstellung des Toxco-Prozesses .....	28
Abbildung 4-3 Ablauf des an der RWTH Aachen entwickelten Recyclingprozesses .....	29
Abbildung 4-4 Ablaufschema des Recyclingprozesses, verändert nach (Shin, 2005, S. 173) .....	31
Abbildung 4-5 Vereinfachte Darstellung der Li-Gewinnung, verändert nach (Paulino, 2008, S. 845)..	32
Abbildung 4-6 Ablaufschema des Patents zur Li-Wiedergewinnung, verändert nach (Kakuta & Yamazaki, 2006).....	33
Abbildung 4-7 Berechnung der Effizienz der Recyclingkette, (Umicore, 2009, S. 18).....	34
Abbildung 5-1 Wirkungszusammenhänge eines GRS, verändert nach (EPBA, 2007, S. 10).....	38
Abbildung 5-2 Sammelquoten bereits bestehender Rücknahmesysteme im Jahr 2005 [in %], verändert nach (EPBA, 2007, S. 22).....	39
Abbildung 6-1 Beispiel der Dateneingabe über Microsoft Excel.....	42
Abbildung 6-2 Vensim Werkzeugleiste .....	42
Abbildung 6-3 Analyse-Werkzeugleiste.....	43
Abbildung 6-4 Berechnung der Senke „Beseitigung“ .....	45
Abbildung 6-5 Sammlung zum Recycling .....	45
Abbildung 6-6 Berechnung der Lithium-Menge für „Fz-Batterien“ .....	46
Abbildung 6-7 Berechnung des Anfalls von Sekundärlithium .....	47
Abbildung 6-8 Senke „Dissipative Nutzung“ .....	47
Abbildung 6-9 Gesamtdarstellung des Vensim-Berechnungsmodells .....	49
Abbildung 6-10 Neuzulassungsanteile - Szenario Dominanz .....	52
Abbildung 6-11 Neuzulassungsanteile - Szenario Pluralismus.....	53
Abbildung 6-12 Studien zu Neuzulassungen weltweit .....	53
Abbildung 6-13 Fahrzeuganteile am Gesamtbestand [in %] - Pluralismus-Szenario .....	59
Abbildung 6-14 Gesamt-Lithium-Verbrauch, Nachfrage nach Primärlithium und Anfall von Sekundärlithium [in t Li] – Pluralismus.....	60
Abbildung 6-15 Verbrauchsmengen der einzelnen Verwendungsarten [in t Li] – Pluralismus .....	61

Abbildung 6-16 Fahrzeuganteile am Gesamtbestand [in %] - Dominanz-Szenario .....	62
Abbildung 6-17 Gesamt-Lithium-Verbrauch, Nachfrage nach Primärlithium und Anfall von Sekundärlithium [in t Li] – Dominanz .....	63
Abbildung 6-18 Verbrauchsmengen der einzelnen Verwendungsarten [in t Li] – Dominanz.....	64
Abbildung 7-1 Verwendungsarten kumuliert [in t Li] - Pluralismus .....	67
Abbildung 7-2 Verwendungsarten kumuliert [in t Li] - Dominanz .....	69
Abbildung 7-3 Verbrauchsmengen bei verlängerter Lebensdauer [in t Li] .....	73
Abbildung 7-4 Sukzessive Erhöhung der Batterie-Sammelquote [in %] .....	74
Abbildung 7-5 Gewonnenes Sekundärlithium pro Jahr [in t Li] - Pluralismus.....	75
Abbildung 7-6 Lithium-Verbrauch und Primärbedarf bei verlängerter Lebensdauer [in t Li].....	76
Abbildung 7-7 Gewonnenes Sekundärlithium pro Jahr [in t Li] – Dominanz .....	77



### III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Kommerziell genutzte Lithium-Mineraie, verändert nach (Roskill, 2009, S. 8) (Wietelmann & Bauer, 2005, S. 4-6).....	5
Tabelle 2-2 Sole-Konzentrationen an ausgewählten Lagerstätten, verändert nach (Roskill, 2009, S. 9) 6	
Tabelle 2-3 Lithium-Reserven nach Ländern (in 000t Li), verändert nach (Roskill, 2009, S. 11).....	9
Tabelle 2-4 Versorgungssituation bei Lithium 2008.....	11
Tabelle 3-1 Wachstumsprognosen der Hauptverwendungen [in %] .....	22
Tabelle 4-1 Recycling-Effizienzen beschriebener Prozesse .....	35
Tabelle 6-1 Senken der einzelnen Verwendungsarten .....	44
Tabelle 6-2 Annahmen zum Recycling.....	56
Tabelle 6-3 Verwendete Wachstumswerte [in % p.a.].....	57
Tabelle VI-1 Fahrzeugbestandsdaten 2000-2050, (wbc-sd, 2004) .....	83
Tabelle VI-2 Neuzulassungen 2008-2033 .....	84
Tabelle VI-3 Neuzulassungen 2034-2050 .....	85

#### IV. Abkürzungsverzeichnis

bbl	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

## V. Verwendete chemische Elemente und Formeln

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

---

## 1 Einleitung

Die globale Umstellung der Fahrzeug-Antriebskonzepte von den klassischen Verbrennungsmotoren hin zu Anwendungen der Elektromobilität wird sowohl von der Politik als auch von Wissenschaft und Wirtschaft als unausweichlich angesehen und hat bereits mit der kommerziellen Einführung von Mild-Hybrid- und Hybridfahrzeugen begonnen. Mit der schrittweisen Abkehr vom Verbrennungsmotor wird versucht, sich aus der Abhängigkeit vom Erdöl und seinen preisdiktierenden Förderländern zu befreien. Weiterhin liegt gerade der politische Fokus bezüglich des Klimawandels und der immer größer werdenden Debatte um CO<sub>2</sub>-Ausstoss und Abgas-Grenzwerte auf den Potentialen der umweltschonenden Elektromobilität. So werden schon beim Einsatz eines zusätzlichen Elektromotors, wie z.B. im Toyota Prius, signifikante CO<sub>2</sub>- sowie Kraftstoffmengen gespart. Betrachtet man ein reines Elektrofahrzeug, so kann man den CO<sub>2</sub>-Ausstoss beim Einsatz regenerativer Energien zur Akku-Aufladung sogar auf nahezu Null herabsetzen.

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.

## 1.1 Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

Die oben genannten Tatsachen 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?

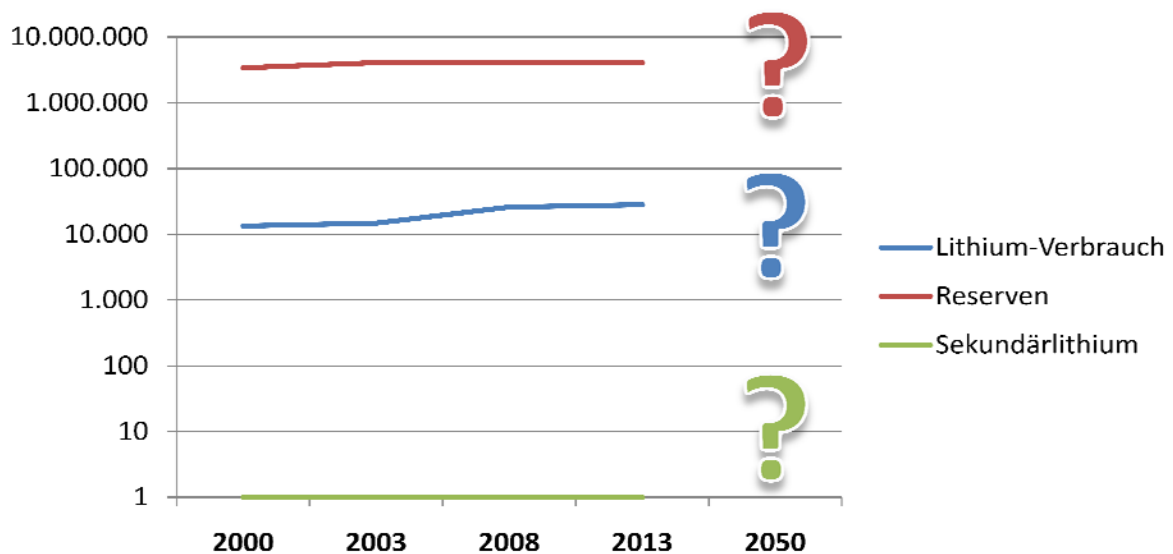


Abbildung 1-1 Offene Fragen, Zahlen aus (Roskill, 2009, S. 157), (USGS, 2009)

In der vorliegenden Arbeit soll daher der künftige Lithium-Bedarf sowie das Potential der Gewinnung von Sekundärlithium aus dem Recycling abgeschätzt werden. Es wurde 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, wurde die Entwicklung der Nachfrage nach Fahrzeugbatterien, welche große Li-Mengen benötigen, gesondert betrachtet. Hierfür wurden Prognosen für die künftige Entwicklung der Neufahrzeugzulassungen, durchgeführt von dem Fraunhofer Institut für System- und Innovationstechnik (ISI) sowie von weiteren renommierten Forschungs- und Wirtschaftsinstituten, herangezogen. Als Reichweite der Berechnungen wurde der Zeitraum von 2008 bis 2050 gewählt.

---

## 1.2 Vorgehensweise

Im Folgenden wird zunächst das Element Lithium näher beschrieben. In dieser „Lithium-Synopse“ (Kap.2) wird auf die chemischen und physikalischen Eigenschaften, die weltweiten Vorkommen, sowie deren Verteilung, die Produktion und die aktuellen Verwendungsarten von Lithium eingegangen.

Letzteren widmet sich das anschließende Kapitel. Zu den fünf Haupt-Lithium-Verwendungen, welche zusammen 80 % des weltweiten Lithium-Verbrauchs im Jahr 2008 ausmachten, wird der jeweilige Einsatz bzw. die Verwendung von Lithium in der Produktion und Nutzung beschrieben. Außerdem wird für jede Verwendungsart ein Überblick über die aktuelle sowie die künftige Bedarfssituation gegeben. Eine Zusammenfassung der einzelnen Bedarfe zu einem künftig zu erwartenden Gesamt-Lithium-Bedarf schließt dieses Kapitel ab.

Da Sekundärlithium in erster Linie durch das Recycling von Li-haltigen Batterien gewonnen werden kann, gibt das vierte Kapitel einen Einblick in den aktuellen Stand der Technik beim Batterie-Recycling. Zunächst werden einzelne Prozesse beschrieben, die bei den Recyclingvorgängen angewendet werden. Zur Extrahierung von Lithium aus den Batterien sind Kombinationen dieser Einzelprozesse nötig. Sowohl auf bereits kommerziell betriebene als auch erst im Versuchslabor angewendete Kombinationen wird im Anschluss genauer eingegangen. Weiterhin werden die einzelnen Schritte und Verfahren zu einer gesamten Recycling-Kette verbunden und deren Effizienz sowie deren Schwachstellen betrachtet. Zum Ende dieses Kapitels wird ein kurzer Ausblick auf die zu erwartende Entwicklung im Batterierecycling gegeben.

Das fünfte Kapitel beschäftigt sich mit den Rahmenbedingungen des Recyclings. Vor allem die Sammel- sowie die Recyclingquoten spielen hier die entscheidende Rolle. Zunächst werden aktuelle Vorschriften und Gesetze hierzu betrachtet. Daraufhin wird ein kurzer Ausblick auf die künftige Entwicklung der einzelnen Quoten sowie auf geplante bzw. geeignete Verbesserungsmaßnahmen gegeben.

Im sechsten Kapitel wird das Angebotspotential von Sekundärlithium durch Recycling berechnet. Hierfür werden zunächst im Methodik-Teil (Kapitel 6.1) das verwendete Simulationsprogramm sowie dessen Anwendung beschrieben. Im Abschnitt 6.2 wird dann das entwickelte Berechnungsmodell mit seinen einzelnen Rahmenbedingungen, Quellen und Senken erklärt und die Ergebnisse werden graphisch dargestellt.

Im Kapitel 7 wird die in Kapitel 3.6 genannte künftige Lithium-Nachfrage mit dem Li-Angebot, bestehend aus den Reserven und dem in Kapitel 6 ermittelten Sekundärlithium, verglichen. Als Ergebnis-Interpretation wird eine Aussage zur Reichweite der weltweiten Lithium-Menge bei der zu

erwartenden starken Nachfragesteigerung getroffen. Um die Haupt-Einflussfaktoren auf die Sekundärlithium-Gewinnung zu bestimmen werden einzelne Sensitivitätsanalysen durchgeführt.

Im achten Kapitel wird der gewählte Ansatz noch einmal zusammengefasst, verglichen und kritisch hinterfragt um einen Überblick zu möglichen Erweiterungen des Ansatzes zu bekommen und um mögliche Einschränkungen bei der Interpretation und Einordnung der Ergebnisse aufzuzeigen. Weiterhin wird auf den künftigen Handlungs- respektive Forschungsbedarf in diesem Themenbereich hingewiesen und ein kurzer Ausblick gegeben.

## **2 Lithium-Synopse**

### **2.1 Eigenschaften**

Mit der Ordnungszahl 3 und einem Atomgewicht von 6,941 ist Lithium das erste und gleichzeitig das leichteste Metall im Periodensystem. Es ist ein leicht formbares Alkalimetall (Mohs Härte: 0,6) und hat eine silbergraue Farbe. Bei Raumtemperatur ist Lithium der Feststoff mit der geringsten Dichte ( $0,534 \text{ g/cm}^3$  bei  $20^\circ\text{C}$ ) und reagiert mit den meisten Luftbestandteilen, wie z.B. Wasser, Sauerstoff,  $\text{CO}_2$  oder Stickstoff. Aus diesem Grund liegt Lithium in der Natur lediglich in Verbindungen vor. Reines Lithium-Metall muss mit Mineralöl oder Edelgasen in Stahlbehältern aufbewahrt werden, da es nur auf diese Weise, d.h. ohne Luftkontakt, unbegrenzt lange gelagert werden kann. (Wietelmann & Bauer, 2005, S. 13)

Seine hohe elektrische Leitfähigkeit beruht auf einer kubisch-raumzentrierten Kristallstruktur der Atome im Metallgitter. Lithium hat sowohl eine geringe thermische Ausdehnung ( $46 \cdot 10^{-6} \text{ m K}^{-1}$  bei  $20^\circ\text{C}$ ) als auch eine hohe spezifische Wärmekapazität ( $3.573 \text{ J K}^{-1}\text{kg}^{-1}$ ). Die Schmelztemperatur liegt bei  $180^\circ\text{C}$  und der Verdampfungspunkt bei  $1.342^\circ\text{C}$ . (Wietelmann & Bauer, 2005, S. 2-4)

Aufgrund der großen Spannweite zwischen seinem Schmelz- und Verdampfungspunkt sowie der geringen thermischen Ausdehnung kann Lithium sehr gut in Anwendungen für Kühlzwecke oder den Hitzetransfer verwendet werden. (MBM Fundamentals, 2007).

Wenn Lithium mit anderen Metallen legiert wird, verändert es deren Eigenschaften beträchtlich, wie z.B. die Härte von Aluminium oder Blei oder die Verformbarkeit von Magnesium.

Lithium verbrennt mit einer charakteristischen roten Flamme und kann lediglich mit Kalziumchlorid oder mit auf Kochsalz basierenden Löschpulvern gelöscht werden.

### **2.2 Vorkommen**

Die Lithium-Vorkommen in der Erdkruste werden zwischen 20 und 60 ppm (parts per million) angegeben, während die Li-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 Li-haltigem Lehm, sowie die Li-Gewinnung aus dem Abwasser von Geothermie-Kraftwerken sind derzeit lediglich im Entwicklungsstadium.

### 2.2.1 Lithium-Mineraie

Die kommerziell genutzten Li-Mineraie sind Petalit, Spodumen, Lepidolith, Eucryptit und Hectorit. Die jeweiligen theoretischen und generell vorgefundenen Li-Gehalte sowie die entsprechenden chemischen Formeln sind in Tabelle 2-1 dargestellt.

**Tabelle 2-1 Kommerziell genutzte Lithium-Mineraie, verändert nach (Roskill, 2009, S. 8) (Wietelmann & Bauer, 2005, S. 4-6)**

Mineral	Formel	theoretische Li <sub>2</sub> O-Konzentration (%)	übliche Li <sub>2</sub> O-Konzentration (%)
Petalit	LiAlSi <sub>4</sub> O <sub>10</sub>	4,9	3,0-4,5
Spodumen	LiAlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	8,0	1,5-7,5
Lepidolith	K[Li, Al] <sub>3</sub> [Al, Si] <sub>4</sub> O <sub>10</sub> [F, OH] <sub>2</sub>	3,3-7,7	3,0-4,0
Eucryptit	LiAlSiO <sub>4</sub>	11,1	5,0
Hectorit	LiNaMg <sub>8</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ) <sub>3</sub> [F, OH] <sub>6</sub>	1,2	0,3-0,6

Petalit hat eine monoklinische Struktur und schließt sich bei Erhitzung auf 1.100°C in β-Spodumen und Siliziumdioxid (SiO<sub>2</sub>) auf. Aufgrund seines geringen Eisenanteils wird es besonders in der Glasherstellung verwendet.

Spodumen-Erze bestehen aus reinem Spodumen gemischt mit Quarz oder Feldspat. Manchmal treten sie in Form von großen einzelnen Kristallen auf. Genau wie Petalit wird es hauptsächlich in der Glas- & Keramikindustrie verwendet, jedoch kann daraus unter hohem energetischem und damit kostenintensivem Aufwand auch Li-Karbonat hergestellt werden. (Enghag, 2004, S. 296)

Lepidolith ist der wichtigste Lithium-Glimmer. Ursprünglich war es das meistgenutzte Li-Mineral, verlor jedoch aufgrund seines hohen Fluorgehalts an Bedeutung.

Eucryptit ist ein relativ seltenes Li-Mineral, welches hauptsächlich in Kombination mit Petalit auftritt.

Hectorit ist das einzige Li-Mineral, das in Sedimentgestein und Lehm auftritt. Es wandelt Flüssigkeiten in eine Gel-artige Struktur um und wird in Mörteln, Klebern und Lacken verwendet. (Roskill, 2009, S. 8)

Li-Mineraie werden hauptsächlich in Australien, China und Mozambique abgebaut. Kleinere Mengen werden auch in Frankreich, Indien, Schweden und der Ukraine gefördert.



### 2.2.2 Lithium-Solen

In zahlreichen Salzseen der Erde treten Lithium-Solen mit besonders hohem Li-Gehalt auf. Dies folgt aus der hohen Wasserlöslichkeit von Li-Chlorid. In sehr trockenen Zonen verdunstet das Wasser und die Li-Konzentration erhöht sich. Schließlich bleiben in Hohlräumen Lithium-Solen mit Li-Gehalten von bis zu 2.000 ppm zurück, aus denen mit vergleichsweise geringem Aufwand Li-Karbonat gefördert werden kann. Hieraus wird eine Vielzahl unterschiedlicher Li-Verbindungen hergestellt.

In Salaren, trockenen Salzseen, sind die Li-Solen direkt unter einer dünnen Salzkruste zu finden. Dies macht den kommerziellen Abbau ungleich leichter. Salare treten an Orten auf, an denen die Verdampfungsrate des Wassers höher ist als die Niederschlagsmenge. Dies ist vor allem in den Hochplateaus der Anden und Tibets der Fall. Einen großen Einfluss auf die Abbaukosten hat auch der Gehalt von Magnesium oder Kalium in den Solen. Treten davon zu hohe Konzentrationen auf, erhöht sich der Aufwand zur Reinigung des Li-Karbonats. (Wietelmann & Bauer, 2005, S. 7).

Tabelle 2-2 stellt die wichtigsten Lithium-Sole Vorkommen und deren jeweiligen Lithium-, Kalium- und Magnesium-Gehalte dar.

**Tabelle 2-2 Sole-Konzentrationen an ausgewählten Lagerstätten, verändert nach (Roskill, 2009, S. 9)**

Sole-Vorkommen	Li (ppm)	K (ppm)	Mg (ppm)
Clayton Valley (USA)	163	0,40	190
Salar de Atacama (Chile)	1.570	2,36	9.650
Salar de Hombre Muerto (Argentinien)	680-1.210	0,24-0,97	180-1.410
Salar de Uyuni (Bolivien)	321	2,53	-
Großer Salzsee (USA)	18	0,26-0,72	5.000-9.700
Totes Meer (Israel)	12	0,56	30.900
Zabuye (China)	489	1,66	26
Taijinaier (China)	310	0,44	20.200

Die Gewinnung von Lithium aus Meerwasser sowie aus Abwässern von Ölbohrungen bzw. Geothermie-Kraftwerken ist, wie bereits erwähnt, erst in der Entwicklung und spielt derzeit keinerlei kommerzielle Rolle.

### 2.2.3 Reserven vs. Ressourcen

Bei der Bewertung und Einschätzung der Lithium-Vorkommen auf der Erde gibt es unterschiedliche Herangehensweisen. Dies führte in der Literatur zu kontroversen Ansichten über die Reichweite der weltweiten Lithium-Vorkommen. So wird in (Tahil, 06) von einem dramatischen Lithium-Mangel aufgrund der hohen zu erwartenden Nachfrage für Fahrzeugbatterien ausgegangen, wohingegen

---

(Evans K. , 2008) in seiner Studie keinen Grund zur Sorge bzgl. der Knappheit der weltweiten Lithium-Reserven sieht.

Im Folgenden werden die Vorkommen deshalb nach der offiziellen Definition des U.S. Geological Survey (USGS) bewertet. Hierbei werden die Gesamtvorkommen in „reserves“ also Reserven, „reserve base“, die Reservebasis und „resources“, die Ressourcen unterteilt (siehe Abbildung 2-1).

Die Ressourcen umfassen die Menge eines festen, flüssigen oder gasförmigen Materials in der Erdkruste, aus welcher der wirtschaftliche Abbau des Rohstoffs aktuell oder potentiell 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 festgelegt, durch die aktuellen Abbau- und Produktionsmethoden hervorgerufene, physikalische und chemische Mindestanforderungen erfüllt. Er 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, der 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. Es bezieht sich lediglich auf förderbares Material. (USGS, 2009) Appendix C.



**Abbildung 2-1 Einteilung der Rohstoffvorkommen, verändert nach (USGS, 2009)**

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-Mineralie gefunden und bereits abgebaut. Eine steigende Nachfrage und die daraus folgenden steigenden Preise werden zu einer vermehrten Suche und Erschließung neuer Lithium-Abbaugelände 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 Li-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.

In Tabelle 2-3 sind die Lithium-Reserven und die Reservebasis, wie sie in (USGS, 2009) angegeben wurden, aufgeführt. Diese werden den in (Roskill, 2009) genannten Werten gegenübergestellt. 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, wurden 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.

**Tabelle 2-3 Lithium-Reserven nach Ländern (in 000t Li), verändert nach (Roskill, 2009, S. 11)**

Land	USGS Reserven	USGS Reservebasis	Roskill Reserven
Argentinien	2.000 <sup>2</sup>		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 <sup>1</sup>
Israel			2.500 <sup>1</sup>
Kanada	180	360	151
Österreich			113
Portugal			10
Russland			81
Serbien			957 <sup>1</sup>
Spanien			72
USA	38	410	
Zimbabwe	23	27	
<b>Gesamt</b>	<b>6.141</b>	<b>11.427</b>	<b>27.843</b>

<sup>1</sup> – Ressourcen

<sup>2</sup> – Annahme analog (Tahil, 06, S. 3)

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.

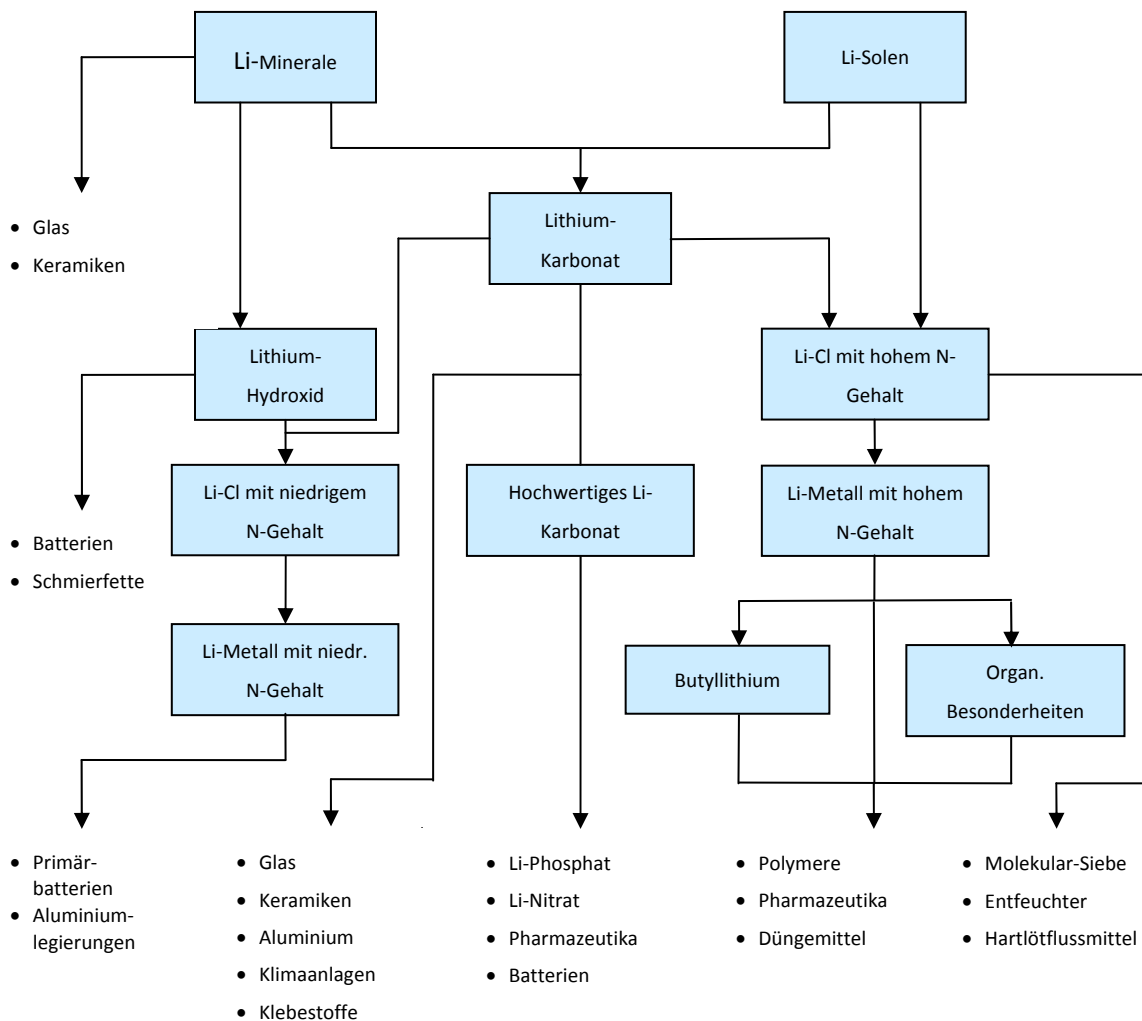
## 2.3 Produktion

Die Produktion für den kommerziellen Einsatz von Lithium kann in zwei Kategorien unterteilt werden:

- Lithium-Mineralien wie Spodumen, Petalit oder Lepidolith werden meist direkt in der Glas- & Keramikherstellung verwendet. Allerdings kann aus ihnen auch Li-Karbonat hergestellt werden.

- Das aus den Lithium-Solen gewonnene Li-Karbonat ist die Grundlage für zahlreiche Li-Verbindungen, welche unter anderem in der Produktion von Batterien, Schmierfetten, Polymeren oder Pharmazeutika eingesetzt werden.

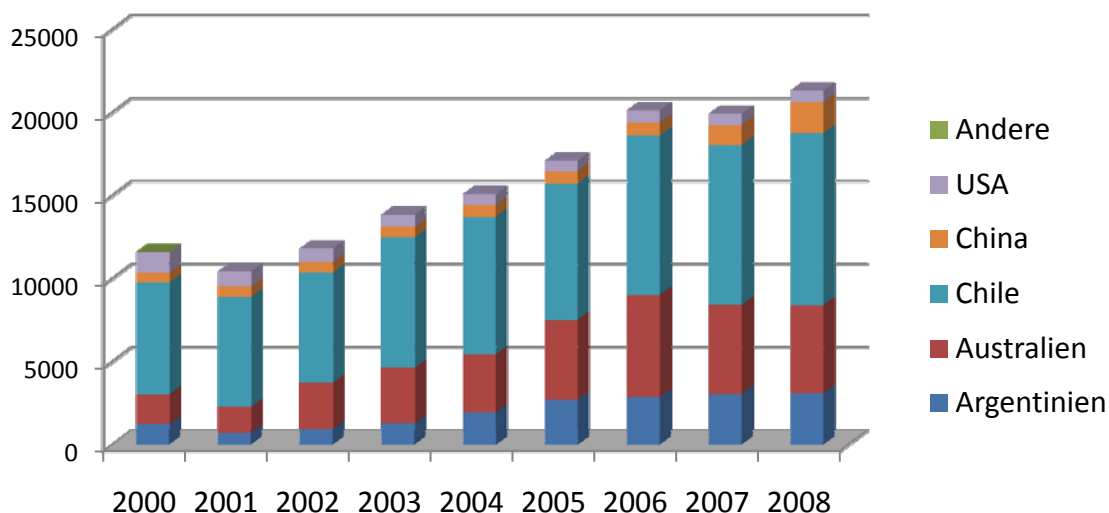
In Abbildung 2-2 ist die Produktion von Lithium und Li-Verbindungen für die jeweiligen Verwendungen dargestellt.



**Abbildung 2-2 Überblick über die Lithium-Produktion, verändert nach (Roskill, 2009, S. 12)**

Im für diese Arbeit als Basisjahr angenommenen Jahr 2008 betrug die weltweite Lithium-Produktion laut (Roskill, 2009) 22.810 t. Sie ist stark auf wenige Länder konzentriert und stieg in den letzten acht

Jahren um 7 % p.a. (siehe Abbildung 2-3). Der Herfindahlindex für die Lithium-Produktion liegt bei 0,29, was die hohe Konzentration der Produktion zeigt.



**Abbildung 2-3 Welt-Lithium-Produktion nach Ländern (in t Li), verändert nach (Roskill, 2009, S. 22)**

Einen Überblick zur Versorgungssituation für Lithium im Basisjahr 2008 gibt Tabelle 2-4. Mit dem Herfindahlindex misst man, wie stark die vorhandenen Reserven auf einzelne Länder konzentriert sind, wobei ein Index von  $>0,18$  bereits für eine sehr starke Konzentration steht. Für seine Berechnung wurden die Zahlen, die in (Roskill, 2009, S. 11) als Reserven angegeben sind, hergenommen. Hierbei wurden die Länder Irland, Israel und Serbien aus der Berechnung ausgenommen, da deren Li-Vorkommen in (Roskill, 2009, S. 11) als Ressourcen ausgewiesen wurden. Der Index verdeutlicht eine starke Konzentration der großen Reserven auf wenige Länder, was auch aus Tabelle 2-3 hervorgeht. Bei einer gleichbleibenden jährlichen Produktion von 22.810 t wie im Basisjahr würde die statistische Ressourcenreichweite, basierend auf den Ressourcenangaben von (USGS, 2009), 614 Jahre betragen.

**Tabelle 2-4 Versorgungssituation bei Lithium 2008**

<b>Reserven:</b>	6.141.000 t (USGS, 2009), (Tahil, 06)
<b>Ressourcen:</b>	14.000.000 t (USGS, 2009)
<b>Statistische Reservenreichweite:</b>	270 Jahre
<b>Statistische Ressourcenreichweite:</b>	614 Jahre
<b>Wichtige Förderländer:</b>	Argentinien, Australien, Chile, China, USA
<b>Länderkonzentration der Reserven:</b>	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 Li-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.

## 2.4 Aktuelle Verwendungen

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 die unterschiedlichen Verwendungen der Li-Verbindungen siehe Abbildung 2-2.

Für den weltweiten Li-Verbrauch wird eine Steigung um 6 % vom Jahr 2000 bis 2008 geschätzt. Hauptsächlich wurde Li 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 2-4 zeigt die prozentualen Anteile weiterer Produkte, die am Lithium-Verbrauch beteiligt sind.

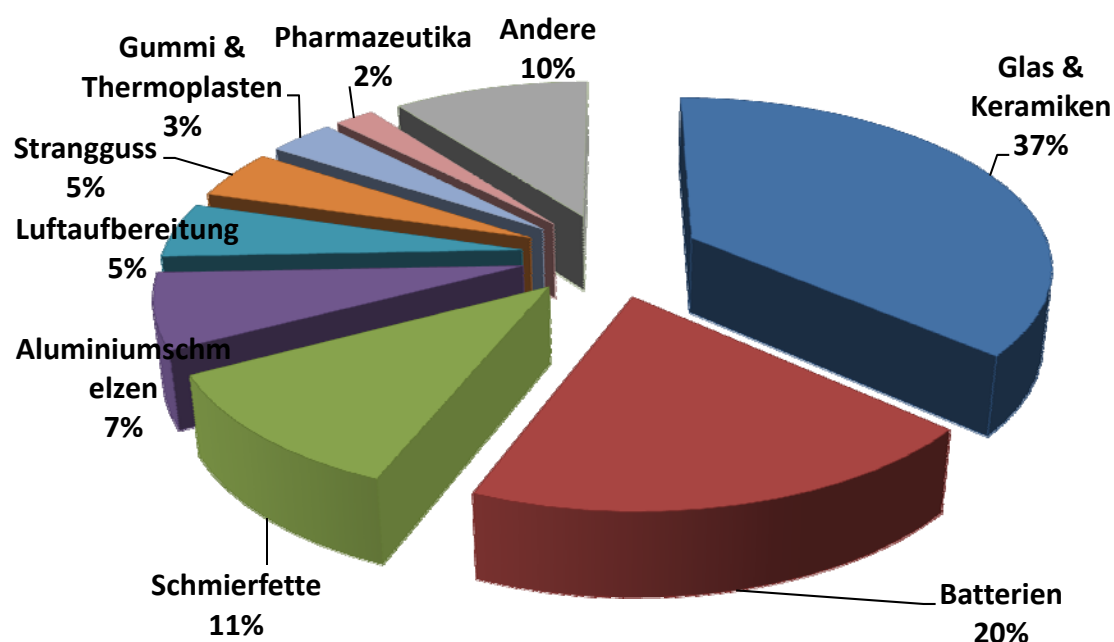


Abbildung 2-4 Lithium-Verwendungen in 2008, verändert nach (Roskill, 2009, S. 156)

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-Li-Verbraucher sein werden. So stieg

---

der Li-Verbrauch für Batterien um 22,1 % im betrachteten Zeitraum, wohingegen der für Glas & Keramiken lediglich um 2,8 % stieg. (Roskill, 2009, S. 157)

### **3 Lithium-Bedarf in den einzelnen Verwendungen**

Wie aus Abbildung 2-4 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. Zunächst soll hierbei beschrieben werden, warum in der jeweiligen Verwendung Lithium benötigt wird bzw. was es dort bewirkt. Anschließend wird die aktuelle Bedarfssituation skizziert sowie eine Prognose für die künftige Entwicklung der jeweiligen 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, Fieberglas 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 Li-Verbrauchs.

##### **3.1.1 Einsatz von Lithium in Glas & Keramiken**

Der bei der Herstellung hauptsächlich verwendete  $\beta$ -Spodumen hat die Eigenschaft, sich bei Erhitzung zusammenzuziehen. Aufgrund der daraus folgenden geringen Hitzeausdehnung des Endprodukts ist es möglich Glas-Keramiken herzustellen, die unempfindlich gegen starke und plötzliche Temperaturschwankungen („thermal shock“) sind. Diese wurden zunächst im Raketenbau, mittlerweile aber hauptsächlich für Herdoberflächen und Ofenfenster genutzt.

Wird Lithium bei der Glas-, Glas-Keramik- oder Keramikherstellung eingesetzt, können u.a. folgende Effekte erzielt werden:

- Verringerung des Schmelz- bzw. Brennpunktes und somit Energieeinsparungen
- Geringere thermische Ausdehnung und hohe Widerstandsfähigkeit gegen Temperaturschwankungen
- Höhere mechanische und chemische Widerstandsfähigkeit
- Beeinflussung von Eigenschaften wie Dichte, Oberflächenbeschaffenheit und Oberflächenaussehen (Roskill, 2009, S. 167-172)



### 3.1.2 Aktuelle Bedarfssituation

Derzeit werden sowohl Lithium-Mineralien als auch Li-Karbonat in der Glas-, Keramik- und Glas-Keramikherstellung verwendet. Mit einem Verbrauch von 10.000 t Li<sub>2</sub>O (Li-Oxid) wurden im Jahr 2008 ca. 90 % der weltweit geförderten Lithium-Mineralien in diesem Sektor genutzt. Hinzu kommen weitere 16.600 t Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (Li-Karbonat), was sich zusammen mit dem Li<sub>2</sub>O auf einen reinen Lithium-Verbrauch von 7.760 t im Jahr 2008 beläuft. (Roskill, 2009, S. 194-195)

### 3.1.3 Künftiger Li-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 Li senkt den Energiebedarf in der Herstellung
- Entwicklung der Umweltauflagen: Einsatz von Li senkt Energiebedarf und somit CO<sub>2</sub>-Ausstoß
- Entwicklung der Lithium-Nachfrage: höhere Nachfrage führt zu höheren Preisen und somit zu geringerer Verwendung von Li 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 Einsatzpotential 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 Einsatz von Lithium in Batterien

Sowohl in Primär- als auch in Sekundärbatterien wird Lithium vor allem in Verwendungen eingesetzt, bei denen es auf Langlebigkeit und geringes Gewicht ankommt. Dies sind z.B. Taschenrechner oder Herzschrittmacher bei Primär- oder Handys, Laptops und Elektrofahrzeuge bei Sekundärbatterien. Lithium-Batterien sind derzeit weltweit in mehr als 60 % aller Handys und 90 % aller Laptops eingebaut. (Amadee + Company, 2009, S. 39)

Da Lithium sowohl das leichteste Metall als auch das mit dem höchsten elektrochemischen Potential ist, eignet es sich hervorragend für diese Anwendungen. Es kombiniert eine hohe Energiedichte und Langlebigkeit mit geringer Größe und Gewicht.

### 3.2.2 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 Li-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.

### 3.2.3 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 in Zuge der Ersetzung von Alkali- und Zink-Karbon-Batterien durch Li-Metall Primärbatterien
- Ersetzung der Li-Primär- durch Li-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 folgenden 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-Li-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. Die künftig erwartete Verwendung der verschiedenen Fahrzeuge im Hinblick auf ihre Reichweite und ihren CO<sub>2</sub>-Ausstoß ist in Abbildung 3-1 dargestellt. In der Sparte „Hybrid / Range Extender“ sind auch PHEVs anzusiedeln.

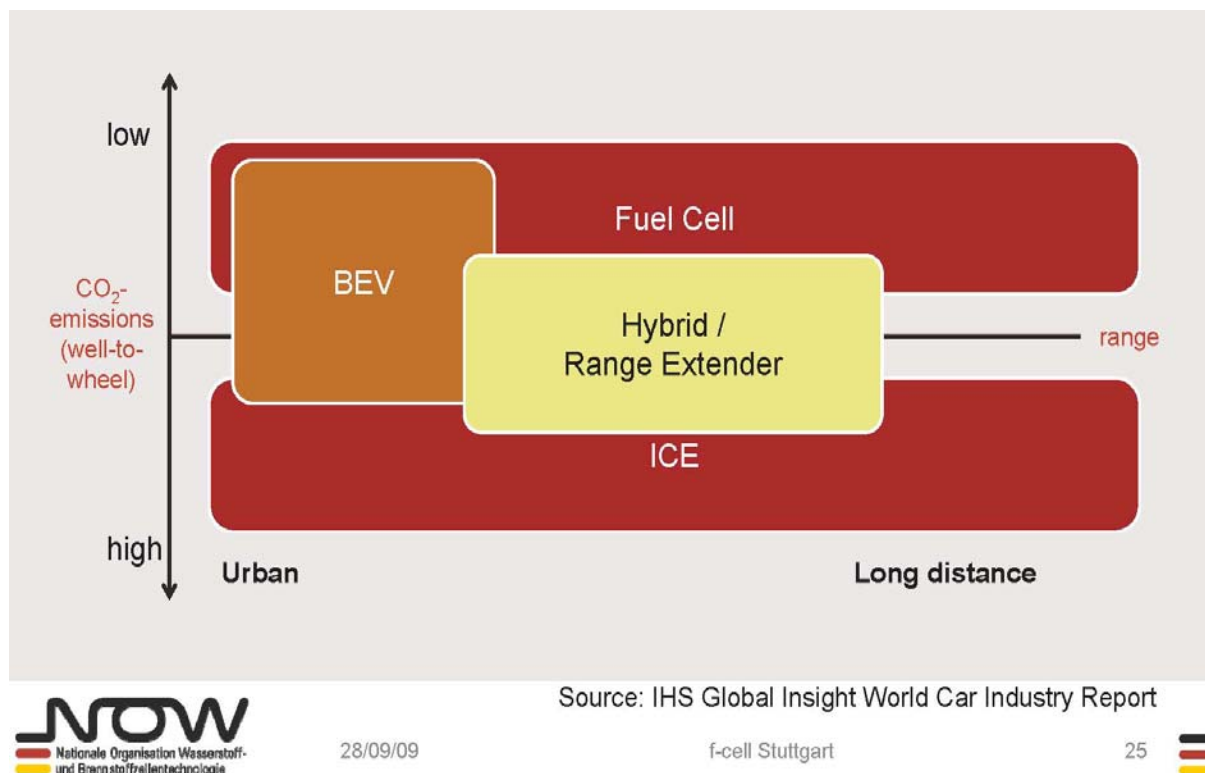


Abbildung 3-1 Verwendung der Fahrzeugtypen, aus (Bonhoff, 2009, S. 25)

(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 Einsatz von Lithium in Schmierfetten**

Lithium-Schmierfette werden produziert, indem man Lithium-Seife mit Schmieröl mischt und dann unter Einfluss von Hitze, Druck oder Umwälzung reagieren lässt. Bei einfachen Lithium-Fetten lässt man, um die Lithium-Seife zu produzieren, das Metallsalz mit einer Säure reagieren, bei komplexen Fetten mit mehreren Säuren.

Lithium-Schmierfette bewirken u.a.: (Roskill, 2009, S. 241)

- Aufrechterhaltung der Schmierwirkung in einem großen Temperaturbereich
- Gute Viskosität bei hoher Temperaturbeständigkeit
- Hervorragende Scherstabilität; gut in Hochgeschwindigkeitslagern einsetzbar

---

Die komplexen Fette haben die gleichen Eigenschaften, sind allerdings länger einsetzbar und haben zudem eine noch höhere Temperaturbeständigkeit.

### **3.3.2 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 Li-Hydroxid im Welthandel 2008 aus, so fallen demnach 90 % des gesamten Li-Hydroxid-Verbrauchs auf Schmierfette.

### **3.3.3 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 wird, ist deren Verbrauch stark an das Weltwirtschaftswachstum gekoppelt. Folgende Faktoren spielen für den künftigen Li-Hydroxid-Verbrauch in Schmierfetten eine Rolle: (Roskill, 2009, S. 250)

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

Mit einem Wachstum des Li-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 Li-Karbonat bzw. Li-Chlorid beim Aluminiumschmelzen verursachte im Jahr 2008 einen Verbrauchsanteil von 7 % am gesamten Lithium-Verbrauch.

### 3.4.1 Einsatz von Lithium beim Aluminiumschmelzen

Bei der Aluminium-Herstellung wird Aluminiumoxid in einem Elektrolyt-Bad unter enorm hohen Stromstärken aufgelöst. Dies ist ein sehr energie- und damit kostenintensiver Prozess. Um die physikalischen Eigenschaften des Elektrolyts zu verbessern, werden Additive wie Aluminiumfluorid, Kalziumfluorid oder Li-Karbonat bzw. Li-Chlorid beigemischt. Letztere reagieren mit Aluminiumoxid und  $\text{CO}_2$  zu Li-Fluorid, was u.a. folgende Vorteile für das Elektrolyt-Bad bewirkt: (Roskill, 2009, S. 254-255)

- Niedrigerer Schmelzpunkt und höhere elektrische Leitfähigkeit
- Reduzierung der Bad-Temperatur um 12-18°C
- Reduzierung der Fluorid-Emissionen um 40-50 %
- Geringerer Aluminiumfluorid-Verbrauch
- Geringerer Energieverbrauch aufgrund niedrigerer Temperatur und höherer Leitfähigkeit

### 3.4.2 Aktuelle Bedarfssituation

Für das Jahr 2008 schätzte (Roskill, 2009, S. 262) den Verbrauch von Li-Karbonat für das Aluminiumschmelzen auf 8.000 t. Viele Schmelzwerke nutzten Li-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.

### 3.4.3 Künftiger Lithium-Bedarf für das Aluminiumschmelzen

Der Bedarf für Li-Karbonat beim Aluminiumschmelzen ist stark gekoppelt an den generellen weltweiten Aluminiumbedarf. Da der gesamte Li-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 Li-Chlorid und die Luftreinigung mittels Li-Hydrid oder Li-Peroxid.

### 3.5.1 Einsatz von Lithium in der Luftaufbereitung

In Absorptionskälteanlagen wird Wasser als Kühlmittel und Li-Bromid als Lösungsmittel eingesetzt. Hierbei absorbiert Li-Bromid die Flüssigkeit aus dem verdampften Wasser und hält den Kreislauf aus Verdampfungskühlung und Kondensations-Erwärmung aufrecht. (Wikipedia, Absorptionskältemaschine, 09) Dies bewirkt, dass die Luft innerhalb einer Anlage sowohl gekühlt, als auch angewärmt werden kann.

In allen Prozessen, bei denen eine hohe Luftfeuchtigkeit hinderlich ist, wie z.B. in Labors oder in der Lebensmittelherstellung, werden Luftentfeuchter verwendet. Hier wird ein Luftstrom mit feuchter Luft am Li-Chlorid vorbeigeführt, welches die Feuchtigkeit absorbiert. Zusätzlich besitzt es auch eine bakterienhemmende Wirkung.

Im Bergbau, in U-Booten oder in Space-Shuttles wird Li-Hydrid bzw. Li-Peroxid eingesetzt um der verbrauchten Luft das CO<sub>2</sub> zu entziehen. Diese Stoffe reagieren mit CO<sub>2</sub> und produzieren Li-Karbonat und Wasser bzw. Sauerstoff. (Roskill, 2009, S. 279-289)

### 3.5.2 Aktuelle Bedarfssituation

Rechnet man den Verbrauch von Li-Bromid, Li-Chlorid und Li-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)

### 3.5.3 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 Li-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. Nimmt man für die folgenden 10 Jahre ein ähnliches Wachstum an, so erhält man einen Lithium-Bedarf von 86.055 t im Jahr 2030. Aus diesen Zahlen lässt sich entnehmen, dass sich die Lithium-Nachfrage in den kommenden 22 Jahren verfünffachen würde.

**Tabelle 3-1 Wachstumsprognosen der Hauptverwendungen [in %]**

Verwendung	2008-2013	2007-2020
	(Roskill, 2009)	(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 <sup>1</sup>
Fahrzeugbatterien	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

<sup>1</sup>Bei Anderson als Sekundärbatterien zusammen mit den Rundzellen betrachtet.

## 4 Stand der Technik im 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. lediglich Recyclingkonzepte für Batterien und Geräte der Absorptionskühlung. Im letzteren Fall ist das Recycling des dort verwendeten Li-Bromids bereits gängige Praxis. Hierbei handelt es sich allerdings um so geringe Mengen an Lithium, dass dies in der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet wird und die Konzentration im Folgenden aus 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)

Im Folgenden sollen zunächst einige physikalische und chemische Prozesse beschrieben werden. Im Anschluss werden z.T. bereits kommerziell angewendete Kombinationsverfahren vorgestellt.

---

## 4.1 Physikalische Prozesse

### 4.1.1 Mechanische Zerteilung

Die mechanische Zerteilung wird angewandt um die äußeren Materialschichten der Batterie von den innenliegenden Metallen zu trennen. Dies kann manuell oder maschinell durch Zerkleinern, Zermahlen, Aufschneiden oder Quetschen geschehen. Die gewonnenen Metallanteile können dann im Anschluss besser aufgeschlossen werden und die in den folgenden Schritten angewendeten Säuren oder Laugen werden weniger stark durch Plastikteile oder Folien kontaminiert. (Shin, 2005, S. 175)

Die Prozesse der mechanischen Zerteilung sind nahezu immer ein fester Bestandteil in den aktuell angewendeten Recyclingverfahren. Allerdings können nicht alle Einzelkomponenten einer Batterie durch die mechanische Zerteilung voneinander getrennt werden, da sie oft innerhalb eines kleinen Bereichs sehr eng und komplex miteinander verbunden sind.

### 4.1.2 Thermische Behandlung

Will man das als Elektrode verwendete Lithium und Kobalt aus der in vorigen Schritten gewonnenen Lauge herauskristallisieren, kann man eine thermische Behandlung anwenden. Hierbei wird die Lauge in mehreren Schritten verschiedenen Temperaturen ausgesetzt, damit Bindematerial und Kohlenstoff abbrennen und Li-Kobaltoxid ( $\text{LiCoO}_2$ ) gewonnen werden kann.

Die thermische Behandlung wird in der Praxis häufig angewendet aufgrund ihrer einfachen und praktischen Durchführbarkeit, allerdings werden dabei Rauch- und Gasfilter benötigt, da die organischen Bestandteile nicht vollständig aufgelöst werden können. (Xu, 2008, S. 516)

### 4.1.3 Mechano-chemischer Prozess

Ein weiteres in der Praxis bereits angewendetes Verfahren ist der mechano-chemische Prozess. Er umfasst die zwei Schritte Zermahlen und Säure-Behandlung. Beim Zermahlen wird die Kristallstruktur des Elektrodenmaterials  $\text{LiCoO}_2$  so verändert, dass die einzelnen Bestandteile Lithium und Kobalt bei der späteren Säure-Behandlung leicht herauszulösen sind. (Saeki, 2004, S. 374)

Zusätzlich kann während des Zermahlens Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) beigemischt werden, was die Effektivität des Prozesses weiter erhöht. (Q. Zhang, 2000, S. 353)

### 4.1.4 Auflösung

Um das  $\text{LiCoO}_2$  einfach und effektiv von seinem Trägersubstrat loszulösen werden spezielle organische Lösemittel verwendet, welche den Kunststoff Polyvinylidenfluorid (PVDF) vollständig auflösen.

---

Vorteilhaft ist die einfache und effektive Anwendung dieses Prozesses, jedoch ist das benötigte Lösemittel N-Methyl-2-pyrrolidon (NMP) sehr teuer. Somit eignet sich dieser Prozess nicht dazu, im großen Stil angewendet zu werden. (Xu, 2008, S. 516)

## 4.2 Chemische Prozesse

Chemische Prozesse dienen dazu, die metallischen Bestandteile der Batterien aufzulösen. Aus den so gewonnenen Lösungen können die einzelnen Metalle durch Verändern der pH-Werte oder durch Elektrolyse wieder abgeschieden werden.

### 4.2.1 Säure-Extrahierung

Nach dem Sortieren, Reinigen und Demontieren der Batterien wird bei den meisten derzeit angewendeten Recyclingverfahren aus dem übriggebliebenen Rest mittels einer Säure-Lösung  $\text{LiCoO}_2$  ausgewaschen. Hierfür wird z.B. Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), Salzsäure (HCL) oder Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ) hergenommen. Durch Verändern der Parameter Einwirkzeit, Temperatur und Reinheit der Säure-Lösung können unterschiedliche Ergebnisse erzielt werden. So konnten z.B. (Zhang, 1998) 93,1 % des Li bei einer Einwirkzeit von 30 min mittels  $4,0 \text{ mol l}^{-1}\text{HCl}$  bei  $80^\circ\text{C}$  gewinnen. Das Flüssigkeits/Feststoff-Verhältnis betrug hierbei 1/20. (Zhang, 1998, S. 266)

In weiteren Versuchen bei einstündiger Einwirkzeit und einem geringeren Flüssigkeits/Feststoff-Verhältnis (1/10) konnten sogar bis zu 100 % des Lithiums wiedergewonnen werden. (Xu, 2008, S. 517)

### 4.2.2 „Bioleaching“

Ein interessanter und zukunftssträchtiger chemischer Prozess ist das „Bioleaching“. Hierbei wird das Kathodenmaterial, also Lithium und Kobalt, mit Hilfe von säurefreundlichen Bakterien indirekt ausgewaschen. Diese Bakterien nutzen eisenhaltige Ionen und Schwefelpartikel als Energiequelle und scheiden als Stoffwechselprodukt Schwefelsäure aus.

Derzeit sind die Techniken des „Bioleachings“ allerdings erst in der Entwicklungsphase und können noch nicht im kommerziellen Batterierecycling angewendet werden. (Xu, 2008, S. 517)

### 4.2.3 Lösungsmittlextraktion

Für diesen Prozess müssen die Batterien zunächst demontiert und ihre metallischen Komponenten aufgelöst werden. Bei der Lösungsmittlextraktion werden dann einzelne Metalle gezielt mit Hilfe von Lösungsmitteln und eingestellten pH-Werten aus der Lösung entnommen. Bei (Mantuano, 2006) wurden Li-Ionen-Akkus aus Handys als Versuchsobjekt genommen. Als Lösungsmittel verwendete man Cyanex 272, eine Phosphinsäure, die z.B. Kadmium von Nickel oder auch Kobalt von Lithium trennen kann. In einer ersten Stufe wurde bei pH-Werten von 2,5-3,0 Aluminium aus der Lösung

---

extrahiert. Daraufhin wurde bei pH 4,5 Kobalt entnommen, womit einzig Lithium in der Lösung zurückblieb.

Dieser Prozess vereint eine einfache Anwendbarkeit mit geringem Energieverbrauch sowie guten Ergebnissen bei der Trennung der Metalle. Allerdings sind die angewendeten Lösungsmittel sehr teuer, was einer industriellen Anwendung entgegen sprechen kann. (Xu, 2008, S. 517)

#### **4.2.4 Chemische Ausscheidung**

Bei der chemischen Ausscheidung wird den bereits in einer Säure gelösten Metallen (nach vorheriger Reinigung, Demontage und Auflösung der Batterien) z.B. Natronlauge zugefügt. Mit der Erhöhung des pH-Wertes werden die Metalle ausgeschieden und können anschließend durch Filtern gewonnen werden.

Dies ist ein einfacher Prozess mit hoher Rückgewinnungsrate und wird in der Praxis bereits verwendet. Entscheidend hierbei ist die Wahl der Ausscheidungslauge. (Xu, 2008, S. 519)

### **4.3 Kombinationen**

#### **4.3.1 VAL'EAS™ Prozess, Umicore (Tytgat, 2009), (Cheret & Santén, 2008), (Umicore, 2008)**

Mit einer installierten Verarbeitungskapazität von 4.000 Tonnen ist die Firma Umicore aus Belgien der größte Lithium-Ionen-Batterie-Recycler in Europa. Mit dem von ihr entworfenen und patentierten VAL'EAS™ Prozess ist es möglich, sowohl Li-Ionen-, Li-Polymer- und NiMH (Nickel-Metallhydrid)-Akkumulatoren als auch alkalische Zn-Primärbatterien zu recyceln. Zusätzlich können sogar bestimmte Arten von abgenutzten Katalysatoren sowie Kondensatoren behandelt werden. Auch die Batterien der HEVs, die im Bezug auf das Volumen deutlich größer sind als die bisher behandelten Zellen, stellen nach vorheriger Zerteilung kein Problem für Umicore dar.

Derzeit werden Ni und Co zur Weiterverarbeitung in neuen Batterien mit diesem Prozess wiedergewonnen. Das in einer Schlacke gebundene Lithium wird beim Betongießen wiederverwendet.

Einen vereinfachten Überblick zum Ablauf des Prozesses gibt Abbildung 4-1.

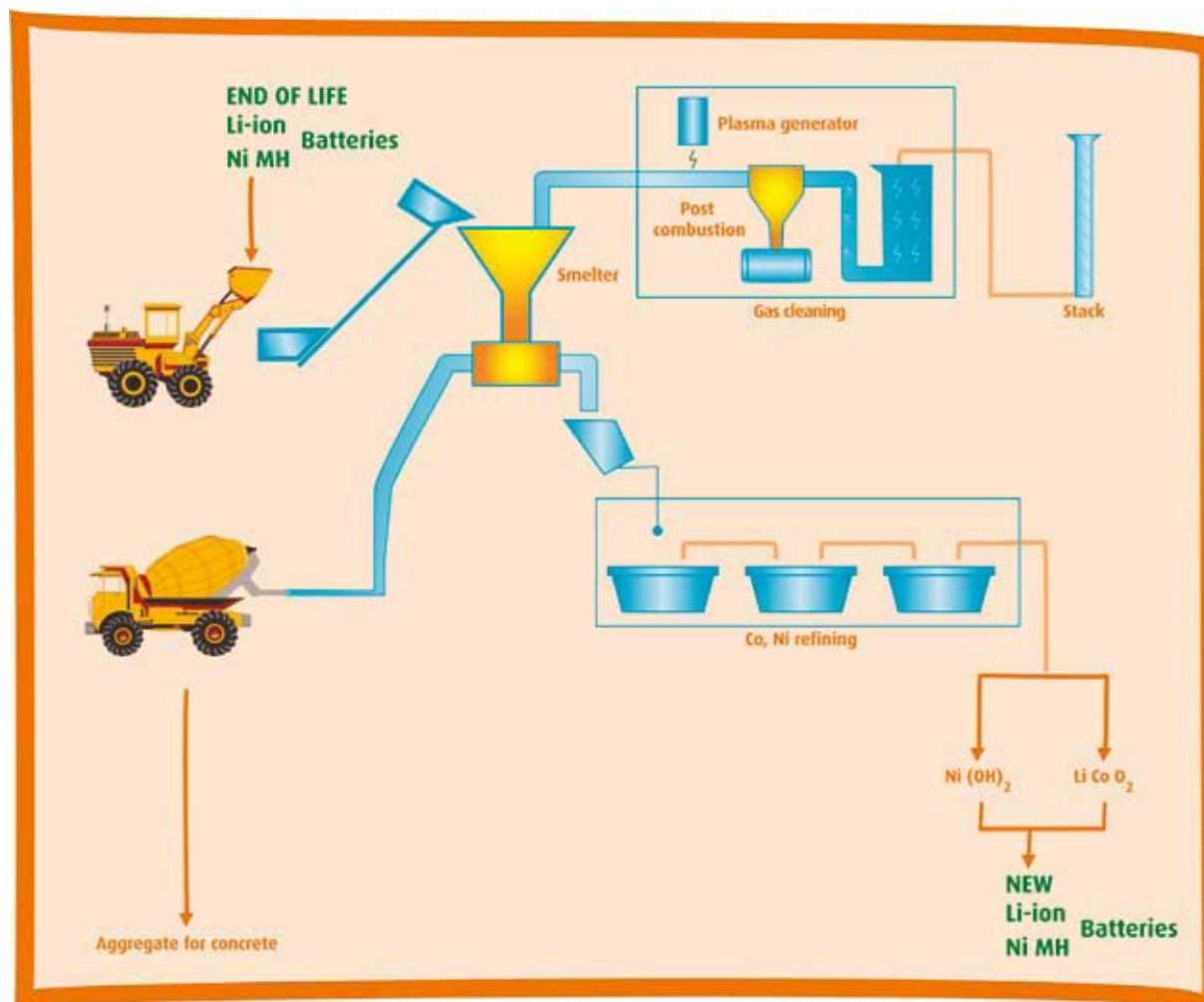


Abbildung 4-1 Der VAL'EAS™ Prozess von Umicore, (Umicore, 2008, S. 5)

Die Altbatterien werden zusammen mit geringen Mengen an Kohle, Kalkstein, Sand und ggf. Bestandteilen, die Metalloxid enthalten, ohne Vorbehandlung in einen Schmelzofen geworfen. Der Batterieanteil liegt hierbei bei 30-50 %. Lediglich große Batterien (z.B. aus Elektro- oder Hybridfahrzeugen) müssen aus technischen Gründen vorher geteilt werden. Der Ofen lässt sich in drei Hauptbereiche unterteilen: Vorheiz-Bereich, Plastik-Pyrolyse-Bereich und der Metall-Schmelz-Bereich am Ofenboden.

In der Vorheiz-Zone wird die Temperatur langsam bis auf 300°C erhitzt und dabei der Elektrolyt verdampft. Aufgrund der langsamen Erhitzung sinkt das Explosionsrisiko der Batterien erheblich. Aus den hierbei freigewordenen Gasen wird in einer Nachverbrennung Halogen gewonnen. Der Rest wird nach den üblichen Gasreinigungsprozessen über ein Auspuffrohr in die Umwelt abgelassen. In der zweiten Zone wird die Temperatur auf bis zu 700°C angehoben, wobei das Plastik der Batterieverkleidungen schmilzt. Die hierbei entstehenden Gase werden zum Heizen im Vorheiz-Bereich verwendet. Im Metall-Schmelz-Bereich wird das Metall schließlich in eine Schlacke, die Aluminium, Silicium, Lithium und mindestens einen kleinen Anteil Eisen enthält, und eine Legierung

aus Eisen, Kupfer, Kobalt und Nickel umgewandelt. Die Schlacke wird direkt in der Betonherstellung weiterverarbeitet. Derzeit sind jedoch weitere Verwendungen der Schlacke in Untersuchung, um den in ihr enthaltenen Lithium-Anteil besser nutzen zu können. Angedacht ist z.B. die Verwendung in der Produktion von hitzebeständigen Glaskeramiken (Ceran-Kochfeldern). Die Legierung wird dagegen in weiteren Raffinierungsschritten zu  $\text{Ni(OH)}_2$  (Nickel(II)-hydroxid) bzw.  $\text{LiCoO}_2$  (Lithium-Kobalt(III)-Oxid) verarbeitet, welche direkt in der Herstellung neuer Batterien eingesetzt werden können.

Dieser Prozess vereint viele Vorteile: zum einen können hohe Recycling-Effizienzen von bis zu 80 % erreicht werden, was deutlich über denen in der EU-Richtlinie 2006/66/EG geforderten 50 % liegt. Die Recycling-Effizienz von Kobalt liegt sogar bei über 95 %. (Tytgat, 2009)

Weiterhin fallen bis auf die organischen Abgasbestandteile keine Abfallstoffe bei diesem Prozess an, d.h. alle eingehenden Batteriematerialien werden auf irgendeine Weise wiederverwendet oder weiterverarbeitet.

#### **4.3.2 Tieftemperaturzerlegung, Toxco Inc. (Center for Transportation Research, 2000, S. 45-48), (Renz, 2001, S. 138-139)**

Die Firma Toxco Inc. recycelt in Trail, Kanada, eine Vielzahl unterschiedlicher Lithium-Batterien. Darunter sind auch große Akkus aus militärischen Verwendungen (bis zu 250 kg).

Die Batterien werden, nachdem die Verpackung entfernt wurde, mit flüssigem Stickstoff ( $< -196^\circ\text{C}$ ) gekühlt. Dies erfolgt um die explosiven Reaktionen der Li-haltigen Bestandteile beim Zerkleinern möglichst gering zu halten. Um die Arbeitssicherheit zusätzlich zu erhöhen, laufen ca. 90 % der hier beschriebenen Arbeitsschritte laut Toxco Firmenangaben ferngesteuert ab. (TOXCO Inc, 2003)

Im Anschluss erfolgt die Zerkleinerung durch unterschiedliche Scher- und Mahlvorgänge, welche die Batterien je nach Größe vollständig oder nur teilweise durchlaufen. Diese Zerkleinerung findet in einem NaOH-Säurebad (Natriumhydroxid) statt, das die Neutralisierung säurehaltiger Bestandteile und die Auflösung von Lithium und Lithium-Salzen bewirkt. Die so gewonnenen Lithium-Bestandteile werden ausgefällt und danach zu Li-Karbonat weiterverarbeitet. Der nach der Lithium-Ausfällung übriggebliebene Schlamm wird zur Kobalt-Gewinnung weiteren Löse- bzw. Ausfallschritten ausgesetzt. Wasserstoff und organische Materialien verbrennen an der Oberfläche des Säurebads und die so anfallenden Verbrennungsabgase werden gefiltert an die Atmosphäre geleitet. Papier- und Plastikrückstände werden zur Verwertung oder Beseitigung von der Oberfläche gefiltert. Die im Säurebad übriggebliebenen großen Teile werden in einer Hammermühle erneut gemahlen und dann in metallische und nichtmetallische Komponenten getrennt. Eine schematische Darstellung dieses Prozesses ist Abbildung 4-2 dargestellt.

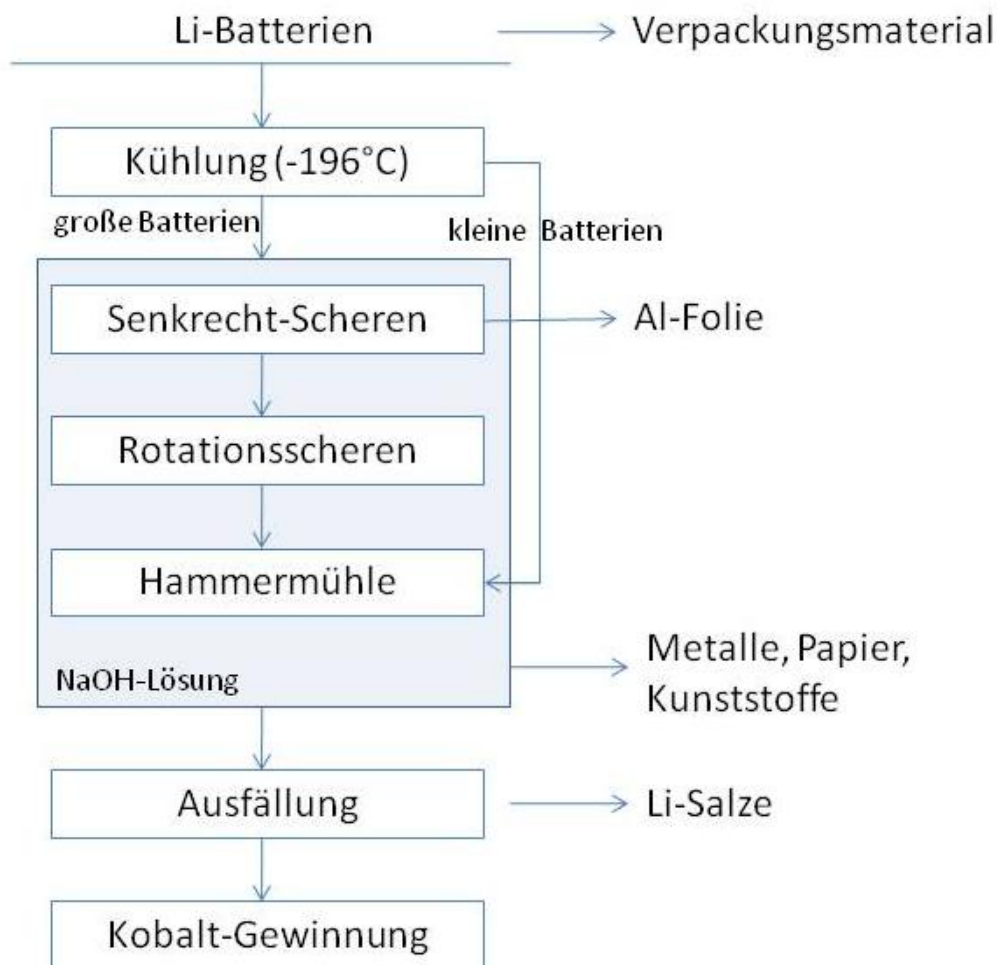
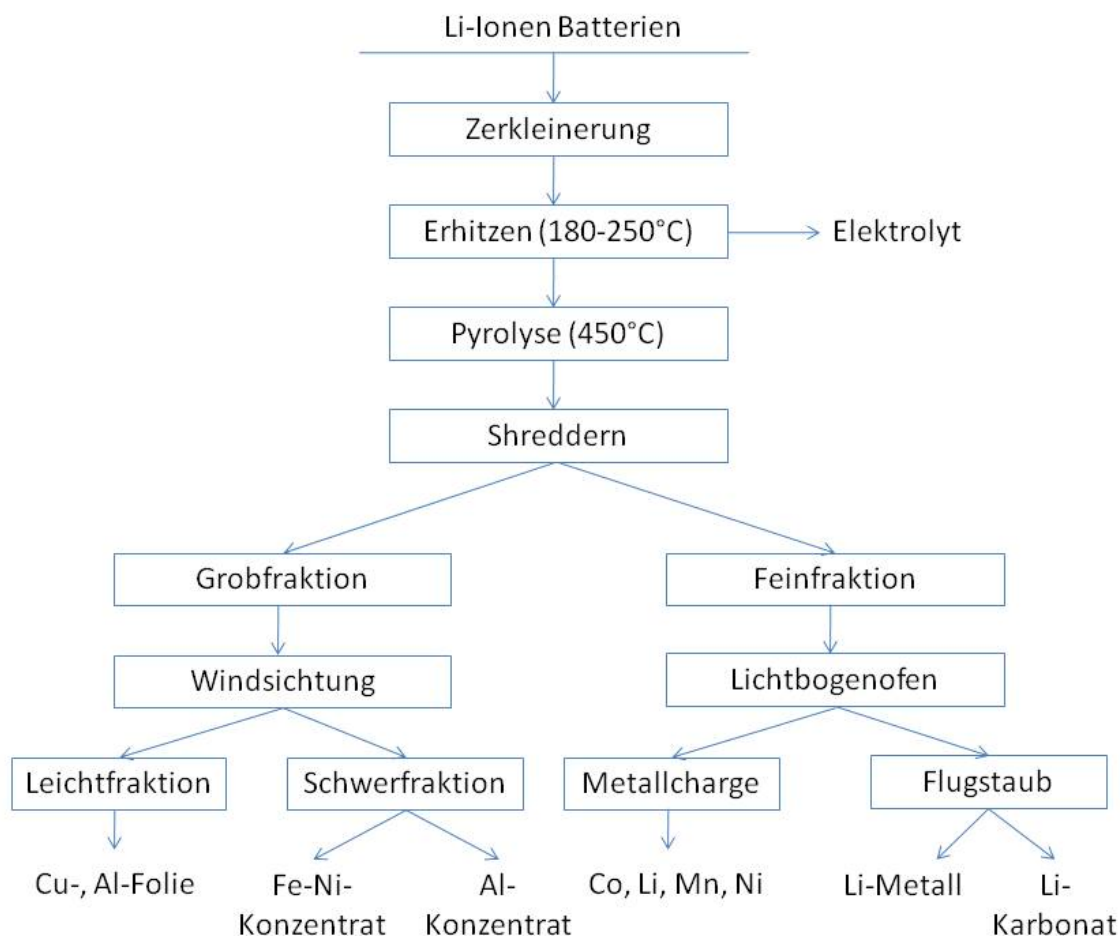


Abbildung 4-2 Vereinfachte Darstellung des Toxco-Prozesses

#### 4.3.3 Prozess der RWTH Aachen (Georgi-Maschler, 2009)

Im Rahmen eines BMBF-Forschungsprojektes (Bundesministerium für Bildung und Forschung) wurde am Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung (IME) der RWTH Aachen zusammen mit den Industriepartnern ACCUREC und UVR-FIA ein alternatives Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien entwickelt. Es ist ein Verfahren, das die Vorteile der Pyrolyse und Hydrolyse kombiniert und theoretische Recycling-Effizienzen von 80-90 % für Co und Li gewährleistet.

Seine einzelnen Schritte sind in Abbildung 4-3 dargestellt.



**Abbildung 4-3 Ablauf des an der RWTH Aachen entwickelten Recyclingprozesses**

Zunächst werden die Einzelzellen aus dem angelieferten Batterieschrott freigelegt, d.h. das Gehäuse wird beseitigt und kann separat verwertet werden. Dieser erste Schritt erfolgt entweder manuell oder mit Hilfe einer Hammermühle. Im Anschluss folgt ein kombinierter Pyrolyse-Destillations-Schritt. Hierbei wird das oben gewonnene Zellenmaterial einer vakuumthermischen Behandlung unterzogen und auf 180-250°C erhitzt. In diesem Schritt verflüchtigt sich der Elektrolyt und wird mittels Filteranlagen aufgefangen. Um die organischen Bestandteile abzubrennen, erfolgt im Pyrolyse-Schritt eine Erhitzung auf 450°C. Gleichzeitig werden die Zellen somit thermisch deaktiviert was für das spätere Shreddern von Vorteil ist. Die so erhaltene Materialfraktion ist trocken, was entscheidende Vorteile im Bezug auf Geruch und Arbeitssicherheit in den nachfolgenden Schritten mit sich bringt.

Mit einer Hammermühle wird diese nun zerkleinert und in eine Grobfraktion (>200 µm) und eine Feinfraktion (<200 µm) aufgeteilt. Die Grobfraktion, die metallische Bestandteile des Gehäuses, elektrische Kontakte und Folien enthält, wird dann einer Windsichtung unterzogen. Die so gewonnene Leichtfraktion enthält Cu- und Al-Folienreste. Die Schwerfraktion wird mittels einer



Magnetscheidung weiter in Fe-Ni-Konzentrat und Al-Konzentrat getrennt. Letztere sind beide sehr sortenrein und können direkt an die metallverarbeitende Industrie weiterverkauft werden.

Die Feinfraktion besteht aus den Elektrodenmaterialien  $\text{LiMnO}_2$ ,  $\text{LiMnO}_4$  und Graphit und wird weiter im Lichtbogenofen behandelt, mit dem Ziel, der Gewinnung einer Co-Basis und eines Lithium-Konzentrats. Nach vorherigem Pelletieren reagiert die Feinfraktion im Lichtbogenofen mit CO. Hierbei wird  $\text{O}_2$  von Co, Mn und Ni abgetrennt, welche dann die sog. Metallcharge bilden. Auch Li wird reduziert, verdampft und reoxidiert als  $\text{Li}_2\text{O}$  im Flugstaub und der Schlacke (2 Haupt-Lithium-Konzentrate). Letztere wird über mehrere Chargen (Phasen) im Ofen belassen, um das in ihr enthaltene Lithium weiter anzureichern. Der Flugstaub eignet sich aufgrund seiner feinen Konsistenz sehr gut zum Laugen (Hydrolyse). Aus dem so gewonnenen LiCl kann zum einen mittels Elektrolyse Lithium-Metall, zum anderen mit Hilfe von Na-Karbonat Li-Karbonat ausgefällt werden, welches entweder direkt in der Glasindustrie oder aber auch zur Herstellung von neuen Elektroden verwendet werden kann.

#### **4.3.4 Prozess zur Metallwiedergewinnung aus Lithium-Ionen-Batterie-Abfällen [Shin et al. 2005]**

(Shin, 2005) stellten im Jahr 2005 einen Prozess vor, mit dem sowohl Lithium als auch Kobalt relativ einfach aus Batterieabfällen gewonnen werden können. Hierbei werden mehrfache mechanische Zerkleinerung, Sieben und schließlich eine Säure-Extrahierung angewandt. Bei geeignetem Einstellen der Parameter Einwirkzeit, Temperatur und Säurezusammensetzung liegt die Extraktions-Effizienz bei bis zu 100 %.

Zunächst durchlaufen die Batterie-Abfälle eine Reihe mechanischer Prozesse. Nach einer ersten Zerkleinerung wird das Material mit einem Vibrations-Sieb von  $850\ \mu\text{m}$  aussortiert. Hier werden die Aluminium- und Kupferelektroden, das Stahlgehäuse und die Plastikverpackungen abgetrennt. Das aktive Kathoden-Material, welches Li und Co enthält, befindet sich im nichtmagnetischen Teil der Hauptmasse und bleibt auch nach der magnetischen Trennung erhalten. Für ein besseres Säure-Extrahierungs-Ergebnis ist eine Feinzerkleinerung eigentlich nicht nötig, jedoch begünstigt sie die Abtrennung der restlichen Aluminium-Folie, welche an den Li-Co-Partikeln haftet.

Im Anschluss folgt die Säure-Extrahierung: nachdem eine Reihe unterschiedlicher Säurezusammensetzungen getestet wurden, stellte sich heraus, dass Schwefelsäure mit einer Konzentration von  $2\ \text{mol/L}$  und einem Volumenanteil von 15 % Wasserstoffperoxid das geeignetste Auflösungsmittel ist. Bei einer Temperatur von  $75^\circ\text{C}$  und Umrühren mit 300 Umdrehungen pro min werden innerhalb von 10 min jeweils 100 % des Lithiums und Kobalts in der Säure gelöst. Sowohl der Kunststoff PVDF als auch Karbonbestandteile werden nicht aufgelöst, so dass nach weiterer

Filtrierung eine reine Li-Co-Lösung übrigbleibt. Eine schematische Darstellung dieses Prozesses ist in Abbildung 4-4 zu sehen.

Weiterhin testeten (Shin, 2005) auch die Wirkung einer Erhitzung der zerkleinerten Partikel auf 900°C vor der Säure-Behandlung um Karbon und Bindemittel abzubrennen. Zwar wurden letztere hierbei vollständig verbrannt, allerdings stellte sich heraus, dass die Oberfläche der Li-Co-Oxide anschließend mit geschmolzenem Aluminium überzogen war, was die Effizienz der Co-Auflösung in der weiteren Säure-Behandlung erheblich verringerte. Folglich raten (Shin, 2005) von einer solchen Wärmebehandlung beim hier beschriebenen Recyclingprozess ab.

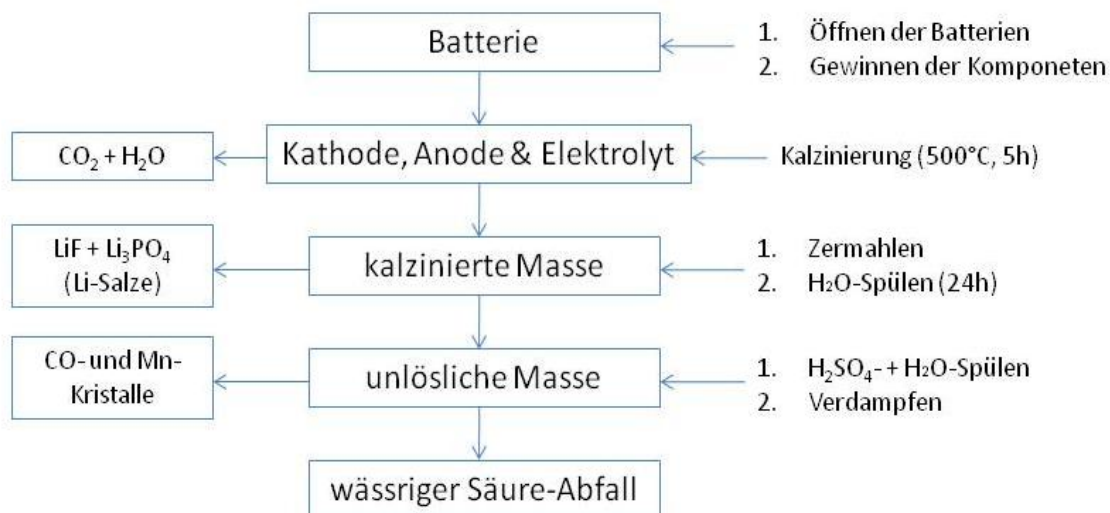


Abbildung 4-4 Ablaufschema des Recyclingprozesses, verändert nach (Shin, 2005, S. 173)

#### 4.3.5 Mechanisches Trennen, Kalzinierung, Ausspülen mit Wasser [Paulino et al. 2008]

In diesem in 2008 von (Paulino, 2008) veröffentlichten Prozess werden sowohl Li-Ionen- als auch Li/MnO<sub>2</sub>-Batterien zunächst manuell geöffnet und zerlegt. Die aktive Masse, d.h. Kathode, Anode und Elektrolyt, wird anschließend erhitzt und schließlich die Lithium-Salze mit Wasser ausgespült.

Das übrige Kobalt bzw. Mangan wird daraufhin mit Hilfe von Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) auskristallisiert. Einen vereinfachten Überblick über diesen Prozess gibt Abbildung 4-5.



**Abbildung 4-5 Vereinfachte Darstellung der Li-Gewinnung, verändert nach (Paulino, 2008, S. 845)**

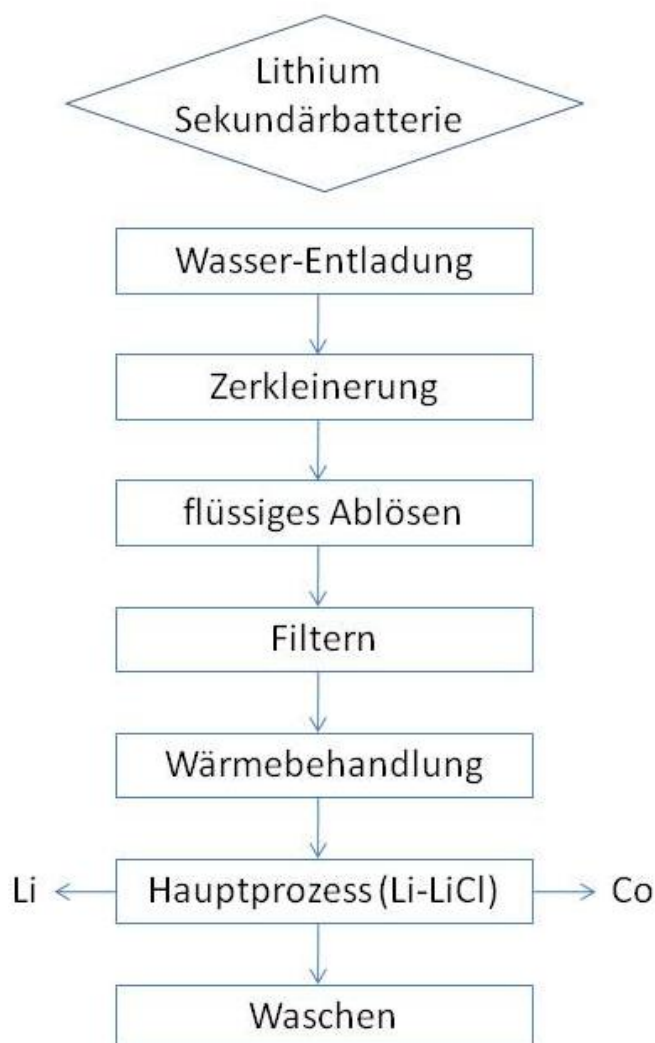
Um die einzelnen Komponenten der Batterien zu gewinnen werden sie manuell geöffnet, zerlegt und in Kathode, Anode, Plastik- bzw. Stahlgehäuse, Kupfer-, Kunststoff- bzw. Aluminiumfolie und elektrische Kontakte getrennt. Für die industrielle Anwendung ihres Prozesses schlagen (Paulino, 2008, S. 847) vor, die Trennung der aktiven Masse von den Metallfolien durch Abwaschen mit Wasser und anschließendes Filtrieren durchzuführen. Dies würde das manuelle Trennen vermeiden. Die so gewonnene aktive Masse wird im Anschluss in einem Brennofen langsam ( $5^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ) auf  $500^\circ\text{C}$  erhitzt. Bei dieser sog. Kalzinierung verdampft das an den Li-Co-Oxiden haftende Karbon vollständig. Aufgrund der langsamen Erhitzung kommt es gleichzeitig nicht zur Entzündung des Karbons, was die Bildung von Mischoxiden und somit die Reaktionsfähigkeit der kalzinierten Masse in den folgenden Prozessschritten verschlechtern würde.

Nach der Kalzinierung werden die in der Restmasse enthaltenen Lithium-Salze durch 24 Stunden langes Spülen mit Wasser extrahiert. Die übrige unlösliche Abfallmasse wird mit  $\text{H}_2\text{SO}_4$  und Wasser behandelt, damit Kobalt bzw. Mangan auskristallisieren und herausgefiltert werden können.

#### **4.3.6 Europäisches Patent EP 1 981 115 A1: Methode zur Wiedergewinnung wertvoller Substanzen von einer Lithium-Ionen Batterie**

Dieses im Jahr 2006 von Kawasaki Plant Systems eingereichte Patent (Kakuta & Yamazaki, 2006) beinhaltet einen mehrstufigen Prozess zur Lithium-Rückgewinnung aus Sekundärbatterien ohne den

Einsatz von Säure-Lösungen. Die einzelnen Stufen sind: Entladen, Zerkleinern, vom Bindemittel lösen, Filtern, Wärmebehandlung und Reduktion in Li-Chlorid und sind in Abbildung 4-6 vereinfacht dargestellt.



**Abbildung 4-6** Ablaufschema des Patents zur Li-Wiedergewinnung, verändert nach (Kakuta & Yamazaki, 2006)

Um eventuellen ungewollten Reaktionen beim Zerkleinern vorzubeugen werden die gesammelten Lithium-Batterien zunächst in einem Wasserbad vollständig entladen. Anschließend werden sie mit einer einachsigen Schermaschine in 10-20 mm große Teile zerkleinert. Um das an den Elektroden haftende Bindemittel abzulösen werden die zerkleinerten Teile im nächsten Schritt in Butanon getaucht. Während diesem flüssigen Ablösen wird die Lösung umgerührt bzw. mit Ultraschall gerüttelt und auf eine Temperatur kurz unter ihrem Siedepunkt angeheizt. Um das Elektrodenmaterial, das aus den wertvollen Metallen sowie aus Karbon besteht, aus der Lösung zu gewinnen, muss diese im folgenden Schritt gefiltert werden. Das so gewonnene Material wird in der

Hitzebehandlung anschließend ca. eine Stunde lang auf über 750°C erhitzt, damit das Kohlenstoff verdampft.

Im nun folgenden Hauptprozess wird das vorbehandelte Material in eine LiCl-Salzlösung getaucht. In der hierbei ablaufenden Reduktion wird das Li-Kobalt-Oxid mit Hilfe des LiCl in Kobalt und Li-Oxid umgewandelt. Kobalt schwimmt oben auf der Lösung und kann einfach abgeschöpft werden. Mit Hilfe von Galvanisierung kann anschließend auch das metallische Lithium gewonnen werden.

#### 4.4 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 4-7).

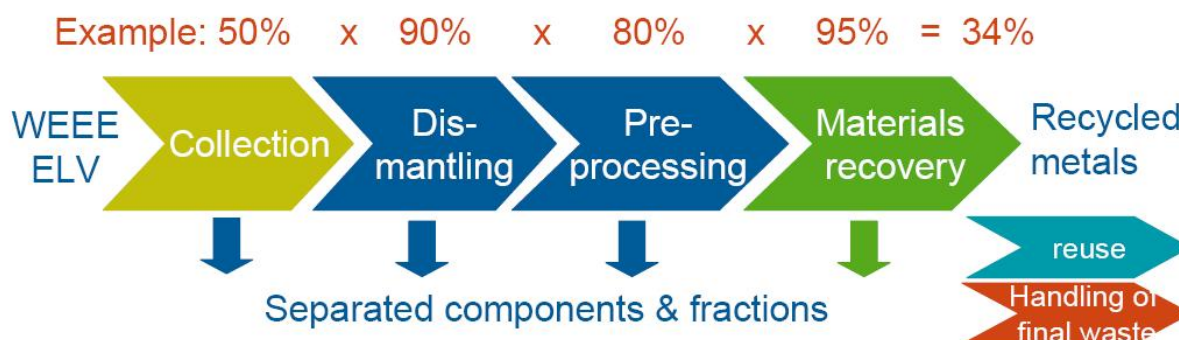


Abbildung 4-7 Berechnung der Effizienz der Recyclingkette, (Umicore, 2009, S. 18)

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-Altbatterien und dem Durchschnitt der Gewichte 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 (siehe Kapitel 5.1). 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, von denen einige in Kapitel 4.3 bereits beschrieben wurden. Tabelle 4-1 gibt einen

Überblick zu den Recycling-Effizienzen der oben beschriebenen 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-Rückgewinnungspotential 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 Verbesserungspotential zu finden ist: um eine hohe Gewinnung von Sekundärlithium bzw. anderen Sekundärrohstoffen aus Batterien und Akkus zu gewährleisten, muss die Sammelquote weiter erhöht werden. Deutschland liegt hier mit seinen 42 % mit an der Weltspitze (vgl. Abbildung 5-2).

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)

## 4.5 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 Li-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 oben beschriebenen VAL'EAS-Prozess gewonnene Li-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 Entwicklungspotential in der Elektromobilität und die damit verbundenen Nachfragemengen für Lithium, so ist ein gezieltes Recycling der hier verwendeten Batterien sowohl ökonomisch als auch ökologisch unabdingbar. Aus diesem Grund wurden 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)

## **5 Anfall von Li-haltigen Abfallstoffen aus Batterien**

### **5.1 Gesetzeslage, aktuelle Sammel- und Recyclingquoten**

Der Umgang und die Entsorgung bzw. Verwertung von Batterien wurde schon früh gesetzlich geregelt. So legte die EU-Richtlinie 91/151/EWG am 18.03.1991 bereits einheitliche Rechtsvorschriften für die damaligen EG-Mitgliedsstaaten fest, welche die Bekämpfung der Umweltbelastungen durch Cadmium und Quecksilber zum Ziel hatten. Die europäischen Richtlinien wurden in den folgenden Jahren, bedingt einerseits durch nicht vollständiges Erreichen der gesetzten Ziele und andererseits durch zahlreiche Änderungen aufgrund des technischen Fortschritts, häufig erneuert und verändert. Die aktuell gültige Richtlinie wurde am 06.09.2006 vom europäischen Parlament und vom Rat der europäischen Union verabschiedet und heißt: „Richtlinie 2006/66/EG [...] über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren [...]“ (Europäische Union, 2006, S. 1). „Sie zielt darauf ab, die Umweltbilanz der Batterien und Akkumulatoren sowie der Tätigkeiten aller am Lebenszyklus von Batterien und Akkumulatoren beteiligten Wirtschaftsakteure [...] zu verbessern.“ (Europäische Union, 2006, S. 4) Erstmals sind hier auch konkrete minimale Recyclingquoten sowie Sammelquoten für die Jahre 2012 und 2016 festgelegt.

In Deutschland wurden die EU-Richtlinien zunächst seit dem Jahr 1998 in der Batterieverordnung (BattV) umgesetzt, welche auch wiederholt angepasst und verändert wurde. Ziel dieser Verordnung ist es, den Eintrag von Schadstoffen in Abfällen durch Batterien zu verringern, indem bestimmte schadstoffhaltige Batterien nicht in Verkehr gebracht werden dürfen, gebrauchte Batterien zurückgenommen und dann verwertet oder beseitigt werden sowie Batterien mehrfach verwendbar und technisch langlebig hergestellt werden sollen. (Bundesministerium der Justiz, 2001)

Um dem Umweltbundesamt neue Vollzugsaufgaben zu übertragen, d.h. die Verfolgung bestimmter Ordnungswidrigkeiten, welche die Registrierungs- und Rücknahme-Pflichten der Hersteller betreffen, wurde im Mai 2009 das Gesetz zur Neuregelung der abfallrechtlichen Produktverantwortung für

---

Batterien und Akkumulatoren (BattG) verabschiedet, dass am 01.12.2009 in Kraft treten wird. (EUWID Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH, 2008, S. 1)

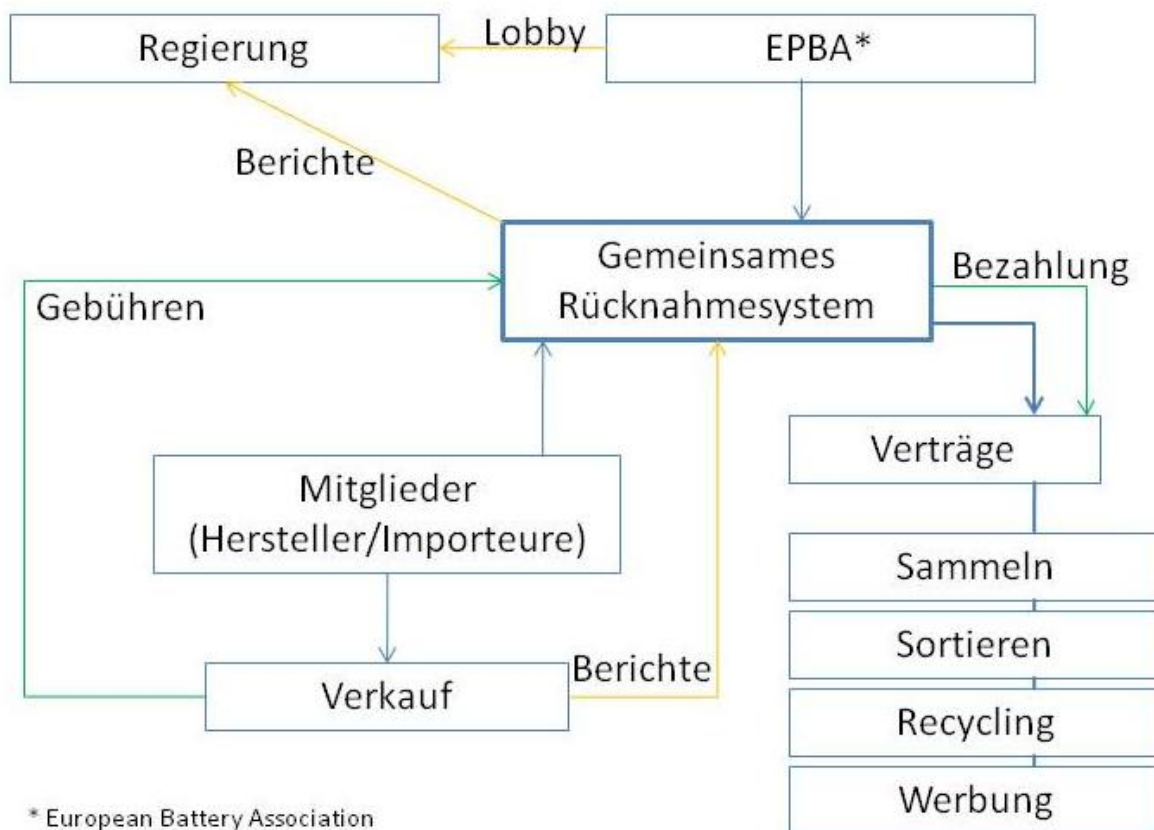
Es setzt die EU-Verordnung 2006/66/EG direkt um und beinhaltet u.a. folgende Punkte (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2009, S. 8-15):

- Verpflichtung der Hersteller zur Registrierung ihrer Marktteilnahme beim Umweltbundesamt (UBA)
- Einrichtung eines gemeinsamen, nicht gewinn-orientierten Rücknahmesystems (GRS) für Geräte-Alt-Batterien durch die Hersteller; u.a. mit folgenden Aufgaben:
  - Unentgeltliche Abholung und flächendeckende Rücknahme von Geräte-Alt-Batterien bei allen Vertreibern und öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern
  - Rücknahme, Transport, Sortierung und Verwertung von Geräte-Alt-Batterien sowie Beseitigung nicht verwertbarer Geräte-Alt-Batterien
  - Finanzierung anteilmäßig durch die einzelnen, beteiligten Hersteller
  - Offenlegung der jährlichen Kosten
  - Jährlicher Bericht an die obersten Landesbehörden und an das UBA zum 30. April

Die systemische Darstellung der Arbeitsweise eines GRS ist in Abbildung 5-1 dargestellt. Man sieht, dass das GRS von seinen Mitgliedern direkt über Aufschläge auf den Batteriepreis finanziert wird. Die hier erhaltenen Zuwendungen werden zur Steuerung, Organisation und Durchführung von Sammlung und Recycling sowie für das umfangreiche Berichtswesen verwendet. Die European Portable Battery Association (EPBA) ist eine Interessenvertretung der Batteriehersteller und hat somit direkten Einfluss auf das GRS, da seine Mitglieder auch größtenteils Mitglieder in der EPBA sind.

In vielen Mitgliedsstaaten der EU sind bereits Rücknahmesysteme nach diesem Schema eingerichtet und arbeiten seit Jahren (das Umweltforum Batterien in Österreich ist bereits seit 1989 in Betrieb) gemäß den hier festgelegten Richtlinien.





**Abbildung 5-1 Wirkungszusammenhänge eines GRS, verändert nach (EPBA, 2007, S. 10)**

- Verpflichtung der Vertrieber, die Altbatterien vom Endnutzer an der Verkaufsstelle unentgeltlich zurückzunehmen und sie dem GRS zur Abholung bereitzustellen
- Verwertung aller gesammelten und identifizierten Altbatterien nach dem Stand der Technik und Beseitigung nicht-verwertbarer bzw. nicht-identifizierbarer Altbatterien
- Festlegung der Sammelziele:
  - Sammelquote von mindestens 35 % bis zum 26.09.2012
  - Sammelquote von mindestens 45 % bis zum 26.09.2016
- Festlegung der Recyclingquote (Anteil der recycelten an der Menge aller gesammelten Batterien im Kalenderjahr; Definition aus (Stiftung GRS Batterien, 2009, S. 16)): mindestens 50 % bei Batterien, die kein Cadmium oder Blei enthalten und mindestens 75 % bzw. 65 % bei cadmiumhaltigen bzw. bleihaltigen Batterien.

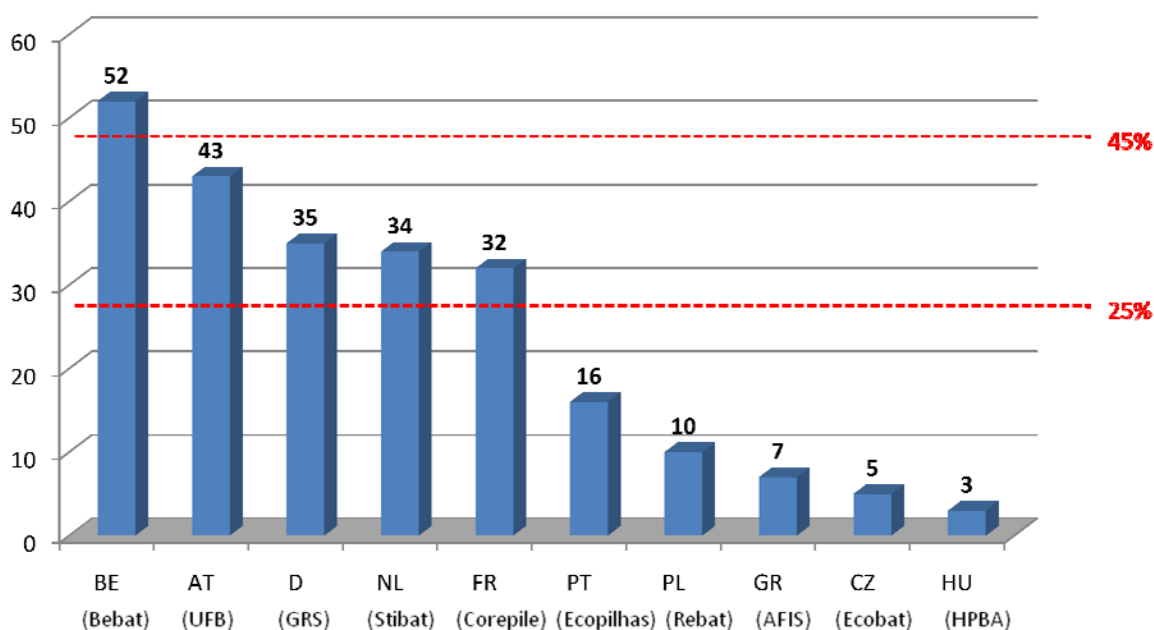
Die Definition der Sammelquote wird hierbei aus der EU-Richtlinie 2006/66/EG übernommen (siehe 4.4).

Die wesentlichen Neuerungen des BattG gegenüber der bestehenden Rechtslage sind: (Stiftung GRS Batterien, 2009)

- Neben Quecksilber wird künftig auch der Einsatz von Cadmium in Batterien eingeschränkt
- Batterie-Hersteller müssen sich in Melderegister beim UBA eintragen
- Erstmals Angabe verbindlicher Sammelziele aus EU-Richtlinie
- Übertragung der Vollzugsaufgaben zur Verfolgung bestimmter Bußgeldtatbestände im Zusammenhang mit dem Melderegister und abfallrechtlichen Grundpflichten auf das UBA
- Elektro- und Elektronikgeräte sind so zu konstruieren, dass Batterien/Akkus problemlos entnommen werden können

Die EU-Richtlinie und deren Umsetzung im BattG wurden von der Industrie begrüßt als auch kritisiert. Besonders die festgelegten Sammelziele wurden als „sinnvoll“ aber auch „anspruchsvoll“ eingestuft. (EUWID Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH, 2006)

Betrachtet man eine Studie der European Portable Battery Association mit den Sammelquoten der bereits installierten Rücknahmesysteme aus dem Jahr 2005, so erkennt man bei einigen EU-Staaten noch deutlichen Steigerungsbedarf, um die bis 2012 festgelegten 25 % als Sammelquote zu erreichen (siehe Abbildung 5-2).



**Abbildung 5-2 Sammelquoten bereits bestehender Rücknahmesysteme im Jahr 2005 [in %], verändert nach (EPBA, 2007, S. 22)**

Zurzeit gibt es noch keine offizielle Definition für die Recycling-Quote. Eine geeignete Berechnungsmethode soll jedoch laut (EPBA, 2007, S. 23) bis Anfang 2010 durch die EU festgelegt werden. Als Recycling-Quote (laut obiger, von der GRS selbst festgelegter Definition) wurde von der Stiftung GRS für das Jahr 2008 in Deutschland 99 % angegeben. Nach GRS-Angaben wurden von 13.928 t Altbatterien, welche nach Sammlung und Sortierung zur Entsorgung freigegeben wurden

13.772 t verwertet. Hier wurde allerdings nicht nach cadmiumhaltigen oder bleihaltigen Batterien unterteilt, sondern es wurden alle behandelten Batterien erfasst. (Stiftung GRS Batterien, 2009, S. 16)

## **5.2 Entwicklung künftiger Sammel- und Recyclingquoten**

Die von (Stiftung GRS Batterien, 2009) mit 99 % für Deutschland angegebene Recyclingquote sollte 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 sog. „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)

## **6 Angebotspotential von Sekundärlithium aus der Wiederverwertung Li-haltiger Abfallstoffe**

### **6.1 Methodik**

Zur Berechnung des Angebotspotentials von Sekundärlithium aus dem Recycling wurde 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, & al., 2004, S. 155)

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

Um die Benutzung für den Anwender zu erleichtern, wurden alle Eingabegrößen in einer im selben Systemordner gespeicherten Excel-Tabelle angegeben, welche dann von Vensim aus automatisch eingelesen wird. Siehe hierfür Abbildung 6-1. Im Drop-down-Menü „Szenario“ kann man das zu simulierende Fahrzeug-Penetrationsszenario auswählen. Über die Tabelle kann zudem jede Eingangsgröße für Sensitivitätsanalysen einzeln verändert werden.

Somit wird erreicht, dass auch Benutzer, die keine Kenntnisse in der Software Vensim besitzen, das in dieser Arbeit entwickelte Modell verwenden können.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2		Szenario:	<b>Dominanz</b>					
3								bitte Szenario auswählen!
4								
5		<b>Hier +/- Veränderungen für Sensitivitätsanalyse eingeben!</b>						
6								
7	Wachstum zum Vorjahr [%]	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
8	Glas&Keramiken	0	0	0	0	0	0	0
9	Alu-Schmelzen	0	0	0	0	0	0	0
10	Strangguss	0	0	0	0	0	0	0
11	Gummi&Thermoplasten	0	0	0	0	0	0	0
12	Luftaufbereitung	0	0	0	0	0	0	0
13	Primärbatterien	0	0	0	0	0	0	0
14	Rundzellen	0	0	0	0	0	0	0
15	Gerätebatterien	0	0	0	0	0	0	0
16	Schmierfette	0	0	0	0	0	0	0
17	Pharmazeutika	0	0	0	0	0	0	0
18	Sonstige	0	0	0	0	0	0	0
19								
20								
21	Lebensdauer [Jahre]	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
22	Fz-Batt	0	0	0	0	0	0	0
23	Glas&Keramiken	0	0	0	0	0	0	0
24	Alu-Schmelzen	0	0	0	0	0	0	0
25	Strangguss	0	0	0	0	0	0	0
26	Gummi&Thermoplasten	0	0	0	0	0	0	0
27	Luftaufbereitung	0	0	0	0	0	0	0
28	Primärbatterien	0	0	0	0	0	0	0
29	Rundzellen	0	0	0	0	0	0	0
30	Gerätebatterien	0	0	0	0	0	0	0
31	Sonstige	0	0	0	0	0	0	0
32								
33								
34		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
35	Wachstum Fahrzeuge	0	0	0	0	0	0	0
36	Li-Anteil Stadt-BEV	0	0	0	0	0	0	0
37	Li-Anteil HV	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 6-1 Beispiel der Dateneingabe über Microsoft Excel

Bei der Arbeit mit dem Modell ist lediglich zu beachten, dass die Excel-Datei mit den Rahmendaten, wie bereits erwähnt, im dem Ordner, in dem auch die Modelldatei liegt gespeichert werden muss.

Will man das Modell in Vensim nun mit unterschiedlichen Werten testen, so muss man zunächst im Fenster „Name the Simulation to be Made“ (Siehe Abbildung 6-2) einen Namen für den bevorstehenden Durchlauf angeben. Klickt man anschließend auf den Button „Run a Simulation“, so beginnt die Simulation mit den aktuellen Werten und dem ausgewählten Szenario.



Abbildung 6-2 Vensim Werkzeugleiste

Nach Ablauf der Berechnungen können die Ergebnisse mit Hilfe der Analyse-Werkzeugleiste begutachtet werden. Mit den unterschiedlichen Buttons (siehe Abbildung 6-3) können, von oben her aufgezählt, Baumdiagramme zu Herkunft, zum Gebrauch, evtl. vorhandene Schleifen, die Berechnung, Graphen zu den Variablen der Herkunft, der Graph, Graphen aus evtl. Sensitivitätsanalyse, die Wertetabelle und Vergleiche mit anderen Durchläufen der jeweils ausgewählten Variable angezeigt werden. Die so hervorgehobenen Ergebnisse können jeweils zur Nachbearbeitung in andere Programme exportiert werden.



Abbildung 6-3 Analyse-Werkzeugleiste

## 6.2 Modell

### 6.2.1 Modellbeschreibung

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 wurden zunächst in drei Kategorien unterteilt:

- (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).

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 der oben beschriebenen Excel-Tabelle aufgeführt sind.

Definiert man die Verbrauchsmengen der einzelnen Verwendungsarten  $i$  als  $MV_i$  (Menge Verwendungsart), so erhält man den jährlichen Gesamt-Lithium-Verbrauch aus:

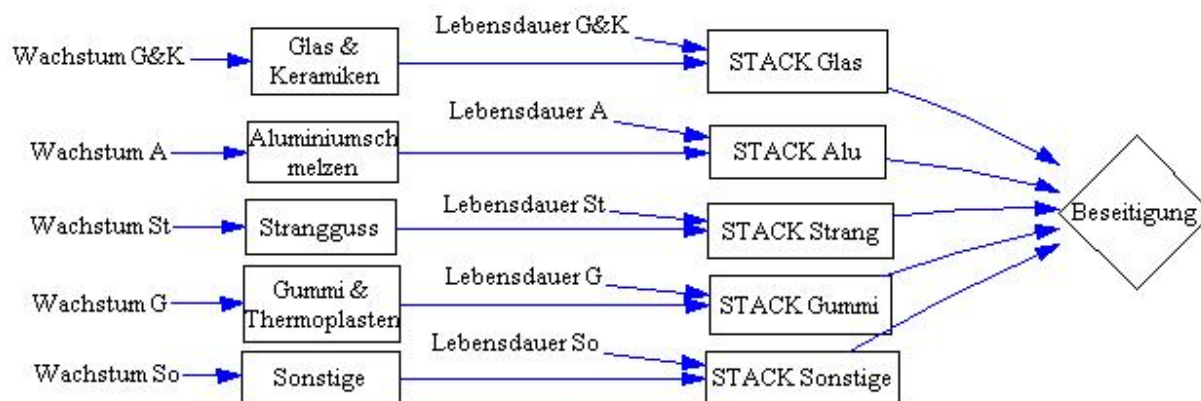
$$\sum_{i=1}^9 MV_i$$

Aus den oben definierten Kategorien folgen direkt die drei unterschiedlichen Senken für das verwendete Lithium: „Beseitigung“, „Sekundärlithium“ und „dissipative Nutzung“ (siehe Tabelle 6-1). Ihre Mengen sind auch jeweils in Tonnen Lithium angegeben.

**Tabelle 6-1 Senken der einzelnen Verwendungsarten**

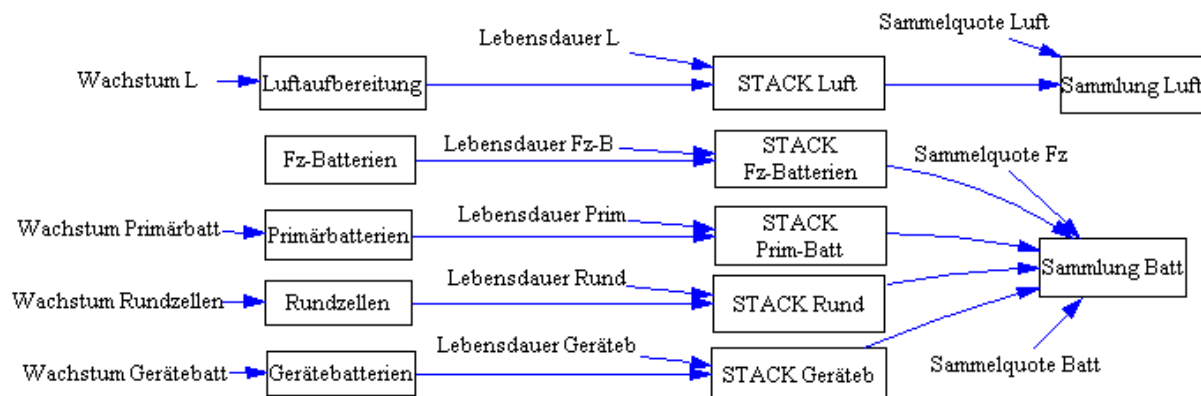
Verwendungsart	Senke
Aluminiumschmelzen	Beseitigung
Glas & Keramiken	
Gummi & Thermoplasten	
Sonstige	
Strangguss	
Batterien	Sekundärlithium
Luftaufbereitung	
Pharmazeutika	dissipative Nutzung
Schmierfette	

Die Berechnung der Senke „Beseitigung“ ist in Abbildung 6-4 dargestellt. Im Ausgangsjahr+1 werden die Verwendungen der Kategorie (1) jeweils zunächst in einen sog. „STACK“ geschoben. Dieser verzögert die Weitergabe der Lithium-Menge im Baum um den Wert der jeweiligen Hilfsvariablen „Lebensdauer“ und simuliert so die Nutzung des Produktes. Zum Ende der Lebensdauer werden die Produkte und damit das in ihnen enthaltene Lithium der Beseitigung zugeführt. Die einzelnen Lebensdauern werden hierbei wieder über die Excel-Tabelle eingelesen.



**Abbildung 6-4 Berechnung der Senke „Beseitigung“**

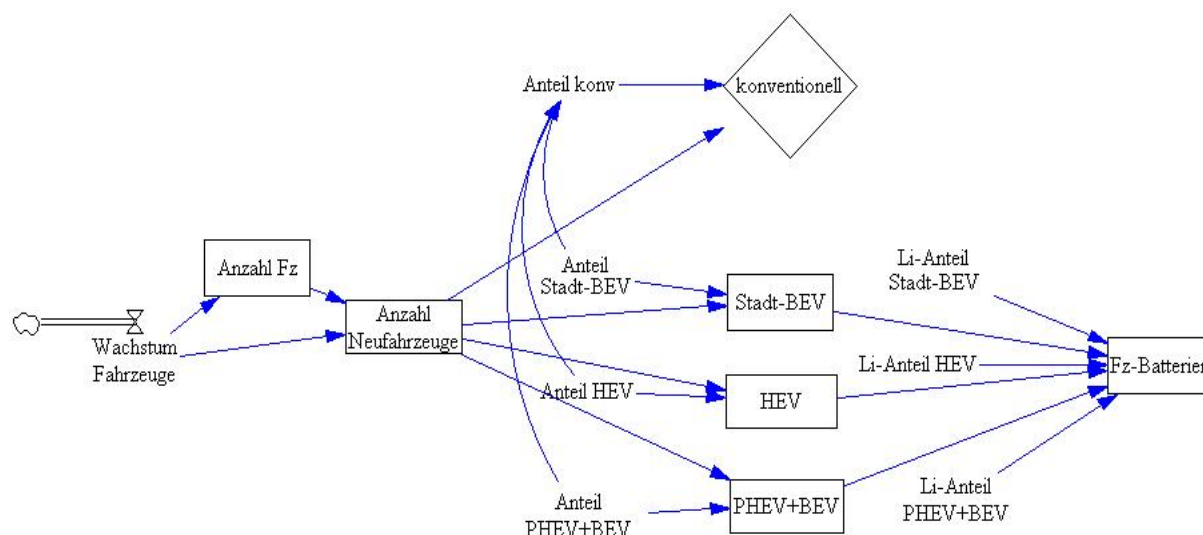
Der Anfall von Sekundärlithium aus dem Recycling wird aus den Verwendungen der Kategorie (2), Batterien und Luftaufbereitung, berechnet. Zunächst werden die im Ausgangsjahr angegebenen Mengen wie oben in einen STACK geschoben, welcher die jeweilige Nutzung der Produkte simuliert. Sind die Produkte am Ende ihrer Lebensdauer angelangt, müssen sie um eine weitere Verwendung zu ermöglichen, mit einer möglichst hohen Sammelquote gesammelt werden. Im Modell wurden diskrete Sammelquoten für die Luftaufbereitung und die Fahrzeugbatterien angenommen. Die übrigen Batteriearten werden mit einer Sammelquote behandelt, da diese auch gemeinsam eingesammelt werden (siehe Abbildung 6-5).



**Abbildung 6-5 Sammlung zum Recycling**

Die Verwendungsarten werden genau wie bei der „Beseitigung“ Jahr für Jahr mit dem jeweiligen aus der Excel-Tabelle eingelesenen Wachstum multipliziert. Lediglich bei der Verwendung Fz-Batterien wurde eine andere Herangehensweise gewählt. Um den Anteil der jeweiligen Fahrzeugtypen, also Hybrid- (HEV), Plug-In-Hybrid- (PHEV) oder Elektrofahrzeug (BEV), an der Gesamtmenge der Fahrzeugbatterien besser ablesen und eventuelle Trends und Entwicklungen einfacher ins Modell integrieren zu können, wird das Wachstum dieser Verwendungsart über die Verteilung der Fahrzeugtypen-Anteile berechnet (siehe Abbildung 6-6).



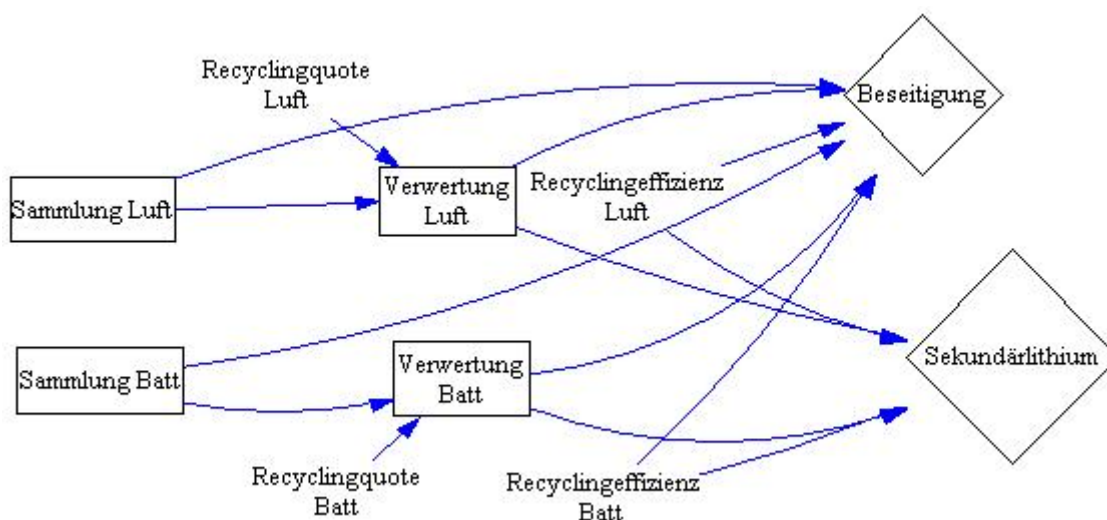


**Abbildung 6-6 Berechnung der Lithium-Menge für „Fz-Batterien“**

Aus der Quelle „Anzahl Neufahrzeuge“, welche selbst aus dem jährlichen Wachstum der Fahrzeug-Gesamtanzahl ermittelt wird, werden mittels der jeweiligen Zulassungsanteile an Stadt-BEVs, HEVs und PHEVs+BEVs die jährlichen Stückzahlen für die einzelnen Fahrzeugtypen sowie die Anzahl konventioneller Fahrzeuge, sprich mit Verbrennungsmotor, berechnet. Um aus den so ermittelten Stückzahlen die Menge an benötigtem Lithium zu ermitteln, wird der jeweilige Lithium-Anteil pro Fahrzeug mit einbezogen. Dieser wurde hier auf 150g Li/kWh gesetzt unter der Annahme, dass das Verhältnis von in den Batterien eingesetzten Kobalt- zu Eisenphosphatkathoden in etwa bei 50:50 liegt. (Angerer & al., 2009, S. 171)

Die Batteriekapazität der Elektrofahrzeuge sowie Plug-In-Hybridfahrzeuge wurde mit 20 kWh, die der reinen Hybridfahrzeuge mit 1,4 kWh eingerechnet.

Das Lithium aus den wie oben beschrieben gesammelten Batterien bzw. Luftaufbereitungsanlagen wird nun der Verwertung zugeführt. Die Anteile, die nicht gesammelt werden konnten, werden zur Senke „Beseitigung“ addiert (siehe Abbildung 6-7). Nach der Sammlung werden die Batterien sortiert und identifiziert. Nicht recycel- bzw. identifizierbare Batterien werden wiederum direkt der Beseitigung zugeführt, die restlichen dem Recycling. Aus diesen Zahlen ergibt sich die Recyclingquote, welche bei der Luftaufbereitung als 100 % angenommen wurde: hier kann alles verwendete Lithium dem Recycling zugeführt werden.



**Abbildung 6-7 Berechnung des Anfalls von Sekundärlithium**

Das eigentliche Recycling läuft wiederum in verschiedenen Arbeitsschritten ab. Diese haben jeweils, wie bereits bei der Beschreibung der einzelnen Verfahren erwähnt wurde, unterschiedliche Wirkungsgrade; d.h. nicht 100 % des eingebrachten Lithiums können tatsächlich wiedergewonnen werden. Hieraus ergibt sich die Recyclingeffizienz. Für die Luftaufbereitung wurde dieser Wert wiederum auf 100 % gesetzt, da das verwendete Li-Bromid nahezu vollständig zurückgewonnen werden kann. Bei den Batterien wurde ein Mittelwert aus den zurzeit in Anwendung befindlichen Prozessen gewählt. Die bei der Verwertung gewonnene Lithium-Menge geht in die Senke „Sekundärlithium“, der nicht rückgewinnbare Restanteil wird zur „Beseitigung“ addiert.

Ein verhältnismäßig geringer Anteil der Lithium-Verwendungen fällt in Kategorie (3), die dissipative Nutzung. Wie bereits bei den beiden vorherigen Kategorien, werden auch hier die Verbrauchsmengen des Ausgangsjahres mit den jeweiligen, aus der Excel-Tabelle eingelesenen Wachstumswerten multipliziert. Da das Lithium zusammen mit den Produkten bei der Nutzung verbraucht und somit aus dem Kreislauf entnommen wird, geht die entsprechende Lithium-Menge direkt in die Senke „dissipative Nutzung“ ein, ohne vorher über einen Nutzungsdauer-STACK zu laufen (siehe Abbildung 6-8).



**Abbildung 6-8 Senke „Dissipative Nutzung“**

---

Setzt man die Berechnungsgraphen der drei Kategorien zusammen, so erhält man die gesamte Modelldarstellung, welche in Abbildung 6-9 zu sehen ist.

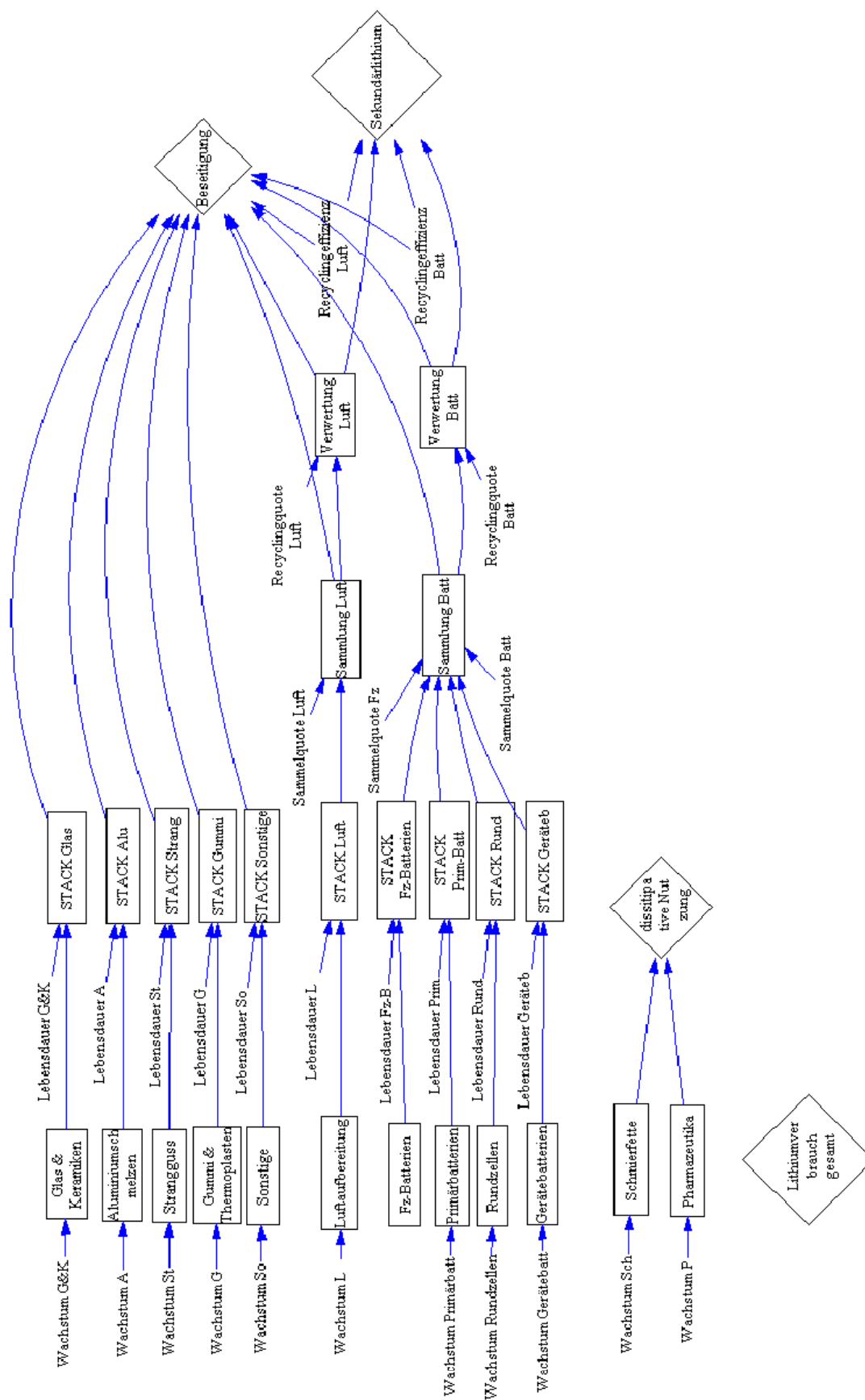


Abbildung 6-9 Gesamtdarstellung des Vensim-Berechnungsmodells

---

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

- (1) 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
- (2) Die Brennstoffzelle wird bei ausreichender technischer Entwicklung Marktanteile von den Verbrennungsmotoren abringen. 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 wurde von einer gesonderten Betrachtung reiner Brennstoffzellenfahrzeuge bei der Szenarien-Entwicklung abgesehen.
- (3) Die Entwicklung der Elektromobilität in Nordamerika, Japan und China verläuft parallel zu der in Europa.
- (4) Der Rest der Welt (RoW) wurde im Bezug auf die Verbreitung der Elektromobilität mit fünf Jahren Verzögerung im Vergleich zu Europa eingerechnet.
- (5) Die künftige Entwicklung der Gesamtfahrzeugbestände in den einzelnen Weltregionen wurde aus dem IEA-Transport-Spreadsheet-Modell des World Business Council for Sustainable Development (wbc-sd, 2004) entnommen.
- (6) Zur Berechnung der Neuzulassungszahlen wurde eine Lebensdauer von 10 Jahren für alle Fahrzeugtypen angenommen.

Die Betrachtung der Fahrzeugzahlen schließt ausschließlich PKWs bzw. bei Stadt-BEVs auch Elektroroller und Kleintransporter ein. Auf die Einbeziehung von LKWs und Bussen wurde 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) wurden die zwei entwickelten Szenarien „Dominanz“ bzw. „Pluralismus“ genannt:

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).
- V2G<sup>1</sup>-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 -fahrräder 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.

<sup>1</sup>Vehicle-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 6-10).

## Neuzulassungsanteile\_Welt - Dominanz

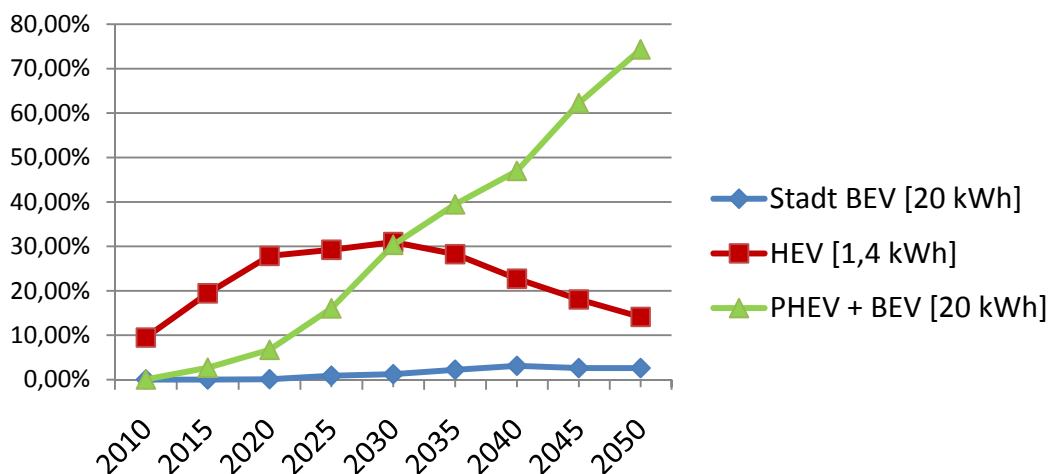


Abbildung 6-10 Neuzulassungsanteile - Szenario Dominanz

Das zweite Penetrationszenario, das als Pluralismus-Szenario bezeichnet wird, prognostiziert eine restriktivere Marktpenetration, wie in Abbildung 6-11 zu sehen ist. Die zugrundeliegenden Annahmen sind:

- 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, CO<sub>2</sub>-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.

## Neuzulassungsanteile\_Welt - Pluralismus

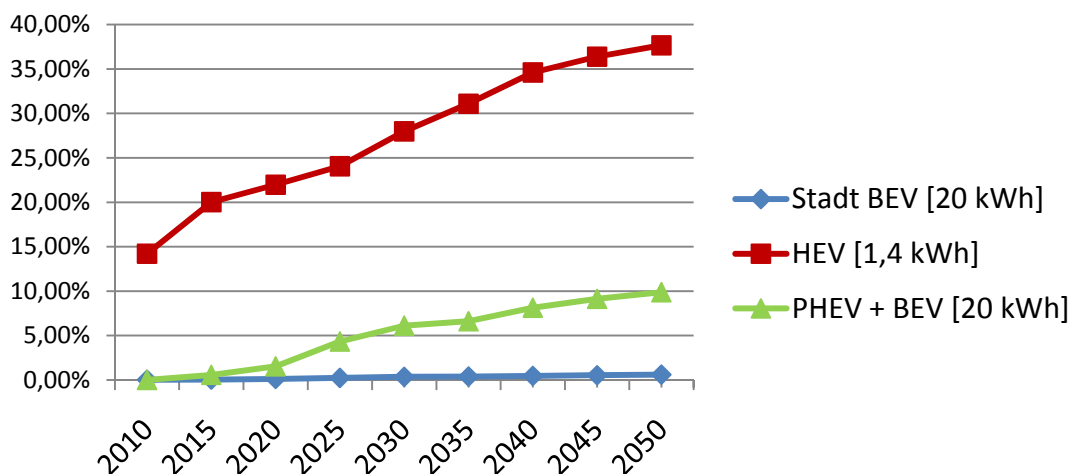


Abbildung 6-11 Neuzulassungsanteile - Szenario Pluralismus

Eine Einordnung der obigen Szenarien im Vergleich zu Studien anderer renommierter Analysefirmen gibt Abbildung 6-12. Die hier betrachteten Studien stellen eine Abschätzung der weltweiten Neuzulassungszahlen von PHEVs und BEVs in den Jahren 2015-2030 dar. Es lässt sich erkennen, dass die ISI-Penetrationsszenarien ungefähr im mittleren Bereich der betrachteten Studien angesiedelt sind.

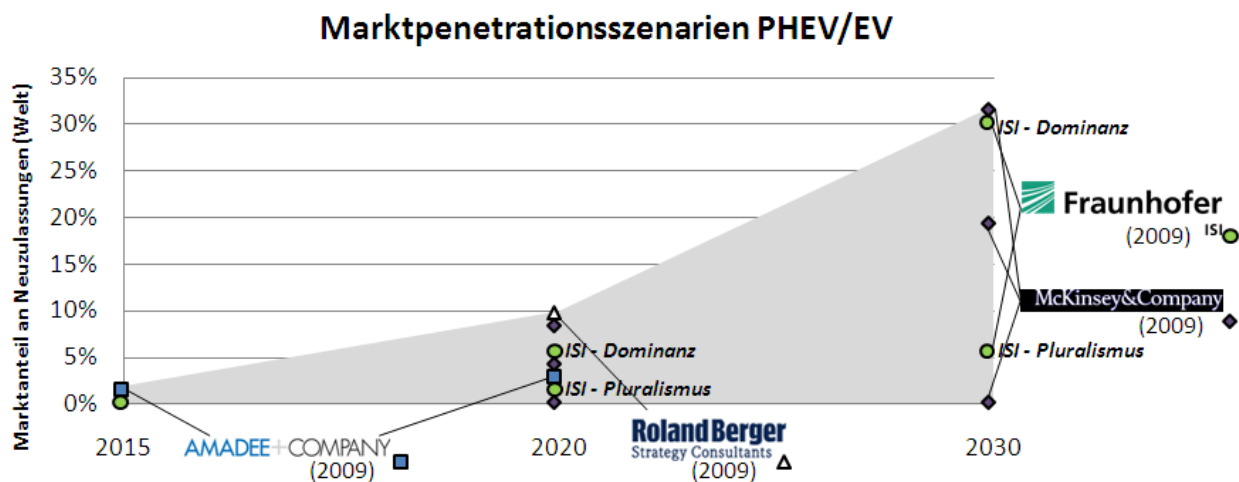


Abbildung 6-12 Studien zu Neuzulassungen weltweit



---

Im Modell wurden 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, wurden 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 wurden 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
- Li-Anteil Stadt-BEV
- Li-Anteil HEV
- Li-Anteil PHEV+BEV

Die Definition der Sammelquote wurde bereits in Kapitel 5.1 gegeben. In der Modellrechnung wurde 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 zu 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 wurde.

Da das in Absorptionskälteanlagen verwendete Li-Bromid nahezu vollständig wiederverwendet wird (Roskill, 2009, S. 285), wurde 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 wurde.

Für die Recyclingeffizienz Batt wurde mit 0,85 ein Mittelwert der derzeit kommerziell angewendeten Lithium-Recyclingprozesse angenommen (siehe Tabelle 4-1).

Das in Absorptionskühlanlagen verwendete Li-Bromid wird eins zu eins wiederverwendet (Roskill, 2009, S. 285), was auf eine Recyclingeffizienz Luft von 1 schließen lässt.

Das Fahrzeugwachstum wurde 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 vorhersagbar. Deshalb wurde 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 wurden 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 6-2.

**Tabelle 6-2 Annahmen zum Recycling**

<b>Annahme</b>		<b>Wert</b>
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 über die in 6.1 beschriebene Excel-Tabelle eingelesen:

- 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 wurden bis 2013 aus (Roskill, 2009), bis 2020 aus (Anderson, 2009) entnommen und sind in Tabelle 6-3 dargestellt. Für die Werte ab 2020 wurden eigene sowie Expertenannahmen herangezogen.

Tabelle 6-3 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 <sup>1</sup>	0,0	0,0
Strangguss	2,5	2,5 <sup>2</sup>	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 <sup>3</sup>	4,0	4,0
Gerätebatterien	6,9	8,0 <sup>3</sup>	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

<sup>1</sup> Bei Anderson Wachstum von -2,6 % p.a., in Modell wurde kein Wachstum angenommen

<sup>2</sup> keine Prognose bei Anderson; Übernahme der Roskill-Schätzung

<sup>3</sup> 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 Li-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 wurden 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 3.3.3 beschrieben, eng mit dem Weltwirtschaftswachstum gekoppelt, weswegen hier 2,8 % p.a. respektive 2,5 % p.a. angenommen werden.

Da die Patente für Li-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 wurde das Wachstum für Sonstige im Modell ab 2020 an das Weltwirtschaftswachstum gekoppelt.

Die Lebensdauern wurden jeweils über den gesamten Betrachtungszeitraum konstant gehalten. So wurde für Glas & Keramiken nach Rücksprache mit der Firma SCHOTT Technical Glass Solutions GmbH eine mittlere Lebensdauer von acht Jahren angenommen.

Für die Fahrzeugbatterien wurde, 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 zu spezielle Eigenschaften besitzt (entfernt z.B. Unreinheiten wie Aluminiumoxid aus dem Stahl), die nach dem Guss „verbraucht“ 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 wurde für die Modellrechnung ein Mittelwert von fünf Jahren gewählt.

In der Luftaufbereitung muss das Absorptionsmittel Li-Bromid alle fünf Jahre ausgetauscht werden. (Roskill, 2009, S. 285)

Für Primär-, Gerätebatterien und Rundzellen wurde 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 wurde für die Berechnungen eine Lebensdauer von 10 Jahren für Sonstige angesetzt.

Die Neuzulassungsanteile von Stadt-BEVs, HEVs und PHEV+BEVs wurden mit den oben beschriebenen Szenarien bestimmt. Der Anteil an Neuzulassungen von Fahrzeugen mit konventioneller Antriebstechnik ergibt sich aus:

$$\text{Anteil konv} = 1 - (\text{Anteil Stadt-BEV} + \text{Anteil HEV} + \text{Anteil PHEV+BEV})$$

## 6.2.2 Modellergebnisse

### 6.2.2.1 Szenario: Pluralismus

Zunächst soll das gemäßigte Pluralismus-Szenario betrachtet werden. Hier stellen sich die Anteile der einzelnen Fahrzeugklassen am Gesamtfahrzeugbestand wie in Abbildung 6-13 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 Gesamt-Fahrzeugbestand eindeutig die dominierende Rolle spielen.

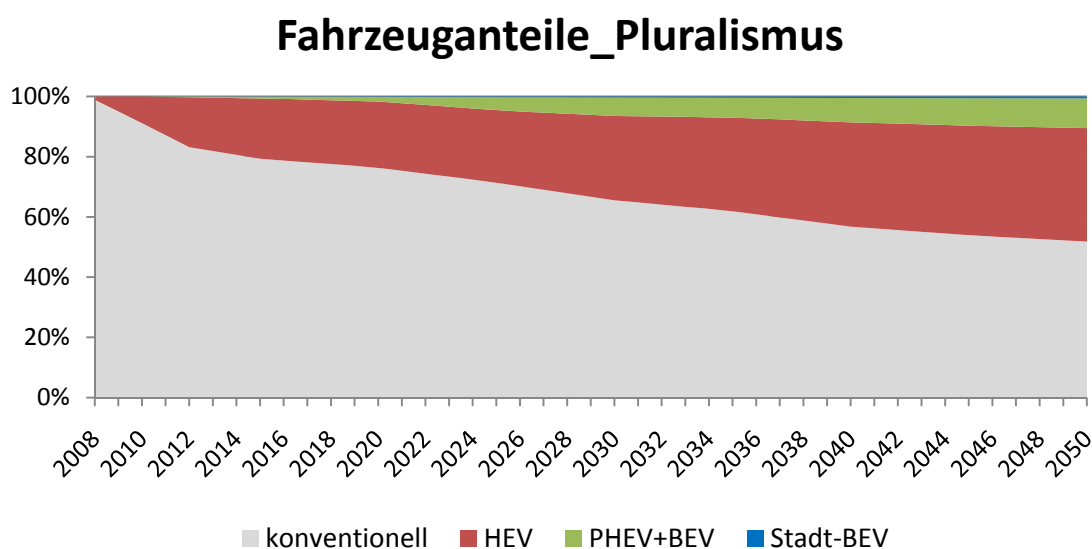
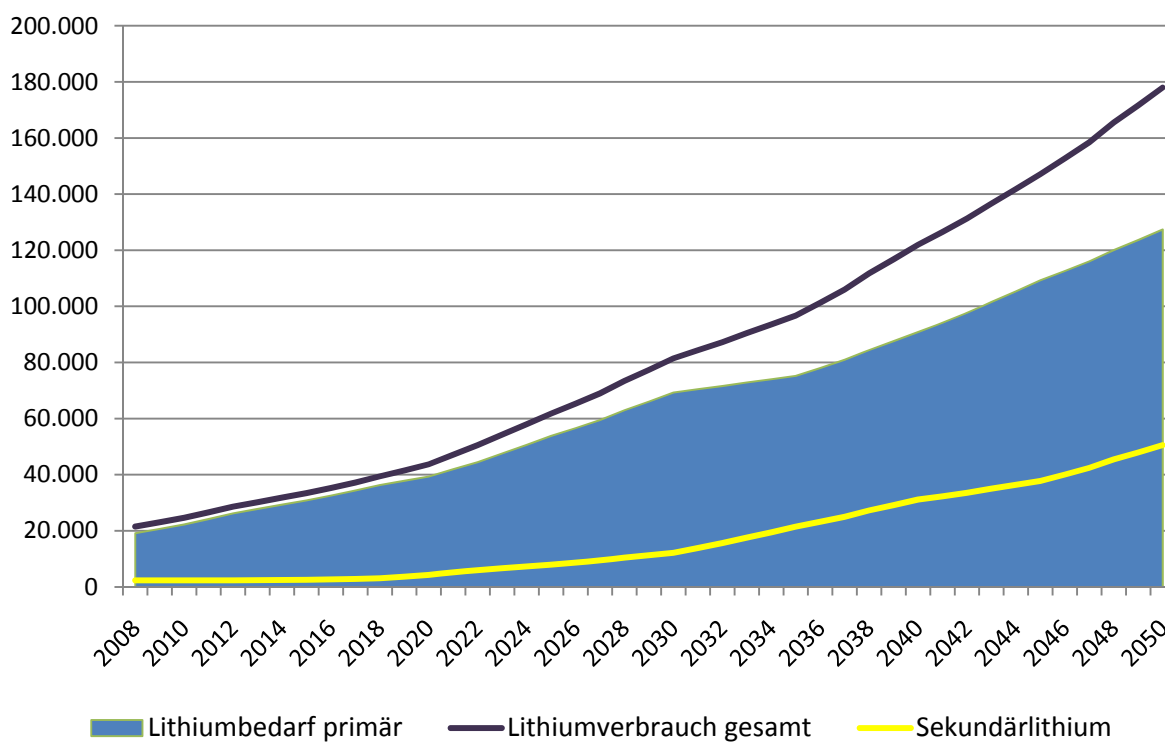


Abbildung 6-13 Fahrzeuganteile am Gesamtbestand [in %] - Pluralismus-Szenario

Bei einem Gesamt-Lithium-Verbrauch von 21.295 t im Jahr 2008, unter Einbeziehung der in 6.2.1 getroffenen Annahmen und angenommenen Werte, stellt sich die Entwicklung des weltweiten Lithium-Verbrauchs im Pluralismus-Szenario wie in Abbildung 6-14 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.

## Pluralismus



**Abbildung 6-14 Gesamt-Lithium-Verbrauch, Nachfrage nach Primärlithium und Anfall von Sekundärlithium [in t Li] – Pluralismus**

Einen detaillierteren Überblick zur Lithium-Nachfrage gibt Abbildung 6-15. 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 wurde 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 Zuwachs erhält. Die

hohen Verbrauchsmengen für Li-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 Flugzeuggestaltungsbau.

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 verwendete Lebensdauer von zehn Jahren für die Fahrzeugbatterien zurückzuführen, deren Verwendung in der Modellrechnung ab dem Jahr 2008 stetig steigt. Somit spiegelt die Sekundärlithium-Kurve Veränderungen im Lithium-Verbrauch für Fahrzeugbatterien immer mit zehn Jahren „delay“ 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 wurden.

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 %.

## Verwendungsarten - Pluralismus

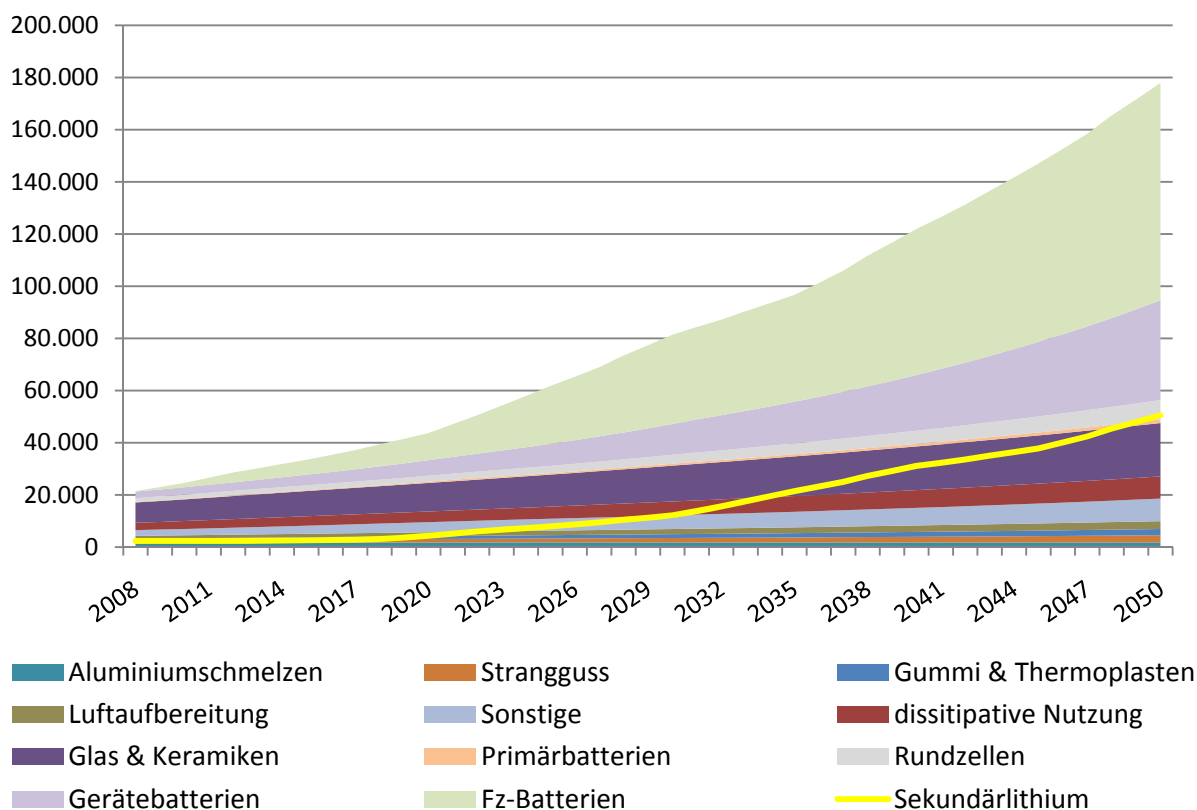
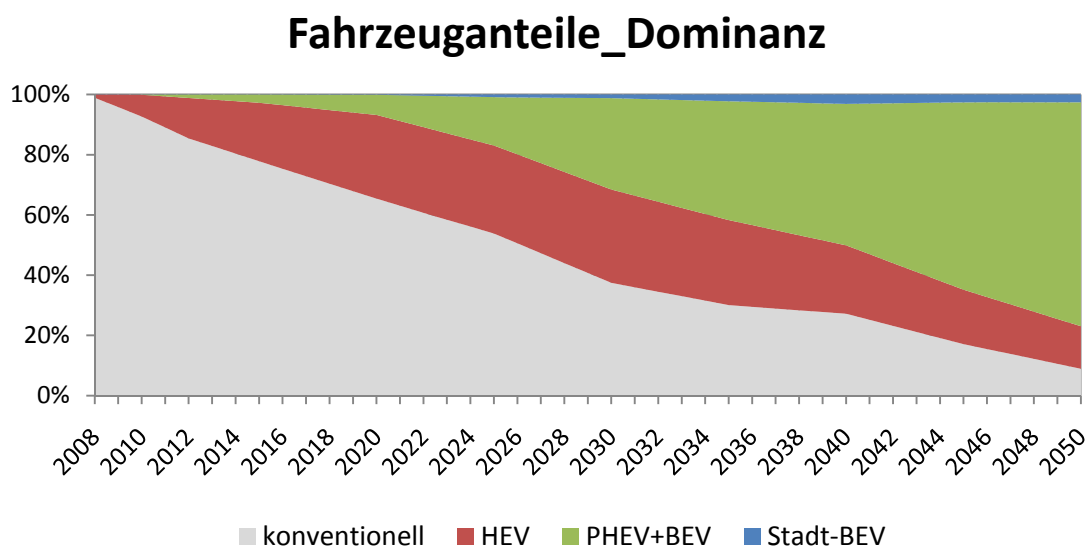


Abbildung 6-15 Verbrauchsmengen der einzelnen Verwendungsarten [in t Li] – Pluralismus



### 6.2.2.2 Szenario: Dominanz

Im Dominanz-Szenario wird der Fahrzeugmarkt bis 2050 klar von der Elektromobilität beherrscht. Wie Abbildung 6-16 zeigt, nehmen herkömmliche Verbrennungsmotoren in 2050 lediglich einen Anteil von 9 % des Gesamtbestandes ein. Die dominierende Fahrzeugklasse mit 74 % Bestandsanteil sind die Plug-In-Hybriden und die Batteriefahrzeuge mit Austauschbatterie. Die Stadt-BEVs spielen erneut nur eine kleine Rolle.



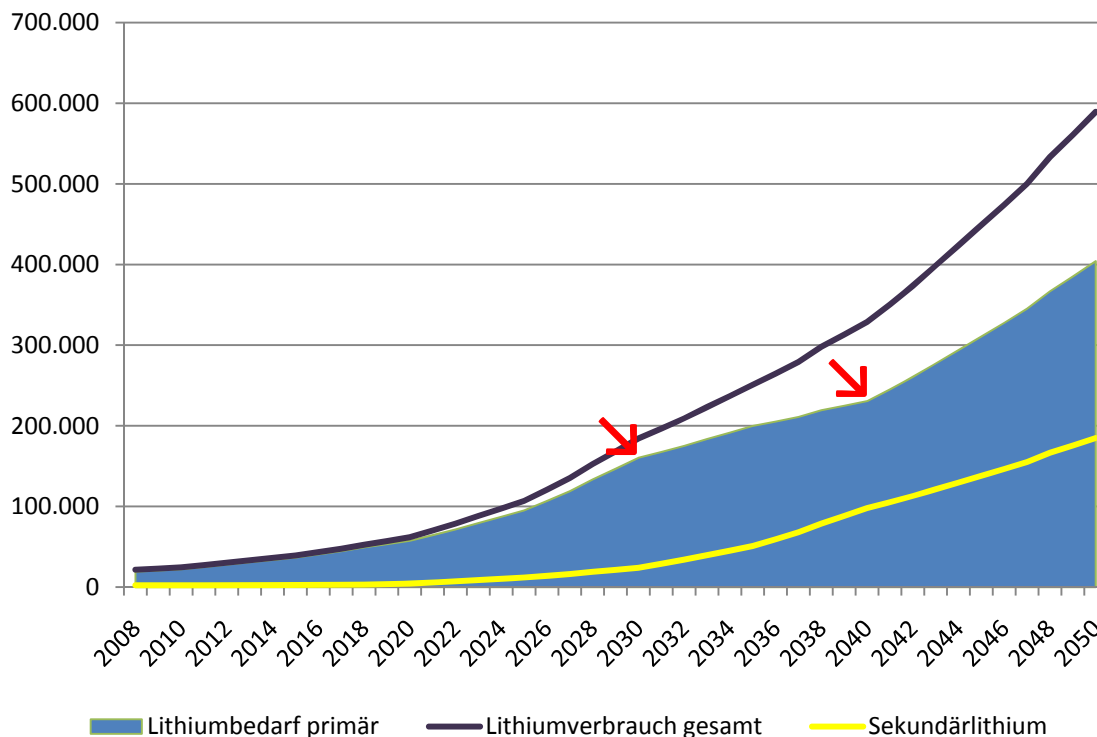
**Abbildung 6-16 Fahrzeuganteile am Gesamtbestand [in %] - Dominanz-Szenario**

Die jährlichen Lithium-Verbrauchswerte sowie das Angebot an Sekundär- und die Nachfrage nach Primärlithium im Dominanz-Szenario sind in Abbildung 6-17 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 6-10) 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.

## Dominanz



**Abbildung 6-17 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 6-18 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 wurden. 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.

## Verwendungsarten - Dominanz

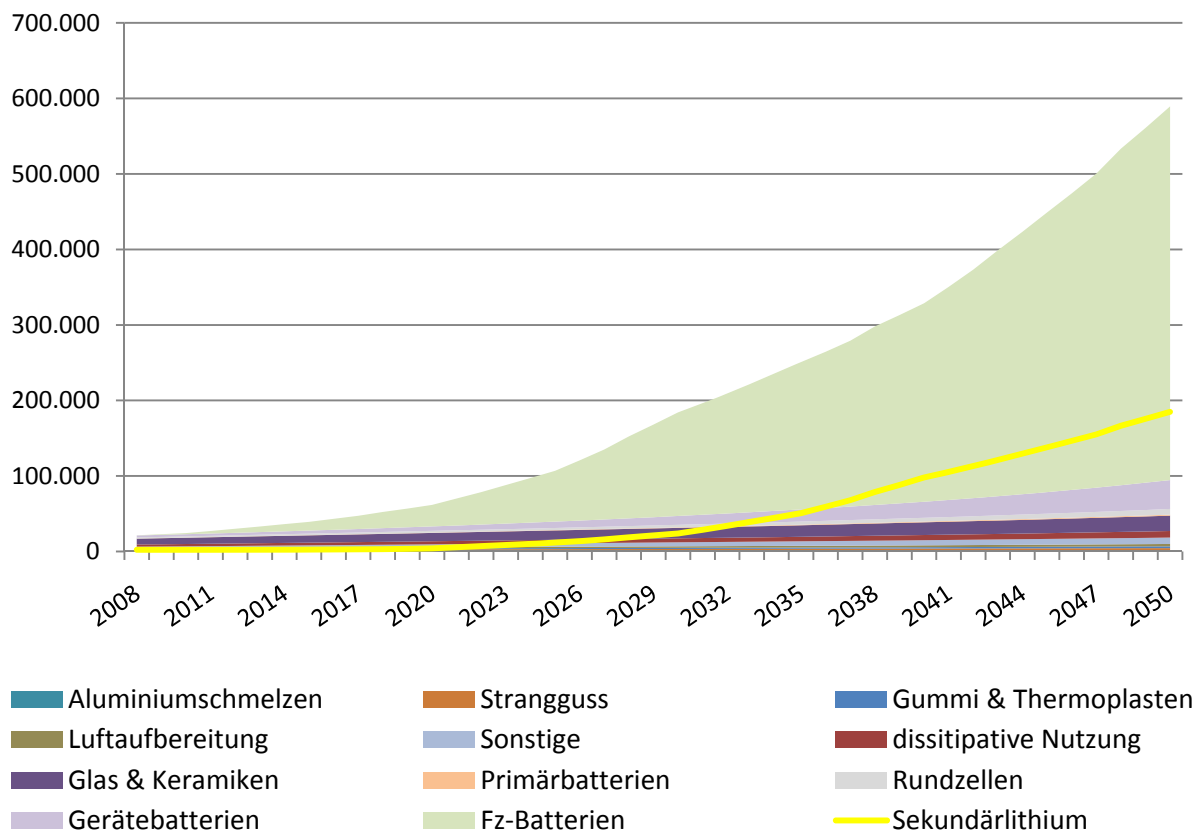


Abbildung 6-18 Verbrauchsmengen der einzelnen Verwendungsarten [in t Li] – Dominanz

## 7 Entwicklung von Lithium-Angebot und -Nachfrage

Im Kapitel 7 werden die mit Hilfe des Modells in Vensim errechneten Lithium-Verbrauchsmengen dem vorhandenen Lithium-Angebot gegenübergestellt. Dieses besteht aus der Summe der in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Reserven und der Menge an durch Recycling wiedergewonnenem Sekundärlithium. Als Reserven wurden 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 14 Mio. t (siehe Tabelle 2-4). Da die Sekundärlithium-Menge stark von der Anzahl der recycelten Fahrzeugbatterien abhängt, ist hier eine getrennte Betrachtung der zwei verwendeten Szenarien sinnvoll.

## 7.1 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 7-1). 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 ca. 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 wurden. Zusammen werden bis zum Jahr 2050 ca. 300.000 t Lithium für diese Verwendungen verbraucht.

Zusätzlich wurde 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 Li-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 Recycelquoten 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 % des Lithium-Angebots verbraucht sein.

Betrachtet man die weltweit vorhandenen Lithium-Ressourcen, so werden in diesem Szenario bis 2050 ca. 25 % durch die Lithium-Nachfrage verbraucht sein. Hierbei ist jedoch die durch Recycling gewonnene Sekundärlithium-Menge nicht enthalten.

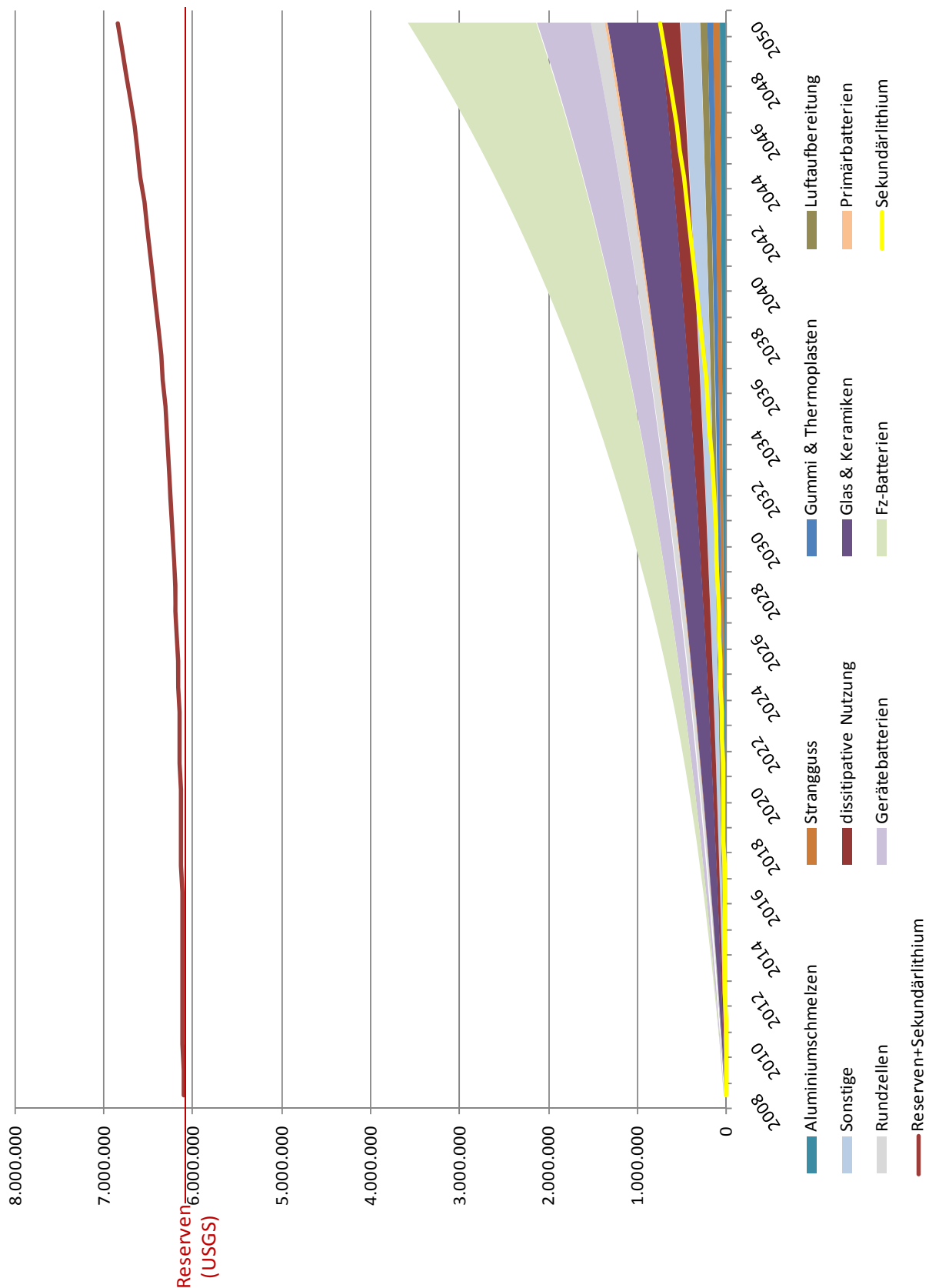


Abbildung 7-1 Verwendungsarten kumuliert [in t Li] - Pluralismus

---

## 7.2 Analyse des Dominanz-Szenarios

Aus der kumulierten Darstellung der Verbrauchswerte der einzelnen Verwendungen im Dominanz-Szenario in Abbildung 7-2 lässt sich ein Gesamt-Lithium-Verbrauch im Zeitraum 2008-2050 von ca. 8,95 Mio. Tonnen 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 Sekundärrohstoff 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 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 Reserven verwendete Lithium-Menge auf einer im Jahr 2008 getätigten Schätzung mit den zu diesem Zeitpunkt gängigen Abbau- und Produktionsverfahren beruht.

Rechnet man jedoch mit den von (USGS, 2009) mit 14 Mio. t geschätzten Lithium-Ressourcen, so sind im Jahr 2050 bereits ca. 64 % der weltweit verfügbaren Lithium-Menge verbraucht.

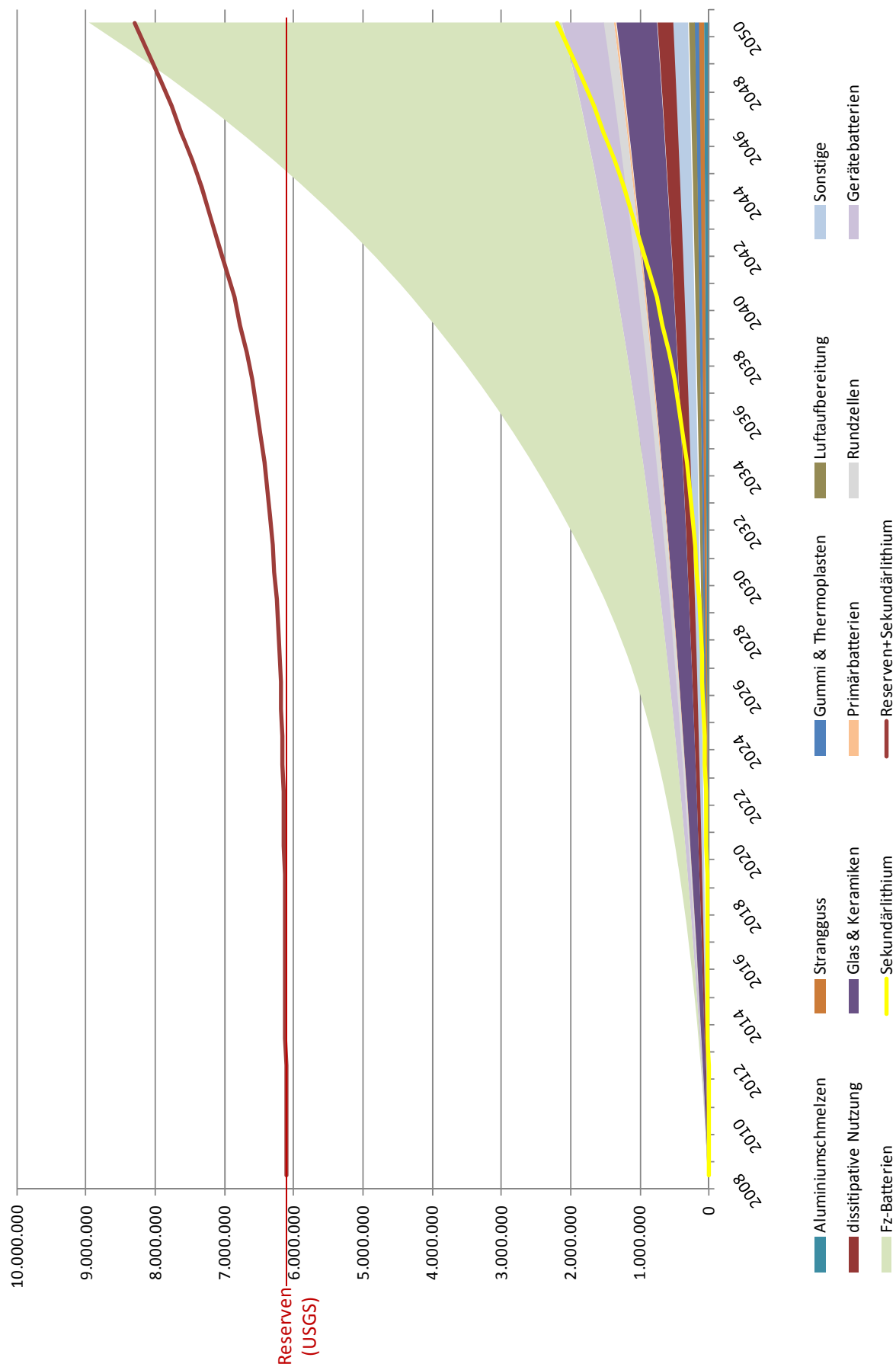


Abbildung 7-2 Verwendungsarten kumuliert [in t Li] - Dominanz



### 7.3 Szenarien-Vergleich

Die unterschiedlichen Grundannahmen der beiden verwendeten Szenarien wurden bereits in Kapitel 6.2.1 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 spielt 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. Gesamtwirtschaftlich gesehen kann dieser Schaden jedoch durch die neu entstehenden Batterie- bzw. Brennstoffzellen-Zulieferer bzw. -Hersteller aufgefangen werden. Setzt sich die Hybridisierung auch soweit in den Köpfen der Weltbevölkerung durch, dass sogar eventuelle Mehrkosten in der Anschaffung gebilligt werden – wie für das Dominanz-Szenario angenommen – so kann es zudem zu einem erhöhten Wachstum in der Elektromobilitätsbranche kommen: die herkömmlichen Fahrzeuge werden durch etwas teurere Hybride ausgetauscht und es wird somit mehr konsumiert, was der Wirtschaft zugutekommt.

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 umweltfreundlicher 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 Li-haltigen 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 CO<sub>2</sub>-, HC- und NO<sub>x</sub>-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 unausweichlich, langfristig nach Alternativen für die Lithium-Batterien zu suchen, wie besonders Abbildung 7-2 eindrucksvoll unterstreicht.

## 7.4 Sensitivitätsanalysen

Die oben dargestellten Ergebnisse werfen u.a. die Frage auf, wie sensibel sie auf eine Variation der getroffenen Annahmen reagieren. Im Folgenden wird dieser Frage nachgegangen indem einige Variablen variiert werden, deren Werte in Zukunft unterschiedliche Entwicklungen einschlagen könnten. Lassen sich auf diese Weise signifikante Ergebnisänderungen feststellen, können diese als Anregungen für die künftig anzustrebenden Ziele in Forschung bzw. Politik gesehen werden.

Als zu variierende Eingangsgrößen wurden folgende Variablen ausgewählt:

- die Lebensdauer der Fahrzeugbatterien
- die Batterie-Sammelquote
- die Recycling-Effizienz bei Batterien

Durch die großen Anstrengungen in der Entwicklung von Lithium-Batterien für die Elektromobilität kann davon ausgegangen werden, dass sich die Haltbarkeit der Fahrzeugbatterien in der Zukunft entscheidend verbessern wird. Aus diesem Grund wurde die Lebensdauer von Fz-Batterien in der Sensitivitätsanalyse ab dem Jahr 2025 um fünf Jahre verlängert. Es wurde angenommen, dass die Einführung der Batterien mit längerer Lebensdauer nicht allmählich stattfinden wird, sondern in vollem Umfang und bei allen neu zugelassenen Fahrzeugen. Die verbesserte Batterie-Technologie und die damit verbundenen Einsparungen werden von allen Herstellern genutzt und angenommen.

Für die Gewinnung von Sekundärlithium entscheidende Größen sind die Sammelquote sowie die Recyclingeffizienz. Die in den Basisannahmen mit 0,42 angenommene Sammelquote wurde ab dem

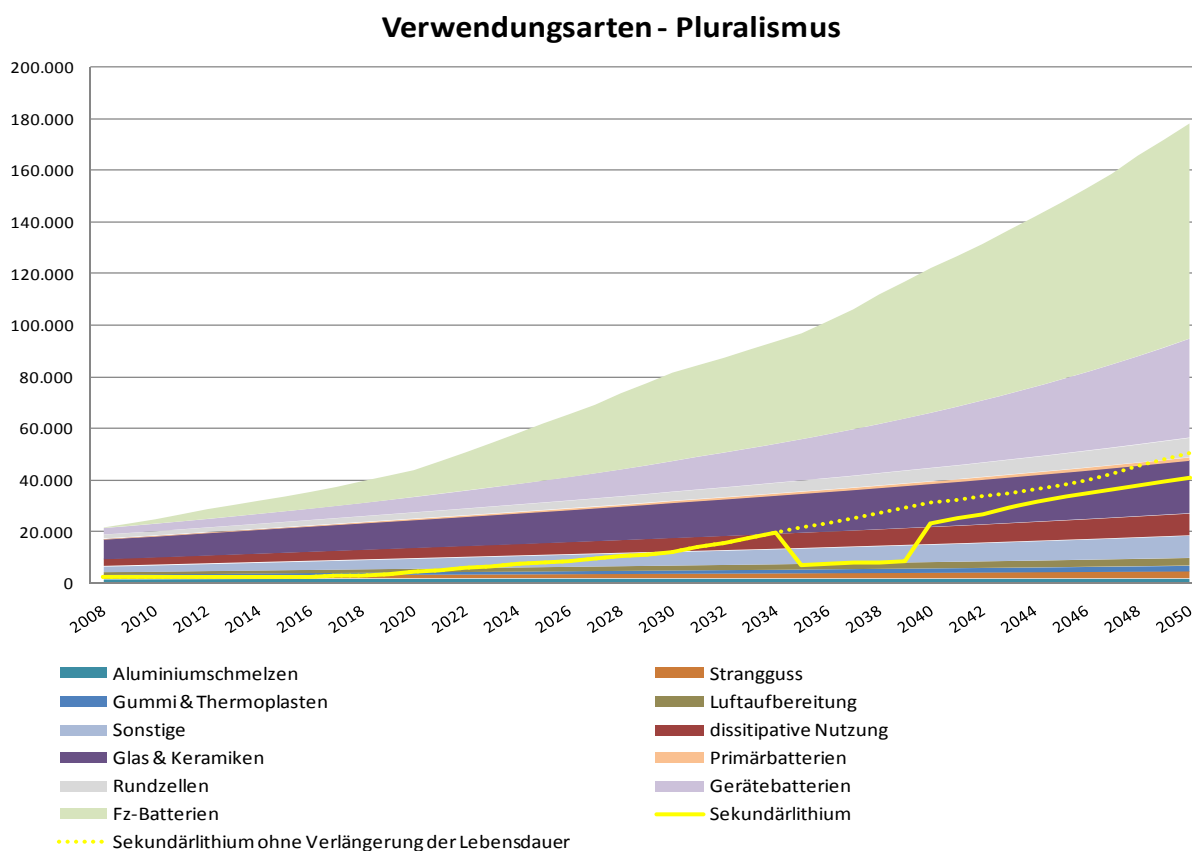
Jahr 2025 in Teilschritten sukzessive erhöht, um mit 0,60 im Jahr 2050 ein relativ hohes Niveau zu erreichen. Diese Entwicklung setzt allerdings große, weltweite politische Anstrengungen sowie das Erreichen eines generellen Umdenkens in der Weltbevölkerung im Bezug auf Müllentsorgung und Recycling voraus.

Die Recyclingeffizienz ist mit 0,85 bereits auf einem hohen Niveau. Durch Verbesserung der einzelnen Teilschritte und Optimierung ihrer Kombination könnte diese jedoch noch verbessert werden. So wurde hier ab dem Jahr 2025 eine Recyclingeffizienz von 0,95 angenommen.

Die Sensitivitätsanalysen werden erneut in beiden Szenarien getrennt durchgeführt und nacheinander dargestellt. Für die Analyse wurde jeweils nur eine der drei ausgewählten Variablen verändert um die Veränderungen in den Ergebnissen klar zuordnen zu können.

Zunächst soll das **Pluralismus-Szenario** betrachtet werden:

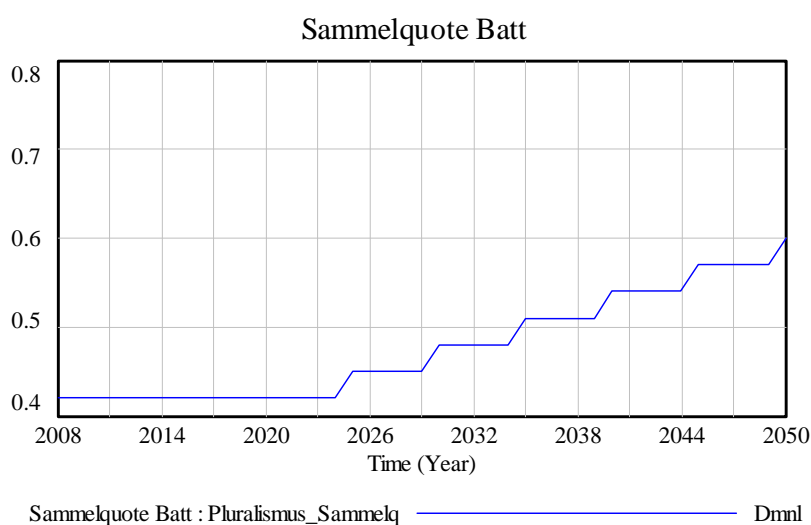
Verlängert man die Lebensdauer der Fahrzeugbatterien, so kann während des Zeitraumes, der der Verlängerung entspricht, kein Sekundärlithium durch Recycling aus Fz-Batterien gewonnen werden. In diesem Fall wäre dies dann der Zeitraum von 2035-2039, da die Lebensdauer in 2025 von 10 auf 15 Jahre angewachsen ist. Diese Veränderung ist, wie in Abbildung 7-3 zu sehen, als Delle in der Sekundärlithium-Kurve zu erkennen.



**Abbildung 7-3 Verbrauchsmengen bei verlängerter Lebensdauer [in t Li]**

Dies ist die Darstellung der jeweiligen Jahresverbräuche und der pro Jahr zurückgewonnenen Menge an Sekundärlithium. Die Sekundärlithium-Menge, die im Basis-Szenario gewonnen werden kann ist mit einer gestrichelten Linie dargestellt. In der kumulierten Darstellung von 2008-2050 ist die Delle nicht zu erkennen, allerdings sinkt die Menge des bis 2050 gesamt zurückgewonnenen Lithiums um ca. 162.000 t auf 584.000 t.

Zur Analyse der Auswirkungen einer steigenden Batterie-Sammelquote wurde diese, wie in Abbildung 7-4 zu sehen, schrittweise erhöht.



**Abbildung 7-4 Sukzessive Erhöhung der Batterie-Sammelquote [in %]**

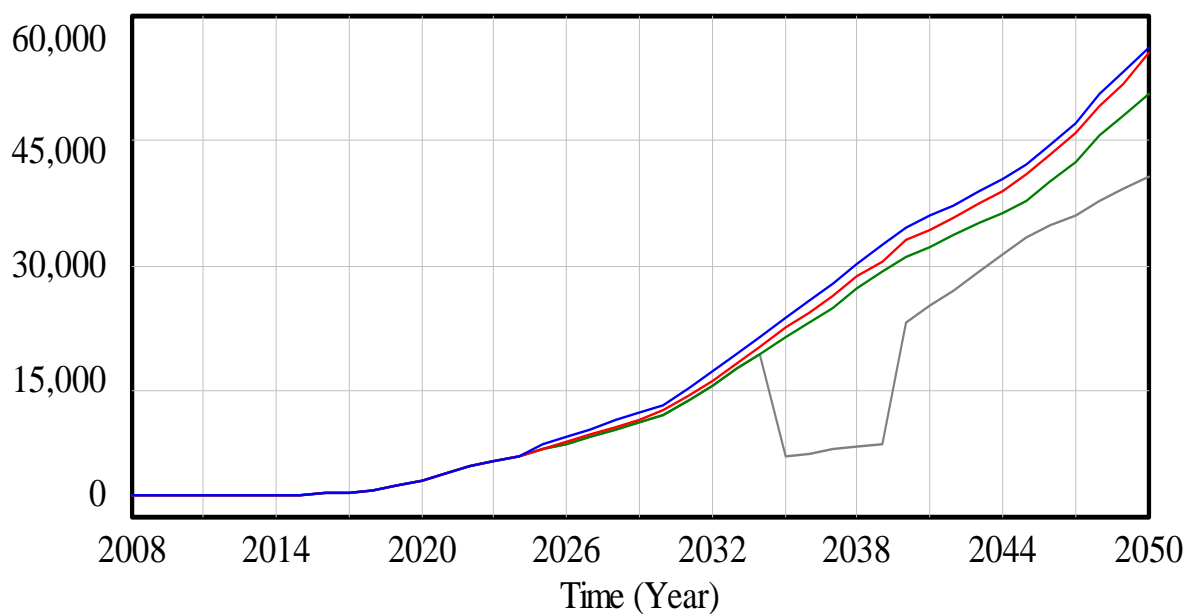
Durch diese Erhöhung ist eine deutliche Mengensteigerung beim Sekundärlithium festzustellen. Im Vergleich zur ursprünglichen Berechnung können in dieser Simulation bis zum Jahr 2050 mit insgesamt 789.000 t wiedergewonnenem Lithium ca. 43.600 t zusätzlich gewonnen werden. Dies entspricht ungefähr der doppelten Menge des insgesamt im Jahr 2008 verbrauchten Lithiums.

Erhöht sich die Recyclingeffizienz ab dem Jahr 2025 um 10 % auf 0,95 kann dadurch ebenso mehr Sekundärlithium gewonnen werden. Die bis 2050 zusätzlich gewonnene Menge ist in diesem Fall mit ca. 74.000 t beträchtlich. So könnte damit z.B. der gesamte Lithium-Bedarf für Strangguss oder Aluminiumschmelzen bis 2050 gedeckt werden.

Die aus Vensim importierte Abbildung 7-5 gibt einen Überblick über die verschiedenen Sensitivitätsanalysen im Pluralismus-Szenario. Dargestellt sind jeweils die pro Jahr unter den jeweiligen Annahmen gewonnenen Mengen an Sekundärlithium durch Recycling in Tonnen Lithium.

Durch die Erhöhung der Batterie-Recyclingeffizienz kann am meisten zusätzliches Sekundärlithium gewonnen werden. Eine Verlängerung der Fahrzeugbatterie-Lebensdauer hingegen führt zu weniger Lithium-Gewinn.

## Sekundärlithium

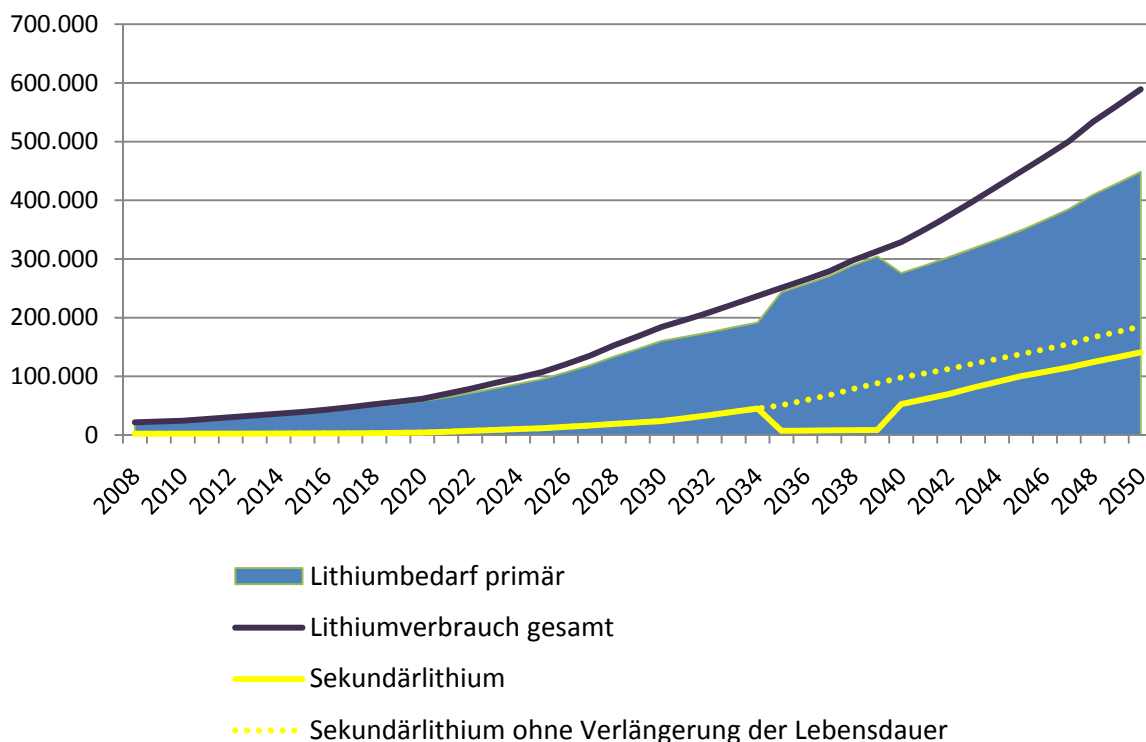


Sekundärlithium : Pluralismus\_Recyclingeff ————— t  
 Sekundärlithium : Pluralismus\_Sammelq ————— t  
 Sekundärlithium : Pluralismus ————— t  
 Sekundärlithium : Pluralismus\_Lebensdauer ————— t

**Abbildung 7-5 Gewonnenes Sekundärlithium pro Jahr [in t Li] - Pluralismus**

Im Anschluss werden oben durchgeführte Sensitivitätsanalysen im **Dominanz-Szenario** betrachtet: Verlängert man ab 2025 die Fahrzeugbatterie-Lebensdauer im Dominanz-Szenario um fünf Jahre, so ist erneut eine Delle im Sekundärlithium-Angebot zu erkennen. Die Gewinnung von Sekundärlithium aus den Fahrzeugbatterien wird um fünf Jahre ausgesetzt, da die Batterien ab 2025 genau um diesen Zeitraum länger genutzt werden können. Abbildung 7-6 zeigt, dass diese Diskrepanz im Lithium-Angebot durch zusätzliches Primärlithium gedeckt werden muss.

## Dominanz



**Abbildung 7-6 Lithium-Verbrauch und Primärbedarf bei verlängerter Lebensdauer [in t Li]**

Die gestrichelte „Basis-Sekundärlithium“-Linie zeigt, dass durch eine Lebensdauererlängerung bei Fahrzeugbatterien bis 2050 deutlich weniger Lithium durch das Recycling zurückgewonnen werden kann. Betrachtet man den gesamten Berechnungszeitraum von 2008-2050, so werden insgesamt ca. 763.000 t weniger Sekundärlithium wiedergewonnen. Diese Fehlmenge muss durch Primärlithium, d.h. durch eine Erhöhung der Abbaumengen, ausgeglichen werden.

Eine Erhöhung der Batterie-Sammelquote (analog zu Abbildung 7-4) hat im Dominanz-Szenario dieselben mengenmäßigen Auswirkungen wie im Pluralismus-Szenario. Da sich die beiden Szenarien lediglich in den Mengen der Lithium-Verbräuche für Fahrzeugbatterien unterscheiden, bringen Änderungen an Modellparametern, die die Fz-Batterien nicht betreffen, gleiche Ergebnisse für beiden Szenarien.

Erhöht man hingegen die Recyclingeffizienz, die für alle Batterie-Typen gleichermaßen verwendet wird, ab 2025 um 10 %, macht sich dies im Dominanz-Szenario deutlich bemerkbar. Insgesamt können auf diese Weise ca. 240.000 t an zusätzlichem Sekundärlithium gewonnen werden. Dies entspricht z.B. der Gesamtmengen an Lithium, das von 2008-2050 für die dissipative Nutzung verbraucht wird.

Abbildung 7-7 verdeutlicht die Auswirkungen der in den Sensitivitätsanalysen getätigten Änderungen. Wie im Pluralismus-Szenario bringt die Erhöhung der Recyclingeffizienz den größten Lithium-Gewinn, da auch im Dominanz-Szenario große Recyclingmengen von der Recyclingeffizienz-Quote betroffen sind. Die Verlängerung der Fz-Batterie-Lebensdauer führt zu einem wesentlich deutlicheren Einschnitt. Im Dominanz-Szenario gibt es eine größere Anzahl an Fahrzeugen, die Batterien benötigen, weswegen eine Lebensdauererlängerung zu stärkeren Einbußen in der Sekundärlithium-Gewinnung führt.

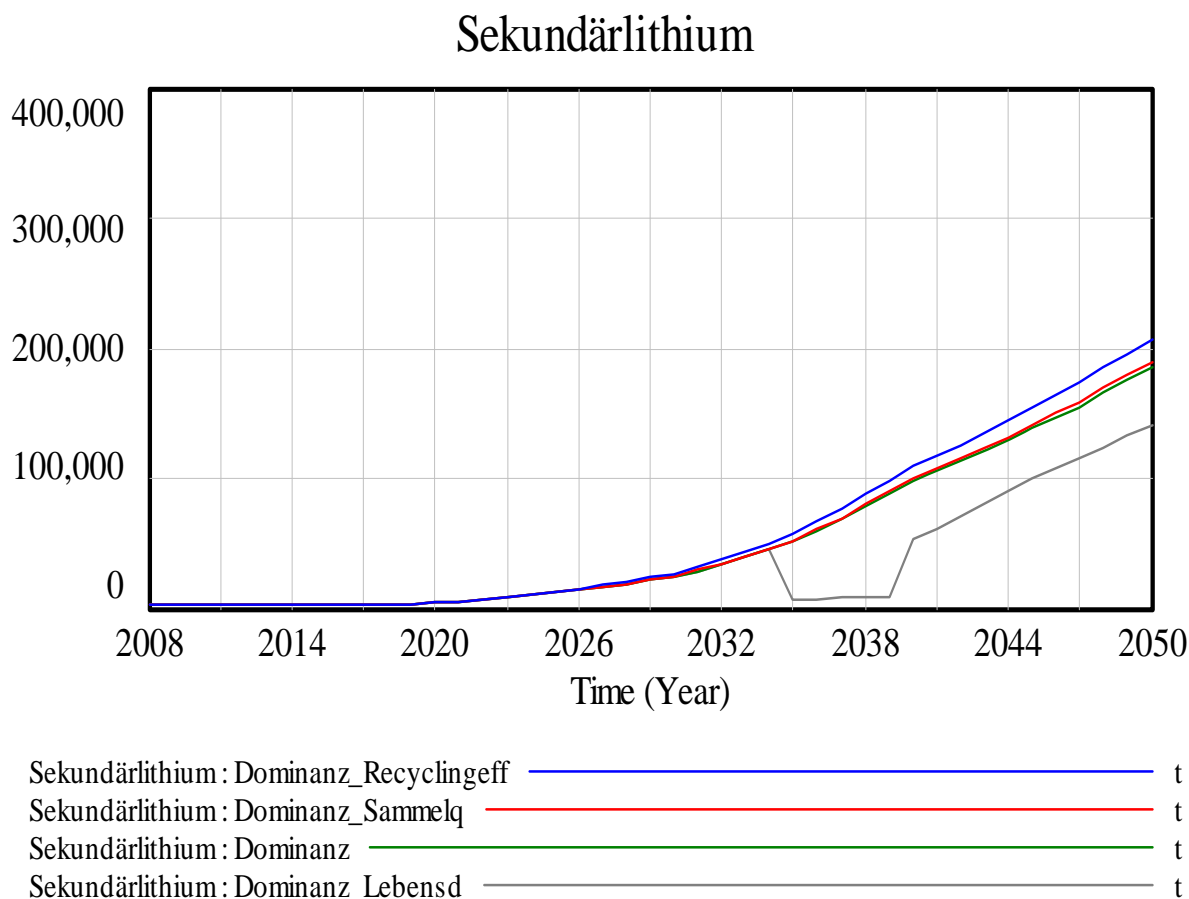


Abbildung 7-7 Gewonnenes Sekundärlithium pro Jahr [in t Li] – Dominanz

## 7.5 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 Li-Knappheit kommen wird und Evans einen Lithium-Überfluss beschreibt. 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-Mineralerz, -Solen, Abwässer aus Ölfeldern und Geothermie-Kraftwerken sowie Li-haltiger Lehm
- „Potentielle 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 Li-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: 1,4 kg

- 
- 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 konnten 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. Wurden in (Tahil, 06) 300 g/kWh angenommen, so waren es in (Meridian International Research, 2008) bereits 1,4 kg/kWh. Dies ist die doppelte bzw. nahezu zehnfache 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), wurde 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.

## **8 Zusammenfassung & Ausblick**

Zu Beginn dieser Arbeit wurden drei einleitende Fragen zur künftigen Entwicklung des Lithium-Verbrauchs, des Abnehmens der Lithium-Reserven 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 vorhandenen Reserven dar, da bis zu diesem Jahr lediglich 59 % der in 2008 als Reserven eingeschätzten Lithium-Menge verbraucht sein wird. Da in diesem Szenario weniger Fahrzeuge die Lithium-Batterien verwenden, spielt auch das durch Recycling dieser Batterien gewonnene Sekundärlithium eine kleinere Rolle und macht lediglich 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 vorhandenen Lithium-Reserven. 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 2040 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. Folglich muss das langfristige 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. das 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. Hierfür ist zudem zusätzlich eine hohe Rückgewinnungsquote des Sekundärlithiums, d.h. hohe Sammel- und Recyclingquoten sowie Recycling-Effizienzen, nötig.

Da die Lithium-Batterien allerdings zur Zeit als die Technologie mit dem meisten Potential 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:

Nahezu alle Fahrzeughersteller haben bereits mit der Entwicklung bzw. mit der Produktion von Hybrid-, Plug-In-Hybrid- und Elektrofahrzeugen begonnen. Diese Technologien zur Serienreife zu bringen und am Markt zu etablieren ist derzeit eines der Hauptziele der Automobilindustrie.

Ebenso wird die Einführung der Brennstoffzellenfahrzeuge spätestens bis zum Jahr 2018 erwartet. (Geschka & Partner, 2009)

Im Rahmen der Einführung der neuen Fahrzeuge steht zudem das Erstellen einer Infrastruktur zum Betanken/Laden der Fahrzeuge im Fokus der Industrie. Hierfür gibt es z.B. in Deutschland und Japan bereits Absichtserklärungen von Energie-, Automobil- und Infrastrukturfirmen, welche eine Zusammenarbeit beim (Um-)Bau von Tankstellen und der generellen Sicherstellung der Versorgung vorsieht. Im Rahmen dieses Infrastrukturaufbaus müssen auch Systeme entwickelt und installiert werden, die den schnellen Austausch von entladenen bzw. veralteten Batterien an Tankstellen bzw. in Werkstätten ermöglichen.

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 Li-Batterien zur Gewinnung von Sekundärlithium weltweit vorangetrieben und etabliert werden (siehe Kapitel 4.5 Künftige Entwicklung im Batterierecycling).

Die kurzfristigen politischen Ziele bestehen aus einer Reihe von Maßnahmen, welche die großflächige Einführung und die Akzeptanz der Elektromobilität erleichtern helfen. So sollten die Emissionsgesetze weiter verschärft werden und zusätzlich Anreize zum Kauf von (Plug-In-) Hybriden bzw. Elektrofahrzeugen geschaffen werden. Diese könnten aus geringeren Fahrzeugsteuern, staatlichen Zuschüssen beim Kauf in Form von Umweltprämien oder einer geringeren Besteuerung der Treibstoffe Strom bzw. Wasserstoff bestehen. Das Schaffen einer flächendeckenden Infrastruktur für strom- bzw. wasserstoffbetriebene Fahrzeuge muss, in Zusammenarbeit mit der Industrie, ein weiteres unmittelbares Ziel der politischen Anstrengungen sein. 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. Wie in den Sensitivitätsanalysen dargestellt, haben diese Quoten großen Einfluss auf die Sekundärlithium-Gewinnung. Um einen erhöhten Lithium-Abbau zu gewährleisten, muss es zu geopolitischer Einigkeit zwischen den Förder- und Abnehmerländern kommen. Gerade die derzeitigen politischen Spannungen zwischen den USA und Bolivien mit seinen großen Lithium-Vorkommen stehen hier im Fokus.

Um die ökologischen Auswirkungen des Wechsels zur Elektromobilität zu maximieren, sollte künftig zudem der weltweite Strommix zunehmend auf Erneuerbare bzw. CO<sub>2</sub>-neutrale Energien umgestellt werden.

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.

Diese Arbeit hat herausgestellt, dass es je nach angenommenem Marktpenetrationsszenario bereits vor dem Jahr 2050 zu einer Knappheit des für die Elektromobilität wichtigen Rohstoffes Lithium kommen kann. Weiterer Handlungs- bzw. Forschungsbedarf für Industrie, Politik und Wissenschaft ist vorhanden und wurde aufgezeigt.

## VI. Anhang

Tabelle VI-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 VI-2 Neuzulassungen 2008-2033

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
<b>PLURALISMUS</b>													
Anteil an Neuzulassungen [%]													
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	0,00029212	0,00034561	0,00040003	0,00045444	0,00050885	0,00063489	0,00076093	0,00088697	0,00101301	0,00113905
Summe	0,01095481	0,04963322	0,088332931	0,12814604	0,16796278	0,18077952	0,19359625	0,20641299	0,21236713	0,21832128	0,22427543	0,23022957	0,23618372
<b>DOMINANZ</b>													
Anteil an Neuzulassungen [%]													
HEV [1,4 kWh]	0,01049209	0,04149713	0,07250217	0,10350722	0,13451226	0,15441011	0,17430796	0,19420581	0,211105936	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
<b>PLURALISMUS</b>													
Anteil an Neuzulassungen [%]													
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
<b>DOMINANZ</b>													
Anteil an Neuzulassungen [%]													
HEV [1,4 kWh]	0,28126004	0,28404654	0,28683303	0,28961952	0,29240601	0,2958634	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	0,01242077	0,012625021	0,012825966
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 VI-3 Neuzulassungen 2034-2050

	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
<b>PLURALISMUS</b>									
Anteil an Neuzulassungen [%]									
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	0,07828832	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	0,42185777	0,43210029	0,43779037	0,44348046
<b>DOMINANZ</b>									
Anteil an Neuzulassungen [%]									
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
<b>PLURALISMUS</b>									
Anteil an Neuzulassungen [%]									
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	0,00551174	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	
<b>DOMINANZ</b>									
Anteil an Neuzulassungen [%]									
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	



---

## VII. 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](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](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.

Englhar, 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 Alttakkumulatoren 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](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<sub>0.2</sub>Ni<sub>0.8</sub>O<sub>2</sub> 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.

Saeki, e. a. (2004). Co-grinding LiCoO<sub>2</sub> 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/Erl%44uterung.pdf](http://www.grs-batterien.de/fileadmin/user_upload/Download/Recht/BattG_2009/Erl%44uterung.pdf)

Tahil, W. (Dezember 06). *the trouble with lithium*. Abgerufen am 05. 05 09 von [www.evworld.com/library/lithium\\_shortage.pdf](http://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)

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-original-teile.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.wbcSD.org/plugins/DocSearch/details.asp?type=DocDet&ObjectId=MTE0Njc>

Wietelmann, U., & Bauer, R. J. (2005). *Lithium and Lithium Compounds*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

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.