



Hochschule **RheinMain**  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



Für eine lebenswerte Zukunft

# WIEDERVERWENDUNG UND RECYCLING VON LITHIUM-IONEN-AKKUS

Projektarbeit der Hochschule RheinMain  
in Kooperation mit Prof. Dr. Thomas Schmid  
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Erstellt von:

Maro Atzorn  
Clara Gey  
Felix Leplow  
Martin Piayda

Eingereicht am: 16. März 2018

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
Abbildungsverzeichnis .....	3
Tabellenverzeichnis.....	4
Abkürzungsverzeichnis.....	5
1 Einleitung.....	6
2 Das Element Lithium.....	7
2.1 Lithiumvorkommen, Produktion & Marktsituation .....	7
2.2 Umweltauswirkungen der Lithiumförderung .....	9
2.3 Gewinnung von Lithium.....	10
2.3.1 Gewinnung von Lithium aus Salzlösungen .....	10
2.3.2 Gewinnung von Lithium aus dem Hartgestein Petalit .....	10
3 Aufbau und Zusammensetzung von Lithium-Ionen-Akkus.....	12
3.1 Primär- und Sekundärzellen .....	12
3.2 Aufbau und Funktion einer Lithiumzelle .....	12
3.3 Module und Batteriemanagementsystem.....	14
3.4 Zusammensetzung von Lithium-Batterien .....	14
3.5 Weitere kritische Bestandteile von Lithium-Ionen-Akkus .....	16
3.5.1 Gewinnung von Mangan .....	16
3.5.2 Gewinnung von Nickel.....	16
3.5.3 Gewinnung von Kobalt .....	17
3.6 Rücknahme und Entsorgung.....	19
4 Einsatzgebiete von Lithium-Ionen-Akkus in der Elektromobilität .....	20
5 Second Life-Anwendungen für Lithium-Ionen-Akkus .....	21
5.1 Einführung in Second Life-Konzepte.....	21
5.2 Ablauf des Second Life.....	22
5.3 Second Life-Anwendungsfelder.....	24
5.4 Ökologische und ökonomische Bewertung .....	27
5.5 Zentrale Standortwahl.....	28
5.6 Fazit und Ausblick zu Second Life-Anwendungen.....	29
6 Recycling von Lithium-Ionen-Akkus.....	32
6.1 Stand der Technik.....	32
6.1.1 Demontage .....	32
6.1.2 Mechanische Aufbereitung .....	33
6.1.3 Pyrometallurgischer Prozess .....	33

6.1.4	Hydrometallurgische Prozesse .....	34
6.2	Verfahrensansätze .....	34
6.2.1	Umicore .....	34
6.2.2	Retriev Technologies .....	35
6.2.3	EcoBatRec .....	35
6.2.4	LithoRec .....	35
6.3	Infrastruktur .....	36
6.4	Modell zur Abschätzung des Altbatterieaufkommens .....	37
6.4.1	Szenario Pessimistisch .....	37
6.4.2	Szenario Politisch .....	38
6.4.3	Szenario Realistisch .....	38
6.5	Wirtschaftlichkeit des Recyclingverfahrens .....	38
6.6	Kapazitätsstärkste Lithium-Ionen-Behandlungsanlagen .....	40
6.7	Fazit zum Recyclingverfahren .....	42
7	CO <sub>2</sub> -Bilanzierung .....	43
7.1	CO <sub>2</sub> -Bilanz von Elektrofahrzeugen .....	43
7.2	CO <sub>2</sub> -Einsparpotential durch Recycling .....	45
8	Ausblick .....	48
8.1	Globale Nachfrage an Elektrofahrzeugen .....	48
8.2	Rohstoffe .....	49
9	Fazit .....	53
	Literaturverzeichnis .....	55

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anteil der weltweiten Verwendung von Lithium zur Herstellung von verschiedenen Produkten (erstellt nach (Jaskula, 2016)).....	7
Abbildung 2: Darstellung der weltweiten Ressourcen und Reserven von Lithium auf Basis der Daten des USGS Mineral Commodity Summaries Reportes im Jahr 2016 in Tonnen (McDowell, 2016) ..	8
Abbildung 3: SEM-Aufnahme von $\alpha$ -Spodumen (links) und $\beta$ -Spodumen (rechts) (Dorfner Analysenzentrum und Anlagenplanungsgesellschaft mbH).....	11
Abbildung 4: Aufbau und Funktion einer Lithium-Ionen-Zelle beim Entladungsvorgang (Rahimzei, Sann & Vogel, 2015, S. 3) .....	13
Abbildung 5: Beurteilung von NCA (Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid) als Kathodenmaterial anhand der Kriterien Sicherheit, spezifische Energie, spezifische Leistung, Lebensdauer, Kosten und Schnellladbarkeit (Korthauer, 2013, S. 42) .....	15
Abbildung 6: Entwicklung der Bergwerksförderung zwischen 2005 und 2015 (Al Barazi et al., 2017, S. 3) .....	17
Abbildung 7: Preisentwicklung der Monatsdurchschnittspreise für Kobalt (min. 99,8 %, free market) zwischen 1967 und Februar 2017 (Al Barazi et al., 2017, S. 5).....	18
Abbildung 8: Batterie-Lebenszeit-Modell der P3 Energy and Storage GmbH (P3 Energy and Storage GmbH; Westfälische Wilhelms-Universität Münster Institut für Wirtschaftsinformatik).....	22
Abbildung 9: Ablauf, Klassifizierung und Entscheidungsfindung auf dem Weg zum Second Life (Canals Casals, Amante García & Cremades, 2017, S. 272) .....	24
Abbildung 10: Kreislaufmodell für Akkus auf der E-Mobilität mit möglichen SL-Anwendungsfeldern (Canals Casals, Amante García & Cremades, 2017, S. 278).....	25
Abbildung 11: Einfluss jedes Rechenparameters für die Standortberechnung einer zentralen SL-Umrüstungsanlage. Die Punkte zeigen die Masse-Zentren der individuellen Parameter der Berechnung (Canals Casals, Amante García & Cremades, 2017, S. 249).....	29
Abbildung 12: SWOT-Analyse zu Second Life-Konzepten [erstellt auf Grundlage der Abbildung zur SWOT-Analyse von Fischhaber et al. (2016) S. 20] .....	30
Abbildung 13: Allgemeines Schema zur Demontage von Batteriesystemen, frei nach Abbildung B-10 (Kwade & Bärwaldt, 2012, S. 89).....	33
Abbildung 14: Generische Struktur eines Recyclingnetzwerkes, Abbildung 2.13 (Hoyer, 2015, S. 57) 34	
Abbildung 15: Konzept des Modells zur Abschätzung des Altbatterieaufkommens, frei nach Abbildung A-1, (Kwade & Bärwaldt, 2012, S. 10) .....	37
Abbildung 16: Gewinnschwellendiagramm des Gesamtprozesses für gemischtes Aufkommen, Abbildung E-17 (Kwade & Bärwaldt, 2012, S. 227) .....	39
Abbildung 17: Zeitbezogene Gewinnschwellen der Einzelprozesse in Abhängigkeit der Szenarien zum Altbatterieaufkommen, Abbildung E-20 (Kwade & Bärwaldt, 2012, S. 231).....	40

Abbildung 18: Übersicht über die kapazitätsstärksten Li-Ion-Behandlungsanlagen innerhalb der EU (Stand 2013) (Weyhe, 2013, S. 520).....	41
Abbildung 19: Stromverbrauch und CO <sub>2</sub> -Emissionen der Stromerzeugung seit 1990 in Deutschland, frei nach (Icha & Kuhs, 2017) .....	44
Abbildung 20: Treibhausgasemissionen der betrachteten Fahrzeugkonzepte unter heute durchschnittlichen Bedingungen in Deutschland (Lebensfahrleistung 168.000 km; Windstrom (gestreifter grüner Bereich) bzw. deutscher Erzeugungsmix 2012 (gesamter grüner Bereich)). In Klammern wird die Reichweite der Elektromotoren angegeben (Helms et al., 2016, S. 79).....	45
Abbildung 21: Einsparpotential von Treibhausgasemissionen durch das Recyclingverfahren EcoBatRec. (Buchert & Sutter, EcoBatRec 2016, S. 28).....	46
Abbildung 22: Einsparpotential von Treibhausgasemissionen durch das Recyclingverfahren „LithioRec II“ (Buchert & Sutter, LithioRec II, 2016, S. 29) .....	47
Abbildung 23: Jährliche Verkäufe (links) und Bestand (rechts) von Pkws nach dem 2DS-Szenario (Millionen Fahrzeuge) (Buchert, Degreif, & Dolega, 2017, S. 14) .....	49
Abbildung 24: Globaler Graphitbedarf in Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge 2015, 2030, 2050 in den Szenarien 2DS und 4DS und Sekundärmaterialpotenziale (in Tonnen) (Buchert, Degreif, & Dolega, 2017, S. 31) .....	50
Abbildung 25: Globaler Lithiumbedarf in Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge 2015, 2030, 2050 in den Szenarien 2DS und 4DS und Sekundärmaterialpotenziale (in Tonnen) (Buchert, Degreif, & Dolega, 2017, S. 26) .....	50
Abbildung 26: Globaler Nickelbedarf in Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge 2015, 2030, 2050 in den Szenarien 2DS und 4DS und Sekundärmaterialpotenziale (in Tonnen) (Buchert, Degreif, & Dolega, 2017, S. 30) .....	51
Abbildung 27:: Globaler Kobaltbedarf in Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge 2015, 2030, 2050 in den Szenarien 2DS und 4DS und Sekundärmaterialpotenziale (in Tonnen) (Buchert, Degreif, & Dolega, 2017, S. 28) .....	51

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Minenproduktion von Lithium in den Jahren 2014 und 2015 bezüglich ihrer Länder mit Angabe der geschätzten Reserven (Jaskula, 2016) .....	9
Tabelle 2: Prozentuale Zusammensetzung von Batterien mit einer Lithium-Magnesium-Oxid Kathode für HEVs (hybrid electric vehicles), PHEVs (plug-in hybrid electric vehicles) und BEVs (battery electric vehicles) nach (Dunn et al. 2012) .....	15

## Abkürzungsverzeichnis

2DS	2-Grad-Szenario
4DS	4-Grad-Szenario
BEV	Battery Electric Vehicle
BMS	Batteriemanagementsystem
E-Mobilität	Elektromobilität
EE	Erneuerbare Energien
EF	Elektrofahrzeug
EoL	End of Life
FL	First Life
GWP	Treibhauspotential
HEV	Hybrid Electric Vehicle
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle
LIA	Lithium-Ionen-Akku
NCA	Nickel-Kobalt-Aluminium
NMC	Nickel-Mangan-Kobalt
OEM	Original Equipment Manufacturer
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
REEV	Range Extended Electric Vehicle
SL	Second Life
SoH	State of Health
THG	Treibhausgas

# 1 Einleitung

„Die Elektroautos rollen an“ (Stepan, 2008).

So lautet ein Artikel der Frankfurter Allgemeinen Zeitung, der am 03.05.2008 erschienen ist. Die Idee des elektronischen Antriebs von Fahrzeugen besteht schon lange, doch bis die Entwicklung so weit gereift ist, dass sich diese eigenständig am Weltmarkt behaupten können, wird noch einige Zeit vergehen.

Die Forschung und Einführung von Elektrofahrzeugen (EF) wird dabei maßgeblich von der Politik unterstützt. Hintergrund ist hierbei der globale Klimawandel, der durch den Einsatz alternativer Antriebsformen verlangsamt werden soll. Insbesondere die Verbrennung von fossilen Energieträgern, wie Kohle und Erdöl, sind bedeutende anthropogene Quellen für CO<sub>2</sub>-Emissionen, eines der wichtigsten Treibhausgase. Neben den Sektoren der Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung, sowie der Industrie, trägt vor allem der Transportsektor mit über einer Milliarde Fahrzeugen weltweit einen bedeutenden Teil zu den globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei. Um diesen Einfluss zu minimieren, soll in Zukunft die Elektromobilität (E-Mobilität) ausgeweitet werden.

Eine wesentliche Grenze ist hierbei der eingesetzte chemische Energiespeicher, der Lithium-Ionen-Akkumulator (LIA). Von den Eigenschaften eines LIAs (u. a. Ladeverhalten, Kapazität, Gewicht) hängen die Etablierung und die Akzeptanz des EFs maßgeblich ab. Die Wirtschaftlichkeit des LIAs beruht dabei auf seiner Verfügbarkeit, dem Herstellungsprozess, möglichen Einsatzgebieten, weiteren Verwendungsmöglichkeiten und den Kosten für Recycling und Entsorgung. LIAs verlieren durch wiederholte Ladevorgänge an Kapazität und sind daher in EF nicht unbegrenzt einsetzbar. Um den Lebenszyklus von LIAs optimal auszunutzen, sind Anwendungen im Bereich des Second Life, vor allem als Energiespeicher, für Erneuerbare Energien (EE) möglich.

Der erste Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit dem Element Lithium, da es einer der Grundbausteine für LIAs ist. Neben den weltweiten natürlichen Vorkommen werden außerdem der Herstellungsprozess und die damit einhergehenden Umweltauswirkungen dargestellt. Anschließend werden der Aufbau und die Funktion von LIAs aufgezeigt, auf kritische Bestandteile des LIAs eingegangen und wichtige gesetzliche Regelungen erläutert. Im zweiten Teil wird das Konzept von LIAs in Second Life-Anwendungen erklärt. Hier werden mögliche Anwendungsfelder genannt und eine ökologische und ökonomische Bewertung vorgenommen. Im Anschluss daran wird auf das Recycling von LIAs eingegangen. Neben dem aktuellen Stand der Technik werden hier neue und fortschrittliche Verfahrenstechniken zum Recycling vorgestellt und diskutiert. Das zukünftige Altbatterieaufkommen wird in drei verschiedenen Szenarien abgeschätzt. Der letzte Teil beschäftigt sich mit der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung von LIAs. Für die Produktion der Akkumulatoren, den Transport, das Wiederaufladen sowie das Recycling wird Energie benötigt. Da diese Energie aus einem „Strommix“ und nicht ausschließlich aus erneuerbaren Energiequellen stammt, sollen die dabei entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen bilanziert werden. Zuletzt wird ein Ausblick über die zukünftige Marktentwicklung der Rohstoffe Graphit, Lithium, Nickel und Kobalt gegeben, da sie entscheidende Rollen als Komponente in LIAs übernehmen. Zum Abschluss werden die wichtigsten Punkte in einem Fazit zusammengefasst.

## 2 Das Element Lithium

Lithium gehört zu der Gruppe der Alkalimetalle und befindet sich daher zusammen mit Natrium (Na), Kalium (K), Rubidium (Rb), Cäsium (Cs) und Francium (Fr) in der ersten Hauptgruppe des Periodensystems der Elemente. Das Element wurde erstmals 1817 von J. A. Arfvedson in einer Gesteinsart namens Petalit entdeckt. Daher kommt sein Name: lithos (griech.) = Stein. Es handelt sich dabei um ein silberweißes, weiches Metall mit einer Dichte von  $0,534 \text{ g/cm}^3$  und einem Schmelzpunkt von  $180,54 \text{ °C}$ . Es ist das leichteste aller festen Elemente und reagiert meist unter starker Wärmeentwicklung mit anderen Hauptgruppenelementen sowie einer Reihe von Nebengruppenelementen. Aufgrund seines stark negativen Potentials ( $\varphi_0 = -3,045 \text{ V}$ ) und seinem geringen Gewicht eignet es sich besonders gut als Komponente für mobile Akkumulatoren, da sich so hohe Energiedichten erreichen lassen. (Wiberg & Holleman, 2007)

Abbildung 1 basiert auf den Daten der „USGS Mineral Commodity Summaries“ (Jaskula, 2016) und gibt einen Überblick über die weltweite Verwendung von Lithium zur Herstellung verschiedener Endprodukte im Jahr 2015. Der größte Anteil an Lithium von 35 % wird mittlerweile für Batterien eingesetzt, gefolgt von 32 % in der Glas- und Keramikproduktion. Schmierfette verbrauchen 9 % des weltweiten Lithiums, während die Sektoren der Luftaufbereitung und des Stranggusses jeweils 5 % in Anspruch nehmen. 4 % des Lithiums gehen in die Polymerproduktion ein und 1 % in die primäre Herstellung von Aluminium. Die verbleibenden 9 % finden andere Verwendungen (u. a. Pharmazeutika).

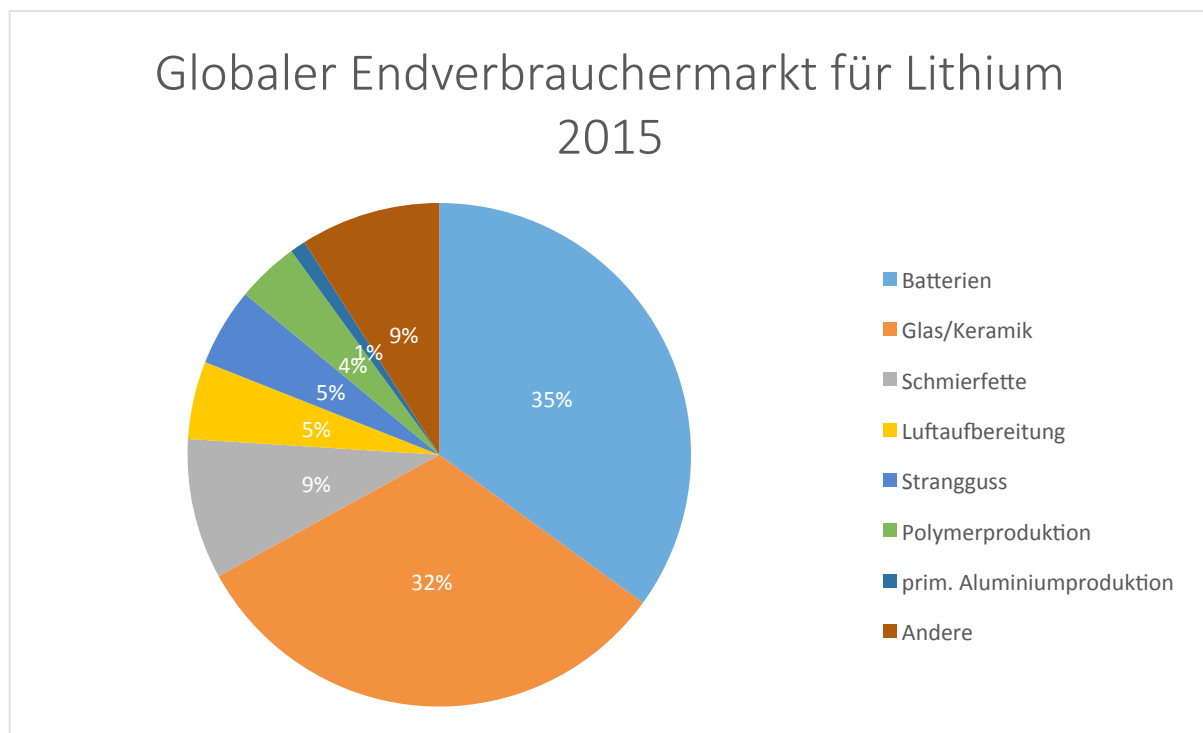


Abbildung 1: Anteil der weltweiten Verwendung von Lithium zur Herstellung von verschiedenen Produkten (erstellt nach (Jaskula, 2016))

### 2.1 Lithiumvorkommen, Produktion & Marktsituation

- Lithiumvorkommen: Lithium kommt mit  $2 \cdot 10^{-3}$  Gewichtsprozent als Anteil der Erdrinde (einschließlich Luft- und Wasserhülle) vor. Dieser Anteil scheint gering, ist damit aber höher als die weithin bekannteren Metalle Zinn und Blei. In gebundenem Zustand ist es meist nur in sehr geringen Konzentrationen als Begleiter von Natrium und Kalium in silicathaltigen Gesteinen anzutref-



fen. Wichtige Lithiumminerale kommen dabei als Phosphate (Amblygonit, Triphylin) und Silicate (Spodumen, Lepidolith und Petalit) vor. Darüber hinaus ist es als Li<sup>+</sup>-Ion in Salzseen zu finden. (Wiberg & Holleman, 2007)

Abbildung 2 gibt einen Überblick über die weltweit geschätzten Ressourcen und Reserven von Lithium im Jahr 2016. Ressourcen sind Vorkommen, die zum Erfassungszeitpunkt mit dem aktuellen Stand der Technik wirtschaftlich abbaubar sind. Reserven bezeichnen hingegen nachgewiesene Vorkommen, die im Gegensatz dazu noch nicht wirtschaftlich gefördert werden können. Während die Reserven auf 14 Mio. Tonnen geschätzt werden, belaufen sich die Ressourcen auf rund 40,7 Mio. Tonnen (Jaskula, 2016).

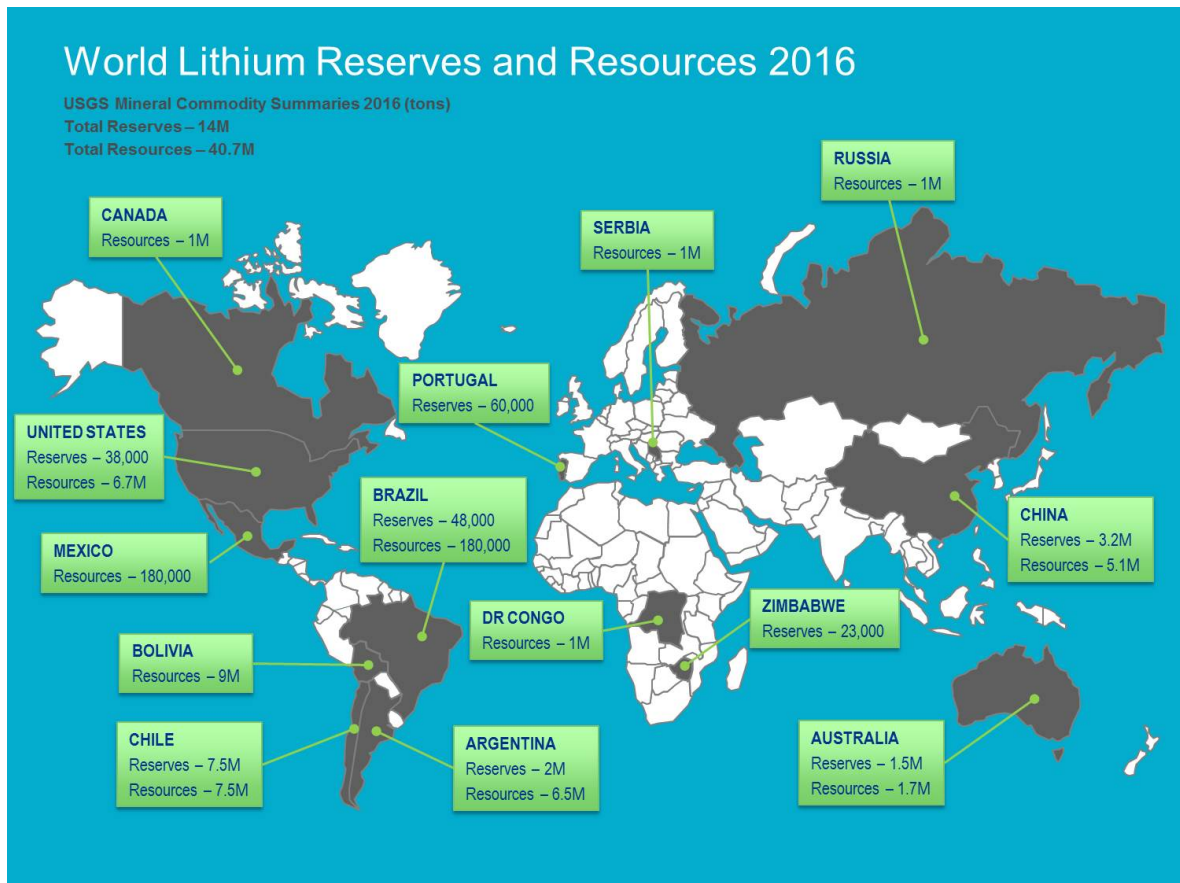


Abbildung 2: Darstellung der weltweiten Ressourcen und Reserven von Lithium auf Basis der Daten des USGS Mineral Commodity Summaries Reportes im Jahr 2016 in Tonnen (McDowell, 2016)

Obwohl Lithium in den verschiedensten Ländern in Form von Ressourcen vorliegt, wird es nur in wenigen Ländern abgebaut. Die Wirtschaftlichkeit der Lithiumgewinnung hängt neben dem erreichbaren Marktpreis im Verhältnis zu den Herstellungskosten meist davon ab, in welcher natürlichen Form (Lake, Pegmatit-Gestein oder Sedimentgestein) und in welcher Konzentration das Lithium vorkommt. Besonders interessant sind die einfacher abzubauenen Salzseen in Bolivien, Argentinien, Chile und China. Eine detaillierte Auflistung von verschiedenen Vorkommen in unterschiedlichen Ländern und den jeweiligen Lithiumkonzentrationen kann in (Gruber et al., 2011) eingesehen werden. Zusätzlich müssen äußere Faktoren, wie die politische Stabilität des Landes und die bestehende Infrastruktur berücksichtigt werden.

- Produktion: Tabelle 1 stellt die verschiedenen Minenproduktionen in den Jahren 2014 und 2015 für Lithium dar. Hauptlieferanten sind insbesondere Australien und Chile, mit mehr als 10.000 Tonnen/Jahr. Argentinien und China folgen mit 2.000-3.000 Tonnen/Jahr. Die verbleibenden Län-

der Brasilien, Portugal und Zimbabwe kommen auf eine jährliche Produktion von mehreren 100 Tonnen/Jahr. Angaben über die Produktion von Lithium in den USA werden nicht gemacht. (Jaskula, 2016)

**Tabelle 1: Minenproduktion von Lithium in den Jahren 2014 und 2015 bezüglich ihrer Länder mit Angabe der geschätzten Reserven (Jaskula, 2016)**

	Minenproduktion in [t]		Reserven [t]
	2014	2015	
<b>Argentinien</b>	3.200	3.800	2.000.000
<b>Australien</b>	13.300	13.400	1.500.000
<b>Brasilien</b>	160	160	48.000
<b>Chile</b>	11.500	11.700	7.500.000
<b>China</b>	2.300	2.200	3.200.000
<b>Portugal</b>	300	300	60.000
<b>USA</b>	k. A.	k. A.	38.000
<b>Zimbabwe</b>	900	900	23.000
<b>Weltweit (gerundet)</b>	31.700	32.500	14.000.000

- **Marktsituation:** Die Lithiumproduktion hat von 2014 nach 2015 leicht zugenommen, was hauptsächlich auf die verstärkte Nachfrage für Lithiumbatterien zurückzuführen ist. Während die Produktion in Australien und Chile nur leicht zugenommen hat, verzeichnet Argentinien ein Wachstum von etwa 15 %. Die Hauptproduzenten von Lithium gehen für das Jahr 2015 von einer steigenden Nachfrage von 5 % aus. Durch die erhöhte Nachfrage ist der Preis für Lithiumcarbonat im Jahr 2015 rund 10-15 % höher als im Vorjahr. (Jaskula, 2016)

## 2.2 Umweltauswirkungen der Lithiumförderung

Wie jeder Bergbaubetrieb haben auch der Abbau und die Gewinnung von Lithium Auswirkungen auf die Umwelt. In Industrieländern wie Australien und Portugal wird auf hochwertige Materialien zum Bau und zur Förderung zurückgegriffen. Des Weiteren gelten hier meist strenge gesetzliche Regelungen, die Umweltauswirkungen minimieren sollen. Problematisch ist insbesondere die Lithiumförderung in Südamerika. Die hier verwendeten Solarteiche zum Einengen der Salzlake werden meist mit günstigem, toxischem PVC Material von der Umgebung abgegrenzt. Leckagen führen zum Versickern der Chemikalien in das Grundwasser und kontaminieren die Umgebung. In Chile werden rund zwei Drittel des Trinkwassers der niederschlagsarmen Region für die Lithiumförderung verwendet. Dies hat ein Absinken des Grundwasserspiegels und damit auch erhebliche Auswirkungen auf das dortige Ökosystem und die vorhandene Biodiversität zur Folge (Cheringo Wagner, 2011). Die Regionen im Norden Tibets und um den Salzsee Salar De Uyuni in Bolivien sind ebenfalls niederschlagsarme Gebiete in denen große Wassermengen zur Lithiumförderung verbraucht werden. In Südamerika wird Lithium unter anderem noch von Hand abgebaut. Die dabei entstehenden Stäube führen bei Menschen und Tieren zur Reizung der Atemwege. Bei anhaltendem Kontakt können sich Lungenödeme bilden. (Lithium Mining and Environmental Impact)

Bei der Lithiumgewinnung aus Erzen ist vor allem der Energieverbrauch für den Herstellungsprozess zu berücksichtigen. Durch den Abbau der Erze kommt es zu Landschaftsveränderungen, die Auswirkungen auf grundwassertragende Schichten haben können. Die zum Herauslösen verwendeten Che-

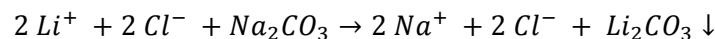
mikalien sind meist hoch toxisch und müssen daher in geschlossenen Kreisläufen geführt oder fachgerecht entsorgt werden. (Cheringo Wagner, 2011)

## 2.3 Gewinnung von Lithium

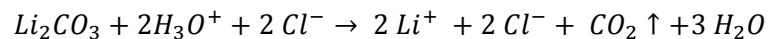
Lithium kann entweder aus einer Salzlake oder aus Hartgesteinen, wie Petalit gewonnen werden. Sedimentgesteine werden im industriellen Maßstab nicht zu Lithiumgewinnung verwendet. Je nach Produktionsstätte und Abnehmer wird das Lithium zu Lithiumcarbonat, Lithiumchlorid oder Lithiumhydroxid aufbereitet. Durch Elektrolyse lassen sich diese Produkte dann auch zu elementarem Lithium aufbereiten.

### 2.3.1 Gewinnung von Lithium aus Salzlösungen

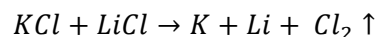
Die lithiumchloridhaltige Salzlösung, die aus Salzseen gewonnen wird, wird mit den darin enthaltenen Störstoffen in große, flache Becken gepumpt und durch natürliche Verdunstung aufkonzentriert. Die Aufenthaltszeiten in den Becken sind abhängig von der Konzentration der Ausgangslake, der Sonneneinstrahlung und der Niederschlagsmenge. Typisch sind 12-18 Monate (Talens Peiró, Villalba Méndez, & Ayres, 2013). Überschreitet der Lithiumgehalt der Lösung 0,5 %, wird Natriumcarbonat (Soda =  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) hinzugegeben. Pro hergestellte Tonne Lithiumcarbonat werden ungefähr 1,8 Tonnen Natriumcarbonat benötigt. Durch das geringere Löslichkeitsprodukt von Lithiumcarbonat fällt dieses aus:



Das Lithiumcarbonat wird abgetrennt und im nächsten Schritt mit Salzsäure umgesetzt. Es entsteht gelöstes Lithiumchlorid und gasförmiges Kohlendioxid:



Die Lösung wird nun durch einen Vakuumverdampfer eingeeengt, bis das Chlorid ausfällt. Wegen der starken Korrosionseigenschaften der Salzsäure muss dies in speziellen Stahl- oder Nickeltanks durchgeführt werden. Das metallische Lithium kann im Anschluss großtechnisch durch eine Schmelzflusselektrolyse aus den Verbindungen Kaliumchlorid und Lithiumchlorid (jeweils 45-55 %), bei einer Temperatur von 400-460 °C, gewonnen werden (Wiberg & Holleman, 2007; Bertau, Müller, Fröhlich, & Katzberg, 2013):



### 2.3.2 Gewinnung von Lithium aus dem Hartgestein Petalit

Lithium kommt in rund 145 verschiedenen Gesteinsarten vor. Extrahiert wird es aber nur aus Spodumene, Petalit, Lepidolit, Amblygonit und Eucryptit. Durch das geschickte Ausnutzen der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Lithium kann dieses aus den Gesteinen herausgetrennt werden. Im Folgenden soll ein Verfahren beschrieben werden, bei dem Lithium aus dem Spodumene-Gestein, welches ungefähr 8,0 %  $\text{Li}_2\text{O}$  enthält, abgetrennt werden kann.

Das Ursprungsgestein wird im ersten Schritt zerkleinert. Im Anschluss wird ein Flotationsverfahren genutzt um möglichst viel der darin enthaltenen Spodumene, ein Lithiumaluminium-Silikat ( $\text{LiAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ ) von den restlichen Bestandteilen abzutrennen. Da eine vollständige Abtrennung ohne Störstoffe in diesem Teilschritt nicht wirtschaftlich ist, wird für die großtechnische Herstellung ein Mindestanteil von 75 % Spodumene in der Fraktion angestrebt. Der nächste Prozessschritt besteht im Rösten der Fraktion bei 1050-1100 °C, wodurch ein Großteil der Herstellungskosten ent-

steht. Je nach Zusammensetzung des Erzes muss der Röstprozess angepasst werden, da einige Erze bei höheren Temperaturen das Lithium in unlösliche Glasphasen einschließen. Das Rösten führt zu einer Transformation von  $\alpha$ -Spodumene zu  $\beta$ -Spodumene. Die Struktur expandiert dabei um etwa 25 %, was zu einer Dichteverringering von  $3,1 \text{ g/cm}^3$  ( $\alpha$ -Spodumene) zu  $2,4 \text{ g/cm}^3$  ( $\beta$ -Spodumene) führt (vgl. Abbildung 3). (Dorfner Analysenzentrum und Anlagenplanungsgesellschaft mbH)

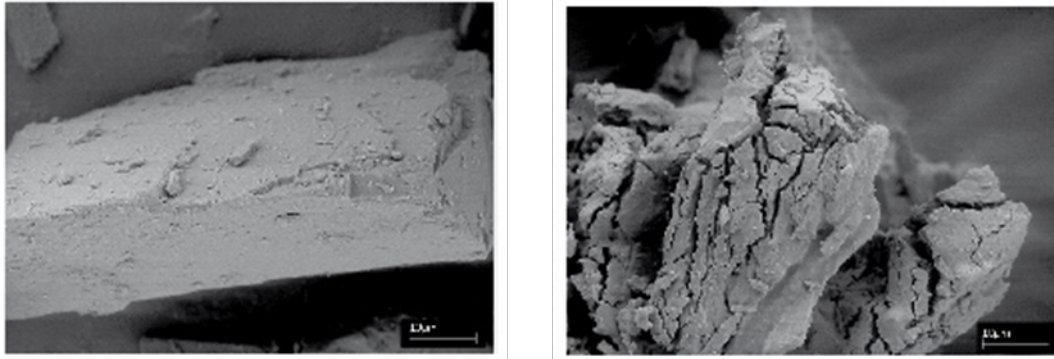
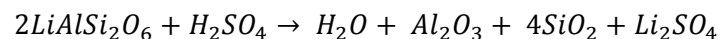


Abbildung 3: SEM-Aufnahme von  $\alpha$ -Spodumen (links) und  $\beta$ -Spodumen (rechts) (Dorfner Analysenzentrum und Anlagenplanungsgesellschaft mbH)

Im nächsten Prozessschritt wird das  $\beta$ -Spodumene mit hochprozentiger Schwefelsäure, Natriumcarbonat oder Kalziumhydroxid umgesetzt. Das häufigste großtechnische Verfahren zur Konvertierung von  $\beta$ -Spodumene ist der sogenannte „Amerikanische Spodumene Prozess“, bei dem das  $\beta$ -Spodumene mit 95-97 %-iger Schwefelsäure nach folgender Reaktionsgleichung umgesetzt wird:



Das Gemisch wird dafür auf 200-250 °C erwärmt, wobei ab 170 °C eine exotherme Reaktion stattfindet, bei der sich Lithiumsulfat bildet, welches in Wasser löslich ist. Der Säureüberschuss wird mit Calciumcarbonat neutralisiert. Je nach Gesteinsart werden dabei auch signifikante Mengen an Eisen, Magnesium, Mangan, Natrium und Aluminium herausgelöst. Um möglichst reines Lithium gewinnen zu können müssen diese Elemente dann durch weitere Separationsschritte abgetrennt werden. Gesteinsreste lassen sich durch ein Filtersystem abtrennen, während Aluminium, Eisen und Magnesium durch die Zugabe von CaO und NaCO<sub>3</sub> gefällt werden können. Im nächsten Schritt wird konzentriertes Natriumcarbonat hinzugegeben um Natriumsulfat auszufällen. Die verbleibende Lithiumcarbonat-Lösung wird durch Verdampfung eingeengt und durch weitere Zugabe von Natriumcarbonat bei 90 °C bis 100 °C ausgefällt und im Anschluss zentrifugiert, gewaschen und getrocknet. (Talens Peiró, Villalba Méndez, & Ayres, 2013; Dorfner Analysenzentrum und Anlagenplanungsgesellschaft mbH; SGS Mongolia, 2013)

### 3 Aufbau und Zusammensetzung von Lithium-Ionen-Akkus

Batterien und Akkumulatoren gibt es in den unterschiedlichsten Formen und Größen. Früher wurden hauptsächlich Bleisäure-Batterien verwendet, die dann durch Nickel-Cadmium-Batterien ersetzt wurden. Im heutigen Zeitalter sind vor allem LIAs von Bedeutung, da sie eine hohe Lebensdauer und Energiedichte besitzen und wieder aufladbar sind. Allerdings wird momentan auch an neuen Batterien, wie zum Beispiel der Zink-Luft-Batterie, geforscht von denen man sich noch höhere Leistungen und Energiedichten verspricht.

#### 3.1 Primär- und Sekundärzellen

Eine Batterie ist ein elektrochemischer Energiespeicher und wird auch als galvanische Zelle bezeichnet. Die in der Batterie gespeicherte chemische Energie wird bei Nutzung durch eine Redoxreaktion in elektrische Energie umgewandelt. Eine erste Unterteilung erfolgt in sogenannte Primärzellen und Sekundärzellen.

Bei Primärzellen ist die stattfindende Redoxreaktion irreversibel. Die Batterie ist nach einer vollständigen Entladung leer und muss entsorgt werden. Zu dieser Kategorie gehören vor allem Alkali-Mangan- und Zinkchlorid-Batterien. Es gibt auch nicht wieder aufladbare Lithiumbatterien, die zu dieser Kategorie zählen.

Sekundärzellen, zu denen auch der LIA gehört, sind wieder aufladbar und werden deswegen als Akkumulatoren bezeichnet. Häufig wird der Begriff Batterie verwendet, obwohl ein Akku gemeint ist. Dies kommt aus vielen englischen Publikationen in denen das Wort „battery“ verwendet wird. Folglich wird das Wort Batterie auch für Akkumulatoren genutzt und in dieser Arbeit als Synonym verwendet. Die hier stattfindende Redoxreaktion ist umkehrbar und der Akku kann durch das Anlegen einer entsprechenden Spannung wieder aufgeladen werden und (nahezu) in ihren Ursprungszustand versetzt werden. Der Vorgang einer Entladung sowie einer Wiederaufladung wird als ein „Zyklus“ bezeichnet und kann vollständig oder unvollständig erfolgen. Die Anzahl der maximalen Zyklen bezeichnet wiederum die Lebensdauer einer Batterie. Abhängig von Art, Handhabung und Anwendung können Zyklen von 100 bis zu mehreren 1.000 Zyklen erreicht werden, bevor die Lebensdauer einer Batterie endet. (Rahimzei, Sann, & Vogel, 2015)

#### 3.2 Aufbau und Funktion einer Lithiumzelle

Die kleinste Einheit einer Batterie ist die Zelle. Sie besteht beim Entladungsvorgang aus einer negativen Anode und einer positiven Kathode (siehe Abbildung 4). Um den Stofftransport von  $\text{Li}^+$ -Ionen zu ermöglichen, befindet sich ein ionenleitender Elektrolyt zwischen den Elektroden. Die elektronische Trennung der Elektroden erfolgt über einen Separator. Bei der Entladung wandern die Elektronen von der Anode über den Verbraucher zur Kathode.

Jede Elektrode besteht bei der Li-Sekundärzelle aus einem Stromableiter und einem darauf aufgebrachteten Aktivmaterial. Der Stromableiter der negativ geladenen Anode ist eine Kupferfolie, während das Aktivmaterial meist aus Graphit besteht (C/Sn-, C/Si-Komposite und Legierungen sind ebenfalls möglich), in die das positiv geladene Lithium-Ionen eingelagert sind. Die negative Kathode hat zur Stromableitung einen Aluminium-Kollektor und als Aktivmaterial ein Lithium-Metalloxid. Gängige Metalloxide bestehen zurzeit aus Kobalt, Mangan, Aluminium oder Nickel. Wegen der ökologisch schädlichen Eigenschaft von Kobalt wird vorzugsweise Mangan verwendet. Eine weitere Alternative ist Lithium-Eisen-Phosphat (LFP). (Rahimzei, Sann & Vogel, 2015)

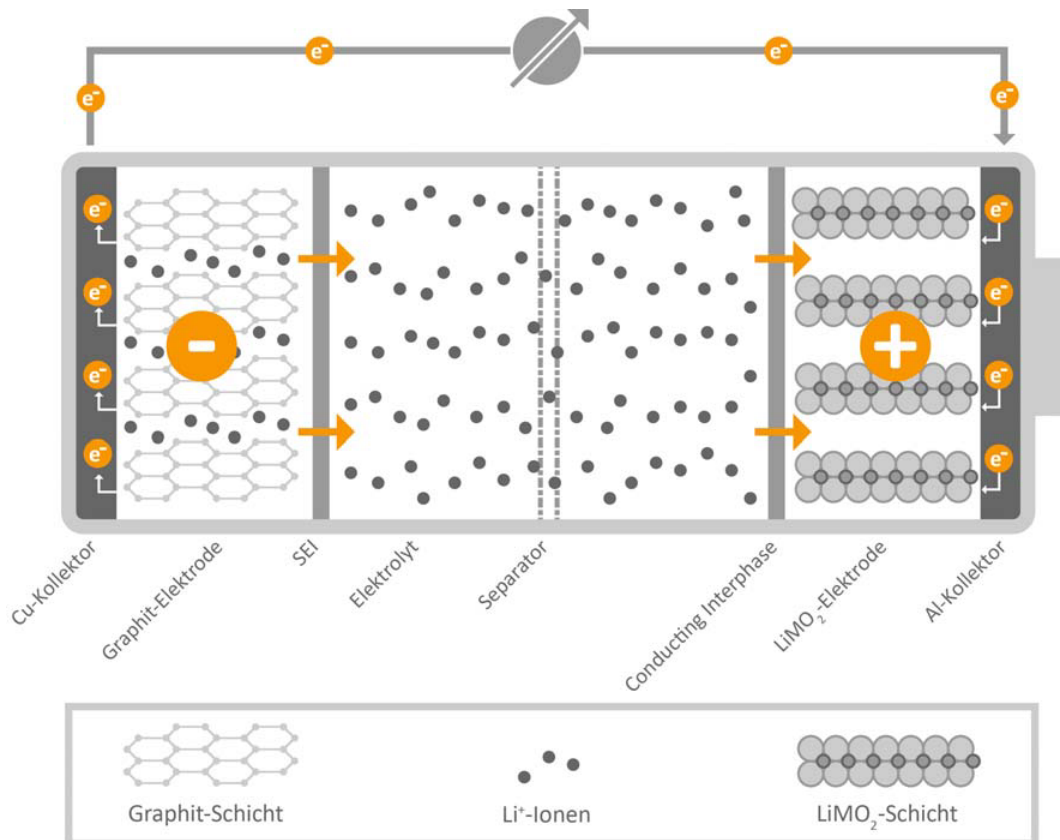


Abbildung 4: Aufbau und Funktion einer Lithium-Ionen-Zelle beim Entladevorgang (Rahimzei, Sann & Vogel, 2015, S. 3)

Während dem Entladevorgang wandern die  $\text{Li}^+$ -Ionen von der Anode durch das Elektrolyt und den Separator zur Kathode und werden eingelagert. Die bei dem Oxidationsprozess freiwerdenden Elektronen wandern über den Kupferkollektor und den Verbraucher zur positiv geladenen Kathode und werden durch den dort stattfindenden Reduktionsprozess aufgenommen.

Der Elektrolyt dient beim Betreiben der Zelle als Transportmedium und muss bei der vorhandenen Spannung (0-4,5 V) und im Temperaturbereich von  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  bis  $+80\text{ }^\circ\text{C}$  stabil sein und eine möglichst hohe Leitfähigkeit besitzen. Zusätzlich ist eine Kompatibilität mit den Elektroden und Inaktivmaterialien auf chemischer und elektrochemischer Ebene notwendig. Der Elektrolyt kann dabei in flüssiger oder fester Form, sowie als Polymer vorliegen. Momentan werden hauptsächlich flüssige Elektrolyten und Polymere verwendet, da feste Elektrolyte ein schlechtes Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweisen. Die meisten Elektrolytlösungen sind Carbonate, Ester und Ether (Korthauer, 2013).

Elektrolytlösungen wechselwirken mit den Elektroden. Geeignete Elektrolyte bilden an der Anode eine elektronenisolierende Schicht, die „Solid Electrolyte Interphase“ (SEI), aus. Sie schützt die Anode vor der korrosiven Eigenschaft der Elektrolytlösung, lässt aber gleichzeitig Lithium-Ionen durch. Die sich an der Kathode bildende Schicht wird hingegen als „Conductive Interphase“ bezeichnet. Sie wächst mit jedem Lade- und Entladevorgang und erhöht so den Widerstand der Zelle. Durch das Wachstum werden der Zelle mobile  $\text{Li}^+$ -Ionen, Kathodenmaterial sowie Elektrolyt entzogen, wodurch es zu einer Verringerung der Zellspannung und Ladungsmenge (in Ah) kommt. Um den Einfluss dieser Vorgänge so gering wie möglich zu halten, werden Elektrolyt und Kathodenmaterial im Überschuss hinzugegeben.

Der Separator verhindert einen Kurzschluss indem er die Elektroden voneinander trennt. Er besteht meist aus Polymer-Membranen, einer Keramik, Vliesstoffen oder Glasfasern. Diese haben die Eigen-

schaft einen Stromfluss bei zu hohen Temperaturen zu unterbinden und können so ein Abbrennen der Zelle verhindern. (Korthauer, 2013; Rahimzei, Sann & Vogel, 2015)

### 3.3 Module und Batteriemanagementsystem

Die maximale Spannung einer Zelle ist durch die Wahl ihrer Komponenten beschränkt. Üblich sind Spannungen zwischen 2,2 V und 4,2 V. Für die praktische Anwendung werden meist höhere Spannungen benötigt. Hierfür werden die Zellen in Reihe geschaltet und dann als Modul bezeichnet. Schaltet man die Zellen hingegen parallel, lässt sich die Ladungsmenge (in Ah) erhöhen, während die Spannung gleichbleibt. Je nach Anwendungsfall werden unterschiedlich viele Zellen parallel und in Reihe geschaltet, wodurch sich ein Batteriesystem ergibt.

Ein Batteriesystem besitzt neben den Zellen meist zusätzlich mechanische und elektronische Komponenten, damit die Zellen aufeinander abgestimmt werden können. Zu den wichtigsten mechanischen Komponenten zählen ein Gehäuse mit Isolierung, ein Befestigungssystem und ggf. eine Kühlung. Die wichtigste elektronische Komponente ist das Batteriemanagementsystem (BMS).

Das BMS bildet die Schnittstelle zwischen Batteriesystem und Verbraucher. Da sich die Zellen fertigungs- und nutzungsbedingt unterscheiden, ergeben sich unterschiedliche Innenwiderstände, wodurch die verschiedenen Zellen unterschiedlich schnell be- und entladen werden. Dies hat gleichzeitig zur Folge, dass die im Modul zusammengefassten Zellen unterschiedlich schnell altern. Das BMS regelt und überwacht daher diese beiden Vorgänge mittels geeigneter Sensoren und fragt Strom, Spannung und Temperatur der Einzelzellen sowie des Gesamtsystems ab. Weiterhin erfüllt es eine „Balancing“-Funktion, indem es Tiefenentladungen und Überladungen der einzelnen Zellen verhindert, die sonst stark negative Auswirkungen auf die Lebensdauer und generelle Funktion des Systems hätten. Ungünstige Temperaturen führen zu einer schnelleren Alterung und Degeneration der Zellkomponenten und beeinflussen die Leitfähigkeit des Elektrolyten. Für eine optimale Leistungs- und Lebensdauer wird das Batteriesystem daher gegebenenfalls beheizt oder gekühlt. (Korthauer, 2013; Rahimzei, Sann & Vogel, 2015)

### 3.4 Zusammensetzung von Lithium-Batterien

Die Zusammensetzung von Lithiumbatterien unterscheidet sich je nach Produzent, Modell und Anwendungsbereich. Die einzelnen Komponenten werden dabei meist nach unterschiedlichen Kriterien beurteilt und dann je nach Bedarf ausgewählt. Abbildung 5 zeigt die Beurteilung des Kathodenmaterials Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (NCA) anhand sechs unterschiedlicher Kriterien (Korthauer, 2013).

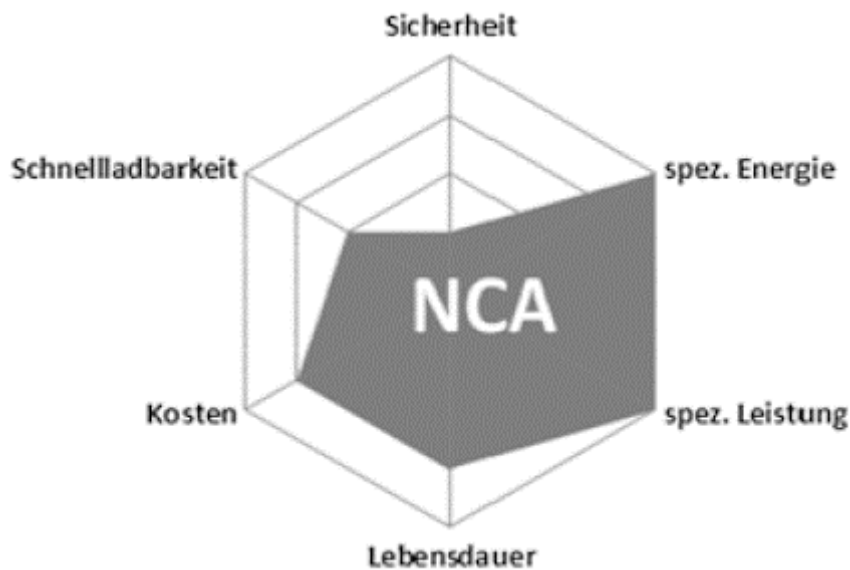


Abbildung 5: Beurteilung von NCA (Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid) als Kathodenmaterial anhand der Kriterien Sicherheit, spezifische Energie, spezifische Leistung, Lebensdauer, Kosten und Schnellladbarkeit (Korthauer, 2013, S. 42)

Zusätzlich muss vor allem auch das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten berücksichtigt werden um Konflikte zwischen den einzelnen Komponenten zu vermeiden.

Tabelle 2 zeigt die Zusammensetzung von drei unterschiedlichen Batterien, die im National Laboratory Argonne in Illinois untersucht wurden. Die Batterien nutzen zur besseren Vergleichbarkeit als Kathode jeweils Lithium-Magnesium-Oxid. Die Tabelle zeigt nur geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Batterien, sodass davon ausgegangen werden kann, dass zumindest die im Fahrzeugbau verwendeten Batterien alle eine ähnliche Zusammensetzung besitzen. (Dunn, et al., 2012)

Tabelle 2: Prozentuale Zusammensetzung von Batterien mit einer Lithium-Magnesium-Oxid Kathode für HEVs (hybrid electric vehicles), PHEVs (plug-in hybrid electric vehicles) und BEVs (battery electric vehicles) nach (Dunn et al. 2012)

Komponente	Prozentuale Masse [%]		
	HEV	PHEV	BEV
LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	27	28	33
Kohlenstoff	12	12	15
Bindemittel	2,1	2,1	2,5
Kupfer	13	15	11
Gehämmertes Aluminium	24	23	19
LiPF <sub>6</sub>	1,5	1,7	1,8
Ethylencarbonat	4,4	4,9	5,3
Dimethylcarbonat	4,4	4,9	5,3
Polypropylen	2	2,2	1,7
Polyethylen	0,26	0,4	0,29
Polyethylenterephthalat	2,2	1,7	1,2
Stahl	2,8	1,9	1,4
Therm. Isolierung	0,43	0,33	0,34
Glycol	2,3	1,3	1
Elekt. Teile	1,5	0,9	1,1



### 3.5 Weitere kritische Bestandteile von Lithium-Ionen-Akkus

Zusätzlich zu Lithium-Ionen werden in den Akkumulatoren weitere Metalle benötigt, damit diese ihre Funktion erfüllen können. Lithium kann eine Verbindung mit verschiedenen Metalloxiden eingehen, die sich an der Kathode befinden. Wie in Kapitel 0 beschrieben, werden in den meisten Fällen für diesen Schritt Mangan, Nickel und Kobalt genutzt. So kann durch dessen Einbau eine höhere Arbeitsspannung erreicht werden, wodurch gleichzeitig die Energiedichte erhöht wird. (Graf, 2013)

Hier sollen ökonomische und ökologische Aspekte in Hinblick auf die Gewinnung und den Bedarf kritisch betrachtet werden.

#### 3.5.1 Gewinnung von Mangan

Mangan ist im Hinblick auf die anderen beiden Übergangsmetalle verhältnismäßig einfach zu gewinnen und ist das häufigste der drei Materialien. Außerdem besteht ein extrem hohes Vorkommen, mit einem gleichzeitig niedrigen Verbrauch. Mit weltweit über 500 Minenbetreibern und 200 Unternehmen, die Manganerze fördern, wird die Versorgung als unkritisch betrachtet (Hoyer, 2015). Dabei werden sowohl Tagebau-, als auch Untertagebau-Verfahren angewendet. Beim Tagebau besteht das Problem, dass durch Sprengung, sowie großflächigem und langjährigem Betrieb extreme Landschaftsveränderungen entstehen. Zusätzlich können unnatürliche Grundwasserabsenkungen erzwungen werden um eine größere Menge von Manganerzen zu erreichen. Dadurch entstehen erhebliche Umweltbelastungen. Durch Sprengungen kommt es auch beim Untertagebau zu Landschaftsveränderungen. Erschwerend kommt hinzu, dass durch den Bau von Zwischenräumen, um eine Absenkung der Mine zu verhindern, Manganverluste entstehen, die gleichzeitig die Wirtschaftlichkeit beeinflussen (Wittmer, Erren, Lauwigi, Ritthoff, & Dressler, 2011). Allerdings gibt es die Möglichkeit Mangan aus der Tiefsee zu gewinnen. Sogenannte „Manganknollen“ entstehen in einer Meerestiefe von 4000 m bis 6000 m, indem verschiedene Oxide eine Matrixphase bilden. Durch verschiedene Verfahren kann das Mangan aus den Gesteinen gewonnen werden, was eine deutlich umweltfreundlichere Alternative darstellt. Problematisch ist hierbei die aufwendige Trocknung der Produkte, dies könnte dazu führen, dass Prozesse unwirtschaftlich werden (Pophanken, Friedmann, Friedrich, & Heller, 2013).

#### 3.5.2 Gewinnung von Nickel

Die Nutzung von Nickel ist, ähnlich wie Mangan, im Vergleich zu dem weltweit reichhaltigen Vorkommen sehr gering. Nickel hat den Vorteil, dass die Reserven weltweit nicht konzentriert gelagert sind. So verfügen Länder wie Australien, Neukaledonien, Brasilien, Russland, Kuba, Indonesien und Kanada über große Vorkommen, die für einen langen Zeitraum den Bedarf kostengünstig decken können (Hoyer, 2015). Zusätzlich kann ein Teil des Nickels zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht wirtschaftlich erschlossen werden. Jedoch ist davon auszugehen, dass bei einer möglichen Knappheit, Verfahren entwickelt werden um eine fortlaufenden Nachschub zu garantieren. Beim Abbau von Nickelerzen gibt es verschiedene Anwendungsverfahren, die aber ähnliche Einflüsse auf ihre Umgebung und Umwelt haben. Durch die Gewinnung von Nickel können geringe Belastungen der Oberflächengewässer und des Grundwassers auftreten. Zusätzlich entstehen anorganische Wasserverschmutzungen durch ausfallende Eisenverbindungen und gelöste Schwermetalle. Auch die Flächeninanspruchnahme der Abbaunternehmen bewirkt einen weitwirkenden Eingriff in die Landschaft (Wittmer et al., 2011). Nach derzeitigem Stand gibt es noch auch keine weiteren Verfahren, welche die Umweltbelastung senken könnten.

### 3.5.3 Gewinnung von Kobalt

Kobalt hingegen zeigt gegenüber den anderen beiden Übergangsmetallen ein deutlich schlechteres Szenario. Auf Grund der steigenden Nachfrage des Metalls in den letzten Jahren, durch den vermehrten Einsatz von LIAs, ist die Förderrate ebenso angestiegen. Kobalt wird hauptsächlich durch den Bergbau von Kupfer gewonnen. Problematisch ist hier die Emission von Schwefeldioxid. Bei Entlüftungen werden Werte erreicht, die 30- bis 70-mal höher sind, als die festgelegten Grenzwerte von 1000 mg/Nm. Zusätzlich führt das Gas zu saurem Regen. Ein weiteres Problem stellt das Eindringen von Schwefelsäure in das Grundwasser da. Die Kontamination kann zu Vergiftungen durch das Trinkwasser führen, Fischsterben und der Veränderung der Vegetation. Und auch hier besteht das Problem, dass durch großflächigen und langjährigen Betrieb extreme Landschaftsveränderungen entstehen. (Rüttinger, Treimer, Tiess, & Griestop, 2014)

Des Weiteren zeigt Abbildung 6, dass weit über 50 % des Kobalts in den letzten Jahren in der Demokratischen Republik Kongo abgebaut wurden. Durch immer wiederkehrende politische Unruhen in diesem Staat wird das Metall in den USA und der EU als sogenanntes „Konfliktmineral“ klassifiziert. Dadurch sind Abnehmer gezwungen eine Sorgfaltspflicht in der Rohstofflieferkette anzuwenden. (Al Barazi et al., 2017)

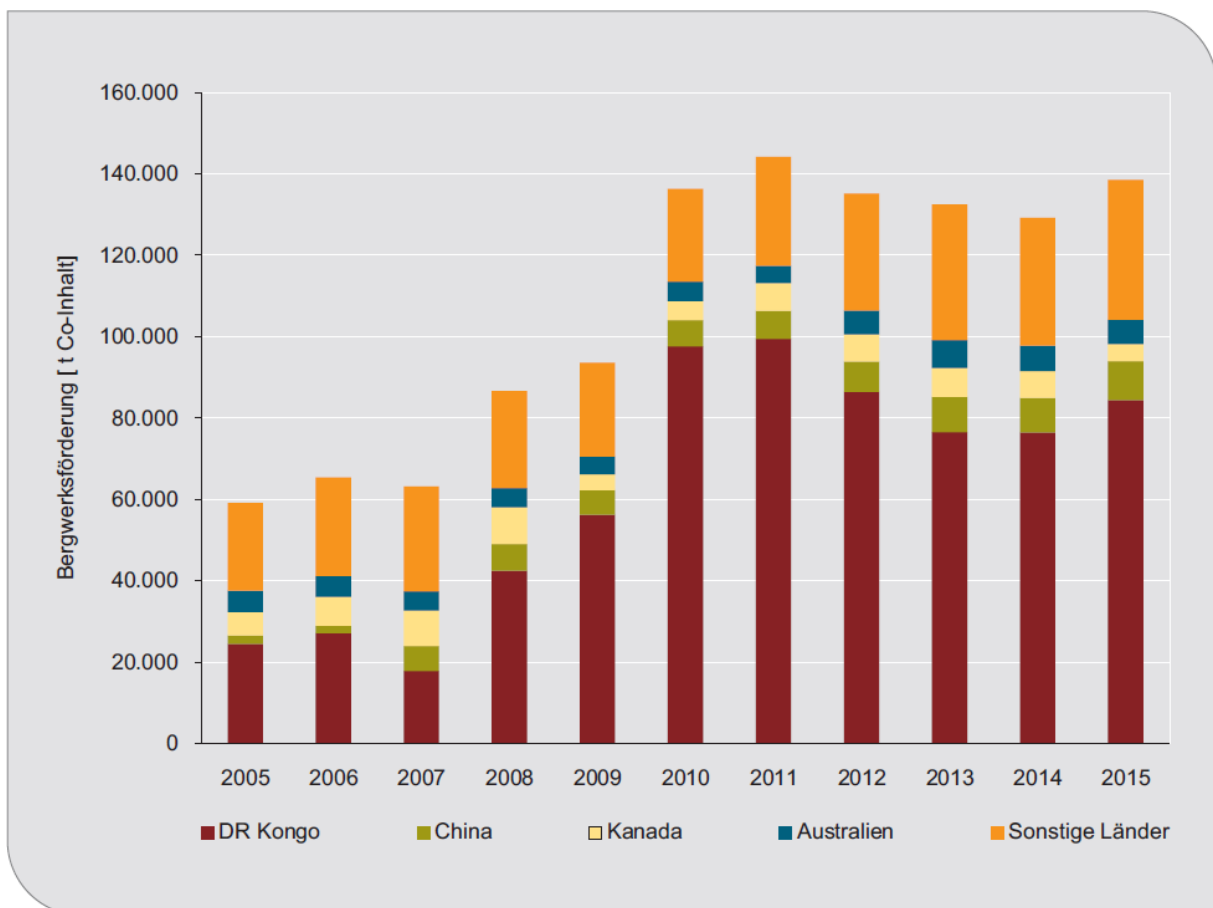


Abbildung 6: Entwicklung der Bergwerksförderung zwischen 2005 und 2015 (Al Barazi et al., 2017, S. 3)

Die Problematik spiegelt sich auch in Abbildung 7 wider. Krisen, wie der Verkaufsstopp der Kobaltvorräte der USA und die, durch Kriege und Krisen ausgelöste, instabile Lage im Kongo führten zu einem wechselhaften Kurs der Preise. Zusätzlich kommt es zu einem starken Preisanstieg, wenn die Kobaltnachfrage steigt, Kupfer und Nickel aber keinen Nachfrageschub erleben. Da Kobalt nur als Nebenprodukt gewonnen werden kann, reagiert der Markt hier sehr empfindlich, zu erkennen an der rasanten Preiszunahme seit 2015. (Al Barazi et al., 2017)

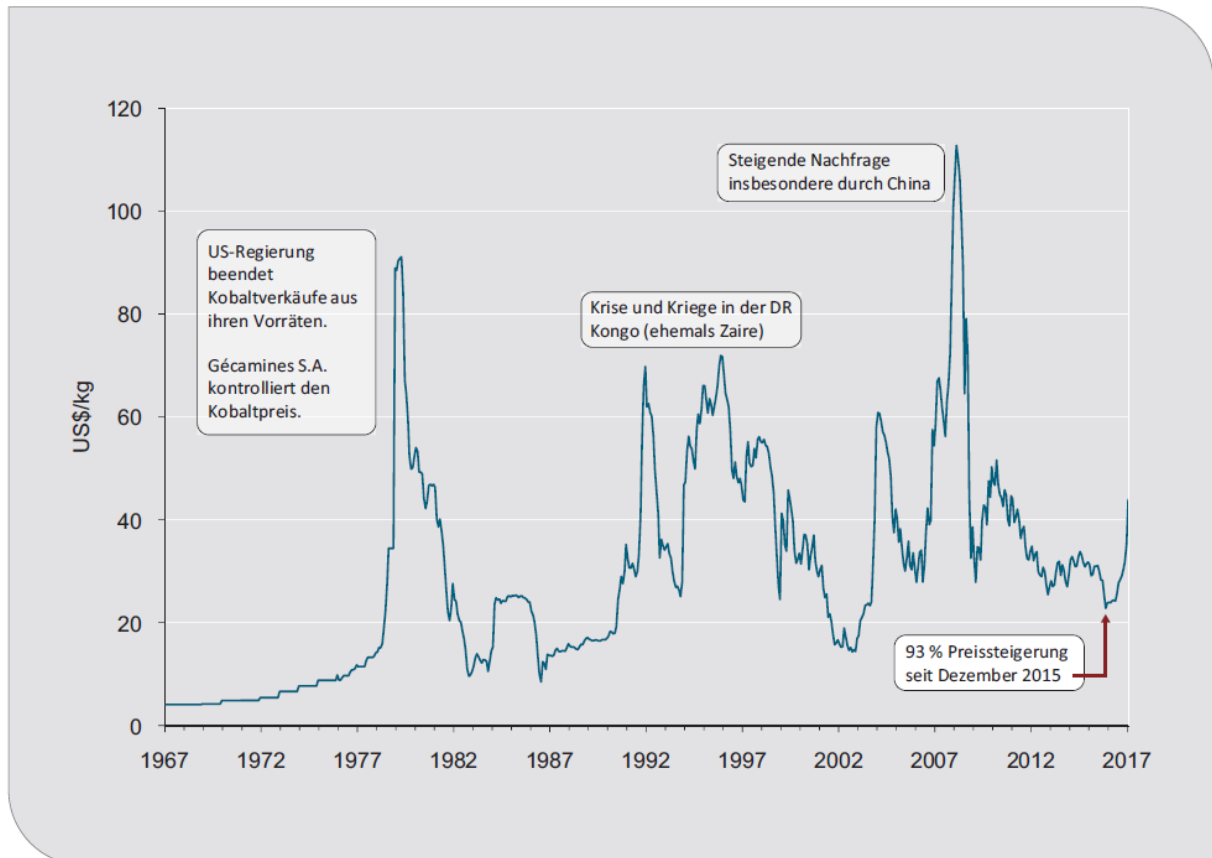


Abbildung 7: Preisentwicklung der Monatsdurchschnittspreise für Kobalt (min. 99,8 %, free market) zwischen 1967 und Februar 2017 (Al Barazi et al., 2017, S. 5)

### 3.6 Rücknahme und Entsorgung

Gesetzliche Grundlage für LIA ist das Batteriegesetz (BattG 2009), dort heißt es: „alle Arten von Batterien, unabhängig von Form, Größe, Masse, stofflicher Zusammensetzung oder Verwendung“ (BattG 2009). Spezielle Ausnahmen von diesem Gesetz sind in § 1 (2) geregelt (u. a. „Ausrüstungsgegenstände, die mit dem Schutz der wesentlichen Sicherheitsinteressen der Bundesrepublik Deutschland in Zusammenhang stehen“) und betreffen den normalen Konsumenten und Hersteller von Batterien nicht. Ferner wird in § 20 festgelegt, dass das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit weitere Rechtsverordnungen nach denen im Batteriegesetz festgelegten Bestimmungen erlassen darf.

Im Folgenden wird ein Überblick über die wichtigsten Paragraphen des Batteriegesetzes und deren Inhalt gegeben.

Die § 5-8 legen die Rücknahmepflicht durch den Hersteller fest und beschreiben die einzuhaltenden Spezifikationen beim Rücknahmesystem. Der Hersteller hat dabei die Möglichkeit entweder ein eigenes, flächendeckendes Rücknahmesystem zu entwickeln und zu betreiben, einen Dritten zu beauftragen oder sich einem vorhandenen Rücknahmesystem anzuschließen. Nutzt er keine der drei genannten Möglichkeiten können ihm die Kosten für die Rücknahme, Sortierung und Verwertung oder Beseitigung in Rechnung gestellt werden. Das Rücknahmesystem darf dabei nicht gewinnbringend ausgelegt sein und muss die Sammelziele, die in § 16 des Batteriegesetzes beschrieben sind (ab 2016 mindestens 45 %) erfüllen.

Die in § 18 beschriebenen Hinweispflichten verlangen vom Hersteller sich am Rücknahmesystem der Batterien in angemessenem Maße zu beteiligen und den Kunden über die Inhaltsstoffe der Batterie zu informieren. Zusätzlich sind gut sichtbare Hinweise anzubringen, die dem Kunden vermitteln, dass die Batterien nach Gebrauch unentgeltlich zurückgegeben werden können und er zu dieser Rückgabe gesetzlich verpflichtet ist.

Der Transport und die Verpackung von Li-Batterien sind nicht explizit im Batteriegesetz geregelt. Je nach Transportart gibt es allerdings andere Gesetze die hier lenkend eingreifen. Für den Transport gefährlicher Güter auf der Straße gilt zum Beispiel das aktuelle Gefahrgutrecht (ADR 2015). Diese Vorschriften sind nicht nur für neue, sondern auch für zu entsorgende und zu recycelnde Batterien anzuwenden. Zusätzlich sollte die Norm DIN EN 62281 zur „Sicherheit von Primär- und Sekundär-Lithium-Batterien beim Transport“ berücksichtigt werden (Korthauer, 2013; Rahimzei, Sann & Vogel, 2015).

Das Batteriegesetz regelt damit prinzipiell den vollständigen Lebenszyklus von Lithium-Batterien, wie er auf dem aktuellen Markt stattfindet. Von ihrer Herstellung über die Nutzung bis hin zur Rückgabe an den Hersteller, der diese dann verwerten oder beseitigen muss. In diesem Rahmen werden aber neuere Konzepte, wie die Second Life-Anwendung noch nicht berücksichtigt. Sobald sich diese Ideen auf dem Markt etablieren, sind vor allem die Pflichten und Rechte der einzelnen beteiligten Parteien neu zu evaluieren und festzulegen, damit auch in Zukunft eine reibungslose Wiederverwertung stattfinden kann.

## 4 Einsatzgebiete von Lithium-Ionen-Akkus in der Elektromobilität

Seit dem Anfang der 90er Jahre werden LIA in technischen Anwendungen eingesetzt. Durch ihre hohe Energiedichte bringen sie ideale Voraussetzungen für kleine und mobile Anwendungen mit. Außerdem werden sie in stationären Anwendungen benutzt in denen eine hohe Leistung nötig ist. Zu den größten Einsatzgebieten zählen Mobiltelefone sowie Laptops. Des Weiteren werden LIA in Werkzeugmaschinen und in der E-Mobilität verbaut. (Leuthner, 2013)

Da der LIA ein Kernelement von EF ist und pro Fahrzeug mit einer Masse von etwa 300 kg ins Gewicht fällt, spielen LIAs aus EF eine große Rolle in Bezug auf das Gesamtaufkommen (Karle, 2015). Aus diesem Grund wird hier etwas näher auf die Rolle der E-Mobilität eingegangen.

Die E-Mobilität ist eng mit der Energiewende verknüpft. Mit EF im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren bietet sich eine Möglichkeit die Emissionen im Straßenverkehr nachhaltig zu senken. Die Emissionen von Luftschadstoffen wie Stickoxiden, Kohlenmonoxiden oder auch Rußpartikeln und die Lärm-Emissionen auf den Straßen, vor allem in Städten, können mit EF merklich reduziert werden. Der Markt von EF in Deutschland wächst stetig auch durch staatliche Förderungen.

Die E-Mobilität umfasst den Personen- und Güterverkehr mit Fahrzeugen, die elektrisch betrieben werden, anstatt konventionell mit einem Verbrennungsmotor. Es gibt verschiedene Typen von EF:

- Reine Elektrofahrzeuge
- Elektrofahrzeuge mit Reichweitenverlängerung (Verbrennungsmotor oder Brennstoffzelle zur Aufladung des Akkus)
- Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge (Verbrennungsmotor kombiniert mit Elektroantrieb)
- Hybridfahrzeug (Verbrennungsmotor plus Elektromotor)
- Brennstoffzellenfahrzeug (Elektromotor plus Brennstoffzelle)

Die Ausführungsformen umfassen folgende EF:

- Elektro-PKW
- Elektro-Busse
- Elektro-Nutzfahrzeuge
- Elektrofahrräder
- Weitere Elektrofahrzeuge (Segway, Motorräder, Flugzeuge)

(Karle, 2015)

## 5 Second Life-Anwendungen für Lithium-Ionen-Akkus

SL-Konzepte sind eine Möglichkeit die Lebensdauer von LIAs aus EF zu verlängern. Die ausgemusterten Akkus werden in einem „zweiten Leben“ in alternativen Anwendungen eingesetzt. Der Einsatz nach dem First Life (FL) wird Second Life (SL) genannt (Canals Casals, Amante García & Cremades, 2017).

In diesem Kapitel sollen der mögliche Ablauf des SL umrissen und geeignete Anwendungsfelder vorgestellt werden. Darüber hinaus werden Ergebnisse von Studien zur ökologischen und ökonomischen Bewertung von SL-Anwendungen und eine potenzielle logistische Umsetzung in Form eines geeigneten zentralen Standortes für eine SL-Umrüstungsanlage präsentiert. Abschließend sollen die Ergebnisse in einer SWOT-Analyse zusammengefasst und bewertet sowie ein Ausblick gegeben werden.

### 5.1 Einführung in Second Life-Konzepte

Wie bereits vorher beschrieben bieten EF eine nachhaltige Lösung um den Ausstoß von Treibhausgas (THG)-Emissionen zu verringern. Mit dem Ansteigen des Anteils von EF unter den Transportmitteln steigt gleichzeitig das Aufkommen von LIA.

Allerdings eignen sich LIA nur bis zu einer Rest-Kapazität, dem „State of Health“ (SoH), von ca. 80 % für den Einsatz in EF. Danach haben sie ihr „End of Life“ (EoL) erreicht und müssten recycelt werden. Gleichzeitig steigt der Anteil der EE am Gesamt-Strommix an. Die Bundesrepublik Deutschland hat sich zum Ziel gesetzt bis 2025 ihre Stromversorgung zu 40 bis 45 % und bis zum Jahr 2050 zu 80 % aus EE zu generieren (§ 1 Abs. 2 EEG 2017). Hier bietet sich die Chance ausgemusterte LIA aus EF einzusetzen. Denn um EE in das Stromnetz zu integrieren sind Speichertechnologien notwendig. Doch im Gegensatz zur Energiegewinnung aus konventionellen Kraftwerken ist die Stromgewinnung durch EE Schwankungen unterworfen. Um die Netzstabilität des Stromnetzes bei konstanten 50 Hz zu gewährleisten, ist es notwendig diese mithilfe von Pufferspeichern auszugleichen. Eine Art der Energiespeicherung bieten elektrochemische Speicher wie LIAs. Da die Neuanschaffung von LIAs sehr teuer ist und diese somit nicht die Ideallösung für den Einsatz in Kombination mit EE darstellen, bieten SL-Akkus eine günstige Alternative.

LIAs haben nach dem FL noch ausreichend Kapazität, um in Anwendungen mit geringerem Leistungsprofil als der E-Mobilität zum Einsatz zu kommen. Das SL bietet die Möglichkeit die Lebensdauer der LIAs aus EF auf bis zu 20 Jahre ansteigen zu lassen und damit das ökonomische und ökologische Potenzial zu erhöhen. (Rahimzei, Sann & Vogel, 2015). Einige Automobilhersteller haben sich bereits diesem Thema zugewandt und eigene Projekte gestartet, um den Einsatz von LIAs in SL-Anwendungen zu testen. BMW erforscht beispielsweise im Projekt „Second-Life-Battery“ zusammen mit dem Energieversorger Vattenfall und der Firma Bosch den Einsatz von ausgemusterten LIAs aus eigenen EF im Hamburger Stadtteil Hafen-City (Schröder, 2016). Dort wurde ein Großspeicher mit einer Leistung von 2 MW zur Bereithaltung von Regelenergie errichtet. Für den mit 13 MW Leistung bis 2016 größten Energiespeicher aus SL-Akkus haben sich der Fahrzeughersteller Daimler, der Fahrzeugbatterien-Entwickler The Mobility House, der Energiedienstleister GETEC und der Recycling-Dienstleister REMONDIS zusammengetan (Daimler AG, 2016). Dieses Verbundprojekt umfasst die gesamte Wertschöpfungskette der Batteriespeicher:

- die Herstellung,
- den Einsatz im EF (First Life),
- den Einsatz als stationärer Energiespeicher (Second Life),
- und das abschließende Recycling.

Die Studie „Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen“ (Fischhaber, Regett, Schuster & Hesse, 2016) zeigt auf, welches Potenzial und welche Risiken solche Anwendungen bergen, wie SL-Konzepte umzusetzen und welche Fragestellungen zu bearbeiten sind. Laut Fischhaber, Regett und Schuster ist die Vision der E-Mobilität eng mit SL-Anwendungen verknüpft und muss ganzheitlich untersucht werden, d.h. der gesamte Lebenszyklus von LIAs muss einbezogen werden.

Die Lebensdauer bzw. die Garantie einer Batterie in EF wird von den Automobilherstellern unterschiedlich definiert. BMW gibt auf seine i-Modelle eine Gewährleistung bis 100.000 km bzw. acht Jahre (BMW AG). Renault bietet für seine E-Modelle eine Batteriemiete an. Die Lebensdauer einer Mietbatterie beläuft sich bis zu einer ursprünglichen Ladekapazität von 75 % (Renault Suisse SA). Auf der Grundlage solcher Herstellerangaben und Studien veranschaulicht Abbildung 8 die Lebensdauer eines LIAs unter Einbeziehung des FL und des SL (P3 Energy and Storage GmbH; Westfälische Wilhelms-Universität Münster Institut für Wirtschaftsinformatik). In der Regel dauert das FL ca. zehn Jahre bis zu einem SoH von ca. 75 %. Es endet nach ca. 20 Jahren und einer geschätzten Restkapazität von 50 %. Anschließend wird die Batterie dem Recycling übergeben. Nach dieser Einschätzung kann das Leben um weitere zehn Jahre verlängert werden. Damit könnten sich die Anschaffungskosten von EF verringern (Martinez-Laserna, Sarasketa-Zabala & Stroe, 2016) und zusätzliche Einnahmen generiert werden (Rahimzei, Sann & Vogel, 2015).

### Batterie-Lebensdauer-Modell

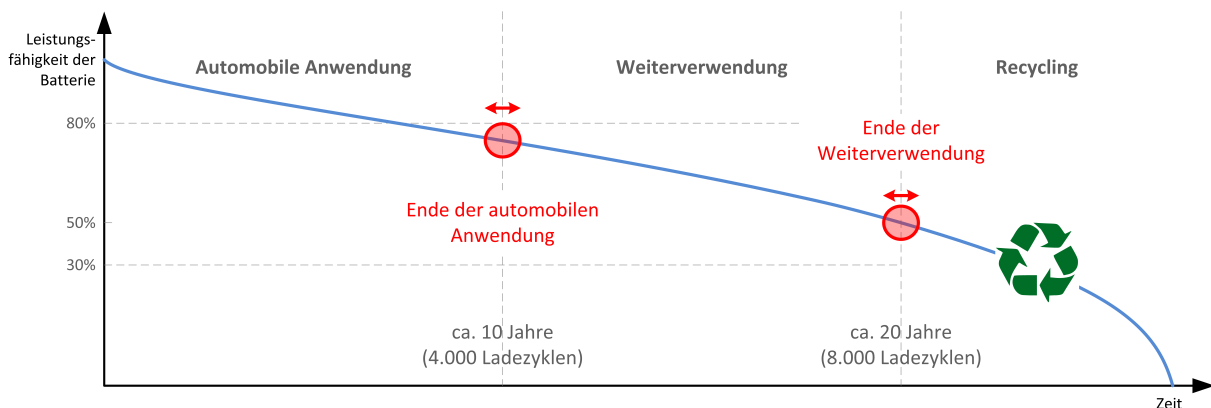


Abbildung 8: Batterie-Lebenszeit-Modell der P3 Energy and Storage GmbH (P3 Energy and Storage GmbH; Westfälische Wilhelms-Universität Münster Institut für Wirtschaftsinformatik)

## 5.2 Ablauf des Second Life

Auf Grundlage der Studien „Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen“ (Fischhaber et al., 2016) und „Electric Vehicle Battery Reuse: Preparing for a Second Life“ (Canals Casals, Amante García & Cremades, 2017) wird in diesem Abschnitt der mögliche Ablauf von SL-Konzepten erläutert.

Laut der Studie „Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen“ (Fischhaber, Regett & Schuster, 2016) umfasst der Ablauf vier Kernfelder aufgezählt nach der zeitlichen Reihenfolge:

- 1) Fahrzeugbetrieb (First Life)
- 2) Wiederaufbereitung
- 3) Second Life-Anwendung
- 4) Recycling

Nachdem die Fahrzeug-Batterie das EoL erreicht hat wird diese ausgebaut und der Wiederaufbereitung zugeführt. Diese setzt sich aus den folgenden Schritten zusammen, die jedoch variieren können:

- 1) Ausbau
- 2) Zerlegung in kleinere Einheiten
- 3) Feststellung des Alterungszustandes (SoH)
- 4) Bestimmung der Art der Weiterverwendung
- 5) Zusammensetzen zu neuem Modul
- 6) Installation in SL-Anwendung

Wie anfangs beschrieben setzen sich LIAs aus verschiedenen Komponenten zusammen. Nach dem Ausbau wird der Akku in kleinere Bestandteile zerlegt, um nur die benötigten Komponenten zu erhalten. Es erscheint aus ökonomischen Gründen nur sinnvoll den Akku in Einzelmodule zu zerlegen, wenn nicht der komplette Akku weiterverwendet werden kann. Der Zustand des LIAs entscheidet über dessen Art der Weiterverwendung. Die Feststellung des SoH ist hierbei von enormer Bedeutung und stellt gleichzeitig ein derzeitiges Problem dar. Über das BMS des LIAs wird der Alterungszustand aufgezeichnet. Theoretisch könnte über selbiges der SoH bestimmt werden, allerdings ist davon auszugehen, dass die Daten, die den Batteriezustand über Algorithmen errechnen und abschätzen, von den Fahrzeugherstellern nicht weitergegeben werden. Es muss also eine alternative Bestimmung stattfinden. Um dies schnell und wirtschaftlich zu gewährleisten, ist die Entwicklung eines Alterungsschnelltestes der Schlüssel. Je nach Kapazität, Leistung und generellem Zustand kann in den nächsten Schritten die Art der Weiterverwendung festgelegt und die zerlegten Module können passend nach ihren Zellparametern zu neuen Modulen in der gewünschten Größe zusammengesetzt werden. Abschließend wird das neue LIA-Modul in der jeweiligen SL-Anwendung installiert.

Der Prozess der Wiederaufbereitung kann alternativ nach folgendem Konzept durchgeführt werden (Canals Casals, Amante García & Cremades, 2017). Die Autoren der Studie gehen nach dem FL von einem SoH zwischen 70 % und 90 % aus und einem Mittel von 80 %. Dies wird statistisch begründet. Eine genaue Erläuterung ist Kapitel 2.1 der Studie zu entnehmen. Abbildung 9 veranschaulicht den Ablauf vom FL (grün umrandet) zum SL, gibt Möglichkeiten für eine Klassifizierung der LIAs nach ihren SoH und bietet damit eine Hilfestellung in der Entscheidungsfindung für die spätere SL-Anwendung.

Nach dem Ende des FLs werden die LIAs gesammelt und auf mögliche grobe Schäden überprüft. Wird ein solcher Schaden entdeckt, eignet sich der LIA nicht für ein SL und wird direkt der Verwertung in Form des Recyclings zugeführt. Eignet sich der LIA für ein SL wird nun der SoH festgestellt. Besitzt der LIA eine Kapazität von mehr als 88 % wird dieser rückgeführt und kann in FL-Anwendungen als Ersatz- oder Austauschteil dienen (vgl. (1) in Abbildung 9). Liegt der SoH zwischen 75 % und 88 %, wird eine Anwendung ohne Zerlegung in Einzel-Module empfohlen (2). Solche Anwendungen sind stationäre Stromspeicher, aber auch mobile Einsatzgebiete, z.B. in Hybrid-LKW oder in der Fährschiffahrt. Ist der SoH kleiner als 75 %, sollten die LIA in kleinere Module oder Zellen zerlegt werden (3). In Frage kommen sowohl stationäre Anwendungen als auch solche für kleinere Gerätschaften wie Laptops, E-Fahrräder und kleine Hausroboter (z.B. automatisierte Staubsauger).

Beide Ablauf-Konzepte ähneln einander stark, allerdings wird nach Canals Casals et al. (2017) die Bestimmung des SoH vor der Zerlegung durchgeführt. Denn gegebenenfalls kann die Zerlegung in Einzelmodule oder gar auf Zellniveau ausgelassen werden. In diesem Fall wird der gesamte Akku mit Gehäuse in die neue Anwendung integriert.



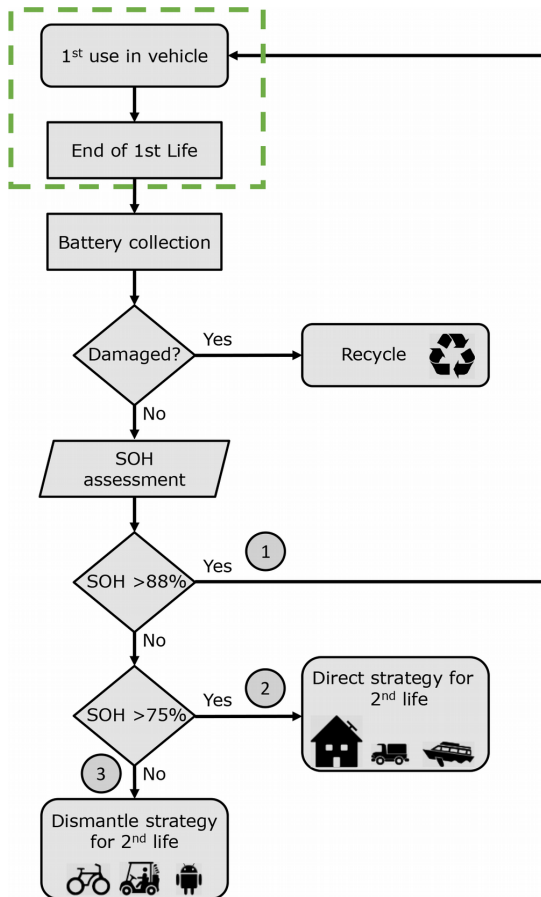


Abbildung 9: Ablauf, Klassifizierung und Entscheidungsfindung auf dem Weg zum Second Life (Canals Casals, Amante García & Cremades, 2017, S. 272)

### 5.3 Second Life-Anwendungsfelder

Zur Identifizierung der am besten geeigneten Anwendungsfelder im SL-Bereich werden die Ergebnisse mehrerer Studien vorgestellt und zusammengefasst. Es wird dabei nicht nur auf die technische Machbarkeit eingegangen, sondern auch auf mögliche Alterungserscheinungen in Kombination mit bestimmten Anwendungen.

Laut Canals Casals et al. (2017) bieten sich stationäre Speicher-Anwendungen, die Nutzung in der elektrischen Infrastruktur und die E-Mobilität als wahrscheinlichste Einsatzfelder an. Die Autoren der Studie schätzen, dass 9 % der Akkus als Ersatzteilkombi in die E-Mobilität zurückgeführt, 70 % in stationären oder in Anwendungen mit höherem Leistungsprofil genutzt und 20 % in kleinen Anwendungen mit niedrigerem Leistungsprofil eingesetzt werden (vgl. Abbildung 10).

Als Energiespeichersysteme kommen Speicher für EE (in Industrie und Privat-Haushalt), netzdienliche Großspeicher zur Bereitstellung von Primärregelleistung und Notstromversorgungs-Systeme in Frage.

Zu den mobilen SL-Konzepten zählen Hybrid-LKW und die Fährschiffahrt. Hier können zur Vermeidung von Lärm- und Abgas-Emissionen – vor allem in Städten – SL-LIA zum elektrischen Betrieb im 1. und 2. Gang genutzt werden. Die verminderte Kapazität würde hier kein Problem darstellen, da die Fahrzeuge nur kurzzeitig mit Elektrizität angetrieben würden. Dank der hohen Energiedichte von LIAs und der Größe der LKW sollten weder das zusätzliche Gewicht noch der benötigte Platz ein Problem darstellen. Der Einsatz in Fähren wäre derselbe und würde ebenfalls Lärm-Emissionen in Häfen reduzieren, wenn der elektrische Antrieb anstatt des Verbrennungsmotors genutzt wird.

Kleinere Anwendungen wie Laptops, E-Fahrräder oder Hausroboter sind ebenfalls denkbar. Hierfür müssen die LIAs in ihre Zellstrukturen zerlegt werden. Da die Akkus von EF besser entwickelt sind als handelsübliche kleine Akkus, können diese in Kombination mit neuen Zellen die nötige ökonomische sowie elektrische Leistung aufbringen, ohne dass mehr Platz benötigt werden würde.

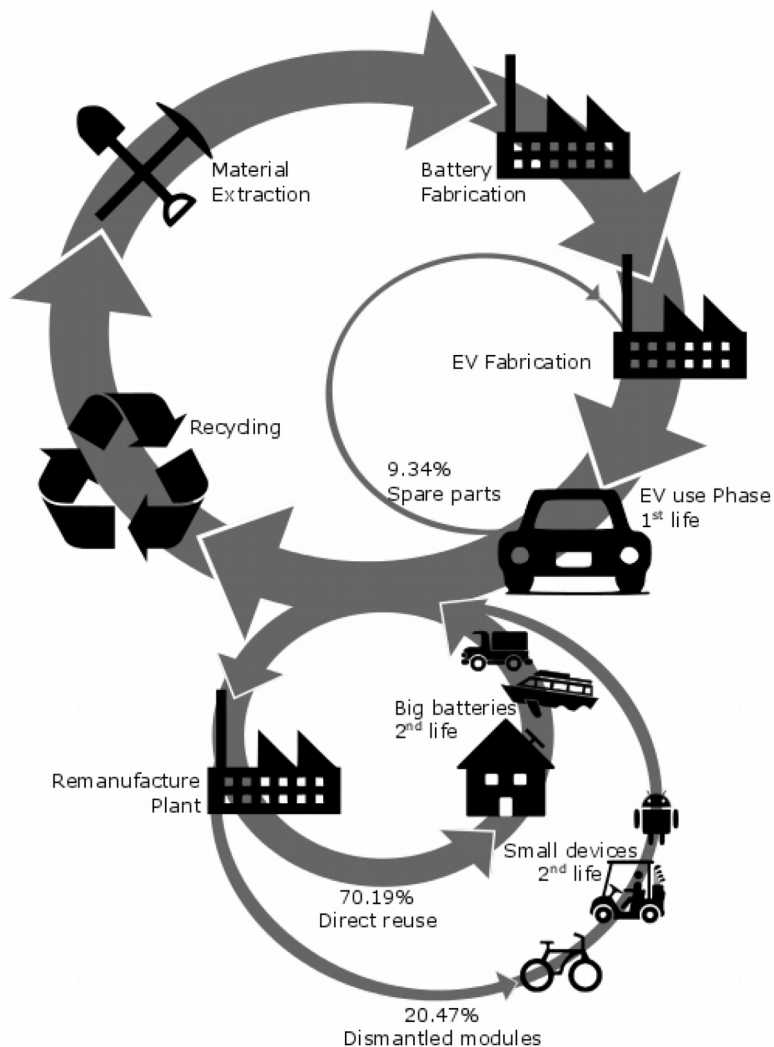


Abbildung 10: Kreislaufmodell für Akkus auf der E-Mobilität mit möglichen SL-Anwendungsfeldern (Canals Casals, Aman-te García & Cremades, 2017, S. 278)

Martinez-Laserna et al. (2016) zufolge kommt es beim Einsatz in Kombination mit Photovoltaik-Anlagen sowohl in Privathaushalten als auch in Großanlagen zu Problemen mit einem abrupten Leistungsabfall der eingesetzten SL-Akkus. Dieses Phänomen konnte schon nach kurzer Einsatzzeit beobachtet werden. LIAs mit einem SoH von unter 70 % bis 80 % waren praktisch nicht zu verwenden. Die Vermutung der Autoren ist, dass entweder die Hochleistungsanforderungen für dieses Phänomen verantwortlich sind oder aber die nicht bei 100 % liegende Kapazität der LIAs. Zur genauen Untersuchung dieses Phänomens müssen weitere Tests durchgeführt werden.

Ähnliche Untersuchungen zum Abnutzungsverhalten führten Canals Casals et al. (2015) durch. Zum Einsatz kamen Energiespeicher zur Nutzung im Inselbetrieb (Privathaushalt), zur Großspeicherung für das Stromnetz sowie zur Zwischenspeicherung von EE. Je nach Material der Elektroden sind unterschiedliche Abnutzungserscheinungen zu beobachten. Es sind weitere Untersuchungen nötig. Außer-

dem beeinflusst die Aggressivität der Lade- und Entladezyklen die Lebensdauer. Akkus, die vollständig geladen und entladen werden, zeigen eine signifikant kürzere Lebensdauer.

Der Einsatz von direkt weiterverwendeten LIAs in Gas-Turbinen-Kraftwerken für die lokale Energiespeicherung und zur netzstabilen Einspeisung in das Stromnetz bietet ein weiteres konkretes Anwendungsfeld (Canals Casals & Amante García, 2017). Die SL-Akkus sind in der Lage die Netzschwankungen auszugleichen und zeigen im Arbeitsbetrieb ein gutes Alterungsverhalten. Bei geringerer Anforderung arbeitet der SL-Akku 21 % länger als unter einem höheren Lastenprofil mit aggressiveren Ladezyklen. Volle Entladung des Akkus zählt allerdings nicht zu einem normalen Arbeits-Zyklus in der Praxis. Deshalb ist es prinzipiell möglich, dass SL-Akku-Systeme netzdienliche Unterstützung in Kombination mit Gas-Turbinen-Kraftwerken liefern können.

Die Nutzung in Hausspeichersystemen und in der Bereitstellung von Primärregelleistung wurde von Fischhaber et al. (2016) detailliert untersucht. Beide Anwendungen erscheinen vielversprechend. Allerdings ist auch bei der Nutzung der SL-LIAs in Hausspeichersystemen ein nicht-linearer Kapazitätsabfall beobachtet worden. Dies wird von den Autoren auf die tieferen und damit aggressiveren Ladezyklen zurückgeführt. Als weitere denkbare Anwendungen werden die Notstromversorgung, die Nutzung in Flurförderfahrzeugen und im Spitzenlastmanagement von Großversorgern und die Leistungspufferung von EF-Schnellladesäulen genannt.

Zusammengefasst aus den Ergebnissen der genannten Studien lassen sich vier Haupt-Anwendungsfelder bilden: kleine Anwendungen, stationäre Speicher, die elektrische Infrastruktur und die E-Mobilität. Im Folgenden werden die denkbaren Anwendungen aufgeteilt nach den Haupt-Anwendungsfeldern aufgelistet.

- Kleine Anwendungen
  - Laptops
  - Hausroboter
- Stationäre Speicher
  - in Kombination mit EE in Hausspeichersystemen
  - in Kombination mit EE in industriellen Großspeichern
  - Inselnetze (mit Microgrid)
  - im Spitzenlastmanagement konventioneller Großkraftwerke
  - zur netzstabile Einspeisung konventioneller Großkraftwerke
- Elektrische Infrastruktur
  - Bereitstellung von Primärregelleistung
  - Notstromversorgungssysteme
  - EF-Schnellladesäulen
- E-Mobilität
  - Hybrid-LKW
  - Fähren
  - E-Fahrräder
  - Flurförderfahrzeuge

Die Zahl der möglichen Anwendungsgebiete ist groß und bietet ein vielfältiges Spektrum. Für eine bessere Identifizierung ist die Auflistung von Stakeholdern hilfreich, es kann jedoch mit einem stark wachsenden Marktpotenzial gerechnet werden (Fischhaber et al., 2016). Probleme beim Einsatz von LIA in SL-Anwendungen bereitet das Phänomen des nicht-linearen Kapazitätsverlusts. Dies kann unter anderem auf Alterungsprozesse der Elektroden und das Profil der Ladzyklen zurückgeführt werden. Für ein tieferes Verständnis der Alterungsprozesse und der Identifizierung von SL-Anwendungen wird an dieser Stelle auf die Studie von Fischhaber et al. (2016) verwiesen.

## 5.4 Ökologische und ökonomische Bewertung

Im vorherigen Abschnitt ist auf die technische Machbarkeit von SL-Anwendungen eingegangen worden. Damit ist allerdings keine Aussage über die ökonomische und ökologische Sinnhaftigkeit von SL-Konzepten getroffen worden. Die Studie „Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen“ (Fischhaber et al., 2016) konnte ein signifikantes wirtschaftliches und ökologisches Potenzial aufzeigen, sollte der Markt der E-Mobilität wie erwartet wachsen. Für eine detaillierte Bewertung mit einer vollständigen Erklärung der zugrundeliegenden Methodik wird auf die Kapitel 10 bis 12 der Studie verwiesen.

Im „Maßnahmenpapier zur Studie: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen“ (Rahimzei, Regett, Fischhaber, & Schuster, 2016) wird das ökologische Potenzial wie folgt zusammengefasst. Der Umweltvorteil wird anhand des THG-Einsparpotenziales pro kWh ursprüngliche Nennkapazität durch vermiedene Neubatterie-Produktion bestimmt.

- In der Primärregelleistung ergibt sich eine Einsparung von 34 bis 106 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten beim Einsatz von SL-LIAs. Wird die mittlere Einsparung bei einem Bedarf von 650 MW (im Jahr 2014) an benötigter Gesamt-Primärregelleistung angesetzt und von einer zehnpromtigen Abdeckung durch SL-Speicher ausgegangen, ergibt sich ein Einsparpotenzial von 7100 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Jahr.
- Für den Einsatz als Zwischenspeicher in Haushalten beträgt das THG-Einsparpotenzial 30 % bis 95 % pro kWh ursprüngliche Nennkapazität. Mit dem Ausgangsszenario, dass im Jahr 2014 alle neuen Hausspeichersysteme mit SL-LIA verbaut worden wären – bei einer Kapazität pro Speicher von 6,6 kWh –, ergibt sich eine Einsparung von ebenfalls 7100 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten im Jahr.

Zusätzlich zur Einsparung von THG-Emissionen werden, durch die verringerte Produktion von Neubatterien für den Energiespeichersektor, kritische Rohstoffe wie Lithium, Mangan, Nickel und Kobalt eingespart. Der ökologische Aspekt von SL-LIAs ist in positivem Maße erheblich. Vor allem in der Kombination mit EE steckt großes Potenzial für den Umweltschutz, welches in der Kombination mit konventioneller Energietechnik sinkt (Canals Casals et al., 2015).

Rahimzei et al. (2016) zufolge ist der Einsatz von SL-LIAs sowohl in der Primärregelleistung als auch in der Hausspeicherung von elektrischer Energie wirtschaftlich.

- In der Primärregelleistung lässt sich der Kapitalwert im Vergleich zum Einsatz einer Neubatterie in 20 Jahren Betrachtungszeitraum um 33 % steigern. Das bedeutet eine Amortisation des SL-Speichers nach wenigen Jahren.
- In der Hausspeicherung lässt sich der Kapitalwert um 26 % steigern. Es tritt keine Amortisation innerhalb des Betrachtungszeitraumes ein.

Dennoch sind beide Beispiele wirtschaftlich, da die Alternative eine 50 % kostenintensivere Neuproduktion eines LIAs wäre.

Der Hoffnung die SL-Nutzung von LIAs aus EF würde zu einer Reduzierung des Anschaffungspreises der EF führen (Canals Casals, Amante García & Cremades, 2017; Martinez-Laserna, Sarasketa-Zabala & Stroe, 2016) wird von Fischhaber et al. (2016) widersprochen. Die SL-Anwendung senke den Neupreis von EF nur um 3 %, habe aber erheblichen wirtschaftlichen Einfluss auf die SL-Anwendungsfelder.

## 5.5 Zentrale Standortwahl

Für die Umsetzung eines wirtschaftlichen und in der Praxis sinnvoll umsetzbaren SL-Konzeptes ist die Logistik von entscheidender Bedeutung. Dabei geht es um Fragestellungen wie LIAs aus EF nach dem EoL gesammelt, wo sie zerlegt, überprüft und umgerüstet werden. Einen interessanten Ansatz bietet die Studie „Electric Vehicle Reuse: Preparing for a Second Life“ (Canals Casals, Amante García & Cremades, 2017). Hier werden der EF-Markt und Umwelteinflüsse analysiert, um mittels eines mathematischen Modells einen zentralen Standort für eine Umrüstungsanlage innerhalb von Europa zu finden. Das Ergebnis ist in Abbildung 11 graphisch dargestellt. Der mathematischen Berechnung des Mittelpunktes einer Masse liegen drei Haupteinflüsse zugrunde und es werden nur Länder mit EF-Verkäufen von über 7.000 Fahrzeugen pro Jahr berücksichtigt:

- Einflüsse auf die Umwelt (dargestellt in orange)
  - Anzahl der verkauften EF (dargestellt in blau und schwarz)
  - Produktion von EF (dargestellt in gelb)
- 
- Umwelteinflüsse: Der Strommix der ausgewählten Nationen - mit dem Vergleichswert der CO<sub>2</sub>-Emissionen - spiegelt den Bedarf an der Umstellung auf EE wider. Sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen pro kWh erzeugte Energie hoch, ist der Anteil der fossilen Verbrennung in der Energiegewinnung der Nation ebenfalls hoch und es besteht im Umkehrschluss ein in Zukunft großer Bedarf an EE im Gesamt-Strommix der Nation. Mit dem Ausbau der EE steigt zugleich der Anteil an benötigten Energiespeichern.
  - Anzahl der verkauften EF: Indirekt beeinflusst das Pro-Kopf-Einkommen die Berechnung, da es mit den EF-Verkäufen korreliert. Umso größer das Pro-Kopf-Einkommen umso höher die Verkaufszahlen von EF.
  - Produktion von EF: Von den, laut mathematischen Modell, in Frage kommenden Ländern für den Standort einer Umrüstungsanlage befinden sich nur in Deutschland, Frankreich, Großbritannien und Norwegen Produktionsstätten für EF.

Norwegen wird weniger gewichtet, da es bereits den Großteil seiner Energie aus EE bezieht. Frankreich fällt ebenfalls ein geringerer Anteil an der Gesamt-Gewichtung zu, da deren CO<sub>2</sub>-Emissionen pro kWh erzeugte Energie deutlich geringer ausfallen. In Frankreich sind die geringen Zahlen an CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht durch einen fortschrittlichen Marktanteil von EE zu begründen, sondern dem hohen Anteil an Kernkraftenergie zuzuordnen. Somit werden Deutschland und Großbritannien am Stärksten von allen in Frage kommenden Ländern gewichtet.

Die Berechnung wird ebenfalls durch die drei größten Städte jedes Landes beeinflusst. Statistisch gesehen siedeln sich die meisten Altfahrzeuge-Verwerter bevorzugt im Umfeld großer Städte an. Bei diesen Verwertern werden potenziell die LIA nach dem EoL ausgebaut.

Das Ergebnis für den mathematisch berechneten Mittelpunkt des europäischen SL-Marktes ist das Rhein-Main-Gebiet in Deutschland, genauer ein Punkt zwischen Wiesbaden und Frankfurt (dargestellt als roter Punkt).

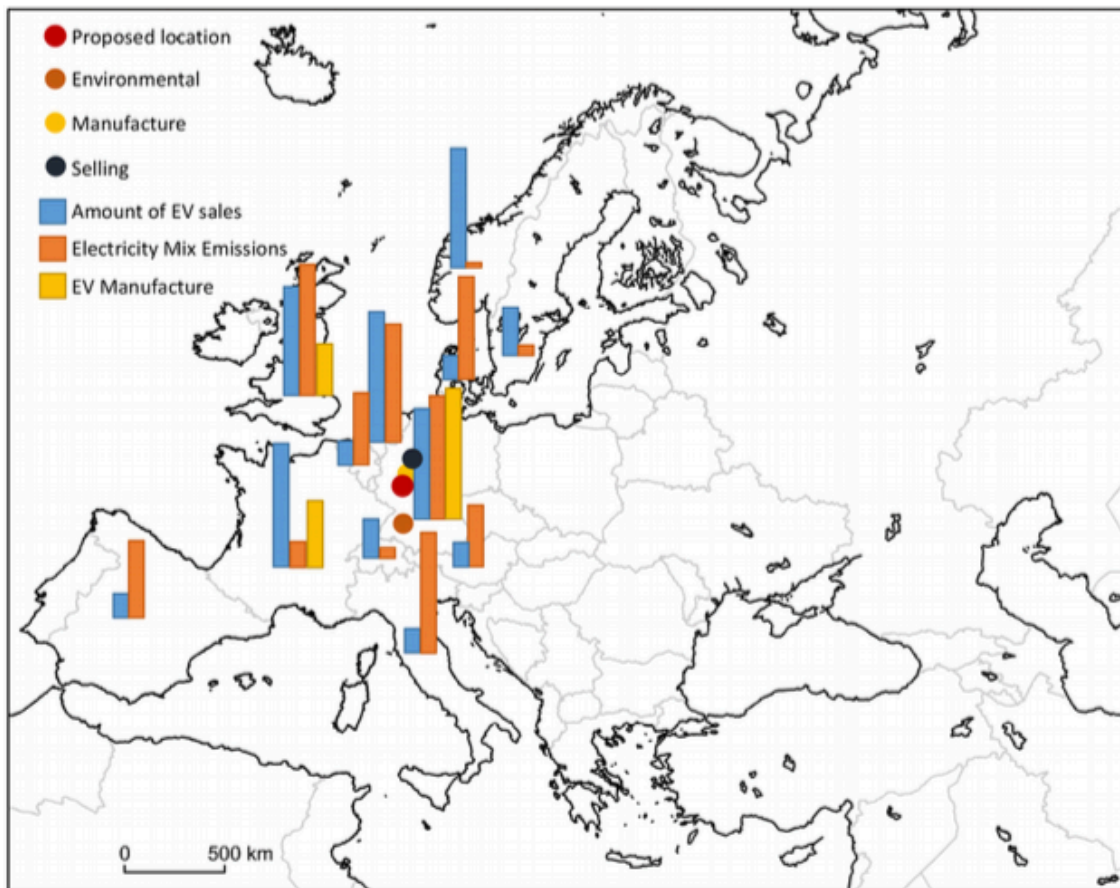


Abbildung 11: Einfluss jedes Rechenparameters für die Standortberechnung einer zentralen SL-Umrüstungsanlage. Die Punkte zeigen die Masse-Zentren der individuellen Parameter der Berechnung (Canals Casals, Amante García & Cremades, 2017, S. 249)

Dass Deutschland den mathematischen Mittelpunkt einer Masse bildet, erscheint durchaus realistisch. Zum einen gibt es in der Bundesrepublik Deutschland mehrere Automobilhersteller, die EF herstellen, und das Pro-Kopf-Einkommen und damit die Verkaufszahlen von EF vergleichsweise hoch sind. Zum anderen gibt es – wie in der Einführung in SL-Konzepte erwähnt – tatsächlich einen großen Bedarf die EE auszubauen. Der genaue Standort, das Rhein-Main-Gebiet, erscheint aufgrund seines Status als Wirtschafts-Standort ebenfalls realistisch und bietet der Industrie eine gute Infrastruktur. Nichtsdestotrotz bleibt diese mathematische Berechnung nur ein möglicher Vorschlag für einen zentralen Umrüstungsstandort.

## 5.6 Fazit und Ausblick zu Second Life-Anwendungen

Die Nutzung von SL-Konzepten verlängert die Lebensdauer eines LIAs aus EF um ca. zehn Jahre. Der Einsatz im FL ist möglich bis ein SoH von 80 % erreicht ist. Der anschließende Einsatz in SL-Anwendungen ist grundsätzlich möglich bis zu einer verbleibenden Kapazität von etwa 50 %, wobei hier die Ergebnisse der angeführten Untersuchungen auseinander gehen. Grundsätzlich gibt es verschiedene Anwendungsbereiche, die abhängig nach dem Zustand des LIAs und dessen Aufbau identifiziert werden können.

Um die SL-Konzepte abschließend zu bewerten zeigt Abbildung 12 eine SWOT-Analyse (durchgeführt von Fischhaber et al. (2016)). Es werden die Stärken und Chancen, die das SL bietet, abgewogen gegen die Schwächen und Risiken.

+ STÄRKEN	SCHWÄCHEN -
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Zweites Leben in stationären und mobilen Anwendungen grundsätzlich möglich</li> <li>➤ Möglichkeit zusätzlicher Erlöse oder Kosteneinsparungen</li> <li>➤ Ersatz von umweltschädlichen Batterien (z.B. Bleisäurebatterien)</li> <li>➤ Verringerung von Treibhausgasemissionen und Ressourcenbedarf</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Unsicherheit bzgl. des Zustandes nach First Life</li> <li>➤ Unsicherheit bzgl. der Lebensdauer im Second Life</li> <li>➤ Sicherheitstechnische Bedenken</li> <li>➤ Wiederaufbereitungskosten</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Wachsender Markt für Elektromobilität</li> <li>➤ Wachsende Nachfrage nach stationären Energiespeichern</li> <li>➤ Steigendes Umwelt- und Ressourcenbewusstsein</li> <li>➤ Verzögerung der anfallenden Recyclingkosten</li> <li>➤ Steigerung der Wirtschaftlichkeit durch Fördermaßnahmen</li> <li>➤ Entwicklung neuer Geschäftsmodelle</li> <li>➤ Design-for-Second-Life: Baukastenstrategie möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Geringe Verfügbarkeit gebrauchter Batterien</li> <li>➤ Unsicherheit bzgl. Batteriepreisentwicklung</li> <li>➤ Fehlende Zahlungsbereitschaft durch geringe Akzeptanz für gebrauchte Produkte</li> <li>➤ Wirtschaftliche Recyclingprozesse</li> <li>➤ Unklare Rechtssituation</li> <li>➤ Fehlende Standardisierung</li> <li>➤ Hohe Anforderungen an die logistischen Ketten</li> <li>➤ Adaption des Nutzerverhaltens im First Life: längere Nutzung im Fahrzeug</li> </ul>
+ CHANCEN	RISIKEN -

Abbildung 12: SWOT-Analyse zu Second Life-Konzepten [erstellt auf Grundlage der Abbildung zur SWOT-Analyse von Fischhaber et al. (2016) S. 20]

Das SL bietet ein großes ökonomisches und ökologisches Potenzial, da neue LIAs und alternative umweltschädliche Batterien eingespart werden können. Außerdem lässt sich – besonders in Verbindung mit EE – der ökologische Fußabdruck in Form von THG-Emissionen und Ressourcenschonung verbessern. Es besteht zudem die Möglichkeit, Kosten einzusparen und zusätzliche Einnahmen zu generieren, aber mit vermutlich sehr geringen Preissenkungen für EF.

Bedenken bestehen allerdings bezüglich des beobachteten abrupten Leistungsabfalls mancher LIAs. Dieses Phänomen verkürzt die Lebensdauer und verschlechtert die Wirtschaftlichkeit. Es ist noch nicht im Detail untersucht, wodurch dies ausgelöst wird. Mögliche Gründe sind eine zu niedrige Rest-Kapazität nach dem FL, die Inkompatibilität in Verbindung mit Hochleistungsanwendungen und zu aggressive und tiefe Ladezyklen, die zu einer chemischen Abnutzung der Elektroden führen können. Große Unsicherheit besteht derzeit noch im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit der Wiederaufbereitung.

Mit wachsendem Markt der E-Mobilität und steigender Nachfrage nach günstigen chemischen Energiespeichern lässt sich die wirtschaftliche Rentabilität verbessern. Die Bereitschaft der Wirtschaft in diesen Markt zu investieren und die Bereitschaft zur politischen Förderung von SL-Konzepten werden vermutlich in Zukunft steigen.

Aktuell können noch wenige praxisnahe Aussagen zum SL getroffen werden. Noch sind ausgemusterte LIAs aus EF kaum vorhanden, wobei dieser Markt mit steigenden Verkäufen und fortschreitender Zeit wachsen wird. Kippunkte in der Umsetzung sind die Wiederaufbereitung und die Altersdetektion sowie die unklare Rechtssituation. Durch das BattG werden die Besitzverhältnisse und Zuständigkeiten für ein SL nicht definiert. Es besteht Handlungsbedarf durch den Gesetzgeber und durch die OEM (Original Equipment Manufacturer).

Um SL-Konzepte in Zukunft erfolgreich in den Lebenszyklus von LIAs zu integrieren muss ein Konzept für die Logistik ausgearbeitet werden, dass sich mit folgenden Fragestellungen auseinandersetzt.

- Soll die Umsetzung zentral für Europa oder dezentral geregelt sein?
- Wie werden die ausgebauten LIAs gesammelt und transportiert?
- Welche Stakeholder sind beteiligt und wie sind die Zuständigkeiten verteilt?

Darüber hinaus ist weitere Forschung nötig um konkrete Anwendungen zu identifizieren und Aufschluss über das Alterungsverhalten von LIAs jenseits eines SoH von 80 % zu erhalten.



## 6 Recycling von Lithium-Ionen-Akkus

Durch die angestrebte Steigerung des Marktanteils von Elektrofahrzeugen erhöht sich auch das Aufkommen von LIAs. Dieses Altbatterieaufkommen stellt Deutschland vor die Herausforderung, das Recycling von LIAs zu fördern und eine sinnvolle Recyclinginfrastruktur zu entwickeln. Hierzu werden im folgenden Kapitel ein Überblick über den Stand der Technik, über aktuelle Verfahrensansätze, über benötigte Infrastrukturen und wirtschaftliche Betrachtungen gegeben. Kapitel 4 geht dazu auf die gesetzlichen Rahmenbedingungen ein.

Recyclingverfahren im Allgemeinen sind erst dann von wirtschaftlichem Interesse, wenn diese sich profitabel betreiben lassen. Die Notwendigkeit zu recyceln ist stark abhängig von der Entwicklung von Rohstoffpreisen.

### 6.1 Stand der Technik

Alle bekannten Recyclingverfahren beinhalten einige oder alle der folgenden technischen Verfahrensschritte. Die Kombination der verschiedenen Schritte unterscheidet sich allerdings. Aus jedem Verfahrensschritt ergeben sich unterschiedliche Stoffströme. Dadurch können Recyclingverfahren je nach Wiedergewinnungsendprodukt konzipiert werden.

#### 6.1.1 Demontage

Der erste Schritt jeder Aufbereitung von LIAs ist die Demontage der Altbatterien. In verschiedenen Zerlegungsverfahren können schadstoffhaltige Bauteile frühzeitig entfernt und nicht dem anschließenden Recyclingprozess zugeführt werden. Diese schadstoffhaltigen Komponenten können so anderen, spezifischeren Recycling- oder Entsorgungswegen zugeführt werden. Hierbei resultierende Stoffströme sind Gehäuse, Kabel und weitere Elektronik-Bauteile. (Hoyer, 2015)

In Abbildung 13 ist der schematische Ablauf der Demontage von Batteriesystemen dargestellt. Die Demontage prüft und sortiert alle Bestandteile der Batterien und teilt diese in wieder- oder weiterverwendbare Komponenten, in verwertbare Stoffe und in nicht-verwertbare Stoffe ein. Nach dieser Einteilung werden alle Stoffe den geeigneten Prozessen zugeführt (Kwade & Bärwaldt, 2012). Umso besser der Schritt der Demontage und damit der Selektion der Bauteile durchgeführt wird, umso effizienter kann eine Aufbereitung sein.

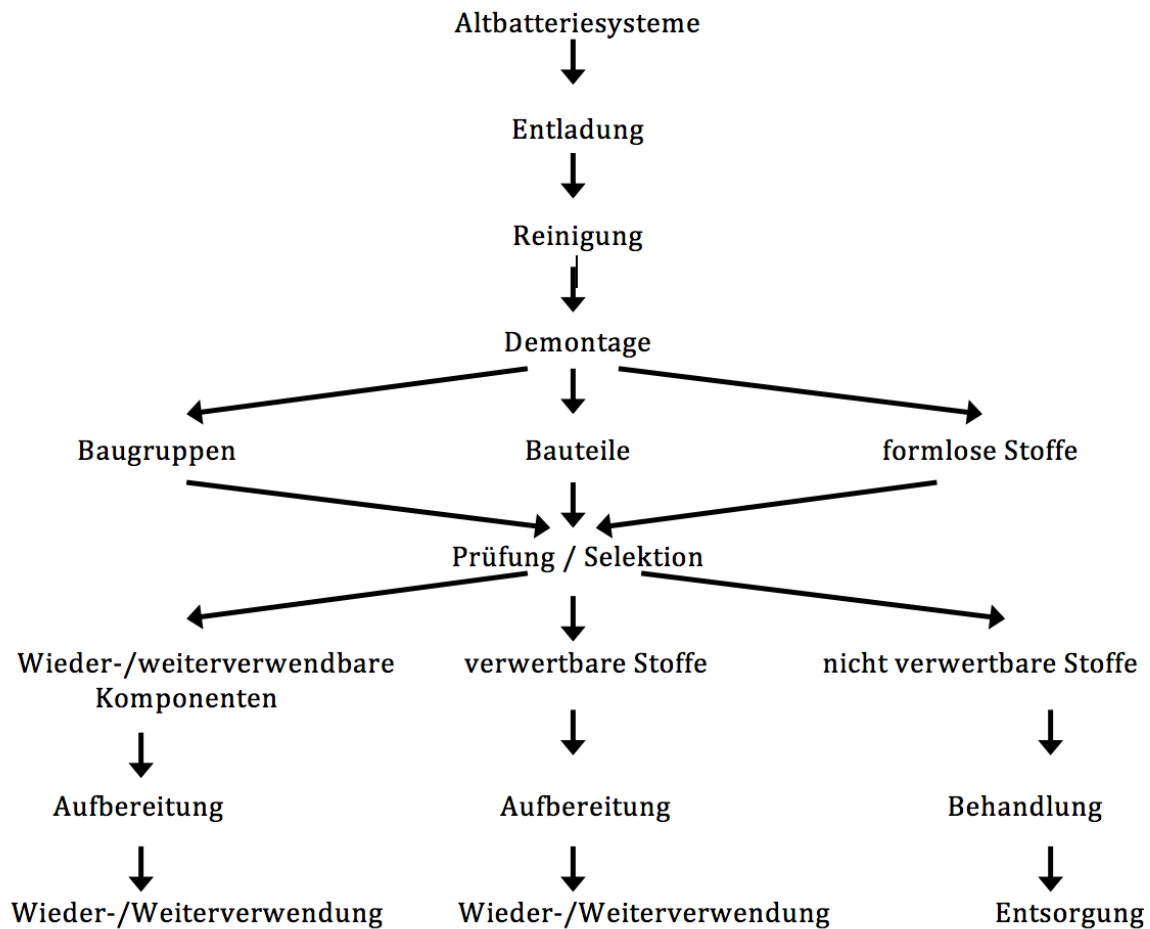


Abbildung 13: Allgemeines Schema zur Demontage von Batteriesystemen, frei nach Abbildung B-10 (Kwade & Bärwaldt, 2012, S. 89)

### 6.1.2 Mechanische Aufbereitung

Die mechanische Aufbereitung umfasst alle Zerkleinerungs-, Sortier- und Klassierverfahren. Dabei kommen Verfahren zum Einsatz die z.B. auch aus der Abfallbehandlung bekannt sind. Unter anderem finden Magnetabscheider und Schwerteileabtrenner hier Anwendung. Vor allem Kupfer und Aluminium können durch diesen Prozessschritt zurückgewonnen werden. (Hoyer, 2015)

### 6.1.3 Pyrometallurgischer Prozess

Pyrometallurgische Verfahren arbeiten mit thermischen Behandlungen der Altbatterien zur Rückgewinnung von Metallen, unter Ausschluss von Sauerstoff. Dabei werden diese Verfahren meist nur auf die Rückgewinnung sehr wertvoller Metalle, wie Kupfer, Kobalt und Nickel, ausgelegt. Lithium geht in diesem Prozess in die entstehende Schlacke über und ist darin gebunden. (Vest, 2016)

Für den pyrometallurgischen Prozess muss die vollständige Entladung der Altbatterien nicht sichergestellt sein, ein Entladungsprozessschritt entfällt. Durch einen langsamen Temperaturanstieg in diesem Verfahrensschritt werden Explosionsrisiken minimiert. (Rothermel, 2016)

### 6.1.4 Hydrometallurgische Prozesse

Lithium kann durch hydrometallurgische Prozesse zurückgewonnen werden. Hierbei werden geeignete Flotations-, Extraktions-, Konzentrations- und Fällungsverfahren miteinander kombiniert. (Hoyer, 2015)

## 6.2 Verfahrensansätze

Weltweit gibt es bisher einige Verfahrensansätze, die für das Recycling von Altbatterien, aber auch LIAs im Speziellen, eingesetzt werden. Dabei verfolgen alle Ansätze einen ähnlichen Ablauf. Dieser erstreckt sich über die Sammlung und Sortierung der Altbatterien, die Behandlung bzw. Verwertung der Bestandteile, die Beseitigung von Schadstoffen und anschließender Distribution. (Kwade & Bärwaldt, 2012)

Die Sammlung der Altbatterien, dargestellt in Abbildung 14 muss die verschiedenen Quellen zusammenführen. Im Schritt der Sortierung findet eine Aufteilung nach Bauart oder Bestandteilen statt, je nach Recyclingverfahren. Anschließend folgen verschiedene Behandlungs- oder Beseitigungsprozesse, die aus mechanischen, sowie hydro- und pyrometallurgischen Aufbereitungen bestehen. Die Distribution beschreibt die Verteilung der entstandenen Teilprodukte in entsprechende Senken. Dort werden sie weiterverwendet oder entsorgt.

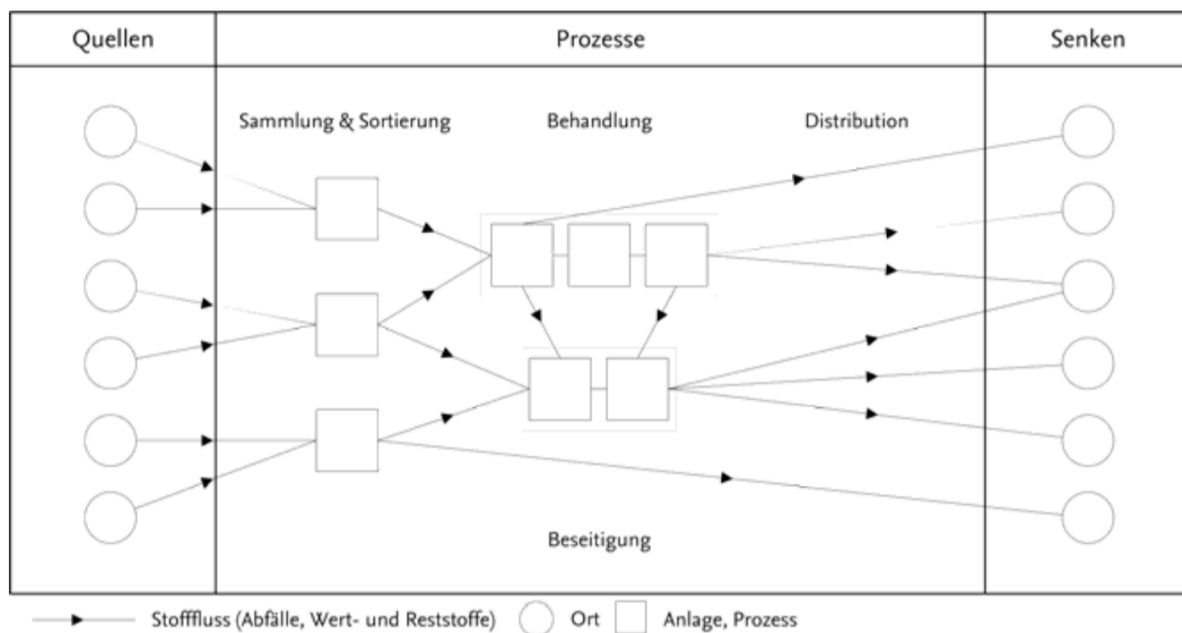


Abbildung 14: Generische Struktur eines Recyclingnetzwerkes, Abbildung 2.13 (Hoyer, 2015, S. 57)

Der folgende Teil beschreibt vier Verfahrensansätze, die bereits in der Praxis bestehen und industriell betrieben werden. Dabei sind die Verfahrensansätze nach Unternehmen unterteilt, die diese Verfahren entwickeln und praktizieren.

### 6.2.1 Umicore

Die Umicore AG und Co. KG mit Sitz in Hanau, Deutschland, betreibt seit 2011 ein Recycling-Werk in Belgien. Im dortigen Werk werden sowohl LIAs als auch Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren behandelt. Dabei wird eine Kombination aus pyro- und hydrometallurgischen Prozessen eingesetzt (Umicore AG & Co. KG). Bei dem von Umicore eingesetzten Verfahren, werden in einem Einzelofen

in einer „Preheating Zone“ durch langsamen Temperaturanstieg enthaltene Elektrolyte verdampft. Durch den langsamen Anstieg wird das Explosionsrisiko minimal gehalten und ein vorgeschalteter Entladungsschritt der Altbatterien entfällt. In der folgenden „Plastics Pyrolysing Zone“ werden anschließend Temperaturen bis 700 °C erreicht, dabei werden Kunststoffteile abgeschmolzen und können abgetrennt werden. Außerdem können in diesem Prozessschritt halogenierte Produkte zurückgewonnen werden. Daran schließt sich die „Smelting and Reduction Zone“ an, in der sauerstoffreiche Luft zugegeben wird und zwei Fraktionen entstehen. Eine Fraktion enthält überwiegend Aluminium, Silizium, Kalzium und Eisen, eine zweite Fraktion dagegen eine Legierung aus Kupfer, Kobalt, Nickel und verbleibendem Eisen. Diese zweite Fraktion wird weiter aufgearbeitet und aufgetrennt. Lithium verbleibt in diesem Prozess als Lithiumoxid in der entstehenden Schlacke und geht für eine Wiederverwendung verloren. (Rothermel, 2016)

### 6.2.2 Retrieval Technologies

Das Recyclingverfahren der kanadischen Firma Retrieval Technologies, vormals Toxco, beruht auf einem mechanisch, hydrometallurgischen Prozess und verarbeitet Primär- und Sekundärbatteriezellen (Retrieval Technologies). Nach der manuellen Demontage, werden in einem Schredder bei sehr niedrigen Temperaturen von bis zu -160 °C die Altbatterien zerkleinert und metallische und kunststoffhaltige Fraktionen abgetrennt. Durch Zugabe einer Lithium-Salzlösung in einem Downstreaming-Tank, entsteht Lithiumcarbonat. Lithiumcarbonat kann dann als Ausgangsstoff für viele weitere Lithiumverbindungen dienen. (Rothermel, 2016)

### 6.2.3 EcoBatRec

Das Projekt EcoBatRec ist ein Verfahren, das von der Firma Accurec Recycling GmbH mit dem Verbundpartner RWTH Aachen durchgeführt wird. Es besteht aus insgesamt vier Hauptprozessschritten. Zuerst werden die gesammelten Akkus nach Typen sortiert und fachmännisch in ihre Einzelkomponenten zerlegt. Die wichtigste Komponente ist die geschlossene Zelle; der Rest wird dem Recycling zugeführt. In der thermischen Behandlung werden die Zellen einer VakuumPyrolyse unterzogen. Danach werden in der mechanischen Aufbereitung weitere Materialien, wie Kupfer und Aluminium, und vor allem das Aktivmaterial zurückgewonnen. Aus dem Aktivmaterial werden durch eine Verdampfung im letzten Schritt Lithiumoxid, bzw. Lithium gewonnen. Das restliche Elektrodenmaterial wird über externe Verwertung behandelt. (Buchert & Sutter, EcoBatRec, 2016; Buchert & Jürgen, LithioRec II, 2016)

### 6.2.4 LithoRec

Das LithoRec-Verfahren ist ein in Deutschland entwickeltes Gesamtkonzept für die Infra- und Recyclingstruktur für LIAs. Der Ablauf des Verfahrens, nach der Sammlung und Entladung der Altbatterien, umfasst zunächst eine Zerkleinerung in einem Schredder. Anschließend werden Elektrolyte verdampft und Metalle und andere Schwerteile in einem Metallabscheider bzw. Schwerteileabtrenner aussortiert. Die zurückbleibende Feinfraktion wird einer hydrometallurgischen Aufbereitung zugeführt. Durch Fällung und Filtration werden jeweils eine saure Übergangsmetallsulfidlösung und eine Lithiumsalzlösung isoliert. Das LithoRec-Verfahren sieht anschließend eine Aufbereitung der Lithiumsalzlösung in einem Ionentauscher vor. Weiter wird die Lithiumsalzlösung in Säure (Salz- oder Schwefelsäure) und Lauge (Lithiumhydroxid-Monohydrat) gespalten. Mithilfe von Kristallisation wird das Lithiumhydroxid weiter aufgereinigt. Die Metallsulfidlösung enthält unter anderem Kobalt, Nickel, Mangan und Aluminium und wird ebenfalls aufbereitet. Das LithoRec-Verfahren ist das bisher einzige

Verfahren, im entsprechend großen Versuchsmaßstab, das die Rückgewinnung von Lithium sicherstellt. 85-95 % des Lithiums kann in diesem Verfahren bereits zurückgewonnen werden. Zudem werden im Labormaßstab bereits Batteriematerialien in Batteriequalität zurückgewonnen. Diese können also direkt in die Batterieherstellung zurückfließen. (Hoyer, 2015)

In den folgenden Abschnitten wird genauer auf das LithoRec-Verfahren eingegangen.

### 6.3 Infrastruktur

Die Infrastruktur eines Batterie-Recyclingverfahrens spielt eine entscheidende Rolle für die Wirtschaftlichkeit. Es gibt eine Vielzahl von Batterietypen mit unterschiedlicher stofflicher Zusammensetzung auf dem Markt. Da ein Recyclingverfahren erst ab einer bestimmten Größe wirtschaftlich relevant wird, muss ein einheitliches System entwickelt werden. Die Sammlung und Demontage von Altbatterien kann z.B. herstellerübergreifend oder herstellerspezifisch realisiert werden. Dazu dient die Einführung eines elektronischen Recyclinginformationssystems, das Daten über Produktion, individuelle Weitergabe entlang der Prozesskette, Identifikationsnummer und Aktivmaterialtyp speichert. Dadurch können zentrale Meldungen über die Herstellung, den Einbau, Instandsetzung während der Nutzungsphase, Ausbau, Demontage und Verwertung der Batterie verwaltet werden. Die gesamte Prozesskette einer Batterie zentral aufgeführt.

Der gesamte Prozess enthält mehrere Systemgrenzen, die für die Entwicklung einer geeigneten Infrastruktur genutzt werden können. Die folgenden Systemgrenzen beziehen sich auf ein Recyclingnetzwerk für Elektrofahrzeug-Batterien.

- Entnahme der Altbatterie aus dem Fahrzeug: Potenzielle Entnahmestellen sind Vertragswerkstätten, freie Werkstätten und Altfahrzeug-Demontage-Betriebe.
- Prüfung der Altbatterie: Es erfolgen Sicht- und Geruchsprüfungen durch geschultes Personal. Anschließend werden Betriebsdaten aus dem Fahrzeug und dem BMS ausgelesen. Testverfahren und Vermessungen einzelner Komponenten können nur durch einen spezialisierten Entsorgungsdienstleister erfolgen.
- Lagerung der Altbatterien: Lagerung in zentralen oder dezentralen Sammelstellen
- Transport der Altbatterien zum Recyclingwerk: LIAs unterliegen speziellen Gefahrguttransportregelungen, deshalb müssen für den Transport geeignete Maßnahmen getroffen werden. Gefährdungen müssen möglichst beseitigt werden. Für den Transport kann, ähnlich zur Abfallbeseitigung, ein Hol- oder Bring-Konzept entwickelt werden. Bei einem Hol-Konzept läge die Verantwortung für den Transport der Altbatterien beim zentralen Lager- oder Demontagewerk, bei einem Bring-Konzept hingegen bei demjenigen, der die Altbatterie entnimmt.  
Auch ein Mehrwegbehältersystem zur Rückgabe ist hier anzudenken. Boxen aus Aluminium, Stahl oder aus kostengünstigerem Kunststoff (für kleiner Batteriesysteme) haben sich in ersten Tests bewährt.
- Demontage der Altbatterie: Die Altbatterie wird hier bis auf Zellebene demontiert. Um den Vorgang zu erleichtern, sollten möglichst bau- bzw. zustandsgleiche Altbatterien zusammengefasst werden. Außerdem können so Kosten bei der Demontage reduziert werden.
- Aufbereitung der Altbatterien: Die Aufbereitung der Altbatterien sollte auf eine möglichst hohe Materialrückgewinnungsrate abzielen.

In den Untersuchungen des LithoRec-Verfahrens hat sich ein herstellerübergreifendes Recyclingnetzwerk als günstige Variante herausgestellt. Über ein einstufiges zentrales Sammelkonzept werden die Altbatterien gesammelt. Das hat vor allem im Anfangsstadium bei geringerem Batterieaufkommen deutliche Vorteile und kann beliebig erweitert werden. Auch die Sortierung sollte herstellerübergreifend organisiert werden. Erst die Demontage der Altbatterien sollte herstellerspezifisch er-

folgen. So werden betriebsinterne Batterieentwicklungen geschützt und die Demontage kann effektiver erfolgen. (Kwade & Bärwaldt, 2012)

#### 6.4 Modell zur Abschätzung des Altbatterieaufkommens

Für eine Abschätzung des künftigen Altbatterieaufkommens ist es sinnvoll verschiedene Szenarien zu beleuchten. Im Folgenden werden diese Szenarien betrachtet: Szenario Pessimistisch, Szenario Politisch, Szenario Realistisch. Des Weiteren folgen alle Abschätzungen einem einfachen Konzept, siehe dazu Abbildung 15. Hierbei wird der voraussichtliche Fahrzeugabsatz abgeschätzt und beurteilt welche Anzahl an ausgemusterten Batterien zu erwarten ist. Alle Szenarien betrachten die Entwicklung der Schwerpunkte Ölpreis, Marktumsatz von Elektrofahrzeugen, Technikfortschritt im Bezug auf Elektrofahrzeuge und Batterieleistung und Wieder- und Weiterverwendung von Batterien. Außerdem wird für jedes Szenario eine Aussage über die daraus resultierende Konsequenz gegeben. (Kwade & Bärwaldt, 2012)

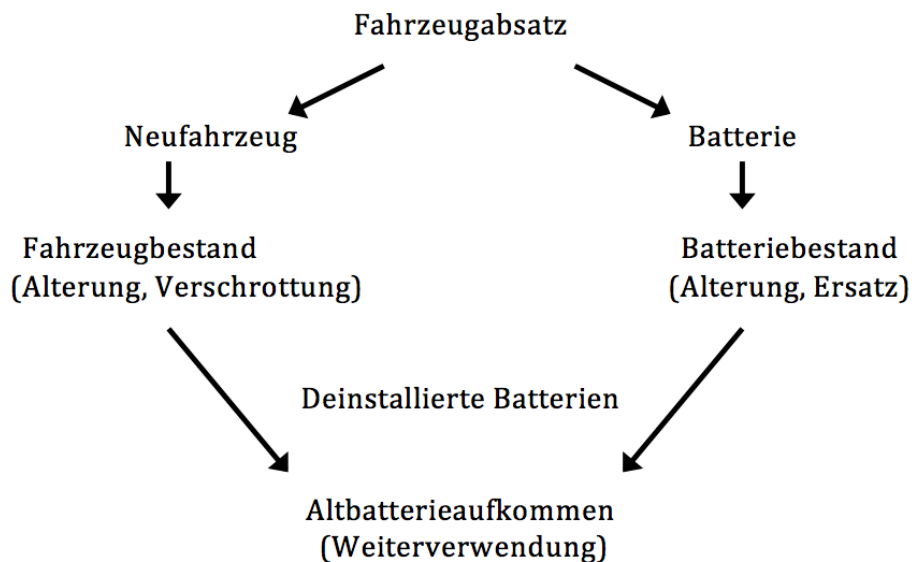


Abbildung 15: Konzept des Modells zur Abschätzung des Altbatterieaufkommens, frei nach Abbildung A-1, (Kwade & Bärwaldt, 2012, S. 10)

##### 6.4.1 Szenario Pessimistisch

Das Szenario Pessimistisch beleuchtet eine zukünftige Entwicklung bei der der Ölpreis nur unwesentlich ansteigt. Auch am Markt werden keine Anreizprogramme geschaffen, wodurch keine Kompensation der Betriebskosten stattfindet. Die Absatzsteigerung von Elektromobilen wird somit nicht aktiv gefördert. Im Bereich der Technik kommt es zu keinen nennenswerten herstellerübergreifenden Lösungen für Batteriesysteme. Die Entwicklung von Batteriesystemen wird herstellereinspezifisch gelöst, was mit erheblichen Problemen für zentrale Recyclingnetzwerke einhergeht. Zudem werden nur geringe Reichweiten realisiert und nur geringe Fortschritte im Bereich E-Mobilität erreicht. Für eine Wieder- bzw. Weiterverwendung im SL-Bereich gibt es kaum Nachfrage und dadurch auch nur eine geringe Eignung der Systeme. Als Konsequenz hieraus resultiert, dass sich EF in Zukunft nicht durchsetzen werden. (Kwade & Bärwaldt, 2012)

Durch den ausbleibenden Fortschritt in diesem Szenario bleiben Elektrofahrzeuge für den Verbraucher unattraktiv. Bis 2035 ist in Deutschland daher mit einem Altbatterieraufkommen von 22.500 t/a zu rechnen. (Hoyer, 2015)

#### 6.4.2 Szenario Politisch

Im Szenario Politisch wird angenommen, dass der Ölpreis in naher Zukunft stark ansteigen wird. In Kombination mit einer erfolgreichen Marktaktivierung und entsprechenden Subventionen durch den Staat für Hersteller werden Elektrofahrzeuge gut gefördert. Niedrige Betriebskosten der Fahrzeuge können Aufpreise bei der Beschaffung kompensieren. In diesem Szenario wird erst eine späte Standardisierung der Batteriesysteme eingeführt und fördert dadurch die hohe Eignung für stationäre Verwendungen. Die Nachfrage für stationäre Anwendungen fällt dabei aber trotzdem gering aus. Durch Fortschritte bei der Entwicklung der Batterien können Effizienz, Reichweite und Zuverlässigkeit gesteigert werden. In einer Konsequenz können aber Elektrofahrzeuge langfristig einen hohen Marktanteil von bis zu 60 % erreichen. (Kwade & Bärwaldt, 2012)

In diesem Szenario werden alle politischen Ziele durch erfolgreiche Marktentwicklung für die Entwicklung von Elektrofahrzeugen erreicht. Hier ist ein Altbatterieraufkommen in Deutschland von 150.000 t/a bis 2035 zu erwarten. (Hoyer, 2015)

#### 6.4.3 Szenario Realistisch

Im Szenario Realistisch hingegen wird vorausgesetzt, dass der Ölpreis extrem ansteigt. Als Folge dessen erreichen zielgerichtete Anreizprogramme eine gute Wirkung. Außerdem bleiben die Betriebskosten in diesem Szenario vergleichsweise gering. Die Entwicklung der Technik schreitet so voran, dass eine weitreichende Standardisierung stattfindet. Ein weiterer Schwerpunkt im Bereich der Technik ermöglicht in Zukunft eine hohe Reichweite der Batteriesysteme sowie eine lange Betriebsdauer. Die Batteriesysteme werden dabei so ausgelegt, dass eine hohe Eignung für stationäre Verwendungen gewährleistet ist. Dadurch ergibt sich ein großer finanzieller Restwert durch Second-Life-Anwendungen. Als Konsequenz aus dem Szenario Realistisch lässt sich ziehen, dass die Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen einem natürlichen Marktwachstum unterliegt. (Kwade & Bärwaldt, 2012)

Höhere Reichweiten stärken den Absatz von Elektrofahrzeugen, lassen das Altbatterieraufkommen in Deutschland aber nur auf 29.000 t/a bis 2035 steigen. (Hoyer, 2015)

### 6.5 Wirtschaftlichkeit des Recyclingverfahrens

Aussagen über die Wirtschaftlichkeit lassen sich nur anhand definierter Beispiele und ausgearbeiteten Systemen treffen. In diesem Kapitel wird daher auf das LithoRec-Verfahren eingegangen, um die Wirtschaftlichkeit zu beurteilen. Dabei werden außerdem die vorangegangenen Szenarien mit einbezogen. Das LithoRec-Verfahren wird deshalb für die genaue Betrachtung gewählt, da es ein sehr fortschrittliches Recyclingsystem ist und außerdem eines der wenigen, bei denen eine Rückgewinnung zum heutigen Zeitpunkt bereits möglich ist.

Die Wirtschaftlichkeit für Recyclingverfahren hängt klar mit der erwarteten Durchsatzquote zusammen. Abbildung 16 zeigt ein Gewinnschwellen-Diagramm für ein gemischtes Batterieraufkommen. Die angenommene Zusammensetzung des Batterieraufkommens enthält zu 80 % NMC-Batterien (Mischoxide aus Lithium, Nickel, Mangan und Kobalt) und zu 20 % LFP-Batterien (Lithium-

Eisenphosphat-Akkumulator), siehe dazu (NMC80:LFP20). Die Ergebnisverläufe sind im Verhältnis zum jährlichen Durchsatz von Altbatteriesystem dargestellt. Das Szenario Referenz ist dem Szenario Realistisch zuzuordnen, hierbei wird die Gewinnschwelle bei ca. 4.500 t Systeme/a erreicht. Betrachtet man vergleichsweise den theoretischen Gewinn bei 15.000 t Systeme/a, kann ein Gewinn von 685 €/t Systeme erwirtschaftet werden. Das Szenario Höher stellt das Szenario Pessimistisch dar, es ergeben sich hohe Fixkosten für die Recyclinganlagen bei niedrigen Deckungsbeiträgen. Die Gewinnschwelle liegt hier am Höchsten bei 8.100 t Systeme/a. Betrachtet man ebenfalls den theoretischen Gewinn für 15.000 t Systeme/a, liegt dieser bei nur 300 €/t Systeme. Das Szenario Politisch ist in Abbildung 16 als Szenario Niedriger dargestellt. Hier werden sehr niedrige Fixkosten und hohe Deckungsbeiträge vorausgesetzt. Die Gewinnschwelle wird bereits bei 2.700 t Systeme/a erreicht. Der theoretische Gewinn bei 15.000 t Systeme/a kann bei 1.070 €/t Systeme angesetzt werden und liegt damit deutlich am Höchsten. (Kwade & Bärwaldt, 2012)

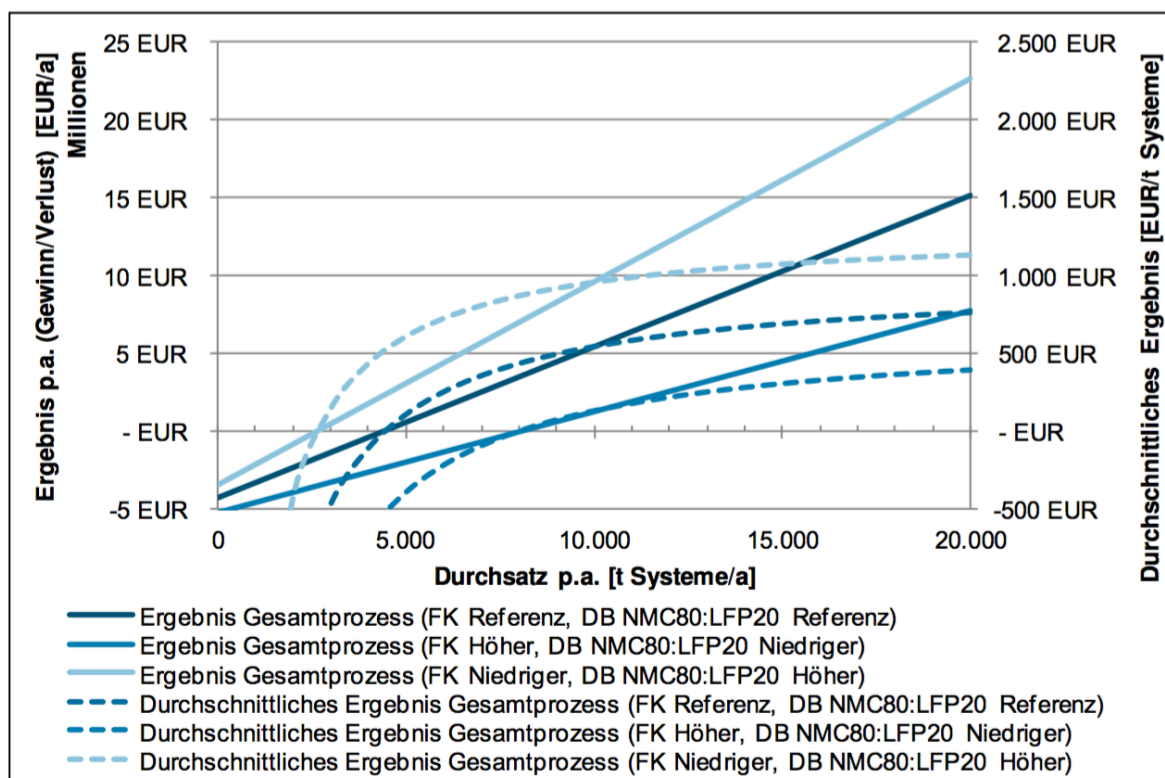


Abbildung 16: Gewinnschwellendiagramm des Gesamtprozesses für gemischtes Aufkommen, Abbildung E-17 (Kwade & Bärwaldt, 2012, S. 227)

Eine wirtschaftliche Untersuchung über die Zeit gesehen, ist eine weitere Betrachtung, die für den Ausbau eines Recyclingnetzwerkes eine große Rolle spielt. Abbildung 17 zeigt anschaulich ab welchem Jahr bei den verschiedenen Szenarien mit einer Übertretung der Gewinnschwelle zu rechnen ist. Auch hier ist die Unterteilung in die drei bekannten Szenarien gegeben. Außerdem werden alle Betrachtungsszenarien in drei weitere Fälle aufgegliedert. Dabei spielen Best-Case, Referenz und Worst-Case eine Rolle. (Kwade & Bärwaldt, 2012)

Für das Szenario Politisch sind bereits ab dem Jahr 2017 mit Gewinnschwellenübertretungen zu rechnen. Vor allem kleine Demontage- bzw. mechanische Aufbereitungswerke können im Jahr 2017 schon Gewinne erzielen. Spätestens aber im Jahr 2026 ist es auch möglich hydrometallurgischen Aufbereitungswerken, die sich auf LFP-Batterien spezialisiert haben, wirtschaftlich zu betreiben. Für das Szenario Realistisch treten die Gewinnschwellen sehr viel später auf. Für kleine Demontage- bzw. mechanische Aufbereitungswerke liegen diese frühestens im Jahr 2020. Für alle anderen Recycling-



schritte verschiebt sich die wirtschaftliche Machbarkeit deutlich nach hinten. Die Gewinnschwelle für eine hydrometallurgische Aufbereitung von LFP-Batterien kann frühestens 2027 realisiert werden. Das Szenario Pessimistisch liegt zwischen den beiden anderen Betrachtungen. Erste Gewinnschwellen sind, genau wie im Szenario Politisch, bereits ab dem Jahr 2017 möglich, auch hier für kleine Aufbereitungswerke. Im Gegensatz dazu sind die möglichen Zeitschienen zwischen Best- und Worst-Case in diesem Szenario deutlich länger. Die genaue Realisierung der Wirtschaftlichkeit kann hier nicht ausgedrückt werden.

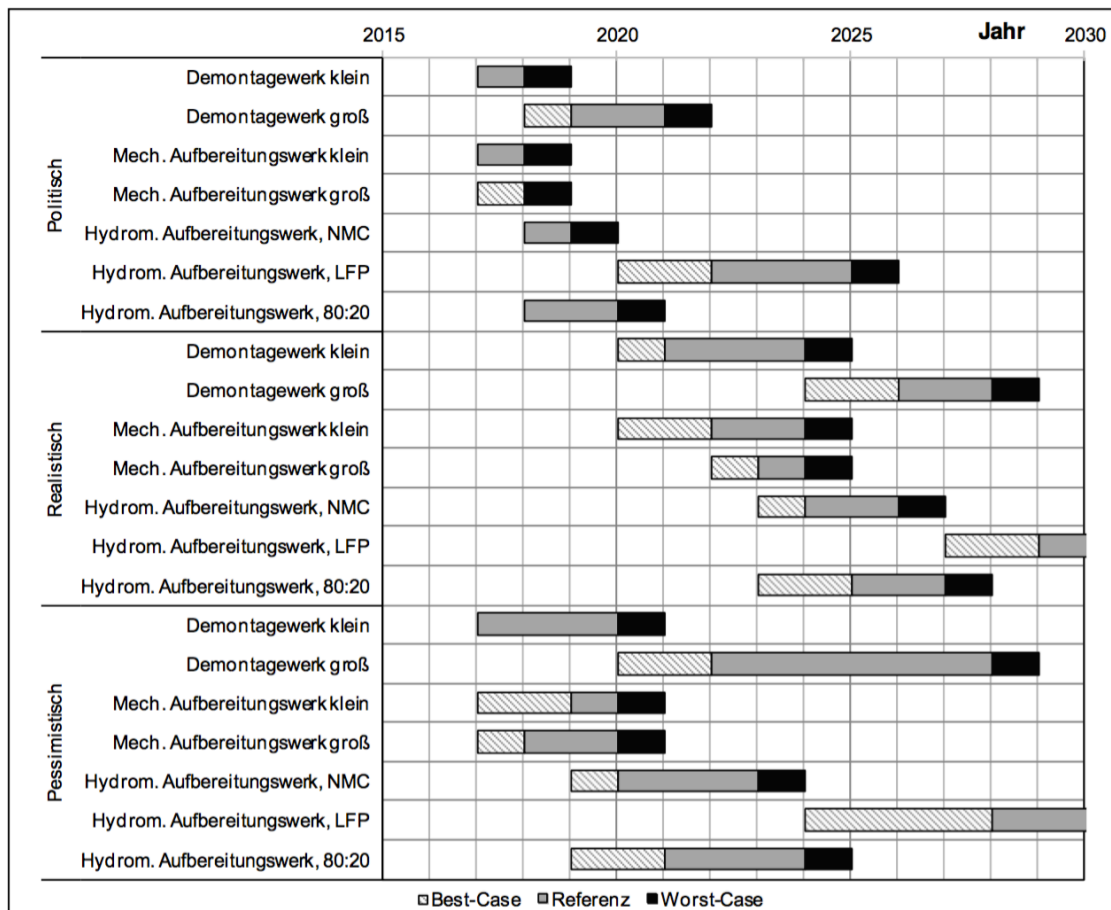


Abbildung 17: Zeitbezogene Gewinnschwellen der Einzelprozesse in Abhängigkeit der Szenarien zum Altbatterieaufkommen, Abbildung E-20 (Kwade & Bärwaldt, 2012, S. 231)

## 6.6 Kapazitätsstärkste Lithium-Ionen-Behandlungsanlagen

Bedingt durch die Gesetzgebung und wirtschaftliches Interesse sind viele Unternehmen an der Forschung und Entwicklung von den genannten Recyclingverfahren beteiligt. Hier soll ein kurzer Überblick über die Gesetzgebung und die Beteiligung der Unternehmen gegeben werden.

In Deutschland werden jährlich ca. 3 Millionen Personenkraftfahrzeuge endgültig außer Betrieb gesetzt, von denen ein möglichst großer Anteil demontiert und verwertet werden soll. In anerkannten Demontagebetrieben mit Verwertungsnachweisen soll ein Großteil der Wertstoffe wiedergewonnen werden (Sander, Wagner, Sanden, & Wilts, 2017). Nach der europäischen Richtlinie 2000/53/EG sollen durch die Automobilhersteller schon während des Herstellungsprozesses Vorsorgen getroffen werden, um Abfälle zu vermeiden und die Wiederverwendung bzw. das Recycling vorrangig zu beachten. Somit sollen bis zum Jahr 2015 95 % des Gesamtgewichts der Fahrzeuge wiederverwendet und verwertet werden. Zusätzlich sollen die EU-Mitgliedsstaaten gewährleisten, dass die verschiedenen

Hersteller einen bedeutenden Teil der Kosten zu der Durchführung beitragen, damit die Letzteigentümer ohne zusätzliche Ausgaben ihre Fahrzeuge ausliefern können. (Richtlinie 2000/53/EG)

Um diese Verwertungsquoten einzuhalten, ist die Automobilindustrie gezwungen eine Infrastruktur, sowie entsprechende Recyclingmethoden zu entwickeln bzw. zu unterstützen. Das Ziel von 95 % Verwertung und Wiederverwendung konnte nach einer Qualitätskontrolle schon im Jahr 2014 übertroffen werden (Umweltbundesamt, 2016). Außerdem schreibt das BattG den Herstellern von LIAs eine Rücknahmepflicht vor (§5 Abs. 1 BattG 2009). Auch hier ist die Automobilindustrie angehalten entsprechende Recyclingwege und eine geeignete Infrastruktur zu unterstützen.

Durch die Ausweitung der E-Mobilität stehen die Automobil- und Batteriehersteller vor einer neuen Herausforderung, da eine entsprechende Infrastruktur erst aufgebaut werden muss und Recyclingverfahren noch nicht die geforderten Quoten erreichen können. Vor allem die Motoren bzw. LIA bieten Probleme aber auch ein großes Potential, da die seltenen Metalle auf Grund der steigenden Nachfrage auch eine steigende Preisentwicklung erleben. Durch Unterstützung der Forschungsarbeit durch die Fahrzeughersteller können Recycling- und Verwertungsunternehmen ihre Kapazität erhöhen und deutlich bessere Zurückgewinnungsquoten erreichen. (Hoyer, 2015)

Unternehmen	Ort	Prozess	Batterietyp	Kapazität
UMICORE S.A.	Belgien (Hoboken)	direktes Schmelzen im Schachtofen Schachtofen > Hydrometallurgie	Konsumer- + Industrie Li-Ion Batterie	> 4.000 t/a
RECUPYL S.A.	Frankreich (Grenoble)	Granulierung > Sieben > Lösen > Ausfällen	Konsumer Li-Ion	< 300 t/a
AKKUSER Ltd.	Finnland (Nivala)	Granulieren > Waschen > Sieben > Hydrometallurgie (OMG)	Konsumer Li-Ion	< 300 t/a
ACCUREC GmbH	Deutschland (Mülheim)	Pyrolyse > mechanische Aufbereitung > Hydro oder Pyrometall. (typabhängig)	Konsumer + Industrie Li-Ion Batterie	2013 1.000 t/a 2014 5.000 t/a

Abbildung 18: Übersicht über die kapazitätsstärksten Li-Ion-Behandlungsanlagen innerhalb der EU (Stand 2013) (Weyhe, 2013, S. 520)

Der amerikanische Elektroautomobilhersteller Tesla Motors geht mit gutem Beispiel voran und hat bereits 2011 angekündigt in Kooperation mit dem Metall- und Werkstoffkonzern Umicore, die Akkus am Ende ihrer Lebenszeit in einem Werk in Antwerpen, Belgien, zu recyceln. Mit einer Kapazität von über 4.000 t recycelten Akkus pro Jahr ist Umicore einer der Marktführer innerhalb von Europa (Hoyer, 2015). Auch Toyota Motor Corporation steht in enger Zusammenarbeit mit Umicore, um LIAs effektiv zu recyceln. (Molotova, Pandya, & Klein, 2013)

Das Verfahren LithioRec wurde während des ersten Forschungs- und Entwicklungsprogramm von Autoherstellern Audi AG und Volkswagen AG finanziell gefördert. Auch hier konnte durch die Unterstützung ein neuartiges Verfahren entwickelt werden (Kwade & Bärwaldt, 2012).

Zusätzlich hat die Firma Accurec Recycling GmbH mit ihrem Verfahren EcoBatRec die erste vollwertige Recyclinganlage im Bereich Lithium-Ionen-Speicher gebaut und nach Stand 2013 mit über 5.000 t pro Jahr die größte Recyclingkapazität in Europa. Unternehmen wie Recupyl S.A. und Akkuser Ltd. können auf Grund der geringen Kapazität noch keine LIAs aus EF in großen Mengen wiederverwerten, doch mit steigender Wirtschaftlichkeit, verbesserten Verfahren und steigenden Zahlen an verfügbaren LIAs kann hier von einem raschen Wachstum ausgegangen werden. (Hoyer, 2015)

## 6.7 Fazit zum Recyclingverfahren

Der Betrieb des LithoRec-Verfahrens lässt sich wirtschaftlich betreiben. Die Erfüllung einiger Randbedingungen ist dafür aber essentiell. Der Recyclingprozess von LithoRec bedarf eines Altbatterieaufkommens von mindestens 4.500 t Systemen/a und gleichzeitiger starker Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen. Der für die Wirtschaftlichkeit entscheidendste Faktor sind die Marktpreise für zurückgewonnene Wertstoffe und steigende Preise für Einsatzstoffe für das Recyclingverfahren. Mit steigendem Altbatterieaufkommen steigt auch die Wirtschaftlichkeit, zudem spielt aber auch die Zusammenarbeit zwischen Herstellern und Recyclingverfahrensentwickler eine große Rolle. Eine gute und enge Zusammenarbeit wirkt sich positiv auf die Entwicklung und letztendlich auch auf die allgemeine Wirtschaftlichkeit aus. Bei konkurrierenden Akteuren hingegen besteht die Gefahr, dass zu viele verschiedene Modelle entwickelt werden, die sich gegenseitig schaden. Auch über die Dimensionierung von Recyclingwerken liefert das LithoRec-Verfahren erste Erkenntnisse. Bergen kleinere Demontagerwerke beispielsweise ein vergleichsweise geringes Risiko bei der Finanzierung, können diese aber wirtschaftlich positive Ergebnisse nur unter günstigen Bedingungen erreichen. Hier eignen sich für die Markteinführung kleine dezentrale Demontagerwerke, die später von größer zentralen Werken abgelöst werden. Dies gilt aber nicht für alle Behandlungsschritte des Recyclings. Die mechanische Aufbereitung sollte immer in großen zentralen Werken angesiedelt sein. Für den gesamten Recyclingprozess sollte, auch politisch, eine Entwicklung hin zu demontagefreundlichen Batteriesystemen gefördert werden. Denn durch leichte Demontagevorgänge können hohe Einsparungen realisiert werden. (Kwade & Bärwaldt, 2012)

Im Allgemeinen ist der Hauptpunkt bei der gesamten Recyclingnetzwerkplanung national sowie international die Wahl der Technologien und die Kapazitätsplanung. Bei der gesamten Entwicklung müssen viele Fragestellungen simultan beantwortet werden. Generell gibt es einige wichtige Punkte, die bei der Entwicklung eines Recyclingnetzwerkes in jedem Fall Beachtung finden sollten:

- Rahmenbedingungen für das Recycling von LIAs: Dabei muss geklärt werden, wie mit der Vielfalt der Batteriesysteme (z.B. Größe und stoffliche Zusammensetzung) umgegangen wird. Welches Verfahren soll zur Abschätzung des Altbatterieaufkommens genutzt werden und wie können verlässliche Aussagen getroffen werden? Ist eine Verpflichtung für Recyclingquoten für Hersteller denkbar und sinnvoll?
- Aufbau eines Recyclingnetzwerkes: Hierbei sind Dezentralisations- und Größendegressionseffekte zu beachten. Welche Entkopplungspunkte im System können genutzt werden, um vergleichsweise dezentrale Sammelstellen und zentrale Behandlungswerke zu realisieren? Welche Technologien müssen zeitlich gesehen, wann eingesetzt werden?
- Entwicklung der Wirtschaftlichkeit des Recyclings: Vor allem die dynamische Entwicklung des Altbatterieaufkommens, aufgrund von stofflicher Zusammensetzung und der Änderung der Rohstoffpreise, muss bei der Beantwortung dieser Frage eine Rolle spielen. Kann ein Recyclingnetzwerk aus Werkstoff Erlösen finanziert werden? Und wenn ja, ab wann?
- Volkswirtschaftliche Bedeutung: Der Beitrag zur Volkswirtschaft ist durch ein Recyclingverfahren sehr hoch, da ein großer Beitrag zur Sekundärrohstoffproduktion geleistet werden kann.

(Hoyer, 2015)

## 7 CO<sub>2</sub>-Bilanzierung

Immer wieder werden EF als derzeitige umweltfreundliche Alternative zu Diesel- und Ottomotoren genannt. Durch die angebliche Klimaneutralität sollen sie helfen, das Problem der steigenden CO<sub>2</sub>-Emissionen im Straßenverkehr zu lösen und die THG zu verringern. So werden Autos, angetrieben durch LIAs, mit einem vom Kraftfahrt-Bundesamt angegebenen CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 0 g pro gefahrenen Kilometer (in g/km) bewertet (Kraftfahrt-Bundesamt, 2017). Allerdings müssen für eine Gesamtbilanz weitere Faktoren mit einbezogen werden. So werden die Produktion der Fahrzeuge und Akkumulatoren, sowie die Bereitstellung des Stroms in dieser Bilanz vernachlässigt, wodurch der Eindruck einer Fahrt ohne Schadstoffe und positiven Umwelteffekte entsteht. Doch in Auftrag gegebene Analysen zur Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen durch das Umweltbundesamt zeigten, wie stark diese Faktoren den angeblichen Klimavorteil beeinträchtigen. (Helms et al., 2016)

Aber CO<sub>2</sub> ist nur ein Teilaspekt der umweltbelastenden Stoffe, die bei der Produktion, dem Aufbau und während des Lebenszyklus der LIAs und Elektrofahrzeuge entstehen. Vorrangig wird aber vor allem Kohlenstoffdioxid in den verwendeten Quellen genutzt. Aufgrund der Datenlage und um die vorhandenen Zahlen besser vergleichen zu können, wird auch in dieser Arbeit nur CO<sub>2</sub> zur Bilanzierung genutzt.

### 7.1 CO<sub>2</sub>-Bilanz von Elektrofahrzeugen

Nach letzten Analysen, mit Berücksichtigung einer durchschnittlichen Lebensfahrleistung von ca. 170.000 km, entstehen bei der Herstellung von Elektrofahrzeugen höhere THG-Emissionen als bei Verbrennungsmotoren. Je größer der Akku ist, um eine möglichst hohe Reichweite zu erreichen, desto aufwendiger und umweltschädlicher ist die Herstellung. Um eine Laufleistung von 250 km zu erreichen, wird, im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, ein doppelt so hoher CO<sub>2</sub>-Ausstoß angegeben. (Helms et al., 2016)

Dies spiegelt sich auch in den Umwelterklärungen von Fahrzeugherstellern, wie z.B. Volkswagen und BMW wieder, die für die Herstellung ihrer Elektrofahrzeuge e-Golf und i3 einen deutlich höheren Ausstoß an THG angeben, als bei der Herstellung von Dieselfahrzeugen (Volkswagen AG, 2014; BMW AG, 2015). Als problematisch ist hier die Gewinnung der wichtigen Rohstoffe der Akkumulatoren, wie Lithium und Nickel, anzusehen. Unabhängig der steigenden Nachfrage und eventuellen sozioökonomischen Problemen, ist der Abbau mit einem hohen Energieaufwand verbunden und den dadurch steigenden THG-Emissionen (Buchert, Degreif, & Dolega, 2017). Zusätzlich werden viele Speicherzellen für EF in Fabriken in China produziert, die ihren Strom teilweise aus umweltschädlichen Kohlekraftwerken beziehen (Schrader, 2017).

Des Weiteren spielt die Bereitstellung des Stroms eine erhebliche Rolle. Falls der „getankte“ Strom aus EE erzeugt wird, können gegenüber einem durchschnittlichen Dieselfahrzeug Emissionen von knapp 50 % eingespart werden; gegenüber einem durchschnittlichen Ottomotor sogar bis zu 60 %. Allerdings besteht der Strommix in Deutschland (Stand 2017) nur zu knapp 33 % aus erneuerbaren Energieträgern, wie Wind-, Wasserkraft, Biomasse und Photovoltaik. Ein Großteil der Bruttostromerzeugung setzt sich immer noch aus Energieträgern mit schädlichem Einfluss auf den CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Luft zusammen (Statistisches Bundesamt, 2017). Durch das häufige und regelmäßige Aufladen der Akkus haben die Elektroautos somit einen nicht unerheblichen Einfluss auf die THG-Emissionen, die bei der Stromerzeugung entstehen. Bei einer CO<sub>2</sub>-Bilanz für Diesel- und Benzinfahrzeuge entfällt dieser Anteil.

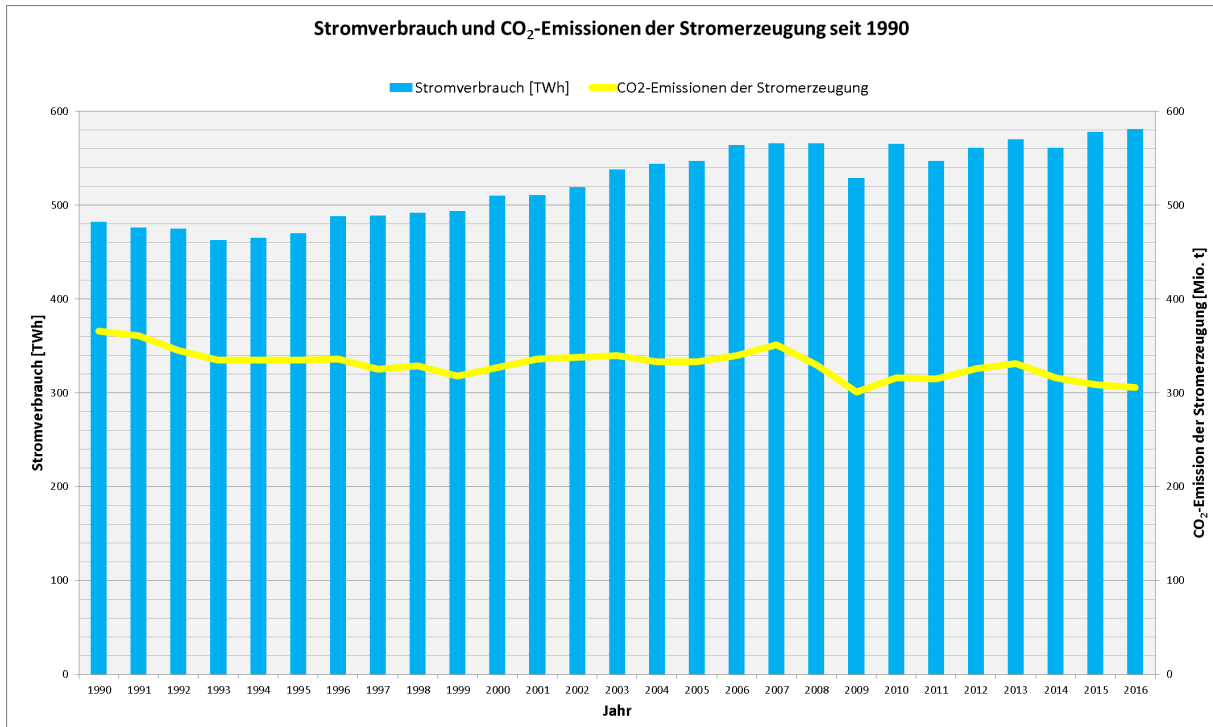


Abbildung 19: Stromverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromerzeugung seit 1990 in Deutschland, frei nach (Icha & Kuhs, 2017)

Der Vergleich zwischen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren und EF zeigt, dass viele Aspekte in einer Bilanz berücksichtigt werden müssen. Abbildung 20 verdeutlicht, dass BEVs durch die erhöhten Emissionen bei der Herstellung und Strombereitstellung ein ähnliches Treibhauspotential (CO<sub>2</sub>-Äq.) wie durchschnittliche Benziner und Diesel haben. In der Abbildung überragt ein Elektrofahrzeug mit einer Reichweite von 250 km sogar alle anderen Modelle, allerdings wird sich auf den deutschen Strommix aus 2012 bezogen. Bei einem Vergleich des Strommixes aus 2012 und 2016 konnte eine Erhöhung der Anteile von EE von 23,4 % auf 31,5 % beobachtet werden (Umweltbundesamt, 2017). Dadurch kann von besseren Emissionswerten für EF ausgegangen werden, die weiterhin ähnlich hoch oder nur minimal besser im Vergleich mit Verbrennungsmotor-Fahrzeugen abschneiden werden. Insgesamt kann derzeit erwartet werden, dass Autos mit LIA eine schwarze „Umweltnull“ einfahren.

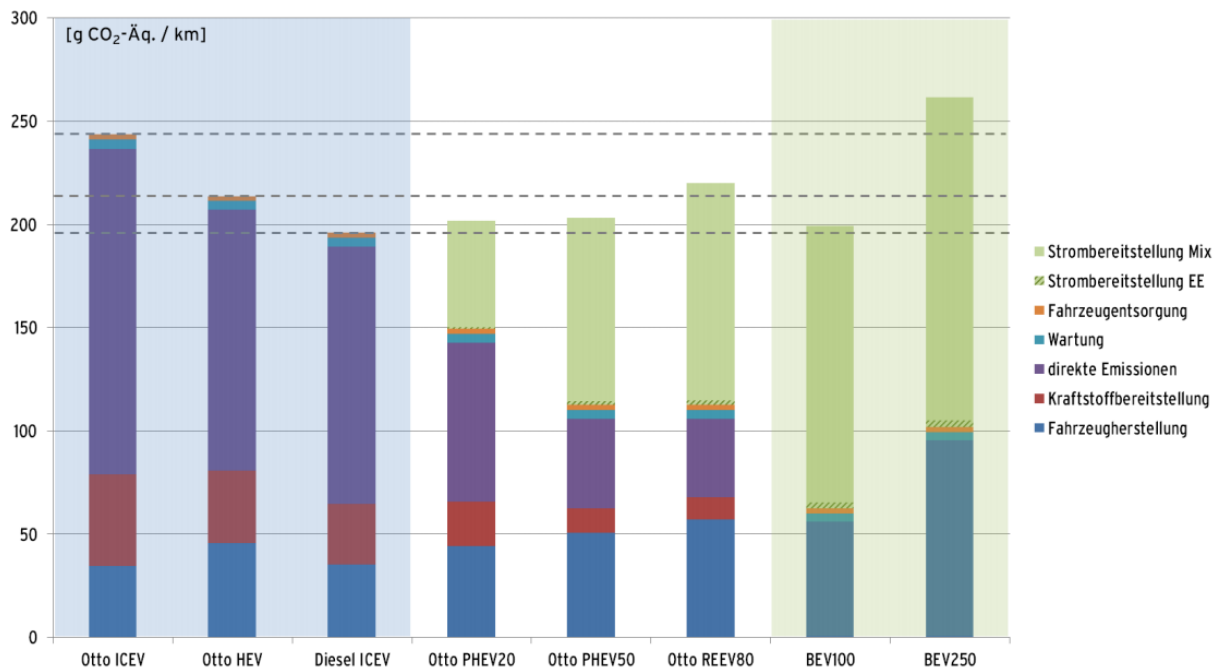


Abbildung 20: Treibhausgasemissionen der betrachteten Fahrzeugkonzepte unter heute durchschnittlichen Bedingungen in Deutschland (Lebensfahrleistung 168.000 km; Windstrom (gestreifter grüner Bereich) bzw. deutscher Erzeugungsmix 2012 (gesamter grüner Bereich)). In Klammern wird die Reichweite der Elektromotoren angegeben (Helms et al., 2016, S. 79)

Da Elektrofahrzeuge derzeit noch keinen deutlichen Vorteil in der CO<sub>2</sub>-Bilanz gegenüber herkömmlichen Fahrzeugen aufzeigen, gibt es die Möglichkeit über Recyclingprozesse der Akkumulatoren die Gesamtbilanz zu verbessern. Durch die Rückgewinnung von wichtigen Rohstoffen besteht die Möglichkeit Einsparungen von Emissionen vorzunehmen und den energieaufwendigen Abbau dieser Stoffe zu verringern. (Helms et al., 2016)

## 7.2 CO<sub>2</sub>-Einsparpotential durch Recycling

Im Jahr 2016 wurden vom Öko-Institut e.V. zwei verschiedene Verfahren auf ihre Ökobilanz hin untersucht bzw. aktualisiert. Es handelt sich hier um das EcoBatRec-Verfahren der Firma Accurec Recycling GmbH und LithioRec II-Verfahren der Firma Rockwood Lithium GmbH. Trotz der Gewinnung von Metallen und Kunststoffen kommt es in diesen Prozessen zum Energieaufwand und somit zu THG-Emissionen. Die Einsparungen und Verluste vom CO<sub>2</sub>-Gehalt sollen hier verglichen werden.

Im Folgenden wird aber von einer hundertprozentigen Rückgabequote von Fahrzeugen und Batterien ausgegangen. In der Realität wird aber eine gewisse Anzahl der Autos, und somit auch der Batterien nach Osteuropa oder Afrika gebracht, wodurch das tatsächliche Potential der Recyclingverfahren eingeschränkt wird.

In Abbildung 21 werden Aufwand und Gutschrift des Verfahrens EcoBatRec gegenübergestellt. Neben den absoluten Ergebnissen in den genannten Wirkungskategorien werden auch normierte Ergebnisse gezeigt. Im ersten Schritt wird der Transport zur Recyclinganlage durch ein Fahrzeug und die Demontage der Module mit Strombedarf als geringer Betrag zum Global Warming Potential (GWP) dargestellt. Durch diesen Schritt entsteht eine große Gutschrift durch die Gewinnung bzw. das Recycling von Aluminium, Edelstahl und Kunststoff, die deutlich die Lastschrift überwiegt. Somit ergibt sich im ersten Teil eine beträchtliche Nettogutschrift. Im zweiten Prozessschritt hingegen entstehen bei der thermischen Behandlung direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen. Zwar kann die Abwärme genutzt werden, aber insgesamt endet dieser Abschnitt in einer negativen Bilanz. Bei der mechanischen Weiterzerlegung

entsteht die insgesamt höchste Last durch den Stromverbrauch, die allerdings durch die Gutschrift von dem Gewinn des Kupfers und Aluminiums übertroffen wird. Dadurch entsteht in diesem Schritt erneut eine Nettogutschrift. Bei der Verdampfung wird erneut Strom verbraucht, dessen GWP hier nicht durch die Gewinnung von Lithium aufgefangen werden kann, wodurch eine minimal negative Bilanz entsteht. Im letzten Schritt werden durch die Aufbereitung vom Elektrodenpulver zwar geringe Mengen Kobalt und Nickel wiedergewonnen, dennoch entsteht hier eine geringe Lastschrift aus direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Insgesamt erzielt das Verfahren der Firma Accurec Recycling GmbH ein deutliches Einsparungspotential von THG-Emissionen mit einer Nettogutschrift von 2.841 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro t Batterie. (Buchert & Sutter, EcoBatRec, 2016)

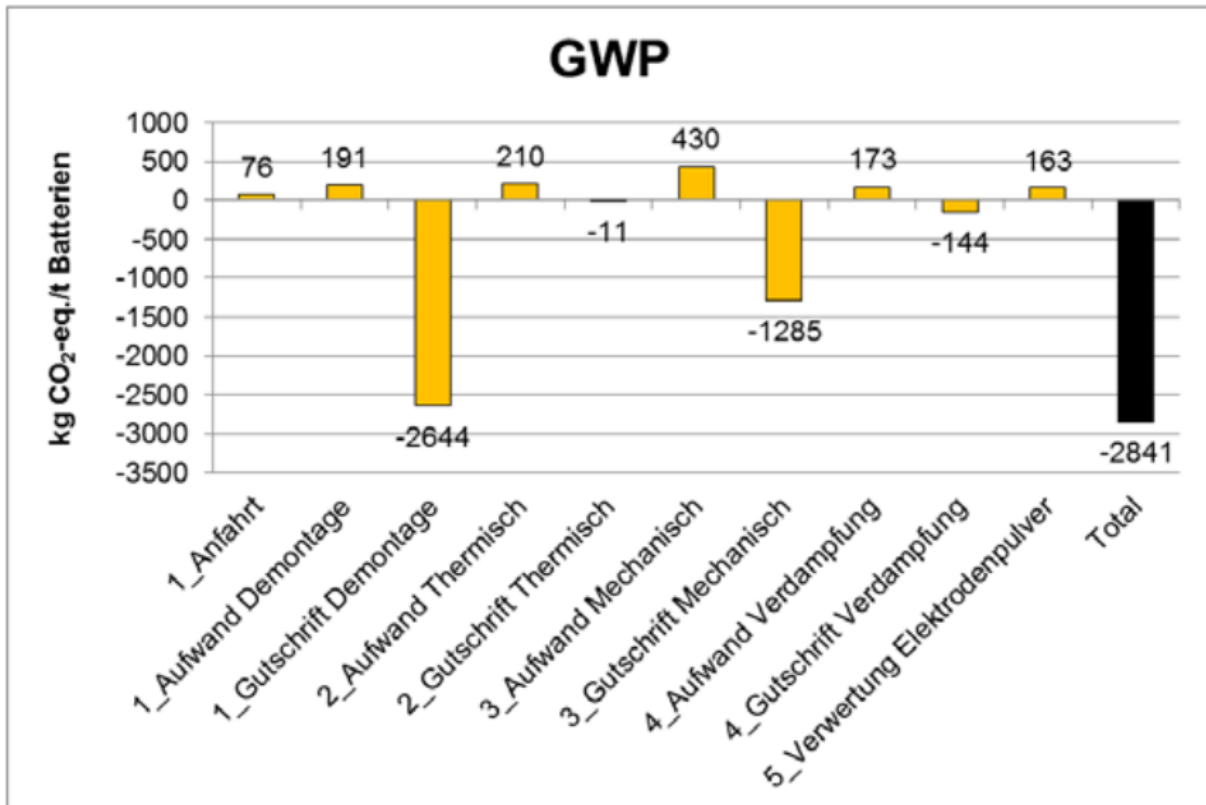


Abbildung 21: Einsparpotential von Treibhausgasemissionen durch das Recyclingverfahren EcoBatRec. (Buchert & Sutter, EcoBatRec 2016, S. 28)

In Abbildung 22 werden Aufwand und Gutschrift des Verfahrens LithioRec II gegenübergestellt. Neben den absoluten Ergebnissen in den genannten Wirkungskategorien werden auch normierte Ergebnisse gezeigt. Im ersten Schritt wird der Transport zur Recyclinganlage durch ein Fahrzeug als geringer Betrag zum GWP dargestellt. Im zweiten Schritt wird die Batterie demontiert, wodurch eine geringe Last durch die Nutzung von Strom entsteht. Dem gegenüber steht aber eine deutliche Gutschrift durch das Recycling von Aluminium und Polyamid, die zeigt wie hoch die Rückgewinnungsrate sein kann und mit welchem Aufwand die Herstellung dieser beiden Ausgangsstoffe verbunden ist. Bei der thermischen Aufbereitung entsteht erneut eine deutliche Nettogutschrift. Zwar entstehen Emissionen durch die Separation des Aktivmaterials, die mit einem Energiebedarf verbunden sind, dagegen steht aber erneut das effektive Recycling von Aluminium, sowie Kupfer. Im letzten Schritt entstehen deutliche THG-Emissionen durch die hydrometallurgische Aufbereitung. Trotzdem entsteht eine Gutschrift durch die Rückgewinnung von Kobalt und Nickel. Doch der hohe Energieaufwand, ebenso wie der Einsatz von Hilfsstoffen, tragen zu einer hohen Netto-Last bei. Insgesamt erzielt das Verfahren der Firma Rockwood Lithium GmbH ein deutliches Einsparungspotential von THG-

Emissionen mit einer Nettogutschrift von 2.725 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro t Batterie. (Buchert & Sutter, LithioRec II, 2016)

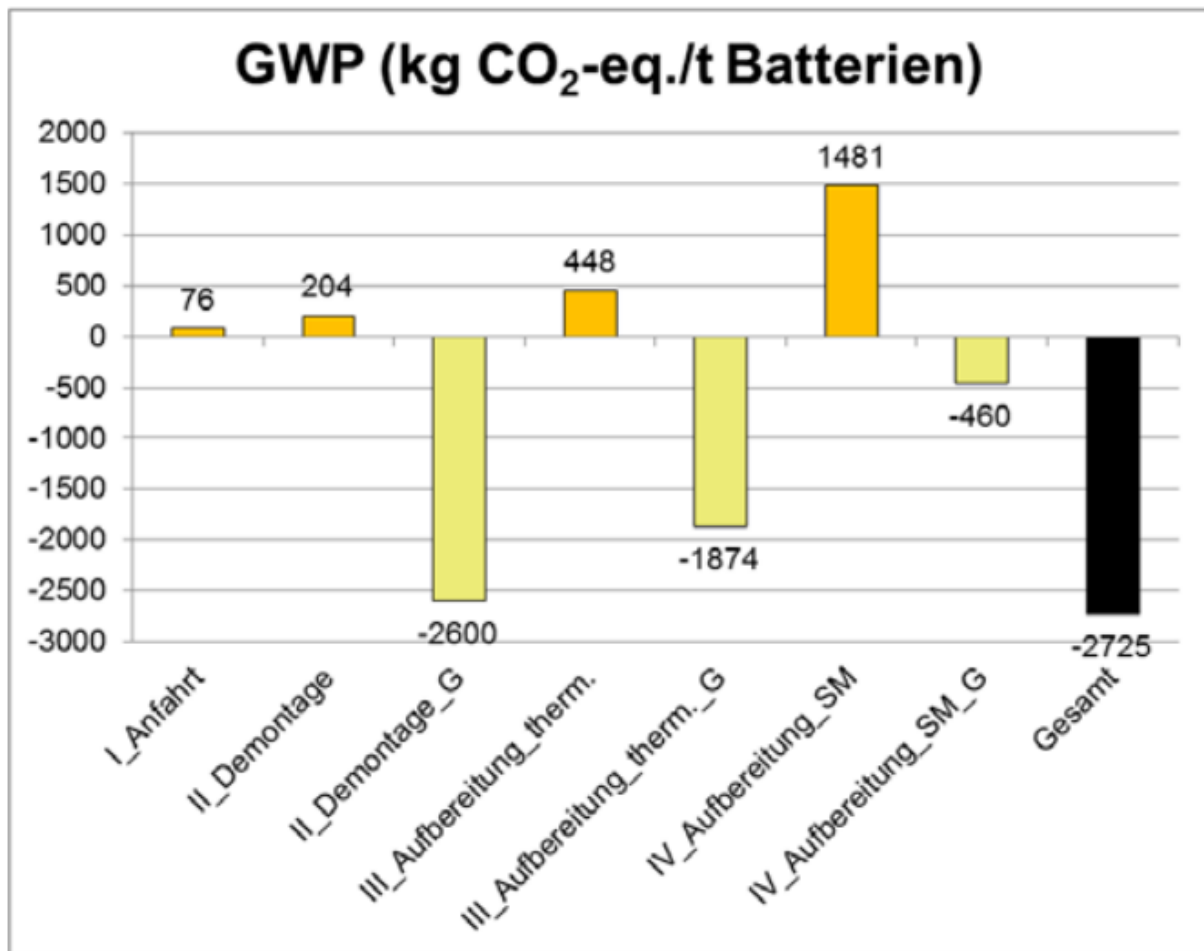


Abbildung 22: Einsparpotential von Treibhausgasemissionen durch das Recyclingverfahren „LithioRec II“ (Buchert & Sutter, LithioRec II, 2016, S. 29)

Die Bilanzen zu den Einsparungen von THG-Emissionen dieser beiden Verfahren zeigen, dass eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz durch effektives Recycling möglich ist. Ein LIA für Automobile wiegt zwischen 200 kg und 250 kg (Ecker & Sauer, 2013). So können pro recycelte Batterie durchschnittlich zwischen 556 kg CO<sub>2</sub>-eq und 696 kg CO<sub>2</sub>-eq der Gesamtbilanz eingespart werden. Bei einem EF mit einer Reichweite von 250 km und einer Lebensfahrleistung von 168.000 km entsteht, nach Abbildung 20, ein CO<sub>2</sub>-Gesamtausstoß von ca. 43.680 kg. Durch die Recyclingverfahren kann somit eine Einsparung von knapp 1,5% bewerkstelligt werden. Durch weitere Verbesserung der Verfahren, sowie eine steigende Stromproduktion durch EE, ist aber ein deutlich besseres Ergebnis möglich. So hat der Stromverbrauch seit 1990 zwar zugenommen, doch gleichzeitig konnten die entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Stromerzeugung gesenkt werden, wie Abbildung 22 zeigt. Bei einem bestehenden Trend sind hier für die Herstellung und das Aufladen von EF deutliche Einsparungen zu erwarten. (Icha & Kuhs, 2017)



## 8 Ausblick

Durch den großen Rohstoffbedarf zur Herstellung von LIAs, steigt der Abbau von den enthaltenen Metallen an. Zusätzlich wird die Anzahl der EF steigen. Hier soll ein Ausblick auf den Reserve- und Ressourcenverbrauch, sowie der benötigten Anzahl an EF zum Erreichen des 2°C-Klimaziels, gegeben werden.

### 8.1 Globale Nachfrage an Elektrofahrzeugen

2009 hat sich die Bundesregierung, um Kanzlerin Angela Merkel, das Ziel gesetzt die Markteinführung von Elektrofahrzeugen zu beschleunigen. Mit der Ausweitung der E-Mobilität sollen bis 2020 eine Million EF zugelassen werden, bis 2030 5 Millionen Fahrzeuge, mit dem Endziel das 2050 auf deutschen Straßen der Verkehr überwiegend ohne fossile Brennstoffe auskommt (Die Bundesregierung, 2009). Diese Zielsetzung kann dazu beitragen das Klimaabkommen von Paris, das eine Klimaerwärmung von maximal 2 °C gegenüber der Durchschnittstemperatur der industriellen Revolution vorschlägt, einzuhalten. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2015)

Weltweit wurden 2015 ca. 66 Millionen PKWs verkauft, was den derzeitigen Stand auf 1,1 Milliarden anhebt. Doch insgesamt konnten nur knapp 330.000 EF verkauft werden, was einen Anteil von weniger als 0,1 % auf den Straßen bedeutet. Deutschland hat 2017 ca. 3,44 Millionen PKWs neu zugelassen, von denen knapp 25.000 EF sind (Kraftfahrtbundesamt, 2018). Das macht einen Marktanteil von 0,73 % und somit höher als der globale Gesamtanteil an EF. Um das Klimaziel zu erreichen, müssen, wie in Abbildung 23 gezeigt wird, deutlich mehr Elektro- und Hybridautos verkauft werden. So soll bis 2030 der Peak vom Verkauf von Verbrennungsmotoren erreicht werden und bei einer globalen Gesamtzahl von 1,8 Milliarden Fahrzeugen mindestens 16 % mit alternativen Antrieben ausgestattet sein. Der Verkauf von alternativen Antrieben sollten mit 37 % auch deutlich gegenüber 2015 gestiegen sein. Dies würde eine Gesamtzahl von 13 Millionen EF auf den Straßen bedeuten. 2050 sollte der Verbrennungsmotor, wie von der Bundesregierung gefordert, nicht mehr vertrieben werden, sodass sich der Verkauf nur noch auf EF, Hybride und Brennstoffzellenfahrzeuge beschränkt. Gleichzeitig steigt der Gesamtbestand auf 2,5 Milliarden Fahrzeuge an und EF machen knapp 40 % der verkauften Fahrzeuge aus. Insgesamt zeichnet sich damit im 2DS-Szenario ein signifikanter Anstieg alternativer Antriebe ab. (Buchert, Degreif, & Dolega, 2017)

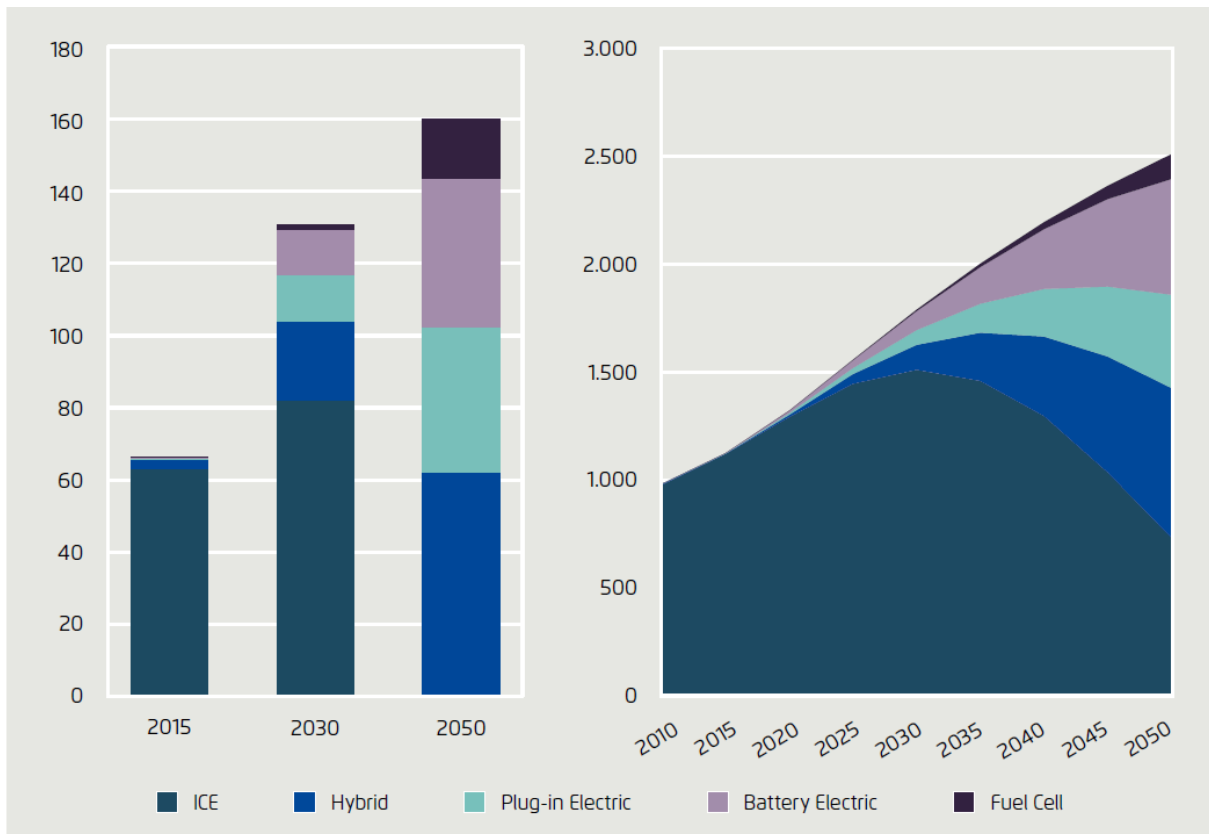


Abbildung 23: Jährliche Verkäufe (links) und Bestand (rechts) von Pkws nach dem 2DS-Szenario (Millionen Fahrzeuge) (Buchert, Degreif, & Dolega, 2017, S. 14)

## 8.2 Rohstoffe

Graphit, Lithium, Nickel und Kobalt sind relevante Schlüsselrohstoffe für LIA und somit entscheidend für die Produktion von EF. Eine wichtige Rolle spielt auch Mangan, da aber die Reserven durch die Erschließung der Quelle „Manganknollen“ erheblich gewachsen ist und Mangan nur einen Teil von 2 % eines Akkus ausmachen, wird in diesem Abschnitt nicht weiter darauf eingegangen (Buchert, Degreif, & Dolega, 2017). Der Ausblick beläuft sich auf die Jahre 2035 und 2050 im Vergleich der Einhaltung des 2-Grad-Ziels (2DS-Szenario) bis 2100 und des Referenzszenarios einer globalen Erwärmung von 4°C (4DS-Szenario) bis 2100.

Der Unterschied des Nutzens von EF zur Einhaltung des 2-Grad-Ziels gegenüber dem 4-Grad-Szenario wird in den folgenden vier Abbildungen sehr deutlich. Hier werden der Bedarf der Stoffe für LIA für 2015, 2035 und 2050 und den beiden Szenarien verglichen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit diese Rohstoffe nicht nur über Primärförderung zu gewinnen, sondern auch über Sekundärförderung z.B. Recycling. Dieser Anteil wird hier schraffiert dargestellt.



Abbildung 24: Globaler Graphitbedarf in Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge 2015, 2030, 2050 in den Szenarien 2DS und 4DS und Sekundärmaterialpotenziale (in Tonnen) (Buchert, Degreif, & Dolega, 2017, S. 31)

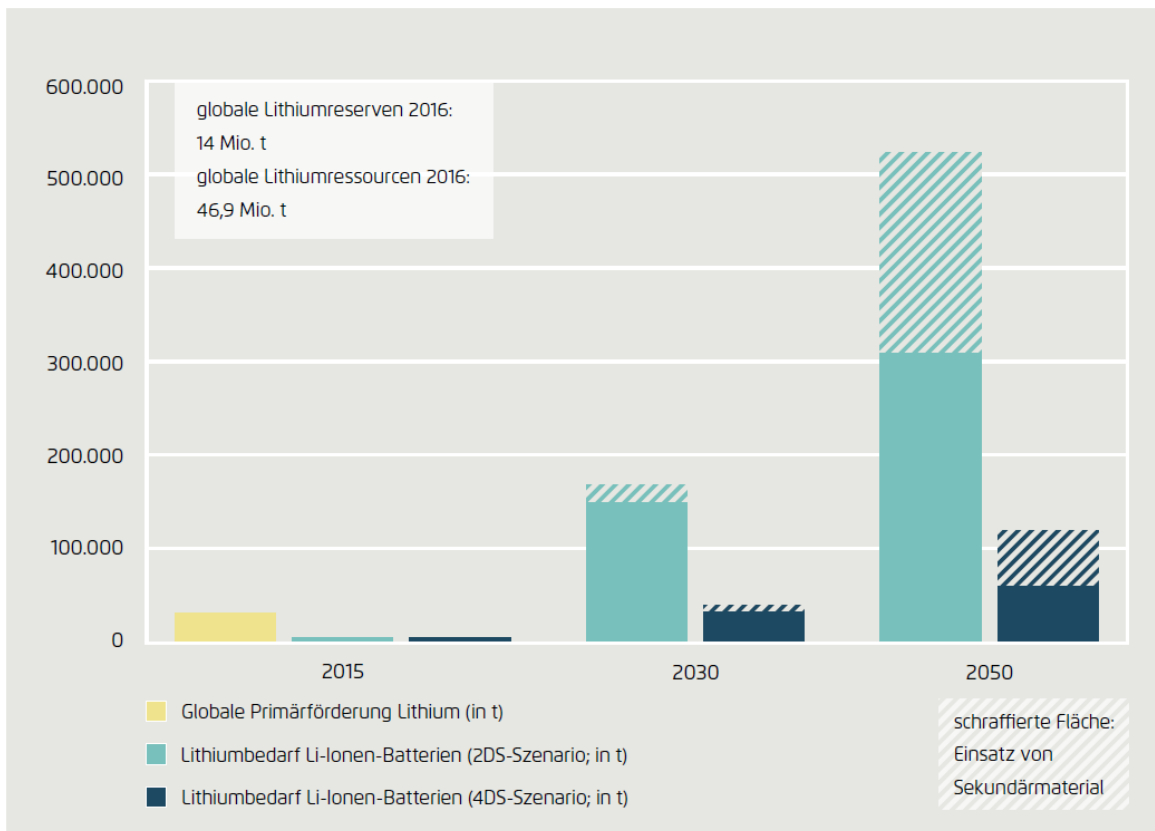


Abbildung 25: Globaler Lithiumbedarf in Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge 2015, 2030, 2050 in den Szenarien 2DS und 4DS und Sekundärmaterialpotenziale (in Tonnen) (Buchert, Degreif, & Dolega, 2017, S. 26)



Abbildung 26: Globaler Nickelbedarf in Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge 2015, 2030, 2050 in den Szenarien 2DS und 4DS und Sekundärmaterialpotenziale (in Tonnen) (Buchert, Degreif, & Dolega, 2017, S. 30)

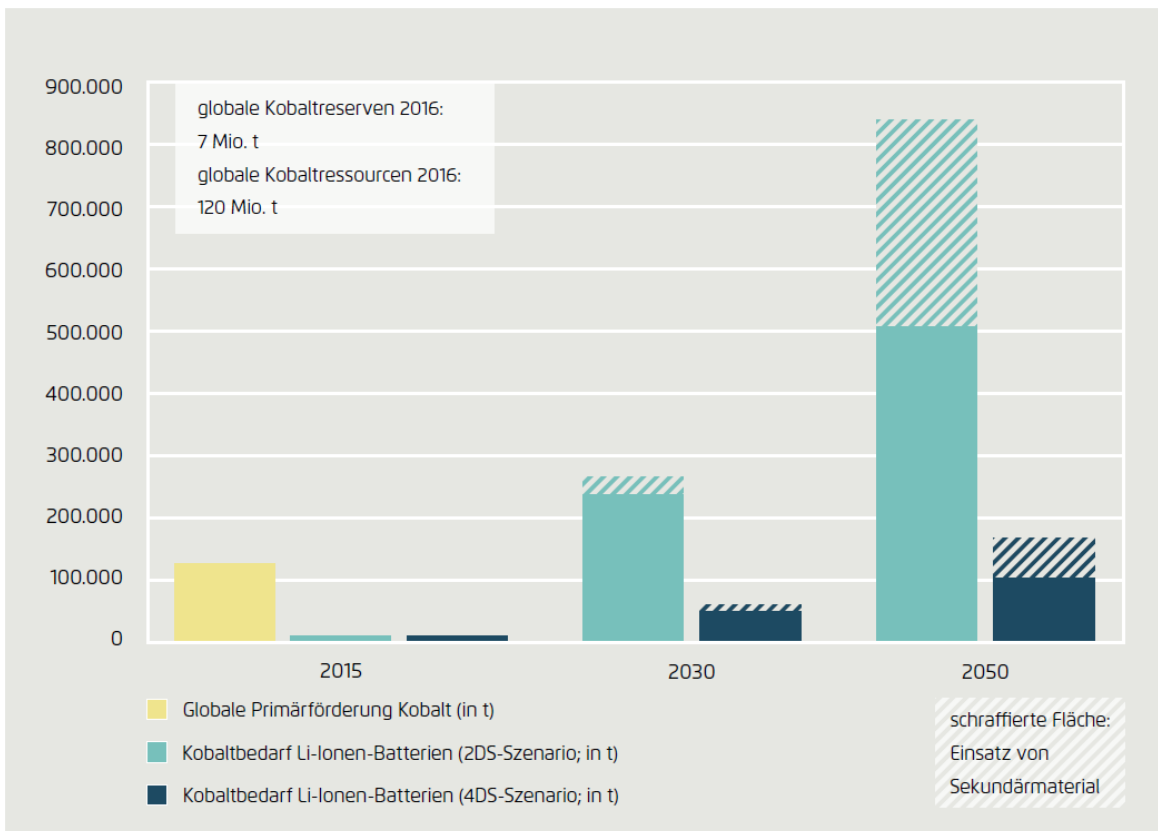


Abbildung 27: Globaler Kobaltbedarf in Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge 2015, 2030, 2050 in den Szenarien 2DS und 4DS und Sekundärmaterialpotenziale (in Tonnen) (Buchert, Degreif, & Dolega, 2017, S. 28)

Graphit und Lithium sind zentrale Bestandteile aller LIA-Typen, sodass der Bedarf 2050 für die Einhaltung des 2-Grad-Ziels deutlich ansteigt und die derzeitige globale Primärförderung übertreffen wird, wodurch die Förderung erhöht werden müsste, wie in Abbildung 24 und Abbildung 25 gezeigt wird. In dem Fall des 4DS-Szenarios ist eine Erhöhung der Graphitförderung allerdings nicht von Nöten, da die derzeitige Förderung nicht übertroffen wird und Graphit synthetisch hergestellt werden kann. Dadurch ist eine Primärförderung nicht zwingend notwendig. Bei Lithium hingegen ist auch für das 4Ds-Szenario eine Erhöhung der Primärförderung erforderlich, doch durch ambitionierte Forschungsprojekte zum Recycling von Lithium, liegt die Vermutung nahe, dass es ebenso als Sekundärrohstoff eingesetzt werden kann. (Buchert, Degreif, & Dolega, 2017)

Um eine möglichst hohe Energiedichte der Akkus zu erreichen, werden häufig Nickel und Kobalt, hier in Abbildung 26 und Abbildung 27 dargestellt, eingesetzt, doch sie finden sich nicht in allen Akkus wieder. Trotzdem steigt der Bedarf, wie bei Graphit und Lithium, von Nickel und Kobalt für die Einhaltung des 2DS-Szenarios deutlich an und die derzeitige globale Primärförderung wird im Jahre 2050 übertroffen, wodurch die Förderung erhöht werden müsste. Da Kobalt, ebenso wie Nickel, aber bereits erfolgreich recycelt werden kann, soll es ebenso als Sekundärrohstoff genutzt werden. Das entlastet die Förderrate und gleichzeitig die Umwelt. Dadurch wäre eine Erhöhung der Primärförderung nur zum Teil nötig.

Zusätzlich sind die globalen Reserven und Ressourcen für die Rohstoffe Graphit, Lithium und Nickel bei weitem ausreichend. Nur die globalen Reserven von Kobalt sind deutlich geringer, wodurch eine Knappheit und zeitgleicher Kostenanstieg von Kobalt entstehen könnte. Aus diesem Grund und da Kobalt als „Konfliktmaterial“ klassifiziert ist, soll der Kobaltgehalt zukünftig minimiert werden. (Buchert, Degreif, & Dolega, 2017)

## 9 Fazit

Das Recycling von LIAs im Bereich der E-Mobilität bekommt einen immer größer werdenden Stellenwert. Viele wissenschaftliche Arbeiten haben sich bereits mit den verschiedenen Verfahren des Recyclings, sowie den ökologischen und ökonomischen Auswirkungen durch den steigenden Einsatz von LIAs auseinandergesetzt.

So eignet sich Lithium mit seinen Eigenschaften hervorragend für den Einsatz in mobilen Akkumulatoren und sorgt für eine hohe Energiedichte. Durch die steigende Nachfrage und den damit verbundenem Preisanstieg werden in Zukunft immer mehr natürliche Vorkommen wirtschaftlich abbaubar sein. Dies betrifft auch weitere wichtige Rohstoffe, z.B. Mangan, Nickel und Kobalt. Durch ihre speziellen Eigenschaften sind sie für die Funktion der Akkus immens wichtig, bergen aber auch Risiken. Vor allem zur Gewinnung der Metalle aus dem Gestein sind aufwendige und damit energieintensive Verfahren nötig. Abhängig von den jeweils gesetzlich geltenden Regelungen kommt es in verschiedenen Ländern zu unterschiedlich starken Umweltauswirkungen. Während der Umweltschutz in Südamerika und Afrika fast keine Rolle spielt, greifen in Industrie-Nationen wie Australien und Portugal entsprechende Gesetze für Abbau von Lithium und minimieren mögliche Umweltauswirkungen. Hier sollte in Zukunft vor allem der Gebrauch von Kobalt weitestgehend eingeschränkt werden. Zwar bietet es eine hohe Energiedichte, doch die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen in einem Land wie der Demokratischen Republik Kongo sind enorm. Menschen werden für die Rohstoffgewinnung ausgebeutet und müssen unter stark gesundheitsschädlichen Bedingungen arbeiten. Zusätzlich werden Ökosysteme verändert bzw. zerstört und das Grundwasser kontaminiert. Doch durch Regelungen wie der Klassifizierung von Kobalt als „Konfliktmaterial“ ist schon der erste Schritt in die richtige Richtung unternommen worden. Außerdem sollte häufiger Kobalt durch Nickel ersetzt werden, da eine ähnlich hohe Energiedichte in der Akkuzelle erreicht werden kann.

Ein wichtiger werdendes Thema in Bezug auf LIAs sind SL-Anwendungen. Durch einen zweiten Einsatz in neuen Anwendungen kann die Lebensdauer bis zu zehn Jahren verlängert werden, was eine Verbesserung der Ökobilanz ist. SL-Anwendungsfelder sind nach jetzigem Stand vor allem kleine Anwendungen, stationäre Speicher, die elektrische Infrastruktur und die E-Mobilität. Da dieses Thema aber erst vor einigen Jahren aufgekommen ist, bestehen hier noch einige Probleme und somit ein hoher Handlungsbedarf. So ist eine Standardisierung des Modulaufbaus sinnvoll, damit die Wiederaufbereitung, sowie die Kombination verschiedener LIAs erleichtert wird. Die Entwicklung von Alterungsschnelltests ermöglicht eine schnellere Erfassung des SoHs und generell einen besseren Einblick zur Beurteilung von Alterungseffekten bei LIAs und deren Ursachen. Außerdem ist die Verminderung von Alterungseffekten in der SL-Anwendung ein wichtiger Forschungspunkt. Auch eine Infrastruktur, mit Transportwegen, Sammelstellen und Wiederaufbereitungsanlagen, für SL-Konzepte muss neu geschaffen werden. Hier ist vor allem Deutschland durch die zentrale Lage in Europa und auf Grund der bedeutenden Autoindustrie als geeigneter Standort in Erwägung zu ziehen. Durch Verbesserungen und Neuerschließungen in diesen Bereichen können die Erträge, bzw. die Wirtschaftlichkeit der Wiederaufbereitung erhöht werden.

Auch beim Recycling treten derzeit noch Probleme und Hindernisse für die Unternehmen auf. Wie bereits erwähnt ist die Variantenvielfalt der verschiedenen Akkus eine Herausforderung, welche die einhergehenden Verfahrensschritte verkomplizieren. Unsicherheit geben auch die Preisentwicklungen der Rohstoffe, die große Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit und damit auf die Gewinnschwellen haben. Zusätzlich bieten die bestehenden Verfahren die Rückgewinnung von nur einem kleinen Teil der Wertstoffe an. Derzeit müssen Recyclingverfahren für Batterien und Akkus nur eine Rückholquoten-Pflicht von 45 % erfüllen. Zum jetzigen Zeitpunkt ist die Erhöhung der Quote nötig, um die Industrie zu der Weiterentwicklung ihrer Verfahren zu drängen. Risiken bestehen, wie bei der

SL-Anwendung, im Bereich der Infrastruktur. Diese ist für LIAs noch nicht weit genug ausgebaut, was an der hohen Planungskomplexität liegt. Außerdem sind Recyclingverfahren in Deutschland gesetzlich Pflicht um Ressourcen zu schonen. Doch sollten diese Verfahren wirtschaftlich nicht tragbar sein, ist eine Weiterentwicklung des Recyclingsystems gefährdet.

Gleichzeitig hat das Recycling von LIAs ein großes Potential und bietet viele Chancen der Verbesserung. So kann durch die Rückgewinnung von Rohstoffen zum Schutz der Umwelt beitragen und hohen Einfluss auf die Rohstoffversorgung haben. Zudem entstehen deutliche Einsparungen von THG-Emissionen beim Einsatz der LithioRec- und EcoBatRec-Verfahren. Zwar ist der prozentuale Anteil der Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Bilanz an der Gesamtbilanz eines EFs noch relativ gering, doch auch hier ist ein Trend der Verbesserung zu sehen. Vor allem bei einer Erweiterung der EE zur Stromerzeugung können die THG-Emissionen weiter gesenkt werden. Somit ist insgesamt ein starkes Einsparpotential vorhanden. Zusätzlich zeigt die Autoindustrie großes Interesse an der Förderung von neuen Recyclingverfahren und unterstützt die Forschung. Dies trägt zusätzlich zu einer ertragreichen Wirtschaftlichkeit der Verfahren bei und steigert gleichzeitig die gesellschaftliche Akzeptanz von EF und somit auch die Anzahl der EF-Verkäufe, denn sowohl das Recycling als auch die Wiederaufbereitung zum SL sind stark abhängig von der Anzahl der verfügbaren LIAs.

Nach Vorbild des Maßnahmenpapiers zur Studie "Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen" (Rahimzei et al., 2016) ist der Aufbau einer Stakeholder-Plattform in der alle Beteiligten (Politik, Wirtschaftsvertreter (Batteriehersteller, Fahrzeughersteller, Recyclingunternehmen), Forschung) sich austauschen und über eine nachhaltige Umsetzung (SL und Recycling) diskutieren sinnvoll. Ein positives Beispiel einer ganzheitlichen Betrachtung aus der Praxis ist, das in Kapitel 5.1 erwähnte, Projekt von Daimler, The Mobility House etc. Hier zeigt sich, dass die Wirtschaft die Problematik erkannt hat und sich aktiv an einer Lösung beteiligen möchte.

## Literaturverzeichnis

ADR (2015): Gesetz zu dem Europäischen Übereinkommen vom 30. September 1957 über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR) vom 18. August 1969 (BGBl. 1969 II S. 1489), das zuletzt durch Artikel 486 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist.

Al Barazi, S., Stähler, U., Vetter, S., Schütte, Philip, Liedtke, M., et al. (2017). *KOBALT AUS DER DR KONGO – POTENZIALE, RISIKEN UND BEDEUTUNG FÜR DEN KOBALTMARKT*.  
Abgerufen am 11. März 2018 von [www.deutsche-rohstoffagentur.de](http://www.deutsche-rohstoffagentur.de): [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity\\_Top\\_News/Rohstoffwirtschaft/53\\_kobalt-aus-der-dr-kongo.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/53_kobalt-aus-der-dr-kongo.pdf?__blob=publicationFile&v=2)

BattG (2009): Batteriegesetz vom 25. Juni 2009 (BGBl. I S. 1582), das zuletzt durch Artikel 6 Absatz 10 des Gesetzes vom 13. April 2017 (BGBl. I S. 872) geändert worden ist.

Bertau, M., Müller, A., Fröhlich, P., & Katzberg, M. (2013). *Industrielle Anorganische Chemie* (4. Auflage Ausg.). Weinheim: Wiley-VCH.  
ISBN-10: 3527330194

BMW AG. [bmw.de](http://bmw.de).  
Abgerufen am 11. März 2018 von [https://www.bmw.de/content/dam/bmw/marketDE/bmw\\_de/topics/offers-and-services/warranty/pdf/BMWi-Battery-Certificate.pdf.asset.1490193447915.pdf](https://www.bmw.de/content/dam/bmw/marketDE/bmw_de/topics/offers-and-services/warranty/pdf/BMWi-Battery-Certificate.pdf.asset.1490193447915.pdf)

BMW AG. (Oktober 2015). [www.bmwgroup.com](http://www.bmwgroup.com).  
Abgerufen am 26. Februar 2018 von [https://www.bmwgroup.com/content/dam/bmw-group-websites/bmwgroup\\_com/responsibility/downloads/de/2015/Umwelterklaerung\\_BMW\\_i3.pdf](https://www.bmwgroup.com/content/dam/bmw-group-websites/bmwgroup_com/responsibility/downloads/de/2015/Umwelterklaerung_BMW_i3.pdf)

Buchert, M., & Sutter, J. (2016). *Aktualisierte Ökobilanzen zum Recyclingverfahren LithoRec II für Lithium-Ionen-Batterien*. Darmstadt: Öko-Institut e.V.  
Abgerufen am 2. März 2018: <https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2017-01/LithoRec%20II-LCA-Update%202016.pdf>

Buchert, M., & Sutter, J. (2016). *Aktualisierte Ökobilanzen zum Recyclingverfahren EcoBatRec für Lithium-Ionen-Batterien*. Darmstadt: Öko-Institut e.V.  
Abgerufen am 2. März 2018: URL: <https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2017-01/EcoBatRec-LCA-Update%202016.pdf>

Buchert, M., Degreif, S., & Dolega, P. (Oktober 2017). *Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität. Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen*.  
Abgerufen am 30. Januar 2018 von [www.agora-verkehrswende.de](http://www.agora-verkehrswende.de): [https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige\\_Rohstoffversorgung\\_Elektromobilitaet/Agora\\_Verkehrswende\\_Synthesepapier\\_WEB.pdf](https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Synthesepapier_WEB.pdf)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. (2015). [www.bmub.bund.de](http://www.bmub.bund.de).  
Abgerufen am 13. März 2018 von [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/paris\\_abkommen\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/paris_abkommen_bf.pdf)



Canals Casals, L., & Amante García, B. (17. März 2017). Second-Life Batteries on a Gas Turbine Power Plant to Provide Area Regulation Services. *Batteries*, 3 (1).  
DOI:10.3390/batteries3010010

Canals Casals, L., Amante García, B., & Cremades, L. V. (Januar 2017). Electric Vehicle Battery Reuse: Preparing for a Second Life. *Journal of Industrial Engineering and Management*, S. 266-285.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.3926/jiem.2009>

Canals Casals, L., Amante García, B., Aguesse, F., & Iturrondobeitia, A. (20. Juni 2015). Second life of electric vehicle batteries: relation between materials degradation and environmental impact. *International Journal of Life Cycle assessment*, S. 82-93.  
DOI:10.1007/s11367-015-0918-3

Cheringo Wagner, T. (2011). The Lithium future - resources, recycling, and the environment. 4 (3), 202-206.  
DOI: 10.1111/j.1755-263X.2011.00166.x

Daimler AG. (13. September 2016). *media.daimler.com*.  
Abgerufen am 11. März 2018 von  
<http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Weltweit-groesster-2nd-Use-Batteriespeicher-geht-ans-Netz.xhtml?oid=13634457>

Die Bundesregierung. (August 2009). *www.erneuerbar-mobil.de*.  
Abgerufen am 02. März 2018 von [https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2016-08/nep\\_09\\_bmu\\_bf.pdf](https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2016-08/nep_09_bmu_bf.pdf)

Dorfner Analysenzentrum und Anlagenplanungsgesellschaft mbH. *Conversion of Spodumene to Lithium Chemicals*.  
Abgerufen am 10. Januar 2018 von <http://www.anzaplan.com/strategic-minerals-metals/lithium/download/>

Dunn, J., Gaines, L., Barnes, M., Sullivan, J., & Wang, M. (2012). *Material and Energy Flows in the Materials - Production, Assembly, and End-of-Life Stages of the Automotive Lithium-Ion Battery Life Cycle*. Argonne, Illinois: Argonne National Laboratory, Chicago.

Ecker, M., & Sauer, D. U. (1. Januar 2013). Batterietechnik Lithium-ionen-Batterien. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* (1), S. 88.

EEG (2017): Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 17. Juli 2017 (BGBl. I S. 2532) geändert worden ist.

Fischhaber, S., Regett, A., Schuster, S. F., & Hesse, H. (2016). *Studie: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen. Analyse von Nachnutzungsanwendungen, ökonomischen und ökologischen Potenzialen*. Frankfurt am Main: Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW).

Graf, C. (2013). Kathodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien. In R. Korthauer (Hrsg.), *Handbuch Lithium-ionen-Batterien* (S. 40). Heidelberg: Springer-Verlag.  
DOI: 10.1007/978-3-642-30653-2

Gruber, P. W., Medina, P. A., Keoleian, G. A., Kesler, S. E., Everson, M. P., & Wallington, T. J. (2011). Global Lithium Availability. A Constraint for Electric Vehicles? *Journal of Industrial Ecology*, 15 (5), S. 760-775.

DOI: 10.1111/j.1530-9290.2011.00359.x

Helms, H., Jöhrens, J., Kämper, C., Giegrich, J., Liebich, A., Vogt, R., et al. (2016). *Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen*. (Umweltbundesamt, Hrsg.)

Abgerufen am 28. Februar 2018 von [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de):

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_27\\_2016\\_umweltbilanz\\_von\\_elektrofahrzeugen.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_27_2016_umweltbilanz_von_elektrofahrzeugen.pdf)

Hoyer, C. (2015). Metallische Rohstoffe für die Lithium-Ionen-Technologie. In *Strategische Planung des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen in Deutschland* (S. 28 ff.).

Braunschweig: Springer Verlag.

DOI: 10.1007/978-3-658-10274-6

Hoyer, C. (2015). Recyclingprozesse für Lithium-Ionen-Batterien. In C. Hoyer, *Strategische Planung des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen in Deutschland* (S. 55 ff.).

Braunschweig: Springer-Verlag.

DOI: 10.1007/978-3-658-10274-6

Hoyer, C. (2015). *Strategische Planung von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen in Deutschland*. Springer Gabler.

DOI: 10.1007/978-3-658-10274-6

Icha, P., & Kuhs, G. (2017). *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2016*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

ISSN: 1862-4359

Jaskula, B. W. (2016). *Mineral Commodity Summaries 2016*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.

Karle, A. (2015). *Elektromobilität. Grundlagen und Praxis*. München: Carl Hanser Verlag.

ISBN: 978-3-446-44339-6

Korthauer, R. (2013). *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Heidelberg: Springer Vieweg.

DOI: 10.1007/978-3-642-30653-2

Kraftfahrt-Bundesamt (Hrsg.). (15. Dezember 2017). *CO<sub>2</sub>-Emissions- und Kraftstoffverbrauchs-Typprüfwerte von Kraftfahrzeugen zur Personenbeförderung mit höchstens neun Sitzplätzen und Wohnmobilen*.

Abgerufen am 27. Februar 2018 von [www.kba.de](http://www.kba.de):

[https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Fahrzeugtechnik/SV/sv222\\_m1\\_kraft\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=18](https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Fahrzeugtechnik/SV/sv222_m1_kraft_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=18)

Kraftfahrtbundesamt. (2018). *Jahresbilanz der Neuzulassungen 2017*.

Abgerufen am 12. März 2018 von [www.kba.de](http://www.kba.de):

[https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/n\\_jahresbilanz.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/n_jahresbilanz.html)

Kwade, A., & Bärwaldt, G. (2012). *Recycling von Lithium-Ionen-Batterien*. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig. Niedersächsisches Forschungszentrum Fahrzeugtechnik.

Laserna-Martinez, E., Sarasketa-Zabala, E., Stroe, D.-I., Swierczynski, M., Warnecke, A., Timmermans, J., et al. (2016). Evaluation of Lithium-ion Battery Second Life Performance and Degradation. In IEEE (Hrsg.), *Energy Conversion and Exposition (ECCE)*. Milwaukee.  
DOI: 10.1109/ECCE.2016.7854977

Leuthner, S. (2013). Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien. In R. Korthauer (Hrsg.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien* (S. 13-19). Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.  
DOI: 10.1007/978-3-642-30653-2

*Lithium Mining and Environmental Impact.*

Abgerufen am 13. März 2018 von <http://www.lithiummine.com/lithium-mining-and-environmental-impact>

M. Buchert, J. S. (14. Dezember 2016). *Aktualisierte Ökobilanzen zum Recyclingverfahren LithoRec II für Lithium-Ionen-Batterien (Stand 09/2016)*. (Ö.-I. e.V., Hrsg.)  
Abgerufen am 02. März 2018 von [www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2017-01/LithoRec%20II-LCA-Update%202016.pdf](http://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2017-01/LithoRec%20II-LCA-Update%202016.pdf)

Marscheider-Weidemann, F. (2016). *Ergebnisse der Studie: "Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016"*. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung.

McDowell, J. (1. Dezember 2016). *linkedin.com*.

Abgerufen am 2. Dezember 2017 von <https://www.linkedin.com/pulse/energy-storage-innovation-lithium-resources-nirvana-julian-mcdowell>

Molotova, E., Pandya, J., & Klein, J. (2013). *Catalysts and metal recycling*. Hamburg: Berenberg Equity Research.

P3 Energy and Storage GmbH; Westfälische Wilhelms-Universität Münster Institut für Wirtschaftsinformatik. *EOL-IS*.

Abgerufen am 10. März 2018 von <http://www.eol-is.de/projekt>

Pophanken, A.-K., Friedmann, D., Friedrich, B., & Heller, C. (2013). *Manganknollen - zukünftige Rohstoffbasis für Technologiemetalle?* Joachimsthal: 46. Metallurgisches Seminar.  
DOI: 10.13140/RG.2.1.4963.8809

Rüttinger, L., Treimer, R., Tiess, G., & Griestop, L. (2014). *Fallstudie zu den Umwelt- und Sozialauswirkungen der Kupfergewinnung in Mopani, Sambia*. Berlin: adelphi.

Rahimzei, E., Regett, A., Fischhaber, S., & Schuster, S. F. (2016). *Maßnahmenpapier zur Studie: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen*. Frankfurt am Main: Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW).

Rahimzei, E., Sann, K., & Vogel, M. (2015). *Kompendium: Li-Ionen-Batterien. Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen*. Frankfurt am Main: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.

Renault Suisse SA. *renault-suisse.ch*.

Abgerufen am 11. März 2018 von <https://www.renault-suisse.ch/renaultch-download/Neuer-Zoe-ZE-CH-DE-Preisliste-Batteriemiete.pdf>

*Retriev Technologies.*

Abgerufen am 03. März 2018 von <http://www.retrievtech.com>

Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge - Erklärung der Kommission.

Rothermel, S. (2016). *Recycling of Lithium Ion Batteries and Development of Alternative Energy Storage Devices*. Münster: Institut für Physikalische Chemie MEET Batterieforschungszentrum.

Sander, K., Wagner, L., Sanden, J., & Wilts, H. (2017). *Entwicklung von Lösungsvorschlägen, einschließlich rechtlicher Instrumente, zur Verbesserung der Datenlage beim Verbleib von Altfahrzeugen. Abschlussbericht*. Deßau-Roßlau: Umweltbundesamt.

ISSN: 1862-4359

Schröder, A. (22. September 2016). *Deutschlandfunk*.

Abgerufen am 08. März 2018 von [http://www.deutschlandfunk.de/projekt-second-life-battery-altbatterien-zu-wertvoll-fuer.697.de.html?dram:article\\_id=366553](http://www.deutschlandfunk.de/projekt-second-life-battery-altbatterien-zu-wertvoll-fuer.697.de.html?dram:article_id=366553)

Schrader, C. (04. November 2017). *www.spektrum.de*.

Abgerufen am 28. Februar 2018 von <http://www.spektrum.de/news/wie-ist-die-umweltbilanz-von-elektroautos/1514423>

SGS Mongolia. (2013). *Hard Rock Lithium Processing*.

Abgerufen am 10. Januar 2018 von <http://www.sgs.com/-/media/global/documents/flyers-and-leaflets/sgs-min-wa109-hard-rock-lithium-processing-en-11.pdf>

Statistisches Bundesamt. (21. Dezember 2017). *www.destatis.de*.

Abgerufen am 28. Februar 2018 von

<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Energie/Erzeugung/Tabellen/Brutto-stromerzeugung.html>

Stepan, M. (03. März 2008). *www.faz.net*.

Abgerufen am 15. März 2018 von <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/die-elektroautos-rollen-an-11394419.html>

Talens Peiró, L., Villalba Méndez, G., & Ayres, R. U. (2013). Lithium: Sources, Production, Uses, and Recovery Outlook. *JOM. The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, 65 (8), 986–996.

DOI: 10.1007/s11837-013-0666-4

*Umicore AG & Co. KG.*

Abgerufen am 02. März 2018 von <http://www.umicore.com/en/about/about-umicore/>

Umweltbundesamt. (2016). *Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2014*. Deutschland: Umweltbundesamt.

Umweltbundesamt. (20. Dezember 2017). *www.umweltbundesamt.de*.

Abgerufen am 28. Februar 2018 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#textpart-1>

Vest, M. (2016). *Weiterentwicklung des pyrometallurgischen IME Recyclingverfahrens für Lithium-Ionen-Batterien von Elektrofahrzeugen*. Aachen Shaker Verlag.  
ISBN: 978-3-8440-4320-4

Volkswagen AG. (Januar 2014). [www.rosier.de](http://www.rosier.de).  
Abgerufen am 26. Februar 2018 von  
[https://www.rosier.de/fileadmin/01\\_Fahrzeuge/Neuwagen\\_Pkw/Neuheiten/VW/Golf/vw\\_e\\_golf.pdf](https://www.rosier.de/fileadmin/01_Fahrzeuge/Neuwagen_Pkw/Neuheiten/VW/Golf/vw_e_golf.pdf)  
Weyhe, R. (2013). Recycling von Lithium-Ion-Batterien. In K. J. Thomé-Kozmiensky, & D. Goldmann (Hrsg.), *Recycling und Rohstoffe* (Bd. 6, S. 518-519). Neuruppin, Deutschland: Thomé-Kozmiensky Verlag.

Wiberg, N., & Holleman, A. F. (2007). *Lehrbuch der Anorganischen Chemie* (102. Auflage Ausg.). Berlin: De Gruyter.

Wittmer, D., Erren, M., Lauwigi, C., Ritthoff, M., & Dressler, C. (2011). *Umweltrelevante metallische Rohstoffe*. Wuppertal: Wuppertaler Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH.  
ISSN: 1867-0237