



ENTWICKLUNG EINER WERTSCHÖPFUNGSKETTE FÜR DAS RECYCLING VON LITHIUM-IONEN-BATTERIEN (LIB) IN ÖSTERREICH

Endbericht

Peter Beigl, Silvia Scherhauser, Florian Part, Aleksander Jandric, Stefan Salhofer
Institut für Abfallwirtschaft
Universität für Bodenkultur Wien (BOKU)

Thomas Nigl, Michael Altendorfer, Bettina Rutrecht, Roland Pomberger
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW)
Montanuniversität Leoben

Ina Meyer, Mark Sommer
Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung (WIFO)

Dieser Bericht ist unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY-SA 3.0 AT veröffentlicht.
Weitere Hinweise unter: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/at/>.



Dieses Projekt wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „Zero Emission Mobility“ durchgeführt.

Wien, Juli 2021

Auftraggeber:

Klima- und Energiefonds

Leopold-Ungar-Platz 2 / Stiege 1 / 4.OG / Top 142

1190 Wien

E-Mail: office@klimafonds.gv.at

Internet: <http://www.klimafonds.gv.at>

Auftragnehmer:

BOKU

Universität für Bodenkultur, Institut für Abfallwirtschaft

Muthgasse 107 / 3. Stock

1190 Wien

Email: abf@boku.ac.at

Web: <https://boku.ac.at/wau/abf>

In Kooperation mit

MUL

Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Franz-Josef-Straße 18

8700 Leoben

Email: avaw@unileoben.ac.at

Web: <https://www.avaw-unileoben.at/>

WIFO

Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung

Arsenal, Objekt 20

1030 Wien

Email: office@wifo.ac.at

Web: <https://www.wifo.ac.at/>

Vorwort

Das Projekt-Konsortium bedankt sich bei allen Personen und Institutionen, die uns bei den Recherchen zu diesem Projekt ihr Vertrauen geschenkt und uns mit Informationen, Daten und persönlichen Einschätzungen unterstützt haben. Die namentliche Nennung von Unternehmen oder Institutionen erfolgt ausschließlich zum Zweck des zusätzlichen Informationsgewinns und dient keinerlei Werbezwecken.

Besonderer Dank gilt auch den Verfassern des Manuskripts "Recycling chains for lithium-ion batteries: A critical examination of current challenges, opportunities, and process dependencies" Stefan Windisch-Kern, Eva Gerold, Aleksander Jandric und Harald Raupenstrauch und Helmut Antrekowitsch, welches als wesentliche Grundlage für Kapitel 4 herangezogen wurde sowie den internen Reviewern und Beratern Gerhard Streicher und Michael Peneder.

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	VI
EXECUTIVE SUMMARY	XVI
1 EINLEITUNG	1
1.1 HINTERGRUND	1
1.2 ZIEL DER STUDIE.....	1
2 MATERIAL UND METHODEN	2
2.1 UNTERSUCHUNGSGEGENSTAND UND DEFINITIONEN.....	2
2.1.1 <i>Batteriearten</i>	2
2.1.2 <i>Klassifizierung von Lithium-Ionen-Batteriezellen</i>	5
2.2 DATEN UND METHODEN.....	8
2.2.1 <i>Quellen</i>	8
2.2.2 <i>LIB Mengenmodellierung</i>	8
2.2.3 <i>Ökonomische Modellierung</i>	9
2.2.4 <i>Stakeholder-Interviews</i>	10
3 DER MARKT UND AKTUELLE TRENDS	13
3.1 RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN	13
3.2 AKTEURE UND ROLLENVERTEILUNG.....	14
3.3 BESTAND AN TRAKTIONS-, INDUSTRIE- UND GERÄTEBATTERIEN UND ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG.....	18
3.4 SICHERHEIT – GEFAHREN (Z.B. BRAND, THERMAL RUNAWAY)	25
3.5 ANLAGENBESTAND ZU AUFBEREITUNG UND BEHANDLUNG VON LIB.....	25
4 DAS LIB-RECYCLING	33
4.1 BESTEHENDE INDUSTRIELLE VERFAHREN IM ÜBERBLICK	33
4.2 VERFAHREN ZUR VORBEHANDLUNG.....	34
4.2.1 <i>Vorsortierung</i>	34
4.2.2 <i>Demontage</i>	35
4.2.3 <i>Verfahren zur Entladung</i>	37
4.2.4 <i>Mechanische Vorbehandlung</i>	39
4.2.5 <i>Pyrolytische Vorbehandlung zur Deaktivierung</i>	39
4.3 METALLURGISCHE VERFAHREN ZUR METALLRÜCKGEWINNUNG.....	40
4.3.1 <i>Hydrometallurgische Verfahren</i>	40
4.3.2 <i>Pyrometallurgische Verfahren</i>	44
4.4 AUSBLICK INNOVATIVER VERFAHREN	46
4.4.1 <i>Kryogene Zerkleinerung</i>	46
4.4.2 <i>Elektrohydraulische Zerkleinerung</i>	47
4.4.3 <i>Froth Flotation – Schaumflotation</i>	47
4.4.4 <i>Elektrolyt-Rückgewinnung durch CO₂-Extraktion</i>	48

4.4.5	<i>Aufbereitung von Kathodenmaterial durch Mikrowellenbehandlung</i>	48
4.4.6	<i>Direktes Recycling</i>	49
4.4.7	<i>Graphitrecycling</i>	50
4.5	FAZIT.....	50
5	POTENZIALE UND HERAUSFORDERUNGEN EINER WERTSCHÖPFUNGSKETTE FÜR DAS RECYCLING VON LIB – MEINUNGSBILD DER STAKEHOLDER	51
5.1	DIE BEDEUTUNG EINER GETRENNTEN SAMMLUNG VON LIB.....	51
5.2	DEN RÜCKLAUF VON BATTERIEN SICHERSTELLEN	52
5.3	DER WEG ZU EINER EFFIZIENTEN SORTIERUNG.....	54
5.4	POTENZIALE FÜR DAS RECYCLING VON LIB.....	55
5.5	ECO-DESIGN ALS CHANCE FÜR EINE EFFIZIENTE NUTZUNG UND VERWERTUNG	57
5.6	DIE BEDEUTUNG DES RE-USE VON EOL-LIB	58
5.7	STANDORTFAKTOREN FÜR LIB RECYCLINGANLAGEN	61
5.8	WIRTSCHAFTSPOLITISCHE INSTRUMENTE UND RAHMENBEDINGUNGEN FÜR EIN WETTBEWERBSFÄHIGES RECYCLING ...	63
5.9	FORSCHUNG & ENTWICKLUNG.....	64
5.10	INTERNATIONALE KONKURRENZ ALS INNOVATIONSTREIBER.....	65
5.11	EINSCHÄTZUNG DER ZUKÜNFTIGEN ENTWICKLUNGEN	65
6	ETABLIERUNG EINES (IDEALEN) KREISLAUFSYSTEMS FÜR LITHIUM-IONEN-BATTERIEN (LIB): ERGEBNISSE DES EXPERT*INNENFORUMS	68
6.1	GESTALTUNG DER WERTSCHÖPFUNGSKETTE.....	68
6.1.1	<i>Ausgangspunkt und Fragestellung für Sessions</i>	68
6.2	ERGEBNISSE DES EXPERT*INNENFORUMS.....	69
6.2.1	<i>First Life – Batterieproduktion und Erstnutzung (Session 1A)</i>	69
6.2.2	<i>Second Life und Re-Use (Session 1B)</i>	71
6.2.3	<i>Rücknahme und Sammlung (Session 2A)</i>	74
6.2.4	<i>Recycling (Session 2B)</i>	76
6.2.5	<i>Prioritätenreihung von Maßnahmen innerhalb der Wertschöpfungskette</i>	79
7	SZENARIEN UND ÖKONOMISCHE BEWERTUNG VON WERTSCHÖPFUNGSKETTEN FÜR LIB- RECYCLING BIS 2040	81
7.1	MENGENGERÜST ZUM AUFKOMMEN VON EOL-LIB	81
7.2	LIB-MENGENENTWICKLUNG NACH VORDEFINIERTEN SZENARIEN	84
7.3	SZENARIENBESCHREIBUNG FÜR DIE ÖKONOMISCHE MODELLIERUNG	88
7.4	ÖKONOMISCHE EFFEKTE	89
7.4.1	<i>Das Modell WIFO DYNK</i>	89
7.4.2	<i>Eingangsparameter</i>	90
7.4.3	<i>Investitionen</i>	94
7.4.4	<i>Makroökonomische Effekte</i>	95
8	TECHNOLOGIE-ROADMAP UND MAßNAHMENPAKETE	100
8.1	VORSCHLAG FÜR MAßNAHMENPAKETE – MOTIVATION, CHANCEN UND RISIKEN.....	100

8.2	TECHNOLOGIE-ROADMAP.....	107
9	SCHLUSSFOLGERUNG.....	109
10	LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS.....	110
11	ANHANG.....	120
11.1	ANHANG 1 – FRAGENKATALOG EXPERT*INNENINTERVIEWS.....	120
11.2	ANHANG 2 – WORKSHOPBERICHT VOM EXPERT*INNENFORUM LITHIUM-IONEN-BATTERIEN	130
11.3	ANHANG 3 – ÖKONOMISCHE ANALYSE	131

Kurzfassung

Hintergrund und Ziele der Studie

Das aktuelle Regierungsprogramm 2020-2024¹ zielt unter anderem darauf ab, geeignete Maßnahmen zur CO₂-Reduktion im Hinblick auf das Ziel der Klimaneutralität bis spätestens 2040 zu entwickeln und umzusetzen. Als konkrete Beispiele werden auch die Bereiche E-Mobilität und Modelle zur Kreislaufwirtschaft genannt. Im Rahmen der Klima- und Energiestrategie **#mission2030** ist der Fokus klar auf die Zero Emission Mobilität im Straßenverkehr ausgerichtet, wobei die Themen Ressourcenverbrauch, Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe und Recycling im Rahmen des Kreislaufwirtschaftspaket der Europäischen Kommission aktiv zu berücksichtigen sind.

Die Bedeutung von Elektrofahrzeugen und damit die Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien (LIB) wird auf Basis des Klimaneutralitätsziels deutlich zunehmen. In Österreich wird ein maßgeblicher Anstieg des Anteils an elektrisch angetriebenen Fahrzeugen erwartet. Maßnahmen, um die knappen und wertvollen Materialien der Elektromobilität, insbesondere der Lithium-Ionen-Batterien (LIB), in einer kreislauforientierten Wirtschaft zu halten, sind frühzeitig zu setzen und erfordern fundierte Entscheidungen hinsichtlich Recycling, Re-Use, Technologiemix, Systemaufbau und wirtschaftspolitischen Rahmen.

Ziel der Studie ist die Entwicklung einer Wertschöpfungskette für das Recycling von LIB. Es werden die Rahmenbedingungen für einen vollständigen Recyclingprozess in Österreich aufgezeigt, bewertet und eine Technologie-Roadmap für ein ganzheitliches System – von Second-Life-Ansätzen bis zu Rücknahme- bzw. Sammelsystemen und innovativen Recyclingtechnologien – erstellt. Schließlich wird diese Roadmap auf der Grundlage eines kohlenstoffarmen Energieszenarios der österreichischen Wirtschaft mit zirkulärer Ressourcennutzung hinsichtlich der wirtschaftlichen Effekte analysiert.

Die Ergebnisse umfassen:

- einen Aktionsplan mit wirtschaftspolitischen Instrumenten zum Aufbau und zur Entwicklung einer LIB-Wertschöpfungskette in Österreich,
- eine Technologie-Roadmap für ganzheitliche Optionen für das LIB-Recycling
- Empfehlungen für Design for Recycling, Design for Re-Use sowie Design for Disassembly und
- eine ökonomische Bewertung des Wertschöpfungspotenzials und der Beschäftigungseffekte des Recyclings von LIB.

Nicht-Ziel dieser Studie ist eine genaue Prognose der in Verkehr gesetzten Mengen und des zu erwartenden Abfallaufkommens an LIB bis zum Jahr 2040. Aufgrund der Unsicherheiten der Markt- und Technologieentwicklung werden im Rahmen dieser Studie Szenarien auf Basis von Annahmen entwickelt und davon abgeleitete Maßnahmen beurteilt. Weitere Nicht-Ziele umfassen eine ökobilanzielle Bewertung von Varianten oder Technologien, sowie eine Bewertung von gesetzlichen Grundlagen für In-Verkehr-Bringung oder Behandlung von LIB.

¹ Aus Verantwortung für Österreich. Regierungsprogramm 2020–2024, Online verfügbar unter <https://www.bundkanzleramt.gv.at/dam/jcr:7b9e6755-2115-440c-b2ec-cbf64a931aa8/RegProgramm-lang.pdf>, zuletzt geprüft am 22.06.2021.

Ergebnisse

Auf Basis eines umfassenden Reviews bestehender und innovativer Recyclingtechnologien, Expert*inneninterviews und interaktivem Dialog mit allen Stakeholdergruppen sowie einer makroökonomischen Modellierung auf Basis von Szenarien zur Erreichung der Klimaziele von Paris, bieten die Ergebnisse dieser Studie eine Grundlage für Entscheidungsträger*innen, zukünftige strategische Maßnahmen auf dem Gebiet der Elektromobilität besser abwägen zu können.

Die Entscheidungsgrundlagen umfassen

- eine Darstellung und Beurteilung der derzeit rasanten technologischen Entwicklung im Bereich des Recyclings von EoL-LIB in ganzheitlicher Betrachtung mit Vor- und Nachbehandlungsschritten,
- die umfassende Darstellung von Potenzialen und Herausforderungen aus Sicht aller relevanten Stakeholdergruppen,
- die szenariobasierte Abschätzung des LIB-Aufkommens in Abhängigkeit von Situierung künftiger Recyclinganlagen in oder außerhalb Österreichs, dem Stellenwert von Second Life sowie Import und Export von EoL-LIB und die daraus resultierenden, ökonomischen Effekte aus Investitionen und Betrieb des Recyclings und nach Umsetzungszeiträumen gestaffelte Maßnahmenpakete inklusive Technologie-Roadmap.

Bedarf an ganzheitlichen Verwertungstechnologien

Die Technologie der Lithium-Ionen-Batterie hat sich rasant entwickelt und wird es aller Voraussicht nach auch weiterhin. Dabei forscht man an den unterschiedlichen Bauformen, aber vor allem in der Performance der Zellchemie. Neben der Reduktion von wertvollen Metallen, wird vor allem versucht die Energiedichte zu erhöhen. Diese leistungsstarken Batterien bergen jedoch ein großes Sicherheitsrisiko, wenn sie unsachgemäß behandelt werden. Insbesondere Entsorgungsunternehmen sehen sich daher schon heute mit steigenden Kosten – ob Sicherheitsvorkehrungen oder Aufwendungen für Versicherungen – zum Schutz vor Bränden, beispielsweise durch einen Thermal Runaway, konfrontiert.

Nicht nur der Sicherheitsaspekt birgt große Herausforderungen. Mit den Zielen der Energiewende, der Dekarbonisierung im Verkehrssektor (Zero Emission Mobilität) oder der Bereitstellung „grüner“ Energie (Klima- und Energiestrategie #mission2030, Green Deal der EU), werden enorme Mengen an Energiespeicher benötigt. Dies bedingt auch einen großen Ressourcenverbrauch. Daher ist es unumgänglich, die in den LIB verwendeten Rohstoffe auch wieder in den Kreislauf zu bringen und nicht, wie in einem linearen Wirtschaftssystem lediglich thermisch zu verwerten oder zu deponieren.

Um im Sinne einer Kreislaufwirtschaft aus einem Produkt wieder ein gleichwertiges Produkt zu erzeugen, bedarf es einer Abstimmung aller Beteiligten der gesamten Wertschöpfungskette. Schon in der Entwicklung müssen daher die Aspekte des Ökodesigns berücksichtigt werden. Dies beeinflusst zwar die Produktion, ermöglicht aber im Sinne der erweiterten Herstellerverantwortung den Rücklauf von EoL-LIB in den Recyclingprozess und die Wiedergewinnung von Ressourcen. Besonders hier steht man vor großen Herausforderungen und Forschungsfragen. Es fehlt einerseits an der Kommunikation entlang der gesamten Wertschöpfungskette (Wissen über Zellchemie, Zugang zum Batterie-Management-System, etc). Andererseits braucht es eine sehr gut abgestimmte Kombination von Vor- und Nachbehandlung, um maximale Recyclingquoten für alle Materialien zu erreichen.

Die hohen Unsicherheiten im Hinblick auf das zukünftige Aufkommen von EoL-LIB macht eine Prognose, ob oder besser gesagt ab wann eine Recyclinganlage in Österreich gebaut werden soll, unmöglich. Dasselbe gilt für die zu verwendende Recyclingtechnologie. Obwohl Anlagen im industriellen Maßstab bestehen, gibt es hier noch keine vorherrschende Methode zur Rückgewinnung der Batteriematerialien. Wie im Kapitel 4 gezeigt, wird aktuell in vielen Richtungen geforscht. Der derzeitige Trend lässt auf kleine dezentrale Anlagen zur Demontage und Deaktivierung sowie zentral gelegene Aufbereitungsanlagen schließen – unabhängig welche Verfahren schlussendlich eingesetzt werden. Jedoch hängt eine Erhöhung der Recyclingquote von einer guten Abstimmung zwischen Vorbehandlung und Aufbereitung ab (Windisch-Kern et al., submitted).

Potenziale und Herausforderungen aus Sicht der Stakeholder

Im Zuge des Projekts wurden entlang der gesamten Wertschöpfungskette Stakeholder identifiziert und in den Prozess in Form von Interviews und eines Workshops mit einbezogen. In den Interviews wurde eine Befragung zu den Potentialen und Herausforderungen der Entwicklung einer Wertschöpfungskette für das Recycling von LIB durchgeführt. Insgesamt wurden 29 Expert*innen für verschiedenste Bereiche der LIB-Wertschöpfungskette, von der Produktion über das Recycling sowie Forschungseinrichtungen und Verwaltung, befragt. Folgende Themenbereiche haben sich als wesentlich herauskristallisiert:

Im Sinne einer Kreislaufwirtschaft legen viele Interviewpartner*innen den Fokus auf das Recycling; indem Batterien ordnungsgemäß gesammelt und möglichst hochwertig verwertet werden sollen. LIB-Recycling wird ein hohes Wertschöpfungspotential zugesprochen, da mit einem starken Zuwachs an Elektrofahrzeugen in den kommenden Jahren zu rechnen ist. Ob sich Österreich als Standort für das Recycling etablieren wird, hänge vor allem von den tatsächlichen Rücklaufmengen ab, die schwer zu prognostizieren sind und die maßgeblich von (illegalen) Exporten von Fahrzeugen beeinflusst werden. Maßnahmen könnten getroffen werden, um der Problematik entgegenzusteuern bzw. vorzugreifen wie z.B. Product-Service-Leistungen oder Leasing-Systeme.

Eine Wiederverwendung (Re-Use) von LIB könne eine hohe Bedeutung einnehmen, um die Lebensdauer einer LIB zu verlängern und damit die Umweltauswirkungen über ihren Lebenszyklus zu verringern. Re-Use könne daher einen Beitrag zu einer effizienteren Ressourcennutzung leisten. Allerdings würden (noch) hohe Kosten für die Logistik und Vorbereitung zur Wiederverwendung, sowie Fragen der Gewährleistung und Weitergabe der Recyclingpflicht dagegensprechen. Hohe Umsetzungspotentiale werden einerseits einer vereinheitlichten Bauweise, einer besseren Effizienz bei Aufbereitung (z.B. durch zerstörungsfreie Zerlegung) und Identifikation der Zellchemie, andererseits der besseren Kenntnis im Bereich des „State of Health“, zur Abschätzung der Restnutzungsdauer und zur optimalen Wiederverwendung, zugesprochen. Der Forschungsbedarf sei noch sehr groß.

Ein die Wertschöpfungskette umspannendes und daher umso wichtigeres Thema ist die getrennte Sammlung von LIB. Durch sie werden eine sichere Lagerung und Transport gewährleistet, sowie alle Wege für eine ordnungsgemäße Verwertung eingeleitet. Die Entsorgung von Gerätebatterien über den Restmüll wurde als ein großes Problem angemerkt. Mehr Bewusstseinsbildung und bessere Kenntnis oder erleichterte Identifikation von LIB wurden als Handlungsfelder genannt.

Grundsätzlich wurde eine zerstörungsfreie Demontage als wesentliche Grundlage für ein effizienteres Recycling aber auch für eine Reparatur oder Wiederverwendung genannt. Standardisierte Bauweisen und Informationsaustausch zwischen Herstellern und Aufbereitern zu Verbindungsmaterialien und gefährlichen Inhaltsstoffen

könnten den Prozess effizienter gestalten. Eine dementsprechende Gestaltung für „Design for Recycling“ (DfR) wurde als Eckpfeiler für Eco-Design von LIB genannt.

Förderungen für R&D-Modellvorhaben bzw. für die R&D-Infrastruktur wurden in der ersten Phase der Implementierung einer Recyclingkette als strategisch wichtig erachtet. Es diene als Starthilfe, um Know-How aufzubauen, voranzutreiben und auf die Entwicklungen von zukünftigen Batteriegenerationen zeitnah zu reagieren. Damit sei es möglich, in Österreich Pilotanlagen zu etablieren, in denen geforscht werden könne. Es wurden beispielhaft Industrie-Wissenschaftskooperationen als erfolgversprechende Unternehmensform genannt und das Beispiel des Research Center Pharmaceutical Engineering GmbH (RCPE) angesprochen. Mit einem derartigen Format ließen sich Förderungsanträge bei der Regierung stellen. Als aussichtsreiche Beispiele wurden auch Verbundforschungsvorhaben aus Universitäten und Industrie in Deutschland erwähnt, in denen die Forschung an Universitäten mit den industriellen Realitäten gekoppelt werde. Über diese Art der Förderung werde auch fachspezifischer Nachwuchs ausgebildet. Letztlich finden die Erkenntnisse aus diesen Bereichen Eingang in die Lehre und Fachkraftausbildung.

Die internationale Konkurrenz im Bereich der Elektromobilität, insbesondere die starke Position im asiatischen oder amerikanischen Raum im Bereich der Zellfertigung und des Recyclings, wurde von einigen Stakeholdern als Treiber für Innovation und Wettbewerbsfähigkeit gedeutet. Der amerikanische Autobauer Tesla, der bei der Wertschöpfung des Autos alle Teilbereiche abdecke, sei ein solcher Innovationstreiber. Von Asien könne man ebenfalls lernen, denn Asien gäbe es innovative Ansätze, um die Probleme, die auch Europa in zehn Jahren vorfinden werde, anzugehen. Die Konkurrenz aus Asien und Amerika sei stark und würde Europa dazu bringen, die E-Mobilität einschließlich aller Recyclingstrategien rasch zu implementieren.

Für den Erfolg einer Recyclingwertschöpfungskette wurden schließlich wirtschaftspolitische Rahmenbedingungen als essenziell betrachtet. Insbesondere Regulierungen und gesetzliche Vorgaben wurden als effektive wirtschaftspolitische Instrumente gewertet. Die neue Batterieverordnung der EU gehe in die richtige Richtung. Es sei sinnvoll, wie jetzt dort anvisiert werde, Vorgaben für Recyclingquoten für kritische Elemente, bzw. Funktionsmaterialien, vorzugeben, die z.B. einen hohen CO₂-Fußabdruck haben oder anderweitig umweltschädlich oder kritisch, im Sinne von knapp seien. Es sei wichtig, dass man von den bisherigen unspezifischen massenbezogenen Recyclingquoten wegkomme. Sie heble qualitativ hochwertiges Recycling aus. So könne z.B. die in der aktuell gültigen Batterierichtlinie erforderliche 50 % massenbasierte Recyclingquote theoretisch erreicht werden, ohne ein Gramm der Funktionsmaterialien Kobalt, Nickel oder Lithium zu recyceln. Das Problem beim derzeitigen Recycling liege im Preiswettbewerb, der zu einer geringen Recyclingqualität führe. Es fehlten Standards, die definieren, was eigentlich erreicht werden solle. Wichtig sei die Festlegung bzw. saubere Definition und Beschreibung der Systemgrenzen: von wo bis wo werde die Recyclingquote berechnet. Es bedürfe einer sauberen Beschreibung der Begriffe „Recycling“ und „Rezyklate“.

CO₂-Steuern wurden als Schlüsselinstrument in der Klimaproblematik bezeichnet, spielten aber bei der Einschätzung der Stakeholder zu den wirtschaftspolitischen Rahmenbedingungen für das Recycling von LIB ebenso wie Ressourcensteuern keine wesentliche Rolle. Lücken gebe es im Bereich der Eco-Design Vorgaben für LIB, die letztlich zentral für das Recycling seien. Ein Stakeholder war der Auffassung, dass Eco-Design Vorgaben auch maßgeblich in die Zulassung von Batterien einfließen sollten.

LIB-Mengenentwicklung nach vordefinierten Szenarien

Für die Abschätzung des Aufkommens an LIB in der End-of-Life Phase (EoL-LIB) in Österreich wurden vier Szenarien entwickelt, um die Variabilität in den Mengen näher zu betrachten. Die Szenarien, wie in Tabelle A abgebildet, unterscheiden sich nach dem Grad der Energiewende, dem Grad der Kreislaufwirtschaft, der Verfügbarkeit von Recyclinganlagen in Österreich oder nur im EU Ausland und der Export- und Importrate von gebrauchten oder alten LIB unterscheiden. Als Ausgangspunkt für die Berechnung der LIB-Mengenentwicklungen fungierten die vom Umweltbundesamt (Wien) entwickelten Energie- und Treibhausgasszenarien im Hinblick auf 2030 und 2050 (UBA 2017). Diese Szenarien wurden auf das aktuelle Ziel des österreichischen Regierungsprogrammes zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2040 angepasst.

Tabelle A: Kernannahmen für die Szenarien

Szenario	Szen_HIGH	Szen_LOW	Szen_TRANS	Szen_WEM
Kurzbeschreibung der Szenarien	Energiewende mit Ziel 2040 und hohem Grad einer Kreislaufwirtschaft	Energiewende mit Ziel 2040 und Recycling in Österreich	Energiewende mit Ziel 2040	Energiewende mit geltenden Maßnahmen 2019
Recycling in Österr.	Ja	Ja	Nein	Nein
Second Life-Anwendung	40 %	20 %	0 %	0 %
Export von gebrauchten E-Fahrzeugen	30 % / 10 % ¹	40 % / 10 % ¹	50 % / 10 % ¹	50 % / 10 % ¹
Import von EoL-LIB	10 %	10 %	-	-

Im ersten Schritt wurde das jährliche Potenzial an EoL-LIB ausgehend von den jährlich in Verkehr gesetzten Mengen abgeschätzt. Dazu wurde der Jahresbestand an Fahrzeugen aus den vom Umweltbundesamt entwickelten Energie- und Treibhausgasszenarien (UBA, 2017) für folgende Produkte/Produktgruppen herangezogen: Batterie-E-Fahrzeuge, Plug-in Hybrid-Fahrzeuge, Hybrid-Fahrzeuge, Leichte E-Nutzfahrzeuge, Schwere E-Nutzfahrzeuge, Wasserstoff-Nutzfahrzeuge, motorisierte Zweiräder, sowie für Photovoltaikanlagen mit Speicher. Die Differenz zwischen Jahresbestand und Bestand des Vorjahres unter Berücksichtigung eines Austauschs der Altbestände bildete die Berechnungsgrundlage für die Ermittlung der jährlich in Verkehr gesetzten Menge an LIB für E-Fahrzeuge. Für Gerätebatterien sind jährlich in Verkehr gesetzte Mengen aus den Tätigkeitsberichten der Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH (EAK Austria, 2020) verfügbar. Es wurde ein jährlicher Zuwachs von 6 % bis 2025 nach Prognose lt. Avicenne Energy (Pillote 2017) angenommen. Außerdem wurden die LIB-Stückgewichte für die jeweiligen Anwendungsfelder festgelegt. Für die Nutzungsdauer der Batterie wurden Verteilungskurven angenommen. Die durchschnittliche Produktlebensdauer liegt für Batterie-E-Fahrzeuge bei etwa elf Jahren und für Photovoltaikanlagen bei etwa 20 Jahren. Während eines Produktlebens wurde weiters angenommen, dass die Batterie 1,1 mal ausgetauscht werden muss (bei leichten Nutzfahrzeugen 1,5 mal und bei schweren Nutzfahrzeugen 1,75 mal).

Ausgehend von dem Ziel, dass eine Elektrifizierung des Verkehrssektors bis 2040 vollzogen wird, können folgende Ergebnisse zum Aufkommen an EoL-LIB abgeleitet werden: Ab dem Jahr 2028 kann eine jährliche Recyclingmenge von etwa 10.000 Tonnen EoL-LIB erwartet werden. Je nach Annahme bezüglich der Wiederverwendung und des Exports an Fahrzeugen variieren die LIB-Mengen. Im Jahr 2030 beträgt das Aufkommen an EoL-LIB je nach Szenario etwa 20.000 bis 23.000 Tonnen pro Jahr. Wird eine Wiederverwendung berücksichtigt verschieben sich die Mengen ein wenig nach hinten (da das Recycling zu einem späteren Zeitpunkt stattfindet) und das Aufkommen im Jahr 2030 reduziert sich auf 16.000 bis 18.000 Tonnen je nach Szenario. Im Jahr 2040 wären bereits 114.000 Tonnen bis 144.000 Tonnen EoL-LIB zu sammeln und zu verwerten bzw. mit Berücksichtigung einer Wiederverwendung 120.000 Tonnen bis 123.000 Tonnen je nach Szenario. Ab 2038 müssten mehr als 100.000 Tonnen verwertet werden. Im Vergleich, wenn Maßnahmen zur Energiewende nicht oder nur im geringeren Ausmaß umgesetzt werden, können mit Recyclingmengen von etwa 7.000 Tonnen im Jahr 2030 bis 43.000 Tonnen im Jahr 2040 gerechnet werden.

Durch einen hohen Zuwachs von Elektrofahrzeugen zwischen 2020 und 2040 zur Erreichung der Energiewende in Österreich, steigt auch das Aufkommen an EoL-LIB exponentiell stark an. Es ist zu hinterfragen, ob die Energiewende und damit die Elektrifizierung des prognostizierten Bestandes von 5,2 Mio. Batterie-E-Fahrzeuge im Jahr 2040 für Österreich hinsichtlich Ressourcenschonung als sinnvoll erachtet werden kann und ob nicht andere Maßnahmen für eine effizientere Nutzung unserer Ressourcen zielführender wäre.

Ökonomische Bewertung von Wertschöpfungsketten des LIB Recyclings

In der ökonomischen Analyse wird das Aufkommen an EoL-LIB des Szenarios mit Energiewende bis 2040 sowie hohem Grad einer Kreislaufwirtschaft (Szen_HIGH) zugrunde gelegt. Dies impliziert die Erreichung der Klimaziele von Paris im Jahr 2040 für Österreich sowie ein Maximum an Kreislauforientierung im Bereich EoL-LIB, wie oben definiert (siehe Tabelle 1). Für die ökonomische Analyse werden auf dieser Basis zwei Vergleichsszenarien erstellt. Einerseits das Recyclingszenario. Hier wird angenommen, dass das Recycling von EoL-LIB in Österreich stattfindet und das gesamte Aufkommen behandelt wird. Die entsprechenden Anlagen sind zu bauen und die daraus gewonnenen Materialien werden auf dem Weltmarkt veräußert. Die resultierenden Wertschöpfungseffekten werden mit einem Exportszenario verglichen, in dem keine Anlage in Österreich erbaut wird und die EoL-LIB zum Recycling ins Ausland verbracht werden und die Verkaufserlöse in Form von Betriebsgewinnen zur heimischen Wertschöpfung beitragen.

Da die Profitabilität solcher Anlagen und damit auch die österreichische Wertschöpfung vom internationalen Umfeld, insbesondere dem Preisumfeld abhängt und die zukünftige Preisentwicklung ungewiss ist, werden Bandbreiten für die Preise wiedergewonnener Materialien definiert. Ein mittleres, oberes und unteres Preisband, wobei historische Höchst- und Niedrigstände von Ressourcenpreisen die Bandbreite definieren. Die Modellierung der ökonomischen Effekte erfolgt mit dem ökonomischen Modell WIFO.DYNK. Das Recyclingszenario wird für alle 3 Preisbänder geschätzt. Da die sich künftig ergebenden Exportpreise unklar sind, wurden ebenfalls Bandbreiten an Exportpreisen angenommen. Die verwendeten Exportpreise sind so gewählt, dass sie ähnliche Wertschöpfungseffekte aufweisen wie das Recyclingszenario. Daraus lässt sich abschätzen, ab welchen Preiskonstellationen (Exportpreis von EoL-LIB und Preise für Sekundärmaterialien) es positiv für die heimische Wertschöpfung ist, die Recyclingaktivität durchzuführen.

In der ökonomischen Analyse wird eine Musteranlage definiert. Je nach Aufkommen von EoL-LIB muss in eine solche Anlage investiert werden, um die Massenströme verarbeiten zu können. Für jede der drei Preissituationen wird die Profitabilität des Betriebes der Anlagen, aus betriebswirtschaftlicher Sicht, anhand der Ermittlung des Kapitalwerts („net present value“, NPV) abgeschätzt. Ist der NPV negativ und die Anlage aus betriebswirtschaftlicher Sicht der Investoren unrentabel (unteres Preisband), wird eine Entsorgungsgebühr eingeführt, die von den Konsumenten zu tragen ist.

Auf der Basis der Eingangsdaten für die Modellierung, insbesondere Investitions- und Betriebskosten für Recyclinganlagen sowie Preisentwicklungen für wiedergewonnene Materialien, wurden die volkswirtschaftlichen Effekte der LIB Recyclingwertschöpfungsketten berechnet.

Mit der steigenden EoL-LIB Menge und der steigenden ökonomischen Aktivität der Recyclinganlagen steigen die Wertschöpfungseffekte in der gesamten Ökonomie (Abbildung A). Die Entwicklung im Umfeld des mittleren Preisbandes ist in Balken und untergliedert in die direkten, indirekten und induzierten Wertschöpfungseffekte dargestellt, die Effekte für niedrige und hohe Preise mit den strichlierten Pfaden angedeutet.

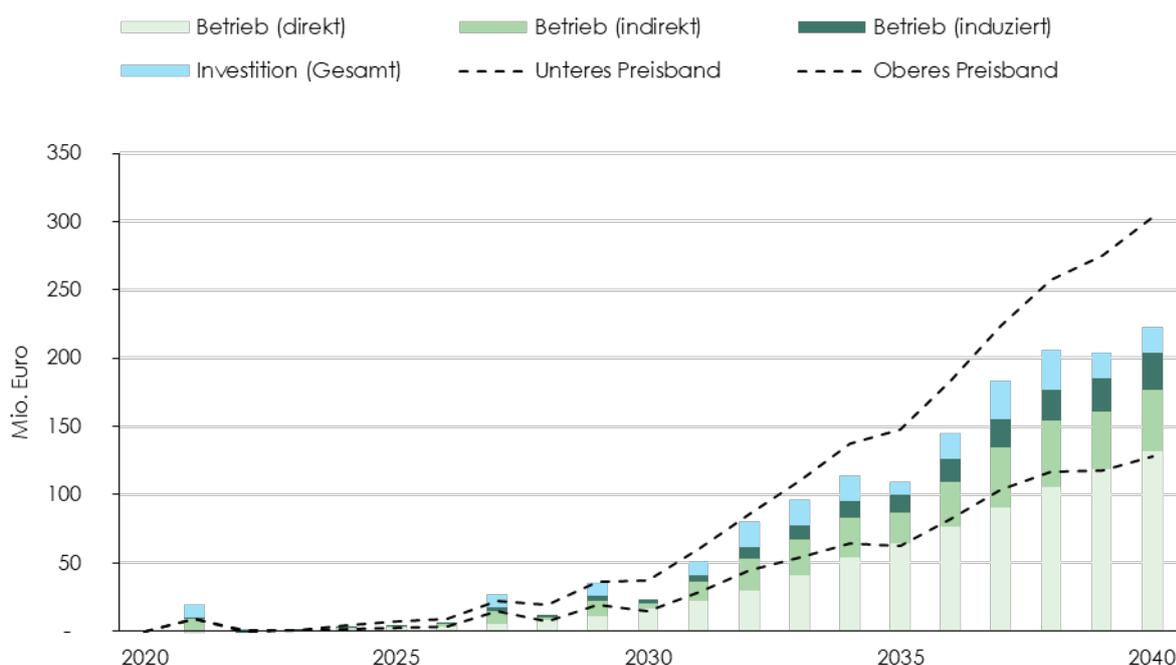


Abbildung A: Ökonomische Effekte – Wertschöpfung, WIFO-Berechnungen.

Im Jahr 2040 im mittleren Preisband werden etwas über 220 Mio.€ generiert. Das entspricht etwas über 0,06% des österreichischen BIP in 2019 (397 Mrd.€).

Analog zu den Wertschöpfungseffekten entwickelt sich die Beschäftigung (Abbildung B). Direkte Beschäftigungseffekte wurden hier anhand der Personalkosten (siehe 7.4.2, 7.4.3 und einem Kostensatz pro Beschäftigten geschätzt. Im Jahr 2040 mit dem höchsten Beschäftigungseffekt sind ca. 2.600 Vollzeitäquivalente (VZÄ) verbundener Beschäftigung berechnet, was im Vergleich zu ca. 3,8 Mio. VZÄ der Beschäftigung in Österreich im Jahr 2018 ca. 0,07 % entspricht.

Im Vergleich zeigt Abbildung C in blau die Wertschöpfungseffekte des Exports von EoL LIB anhand unterschiedlicher Exportpreisbänder. Ein Exportpreis in Höhe von 1200 – 2400 €/t EoL-LIB würde für die österreichische Volkswirtschaft ähnliche Wertschöpfungseffekte generieren wie der Betrieb von Recyclinganlagen in Österreich einschließlich des Verkaufs der gewonnenen Materialien aus dem Recyclingprozess (mittleres Preisband). Allerdings ist zu bedenken, dass der Export von EoL-LIB keine heimische Beschäftigung generiert.

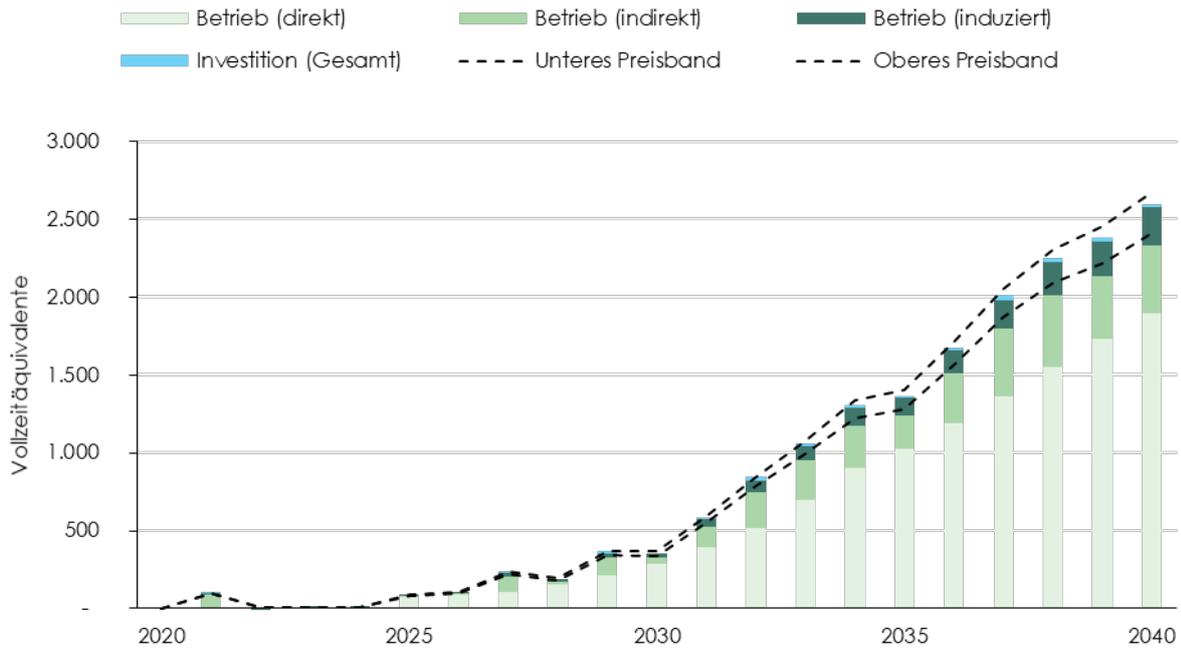


Abbildung B: Ökonomische Effekte – Beschäftigung, WIFO-Berechnungen.

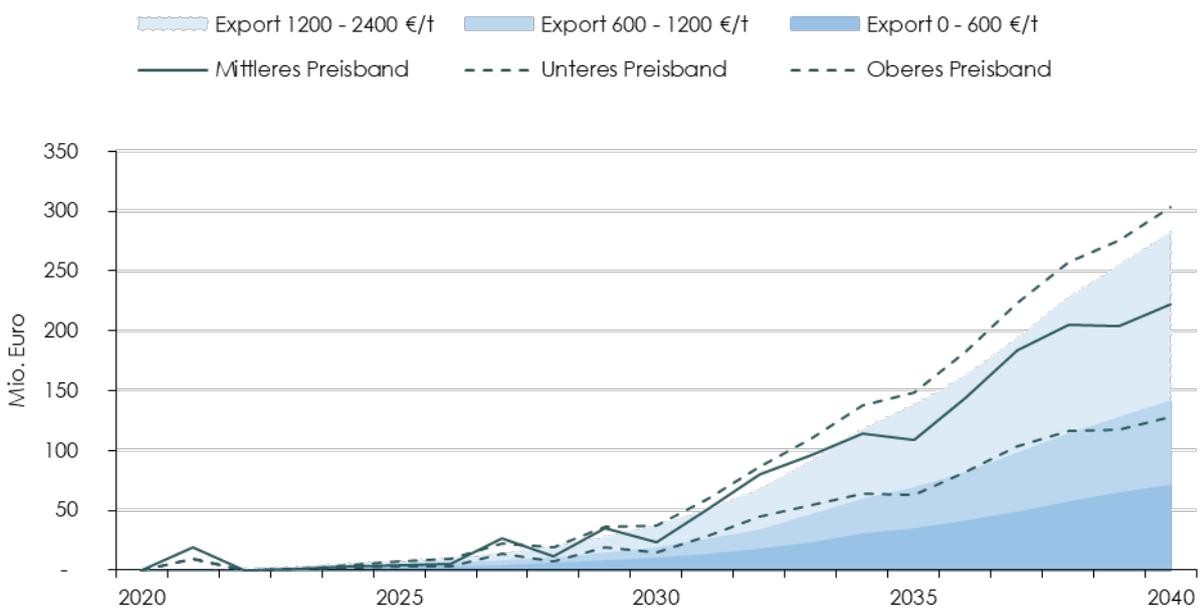


Abbildung C: Ökonomische Effekte – Szenario-Vergleich Wertschöpfung, WIFO-Berechnungen.

Vorgeschlagene Maßnahmen

Auf Basis der Stakeholder-Befragungen und des Expert*innenworkshops konnten Maßnahmenpakete zur Erreichung folgender Ziele für Österreich abgeleitet und vorgeschlagen werden:

1. Erhöhung der Rücklaufquote für eine sichere Sammlung
2. Etablierung einer effizienten Demontage
3. Förderung der Wiederverwendung von LIB
4. Erhöhung der Recyclingeffizienz
5. Sicherstellung effektiver wirtschaftspolitischer Rahmenbedingungen
6. Investitionsförderungen und Aufbau von Know-How

Tabelle B zeigt eine Auswahl von vorgeschlagenen Maßnahmen, die auf Basis des Inputs der Stakeholder aus Sicht der Autor*innen mit hohem Umsetzungspotenzial in Österreich implementiert werden könnten.

Tabelle B: Vorgeschlagene Maßnahmen mit hohem Umsetzungspotenzial in Österreich mit möglichem Beginn der Maßnahme und zu erwartenden Hindernissen und Herausforderungen.

MABNAHMEN	HINDERNISSE & HERAUSFORDERUNGEN
Ab sofort umsetzbare Maßnahmen	
Öffentlichkeitsarbeit und bewusstseinsbildende Maßnahmen zur richtigen Verwertung und Entsorgung von LIB und Geräten mit LIB	Erschwerte Identifikation von LIB
Verbringung ins Ausland verringern (EoL-Auto und EoL-LIB getrennt behandeln, ...)	Online Handel
Product-Service Geschäftsmodelle (Leasing statt Eigentum) um der Verbringung ins Ausland gegen zu steuern	hohe Anfangskosten für Produzenten
Forschungsbedarf zur Kosteneffizienz einer dezentralen oder zentralen Demontage bzw. Deaktivierung (Transportkosten – ADR, Sicherheitsaspekt, ...)	Wirtschaftlichkeit der Demontage; Unsicherheit über weitere Verarbeitung von deaktivierten LIB
Forschungsbedarf zur Bestimmung des SoH (State of Health) nach der Nutzung (Ex-Post Analysen)	Erschwerter Zugang zum Batterie-Management-System (BMS)
Entwicklung von Schnelltests für die Alterungsmessung um eine schnelle Identifikation von Re-Use-fähigen Batterien zu ermöglichen	Aufgrund der Sicherheitsvorkehrungen und Datenschutz ist der Zugang zum Batterie-Management-System (BMS) erschwert bis unmöglich
Förderung von Produktionsunternehmen mit nachhaltigen und recyclingfreundlichen Produkten (z.B. Eco-Label für Produkte, steuerliche Anreize [nachhaltig = niedrigere Steuern; nicht-nachhaltig = höhere Steuern], menschenrechtskonforme Rohstoffgewinnung, Recycling-Gütesiegel, ...)	Entscheidungen können nicht von Österreich allein getroffen werden
Definition von Recycling, Recycling-Quote, Recyclingfähigkeit	Entscheidungen können nicht allein von Österreich allein getroffen werden
Regulative wirtschaftspolitische Rahmenbedingungen sicherstellen (neue Batterie Verordnung)	Materialspezifische Recyclingquoten, klare Definition der Systemgrenzen des Recyclings, Standards für Recyclingqualität
Fördermaßnahmen für Aufbau von Know-How im Umgang und im Recycling von LIB	Österreichischer Standort vs. europäische Zusammenarbeit
Maßnahmen ab 2025	
Besseres Monitoring während der Nutzung und Informationsaustausch (Informationsaustausch mittels neuer Informationsmöglichkeiten (Industrie 4.0, Blockchain), ...)	Der Batteriepass lt. BatterieVO ermöglicht ein besseres Monitoring; festzustellen wäre, ob diese Daten auch für eine Abschätzung der restlichen Lebensdauer einer Batterie ausreichend sind

Maßnahmen ab 2030	
Gesetzliche Anreize für die Wiederverwendung (z.B. Repairability-Index, Reparatur mit 0% Steuern, ...)	Entscheidungen können nicht von Österreich allein getroffen werden
Gesetzliche Anreize für die Nutzung von Second Life-Batterien (z.B. Bonus-Modelle, ...)	Entscheidungen können nicht von Österreich allein getroffen werden
Planung und Errichtung einer Recyclinganlage in Österreich. Dabei ist auf die dynamische Entwicklung im LIB-Sektor und einen flexiblen Anlagenbetrieb zu achten	Mengenverlauf ist zu beobachten und die geeigneten Recyclingtechnologie ist danach auszurichten, welche LIB den österreichischen Markt dominieren

Executive summary

Background and motivation

The current government program 2020-2024 aims, among other things, to open up new sectors and to further develop emerging strengths in which Austria has relevant competitive advantages against the backdrop of contributing to CO₂ reduction with a view to the goal of climate neutrality by 2040 at the latest. The areas of e-mobility and models for the circular economy are mentioned as concrete examples. Within the framework of the climate and energy strategy #mission2030, the focus is clearly on zero emission mobility in road transport, whereby the topics of resource consumption, availability of critical raw materials and recycling are to be actively considered within the framework of the European Commission's circular economy package.

The importance of electric vehicles and thus the demand for lithium-ion batteries (LIB) will increase significantly based on the decarbonization target. In Austria, a significant increase in the share of electrically powered transport vehicles is expected. LIB contain valuable metals and components with increasing recycling and reuse potential. Measures to keep these scarce materials in the economy must be taken at an early stage and require sound decisions regarding recycling, re-use, technology mix, system design and economic policy framework.

The aim of the study is to present a value chain for the recycling of LIB. The framework conditions for a complete recycling process in Austria are evaluated and a technology roadmap for innovative recycling technologies is created. Finally, this roadmap is analyzed with regard to the economic effects on the basis of a low-carbon energy scenario of the Austrian economy with circular resource utilization.

The results include

- an action plan with economic policy instruments to establish and develop a LIB value chain in Austria,
- a technology roadmap for holistic options for LIB recycling
- recommendations for Design for Recycling, Design for Re-Use and Design for Disassembly, and
- an economic assessment of the value creation potential and employment effects.

Non-objectives of this study include a forecast of the volumes placed on the market and the expected waste generation of LIB by the year 2040. Due to the uncertainties of market and technology development, this study develops scenarios based on sets of assumptions and assesses measures derived from these.

Other non-targets include a life cycle assessment of variants or technologies, as well as an assessment of legal bases for placing on the market or treating lithium-ion batteries.

Results

Based on a comprehensive review of existing and innovative recycling technologies, expert interviews and interactive dialogue with all stakeholder groups, and macroeconomic modeling based on scenarios for achieving climate neutrality, the results of this study provide a basis for decision-makers to determine which strategic measures will be beneficial in the future.

The basis for decision-making includes

- a presentation and assessment of the current rapid technological development in the field of recycling EoL-LIB in a holistic view including pre- and post-treatment steps,
- the comprehensive presentation of potentials and challenges from the perspective of all relevant stakeholder groups,
- the scenario-based estimation of the LIB volume depending on the location of future recycling plants in or outside Austria, the importance of Second Life as well as import and export of EoL-LIB and the resulting economic effects on investments and employment, and
- packages of measures staggered according to implementation periods, including a technology roadmap.

Need for holistic recycling technologies

Lithium-ion battery technology has developed rapidly and, in all likelihood, will continue to do so. Research is being conducted into the various designs, but above all into the performance of the cell chemistry. In addition to the reduction of valuable metals, efforts are being made above all to increase energy density. However, these high-performance batteries pose a major safety risk if they are handled improperly. Waste management companies in particular are therefore already faced with increasing costs - whether safety precautions or expenses for insurance - to protect against fires caused by a thermal runaway, for example.

It is not only the safety aspect that poses big challenges. With the goals of the energy transition, decarbonization in the transport sector (zero emission mobility) or the provision of "green" energy (climate and energy strategy #mission2030, EU Green Deal), enormous amounts of energy storage are needed. This also requires an enormous consumption of resources. Therefore, it is inevitable that the materials used in LIBs are also recycled and not burned (thermally recycle) or dumped in landfills as in a linear economic system.

In order to produce an equivalent product from a product in the sense of a circular economy, it is necessary to coordinate all participants in the entire value chain. Therefore, already in the development phase, the aspects of eco-design have to be taken into account. This influences already the production phase and through extended producer responsibility as well as the return of EoL-LIB into the recycling process, EoL-LIB can be re-processed. Especially here are big challenges and there is still a need for further research. On the one hand, there is a lack of communication along the entire value chain (knowledge about cell chemistry, access to the battery management system, etc). On the other hand, a very well coordinated combination of pre- and post-treatment is needed to achieve maximum recycling rates for all materials.

The uncertainty about the future volume of EoL-LIB makes a forecast impossible as to whether or when a recycling plant should be built in Austria. The same applies to the recycling technology to be used. Although plants exist on an industrial scale, there is still no predominant method for recovering the battery materials. As shown in Chapter 4, research is being conducted in many directions. The current trend suggests small decentralized facilities for dismantling and deactivation as well as centrally located processing plants – regardless of which method is finally used. However, an increase in the recycling rate depends on good coordination between pre-treatment and recycling process (Windisch-Kern et al., submitted).

Potentials and challenges from the perspective of stakeholders

Stakeholders were identified along the entire value chain and interviews were conducted on the potentials and challenges of developing a value chain for recycling LIB. A total of 29 experts were interviewed for a wide variety of areas in the LIB value chain (From production to recycling as well as research institutions and systems). The following topics have emerged:

In terms of a circular economy, many stakeholders focus on recycling; by collecting batteries properly and recycling them to the highest possible quality. There would be a high potential for future LIB recycling, as a strong increase in electric vehicles is to be expected in the coming years. Whether Austria will establish itself as a location for recycling would depend above all on the quantities of end-of-life (EoL) LIB, which are difficult to forecast and are significantly influenced by (illegal) exports of vehicles. Measures could be set to counteract the problem, such as product service, leasing systems.

Re-Use of LIBs could play a major role in extending the life of a LIB and thus reducing the environmental impact over its life cycle. Re-Use could therefore contribute to a more efficient use. However, high costs for logistics and processing for reuse as well as questions of warranty and passing on the recycling obligation would (still) speak against it. However, there is a great need for research, since on the one hand better efficiency in sorting and reprocessing (e.g. through non-destructive dismantling, standardized battery design, easier identification of cell chemistry) and on the other hand better knowledge in the area of the "State of Health" or "State of Charge" for estimating the remaining life span can enable reuse on a large scale.

The separate collection of LIB is of high importance, as this can ensure safe storage and transport on the one hand and can initiate ways for proper recycling on the other hand. Disposal via residual waste was noted as a major problem. More awareness raising and better knowledge or facilitated identification of LIB were mentioned as fields of action.

Basically, non-destructive disassembly was mentioned as an essential basis for more efficient recycling but also for repair or reuse. Standardized construction methods and information exchange between manufacturers and reprocessors on connecting materials could make the process more efficient. A corresponding design for recycling (DfR) was mentioned as a basic pillar for eco-design of LIB.

Funding for R&D model projects and for R&D infrastructure was considered strategically important in the first phase of the implementation of a recycling chain in order to build up and advance know-how and to establish pilot plants in which research could be carried out, e.g. in Leoben in Austria. It should be considered to what extent this should be done in close cooperation with industry. Industry-science cooperations were mentioned as an example of a promising form of enterprise, and the example of the Research Center Pharmaceutical Engineering GmbH (RCPE) was cited. With such a format, applications for funding could be submitted to the government. Also mentioned as promising examples were collaborative research projects between universities and industry in Germany, in which research at universities is coupled with industrial realities. This type of funding is also used to train the next generation of specialists by means of doctorates, master's and bachelor's theses. Ultimately, these findings find their way into teaching in these areas. Further funding of such projects would also make sense in view of the developments of future battery generations, since LIBs will change significantly.

International competition in the field of electromobility, especially the strong position in the Asian or American region in the field of cell production and recycling, was interpreted by some stakeholders as a driver for innovation and competitiveness. The American automaker Tesla, which covers everything in the value creation of the car, is such an innovation driver, they said. By publishing all its patents, Tesla is taking a different approach than BMW and Volkswagen, for example, and should therefore not be classified as a competitor. There is also something to learn from Asia, he said, because Asia now has the problems that Europe will face in 10 years. The competition from Asia and America is strong, he said, and would push Europe to implement e-mobility, including all recycling strategies, now.

Finally, economic policy frameworks were seen as essential for the success of a recycling value chain, and regulations and legal requirements in particular were seen as effective economic policy tools. It makes sense, as is now envisaged with the new EU Battery Regulation, to set targets for recycling quotas for critical elements or functional materials which, for example, have a high CO₂ footprint or are otherwise harmful to the environment or critical in the sense of being in short supply. He said it is important to move away from unspecific mass-based recycling quotas as set in the past, as this often leads to a lack of high-quality recycling. For example, the 50% mass-based recycling rate required by the current battery directive could be achieved without recycling one gram of the functional materials cobalt, nickel or lithium. The problem with current recycling, he said, is price competition, which leads to low recycling quality. There is a lack of standards defining what should actually be achieved. He said it is important to define or clearly define and describe the system boundaries: from where to where the recycling rate is calculated. A clear description of the terms recycling and recyclates is needed. Better legal requirements are therefore needed. The new EU Battery Regulation was a step in the right direction.

CO₂ taxes were described as a key instrument in the climate issue, but like resource taxes, they did not play a significant role in the stakeholders' assessment of the economic policy framework for the recycling of LIBs. There were gaps in the area of eco-design requirements for LIB, which is ultimately central to recycling. One stakeholder was of the opinion that eco-design requirements should also play a significant role in the approval of batteries.

Quantities of end-of-life lithium-ion batteries (EoL-LIB) according to predefined scenarios

Four scenarios were developed to estimate the amount of LIB in the end-of-life phase (EoL-LIB) in Austria and to take a closer look at the variability in quantities. The scenarios, as shown in Table A, differ according to the degree of energy transition, the degree of circular economy, the availability of recycling facilities in Austria or only in other EU countries and the export and import rate of used or old LIB. The energy and greenhouse gas scenarios developed by the Federal Environment Agency (Vienna) with regard to 2030 and 2050 (UBA 2017) served as a starting point for the calculation of LIB quantities. These scenarios were adapted to the current goal of the Austrian government program to achieve climate neutrality by 2040.

Table A: Key assumptions for the scenarios.

Szenario	Szen_HIGH	Szen_LOW	Szen_TRANS	Szen_WEM
Short description	Energy transition with goal 2040 and high degree of circular economy	Energy transition with goal 2040 and Recycling in Austria	Energy transition with goal 2040	Energy transition with measures in force 2019
Recycling in Austria	Yes	Yes	No	No
Second Life-Application (Re-Use Rate)	40 %	20 %	0 %	0 %
Export of used electric vehicles (Export-Rate)	30 % / 10 % ¹	40 % / 10 % ¹	50 % / 10 % ¹	50 % / 10 % ¹
Import of EoL-LIB (Import-Rate)	10 %	10 %	-	-

In the first step, the annual potential of EoL-LIB was estimated on the basis of the quantities placed on the market each year. For this purpose, the annual stock of vehicles from the energy and greenhouse gas scenarios developed by the Federal Environment Agency (UBA, 2017) was used for the following products/product groups: Battery E-Vehicles, Plug-in Hybrid Vehicles, Hybrid Vehicles, Light E-Commercial Vehicles, Heavy E-Commercial Vehicles, Hydrogen Commercial Vehicles, Motorized Two-Wheelers, and for Photovoltaic Systems with Storage. The difference between the annual stock and the stock of the previous year, taking into account a replacement of old stock, formed the basis for the calculation of quantities placed on the market. For portable batteries, annual quantities placed on the market are available from the activity reports of the Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH (EAK Austria, 2020). An annual increase of 6% until 2025 was assumed according to Avicenne Energy (Pillote, 2017). In addition, the unit weights of LIB were determined for the respective application fields. Distribution curves were assumed for the lifetime of the battery. The average product life was about 11 years for battery E-vehicles and about 20 years for photovoltaic systems. During a product life, it was further assumed that the battery needs to be replaced 1.1 times (1.5 times for light commercial vehicles and 1.75 times for heavy commercial vehicles).

Based on the goal that electrification of the transport sector will be completed by 2040, the following results can be derived for the generation of EoL-LIB: As of 2028, an annual recycling volume of about 10,000 tons of EoL-LIB can be expected. Depending on the assumption regarding the reuse and export of vehicles, the LIB quantities vary. In 2030, the amount of EoL-LIB is about 20,000 to 23,000 tons per year, depending on the scenario. If reuse is taken into account, the quantities are shifted backwards (since recycling takes place at a later point in time) and the amount in 2030 is reduced to 16,000 to 18,000 tons depending on the scenario. In 2040, LIB to collect and recycle would already account to 114,000 tons to 144,000 tons, or 120,000 tons to 123,000 tons with the consideration of re-use and depending on the scenario. From 2038, more than 100,000 tons would need to be recycled. In comparison, if energy transition measures are not fully implemented, recycling quantities of about 7,000 tons in 2030 to 43,000 tons in 2040 can be expected.

Due to an expected high growth of electric vehicles between 2020 and 2040 to achieve the energy transition in Austria, the volume of EoL-LIB would consequently also increase exponentially. It is questionable whether the energy transition and thus the electrification of the transport sector with an inventory of 5.2 million battery electric vehicles in 2040 can be considered sensible in terms of resource conservation and whether other measures for a more efficient use of our resources would not be more effective.

Economic evaluation of LIB recycling value chains

The economic analysis is based on the EoL LIB volumes of the scenario Scenario_HIGH. Two comparison scenarios are created for the analysis. On the one hand, the recycling scenario. Here it is assumed that the recycling of EoL LIB takes place in Austria and that the entire volume is treated. The corresponding plants are to be built and the materials obtained are sold on the world market. The resulting value added effects are compared with the export scenario, in which no plant is built in Austria and the sales revenues contribute to the domestic value added in the form of operating profits. The value added and employment effects of LIB recycling are calculated from the difference between the two scenarios.

As the profitability of such plants and thus also the Austrian value added depends on the international environment, in particular the price environment, and the future price development is uncertain, bandwidths for the prices of recovered materials are defined. A middle, upper and lower price band, with historical highs and lows of resource prices defining the range. The recycling scenario is estimated for all 3 price bands using the WIFO.DYNK econometric model. Since the resulting export prices in the future are unclear, ranges of export prices were also assumed. The export prices used are chosen to have similar value-added effects as the recycling scenario. From this, it can be estimated at which price constellations (export price of EoL LIB and prices for secondary materials) it is positive for the domestic value added to carry out the recycling activity.

In the economic analysis, a sample plant is defined. Depending on the volume of EoL-LIB, investments must be made in such a plant in order to be able to process the mass flows. For each of the three price situations, the profitability of the plant operation is estimated from a business perspective by determining the net present value (NPV). If the NPV is negative and the plant is unprofitable from the investors' economic point of view (lower price band), a disposal fee is introduced which has to be paid by the consumers.

Based on the input data for the modeling, in particular investment and operating costs for recycling plants as well as price developments for recovered materials, the economic effects of LIB recycling value chains were calculated.

As EoL-LIB volumes increase and the economic activity of recycling facilities increases, the value-added effects increase throughout the economy (Figure A). The development around the middle price band is shown in bars and subdivided into the direct, indirect and induced value added effects, the effects for low and high prices are indicated with the dashed paths.

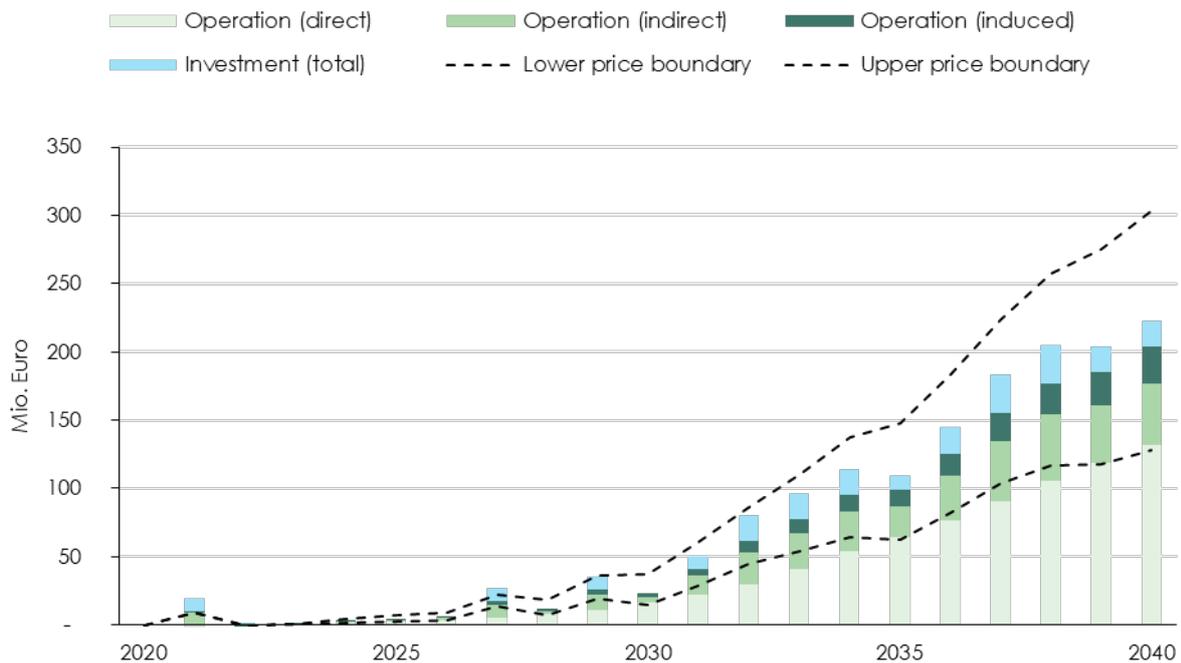


Figure A: Economic effects - value added, WIFO calculations

In the year of the highest value added effect in the medium price band, just over €300 million is generated. This corresponds to just over 0.08% of Austrian GDP in 2019 (€397 billion). The detailed data are summarized in Annex 10.7.

Employment develops analogously to the value creation effects (see Figure B). Here, too, a distinction can be made between direct, indirect and induced effects. Direct employment effects were estimated here on the basis of personnel costs (see input parameters) and a cost rate per employee. 75 employees per plant with a capacity of 6000 t/a were assumed. In the year with the highest employment effect, about 3,500 full-time equivalents (FTEs) of associated employment are calculated, which corresponds to about 0.1% compared to about 3.8 million FTEs of employment in Austria in 2018.

Figure C shows in blue the value added effects of exporting recovered materials at specific export prices. The first blue band reflects the range of the value added effect at an export price up to 600 €/t LIB. The second blue band the range at an export price of 600-1,200 €/t, and the third band goes up to an export price of 2,400 €/t. The latter is the export price that generates similar value added effects in Austria as the operation of the recycling plants and the sale of the recovered materials in a favorable international environment.

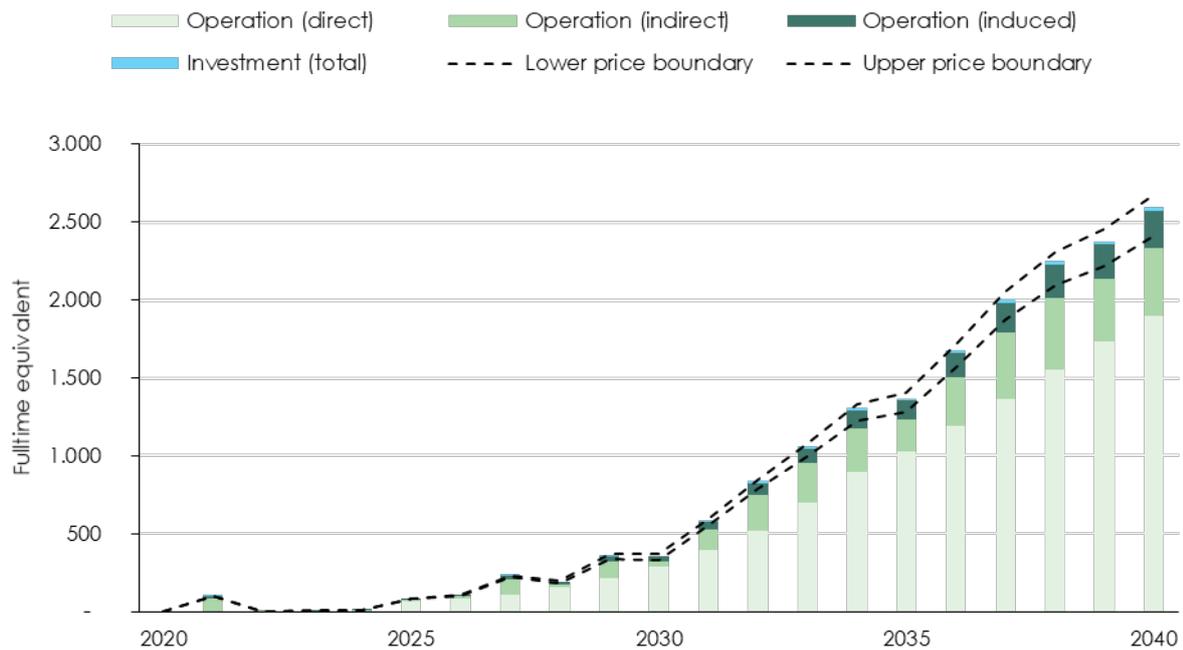


Figure B: Economic effects - employment, WIFO calculations

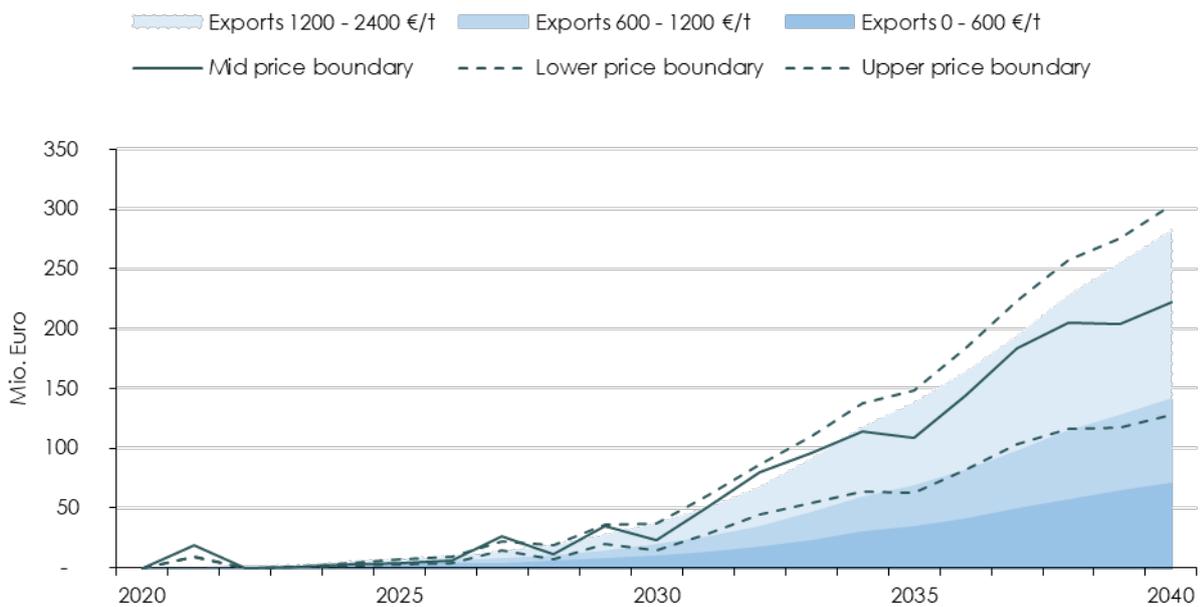


Figure C: Economic Effects – Value Added Scenario Comparison, WIFO Calculations

Proposed measures

Based on the stakeholder surveys and the expert workshop, the following packages of measures were derived and proposed to achieve the following goals for Austria:

1. increase the return rate for safe collection
2. establishment of an efficient dismantling process
3. promoting the reuse of LIBs

4. increasing recycling efficiency
5. ensure effective economic policy frameworks
6. investment promotion and know-how building

Table B shows a selection of proposed measures that, based on stakeholder input, the authors believe could be implemented in Austria with high implementation potential.

Table B: Proposed measures with high implementation potential in Austria with possible start of the measure and expected obstacles and challenges.

MEASURES	BARRIERS & CHALLENGES
Measures that can be implemented immediately	
Public relations and awareness raising measures for proper recycling and disposal of LIB and equipment with LIB	More difficult identification of LIB.
Reduce shipment abroad (treat EoL car and EoL LIB separately, ...)	
Product-service business models (leasing instead of ownership) to counteract foreign shipments	
Need for research on cost-effectiveness of decentralized or centralized dismantling or deactivation (transport costs - ADR, safety aspect, ...)	Cost-effectiveness of dismantling; uncertainty about further processing of deactivated LIBs
Need for research to determine SoH (State of Health) after use (ex-post analyses)	Initial access to battery management system (BMS)
Development of rapid tests for aging measurement to enable rapid identification of re-usable batteries	Due to security and data protection, access to the battery management system (BMS) is difficult to impossible
Promotion of production companies with sustainable and recycling-friendly products (e.g. eco-label for products, tax incentives [sustainable = lower taxes; non-sustainable = higher taxes], human rights compliant raw material extraction, recycling quality labels, ...)	Decisions cannot be made by Austria alone
Definition of recycling, recycling quota, recyclability	Decisions cannot be made by Austria alone
Measures from 2025	
Better monitoring during use and information exchange (information exchange by means of new information possibilities (Industry 4.0, Blockchain), ...)	The battery passport according to the Battery Ordinance enables better monitoring; it would have to be determined whether these data are also sufficient for estimating the remaining service life of a battery
Measures from 2030	
Legal incentives for reuse (e.g. reparability index, repair with 0% tax)	Decisions cannot be made by Austria alone
Legal incentives for the use of second life batteries (e.g. bonus models)	Decisions cannot be made by Austria alone
Planning and construction of a recycling plant in Austria. In this context, the dynamic development in the LIB sector must be taken into account in order to ensure flexible plant operation	The volume trend must be monitored and the appropriate recycling technology must be based on which LIBs dominate the Austrian market.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Batteriearten im Überblick.....	2
Abbildung 2: Anwendungsgebiete für LIB.....	4
Abbildung 3: Vergleich der elektrochemischen Eigenschaften der am häufigsten verwendeten Lithium-Ionen-Batterietypen..	6
Abbildung 4: Übersicht Wertschöpfungskette.....	15
Abbildung 5: Schematische und überblicksmäßige Darstellung bestehender Recyclingprozesse für EoL-LIB (modifiziert nach (Windisch-Kern et al. 2021a). Die durchgehenden Pfeile stellt die großindustrielle Umsetzung dar, wohingegen die gestrichelten Pfeile Pilotversuche darstellen (Stand Mai 2021).....	34
Abbildung 6: Darstellung verschiedener Bauformen für Lithium-Ionen-Batterien, welche sich in Packungen (engl. packs), Module und Zellen untergliedern (entnommen aus Harper et al. 2019).....	36
Abbildung 7: Entlade- und Demontagestation der Fa. Redux GmbH (Arnberger et al. 2018).....	38
Abbildung 8: Entladestation der Fa. Duesenfeld GmbH (Elwert und Frank 2020).	38
Abbildung 9: Schematische Darstellung des Batrec-Prozesses basierend auf Hanisch et al. (2015a) sowie Meng et al. (2021). Die Vorbehandlung erfolgt mechanisch, die Rückgewinnung der Sekundärrohstoffe pyrometallurgisch.....	42
Abbildung 10: Schematische Darstellung des patentierten Düsenfeld-Verfahrens mit mechanischer Vorbehandlung, hydrometallurgischer Aufbereitung und Kalzinierung nach Elwert et al. (2016).	44
Abbildung 11: Maßnahmen zur Zielerreichung – Ergebnis des Expert*innenforums.....	80
Abbildung 12: Bestand an Fahrzeugen im Szenario „Transition“ mit Ziel 2040.....	81
Abbildung 13: Angenommene Verteilungskurve für die Nutzungsdauer von LIB in E-Fahrzeugen, leichten E-Nutzfahrzeugen und schweren E-Nutzfahrzeugen.....	83
Abbildung 14: Geschätztes jährliches Potenzial an EoL-LIB in Österreich auf Basis des Szenarios „Transition“ mit Ziel 2040.	84
Abbildung 15: Abschätzung der LIB-Mengen für das Gesamtpotenzial an EoL-LIB, für die Sammlung und das Recycling nach vier vordefinierten Szenarien für das Jahr 2040 in Tonnen.....	87
Abbildung 16: Abschätzung der LIB-Mengen nach den vier vordefinierten Szenarien von 2025-2040 in Tonnen.....	87
Abbildung 17: Entwicklung Aufkommen EoL-LIB; Recyclingkapazität und Investitionsvolumen.....	95
Abbildung 18: Ökonomische Effekte – Wertschöpfung, WIFO-Berechnungen.....	96
Abbildung 19: Ökonomische Effekte – Beschäftigung, WIFO-Berechnungen.....	97
Abbildung 20: Ökonomische Effekte – Szenario-vergleich Wertschöpfung, WIFO-Berechnungen.....	98
Abbildung 21: Empfehlungen für Design für Recycling and Re-Use von LIB abgeleitet aus den Expert*innenbefragungen...	103

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Merkmale, Klassifizierung und Anwendungsbereiche von Lithium-Ionen-Batteriezellen auf der Grundlage ihrer Kathodenchemie.....</i>	<i>7</i>
<i>Tabelle 2: Interviewpartner*innen und Zuordnung nach Flow Chart (Anm. die Zuordnung erfolgte nach Kenntnissen bzw. Expertise in den genannten Bereichen der Wertschöpfungskette).....</i>	<i>12</i>
<i>Tabelle 3: Ist-Situation und Trend des Bestands an LIB in Kraftfahrzeugen nach Fahrzeugtypen.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabelle 4: Ist-Situation und Trend des Bestands an LIB in Batteriespeichersystemen.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabelle 5: Ist-Situation und Trend des Bestands an LIB in Zweirädern.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabelle 6: Ist-Situation und Trend des Bestands an LIB in Gerätebatterien.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabelle 7: Recyclingbetriebe für LIB im weltweiten Überblick.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabelle 8: First Life und Batterieproduktion – Zusammenfassung der Session 1A.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabelle 9: Second Life und Re-Use – Zusammenfassung der Session 1B.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabelle 10: Rücknahme und Sammlung – Zusammenfassung der Session 2A (Teil 1 von 2).....</i>	<i>75</i>
<i>Tabelle 11: Rücknahme und Sammlung – Zusammenfassung der Session 2A (Teil 2 von 2).....</i>	<i>76</i>
<i>Tabelle 12: Recycling – Zusammenfassung der Session 2B.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabelle 13: Angenommene LIB-Stückgewichte für die Mengenabschätzung.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabelle 14: Kernannahmen der Szenarien.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabelle 15: Eingangsdaten für Modellierung: Investitions- und Betriebskosten einer exemplarischen Recyclinganlage für LIB in Österreich.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabelle 16: Endprodukte und -materialien des Recyclingprozesses einer Tonne LIB.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabelle 17: Historische Höchst- und Niedrigstpreise als Grundlage für die Berechnung von Preisbändern für wiedergewonnene Materialien.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabelle 18: Proxymaterialien und Grundlage für Berechnung der Preisbänder.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabelle 19: Maßnahmenpaket zur Erhöhung der Rücklaufquote für eine sichere Sammlung).....</i>	<i>100</i>
<i>Tabelle 20: Maßnahmenpaket zur Etablierung einer effizienten Demontage (Vorschlag).....</i>	<i>102</i>
<i>Tabelle 21: Maßnahmenpaket zur Förderung der Wiederverwendung von LIB (Vorschlag).....</i>	<i>104</i>
<i>Tabelle 22: Maßnahmenpaket zur Erhöhung der Recyclingeffizienz.....</i>	<i>105</i>
<i>Tabelle 27: Proxy Preise – Oberes Band.....</i>	<i>131</i>
<i>Tabelle 28: Proxy Preise – Mittleres Band.....</i>	<i>132</i>
<i>Tabelle 29: Proxy Preise – Oberes Band.....</i>	<i>133</i>
<i>Tabelle 30: Preise für Modelinput – Oberes Band.....</i>	<i>134</i>
<i>Tabelle 31: Preise für Modelinput – Mittleres Band.....</i>	<i>135</i>
<i>Tabelle 32: Preise für Modelinput – Unteres Band.....</i>	<i>136</i>
<i>Tabelle 33: Details Beschäftigungseffekt.....</i>	<i>137</i>
<i>Tabelle 34: Details Wertschöpfungseffekte.....</i>	<i>138</i>

Abkürzungen

ADR	„Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße“ bzw. „Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road“
B2B	Business-to-Business
BEV	Batterie-Elektrofahrzeuge („Battery electric vehicle“)
BMS	Batterie-Management-System
BSS	Stationäre Batteriespeichersysteme
DfR	Design for Recycling
EAK	Europäischer Abfallkatalog
EDI	Electronic Data Interchange“
ESS	Energiespeichersysteme
EU	Europäische Union
GSS	Großspeichersystemen
HEV	Hybrid-E-Fahrzeuge („Hybrid electric vehicle“)
HSS	PV-Heimspeichersystem
IKT	Information, Kommunikation und Telekommunikation
IO-Analyse	Input-Output-Analyse
ISS	Industrielle Speichersysteme
IT	Informationstechnologie
KFZ	Kraftfahrzeug
LIB	Lithium-Ionen-Batterie(n)
LMO	Lithium-Mangan-Oxide
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
NCA	Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxide
NiCd	Nickel-Cadmium(-Akku)
NiMH	Nickel-Metallhydrid(-Akku)
NMC	Nickel-Mangan-Cobalt
NPV	Net Present Value
OEM	Original Equipment Manufacturer
PHEV	Plug-in-Hybrid E-Fahrzeuge
PKW	Personenkraftwagen
PV	Photovoltaik
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
SoC	State-of-Charge
SoH	State-of-Health
TRL	Technology Readiness Level (Technischer Reifegrad)
UPS	Unterbrechungsfreie Stromversorgung („Uninterruptable Power Supply“)
WEM	with existing measures
WIFO.DYNK	Dynamic New Keynesian Model auf Basis einer makroökonomischen Input-Output-Analyse

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Das aktuelle Regierungsprogramm 2020-2024² zielt unter anderem darauf ab, neue Sektoren zu erschließen und entstehende Stärken, in denen Österreich relevante Wettbewerbsvorteile aufweist, vor dem Hintergrund des Beitrags zur CO₂-Reduktion in Hinblick auf das Ziel der Klimaneutralität bis spätestens 2040 weiterzuentwickeln. Als konkrete Beispiele werden die Bereiche E-Mobilität und Modelle zur Kreislaufwirtschaft genannt. Im Rahmen der Klima- und Energiestrategie **#mission2030** ist der Fokus klar auf die Zero Emission Mobilität im Straßenverkehr ausgerichtet, wobei die Themen Ressourcenverbrauch, Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe und Recycling im Rahmen des Kreislaufwirtschaftspaket der Europäischen Kommission aktiv zu berücksichtigen sind.

Die Bedeutung von Elektrofahrzeugen und damit die Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien (LIB) wird auf Basis des Ziels, Österreich bis zum Jahr 2040 vollständig zu dekarbonisieren, deutlich zunehmen. In Österreich wird ein maßgeblicher Anstieg des Anteils an elektrisch angetriebenen Fahrzeugen erwartet. LIB enthalten wertvolle Metalle und Komponenten mit steigendem Recycling- und Wiederverwendungspotenzial. Maßnahmen, um diese knappen Materialien in der Wirtschaft zu halten, sind frühzeitig zu setzen und erfordern fundierte Entscheidungen hinsichtlich Recycling, Re-Use, Technologiemix, Systemaufbau und wirtschaftspolitischem Rahmen.

1.2 Ziel der Studie

Ziel der Studie ist die Entwicklung einer Wertschöpfungskette für das Recycling von LIB. Es werden die Rahmenbedingungen für einen vollständigen Recyclingprozess in Österreich bewertet und eine Technologie-Roadmap für ein ganzheitliches System – von Second-Life-Ansätzen bis zu Rücknahme-/Sammelsystemen und innovative Recyclingtechnologien – erstellt. Schließlich wird diese Roadmap auf der Grundlage eines kohlenstoffarmen Energieszenarios der österreichischen Wirtschaft mit zirkulärer Ressourcennutzung hinsichtlich der wirtschaftlichen Effekte analysiert.

Die Ergebnisse umfassen:

- einen Aktionsplan mit wirtschaftspolitischen Instrumenten zum Aufbau und zur Entwicklung einer LIB-Wertschöpfungskette in Österreich,
- eine Technologie-Roadmap für ganzheitliche Optionen für das LIB-Recycling
- Empfehlungen für Design for Recycling, Design for Re-Use sowie Design for Disassembly und
- eine ökonomische Bewertung des Wertschöpfungspotenzials und der Beschäftigungseffekte.

² Aus Verantwortung für Österreich. Regierungsprogramm 2020–2024, Online verfügbar unter <https://www.bundeskanzleramt.gv.at/dam/jcr:7b9e6755-2115-440c-b2ec-cbf64a931aa8/RegProgramm-lang.pdf>, zuletzt geprüft am 22.06.2021.

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgegenstand und Definitionen

2.1.1 Batteriearten

Lithium-Ionen-Batterien (LIB) unterliegen der österreichischen Batterieverordnung (BGBl. II Nr. 159/2008 idF BGBl. II Nr. 109/2015), welche auf der EU-Richtlinie 2006/66/EG beruht. Diese Verordnung regelt unter anderem die Sammlung und Behandlung von Altbatterie und Alttakkumulatoren. Zunächst ist es wichtig zu wissen, um welche Art von Batterie es sich handelt, um die Entsorgungswege verstehen zu können. Dazu zeigt Abbildung 1 einen Überblick.

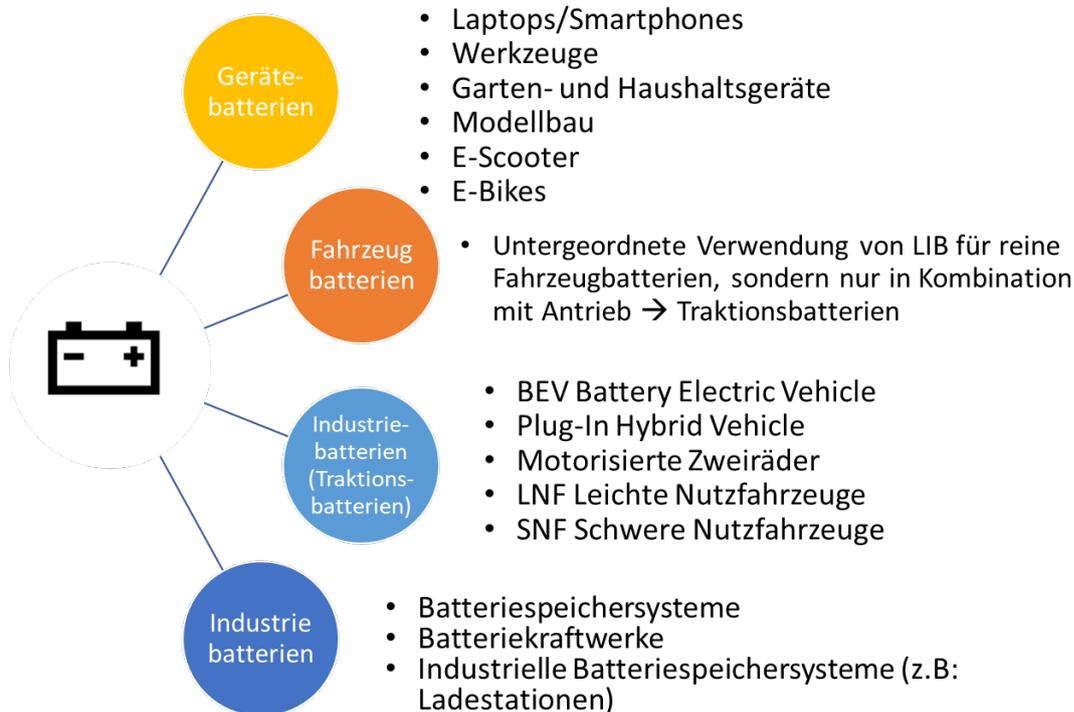


Abbildung 1: Batteriearten im Überblick.

2.1.1.1 Definitionen

Die österreichische Batterieverordnung teilt Batterien, nach ihrer Anwendung in drei Gruppen ein. Die Unterscheidung erfolgt in (1) Gerätebatterien, (2) Fahrzeugbatterien und (3) Industriebatterien.

Für jede Batterieart gilt eine andere Regelung (für Inverkehrbringer, Letztverbraucher, etc.), weshalb diese Abgrenzung wichtig ist.

Jedoch gibt es immer wieder Unklarheiten, da andere Bezeichnungen im täglichen Gebrauch verwendet werden bzw. auch Detailregelungen zu anderen EU-Ländern unterschiedlich sind. Beispielhaft ist zu nennen die Zuordnung von Akkus aus E-Bikes. Die Definition für Industriebatterien oder -akkumulatoren lautet in der EU-Richtlinie sowie in der Batterieverordnung:

[...] Batterien oder Akkumulatoren, die ausschließlich für industrielle oder gewerbliche Zwecke oder für Elektrofahrzeuge jeder Art bestimmt sind;

(vgl. § 6, Z. 6, BGBl. II Nr. 159/2008 und Art. 3, Z. 6, RL 2006/66/EG)

So sind E-Bike-Akkus in Deutschland den Industriebatterien zugeordnet, in Österreich hingegen zu den Gerätebatterien. Die Lösung ist in der Definition der Gerätebatterien zu finden. Der angehängte Zusatz in der österreichischen Batterieverordnung lautet:

[...] es sei denn die Industriebatterien finden in Elektro- und Elektronikgeräten für private Haushalte Verwendung; (§ 3, Abs. 3, lit. c, BGBl. II Nr. 159/2008)

In Zusammenarbeit mit Expert*innen hat das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (heute: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, BMK) ein Informationsblatt zur besseren Abgrenzung der Batteriearten erstellt. Darin begründen sie die Zuordnung der E-Bike- oder Rollstuhl-Akkus zu den Gerätebatterien damit, dass deren Sammlung und Finanzierung sichergestellt werden kann (vgl. BMLFUW 2017).

Missverständnisse treten auch bei den Fahrzeugbatterien auf. Es handelt sich dabei um die Starterbatterien und Batterien für den Anlasser, die Beleuchtung oder die Zündung von Fahrzeugen (§ 3, Z. 5, BGBl. II Nr. 159/2008). Demnach sind Batterien für den Antrieb von Elektrofahrzeugen und Hybridfahrzeugen keine Fahrzeugbatterien. Eine Starterbatterie muss auch eine Angabe über die Kaltstartleistung in Ampere aufweisen und verfügt typischerweise über Rundpolanschlüsse (UFS 2020).

Somit fallen unter:

Gerätebatterien alle gekapselten Batterien, die von einer Durchschnittsperson problemlos in der Hand gehalten werden können:

- Knopfzellen für Hörgeräte, Armbanduhren usw.
- Monozellenbatterien wie Typ AA oder AAA
- Sonstige Batterien für Mobiltelefone, Elektrowerkzeuge, Spielzeuge, Haushaltsgeräte, sowie vergleichbare Geräte in Schulen, Geschäften, Restaurants, Flughäfen, Büros und Krankenhäusern
- Industrialtbatterien, die in Elektro- und Elektronikgeräten für private Haushalte Verwendung finden, wie z.B. E-Bikes.

Industriebatterien alle die für industrielle oder gewerbliche Zwecke bestimmt oder nicht als Gerätebatterien bzw. Fahrzeugbatterien eingestuft sind.

Fahrzeugbatterien nur jene, die für den Anlasser, die Beleuchtung oder Zündung ihren Einsatz finden (vgl. BMLFUW 2017).

Aktuelle Anwendungsgebiete von LIB werden in Abbildung 2 dargestellt.

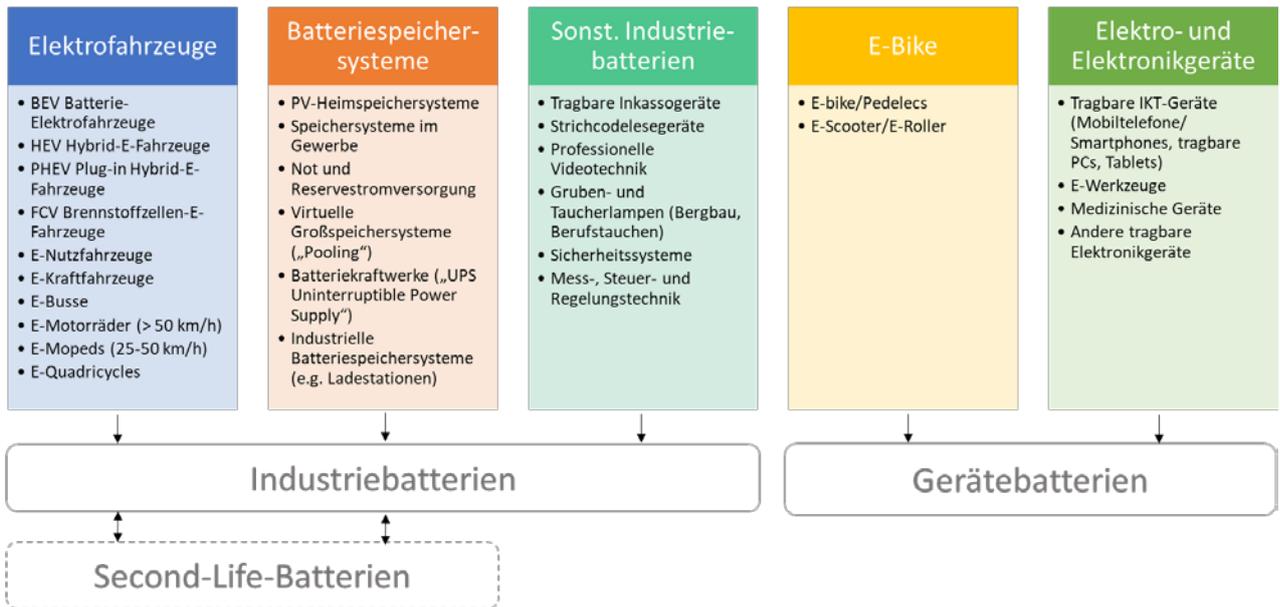


Abbildung 2: Anwendungsgebiete für LIB.

2.1.1.2 Relevanz für Sammlung und Entsorgung

Entsorgung

Im Wesentlichen sind aktuell die Massenströme der Gerätebatterien und Industriebatterien für das LIB-Recycling bedeutsam. Die oben angeführten Unterscheidungen zeigen ihre Auswirkung in der Abfallwirtschaft. So kann der Letztverbraucher von **Gerätebatterien** diese

- bei Sammelstellen von Gemeinden oder Gemeindeverbänden,
- bei Sammelstellen von Herstellern,
- sonstige Rückgabemöglichkeiten, welche Hersteller oder Sammel- und Verwertungssysteme dafür einrichten und
- bei Letztvertreiber von Gerätebatterien

unentgeltlich zurückgeben (vgl. §§ 3, Z. 15 und 9, Abs. 1, BGBl. II Nr. 159/2008).

Hingegen gilt für die **Industriebatterien**:

Hersteller, die Industriebatterien in Verkehr setzen, haben Industrialtbatterien unabhängig vom Datum ihres In-Verkehr-Setzens und unabhängig von ihrer Herkunft oder chemischen Zusammensetzung zurückzunehmen, dies erfolgt nicht unentgeltlich. Hersteller können mit den Letztverbrauchern der Industriebatterien Vereinbarungen über die Finanzierung der Sammlung und Behandlung treffen (vgl. § 15, Abs. 1, BGBl. II Nr. 159/2008).

Somit entstehen zwei unterschiedliche Sammelströme.

Sammelströme

Einerseits kommen LIB aus der Gerätebatteriesammlung und andererseits aus der Sammlung von Industriebatterien.

Bei den **Gerätebatterien** sind neben den Lithium-Ionen-Batterien auch Zink-Kohle-Batterien, Alkali-Mangan-Batterien usw. im Sammelstrom vereint. Zudem handelt es sich in den meisten Fällen um kleine Gebinde mit geringen Abmessungen. Für die weitere abfallwirtschaftliche Behandlung, im Sinne der Sekundärrohstoffgewinnung ist eine Sortierung nach Zellchemie unerlässlich. Bei den daraus erhaltenen LIB handelt es sich um einen heterogenen Massenstrom unterschiedlicher Zellchemie (siehe Kapitel 4).

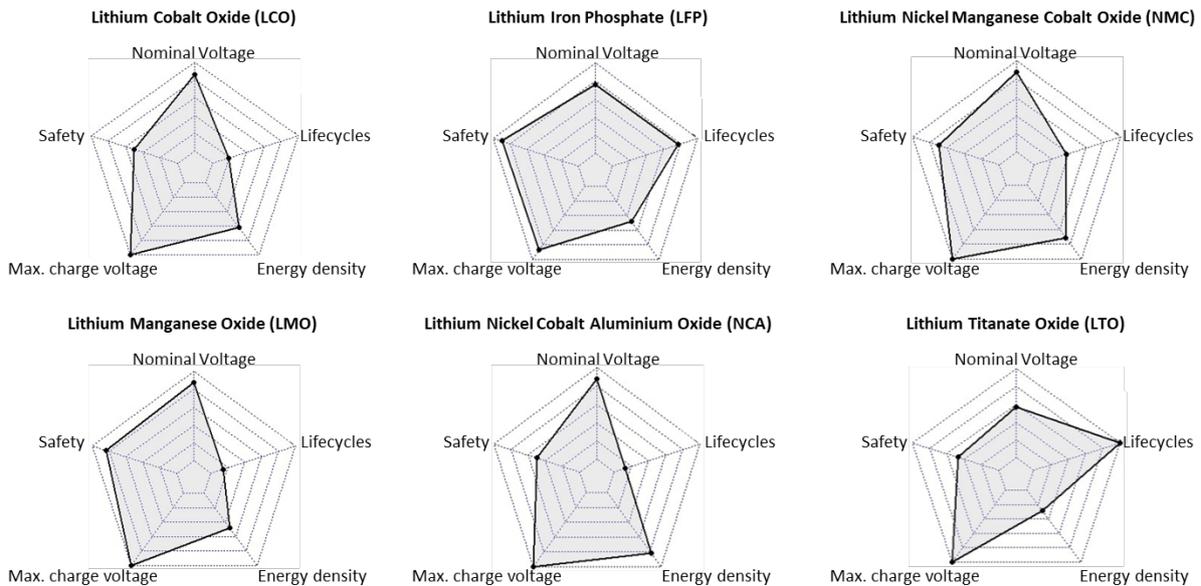
Industriebatterien kommen zumeist in größeren Batteriesystemen vor. Bei diesen kann von einer einheitlichen Zellchemie ausgegangen werden. Da sie von den Herstellern gesammelt werden müssen, ist die weitere Verbringung auch in deren Verantwortung. So ist es nicht zwingend notwendig, dass Industrialtbatterien im österreichischen Abfallregime landen. Durch ihre Größe, Batteriesysteme aus Elektrofahrzeugen haben im Durchschnitt 250 kg gelangt ein relativ homogener Massenstrom an LIB in die Aufbereitung. Vorausgesetzt die Hersteller geben die Zellchemie der verbauten LIB bekannt.

2.1.2 Klassifizierung von Lithium-Ionen-Batteriezellen

Im Allgemeinen werden LIB in Zellen, Module und Packs unterteilt (siehe Abbildung 6). Eine Batteriezelle ist eine einzelne stromerzeugende Einheit und besteht grundsätzlich aus einer Kathode, einer Anode, einem Separator, der mit einem Elektrolyten getränkt ist. Ein Batteriemodul ist ein Satz von Batteriezellen, die in Reihe, parallel oder in einer Kombination aus beidem miteinander verbunden sind und in einem dielektrischen Gehäuse untergebracht sind, während ein Batteriepack ein Satz von Batteriemodulen ist (Warner, 2014). Je nach den Anforderungen einer bestimmten Anwendung variieren LIB in Form, Größe und Konfiguration (d.h. Einzelzelle, Modul oder Pack).

Der wesentliche Unterschied von LIB zu anderen Batterien wie Zink-Kohle-Batterien, Alkali-Mangan-Batterien oder Blei-Akkus liegt darin, dass sie aus unterschiedlichen Zusammensetzungen in der Zellchemie bestehen. Jedoch wird bei der Kennzeichnung derzeit noch nicht darauf eingegangen, was große Herausforderungen, vor allem am Ende des Lebenszyklus einer LIB mit sich bringt (siehe Kapitel 4.2.1).

Das vorherrschende Prinzip zur Unterscheidung verschiedener LIB-Typen konzentriert sich auf das Kathodenmaterial. In der Abbildung 3 ist ein allgemeiner Vergleich der Haupteigenschaften von derzeit gängigen LIB-Typen dargestellt. Darüber hinaus zeigt Tabelle 1 einen Überblick über die am häufigsten verwendeten LIB und ihre Anwendungsbereiche.



Die Nennspannung („Nominal voltage“) und die maximale Ladespannung („Max. charge voltage“) werden auf einer Skala von 0 bis 4,2 V angegeben. Die höchste Sicherheit („Safety“) wird durch den höchsten instabilen Betriebspunkt der thermischen Ausreißer definiert und auf einer Skala von 0 bis 300 °C angegeben. Die Energiedichte („Energy density“) ist das Maß dafür, wie viel Energie ein Batterietyp enthalten kann und wird auf einer Skala von 0 bis 280 Wh/kg Zellen angegeben. Die Lebensdauer („Lifecycles“) ist ein Näherungswert für die erwartete Lebensdauer eines LIB-Typs und wird auf einer Skala von 0 bis 4.000 vollen Lade-/Entladezyklen ausgedrückt.

Abbildung 3: Vergleich der elektrochemischen Eigenschaften der am häufigsten verwendeten Lithium-Ionen-Batterietypen.

Innovationen bei Kathodenmaterialien der letzten Jahrzehnte haben gezeigt, dass sich z.B. die Stöchiometrie von NMC von 1:1:1 ($\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$) über 6:2:2 ($\text{LiNi}_{0,6}\text{Mn}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{O}_2$) hin zu 8:1:1 ($\text{LiNi}_{0,8}\text{Mn}_{0,1}\text{Co}_{0,1}\text{O}_2$) entwickelt haben (El Mofid et al., 2014; Liu et al., 2014; Sun et al., 2020).

Hinsichtlich des Recyclings ist zu beachten, dass solche Materialentwicklungen beider Elektroden, sowohl der lithiumhaltigen Kathoden als auch der Anode, berücksichtigt werden müssen. So ändert sich die Materialzusammensetzung im Laufe der Zeit, wobei z.B. Graphen (Modifizierter Kohlenstoff) und andere Nanokomposite zusätzlich eingesetzt werden, um die Wärmeentwicklung von LMO- oder LFP-Kathoden zu reduzieren oder Brüche der Anode durch wiederholte Lade- und Entladezyklen zu vermeiden (Meng, 2019; Zhu et al., 2014).

Tabelle 1: Merkmale, Klassifizierung und Anwendungsbereiche von Lithium-Ionen-Batteriezellen auf der Grundlage ihrer Kathodenchemie.

Batterietyp basierend auf Kathodenchemie	Chemische Formel und Stöchiometrie	Nennspannung [Volt / Zelle]	Operating range [Volt / Zelle]	Energiedichte [Wh/kg]	Lebenszyklen [Anzahl]	Anwendungsbereiche	Quellen
Lithium Cobalt Oxide (LCO)	LiCoO_2	3,60	3,0–4,2	150–200	500–1.000	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrokleingeräte, wie z.B. Smartphones, Laptops, E-Reader, Tablets, etc. 	(Chen et al., 2021; Liu et al., 2018; Ma et al., 2018; Satyavani et al., 2016; Wang et al., 2020; Yan et al., 2020)
Lithium Iron Phosphate (LFP)	LiFePO_4	3,20	2,0–3,65	90–160	2.000–7.000	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrokleingeräte, wie z.B. Elektrowerkzeuge, medizinische Geräte, Hobby-Geräte usw. 	(Chen et al., 2021; Liu et al., 2018; Liu et al., 2011; Satyavani et al., 2016; Vonsien and Madlener, 2020)
Lithium Manganese Oxide (LMO)	Li_2MnO_3	3,70	3,0–4,2	100–150	400–750	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrokleingeräte, wie z.B. Elektrowerkzeuge, etc. • Medizinische Geräte • BEVs (kombiniert mit NMC-Typen) 	(Chen et al., 2021; Kim et al., 2016; Liu et al., 2018; Satyavani et al., 2016; Thackeray, 1997; Weng et al., 2020)
(Lithium) Nickel Cobalt Aluminium Oxide (NCA)	$\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$	3,70	3,0–4,2	200–260	400–1.000	<ul style="list-style-type: none"> • BEVs, die meist von Tesla produziert werden, wie z.B. "Model 3", oder "Model X" 	(Chen et al., 2004; Chen et al., 2021; Liu et al., 2018; Togasaki et al., 2020; Vonsien and Madlener, 2020; Wang et al., 2016; Xu et al., 2015)
(Lithium) Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC)	$\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ (Ni:Mn:Co = 1:1:1, 6:2:2, oder 8:1:1)	3,70	3,6–4,0	160–230	2.000–3.000	<ul style="list-style-type: none"> • BEVs, wie "BMW i3", "Audi e-tron GE", "BYD Yuan EV535", "BAIC EU5 R550", "Chevrolet Bolt", "Hyundai Kona Electric", "Jaguar I-Pace", "Jiangling Motors JMC E200L", "NIO ES6", "Nissan Leaf S Plus", "Renault ZOE", "Roewe Ei5", "VW e-Golf", "VW ID.3" etc. • Elektrokleingeräte, wie z.B. Smartphones, Laptops, etc. • Batteriespeicherkraftwerke 	(Chen et al., 2021; El Mofid et al., 2014; Liu et al., 2018; Maheshwari et al., 2018; Sun et al., 2020; Vonsien and Madlener, 2020; Zheng et al., 2016)
Lithium Titanate Oxide (LTO)	Li_2MnO_3 , oder $\text{LiNi}_{0,6}\text{Mn}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{O}_2$	2,40	1,8–2,9	50–80	3.000–20.000	<ul style="list-style-type: none"> • BEVs, die hauptsächlich auf dem japanischen Markt verwendet werden, wie "Mitsubishi i-MiEV", "Honda EV-neo electric bike", "Honda Fit EV", Tosa electric bus • Kleingeräte, wie Autoradios, Tablets, Smartphones, etc. • Medizinische Geräte • Unterbrechungsfreie Stromversorgungseinheiten (UPS) 	(Chen et al., 2021; Jing et al., 2020; Liu et al., 2018; Meng et al., 2019; Satyavani et al., 2016; Wang et al., 2019; Wang et al., 2020; Yan et al., 2021; Yan et al., 2020)

2.2 Daten und Methoden

2.2.1 Quellen

Die Studie basiert einerseits auf einer Literaturrecherche in nationalen Berichten und Studien (z.B. AIT, Klima- und Energiefonds) sowie bei internationalen Forschungseinrichtungen (z.B. IRENA, IEA HEV) und fachspezifischen Zeitschriften, andererseits auf Expert*inneninterviews mit Stakeholdern und Expert*innen der gesamten LIB-Wertschöpfungskette in Österreich. Unterstützend zu einzelnen Schritten der Prozesskette (i.e. Second-Life, Sammlung) wurden Expert*innen aus dem umliegenden Ausland (Deutschland, Schweden, Belgien (EU), Holland) hinzugezogen. Außerdem bildet ein Stakeholder-Dialog zur Diskussion der Umsetzung und Machbarkeits-Varianten einer optimierten LIB-Wertschöpfungskette in Österreich eine wesentliche Grundlage für die Etablierung eines Maßnahmenkatalogs bzw. Aktionsplans. Darüber hinaus wird auf der Basis eines definierten Mengenszenarios für die Entwicklung von Elektrofahrzeugen und LIB eine volkswirtschaftliche Evaluierung der Effekte des Recyclings von LIB in Österreich vorgenommen. Diese schätzt mögliche damit einhergehende Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte ab (siehe Kapitel 7).

2.2.2 LIB Mengenmodellierung

Für die Ableitung der Mengenentwicklung von Elektrofahrzeugen und damit der EoL-LIB sowie für die volkswirtschaftliche Evaluierung einer Wertschöpfungskette für das Recycling von LIB in Österreich wird als zentrale Modellannahme die bereits aus einem Vorprojekt bestehenden Energie- und Treibhausgaszenarien zugrunde gelegt (Meyer et al. 2020; Meyer et al. 2018, UBA 2017): Szenario Transition und Szenario WEM („with existing measures“). Das daraus verwendete Transition-Szenario wird im Folgenden näher erläutert, da jenes Szenario eine wesentliche Grundlage für die LIB-Mengenabschätzung in dieser Studie darstellt: Das Transition-Szenario ist ein Energieszenario für Österreich, das den Zeitraum 2015-2050 umfasst. Das Transition-Szenario beschreibt eine mögliche Entwicklung der österreichischen Wirtschaft mit dem Ziel der Klimaneutralität, d.h. einer Reduktion der energiebedingten Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) um mindestens 80-95 % (2050/1990). Es folgt somit dem Ziel des Klimaübereinkommens von Paris (COP21), eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf deutlich unter +2 °C zu erreichen. Der Fokus des Szenarios Transition liegt auf Energieeffizienz und Ressourcenschonung. Dementsprechend wird nicht nur ein hocheffizientes, erneuerbares Energiesystem entwickelt, sondern es werden auch Maßnahmen in nicht-energetischen Sektoren (etwa im Bereich der Raumplanung) hinterlegt, die Nachfrageänderungen etwa im Mobilitätsverhalten implizieren. Zentrale Annahmen des Szenarios Transition sind:

- Alle Volkswirtschaften setzen Maßnahmen und Handlungsweisen, um das Pariser Klimaübereinkommen zu erfüllen (weltweites Klimaschutzszenario)
- Eine öko-soziale Steuerreform schafft über einen steigenden CO₂-Preis Anreize für mehr Klimaschutz sowie sozialen Ausgleich. Die Entwicklung der CO₂-Preise (2015: 8 €/t; 2020: 15 €/t; 2030: 40 €/t; 2050: 200 €/t) folgt dem World Energy Outlook 2016 (IEA 2016)
- Es gelten klare rechtliche Rahmenbedingungen (u.a. Regulierungen) in den Jahren 2030 und 2050

Wesentliche Maßnahmen im Verkehrsbereich betreffen Maßnahmen zur Veränderung des Modal-Split im Personen- und Güterverkehr hin zu umweltfreundlicheren Verkehrsmodi bzw. Verkehrsträgern, die zu einer stark reduzierten jährlichen PKW-Fahrleistung führen (für Maßnahmenbündel in den Sektoren Gebäude, Industrie, Energie und Landwirtschaft siehe UBA 2017). Insbesondere treiben ordnungsrechtliche Vorgaben das Wachstum der Elektromobilität der österreichischen Fahrzeugflotte:

- PKW 100 % Neuzulassung von CO₂-freien Antrieben ab 2030
- LNF 100 % Neuzulassung von CO₂-freien Antrieben ab 2035
- SNF (3,5–40 t) 100 % Neuzulassung von CO₂-freien Antrieben ab 2040

Für das vorliegende Projekt wurde das Transition-Szenario an die Klimaschutzziele des aktuellen Regierungsprogramms angepasst und zeitlich komprimiert, so dass das Ziel der Klimaneutralität bereits im Jahr 2040 erreicht wird.

Das Transition-Szenario wird im Projekt auf zweierlei Weise angewendet:

- Es gilt beispielhaft als Referenz für die Entwicklung der österreichischen Fahrzeugflotte und beschreibt die relevante Mengenentwicklung der elektrischen Antriebe bis zum Jahr 2040 (siehe Abschnitt 7.1)
- Es fungiert als Referenz-Szenario für die volkswirtschaftliche Analyse der Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte einer möglichen Wertschöpfungskette des Recyclings von LIB in Österreich (siehe Abschnitte 7.3 und 7.4).

2.2.3 Ökonomische Modellierung

Die Abschätzung der gesamtwirtschaftlichen Effekte der Investitionen bzw. der Betrieb von LIB-Recyclinganlagen wird mit einer traditionellen Input-Output-Analyse (IO-Analyse) durchgeführt, welche im Modell WIFO.DYNK (Dynamic New Keynesian) umgesetzt wurde (Kirchner et al. 2019). Dieses vereinfachte WIFO.DYNK entspricht somit einer erweiterten Input-Output-Analyse. Auf Basis dieser kann dargestellt werden, wie viele Güter entlang der Vorleistungskette in einer Wirtschaft produziert werden, wenn Investitionen getätigt werden oder wenn sich Strukturen ändern (z.B. durch den Betrieb einer neuen Recyclinganlage). Die Effekte, die so dargestellt werden, umfassen direkte, indirekte und induzierte Effekte. Die direkten Effekte beziehen sich auf Investitionen und Betrieb der Anlagen. Indirekte Effekte berücksichtigen die Güterproduktion und Beschäftigung, die durch die geänderte Nachfragestruktur und die dafür notwendige Produktion an Vorleistungen in anderen Sektoren generiert wird. Die mit der erhöhten Produktion verbundene Einkommenssteigerung wirkt positiv auf den privaten Konsum, der nochmals auf die Nachfrage wirkt. Dieser Effekt ist als „konsuminduzierter Effekt“ zu interpretieren.

Um die Auswirkungen von Recyclinganlagen mittels IO-Analyse zu bewerten wurde ein zusätzlicher Sektor in die IO-Tabelle eingefügt, der ausschließlich die Anlagen darstellt. Die erzeugten Materialien werden dem Export zugeführt und somit heimische Wertschöpfung und Beschäftigung direkt, indirekt und induziert geschaffen. Um den jährlichen Effekt des Betriebs der Anlagen analysieren zu können, wurde die Struktur und Endnachfrage dieses Sektors für 20 Jahresperioden (2020 – 2040) fortgeschrieben und dazu die jährlichen Szenariendaten eingespeist. Somit ist der isolierte ökonomische Effekt der Existenz und des Betriebs der Anlagen sichtbar.

Methoden zur Ermittlung von Primärdaten

Die Szenariendaten umfassen mehrere Quellen. Das Modell beruht auf der Input-Output-Tabelle 2017 (Statistik Austria 2021). Diese umfasst die gesamtwirtschaftlichen Verflechtungen zwischen Sektoren und Konsumenten. Für die Anwendung des Modells im vorliegenden Projekt, wurden eine Reihe von Daten bezüglich des Betriebs von LIB Recyclinganlagen erhoben, separat aufbereitet und die resultierenden Ergebnisse in das Modell eingespeist (siehe Kapitel 7.4). Diese Ergebnisse sind die jährlichen Investitionsvolumina (Expert*inneninterview und Thies et al. 2018), die Güterstruktur der Investitionen³, die Vorleistungsstruktur des Betriebs der Anlage⁴ und der Verkaufswert⁵ der wiedergewonnenen Materialien.

Makroökonomische Modellierung der Varianten unter Annahme von Preisszenarien

Da die Erlöse des Recyclingprozesses abhängig vom internationalen Preisumfeld sind, und dieses eine Schwankungsbreite aufweist, wurden für die Berechnung der volkswirtschaftlichen Effekte des Recyclings Preisbänder definiert, welche historische Höchst- und Niedrigstände abbilden. Dadurch können die gesamtwirtschaftlichen Effekte entlang dieser Preisbänder dargestellt werden. Es wurden 3 Preisszenarien simuliert: Ein mittleres Preisband mit konstanten Preisen, das im Fall von Aluminium, Kupfer und Eisen die Preisprognose der Weltbank (2021) verwendet. Ein oberes Preisband, in dem der historische Preishöchststand innerhalb weniger Jahre erreicht wird und dann konstant bleibt. Und analog ein unteres Preisband, in dem die Preise zu einem Niedrigstand tendieren.

Da, je nach Preiskonstellation, es möglich ist, dass der Betrieb der Recyclinganlage nicht kostendeckend ist und die Anlage somit unprofitabel, wurde für die drei Preisszenarien ein Anlagenkapitalwert („net present value“, NPV) berechnet. Wenn dieser bei gegebener Preiskonstellation, negativ ist, ist die Anlage nicht profitabel. Damit der Anlagenbetrieb profitabel werden kann und somit die Investitionen realistischerweise getätigt werden, mussten Entsorgungskosten („Gate Fee“) eingeführt werden, die auf die Haushalte abgewälzt und daher von den Haushalten zu entrichten sind. Diese Entsorgungskosten reduzieren das verfügbare Einkommen der Haushalte und wirken somit negativ auf die heimische Nachfrage und Wertschöpfung.

2.2.4 Stakeholder-Interviews

Im Zuge des Projekts wurden entlang der gesamten Wertschöpfungskette Stakeholder identifiziert und Interviews zu den wesentlichen Potentialen und Herausforderungen im Bereich der Etablierung einer Wertschöpfungskette für das Recycling von LIB geführt. Es wurden technische, organisatorische und

³ Struktur für Bruttoinvestitionen in Gebäude und Maschinen aus der Endnachfrage zu Herstellerpreisen in der Input-Output-Tabelle 2017 von Statistik Austria

⁴ Annahme zum Vorleistungsbedarf je Produktionsabschnitt. Vorleistung setzt sich zusammen aus Personalkosten, Transportdienstleistungen (CPA 49) und Dienstleistungen zur Reparatur und Installation von Ausrüstungen (CPA 33)

⁵ Worldbank (2021), statista (2021) und tradingeconomics.com (2021)

wirtschaftspolitische Aspekte des Recyclings von LIB abgefragt. Die generierten qualitativen Daten fließen in die Kapitel 4 und Kapitel 5 ein.

Eine Auswahl potenzieller Stakeholder erfolgte anhand der einzelnen Schritte in der Wertschöpfungskette, wie sie im Flow Chart (siehe Abbildung 4) dargestellt ist, betrifft darüber hinaus aber auch Stakeholder aus der Verwaltung und der Forschung. Für das Projekt wesentliche und aus österreichischer Sicht bedeutende Vertreter wurden daraufhin kontaktiert und zu einem Interview gebeten. In der Tabelle 2 sind die befragten Firmen und Institutionen alphabetisch angeführt.

Die Durchführung der Befragungen erfolgte in den meisten Fällen online, mittels unterschiedlicher Webmeeting-Tools. Vereinzelt wurden auch abgestimmte Fragebögen per Mail zugeschickt, oder das Interview per Telefon abgehalten.

Der im Vorfeld entwickelte Fragenkatalog (siehe Anhang 11.1) umfasst alle Teilbereiche der gesamten Wertschöpfungskette und darüber hinaus Fragen bezüglich der notwendigen wirtschaftspolitischen Rahmenbedingungen sowie anderer industriepolitischer Voraussetzungen für die Etablierung einer LIB Recycling Wertschöpfungskette. Ausschlaggebend dafür war, dass viele Themen in mehreren Bereichen gleichermaßen relevant sind und viele Stakeholder mehrere Gebiete der Wertschöpfungskette abdecken. Da für ein paar Interviewpartner die Zuordnung in der Wertschöpfungskette nicht ganz geklärt war, konnte somit im Gespräch flexibel auf ergänzende Themengebiete reagiert werden.

Für jedes Interview bedurfte es einer individuellen Abstimmung des Fragenkatalogs. Dieser diente als Leitfaden, wobei sich der Ablauf und die Reihenfolge des Gesprächs spontan gestaltete. Somit konnte der Gesprächsverlauf so offen wie möglich gestaltet, aber auch die notwendige Struktur gehalten werden (vgl. Helfferich 2009, 181). Solcher Art Expertinnen- bzw. Experteninterviews benötigen meist mehr Zeit, unterbrechen aber den Gesprächsverlauf nicht (vgl. Diaz-Bone 2015, 32). Um sicherzustellen, dass alles angesprochen wird, dient der Leitfaden. Zudem ermöglicht er die Vergleichbarkeit mit anderen Interviews (vgl. Nohl 2012, 13-15).

Eine wörtliche Transkription der Interviews erfolgte nur in ausgewählten Fällen. Die Aussagen der Interview Partner wurden sinnentsprechend zu den als zentral herausgefilterten Themen zugeordnet und ausgewertet. Die detaillierten Ergebnisse sind im Kapitel 5 ausgeführt.

Tabelle 2: Interviewpartner*innen und Zuordnung nach Flow Chart (Anm. die Zuordnung erfolgte nach Kenntnissen bzw. Expertise in den genannten Bereichen der Wertschöpfungskette).

Interviewpartner*innen (alphabetisch geordnet)	Tätigkeitsfeld (nach Flow Chart: siehe Abbildung 4)																
	0 Sonstige	1 Herstellung von Batteriematerial	2 Zellproduktion	3 Batteriepack-Herstellung	4 Produktherstellung	5 First Life	6 Reparatur und Wartung	7 Second Life	8 Sammlung und Vorsortierung	9 Vorbereitung zur Wiederverwendung	10 Transport und Lagerung	11 Identifizierung und Sortierung	12 Demontage	13 Entladung	14 Aufbereitung	15 Verwertung und Recycling	16 Entsorgung
Accurec											x	x	x		x	x	x
Akku Mäser GmbH				x	x												
Duesenfeld GmbH											x	x	x	x	x	x	x
ERA Elektro Recycling Austria GmbH									x		x						
European Commission, DG Environment	x																
European Lithium		x															
Fraunhofer Austria	x																
Green Tech Cluster Styria	x																
JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH	x																
Klima- und Energiefonds (KLIEN)	x																
Miba		x		x													
Montanwerke Brixlegg		x														x	x
Nickelhütte Aue		x													x	x	x
Ökoinstitut Darmstadt	x																
O.Ö. LAVU GmbH									x		x	x	x				
Primobius												x	x	x	x	x	x
Redux											x	x	x	x	x	x	x
Renault Österreich GmbH				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
RepaNet	x									x							
Samsung SDI			x	x													
Saubermacher Dienstleistungs AG									x	x	x	x	x	x	x	x	x
TU Braunschweig, IWF Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik	x							x				x					
TU Braunschweig, IPAT Institut für Partikeltechnik	x														x	x	x
TU Graz - Institut für Elektrische Anlagen und Netze	x					x											
Umicore AG & Co. KG															x	x	x
Universität für Bodenkultur Wien - Council für nachhaltige Logistik	x					x		x									
VERBUND Energy4Business GmbH						x											
UFH Elektroaltgeräte Systembetreiber GmbH									x		x						
Varta micro innovations			x	x													
Summe	11	4	2	5	2	4	1	3	5	3	8	7	8	5	8	9	9

3 Der Markt und aktuelle Trends

Dieses Kapitel umfasst eine Übersicht über den Ist-Zustand des Marktes für LIB in den verschiedenen Anwendungsbereichen sowie ein Ausblick auf zukünftige Trends. Angefangen von den aktuellen rechtlichen Rahmenbedingungen werden Akteure und deren Rollen im Hinblick auf LIB-Produktion, -Verarbeitung, -Nutzung oder -Verwertung näher beschrieben sowie der aktuelle Bestand an Elektro-Fahrzeugen bzw. Batterien gezeigt. Aktuelle sicherheitstechnische Aspekte werden erläutert sowie der Anlagenbestand zur Aufbereitung und Behandlung von LIB dargestellt.

3.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die wichtigsten gesetzlichen Rahmentexte bezüglich Batterien sind die europäische Batterierichtlinie (RL 2006/66/EG), die Abfallrahmenrichtlinie (RL 2008/98/EG), der europäische Abfallkatalog sowie die darauf beruhenden österreichischen Regelungen wie die Batterieverordnung (BGBl. II Nr. 159/2008), das Abfallwirtschaftsgesetz (BGBl. II Nr. 102/2002), die Abfallbehandlungspflichtenverordnung (BGBl. II Nr. 102/2017), sowie die Abfallverzeichnisverordnung (BGBl. II Nr. 409/2020).

Darin wird vorgegeben, wie Batterien im abfallwirtschaftlichen Kontext zu handhaben sind. Von Schadstoffverboten, sowie Minimalvorgaben für die Kennzeichnungspflicht bei der Herstellung von Batterien, wird der Bogen über die getrennte Sammlung durch eigens dafür eingerichtete Systeme bis hin zu Behandlung und Recycling gespannt. Abgerundet durch eine allgemeine Überwachungs- und Aufzeichnungspflicht sollen Stoffströme sichtbar gemacht und über Sammelraten (45 %) und Mindestwerte für die Recyclingeffizienz (65 % Blei-Akku 75 % NiCd und 50 % sonstige Batterien) Ressourcen geschont werden.

Für Batterierecyclinganlagen herrscht Genehmigungspflicht. Durch die Erfüllung der damit verbundenen Auflagen werden Batterien ausschließlich nach dem Stand der Technik und unter Einhaltung der Abfallbehandlungspflichtenverordnung behandelt und verwertet.

Der Transport von Lithium-Ionen-Batterien als Gefahrgut wird innereuropäisch durch das internationale Abkommen ADR geregelt. Die Abkürzung ADR steht für das „Europäische Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße“ und bezieht sich auf den englischen Titel „*Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road*“. Es umfasst Vorschriften für den Straßenverkehr hinsichtlich Verpackung, Ladungssicherung, Klassifizierung und Kennzeichnung von Gefahrgut.

Hier besteht die einzige Diskrepanz zwischen dem europäischen Rechtskanon und Österreich. Auf EU-Ebene ist die Einteilung in gefährliche und nicht gefährliche Abfälle im Europäischen Abfallkatalog (EAK) geregelt. Eine sechsstellige Nummer gibt herkunftsbezogen Auskunft über die Abfallart. Diese Herangehensweise wurde in Österreich nicht in nationales Recht umgesetzt. Im Gegensatz zum EAK erfolgt eine Zuordnung stoffspezifisch mit einer fünfstelligen Nummer. Während eine ausgediente Lithium-Ionen-Batterie in Österreich die Schlüsselnummer „33537 gn – Lithiumbatterien“ besitzt und als gefährlicher nicht ausstufbarer Abfall geführt wird, wird sie auf Basis des EAK unter „606505 Andere Batterien und Akkumulatoren“ eingestuft und gilt als nicht gefährlich. Diese unterschiedlichen Sichtweisen darüber was als Gefahrgut, bzw. als gefährlicher Abfall gilt, führt beim Verbringen über die Grenze zwangsläufig zu Problemen.

Ausblick

Ende 2020 wurde eine Revision der Batterierichtlinie angekündigt. Drei neue Kriterien sollen das Inverkehrbringen von Batterien in Zukunft regeln: der Carbon-Footprint, der Rezyklatanteil und allgemeine Leistungskriterien. Damit sollen Produkte, die nicht Stand der Technik sind vom Markt genommen werden.

Zusätzlich soll von Herstellern und Recyclern mehr Gewicht auf die Themen Recycling von kritischen Rohstoffen, Wiederverwendung, Lebensverlängerung und Reparatur gelegt werden.

Besonders spannend ist die geplante Einführung einer neuen Datenbank genannt EDI „Electronic Data Interchange“ (EDI), die Entsorger beim Verbringen von Batterien digital unterstützen soll samt digitalem Recyclingausweis. Darin will die EU allen relevanten Informationen Herr werden und sie allen Betroffenen entlang der Wertschöpfungskette zur Verfügung stellen.

Von den Änderungen werden wahrscheinlich auch Auswirkungen auf andere Rechtstexte wie zum Beispiel die Altfahrzeugrichtlinie oder die Ecodesignrichtlinie haben.

3.2 Akteure und Rollenverteilung

Im Idealfall kann man Produkte, die ihr Lebensende erreicht haben, aufbereiten und wieder in der Produktion eben dieser Produkte einsetzen. In der Abbildung 4 ist der idealisierte Lebenszyklus einer LIB dargestellt, welcher aus kreislaufwirtschaftlicher Sicht gestaltet wurde. Beginnend in der Produktionsphase (1-4) kommt eine LIB in die Nutzungsphase (5-7). Dabei kann die Nutzung durch Reparatur (6) oder in einem „zweiten Leben“ (7) verlängert werden. Wenn eine LIB ihr Lebensende erreicht hat, durchläuft sie die Stationen der End-of-Life Phase (8-16). In einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft mit funktionellem Recycling kommen die aufbereiteten Stoffströme wieder in die Produktion von Lithium-Ionen-Batterien. Dieses generalisierte Fließbild einer LIB beinhaltet auch das nicht funktionelle Recycling, wo das Produkt für eine andere Anwendung eingesetzt werden kann. Derzeit funktioniert die Wertschöpfung noch nach dem Prinzip der Linearwirtschaft und nur wenige Wertstoffe werden zurückgewonnen und wieder in gleicher oder ähnlicher Qualität eingesetzt.

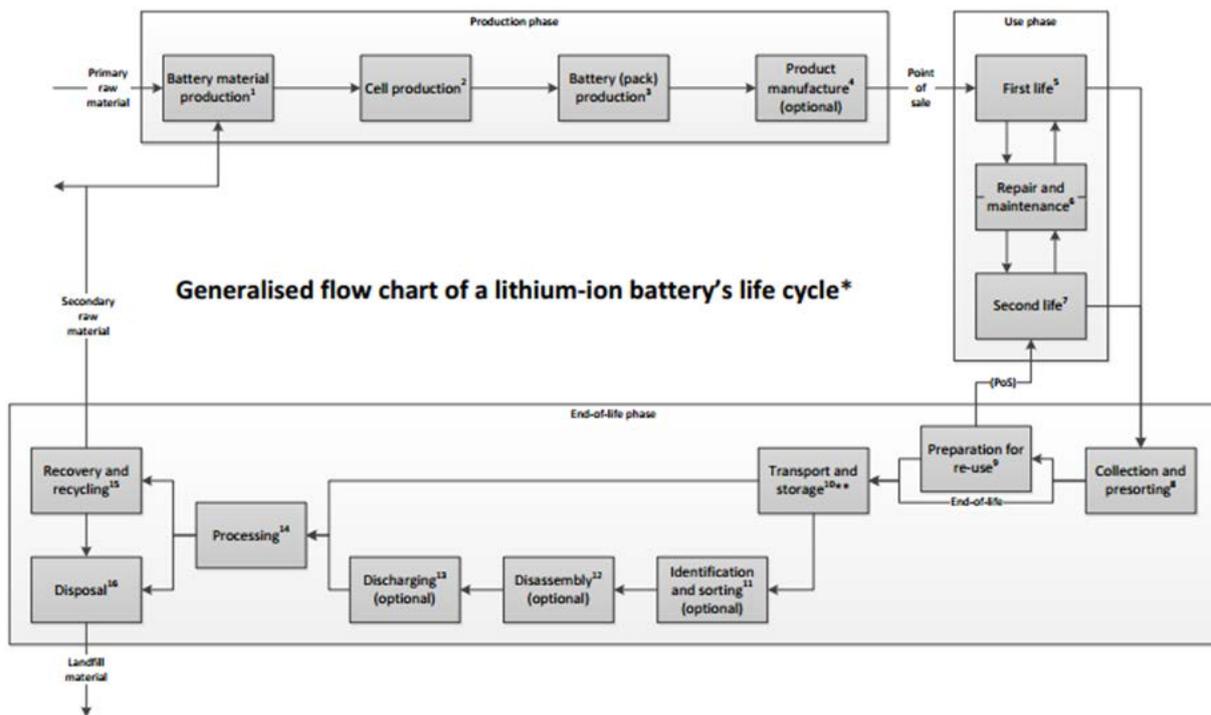


Abbildung 4: Übersicht Wertschöpfungskette.

1. Herstellung von Batteriematerial (Battery material production)

Hersteller von Kathoden- oder Anodenmaterial, Elektrolyt und anderen Materialien, die in einer LIB-Zelle verbaut werden.

Bsp: BASF

2. Zellproduktion (Cell production)

Hersteller von LIB-Zellen in den unterschiedlichen Formaten (zylindrisch, prismatisch, Pouch).

Bsp: LG, Panasonic, Samsung

3. Batteriepack-Herstellung (Battery (pack) production)

Produzieren aus einzelnen Zellen Batteriepacks. Neben den Zellen sind hier noch das Batterie-Management-System (BMS), die notwendige Verkabelung und das Gehäuse verbaut. Viele Produzenten von LIB-Zellen produzieren auch ihre eigenen Batterie-Packs.

Bsp: Samsung SDI; Kreisel, Tesla

4. Produktherstellung (Product manufacture (optional))

Diese Position ist optional, da es sich um Produzenten handelt, die in ihren Produkten LIB verbaut haben. Sie können mitunter auch Batterie-Pack Produzenten zugleich sein, oder sie kaufen einfach die Module zu und verbauen diese im Produkt.

Bsp: VW, Tesla

5. First life

Einsatz der Batterie beim Endkunden.

Bsp: Fahrer eines E-Bikes / E-Autos

6. Reparatur und Wartung (Repair and maintenance)

Betriebe die defekte LIB (Zellen, Module, ...) reparieren und/oder warten. Es besteht vom Besitzer keine Entledigungsabsicht und die Batterien kommen wieder in gleicher Form zum Einsatz.

Bsp: ReCell

7. Second life

Nach der Aufbereitung der LIB, werden sie für einen anderen Zweck als zuvor verwendet. Klassisches Beispiel hierfür sind die Traktionsbatterien, welche nicht mehr in Fahrzeugen verwendet werden. Die nutzbaren Module werden als stationärer Energiespeicher verwendet.

Bsp: stationäre Energiespeicher

8. Sammlung und Vorsortierung (Collection and presorting)

In den meisten Fällen von Gerätebatterien, handelt es sich hier um Altstoffsammelzentren (ASZ), die EoL-Batterien sammeln und vorsortieren. Anders verhält es sich bei den Traktionsbatterien. Industriebatterien müssen vom Hersteller (Batterieverordnung §15) wieder zurückgenommen werden. Automobilhersteller sehen zunehmend Potential im Second Life der LIB als stationärer Energiespeicher.

Bsp: LAVU OÖ, Saubermacher, Hersteller von Industriebatterien; GRS Batterien

9. Vorbereitung zur Wiederverwendung (Preparation for re-use)

Behandlungsbetriebe, die entsorgte LIB für einen weiteren Einsatz aufbereiten. Die von ihrem Besitzer (Mieter) entledigten LIB, werden auf Funktionstüchtigkeit getestet und repariert, um dann – meist in anderer Anwendung – wieder eingesetzt zu werden. Derzeit wird dies mit Traktionsbatterien gemacht, die dann als stationärer Speicher dienen.

Bsp: RepaNet

10. Transport und Lagerung (Transport and storage)

Abfallentsorger und Abfalltransporteure. Bei unsachgemäßer Handhabung können von LIB große Gefahren ausgehen (Brand, giftige Gase, ...). Es ist daher notwendig auf einen sicheren Transport und eine ordnungsgemäße Lagerung zu achten.

Bsp: Saubermacher

11. Identifizierung und Sortierung (Identification and sorting (optional))

Für die meisten Aufbereitungsverfahren ist es notwendig, die eingesetzten Batterien nach ihrer Materialzusammensetzung zu sortieren, damit Störstoffe den Prozess nicht behindern.

Bsp: Saubermacher; Redux

12. Demontage (Disassembly (optional))

Um große Batteriepacks verarbeiten zu können – meist handelt es sich um Traktionsbatterien – werden diese auf Modulebene bzw. Zellebene zerlegt. Die Gehäuseteile, Elektronikteile, Kühlung, etc. werden einem weiteren Recyclingprozess zugeführt.

Bsp: Accurec, Umicore

13. Entladung (Discharging (optional))

Entsorgte LIB-Zellen verfügen über eine Restenergie. Für manche Aufbereitungsverfahren ist es notwendig diese zu entladen, zum Beispiel durch Eintauchen in Salzwasserlösung. Bei großen LIB wird diese Energie auch zurückgewonnen und kann ins (interne) Netz eingespeist werden. Es gibt auch Verfahren, wo eine Entladung nicht von Nöten ist.

Bsp: Redux, Duesenfeld

14. Aufbereitung (Processing)

Je nach Anlage werden Zellen bzw. Module mittels physikalischen und/oder chemischen Prozessen behandelt. Die derzeit gängigsten Methoden beziehen sich auf mechanische, hydrometallurgische und pyrometallurgische Verfahren. Durch die Steigerung der Batterieperformance und die teilweise hochpreisigen Rohstoffe, werden neue LIB-Typen mit neuen Materialzusammensetzungen entwickelt. Zusätzlich fordert die neue Batterieverordnung eine höhere Mindesteffizienz für die stoffliche Verwertung. Dies führt zu neuen Behandlungsmethoden und neuen Verfahren.

Bsp: Umicore, Duesenfeld

15. Verwertung und Recycling (Recovery and recycling)

Fraktionen (Abfallströme) aus den Aufbereitungsanlagen werden in Hütten und ähnlichen Anlagen zusetzt. Daraus entstehen Stoffe, welche unter anderem wieder in der Batterieproduktion als Sekundärrohstoff eingesetzt werden können.

Bsp: AMAG, VOEST, Montanwerke Brixlegg; Nickelhütte Aue

16. Entsorgung (Disposal)

Rückstände aus dem Behandlungs- bzw. Recyclingprozess werden in die dafür vorgesehenen Deponien verbracht. Neben den Deponien gibt es auch noch andere Senken, wie die Atmosphäre, die auch zur Entsorgung zählen.

3.3 Bestand an Traktions-, Industrie- und Gerätebatterien und zukünftige Entwicklung

Dieses Kapitel umfasst eine Beschreibung des aktuellen Bestandes an Traktions-, Industrie- und Gerätebatterien anhand der unterschiedlichen Anwendungsbereiche (Elektrofahrzeuge, Stationäre Batteriespeichersysteme, sonstige Industriebatterien, E-Fahrräder und E-Roller, Elektro- und Elektronikgeräte). Zusätzlich werden derzeitige Anwendungsbereiche von SecondLife-Batterien angeführt. Soweit vorhanden wird der aktuelle Bestand auf Basis der Daten von Statistik Austria sowie das LIB-Stückgewicht für die einzelnen Anwendungsgebiete in Tabelle 3 bis Tabelle 6 dargestellt. Die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung erfolgte auf Basis der vom Umweltbundesamt entwickelten Energie- und Treibhausgasszenarien (Szenario WEM und Szenario Transition) jedoch mit Ziel 2040 (siehe Kapitel 2.2.2). Weitere Referenzen oder Annahmen werden jeweils angeführt.

Elektrofahrzeuge

Zu den Anwendungen von LIB im Automobil-Bereich gehören Batterie-Elektrofahrzeuge (BEV), Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (FCEV), Hybrid-Fahrzeuge (HEV), Plug-in-Hybrid-Elektrofahrzeuge (PHEV), Elektro-Nutzfahrzeuge, Elektro-Schwerfahrzeuge und Elektro-Busse sowie Elektro-Mopeds, -Motorräder und -Quadricycles.

In Österreich ist die Relevanz von elektrisch angetriebenen Transportfahrzeugen, wie z.B. Elektrobussen, Elektro-LKW noch gering, wenn man bedenkt, dass derzeit 44.507 E-Autos gegenüber 9.184 E-Nutzfahrzeugen oder LKW, 225 E-Schwerfahrzeugen registriert sind (Statistik Austria, 2020a). Der BEV hat mit Stand 2020 einen Anteil von 0,87 % am gesamten PKW-Bestand in Österreich. Es wird jedoch erwartet, dass dieser Anteil in den kommenden Jahren bei Umsetzung der nationalen Energiestrategie stark ansteigen wird.

Der höchste Marktanteil des BEV in Österreich hat Tesla mit 36,8 %, gefolgt von BMW mit 12,5 % und Hyundai mit 10,7 % (Bundesministerium Verkehr, 2019). Auch im Jahr 2020 wurden die meisten BEV von Tesla (20 %) neu zugelassen, gefolgt von VW (15 %) und Renault (13 %) (Statistik Austria, 2020b). Die Batteriekapazität der in Österreich eingesetzten neuen Fahrzeugtypen reicht von 18 kWh (Smart fortwo, Smart forfour) bis 100 kWh (Tesla Modell S 100).

Elektronische Fahrzeuge unterscheiden sich von Verbrennungsmotoren mit Zusatzkomponenten wie Wechselrichter, Bordladegerät und Schnellladestecker sowie einem Batteriesystem, hauptsächlich Lithium-Ionen-Batterien und einem Elektromotor. Das Chassis von Elektrofahrzeugen hat ein geringeres Gewicht als Verbrennungsmotoren, um eine höhere elektrische Reichweite zu ermöglichen. Daher werden weniger Stahl oder Gusseisen in die Wagen eingebaut, sondern leichtere Metalle wie Aluminium sowie mehr Kabel. Eine der wichtigsten Komponenten in Elektrofahrzeugen ist das Batteriesystem (318 kg in einem E-Golf), das bei verminderter Kapazität während der Lebensdauer des Fahrzeugs ausgetauscht werden muss. In diesem Fall ist die Batterie jedoch noch funktionsfähig und kann z.B. in Batteriespeichersystemen für PV-Anlagen in Haushalten wiederverwendet werden. Der VDE rechnet mit einer Gesamtlebensdauer der Batterie von 20 Jahren.

Elektro-Mopeds sind Fahrzeuge mit einer Bauartgeschwindigkeit über 25 km/h und mehr als 600 Watt. Elektro-Motorräder sind Fahrzeuge mit einer Bauartgeschwindigkeit über 50 km/h (Straßenverkehrsordnung 1960 (StVO 1960)).

Tabelle 3: Ist-Situation und Trend des Bestands an LIB in Kraftfahrzeugen nach Fahrzeugtypen.

	IST-SITUATION	ABSCHÄTZUNG TREND	
BEV	Bestand (2020): 44.507 Stück ¹ LIB-Gewicht: 330 kg/Fahrzeug ²	WEM: Anstieg bis 2030 mit bis zu 138.000 Stück pro Jahr in Verkehr gebrachte Menge Transition2040: Anstieg bis 2030 mit bis zu 399.000 Stück pro Jahr in Verkehr gebrachte Menge	↑ ↑
HEV	Bestand (2020): 70.032 Stück ¹ LIB-Gewicht: 35 kg/Fahrzeug ²	Auslaufend (nach Avicenne Energy Market Outlook wird HEV im Jahr 2020 weniger als 3 % der Autoverkäufe ausmachen)	↓
PHEV	Bestand (2020): 13.329 Stück ¹ LIB-Gewicht: 105 kg/Fahrzeug ²	WEM: Anstieg bis 2030 mit bis zu 52.000 Stück pro Jahr in Verkehr gebrachte Menge Transition2040: ab 2027 auslaufend	↑ ↓
E-Nutzfahrzeuge	Bestand (2020): 9.184 Stück ¹ LIB-Gewicht: 700 kg/Fahrzeug ⁴	WEM: Anstieg bis 2034 mit bis zu 9.000 Stück pro Jahr in Verkehr gebrachte Menge Transition2040: Anstieg bis 2030 mit bis zu 37.000 Stück pro Jahr in Verkehr gebrachte Menge	↑ ↑
E-Schwerfahrzeuge	Bestand (2020): 225 Stück ¹ LIB-Gewicht: 1200 kg/Fahrzeug ⁴	WEM: Anstieg bis 2040 mit bis zu 140 Stück pro Jahr in Verkehr gebrachte Menge Transition2040: Anstieg bis 2034 mit bis zu 13.000 Stück pro Jahr in Verkehr gebrachte Menge	↑ ↑
Wasserstoff E-Fahrzeuge	keine	WEM: keine Transition2040: Anstieg bis 2034 auf einen Bestand von etwa 3.000 Stück und dann auslaufend	↑
Motorisierte Zweiräder	Bestand (2020): 16.815 Stück ¹ LIB-Gewicht: 3 kg/Fahrzeug ⁴	WEM: Anstieg bis 2037 mit bis zu 19.000 Stück pro Jahr in Verkehr gebrachte Menge Transition2040: Anstieg bis 2034 mit bis zu 134.000 Stück pro Jahr in Verkehr gebrachte Menge	↑ ↑

1... Statistik Austria (2020b)

2... Abschätzung Arnberger (2020)

3... WIFO-Berechnungen mit Ziel 2040 (Auf Tausend gerundet)

4 ... geschätzt

Stationäre Batteriespeichersysteme (BSS)

Die Bedeutung von stationären Stromspeichern wächst aufgrund der Umstellung auf erneuerbare Energien und der daraus folgenden Notwendigkeit zum Erzeugungsausgleich. Der Speicherbedarf in einem Land ist vom Ausbaugrad der erneuerbaren Energien, der verfügbaren Prognosegüte (zur Einspeisung durch Windenergie- und Photovoltaikanlagen), dem Netzausbau, von Import und Export, der Verfügbarkeit flexibler Produktion und dem Ausbau von Lastmanagementoptionen abhängig (Sternier et al., 2017).

Batteriespeichersysteme (BSS) werden im Folgenden in Heimspeichersysteme (HSS), industrielle Speichersysteme (ISS) und Großspeichersystemen (GSS) (nach Figgenger et al. (2020) und Ornetzeder et al. (2019)) unterschieden.

Am häufigsten finden BSS Anwendung als **PV-Heimspeichersystem** (HSS) sowohl in Österreich als auch in Deutschland. Sie werden meist zur Erhöhung des Eigenverbrauchs bei Photovoltaik (PV)-Anlagen und zur Senkung der Stromkosten mit einer Kapazität von unter 10 kWh eingesetzt. Die Bedeutung von HSS nimmt weiter zu, wenn stationäre Speicher im Haus mit Elektro-Fahrzeugen und Wärmepumpen kombiniert werden (Sektorkopplung). Die FH Technikum Wien dokumentiert die jährlich installierte Anzahl von PV-Heimspeichersystemen erst seit 2014 (Anzahl der geförderten und nicht geförderten Speichersysteme). Von 2014 bis 2017 wurden insgesamt 3.995 PV-Speichersysteme mit einer kumulierten Kapazität von 26.894 kWh installiert. Im Jahr 2017 wurden in Österreich ca. 1.607 PV-Heimspeicheranlagen mit einer kumulierten Kapazität von 10.675 kWh installiert. Das sind 31 % der insgesamt installierten Systeme (Fischer and Leohnhartsberger, 2019). Im Jahr 2018 wurden weitere 614 Speichersysteme mit einer kumulierten Kapazität von 10.837 kWh über das OeMAG gefördert (OeMAG, 2018).

Industrielle Speichersysteme (ISS) finden Anwendung in PV-Anlagen gewerblicher und industrieller Unternehmen sowie für die Etablierung von so genannten „Smart Grids“ in Kombination mit erneuerbaren Energiesystemen. Sie werden aber hauptsächlich als zeitlicher Puffer für kommerzielle Zwecke eingesetzt zur Abdeckung von Leistungsspitzen (Ornetzeder et al., 2019). Beispiele dafür sind Schnellladestationen für BEV, aber auch Lastspitzen in der Fertigung. Insbesondere für energieintensive Verbraucher ist dies von Interesse, wie z.B. der Zement-, Stahl-, Elektrostahl- und Metallindustrie.

Die Bedeutung von **Großspeichersystemen** (GSS) ist in Österreich lt. Ornetzeder et al. (2019) noch sehr gering. Ornetzeder et al. (2019) unterscheiden weiters zwischen virtuelle Großspeicher und Batteriekraftwerke. Virtuelle Großspeicher entstehen durch einen Zusammenschluss von mehreren kleinen Anlagen („Pooling“). Unter Batteriekraftwerke versteht man große Anlagen, die Strom mit Akkumulatoren speichern und die mit dem Stromnetz verbunden sind. Beide Systeme können für den Erzeugungsausgleich auf Verteilnetzebene eingesetzt werden und haben Potenzial in Zukunft einen Beitrag für den weiteren Ausbau der dezentralen erneuerbaren Energieanlagen zu leisten (Ornetzeder et al., 2019). Der Markt zur Spannungsregulierung ist in Deutschland bereits gesättigt (Figgenger et al., 2020). Derzeit gibt es nur eine Versuchsanlage der EVN in Österreich die an einem Netzknotenpunkt angeschlossen ist. Aufgrund der vielen Pumpspeicherkraftwerke als Speicherlösung wird der Bedarf für Batteriekraftwerke eher gering eingeschätzt. Ein Vergleich mit anderen Ländern wie z.B. Deutschland, wo in etwa 140 MWh (Figgenger et al., 2020) mittels GSS verfügbar sind, ist nur bedingt möglich. Dennoch wurde die Möglichkeit eingeräumt, dass eine Anwendung im östlichen Flachland und auf Verteilnetzebene in Zukunft eine Rolle spielen wird. LIB dominieren den Markt für diesen Anwendungsbereich (Ornetzeder et al., 2019).

Beispiele an netzgekoppelten **Großspeichersystemen (GSS)** mit LIB sind:

- Batteriespeicher („Blue Battery“) beim Verbund-Wasserkraftwerk Wallsee (NÖ) zur Netz-Stabilisierung mit 16 MW
- Versuchsanlage der EVN in Prottes (NÖ) zur Netz-Stabilisierung mit Anschluss an Windpark mit 2.5 MW/2.2 MWh⁶
- F&E Projekt „Leafs“, zentraler Speicher für Verteilungsnetz mit 100 kW/100 kWh
- F&E Projekt „Urbaner Speichercluster Südburgenland“, Speicher auf Quartiersebene
- F&E Projekt „RE2BA“, Unterpremstätten, Semi-portabler Speicher mit Second-Life-Batterien aus e-Mobility, 100 kWh
- Projekt BatterieSTABIL – FFG Nr.: 853558.

LIB sind die meist verwendeten Batterietypen in Stromspeichersystemen in Deutschland (Figgner et al., 2020). Neben LIB werden auch Redox-Flow- und Natrium-Schwefel-Batterien oder auch in Kombinationen eingesetzt. Die Rolle von Blei-Säure Batterien als Stromspeicher nimmt weiter ab.

Tabelle 4: Ist-Situation und Trend des Bestands an LIB in Batteriespeichersystemen.

	IST-SITUATION	ABSCHÄTZUNG TREND	
HSS	31 % der installierten PV-Systeme mit Speicher (größtenteils LIB) (Stand: 2017) Kumulierte Kapazität von ~11 MWh (Fischer und Leonhartsberger, 2019)	Ausbau PV + ~70 % der PV-Systeme mit Speicher WEM: 1.6 GWp in 2018 16.8 GWp in 2040 Transition2040: 1.6 GW p in 2018 16.8 GWp in 2040	↑
ISS	Unbekannt	Steigend Hauptanwendung: Ladeinfrastruktur für E-Autos	↑
GSS	F&E-Projekte: z.B. Leafs mit 100 kWh, Unterpremstätten mit 100 kWh Versuchsanlage der EVN: 2.2 MWh (im Vgl. Stromverbrauch AT 2016: 72.8 TWh mit 70 % aus erneuerbarer Energie)	Steigend Hauptanwendung: zur Netzstabilisierung und Versorgungssicherheit Unbekanntes Ausmaß (AT-Stromverbrauch + 35 TWh wenn bei 100% erneuerbarer Energie)	↑

⁶ <https://www.evn.at/EVN-Group/Energie-Zukunft/Zukunftsprojekte/Batteriespeicher.aspx>

Sonstige Industriebatterien

Die in Verkehr gesetzte Menge an Industriebatterien wird der EAK Austria gemeldet und betrug im Jahr 2018 546 Tonnen (EAK Austria, 2018). Allerdings ist nicht bekannt welcher Anteil LIB and Industriebatterien haben.

Laut Expert*innenbefragung ist der Großteil an Industriebatterien (noch) Blei-Säure-Batterien.

E-Fahrräder/E-Klein und -Mini-Roller

Elektro-Fahrräder, sogenannte E-Bikes oder Pedelecs, sind Fahrräder mit Tretunterstützung mit einer maximalen Antriebsleistung des E-Motors von 600 Watt und einer Bauartgeschwindigkeit von nicht höher als 25 km/h und zählen zu „Fahrräder“ im Sinne der StVO. Die maximale Nenndauerleistung, also die Leistung, welche über einen Zeitraum von 30 Minuten dauerhaft abgegeben werden kann, darf laut der aktuellen Typengenehmigungsverordnung der EU maximal 250 Watt sein. Wird einer dieser Werte überschritten, so handelt es sich um ein E-Moped (siehe Kapitel Elektro-Fahrzeuge). Weiters unterscheiden sich die E-Fahrräder von den E-Mopeds dahingehend, dass die Zusatzenergie über den Elektro-/ Nabenmotor nur während des Tretens angefordert werden kann. Tritt man nicht, gibt es auch keine Extra-Power (ÖAMTC, 2020).

Die Verkaufszahlen von E-Bikes steigen kontinuierlich. Der Marktanteil der E-Bikes an verkauften Fahrrädern in Österreich lag 2018 bei 33 %. Dies entspricht in etwa 150.000 E-Bikes in 2018.

Elektro-Scooter sind Klein- und Miniroller mit einer höchstzulässigen Leistung von 650 Watt und einer Bauartgeschwindigkeit von nicht mehr als 25 km/h und zählen zu den „Kleinfahrzeugen vorwiegend zur Verwendung außerhalb der Fahrbahn“.⁷

Der vorwiegende Zelltyp für LIB in E-Fahrrädern sind LFP (Pillote, 2017, Sanders, 2017).

Tabelle 5: Ist-Situation und Trend des Bestands an LIB in Zweirädern.

	IST-SITUATION	ABSCHÄTZUNG TREND	
E-Fahrräder/E-Bikes	In Verkehr gebrachte Menge (2018): 150.000 Stück ¹ LIB-Gewicht: 2 kg/Fahrzeug ⁴	stark steigend	↑
E-Scooter/E-Roller	In Verkehr gebrachte Menge (2018): 25.000 Stück ² LIB-Gewicht: 2 kg/Fahrzeug ³	stark steigend	↑

1 ... VSSÖ Verband der Sportartikelherzeuger und Sportausrüster Österreichs

2 ... <https://kurier.at/wirtschaft/der-e-scooter-kommt-in-fahrt/400509532>

3 ... geschätzt

⁷ https://www.oesterreich.gv.at/themen/freizeit_und_strassenverkehr/Elektro-Scooter,-Quads-und-Co/Seite.610110.html

Elektro- und Elektronikgeräte

Die Bedeutung von LIB in Elektro- und Elektronikgeräten wächst, da immer mehr Produktgruppen LIB anwenden. Waren es vor 10 bis 15 Jahren noch vorwiegend Notebooks oder Smartphones die Lithium-Ionen-Technologie angewendet haben, sind es nun auch Gartengeräte, Werkzeuge, Modellbau sowie Spiel-, Sport- und Freizeitgeräte (Pillote, 2017).

Für E-Werkzeuge werden vorwiegend NCA eingesetzt (Pillote, 2017, Sanders, 2017).

Seit 2018 werden LIB auch getrennt von anderen Gerätebatterien gesammelt und erfasst. Im Jahr 2018 betrug der Anteil von LIB 28.6 % der in Verkehr gesetzten Menge an Gerätebatterien (EAK Austria, 2018). Das sind 1.560 Tonnen. Dem gegenüber steht die Sammelmenge von etwa 137 Tonnen im Jahr 2018.

Laut Expert*innenbefragungen sollte die Rücklaufquote nicht auf die in Verkehr gesetzten Menge desselben Jahres bzw. der letzten drei Jahre bezogen werden, sondern unter anderem auch die tatsächliche Nutzungsdauer berücksichtigen. Eine von ERA beauftragten Studie hat eine durchschnittliche „Behaltdauer“⁸ von 5,7 Jahre für LIB ergeben (WPA, 2019).

Tabelle 6: Ist-Situation und Trend des Bestands an LIB in Gerätebatterien.

	IST-SITUATION	ABSCHÄTZUNG TREND
Gerätebatterien	In Verkehr gebrachte Menge (2019): 1967 Tonnen ¹ LIB-Gewicht: 0.288 kg/Gerät ²	Compound Annual Growth Rate CAGR ↑ 2016-2025: 6 % ³

1 ... EAK Tätigkeitsbericht 2019 (EAK Austria, 2020)

2 ... (WPA, 2019)

3 ... (Pillote, 2017)

Second-Life-Batterien

LIB aus Elektrofahrzeugen können für den stationären Gebrauch umgerüstet werden und erhalten somit einen zweiten Einsatzbereich (sogenanntes Second Life).

Die Wiederverwendung von LIB ist neben dem Refurbishment (qualitätsgesicherte Überholung und Instandsetzung) und noch vor dem Recycling eine Schlüsselkomponente im Zusammenhang mit einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft und spielt eine wichtige Rolle bei der Verringerung der Umweltauswirkungen von Produkten der Energiewende. LIB aus BEV erreichen derzeit das Ende ihrer Lebensdauer für den Einsatz in Fahrzeugen typischerweise nach etwa acht bis zehn Jahren oder 150.000 bis

⁸ Als „Behaltdauer“ wird die Zeitspanne in Jahren zwischen der Herstellung/Inverkehrsetzung und der Abgabe des Akkus am Sammelzentrum interpretiert. In der Regel ist diese Zeitspanne länger als die technische Lebensdauer. WPA 2019. Durchschnittliche Behaltdauer von Sekundärbatterien. In: ELEKTRO RECYCLING AUSTRIA GMBH (ed.). Wien: wpa Beratende Ingenieure.

160.000 km, wenn die Kapazität der Batterie unter 80 % liegt (Ahmadi et al., 2014; Canals Casals et al., 2017; Hall und Lutsey, 2018). Eine Wiederverwendung kann die Nutzungsdauer der LIB verlängern. Sie können somit kaskadisch genutzt werden und nach ihrem Einsatz in Elektrofahrzeugen u.a. als stationärer Stromspeicher Anwendung finden. Weiter Anwendungsmöglichkeiten von Second-Life-Batterien können sein: Kühlfahrzeuge, Spezialgeräte, Funboote, Schiffe mit Elektro- oder Hybridantrieb (Curt, 2019).

Second-Life-Batterien bieten die Möglichkeit, die Netzintegration von erneuerbarer Energie zu fördern, da die Speicherung eine Harmonisierung von Angebot und Nachfrage ermöglicht (Nealer und Hendrickson, 2015; Ahmadi et al., 2017). Forschungsprojekte in diesem Bereich stehen erst am Anfang, aber Anwendungen für die Zweitnutzung von Batterien gewinnen weltweit an Interesse. Auch die Expert*innenbefragung im Zuge eines vom ÖAW geführten Projektes hat ein großes Potenzial für die Wiederverwendung von Batterien in Österreich ergeben (Ornetzeder et al., 2019).

Derzeit wird die Anwendung von Second-Life-Batterien in einer Demo-Anlage der Saubermacher Dienstleistungs AG in Unterpemstätten getestet. Es wurde ein semi-portabler Energiespeicher mit vier Stück Second-Life-Batterien und einer Gesamtleistung von 100 kWh erbaut. Die Anlage wird von der Grazer Energieagentur wissenschaftlich begleitet (Ungerböck, 2020).

Internationale Beispiele zu Second-Life-Anwendungen sind:

- Group Renault: Renault besitzt den weltweit größten Bestand an EV-Batterien dank des „Leasing Business Models“ und setzt derzeit etwa 2.000 Stück Second-Life-Batterien in drei stationären Energiespeichersystemen in FR und DE mit einer Gesamtleistung von 60 MWh ein (Curt, 2019)
 - Weiter Projekte von Renault Group in Planung:
 - „SmartHubs“ (GB), zur Netzstabilität, E-STOR-Systeme mit Speicherkapazitäten von je 360 kWh, Projektpartner: Connected Energy
 - Großprojekt zu E-STOR (GB) in Planung, 14.5 MWh, mit etwa 1000 SecondLife-Batterien,
 - „Elektro-Insel“, die portugiesische Atlantik-Insel Porto Santo
 - Elektrifizierung der Wasserstraße in Paris
- SNT Spiers New Technologies Europa/Nordamerika(Van der Have, 2019): Umsetzung eines Closed Loop Systems für Batterie Packs mit Kapazität von 2.000-3.000 Battery Packs pro Monat
- Circular Energy Storage: Berater im Bereich des Life Cycle Managements von LIB (Melin, 2019)
- Batteriekraftwerk in Lünen (DE) von Daimler mit einer Leistung von 13 MW mit 1.000 Stück gebrauchte LIB aus BEV⁹
- Diverse F&E-Projekte zu Second-Life-Anwendungen:
 - ELSA European Research Project (Curt 2019)
 - Batterien aus Volvo-Bussen, Abkommen mit Batteryloop (Tochter von Stena Recycling) und weitere Verwendung von Alt-Batterien aus Volvo-Bussen als Energiespeicher in Gebäuden oder in Ladestationen (electrive.net)

⁹ <https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko.xhtml?oid=13634457>

- Batterien aus Fiat 500, 25 MW Strom über ein V2G-System in Kombination mit Elektroautos und Second Life-Akkus, 2023-2017 in Drosso (IT), Partner: Netzbetreiber Terna mit FCA Italy und Engie EPS (electrive.net)
- Batterien aus Audi, Referenzspeicher, um verschiedene Anwendungsszenarien zu testen, zur Netzstabilisierung, in Heilbronn (DE) fertige Lösung soll später auch Dritten angeboten werden, Partner: EnBW (electrive.net)

3.4 Sicherheit – Gefahren (z.B. Brand, Thermal Runaway)

In den letzten Jahren haben Lithium-Ionen-Batterien die sicherheitstechnischen Herausforderungen in abfallwirtschaftlichen Systemen stark erhöht (Nigl und Pomberger 2018). Aufgrund ihrer hohen Energiedichte und der vielfältigen Gefahren durch Beschädigung (mechanisch, thermisch, elektrisch) können diese schlagartig hohe Energiemengen freisetzen, wodurch es zu einer raschen thermischen Zerlegung (auch thermisches Durchgehen oder *thermal runaway* genannt) bzw. einer unkontrollierten Wärmefreisetzung kommt. Wichtig ist jedoch die klare Unterscheidung der Gefahren und Risikopotenzialen nach Batterietypen (Nigl und Pomberger 2020):

- Lithium-Ionen-Akkus vs. Lithium-Primärbatterien,
- Gerätebatterien (inkl. E-Bike-Akkus) vs. Fahrzeugbatterien (Starterbatterien) vs. Industriebatterien (u.a. Traktionsbatterien)

Darüber hinaus unterscheiden sich die Gefahren und Risiken entlang des Produktlebenszyklus signifikant in den Ursachen und Fehlerquellen die zu einem thermischen Durchgehen (*thermal runaway*) führen können. Eine genaue Betrachtung dieser Risikopotenziale – mit Fokus auf Risikobereiche in Anlagen der Abfall- und Ressourcenwirtschaft – liefern Nigl und Pomberger (2020).

Untersuchungen zeigen vor allem für die Fraktionen der gemischten Siedlungsabfälle (Rest- bzw. Hausmüll) sehr hohe Anteile von Gerätebatterien und ein damit einhergehendes hohes Risiko für Brandereignisse in Anlagen (Nigl et al. 2020, Nigl et al. 2021).

3.5 Anlagenbestand zu Aufbereitung und Behandlung von LIB

Recyclinganlagen Bestand

Verschiedene Prozessrouten und Recyclingstrategien werden von den Recyclingunternehmen weltweit verfolgt. Bisher standen die monetär bedeutende Metalle Nickel und Kobalt im Mittelpunkt. So landen noch heute viele EoL-LIB in Hütten, wo neben diesen beiden Wertmetallen auch Kupfer zurückgewonnen wird. Die Notwendigkeit der Rückgewinnung auch von den anderen Rohstoffen, sowie das Erkennen der schädlichen Auswirkungen auf Mensch, Umwelt und Wirtschaft durch die Deponierung oder das Einbringen in falschen Abfallströmen von EoL-LIB erfordern Maßnahmen zur Förderung des LIB-Recyclings. Dazu haben sich in den letzten Jahren nicht nur europäische Recyclingunternehmen auch auf das Li-Recycling und die Rückgewinnung anderer Wertstoffe konzentriert (Heelan et al., 2015; Melin, 2019; Nigl & Pomberger, 2020; Velázquez-Martínez et al., 2019).

Eine Aufbereitungsanlage für EoL-Batterien (im speziellen für LIB) lässt sich erst ab einer gewissen jährlichen Inputmenge wirtschaftlich rentabel führen. Zudem spielt die Entwicklung der Rohstoffpreise dabei eine wesentliche Rolle (Chen et al., 2019). Doch wird in den nächsten 10 bis 15 Jahren ein enormer Anstieg von EoL-LIB prognostiziert und damit ein wachsender Bedarf sowohl an größeren Recyclinganlagen als auch an optimierten Verfahren zur gezielten Rückgewinnung von Lithium- und Graphitmaterien (Buchert und Sutter, 2020). Höchstwahrscheinlich reichen daher die derzeitigen Kapazitäten der Recyclinganlagen für die enorm steigenden Abfallmengen nicht aus.

Die jährlichen Recyclingkapazitäten für LIB in Europa liegen derzeit zwischen ca. 54.200 und 81.500 Tonnen/Jahr (siehe Tabelle 7).

Betriebe in und außerhalb der EU

Im ersten Schritt fand eine Literaturrecherche statt und aus den verschiedensten Quellen Recyclingbetriebe erhoben. Dabei zeigte sich, dass in der Literatur auch einige Betriebe aufgelistet wurden, bei denen es sich nicht um LIB-Aufbereitungsbetriebe handelt. Ihr Betätigungsfeld betrifft durchaus EoL-LIB, jedoch in den Bereichen der Sammlung und Distribution an Aufbereitungsbetrieben. Daher wurden sie aus der Liste entfernt. Vertiefende Informationen brachte die darauffolgende Online-Recherche. Die bereits erhobenen Daten wurden dabei überprüft bzw. ergänzt. Auch konnten dabei Anlagen identifiziert werden, welche zwar im Bereich des (Batterie-)Recyclings tätig sind, jedoch LIB grundsätzlich nicht als Input-Ströme haben. Die Vermutung liegt nahe, dass möglicherweise EoL-LIB in geringen Mengen verwertet werden. Jedoch nur in einem Ausmaß, wo sie als „Störstoffe“ den Prozess unwesentlich beeinträchtigen. Auch diese Betriebe wurden aus der Liste entfernt.

Die erhobenen Angaben in den einzelnen Spalten (siehe Tabelle 7) sind mit Bedacht zu verwenden und es besteht trotz des hohen Rechercheaufwandes kein Anspruch auf Vollständigkeit. Sie spiegeln nicht zwingend die Realität bzw. sind bei vielen Betrieben die unterschiedlichsten Parameter nur bedingt bekannt. Als Beispiel kann hier die mögliche Diskrepanz im Hinblick auf Anlagenkapazitäten genannt werden. Oftmals ist bei Literaturangaben nicht klar, ob es sich um die genehmigte maximale oder tatsächliche Anlagenkapazität handelt.

Tabelle 7: Recyclingbetriebe für LIB im weltweiten Überblick.

Recyclingbetriebe in Europa										
Betrieb	Land (Standort)	Behandelte Batterietypen	Behandlungs-Methode	Kapazität [Tonnen/Jahr]	mögliche Output-Materialien	Recycling-Quote [%]	Größenordnung	Verlässlichkeit der Quellen	Quellen	
Accurec Recycling	Deutschland	LIB (NiCd, NiMH)	Therm, Mech, Pyro, Hydro	2.500 (2.500 - 6.000)	Ni, Co, Fe, Al, Cu, Mn	k.A.	Ind		2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 63	
Akkuser Oy	Finnland	LIB, alle Batterietypen	Mech	1.000 - 4.000	Cu, Schwarzmasse	k.A.	Pilot - Ind		2, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 15, 63	
Batrec Industrie AG	Schweiz	LIB, alle Batterietypen	Mech, Pyro, Hydro	200 - 1.000	Co, Ni, Mn, NE-Metalle, Kst.	k.A.	Pilot		2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 13, 16, 63	
Duesenfeld	Deutschland	LIB	Mech, Hydro, Thermodynamik	3.000	Li, Co, Ni, Mn, Cu, Al, Fe, Graphit, Elektrolyt, Kst.	Mech: 72%, Hydro: 91% Li: 85% (LFP) & 95% (NMC)	Pilot - Ind		4, 8, 11, 12, 13, 17, 63	
Eramet (Valdi)	Frankreich	LIB alle Batterietypen	Pyro	20.000	Fe-Ni-Legierung, Fe-Mn-Legierung	65%	Forschung/Bau		7, 8, 9, 12, 18, 19	
Erlor	Deutschland	LIB (NMC)	Mech, Direkt Recycling, (Hydro)	k.A.	Al, Cu, Fe, Kathoden- & Anodenmaterial	85%	Pilot		8, 11, 20, 63	
Euro Dieuze Industrie	Frankreich	LIB, Alkaline, Zink Kohle, NiCa	Mech, Hydro	200 - 6.000	Cu, Co, Al, Ni, Mn, Li Ne-Metalle, Metalle, Kst.	bis 80%	Ind		2, 7, 8, 9, 11, 12, 21, 22, 23, 63	
Glencore (vormals Xstrata)	Schweiz	LIB	Pyro, Hydro	3.000 - 7.000	Ni, Co, Cu	k.A.	o		3, 6, 7, 8, 9, 10, 24, 25	
Kyburz	Schweiz	LIB (nur LFP)	direct recycling	k.A.	alle Komponenten	91% der Metalle	Labor - Pilot		26	
Nickelhütte Aue	Deutschland	LIB, NiMH, (alle Batterietypen)	Therm, Pyro, Hydro	7.000 - 20.000	Ni, Co, Cu	k.A.	Ind		8, 10, 11, 27, 63	
Primobius *	Deutschland	LIB (LCO, NMC)	Mech, Hydro	350-700	Cu, Al, Ni, Co, Mn, Li, Fe, Graphit, Kst.	k.A.	Forschung/Bau		8, 12, 13, 28, 62	
Promesa	Deutschland	LIB alle Batterietypen	Mech	k.A.	k.A.	> 50%	Pilot		8, 11, 29	
Redux	Deutschland	LIB, (alle Batterietypen)	Therm, Mech	10.000	Al, Cu, Fe, Kst. Schwarzmasse	60-70%	Ind		1, 8, 11, 12, 13, 30, 63	
SNAM	Frankreich	LIB, NiMH, NiCd, Alkaline	Therm, Pyro, Mech, Hydro	300	Ni, Co, Cu	k.A.	Pilot - Ind		2, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 31, 63	
TES-AMM (vormals Recupyl)	Frankreich	LIB, Alkaline, Zink Kohle	Mech, Hydro	110	Al, Cu, Fe, Co, Li, Ni, Mn, Kst.	bis 60% Li	Pilot - Ind		2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 32, 33, 63	
Umicore	Belgien	LIB, NiMH	Pyro, Hydro	7.000	Ni, Co, Cu, Fe	k.A.	Ind		2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 34, 63	
uRecycle **	Finnland	LIB, alle Batterietypen	Mech	k.A.	Schwarzmasse	k.A.	Labor - Pilot		12,13,35	
Summe Kapazitäten				54.600 – 85.110						

Recyclingbetriebe in Asien									
Betrieb	Land (Standort)	Behandelnde Batterietypen	Behandlungs-Methode	Kapazität [Tonnen/Jahr]	mögliche Output-Materialien	Recycling-Quote [%]	Größenordnung	Verlässlichkeit der Quellen	Quellen
4R Energy Corp.	Japan	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	o		8, 36
Anhua Taisen Recycling	China	LIB, Produktionsausschuss	Mech, Hydro	5.000	Cu, Al, Schwarzmasse	k.A.	Ind		8, 37
Brunp	China	LIB, NiMH, alle Batterietypen	Therm, Mech, Hydro	3.600 - 30.000	Ni, Co, Mn	über 99,5% der Metalle	Ind		4, 6, 7, 8, 9, 11, 38
Dowa	Japan	LIB, alle Batteriearten	Therm, Pyro, Hydro	> 1.000	Al, Cu, Co, Ni, Fe, andere Materialien	k.A.	Pilot - Ind		2, 7, 8, 9, 11, 39
Earthtech	Korea	LIB (aus EV)	Mech, Hydro	2.000	Ni, Co, Li, andere wertvolle Materialien	k.A.	Pilot		8, 40
GEM	China	LIB, NiMH, (Ni & Co Metall-Abfälle)	Mech, Hydro	2.000 - 30.000	Cu, Al, Fe, Co, Ni, Mn, Li	k.A.	Ind		2, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 41
GHTECH	China	LIB	Mech, Hydro	10.000	Co, Ni, Mn, Fe, Li	k.A.	Pilot - Ind		6, 8, 11, 42
Highpower	China	LIB, NiMH	Mech, Pyro, Hydro	10.000	Ni, Co, Li	k.A.	Ind		8, 11, 43
JX Nippon	Japan	LIB, verschiedene Batterietypen	Therm, Mech, Hydro	600 - 5.000	Ni, Co, Li	k.A.	Pilot		2, 7, 8, 9, 11, 44
Kobar	Korea	LIB, NiCd, NiMH	Mech, Hydro	900	Co, Li, Fe, Al, Cu	k.A.	Pilot		11, 45
Kyoei Seiko	Japan	LIB, anderer Abfall	Pyro	k.A.	k.A.	k.A.	o		8, 11, 46
Nippon Recycling Center	Japan	LIB, NiCd, NiMH, Alkaline	Pyro	k.A.	Co & k.A.	k.A.	o		7, 8, 9, 47
Soundon New Energy	China	LIB, verschiedene Batterietypen	k.A.	k.A.	Li, Co, Ni	80-91% Li; Co & Ni kann über 98,5%	o		8, 48
Sumitomo Metals	Japan	LIB	Pyro, Mech, Hydro	120 - 150	Fe, Cu, Al, Co, Ni	k.A.	Pilot - Ind		2, 5, 6, 7, 8, 9, 49
SungEel HiTech	Korea	LIB, (Produktionsausschuss)	Mech, (Therm), Hydro	8.000 - 24.000	Fe, Cu, Al, Co, Ni, Mn, Li	k.A.	Ind		6, 8, 11, 50
Telerecycle	China	LIB, alle Batterietypen	Mech, Hydro	3.000	Co, Li	k.A.	Pilot		8, 11, 51
TES-AMM China	Singapur	LIB	Mech, Hydro	1.200	Cu, Al, Co, Li	k.A.	Pilot - Ind		2, 6, 8, 52
Summe Kapazitäten				47.420 – 122.250					

Recyclingbetriebe in Amerika und Ozeanien									
Betrieb	Land (Standort)	Behandelnde Batterietypen	Behandlungs-Methode	Kapazität [Tonnen/Jahr]	mögliche Output-Materialien	Recycling-Quote [%]	Größenordnung	Verlässlichkeit der Quellen	Quellen
American Manganese	USA	LIB	Hydro	k.A.	k.A.	k.A.	Labor		6, 8, 54
Battery Resourcers	USA	LIB (keine LFP)	Mech, Hydro, direct recycling	k.A.	Kathodenmaterial	90%	Labor		6, 8, 55
Clean Earth (vormals AERC)	USA	LIB, alle Batterietypen	Pyro	k.A.	k.A.	k.A.	o		7, 8, 9, 56
Inmetco	USA	LIB, NiCd, Alkaline	Pyro	k.A.	Ni, andere wertvolle Metalle	k.A.	Ind		2, 5, 6, 7, 8, 57
Li-Cycle	Kanada	LIB	Mech, Hydro	5.000	Cu, Al, Li, Co, Ni, Mn	95%	Ind		8, 58
Lithion	Kanada	LIB	Mech, Hydro	200	Li, Ni, Cu, Co, Al, Mn, Graphit	bis zu 95%	Pilot - Labor		8, 59
OnTo Technology	USA	LIB	Mech, Hydro, direct recycling	k.A.	Kathodenmaterial	k.A.	Labor		6, 8, 60
Retriev	USA	LIB, alle Batterietypen	Mech, Hydro	3.500 - 4.500	Cu, Al, Li, Co, Ni	k.A.	Ind		2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 61
Envirostream	Australien	LIB, alle Batterietypen	Mech, Hydro	k.A.	Li, Ni, Co, Mn, Fe, Cu, Al	95	o		53
Summe Kapazitäten				8.700 – 9.700					

* voraussichtliche Eröffnung 2021

** nur mechanische Aufbereitung, dann Verkauf von Schwarzmasse

Hydro = hydrometallurgisch
 Mech = mechanisch
 Pyro = pyrometallurgisch
 Therm = thermisch

k.A. = keine Angaben

Kst. = Kunststoffe
 Ni = Nickel
 Co = Kobalt
 Li = Lithium
 Mn = Mangan
 Al = Aluminium
 Cu = Kupfer
 Fe = Eisen

k.A. = keine Angaben

Ind = Industriemaßstab
 Pilot = Pilotmaßstab
 Labor = Labormaßstab
 o = keine Angabe möglich
 Forschung/Bau
 sehr wahrscheinlich
 eher wahrscheinlich
 unklar

gute Information
 mittlere Information
 wenig Information

Quellen:

1 Arnberger et al. 2018	11 Sojka et al. 2020	21 Veolia 2020	31 SNAM 2020	41 Gem 2020	51 Telerecycle 2020	61 Retriev 2020
2 Saloojee & Lloyd 2015	12 Danino-Perraud 2020	22 Planet Veolia 2020	32 Recupyl 2020	42 Ghtech 2020	52 TES-AMM 2020b	62 Primobius 2020a
3 Heelan et al. 2016	13 Dahljöf et al. 2019	23 Elibama 2020	33 TES-AMM 2020a	43 Highpower 2020	53 Envirostream 2020	63 Mohr et al. 2020
4 Pistoia & Liaw 2018	14 Accurec 2020	24 Glencore 2020	34 Umicore 2020	44 NMM 2020	54 Recyclico 2020	
5 Hoyer 2015	15 Akkuser 2020	25 Sudburyino 2020	35 Urecycle 2020	45 Kobar 2020	55 Batteryresourcers 2020	
6 Chen et al. 2019	16 Batrec 2020	26 Kyburz 2020	36 Nissan 2020	46 Kyohei 2020	56 Clean Earth 2020	
7 Mayyas et al. 2018	17 Duesenfeld 2020	27 Nickelhütte Aue 2020	37 Taisen 2020	47 Recycleinme 2020	57 AZR 2020	
8 Werner et al. 2020	18 Eramet 2020	28 Primobius 2020b	38 Iru-Miru 2020	48 Soundon 2020	58 Li-Cycle 2020	
9 Lebedeva et al. 2016	19 Global Recycling 2020	29 Promesa 2020	39 Dow 2020	49 SMM 2020	59 Lithion 2020	
10 Brückner et al. 2020	20 WPH Group 2020	30 Redux Recycling 2020	40 Electrive 2020	50 Sungeel 2020	60 Onto 2020	

Batterietypen

Diese Spalte zeigt, welche Batterietypen in den Aufbereitungsprozess gelangen. Es ist zu erkennen, dass neben den LIB bei vielen Betrieben auch andere Typen verarbeitet werden. Je nach Prozessführung bieten sich Batterien mit einer Zellchemie von z.B. NiMH oder NiCd an. In diesen Fällen zielt man vorzugsweise auf die Rückgewinnung von Kobalt, Nickel und Kupfer ab.

Behandlungsmethoden

Unter den Behandlungsmethoden versteht man den Hauptprozess, mit welchem die EoL-Batterien aufbereitet werden. Jegliche Vorbehandlungen die zum Teil notwendig sind, wie Entladung, Demontage oder ähnliches sind hier nicht angeführt. Die grundsätzliche Unterscheidung betrifft dabei:

- Hydro hydrometallurgischer Prozess
- Mech mechanische Aufbereitung
- Pyro pyrometallurgischer Prozess
- Therm thermische Konditionierung
- direkt Recycling Aufbereitung des Kathodenmaterials für direkten Einsatz

Eine genauere Beschreibung der Prozesse ist in Kapitel 4 zu finden.

Wie es aus der Tabelle 7 ersichtlich ist, kommen kaum einzelne Prozesse kaum zur Anwendung. In Fällen, wo dies der Umstand ist, wird entweder ein Produkt zur weiteren Verarbeitung (z.B. Schwarzmasse) hergestellt oder die angewendeten Prozesse sind im Detail schlichtweg nicht bekannt. Zumeist bedient sich die Aufbereitung von LIB an einer Kombination von Prozessen. Behandelt ein Betrieb beispielsweise EoL-LIB in einem pyrometallurgischen Prozess, so entsteht als nutzbares (Zwischen-)Produkt ein Kobalt-Nickel-Kuper-Legierung. Dies benötigt in weiterer Folge eine hydrometallurgische Behandlung, um die einzelnen Elemente zu trennen (Hoyer, 2015; Pistoia & Liaw, 2018). Ins Detail der einzelnen Prozesse wird in diesem Bericht nicht weiter eingegangen, da sie bei jedem einzelnen Betrieb variieren – besonders in Hinsicht auf die vermarktbareren Output-Produkte.

Kapazitäten

Zu dieser Kennzahl wird besonders darauf hingewiesen, dass es sich hierbei in den meisten Fällen um entweder der derzeit bekannten maximal zugelassenen Behandlungskapazität oder einer, aufgrund diverser Angaben angenommenen Kapazitätsgröße handelt. Auch die Behandlung anderer Batterietypen kann maßgeblich diese Werte verzerren.

Mögliche Outputs

Unter den möglichen Outputs stehen Elemente und Stoffe, welche auch in der Literatur bzw. auf den Webseiten der Aufbereiter und Behandler von LIB angeführt wurden. Dabei handelt es sich in den meisten Fällen bzw. bei vielen Stoffen nicht um Reinstoffe, sondern um chemische Verbindungen, welche als Sekundärrohstoffe vermarktet werden können. Zudem produzieren einige Betriebe auch Stoffströme (z.B. Schwarzmasse), die noch einer weiteren Behandlung bedürfen. Neben den tatsächlich erzeugten Outputs gibt es bei einigen Anlagen die Angabe jener Stoffe, die sie theoretisch gewinnen könnten.

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die erzeugten Outputströme nur jene sind, die sich auch wirtschaftlich darstellen lassen. Die Möglichkeit weitere Stoffe zu extrahieren besteht, würde aber zu zusätzlichen Kosten führen.

Ein Vergleich der Betriebe auf dieser Grundlage ist unzulässig, da zu wenig Informationen vorhanden sind.

Recycling-Quote

Zu den wenigsten Betrieben sind Werte bzgl. der Recyclingrate zu finden. Wo es welche gibt, darf man diese auf keinen Fall als real oder gegeben hinnehmen. Einerseits ist in keinem Fall bekannt, wie die Berechnung vollzogen wurde. Andererseits beziehen sich diese Recyclingraten oft nur auf einen einzelnen Stoff und für einen speziellen Teilprozess. Somit sind diese Werte nicht vergleichbar.

Größenordnung auf Basis des technischen Reifegrades (TRL)

Hier wurde aufgrund der Angaben in der Literatur und auf den Websites abgeschätzt, in welcher Entwicklungsstufe sich der jeweilige Betrieb/Prozess befindet. Wie auch schon bei den anderen Parametern, geben die Firmen auch hier kaum Informationen preis. Die Einstufung bezüglich des technologischen Reifegrades (TRL = Technology Readiness Level) (PTJ, 2020) wurde aufgrund fehlender Informationen nicht durchgeführt, könnte aber wie folgend zugeordnet werden.

- | | | |
|-----------------|---------------------------------------|----------|
| • Ind | Industriemaßstab | TRL: 8-9 |
| • Pilot | Pilotmaßstab | TRL: 6-7 |
| • Labor | Labormaßstab | TRL: 4-5 |
| • Forschung/Bau | Anlage ist in Forschung bzw. Bauphase | TRL: 3-4 |
| • o | keine Angaben möglich | |

Verlässlichkeit der Quellen

Diese Einteilung wurde nach dem Ampelsystem (mit drei Farben – grün, gelb und rot) gemacht. Als Grundlage für die Zuordnung dienten die Informationen aus Literatur und den Websites. Neben dem Informationsgrad in der Literatur, wurde diese auch auf deren Recherchetiefe hinterfragt.

Resümee – Trend

Während in der Vergangenheit die EoL-LIB oft in bestehenden Betrieben/Hütten mitbehandelt wurde, ist ersichtlich, dass sich in den letzten Jahren Recyclingbetriebe für LIB mehrten. Diese zeichnen sich durch– für die jeweilige Batteriefraktion und gewünschten Output – abgestimmte Prozesse aus. Dies ist bedingt durch das vermehrte Aufkommen von EoL-LIB in der Abfallwirtschaft und den, in den Batterien enthaltenen wertvollen Rohstoffen.

Wie oben beschrieben erzeugen diese Betriebe wirtschaftlich interessante Sekundärrohstoffe. Deren Einsatzgebiete sind vielfältig und können unter Umständen wieder zu LIB führen. Jedoch landen viele Stoffe, die von geringem Wert sind und/oder sich im Prozess volatiler verhalten nicht wieder im Stoffkreislauf.

In Asien konnte durch die Onlinerecherche vermehrt bemerkt werden, dass Produzenten von LIB-Materialien (z.B. Kathodenmaterial) oder Zellenproduzenten eigene Recyclinganlagen aufbauen. So können sie einerseits eine gewisse Rohstoffsicherheit gewährleisten und andererseits die Qualität der Sekundärrohstoffe sicherstellen. Diese Entwicklung von mehr kreislaufwirtschaftsnahen Kooperationen findet sich auch in Europa, jedoch noch in der Entwicklung. Primobius, ein Joint Venture zwischen Neometals Ltd. (Australien) und der SMS-Group (Deutschland) möchten 2021 eine Demoanlage bauen. Der Standort soll in Deutschland sein (Primobius, 2020). Im Projekt „ReLieVe“ arbeiten SUEZ, Eramet und BASF an einem Kreislaufsystem für LIB. Für den Bereich Sammlung und Demontage ist SUEZ zuständig, Eramet für das Recycling und BASF für die Herstellung von Kathodenmaterial. Eine Pilotanlage soll 2021 entstehen (Eramet, 2020). Auch Northvolt beabsichtigt den Einstieg ins

Batterierecycling. Im Zuge des Projekts „ReVolt“ wollen sie 2022 die erste Pilotanlage in Betrieb nehmen (Electrive, 2020; Innoenergy, 2020). In Amerika beabsichtigt Redwood, ein Start-Up in Nevada die Errichtung einer Recyclinganlage. In Zusammenarbeit mit Panasonic sollen Abfallprodukte aus der LIB-Produktion recycelt werden. In weiterer Folge möchten sie auch EoL-Batterien von Mobiltelefonen und Laptops aufbereiten (Elektroauto-News, 2020; Redwood, 2020).

Resümee – Ökonomie vs. Ökologie

Generell sind zwei treibende Kräfte bemerkbar – einerseits der ökologische und andererseits der ökonomische Antrieb. Obwohl sich die beiden Impulsgeber aus konventioneller Sicht konträr gegenüberstehen, fördern sie – jeder für sich – die Entwicklung des LIB-Recyclings.

Die ökologische Motivation kommt hauptsächlich in Ländern mit einer entwickelten Umweltpolitik vor. Wobei es auch hier an den politischen Vorgaben liegt, inwieweit die ökologische Motivation umgesetzt wird. Der Schutz von Mensch und Natur bedingt die Entwicklung von Methoden, zur Behandlung von gefährlichen Abfällen wie LIB. Natürlich spielt auch hier der ökonomische Faktor eine zentrale Rolle. Das Recycling wird nur soweit betrieben, wie die gesetzlichen Auflagen es erfordern bzw. solange ein Gewinn erwirtschaftet werden kann.

Die ökonomische Motivation des LIB-Recyclings ist gekoppelt an die Marktpreise der Primärrohstoffe. Das exponentielle Wachstum an LIB-Produktion führt neben dem Anstieg der Rohstoffpreise auch dazu, dass manche der benötigten Rohstoffe (wie Lithium und natürlicher Graphit) in die Liste der kritischen Materialien aufgenommen worden (Europäische Kommission, 2020). Zudem spielt die Ressourcenabhängigkeit von Ländern, die keine oder wenige Primärrohstoffe fördern auch eine zentrale Rolle.

4 Das LIB-Recycling

Die Vielfalt der Zellchemien und -designs führt zu Herausforderungen für die Recyclingprozesse. Nicht jede Zellchemie kann auf jeder Recyclingroute recycelt werden. Dieses Kapitel befasst sich mit Recyclingtechnologien, die für die zunehmenden Abfallströme von LIB anwendbar sind und zeigt innovative Verfahren, die sich noch in der Forschung oder in Pilotanlagen befinden.

Neben den bestehenden Anlagenkonzepten (siehe auch Kapitel 3.5) wurden Behandlungskonzepte aus der Forschung und in Pilotanlagen genau untersucht und verglichen. Neben der intensiven Literaturrecherche konnte auch Fachexpertise durch Expert*innengespräche gewonnen werden. Zudem gab es großartige Unterstützung vom Gastautor Stefan Windisch und der Gastautorin Eva Gerold (beide Montanuniversität Leoben), die uns mit vertiefenden Branchenkenntnissen unterstützten.

4.1 Bestehende industrielle Verfahren im Überblick

Grundsätzlich ist bei LIB in der End-of-Life Phase (EoL-LIB) eine Vorbehandlung vor metallurgischen Prozessen notwendig, um die Bestandteile der Batterien zu trennen bzw. sicherheitstechnischen Ansprüchen zu genügen. Wertvolle Stoffströme, welche bei der Demontage anfallen, sind in unter anderem Eisen, Kupfer oder Aluminium. Bei der mechanischen Vorbehandlung werden auch Feinstoffe gewonnen. Diese Feinanteile werden auch als Aktivmaterial oder Schwarzmasse bezeichnet und stammen hauptsächlich aus den aktiven Materialien der Anode und Kathode der LIB (Windisch-Kern et al. 2021b). Daher enthält die Schwarzmasse wertvolle Verbindungen, die reich an Li, Co, Ni, Mn usw. sind und bei metallurgischen Prozessen zurückgewonnen werden. In Abbildung 5 wird der generelle Ablauf der Recyclingprozesse schematisch dargestellt. Die EoL-LIB werden zuerst gesammelt, während der Vorbehandlung entladen bzw. deaktiviert und mechanisch für die metallurgische Rückgewinnung aufbereitet. EoL-LIB können auch direkt – ohne Vorbehandlung zur Entfernung von Nicht-/Eisenmetallen und Kunststoffen – metallurgischen Prozessen zugeführt werden, wobei dies zu Qualitätseinbußen der zurückgewonnenen Legierungen sowie der anfallenden Schlacken führt. Hierbei werden durch pyro- und/oder hydrometallurgischen Verfahren Metallkonzentrate hergestellt, die je nach Qualität bzw. Reinheit entweder der Metallindustrie (nicht-funktionelles Recycling), oder der Batterieproduktion (funktionelles Recycling) zugeführt werden können.

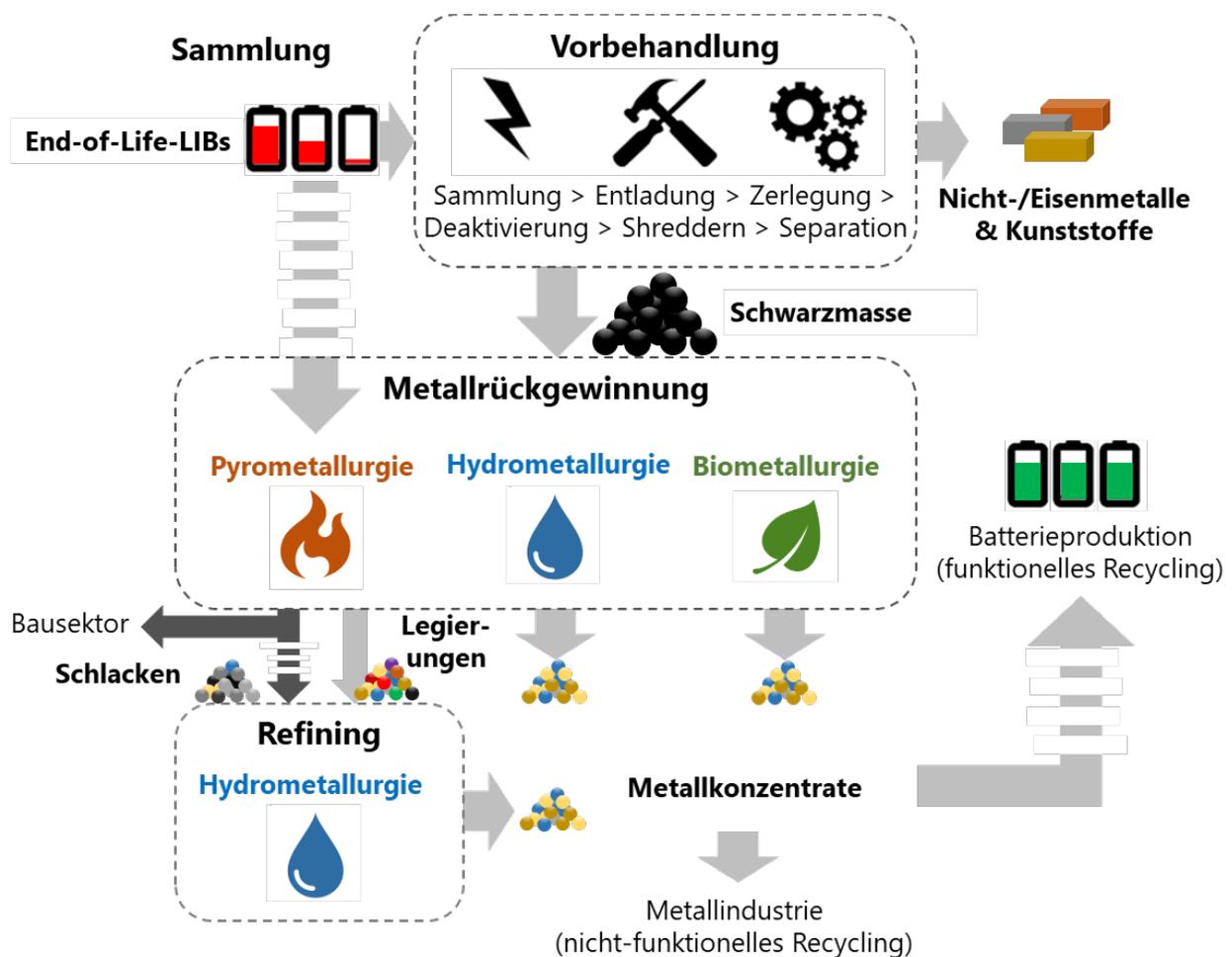


Abbildung 5: Schematische und überblicksmäßige Darstellung bestehender Recyclingprozesse für EoL-LIB (modifiziert nach (Windisch-Kern et al. 2021a). Die durchgehenden Pfeile stellt die großindustrielle Umsetzung dar, wohingegen die gestrichelten Pfeile Pilotversuche darstellen (Stand Mai 2021).

4.2 Verfahren zur Vorbehandlung

Derzeit sind viele verschiedene Vorbehandlungsmethoden etabliert, wovon einige in diesem Kapitel gezeigt werden. Die Vorbehandlungsschritte haben das Ziel, Komponenten des Gehäuses bzw. der Elektronik zu recyceln und Aktivmasse bzw. Zwischenprodukte für die Aufbereitung zu konditionieren. Zudem erfolgt hier oftmals die Deaktivierung, um die Gefahren von Brand und Thermal Runaway zu bannen.

4.2.1 Vorsortierung

LIB-Typen, die in Haushaltsgeräten verwendet werden, (Gerätebatterien) werden indirekt mit Elektro- und Elektronik-Altgeräten (WEEE) gesammelt, die durch die WEEE-Richtlinie 2012/19/EU (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2012) geregelt sind. Gerätebatterien werden daher zusammen mit anderen Batterietypen, wie z.B. Blei-Säure- oder Ni-Batterien, gesammelt. Für ein gezieltes Recycling ist es dann notwendig, die Batterien vorzusortieren und zu klassifizieren, um homogenes Eingangsmaterial für Recyclinganlagen zu schaffen, die auf bestimmte Batterietypen spezialisiert sind.

Für die Vorsortierung können verschiedene Trennverfahren eingesetzt werden. Diese reichen von der Siebung, der visuellen Sortierung mit anschließender Handverlesung, der magnetischen Trennung bis hin zur röntgen-, elektromagnetischen oder UV-basierten Sortierung (Martens und Goldmann 2016; Sziegoleit 2013). Wobei eine Kombination aus visueller und manueller Sortierung in Europa immer noch die häufigste Methode ist. Laut Sziegoleit (2013) dominiert diese Methode EU-weit, so wurden in Deutschland 50 % der im Jahr 2013 gesammelten Gerätebatterien auf diese Weise sortiert. Im Gegensatz dazu werden Industriebatterien aufgrund ihrer Größe und ihres Gewichts im Allgemeinen als nicht geeignet für die bestehenden automatisierten Verfahren angesehen, so dass die visuelle und manuelle Sortierung durch Mitarbeiter*innen als die sinnvollste Option übrigbleibt. Es muss hervorgehoben werden, dass die Vorsortierung zur Klassifizierung eine sehr wichtige Voraussetzung ist, um homogene Eingangsstoffströme für die spezialisierten Recyclingbetriebe zu erzeugen. Diese Aufgabe unterstreicht auch die Bedeutung der Kennzeichnung von Batterien und die Notwendigkeit, Technologien zur Vorsortierung und Trennung nach Batterietypen zu automatisieren.

4.2.2 Demontage

Die augenscheinlichsten Vorteile einer dem Recycling vorgeschalteten Demontage sind der in den Batteriesystemen schlummernde Restwert einfach erreichbarer, aber wertvoller und gut rezyklierbarer Bauteile sowie die damit verbundene Verringerung des zu behandelnden Volumenstroms. So können einerseits aus Gehäusedeckel, Kabelstrang, Kühlsystem und elektronischen Bauteilen Wertstoffe wie Stahl, Kupfer, ausgewählte Kunststoffe und Edelmetalle gezielt zurückgewonnen werden und andererseits Entsorgungsbetriebe auf günstigere kleinere Anlagen und Aggregate zurückgreifen.

Zusätzlich werden durch Demontage von großen Energiespeichersystemen (ESS) wie aus Elektrofahrzeugen einige weitere Chancen eröffnet. Durch Entfernen des Gehäusedeckels wird der Zugang zu Batterie-Management-System und den darin verschalteten Modulen frei. Das erlaubt deren Entladung und Diagnose des (Gesundheits-)Zustands, Kernstück und Entscheidungsgrundlage für jede weitere sekundäre Nutzung in Form von Repair, Refurbishing oder Second Life (Stein et al. 2020).

Nach Diagnose der Module können potenziell kritisch beschädigte Batterien entfernt werden. Auf Lithium-Ionen-Technologie basierende Zellen besitzen auf Grund ihrer Eigenschaften eine sehr hohe Energiedichte. Das ist für Hochenergieanwendungen, wie dem Betrieb eines E-Fahrzeugs, äußerst wünschenswert bringt aber auch diverse Herausforderungen hinsichtlich Brandschutz mit sich. Der Energiespeicher eines E-Fahrzeugs gilt ausgedient -im Sinne einer mobilen Anwendung – wenn der Schwellwert von 80% für den State-of-Health unterschritten wird. Sie besitzen also an ihrem Lebensende noch immer eine relevante Menge an Restenergie, die bei falscher Handhabung und voller Ladung zum thermischen Durchgehen samt explosionsartiger Gasevolution führen kann. Wird also die Batterie freigelegt kann eine signifikante Menge an Energie aus dem Speicher entnommen und anderweitig genutzt werden. Je nachdem wie vollständig, oder teilweise das Energiespeichersystem zerlegt wird ist die Nutzung verschiedener Recyclingwege möglich, die entweder auf Zellen oder Modulen als Inputstrom beruhen (Schwarz und Rutrecht 2018; Gentilini et al. 2020).

Nachteile der Demontage sind der hohe Personal- und Zeitaufwand (Alfaro-Algaba und Ramirez 2020; Rallo et al. 2020), die notwendigen Schulungen für eine sichere Handhabung durch das Demontagepersonal auf Grund des Hochvoltbereichs, sowie isoliertes Spezialwerkzeug. Mangels Branchenlösung für Wissenstransfer über die jeweilige Zusammensetzung in Form von Stück- und Materiallisten beziehungsweise zur Verfügung gestellten

Demontageanleitungen ist der Aufbau von internen Datenbanken mit Identifikationshilfen und Demontagehinweisen ein notwendiges aber aufwendiges Hilfsmittel (Peters et al. 2018; Saubermacher 2020). Am Ende steht eine Gratwanderung der Entsorgungsbetriebe zwischen Kosten und Nutzen der Demontage und die Suche nach dem idealen Break-Even-Point.

Momentane Hindernisse auf dem Gebiet sind die Identifikation des State-of-Health (SoH) (Harper et al. 2019; Stein et al. 2020; Gentilini et al. 2020) und geringe Automatisierbarkeit der Vorgänge auf Grund mangelnder Normbauweise (Harper et al. 2019). In Abbildung 6 sind beispielhaft unterschiedliche Bauformen von Lithium-Ionen-Batterien, vom Pack bis zur Zelle dargestellt.

Die Entwicklung in Richtung Robotik wird auf jeden Fall vorangetrieben. Bis jetzt wurden allerdings nur einzelne Experimente mit Mensch-Maschine Interaktion und partieller Zerlegung von ESS abgestimmt auf spezielle Fahrzeugtypen durchgeführt oder allgemeinen Ansätzen publiziert (Singh und Janardhan 2019; Poschmann et al. 2020). In Zukunft könnte robotergestützte Zerlegung viele mit der Demontage verbundene Risiken minimieren oder vollständig verhindern, Kosten reduzieren und damit das Recycling wirtschaftlicher machen.

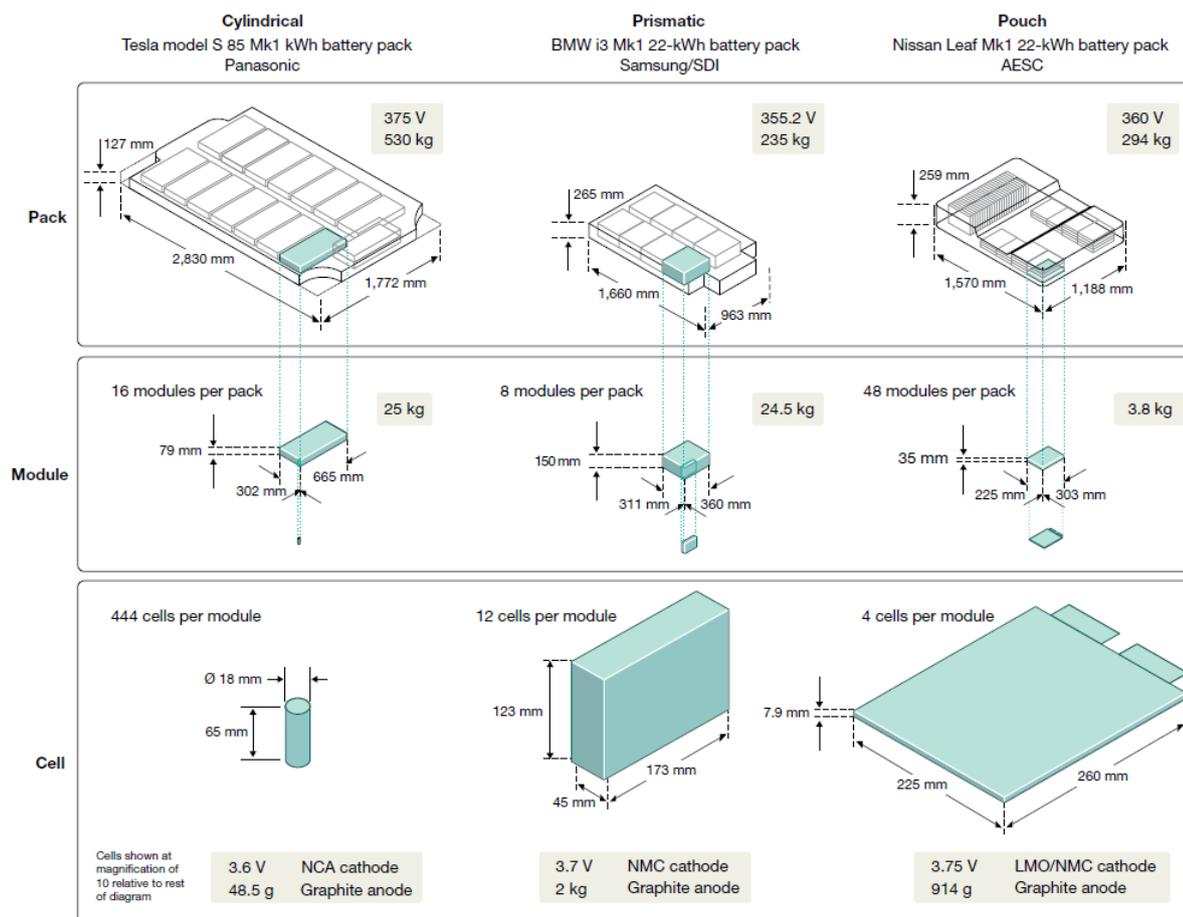


Abbildung 6: Darstellung verschiedener Bauformen für Lithium-Ionen-Batterien, welche sich in Packungen (engl. packs), Module und Zellen untergliedern (entnommen aus Harper et al. 2019)

Ein weiterer Trend ist die Vorwärtsintegration, beziehungsweise Rückwärtsintegration von Recyclingbetrieben, beziehungsweise Batterierohstoffproduzenten. Ein richtiger und wichtiger Schritt in Richtung

Kreislaufschließung. Beispiele dafür sind Tesla, Panasonic und Recycler Redwood Materials (Elektroauto-News.net 2020), Eramet, SUEZ und BASF im Projekt ReLieVie (EIT RawMaterials 2020) oder VW, BMW und Northvolt im aktuellen Forschungsprojekt Revolt (EIT InnoEnergy 2019).

4.2.3 Verfahren zur Entladung

Ein niedriger Ladestand der Batterie ist bei der weiteren mechanischen Aufbereitung von sicherheitstechnischem Vorteil (Golubkov et al. 2015; Lee et al. 2019) und wird bei fast allen Recyclingverfahren angewandt. Ausnahmen davon sind Verfahren mit Kryotechnologie, Inertgasspülung während der thermischen Konditionierung und die Aufbereitung nach Umicore, das bis auf Zellebene demontierte Zellen in einem Schachtofen pyrometallurgisch aufarbeitet. Im Allgemeinen kann eine Zelle auf zwei verschiedene Arten entladen werden, entweder in einer leitenden Flüssigkeit oder über einen Ohm'schen Widerstand.

4.2.3.1 Entladung in leitenden Flüssigkeiten

Die Möglichkeit Zellen über elektrisch leitende Flüssigkeiten zu entladen wurde bereits sehr früh in der Erfolgsgeschichte der Lithium-Ionen-Batterien diskutiert. Die Bundesanstalt für Materialforschung (BAM) aus Deutschland empfahl 2012 im Merkblatt „Beförderung von beschädigten Lithium-Ionen-Zellen und LIB der UN-Nummer 3480 auf der Straße“ (BAM 2012) LIB in 0,3-prozentiger Salzlauge zur Entladung unterzutauchen. Die bedeckten Zellen sollen so unter Beobachtung von fachkundigem Personal binnen 24 Stunden deaktiviert und für den Transport vorbereitet werden. Allerdings wurde dieser Vorschlag von der BAM 2013 revidiert (BAM 2013) und 2014 endgültig davon Abstand genommen (BAM 2014). Es befindet sich in der amtlichen Bekanntmachung keine offizielle Begründung, die zu diesem Umdenken geführt hat. Es kann nur davon ausgegangen werden, dass das Entladen über die äußeren Kontakte zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen in der Praxis geführt hat. Eine wissenschaftliche Arbeit aus 2015 ebenfalls zum Thema Entladung von LIB in flüssigen Medien von Rutrecht, durchgeführt an der Montanuniversität Leoben im Rahmen des Projekt LIBRES, kommt ebenfalls wie Harper et. al zu diesem Schluss. Der Entladeerfolg ist stark von der Leitfähigkeit und der Temperatur abhängig. Elektrochemische Vorgänge der Elektrolyse führen unter anderem zu Korrosionsproblemen an den Polkontakten und dem Gehäuse der Zelle bis zu dessen Zerstörung, sowie dem Verbrauch der leitenden Flüssigkeit selbst. Zusätzlich entstehen unerwünschte Gase wie zum Beispiel Wasserstoff, die eine relevante Sicherheitsgefahr mit sich bringen. Unerwünschte Nebenreaktionen und gelöste Metalle in der leitenden Flüssigkeit sowie die Flüssigkeit selbst bringen neue Herausforderungen in der danach absolut notwendigen Abwasser-aufbereitung mit sich. Am Ende bleibt trotz potenzieller Skalierbarkeit des Prozesses die Empfehlung diese Art der Entladung nicht für energiedichte Zellen und Batterypacks sondern eher für kleine Zellen mit irrelevantem Energieinhalt zu verwenden (Rutrecht 2015; Harper et al. 2019).

4.2.3.2 Entladung über Ohm'shen Widerstand und Rückspeisung

Diese Methode gilt als Stand der Technik und wird bei einschlägigen Entsorgungsbetrieben vor allem bei großen Energiespeichern von Elektrofahrzeugen durchgeführt. Typische Entladestationen werden in Abbildung 7 und Abbildung 8 dargestellt. Die in der Batterie enthaltene Restladung wird entweder in Form von Wärme über einen Ohm'schen Widerstand dissipiert oder optional für weitere Verwendung gespeichert. Der Entladeprozess kann als Diagnose über den Zustand der Batterie genutzt werden, um den SoH festzustellen. Er ist Basis für jede weitere Form von Second Life bzw. Re-Use (Stein et al. 2020).



Abbildung 7: Entlade- und Demontagestation der Fa. Redux GmbH (Arnberger et al. 2018).



Abbildung 8: Entladestation der Fa. Duesenfeld GmbH (Elwert und Frank 2020).

Für den Verfahrensschritt der Entladung bestehen aus ähnlichen Gründen die gleichen Nachteile wie für die Demontage. Mangelnde Automatisierbarkeit, die Artenvielfalt des Aufbaus der Batteriemodule und eine notwendige Fachausbildung des Personals in einem Sektor mit ausbildungsfermem Personal treiben die Kosten des Recyclings in die Höhe. Eine wissenschaftliche Aussage über eine durchschnittlich zurückgewinnbare Energiemenge aus E-Fahrzeugg Batterien mit einem SoC von 80 % gibt es noch nicht. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass sich in Summe eine potenzielle Kosteneinsparung durch kluge Rückeinspeisung zu Hochlastzeiten beziehungsweise durch Skalierung der Batteriemenge ergibt. Werden Batterien nicht entladen muss die darin noch vorhandene Energie mit Mehraufwand im Recyclingprozess weggekühlt werden. Eine Investition dahingehend ist also vorteilhaft (Harper et al. 2019).

4.2.4 Mechanische Vorbehandlung

In den meisten Fällen müssen Batteriepacks oder -module in ihre einzelnen Bestandteile getrennt werden, um ein weiteres Recycling zu ermöglichen. Es ist wichtig zu beachten, dass Batteriepacks vor dem Zerkleinerungsprozess entweder entladen und thermisch deaktiviert oder in irgendeiner Weise thermodynamisch oder chemisch deaktiviert werden sollten, um die Brand- oder Explosionsrisiken zu vermeiden. Stand der Technik bei der mechanischen Vorbehandlung ist die Verwendung von Rotationsscheren unter Einsatz von Doppelwellenzerkleinerern bei niedrigen Umdrehungen pro Minute (U/min) oder die Prallzerkleinerung unter Einsatz von Hammermühlen bei hohen U/min. Abhängig von der Partikelgröße und den vorangegangenen Aufbereitungsschritten wird die Zerkleinerung mit einer Sieb-, Magnet- und/oder Dichteseperation kombiniert, z.B. mit Vibrations- oder Trommelsieben, kombiniert mit Schwimm-Sink-Scheidern (Velázquez-Martínez et al. 2019).

Falls keine Entladung und Deaktivierung im Vorfeld vorgenommen wurden, ist die Zerkleinerung in inerter Atmosphäre derzeit eine beliebte Methode. Diese verhindert im Allgemeinen, dass die Batterien Feuer fangen oder explodieren. Dazu wird eine geschlossene Kammer mit Inertgas wie CO₂, N, oder Argon gefüllt, wie es z.B. bei den Verfahren von Duesenfeld, Batrec oder Recupyl angewendet wird, bevor eine Zerkleinerung stattfindet (Diekmann et al., 2017; Tedjar und Foudraz, 2008).

4.2.5 Pyrolytische Vorbehandlung zur Deaktivierung

Einige Recyclingverfahren kombinieren den pyrometallurgischen und den hydrometallurgischen Prozess. Dabei sind oftmals Vorbehandlungsschritte wie Pyrolyse oder mechanische Konditionierung notwendig. In vielen Fällen werden vor der mechanischen Bearbeitung die LIB einer Pyrolyse unterzogen (Vandepaera et al. 2017; Brückner et al. 2020). Ziel der Pyrolyse ist die Deaktivierung der Zellen. Es kann der Energiegehalt kontrolliert reduziert, organische Komponenten entfernt und der Halogengehalt verringert werden. Dabei wird das Anoden- bzw. Kathodenmaterial von der Kupfer- bzw. Aluminiumfolie durch Entfernen des organischen Binders gelöst (Brückner et al. 2020; Arnberger 2016; Zhang et al. 2018). Je nach Aktivmaterial ist es anzuraten die Zellen zu entladen. Das Aktivmaterial bestehend aus LFP zeigt eine geringe Reaktion und muss vorab nicht entladen werden. Aktivmaterialien bestehend aus LMO und NMC sind wesentlich reaktiver und sollten vor dem Pyrolyseprozess entladen werden (Arnberger 2016).

Nach der Pyrolyse können die Batterien problemlos zwischengelagert und eine mechanische Behandlung ohne Brandgefahr durchgeführt werden (Brückner et al. 2020; Arnberger 2016). Typische Materialströme sind dabei Eisen- und Nichteisenfraktion mit Al und Cu Konzentrationen. Aus dem Aktivmaterial (Elektrodenmaterial) wird die sogenannte Schwarzmasse gewonnen (Brückner et al. 2020).

Für die Pyrolyse wird zuerst der Ofen unter Vakuum gesetzt (Zhang et al. 2018; Sun et al. 2011) und danach mit hochreinem Stickstoff gefüllt (Zhang et al. 2018). Versuche einer Pyrolyse bei 600 °C unter Atmosphäre erzielten keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Es konnten Teile des Kathodenmaterial abgelöst werden. Die Elektrode war unförmig und zerbrechlich und ist bei diesen hohen Temperaturen leicht oxydiert. Das zeigt, dass eine Pyrolyse unter Vakuum notwendig ist, wenn die Aluminiumfolie in ihrer metallischen Form zurückgewonnen werden sollte (Sun et al. 2011).

Der Pyrolyseprozess findet bei etwa 500 °C (Brückner et al. 2020; Zhang et al. 2018) bis 600 °C (Sun et al. 2011) statt. Durch die thermische Belastung schmilzt der Separator ab und es kommt zu einem Kurzschluss, welcher

weitere Zersetzungsreaktionen mit sich bringt, ein sogenannter Thermal Runaway. Werden dabei Temperaturen über 660 °C erreicht, so oxydiert ein Großteil des Aluminiums, was die Ausbeute im Recyclingprozess reduziert (Arnberger 2016; Brückner et al. 2020). Auch die schlagartige Zunahme des Abgas-Volumenstroms bei einem Thermal Runaway ist für die Abgasreinigung problematisch, da dieser grundsätzlich konstant sein sollte (Arnberger 2016).

Bei der Zersetzung der Kunststoffe und teilweise organischen Lösungsmitteln entsteht fluorhaltiges Benzol und Ester-Elektrolyt, welche durch Kondensation gesammelt werden können (Arnberger 2016; Zhang et al. 2018). Sowohl bei der Kathode als auch bei der Anode gibt es zwei Stufen des Gewichtsverlustes: die erste tritt bei der anfänglichen Erwärmung (von 30 bis 150 °C) auf, die durch die Verflüchtigung von Feuchtigkeit und Restelektrolyt verursacht wird; die zweite Stufe tritt bei einer Temperatur von 450 bis 550 °C auf, die durch die Zersetzung des organischen Bindemittels verursacht wird (Zhang et al. 2018). Wird eine Pyrolyse durchgeführt, so zeigen Versuche, dass rund 20 – 24 M-% in den Abgasstrom wandern und die verbleibenden 76 – 80 M-% in die mechanische Aufbereitung überführt werden können (Arnberger 2016).

Im folgenden Zerkleinerungsprozess ist ersichtlich, dass durch die Pyrolyse das Ablösen des Elektrodenmaterials von der Ableiterfolie drastisch gesteigert wird. Die Pyrolysetemperatur wirkt sich auch auf die Trenneffizienz aus. Für die Kathode liegt die optimale Pyrolysetemperatur bei 500 °C, während sie für die Anode 550 °C beträgt. Es gibt jedoch einen kleinen Unterschied in der Trenneffizienz der Anode, wenn die Temperatur von 450 – 550 °C reicht. Bei einer Pyrolysetemperatur von 600 °C sinkt die Trenneffizienz, da die Pyrolyserückstände bei einer höheren Pyrolysetemperatur leichter eine Agglomeration bilden (Zhang et al. 2018).

4.3 Metallurgische Verfahren zur Metallrückgewinnung

Nach dem derzeitigen Stand der Technik kommen EoL-LIB entweder ohne jegliche Abfallvorbehandlung in ein pyrometallurgisches Verfahren oder sie durchlaufen eine Reihe von Vorbehandlungsschritten, um darauffolgend im hydrometallurgischen Prozess aufbereitet zu werden. In diesem Kapitel werden die hydrometallurgischen und pyrometallurgischen Verfahren und deren Stand der Technik vorgestellt.

4.3.1 Hydrometallurgische Verfahren

Um die wertvollen Übergangsmetalle Kobalt (Co), Nickel (Ni) und Lithium (Li) aus der Schwarzmasse rückzugewinnen, werden hydrometallurgische Verfahren wie Laugung, Extraktion, Kristallisation und Fällung eingesetzt. Der erste Schritt einer typischen hydrometallurgischen Behandlung ist die Auslaugung der Schwarzstoffe. Dabei werden die Übergangsmetallverbindungen in anorganischen oder organischen Säuren gelöst, um in weiterer Folge Trennverfahren, wie Kristallisation oder elektrochemische Trennung, zur Aufkonzentrierung anwenden zu können. Auslaugverfahren dienen vor allem dazu, Verunreinigungen und organische Rückstände zu minimieren sowie die verschiedenen Metallpartikel in seine ionischen Bestandteile aufzulösen. Neben den typischen anorganischen Säuren, wie Schwefelsäure (H₂SO₄), Salpetersäure (HNO₃) oder Salzsäure (HCl), wird häufig auch Wasserstoffperoxid (H₂O₂) als Reduktionsmittel eingesetzt. Mittels H₂O₂-Zugabe kann die Extraktionseffizienz von Co und Li von 40 % bzw. 75 % auf jeweils 85 % erhöht werden. Dieser Effekt lässt sich durch die Reduktion von Co₃₊ zu Co₂₊ erklären, wobei letztere Spezies eine höhere Löslichkeit aufweist. Darüber hinaus werden auch organische Säuren, wie Zitronensäure (C₆H₈O₇), Apfelsäure (C₄H₆O₅) und Asparaginsäure

($C_4H_7NO_4$), eingesetzt (Gao et al. 2019, Golmohammadzadeh et al. 2017). Neben den am Ende verwendeten Lösungsmitteln spielen Parameter, wie Temperatur, Fest-Flüssig-Verhältnis und Auslaugzeit, eine wesentliche Rolle. Des Weiteren hat ebenso die Art der Vorbehandlung bzw. die LIB-Aufbereitung eine Schlüsselrolle, da beispielsweise die thermische Vorbehandlung der $LiCoO_2$ -Kathode bei 500 °C positive Effekte auf den Auslaugungsprozess hat (Li et al. 2013, Li et al. 2014). Mit anderen Worten haben die Qualität und Zusammensetzung der Materialien, die aus der Vorbehandlung stammen, einen entscheidenden Einfluss auf weiterfolgende metallurgische Prozesse.

Um den hohen Qualitätsanforderungen, insbesondere für den Einsatz in Traktionsbatterien, gerecht zu werden, vereinbaren Automobilhersteller und ihre Batterielieferanten sehr strenge Materialspezifikationen. Daher müssen auch die Recyclingprozesse zur Rückgewinnung der Sekundärmaterialien in hoher Qualität entsprechend ausgelegt sein. Die Entfernung bzw. Minimierung von Verunreinigungen stellen wichtige Ziele dieser Prozesse dar, um ein nicht-funktionelles Recycling (auch unter „Downcycling“ bekannt) der ursprünglichen Materialien zu vermeiden. Zu den häufigsten Verunreinigungen gehören organische Bestandteile (z.B. Karbonate des Elektrolyten und deren Zersetzungsprodukte), Graphit, Metalle (z.B. Co, Al, etc.) aus Stromabnehmerfolien, Eisen, Fluorverbindungen und andere Zusätze aus dem Elektrolyten wie Mangan. Durch die Störung der Materialkonditionierung sind hohe Al-Gehalte in den Laugungslösungen oft besonders problematisch. Daraus ergeben sich Ansätze wie ein Vorlaugungsschritt mit Natronlauge (NaOH), um Al vorab selektiv abzutrennen (Chen et al. 2011, Dhiman and Gupta 2019).

Das Kathodenmaterial bzw. $LiCoO_2$ wird auch durch elektrochemische Verfahren wie das sogenannte Etoile-Rebatt-Verfahren zurückgewonnen (Ra and Han 2006). Das aktive Material wird hierbei in einer Lösung aus Lithium- und Kaliumhydroxid (LiOH bzw. KOH) ausgelaugt und auf einer Platinelektrode abgeschieden und wieder ausgefällt, um hochwertige Rohstoffe für die Materialsynthese in der Batterieproduktion zu erhalten. Gemische aus gelösten Co- und Li-Ionen können auch mit hoher Selektivität durch bipolare Membranelektrodialyse mit Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA) getrennt werden. Allerdings wird ein nicht zu vernachlässigender Anteil der zugesetzten Metalle auch an den Membranen des Ionenaustauschers absorbiert und verringert somit die Rückgewinnungseffizienz (Iizuka et al. 2013, Ra and Han 2006). Die selektive Fällung ist ein chemischer Prozess, der im Bereich des LIB-Recyclings ausgiebig untersucht und auf die Extraktion von Metallen aus komplexen Materialkompositen angewendet wurde. Die Grundlage dafür liefert die Thermodynamik, wobei ein besonderes Augenmerk auf sogenannte Eh-pH-Diagramme gelegt wird, da diese die stabilen Bereiche der auszufällenden Verbindungen angeben. Da ähnlich affine Elemente (z.B. Kobalt und Nickel) auch ein thermodynamisch analoges Verhalten zeigen, fallen diese Stoffe gleichzeitig bzw. nicht-selektiv aus. Um eine selektive Ausfällung zu ermöglichen, kann beispielsweise die Oxidationsstufe des auszufällenden Ions geändert werden – z.B. durch die Umwandlung von Co_{2+} in Co_{3+} . Dies geschieht durch die Zugabe von Oxidationsmitteln wie z.B. Natriumhypochlorit (NaClO). Prinzipiell finden in diesem Bereich mehrere verschiedene Fällungsmittel ihre Anwendung, dazu gehören Natriumsalze wie Hydroxide, Phosphate und Carbonate, Oxalsäure aber auch andere Verbindungen (Chen et al. 2015a, Chen et al. 2015b, Gerold et al. 2020, Takacova et al. 2017). Aufgrund der starken Einflüsse von Temperatur, Konzentration und Auslaugzeit lassen sich aus der Literatur jedoch noch keine endgültigen optimierten Parameterkombinationen und entsprechende Ergebnisse ableiten. Die selektive Fällung als Rückgewinnungsmethode wird nicht nur alleine, sondern oft in Kombination mit einer vorangehenden Lösungsmittelextraktion zur Entfernung von Ni und Mn oder der Fällung von Ni mit Dimethylglyoxim eingesetzt. Daher müssen publizierte Ergebnisse immer kritisch in Bezug auf die durchgeführten Prozessschritte bewertet werden, da oft eine äußerst komplexe Prozesskombination erforderlich ist, um ausreichende

Fällungsqualitäten und Wirkungsgrade zu erreichen. Das Ziel hydrometallurgischer Prozesse ist, Materialien in einer für die Batterieproduktion geeigneten Qualität zu gewinnen.

4.3.1.1 Stand der Technik

Derzeit wird das sogenannte Batrec-Verfahren in der Schweiz und in Frankreich angewendet, Hydrometallurgie wird auch von der Firma Duesenfeld in Deutschland eingesetzt wird (Pistoia and Liaw 2018). Die Batrec Industrie AG hat einen speziellen Prozess für das Recycling von EoL-LIB entwickelt, der aus einer Kombination von mechanischen und hydrometallurgischen Verfahren besteht und in Abbildung 9 dargestellt ist.

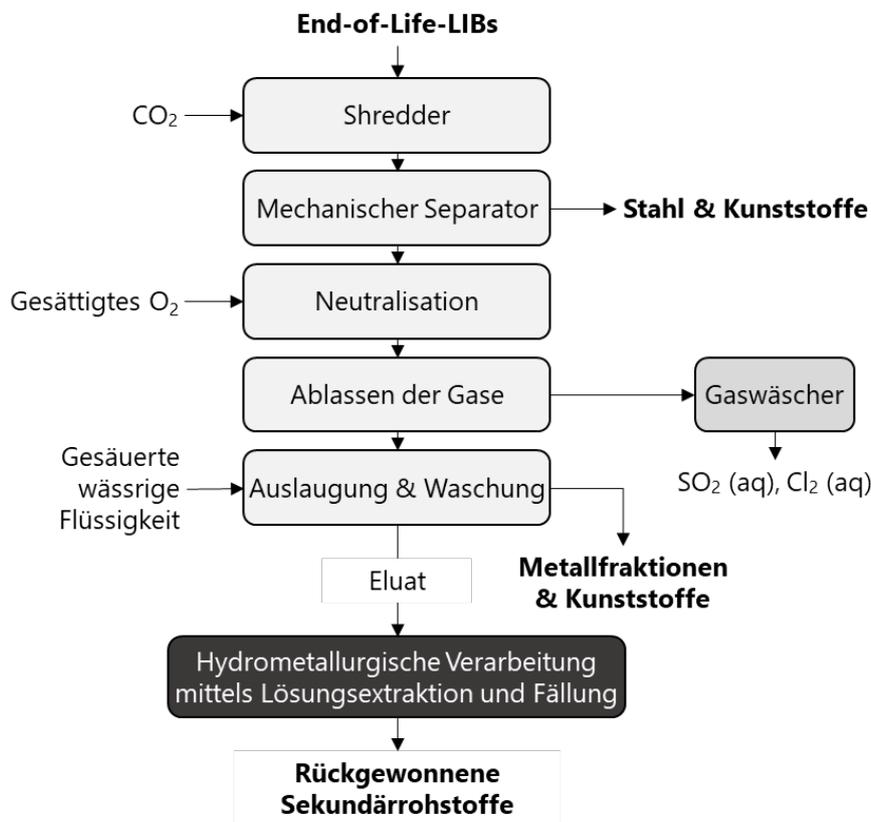


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Batrec-Prozesses basierend auf Hanisch et al. (2015a) sowie Meng et al. (2021). Die Vorbehandlung erfolgt mechanisch, die Rückgewinnung der Sekundärrohstoffe pyrometallurgisch.

Dieses schematische Prozessschema zeigt, dass die LIB zur Zerkleinerung und energetischen Deaktivierung einem Brecher unter einer CO₂-Schutzgasatmosphäre zerkleinert wird, um Explosionen bzw. den Ausbrand zu vermeiden. Die CO₂-Atmosphäre dient dazu, Sauerstoff zu verdrängen, da der Elektrolyt aufgrund seiner hohen Reaktivität zur Oxidation neigen würde. Dadurch wird auch die Freisetzung von hochgiftigen Fluorwasserstoffen verhindert. Das CO₂ verhindert somit starke exotherme Reaktionen und wird während des Shredderprozesses ständig aufgefrischt. Nach der Zerkleinerung werden die LIB durch mechanische Trennung in eine Grob- und eine Feinfraktion aufgeteilt. Die Grobfraktion, die hauptsächlich aus Kunststoff und Stahl von Gehäuseteilen sowie Nichteisenmetallen wie Cu oder Al besteht, wird abgetrennt und verschiedenen Recyclingunternehmen der Metallindustrie zur Verfügung gestellt. Übrig bleibt die Feinfraktion, die das Co und Li der Elektroden enthält. Bei der Zerkleinerung wird der Elektrolyt verdampft und das entstandene Abfallmaterial durch Zugabe

von feuchter Luft neutralisiert. Anschließend wird die Atmosphäre kondensiert und in einem Gaswäscher gereinigt, um mögliche Schadstoffemissionen auf ein Minimum zu reduzieren. Die Feinfraktion wird mit einer angesäuerten wässrigen Flüssigkeit ausgelaugt, um die Kathodenmetalle in Lösung zu bringen. Mit diesem Verfahren können fast alle Metallfraktionen des neutralisierten Abfallmaterials zurückgewonnen werden. Eine thermische Vorbehandlung, wie z.B. Pyrolyse zur Entfernung von Kunststoffresten, kann bei diesem Verfahren zu einer deutlichen Verbesserung führen. In weiteren Schritten werden gelöste Spezies aus der metallhaltigen Laugungsflüssigkeit mittels Lösungsmittelextraktions- und Fällungsprozesses zurückgewonnen. Genauere Prozessparameter sowie eine Spezifikation der Qualität des Endprodukts konnten in der Literatur nicht gefunden werden (Hanisch et al. 2015a, Meng et al. 2021, Pistoia and Liaw 2018, Zhang et al. 2018).

Die Düsenfeld GmbH (Deutschland) kombiniert mechanische, thermische und hydrometallurgische Verfahren in einem patentierten Prozess (Hanisch et al. 2015b). Der energieeffiziente Prozess erreicht sehr hohe Materialrückgewinnungsraten von bis zu 91 %. Ermöglicht wird dies durch den Verzicht auf das Einschmelzen, das sonst häufig beim Batterierecycling eingesetzt wird. Abbildung 10 zeigt das patentierte Prozessschema des Düsenfeld-Verfahrens, das sich auf die Rückgewinnung von hochwertigem Kathodenmaterial aus LIB-Modulen (hauptsächlich aus E-Fahrzeugen) konzentriert. Das Recyclingkonzept kombiniert die mechanische Aufbereitung mit einer anschließenden hydrometallurgischen Behandlung der aktiven Elektrodenmaterialien. Am Anfang der Recyclingkette werden die LIB-Module entladen und manuell in ihre Hauptkomponenten zerlegt. Dabei werden Schutzhülle, Kunststoffe, Kabeln und mögliche andere Verunreinigungen entfernt. Die LIB-Module werden in einem Rotorscherenbrecher (20 mm) in einem Temperaturbereich zwischen 100 und 140 °C unter einer N₂-Schutzgasatmosphäre zerkleinert. Die vorhandenen Lösungsmittel und das Elektrolyt werden verdampft. Der Zerkleinerungsprozess ist mit Kondensatoren verbunden, die das Recycling des Elektrolyten und verschiedener Lösungsmittel durch Vakuumdestillation ermöglichen. Die zerkleinerten Module werden dann zur Klassifizierung in einem Zickzack-Sichter zerlegt. Hier werden Al, Fe, Cu und Kunststoffe voneinander getrennt. Magnetische Bestandteile sowie Kupfer- und Aluminiumfolien werden mittels Dichte- und Wirbelstrom-Abscheider separiert. Es verbleibt eine feinkörnige Schwarzmasse, die sowohl die wertvollen Elektrodenaktivstoffe, als auch fluorhaltige Salze beinhaltet. Ein patentierter, spezifischer Vorbehandlungsschritt entfernt das Fluorid vor der Laugung vollständig, wodurch die Bildung von hochtoxischer Fluorwasserstoffsäure verhindert wird. Nach der Fluoridentfernung werden die Metalle ausgelaugt und vom Graphit getrennt. Li, Co, Ni und Mn werden durch verschiedene Extraktionsverfahren abgetrennt, gereinigt und in Form von Salzen (Sulfaten) zurückgewonnen. Diese werden schließlich einem Kalzinierungsprozess zugeführt, wodurch ein geeignetes aktives Material für die LIB-Produktion hergestellt werden kann (Duesenfeld GmbH, Elwert et al. 2016)

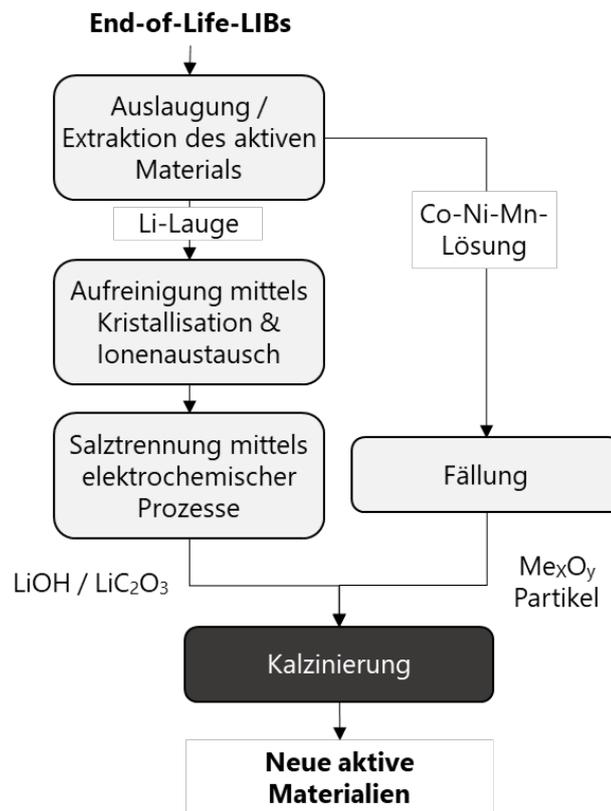


Abbildung 10: Schematische Darstellung des patentierten Düsenfeld-Verfahrens mit mechanischer Vorbehandlung, hydrometallurgischer Aufbereitung und Kalzinierung nach Elwert et al. (2016).

4.3.2 Pyrometallurgische Verfahren

Das pyrometallurgische Verfahren ist eine derzeit viel verwendete Methode im industriellen Recycling von LIB. Hier können Nickel, Kobalt und Kupfer effektiv gewonnen werden. Hingegen Lithium und Aluminium verbleiben in der Schlacke. Bei diesem Prozess ist eine Vorbehandlung der LIB meist nicht notwendig. Jedoch benötigt der pyrometallurgische Prozess viel Energie und erzeugt umweltschädliche Abgase (Zheng et al. 2018).

Pyrometallurgische Prozesse wie die Kalzinierung oder Röstung sind als vorbereitende Methoden zu verstehen. Hingegen zielen Reduktionsprozesse auf die Metallrückgewinnung aus Metalloxiden ab. Die Metalloxide stammen aus dem Kathodenmaterial oder sind das Ergebnis von Oxidationsreaktionen, die während der Vorbehandlung stattfinden.

Die **Kalzinierung** ist ein Hauptmechanismus, der in der konventionellen Pyrometallurgie zur Vorbehandlung von metallhaltigen Karbonatmineralien eingesetzt wird. Es ist ein thermischer Prozess in einer sauerstoffarmen oder sogar sauerstofffreien Atmosphäre. Dabei werden flüchtige Bestandteile entfernt, während das feste Material Phasenänderungen oder Zersetzungsreaktionen durchläuft (Yin & Xing 2019). Für LIB-Abfälle ist insbesondere die Zersetzung von Lithium-Metalloxiden (z.B. LiCoO_2) in ein Metalloxid und Lithiumcarbonat bei gleichzeitiger Sauerstofffreisetzung von Interesse (Kwon & Sohn 2020), sowie die weitere Zersetzung von Lithiumcarbonat in Lithiumoxid und Kohlendioxid (Yin & Xing 2019)

Das **Rösten** ist im Gegensatz zur Kalzinierung eine pyrometallurgische Methode, bei der die Zersetzung in einer sauerstoffreichen Atmosphäre stattfindet (Lin et al., 2018). Dabei hängen die Auswirkungen dieses Prozesses stark von der Vorbehandlung des Inputmaterials ab. Wenn zum Beispiel Aktivmaterial mit hohem Kohlenstoffanteil geröstet wird, oxidiert mit hoher Wahrscheinlichkeit der Kohlenstoff vollständig.

Bei der **carbothermischen Reduktion** wird der Kohlenstoff als Reduktionsmittel verwendet, wobei Metalloxide zu einer Metalllegierung reduziert werden und CO_x entsteht. Dieser Prozess ist abhängig vom Sauerstoffpotential des Metalloxids im Vergleich zum verwendeten Reduktionsmittel. Nickel und Kobalt haben ein relativ niedriges Sauerstoffpotential und lassen sich daher leicht zurückgewinnen, während Lithium und Aluminium mit einem relativ hohen Sauerstoffpotential verschlacken. In der Literatur sind verschiedene Ansätze zu finden, die eine Kombination oder spezielle Designs von Röstung, Kalzinierung und Reduktion verwenden, um eine Rückgewinnung aller Wertmetalle zu erreichen. Diese werden jedoch noch nicht im industriellen Maßstab betrieben (Holzer et al. 2021; Windisch-Kern et al. 2021; Xiao et al. 2017).

4.3.2.1 Stand der Technik

Bekannt ist der sogenannte Umicore-Prozess, der sowohl aus einem pyro- als auch aus einem hydrometallurgischen Prozessschritt besteht und neben LIB auch Ni-basierte Hybridbatterien behandeln kann (Yazicioglu & Tytgat, 2011). Hier werden EoL-LIB zusammen mit Additiven (Koks und Schlackenbildner) einem Schachtofen zugeführt, der in drei Temperaturzonen unterteilt werden kann. In der ersten Zone, der so genannten Vorwärmzone, wird der Elektrolyt der Batterien bei Temperaturen unter 300 °C langsam verdampft, um die Prozesssicherheit zu erhöhen und das Risiko von Explosionen zu verringern. Die energetische Nutzung von C-reiche Anteilen erfolgt in der zweiten Zone. Dies passiert bei bis zu 700 °C und senkt den Energiebedarf für den nachfolgenden Schmelz- und Reduktionsprozess. In der dritten Zone, der Schmelz- und Reduktionszone, kommt es zur Oxidation und Verschlackung von Al und Li. Hier werden auch Ni, Co und Cu reduziert und als Metalllegierung gewonnen, welche weitere Behandlungen durch saure Auslaugprozesse erfährt. Das Abgas, welches den Ofen verlässt, muss einer weiteren Behandlung und Gasreinigung unterzogen werden (Cheret & Santen, 2005). Der größte Vorteil dieses Verfahrens ist, dass es keine Vorbehandlung erfordert. Nachteilig hingegen sind die starke Abhängigkeit von Kobalt- und Nickelpreisen sowie deren Gehalt im eingesetzten Abfallstrom (Gaines, 2014). Zudem bedarf dieser Prozess sehr viel Energie (Sonoc et al., 2015). Ein weiterer Nachteil ist die Verschlackung von Lithium. Da die Konzentration in der Schlacke gering und der Energiebedarf für die Rückgewinnung hoch ist, landet die Schlacke meist als Zusatzstoff für Baumaterialien.

Analog zum Umicore-Prozess zielt auch der Inmetco-Prozess auf die Rückgewinnung von Co und Ni ab, während Li und Al verschlackt werden (Georgi-Maschler et al., 2012). Der Unterschied besteht darin, dass der Inmetco-Prozess ursprünglich für die Behandlung von Abfällen aus der Stahlherstellung konzipiert wurde. EoL-Batterien dienen nur als Co- und Ni-reicher Sekundärrohstoff. Es müssen daher die LIB vorbehandelt werden (Demontage, Kalzinierung und Zerkleinerung). Nach der Reduktion ist eine Weiterbehandlung im Elektrolichtbogenofen notwendig. Danach erhält man eine Fe-Co-Ni-Legierung. Li und Al landen auch hier in der Schlacke (Pinegar & Smith, 2019).

In ähnlicher Weise nutzt auch das Verfahren von Glencore (Xstrata Nickel) vorbehandelte LIB als sekundäres Einsatzmaterial in einem Prozess, der ursprünglich auf die Behandlung von Ni-, Co- und Cu-Erzen abzielt. So werden Li, Al und andere Bestandteile wieder oxidiert und verschlackt bzw. als Energieträger genutzt (Georgi-Maschler et al., 2012).

Die Firma Accurec verfolgt den Ansatz einer Kombination aus mechanischen, pyro- und hydrometallurgischen Schritten. Der Fokus liegt auf einer möglichst frühzeitigen Trennung der Komponenten und Rückführung der reinen Fraktionen in bestehende Recyclingwege (Vest, 2016). Nach der Tiefentladung, Zerlegung, Pyrolyse und mechanischer Behandlung wird die entstandene Feinfraktion pelletiert.

Die Pellets werden in einen Elektrolichtbogenofen eingebracht und bei Bedarf Schlackenbildner beigemischt. Neben der Legierung und Schlacke entsteht auch ein Li-haltiges Konzentrat. Die Legierung und das Konzentrat können in einem nachgeschalteten hydrometallurgischen Prozess verarbeitet werden (Accurec Recycling GmbH, 2018).

4.4 Ausblick innovativer Verfahren

Seit den ersten Veröffentlichungen über Recyclingverfahren zu Beginn des neuen Jahrhunderts, konnte bereits ein umfangreiches Wissen über verschiedene Verfahren zur Behandlung von Batterien, zur Extraktion von Materialien und zur Wiederverwendung des Materials in neuen Batterien aufgebaut werden. Die veröffentlichten Forschungsbeiträge kommen jedoch in erster Linie aus China, gefolgt von Süd-Korea (Melin 2018)

Das LIB-Recycling ist nach wie vor in der Entwicklung. Auch wenn es bereits Anlagen im industriellen Maßstab gibt, wird an alternativen Methoden oder an der Verbesserung bestehender Prozesse geforscht. Dabei reichen die Forschungsthemen von Vorbehandlungsprozessen über die Herstellung von Materialien aus rezyklierten Batterien bis hin zu den unterschiedlichen Recyclingprozessen. In der Vergangenheit konnte ein Fokus im Bereich der hydrometallurgischen Behandlung festgestellt werden (Melin 2018).

Nachfolgend sind einige innovative Verfahren aus den unterschiedlichsten Behandlungsbereichen angeführt. Dabei besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit oder darauf, dass die genannten Prozesse zukünftig eingesetzt werden. Es handelt sich um neue Ansätze, welche zumeist im Labormaßstab getestet werden und durchaus noch weiteren Forschungsbedarf haben.

4.4.1 Kryogene Zerkleinerung

Eine Möglichkeit, Altbatterien für die Weiterverarbeitung vorzubereiten, ist das kryogene Zerkleinern. Durch die Abkühlung der Batterien auf niedrige Temperaturen mit flüssigem Stickstoff, Kohlendioxid oder Argon werden die Batteriematerialien spröde und elektrochemisch inaktiv (Grandjean et al. 2019). Der Vorteil dieser Methode ist daher ein sicheres Zerkleinern der eingebrachten Batterien, unabhängig vom Lade- und Gesundheitszustand der Batterie, ohne dass eine vorherige Entladung erforderlich ist. Darüber hinaus können die Batteriematerialien aufgrund ihrer Versprödung effizienter zerkleinert werden. Ein feiner pulverförmiger Input kann für die Weiterverarbeitung von Vorteil sein. Die kryogene Zerkleinerung ist jedoch mit hohen Investitions- und Betriebskosten verbunden, weshalb diese Methode beim Batterierecycling eher eine technologische Nische darstellt.

Das patentierte Verfahren der kryogenen Kühlung wird als Vorbehandlungsschritt im Toxco-Verfahren, früher bekannt als Retrieve, eingesetzt. Bei diesem Verfahren werden die Batterien mit flüssigem Stickstoff bei Atmosphärendruck auf -175 °C bis -195 °C gekühlt (McLaughling & Adams 1999). Seit 2014 schlägt ein weiteres

Patent von Retrieve vor, zusätzlich zum flüssigen Stickstoff einen Sprühstrahl aus Wasser zu verwenden. Dadurch soll eine Suspension entstehen, die für die weitere Behandlung von Vorteil ist (Smith & Swoffer 2014).

4.4.2 Elektrohydraulische Zerkleinerung

Die elektrohydraulische Zerkleinerung basiert auf Stoßwellen, die durch gepulste Funkenentladungen erzeugt und über ein flüssiges Trägermedium (meist Wasser) auf das Material übertragen werden. Kurze, heftige Stöße greifen gezielt Schwachstellen an Materialgrenzen des Eingangsmaterials an. Nach der Zerkleinerung der verschiedenen Batteriekomponenten (Kathode, Anode, Elektrolyt, Separator, Zelle und Batteriegehäuse) soll eine materialgerechte Trennung der Fraktionen möglich sein.

Basierend auf dieser Art der Zerkleinerung wurde von der Projektgruppe des Fraunhofer IWKS eine Abfolge von Batterierecyclingschritten entwickelt, die von den Entwicklern als Konkurrenzfähig gegenüber anderen Verfahren gesehen wird. Die energieeffiziente und schonende Materialbehandlung bei niedrigen Temperaturen, ohne den Einsatz zusätzlicher Chemie, soll das Recycling der Einzelkomponenten Kunststoff, Elektrolyt, Kohlenstoff und Aktivmaterial für die erneute Herstellung von Batterien ermöglichen (Öhl et al. 2019).

Der größte Nachteil ist wohl der Aufbereitungsaufwand. Große Energiespeicher müssen bis auf die Zellebene zerlegt werden, bevor sie verwendet werden können. Der Erfolg der Auftrennung in verschiedene Materialkomponenten variiert je nach Zelltyp, inwieweit ist unbekannt. Das Verfahren befindet sich noch im Pilotmaßstab mit geringen Durchsätzen von 0,5 Tonnen pro Stunde (Bittner 2018). Die attraktiv erscheinende direkte Wiederverwendung des Aktivmaterials gelingt bisher nur mit Kapazitätsverlusten (Öhl et al. 2019). Völlig offen bleibt, inwieweit der Elektrolyt zurückgewonnen, die Batterie umgebende Medium verunreinigt wird oder eine Wiederaufbereitung erfolgt.

4.4.3 Froth Flotation – Schaumflotation

Die Schaumflotation wird als mechanisches Trennverfahren eingesetzt. Dabei soll nicht nur das Anodenmaterial vom Kathodenmaterial, sondern auch unterschiedliche Kathodenmaterialien voneinander getrennt werden. Das Verfahren nutzt unterschiedliche Oberflächenhydrophobien feiner Materialien, um diese zu trennen. Wenn Partikel mit Wasser gemischt werden, bilden mit Partikeln beladene Luftblasen eine Schaumschicht, während hydrophile Partikel zurückbleiben (Mohr et al. 2020).

In einer Studie von Zhan et al. wurde sowohl gebrauchtes wie auch neues Aktivmaterial untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass es kaum Unterschiede bei der Trennleistung gibt. Bei gebrauchtem Aktivmaterial ist die Rückgewinnung des Aktivmaterials teilweise etwas geringer, da ein Teil der Graphitpartikel nicht schwimmfähig sind.

Eine Erhöhung der Reinheit des Kathodenmaterials erfolgt durch eine feinere Zerkleinerung, was frische hydrophobe Oberflächen im Wasser ermöglicht. Als effektiver Kollektor für das Anodenmaterial wurde Kerosin identifiziert (Zhan et al. 2018). Auch dieses Verfahren ist noch in der Entwicklung und benötigt weitere Studien und Untersuchungen (Mohr et al. 2020).

4.4.4 Elektrolyt-Rückgewinnung durch CO₂-Extraktion

Die meisten derzeitigen Recyclingmethoden für LIB gewinnen den Elektrolyten nicht zurück. Der Fokus liegt zumeist auf den monetär wertvollen Metallen, wobei man die weniger wertvollen oder schwerer rückgewinnbaren Stoffe einfach loswerden will. Beispielsweise wird in der thermischen Behandlung der Elektrolyt einfach verbrannt (Liu et al. 2014).

Bei der Elektrolyt-Extraktion werden die Batterien in ein Extraktionsgefäß gelegt. Dann erfolgen Einstellungen (Druck und Temperatur), sodass sich der überkritische Zustand einstellt. Der kritische Zustand bei CO₂ stellt sich über einen Druck von ca. 74 bar bei einer Temperatur von 31 °C ein. Die Elektrolyte werden von den überkritischen Flüssigkeiten extrahiert und in ein Auffanggefäß überführt. Dort wird der ursprüngliche Zustand der Fluide wiederhergestellt und der Elektrolyt kann abgetrennt werden (Liu et al. 2014).

Grützke et al. haben die Extraktion des Elektrolyten mittels flüssigem und überkritischem CO₂ untersucht. Flüssiges CO₂ hat noch nicht den kritischen Zustand erreicht, während hat und das überkritische CO₂ über dem kritischen Punkt (74 bar und 31 °C) liegt. Im Experiment wurden die dafür geöffnete Rundzellen in einer Extraktionskammer mit dem Extraktionsmedium (CO₂) durchströmt. Das Ergebnis zeigte, dass mit der Extraktion mittels flüssigem CO₂ eine höhere Ausbeute (über die Zeit) erzielt werden kann als gegenüber überkritischem CO₂. Bei weiteren Versuchen wurde dem CO₂ weitere Zusätze beigefügt, um die langen Extraktionszeiten zu verkürzen und bisher nicht gelöste Leitsätze zu extrahieren. Maximale Rückgewinnungsraten konnten mit Mischungen aus verschiedenen Lösungsmitteln erreicht werden. Die Autor*innen schließen daraus, dass es generell möglich ist, mit CO₂-Extraktion den Elektrolyten aus gebrauchten Batteriezellen zu gewinnen. Dazu müssen jedoch die Extraktionsbedingungen (insbesondere die zusätzlichen Lösungsmittel) auf die einzelnen Zellkomponenten (Elektrodenmaterialien, Separator, Elektrolyt und Geometrie) abgestimmt werden (Grützke et al. 2015).

Auch für das Rückgewinnen von Anodenmaterial bzw. Graphit wurde der Prozess der Elektrolytextraktion mit Kohlendioxid (CO₂) untersucht. Inwiefern der Extraktionsprozess eine Auswirkung auf die Qualität des Graphites hat. Es wurde festgestellt, dass Graphit aus einer gealterten Zelle die einer unterkritischen CO₂-Elektrolytextraktion in Kombination mit einer thermischen Behandlung die besten elektrochemischen Eigenschaften zeigt und im Besten Fall den Benchmark – einer synthetisierten Graphitanode – übertrifft. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass trotz der geringeren Kristallinitätsgröße im Vergleich zu nicht-extrahierten Graphitpartikeln die Elektrolytextraktion mit unterkritischem CO₂ als die beste Recyclingmethode angesehen wird, da der recycelte Graphit die beste elektrochemische Leistung zeigt und der Elektrolyt zu 90 % zurückgewonnen wird, einschließlich des Leitsalzes (Rothermel et al. 2016).

4.4.5 Aufbereitung von Kathodenmaterial durch Mikrowellenbehandlung

Durch die Mikrowellenbehandlung soll das Kathodenmaterial aus gemischten LIB aus Handy und Laptops (LCO und LMO) aufbereitet werden. Ziel dabei ist die Gewinnung von Metallen wie Co, Ni, Mn sowie Li.

Nach der Entladung werden das Kathoden- und Anodenmaterial getrocknet und zerkleinert. Bevor das Material in den Mikrowellenofen kommt, wird Kathodenmaterial mit Anodenmaterial gemischt. Dabei fungiert das Anodenmaterial als Reduktionsmittel, wobei das Mischverhältnis eine wichtige Rolle spielt. Durch die Aussetzung des Materials der Mikrowellenstrahlung erwärmt es sich und die Reduktion erfolgt. Im weiteren Schritt wird

das wärmebehandelte Produkt in Wasser gelaugt und danach filtriert bzw. durch einen Magnetabscheider geführt.

Das erreichte Produkt setzt sich aus den Phasen Co, CoO, MnO, Mn₃O₄ und Ni zusammen und kann als ein potenzielles Vorprodukt für die Synthese neuer LIB dienen. Eine durchgeführte Kostenabschätzung kommt zu dem Schluss, dass dieser Prozess wirtschaftlich geführt werden könnte.

Versuche des Auslaugverhaltens nach der Mikrowellenexposition Ergebnisse zeigen, dass Lithium in Form von Lithiumcarbonat mit einer Reinheit von 95% durch Wasserlaugung extrahiert werden konnte. Die Mikrowellenbehandlung bewirkt auch eine verbesserte Metallextraktion bei der Auslaugung mit organischen Lösungsmitteln (Zitronensäure) (Pindar & Dhawan 2020a; Pindar & Dhawan 2020b).

4.4.6 Direktes Recycling

Direktes Recycling ist eine Rückgewinnungsmethode, bei dem die aktiven Materialien von LIB direkt zurückzugewonnen werden, während ihre ursprüngliche Verbundstruktur erhalten bleibt. Ziel ist es das Kathoden- und Anodenmaterial für einen Wiedereinsatz aufzubereiten.

Es erfolgt eine Trennung der einzelnen Batteriebestandteile, wobei in erster Linie physikalische Prozesse, wie durch Schwerkraft, magnetische Trennung oder eine moderate thermische Verarbeitung verwendet werden, um den chemischen Abbau der aktiven Materialien zu vermeiden. Die aktiven Materialien werden gereinigt, und sowohl Oberflächen- als auch Bulkdefekte werden durch erneute Lithiierung oder hydrothermale Prozesse repariert (Chen et al. 2019; Gaines 2018; Ge 2019).

Diese Methode befindet sich jedoch noch im Labor- bzw. Pilotmaßstab, wo hingegen der pyrometallurgische und hydrometallurgische Prozess bereits im industriellen Maßstab betrieben werden können (Chen et al. 2019). Pilotbetriebe für direktes Recycling sind Kyburz (2020), OnTo Technology (2020) und Battery Resourcers (2020), wobei hier nicht bekannt ist, wie der tatsächliche Prozess abläuft, bzw. ob die Pilotanlage bereits in Betrieb ist.

Das direkte Recycling von Aktivmaterialien zeichnet sich dadurch aus, dass es sich um einen relativ einfachen Prozess handelt. Zudem verursacht es weniger Emissionen als der pyrometallurgische oder hydrometallurgische Prozess und das Aktivmaterial kann nach der Aufbereitung sofort für die Zellenproduktion eingesetzt werden. Dem gegenüber stehen Herausforderungen wie die extrem genaue Sortierung nach der Kathodenchemie, was sich technisch und auch wirtschaftlich schwierig erweisen kann. Der Prozess zeigt sich als nicht flexibel und ist sehr empfindlich auf Veränderungen im Inputstrom. Auch der Lithiumverlust kann nicht allgemein für alle Batterien gleichermaßen angenommen werden. Es ist daher kein Leichtes rezykliertes Material zu produzieren mit exzellenter elektrochemischer Performance, die der Batterieerzeugung genügen (Chen et al. 2019; Ge 2019).

4.4.6.1 Aufbereitung des Kathodenmaterials

Der Fokus im direkten Recycling liegt in der Rückgewinnung des Kathodenmaterials. Sowohl die unterschiedlichsten Kathoden-Typen (NMC, LCO, LFP) wie auch verschiedene Methoden (thermisch, chemisch, hydrothermal) kommen dabei zur Anwendung. So haben Ge (2019) und Li et al. (2020) ein NCM523-Kathodenmaterial durch Sintern rezykliert. Zheng et al. (2017) untersuchten die Herstellung von NMC111 Kathodenmaterial aus gemischtem Inputmaterial und thermischer Behandlung. Mit der Aufbereitung von LFP-Material beschäftigten

sich Song et al. (2017) auf thermischer Basis sowie Ganter et al. (2014) auf chemischer und elektrochemischer Weise, wobei die chemische Lithiierung vielversprechender scheint. Shi et al. (2018) und Sloop et al. (2020) bereiten LCO-Kathodenmaterial hydrothermal auf. Wobei Sloop et al. angeben, auch Anodenmaterial und Elektrolyt zurückzugewinnen zu können.

4.4.6.2 Aufbereitung des Anodenmaterials

Über die Aufbereitung von Anodenmaterial liegt wenig Literatur vor. Bei den thermischen Prozessen wird das Anodenmaterial, welches hauptsächlich aus Graphit besteht, verbrannt (Chen et al. 2019). Sabisch et al. (2018) untersuchten das Recycling von Anodenmaterial und untersuchten selbst gebaute Halbzellen. Dabei wurden zehn Zyklen mit aufbereitetem gegenüber neuem Anodenmaterial getestet. Dies lieferte ein brauchbares Ergebnis, jedoch ist hier noch viel zu forschen. Auch Sloop et al. (2020) beschreibt die Aufbereitung von Graphit. Jedoch wird auf die weitere Verwertung nicht eingegangen.

4.4.7 Graphitrecycling

Es gibt viele Ansätze in der Forschung, die sich um die Rückgewinnung von Graphit bemüht. Insbesondere die Einstufung dieses Materials als kritischen Rohstoff, durch die Europäische Union unterstützt (Europäische Kommission, 2020) unterstützt diese Projekte. Es gibt auch Versuche, sowohl die thermische Vorbehandlung als auch die hydrometallurgischen Prozesse entsprechend anzupassen.

Die aktuellen hydrometallurgischen Prozesse laugen das Aktivmaterial mit anorganischen oder organischen Säuren aus. Dabei verbleibt Graphit in den festen Rückständen und ist derzeit ohne Wert. Die Nachbehandlung und Gewinnung von Graphit aus den festen Rückständen oder Schlacken wäre sehr kostspielig und ist auch technisch sehr anspruchsvoll. Dies liegt auch darin, dass neben Graphit Verunreinigungen wie Cu, Al und andere anorganische Komponenten enthalten sind (Dutta et al., 2018; Pinna et al., 2017; Vieceli et al., 2018; Zheng et al., 2018).

4.5 Fazit

Aufgrund der rasanten Entwicklung müssen die Technologien für die Aufbereitung von EoL-LIB bzw. die Kombinationen von Vor- und Nachbehandlungsschritten sehr gut aufeinander abgestimmt sein, um maximale Recyclingquoten für alle Materialien zu erreichen.

Um dies zu erreichen ist noch weitere Forschung notwendig. Darüber hinaus muss im Sinne des Ökodesigns und der erweiterten Herstellerverantwortung die Recyclingfähigkeit bei Design- und Innovationsprozessen berücksichtigt werden. Nur so können Synergien entlang der Recyclingkette identifiziert und effizient genutzt werden, um die zukünftige Versorgung mit kritischen Rohstoffen nachhaltig und wirtschaftlich sinnvoll zu sichern.

Die Autor*innen kommen daher zu dem Schluss, dass noch weitere Forschung notwendig ist, insbesondere um die Recyclingeffizienz für Li- und graphithaltige Materialien zu erhöhen.

5 Potenziale und Herausforderungen einer Wertschöpfungskette für das Recycling von LIB – Meinungsbild der Stakeholder

Im Zuge des Projekts wurden entlang der gesamten Wertschöpfungskette Stakeholder identifiziert und Interviews zu den Potenzialen und Herausforderungen der Entwicklung einer Wertschöpfungskette für das Recycling von LIB geführt (siehe Kapitel 2.3.2). Die Befragungen erfolgten anhand eines umfangreichen Fragenkatalogs (siehe Anhang 11.1), der sowohl die technische als auch die wirtschaftspolitische Dimension der Etablierung einer LIB-Recycling Wertschöpfungskette beinhaltet. Die Ergebnisse der Befragungen werden in den folgenden Kapiteln anhand von zentralen Themengebieten geclustert und zusammenfassend dargestellt. Für eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse der wirtschaftspolitisch ausgerichteten Befragung wird auf Meyer et al (2021) verwiesen. Die Inhalte der qualitativen Interviews werden im Konjunktiv wiedergegeben, da sie die Meinung der Stakeholder darstellen. Diese deckt sich mitunter nicht mit der Meinung der Studienautor*innen oder des Auftraggebers.

5.1 Die Bedeutung einer getrennten Sammlung von LIB

Generell sei es eine Herausforderung, LIB in die richtige Sammelschiene zu bekommen. Wenn die richtige Sammelschiene bedient werde, könne ein sicherer Transport, Sammlung und Behandlung gewährleistet werden. LIB, die nicht über die „richtige Sammelschiene entsorgt würden (z.B. über Restmüll), sind schon jetzt ein Problem und dies werde auch in Zukunft so sein.

Prinzipiell sind Gerätebatterien getrennt von Industriebatterien zu sammeln. Die Sammlung ist in der Abfallbehandlungspflichten-Verordnung geregelt, welche sich nach den Vorgaben der ADR richtet. Der Unterschied zwischen Geräte- und Industriebatterien in der Sammlung liegt darin, dass Gerätebatterien in der kommunalen Abfallsammlung unentgeltlich entsorgt werden können. Für die Sammlung von Industriebatterien sind die Hersteller selbst verantwortlich und müssen kein Sammel- und Verwertungssystem nützen. Sie bedienen sich meist der vorhandenen Strukturen der österreichischen Entsorger sowohl hinsichtlich der regionalen Sammelstellen als auch der Logistik. Sammelgebinde sowie Verpackungsmaterial werden auch meist durch den Entsorger zur Verfügung gestellt. In der Regel gäbe es eine regionale Übernahmestelle pro politischen Bezirk. Bei Industriebatterien sei es meistens so, dass man wisse, um welche Zellchemie es sich handelt. Bei Gerätbatterien bedarf es entsprechende Kennzeichnung damit die Zuordenbarkeit bzw. die Erkennbarkeit um welche Batterie es sich handelt, erleichtert wird. Seit 2018 müssen LIB aus Geräten getrennt von anderen Geräten gesammelt werden (sowohl marktseitig beim Entpflichten als auch sammelseitig), da andere Anforderungen in der Sammlung und Lagerung zutreffen.

Die Lagerung von LIB stelle bis dato kein höheres Sicherheitsrisiko dar, vorausgesetzt die Sammelware ist ordnungsgemäß verpackt. Wenn die Fässer nur kurz umgeschlagen würden, würden sie mit Stapler verwogen und in einem Hochschwerlastregal gelagert. Die Sammelfässer würden in einem überdachten Bereich mit Brandschutzeinrichtung (Meldeanlage) bereitgestellt. Der Transport von Fässern mit LIB aus dezentralen zu zentralen Sammelstellen erfolge nur dann wenn eine komplette LKW-Ladung an verschiedensten Altstoffen für den Weitertransport bereit stehen und sei als Gefahrgut-Transport ausgestattet. Bei der Abholung durch den Entsorger werde der Innensack herausgenommen und in einen 700 L ASB Behälter für den Weitertransport umgefüllt.

Empfohlene Maßnahmen in der Sammlung:

- Dezentrale Sammlung ermöglichen
- Eine gut funktionierende Sammlung und Trennung von anderen Batterien in Sammelstellen, hängt von den Mitarbeiter*innen ab. Regelmäßige Schulungen seien daher von großer Wichtigkeit.
- Eine eindeutige und klare Kennzeichnung, wenn im Gerät Lithium-Akkus enthalten sind, da LIB in vielen Fällen nicht eindeutig identifizierbar seien.
- Bewusstseinsbildung/Aufklärungsarbeit auch bei Kindern und jüngeren Erwachsene, zu Schadstoffen und Gefahren (Brandgefahr).

Herausforderungen in der Sammlung:

- Problematisch seien LIB für Modellautos/-flieger (im Gegensatz zu beispielsweise E-Bike-Akkus, die ausreichend geschützt sind) in der Sammlung. Da diese Modelle eine leichte Bauweise voraussetzen, besitzen die LIB oftmals keine Schutzhüllen (werden nur mit Folie geschützt). Hierzu gab es in der Vergangenheit schon Probleme bezüglich mechanischer Schäden und Kurzschlüssen.
- Rechtliche Hürden werden im Bereich der Zulassungen für Altstoffsammelzentren seitens der BH beschrieben. Diese sei in den einzelnen Bundesländern sehr unterschiedlich geregelt. Im schlimmsten Fall benötigt jedes Altstoffsammelzentrum, welches LIB sammelt, einen eigenen Bescheid. Im besten Fall reiche nur eine Anzeige aus, welche danach überprüft werde. Prinzipiell hätten Sachverständige unterschiedliche zusätzliche Forderungen und dies habe sehr individuelle Lösungen/Auflagen zur Folge.
- Problematisch für Abfallsammler seien Auflagen seitens der Behörde, die vorgeben, dass ein Fass beispielsweise nicht länger als einen Monat gelagert werden dürfe, wobei es teilweise bis zu einem Jahr brauche, bis ein Fass voll sei.
- Geräte mit nicht entnehmbaren Akkus, richtig nach ADR transportieren. Obwohl es EU-Vorgabe sei, dass Akkus entnehmbar sind, käme es immer noch vor, dass Geräte in der Abfallsammlung landen, deren Akkus nicht entnehmbar sind. Dies käme auch bei Großgeräten vor, wo Akkus im Rahmen integriert seien. Dies stellt eine zusätzliche logistische Herausforderung für einen rechtskonformen Transport dar.
- Bei Gerätebatterien bestehe die Herausforderung, dass eine große Vielfalt an LIB gesammelt werden muss (von ganz klein bis mittel groß).
- Ein mögliches wirtschaftliches Risiko betreffe Abfallsammler, wenn der Weg zur Entsorgung plötzlich ausfalle (Ausfall von Anlagen zur Verwertung von LIB), dann müssten größere Mengen für eine Zwischenlagerung abgewickelt werden, mit etwaig höherem Sicherheitsrisiko.
- Eine sich ständig ändernde Technologie (neue Kathodenmaterialien etc.) sei eine Herausforderung bei der Identifikation von LIB oder Geräten mit LIB durch Mitarbeiter*innen oder durch den Kunden. Diese spiegle sich auch in der Wirtschaftlichkeit wider.
- Der Transport von alten Batteriesystemen sei sehr teuer und ökologisch nicht sehr sinnvoll, da sehr viel Platz benötigt werde. Der Transportprozess im Zuge eines Gefahrguttransports sei nicht optimiert. Im besten Fall sei vorzeitige Demontage mit anschließendem Transport empfehlenswert.
- Die Logistik von defekten Batterien sei eine Herausforderung

5.2 Den Rücklauf von Batterien sicherstellen

Es wurde überwiegend die Meinung vertreten, dass es wichtig sei, die Batterien in Europa zu halten, einerseits aus ökonomischen Gründen sowie andererseits, um eine Abhängigkeit von Rohstoffimporten aus dem Ausland zu vermeiden. Es sei nicht sinnvoll, die Seltenen Erden für Neufahrzeuge hochpreisig im Ausland einzukaufen,

die Altbatterien dann günstig zu exportieren, um die Rohstoffe für Neubatterien schließlich wieder teuer im Ausland einzukaufen. Das sei unwirtschaftlich und würde große Abhängigkeiten schaffen.

Mehrere Interviewpartner äußerten die Meinung, dass sogenannte Product-Service-Systems, bei denen die Produzenten im Eigentum der Batterien bleiben, sinnvoll seien, um möglichst hohe Recyclingquoten bzw. ein Second-Life sicherzustellen, dass die Hersteller bisher jedoch nicht bereit dafür seien und es noch viel Bedarf gebe, darüber nachzudenken. Der Vorteil sei, dass durch B2B-Modelle klare Besitzverhältnisse an den Batterien sowie eine Stoffstromverfolgung sichergestellt werden könne. Die Daten über den Lebenszyklus der Batterien wären so problemlos auszulesen und die optimale Lebensdauer der Batterien (etwa eine Entnahme bei 85 oder 90% der Kapazität) präzise zu steuern.

Die Einführung von Product Service Systems bleibe letztlich eine Unternehmensentscheidung und könne nicht politisch vorgeschrieben werden. Product Service Systems würden sich nur durchsetzen, wenn die Hersteller davon überzeugt seien, dass es Vorteile hat. Die Kreislaufwirtschaft allein werde als Anreiz für die Einführung solcher Systeme nicht ausreichen, es sei denn, die gesetzlichen Vorgaben seien hoch genug.

Eine Frage in diesem Zusammenhang betreffe die Entwicklung der E-Mobilität in 10-15 Jahren, konkret, ob die Entwicklung eher in Richtung Austausch von Diesel- und Benzin-Fahrzeugen oder in Richtung Sharing oder Flotten-Modelle gehe. Letzteres wäre von der Kostenseite, der Ressourceneffizienzseite und auch bezüglich einer klimagerechten Raumentwicklung sinnvoller. In Kombination mit Entwicklungen im autonomen Fahren (Digitalisierung) bzw. im Bereich „Mobility-as-Service“ könne das einen höheren Anteil an Flottenfahrzeugen bedeuten. Es wäre dann zu klären, wer diese Flotten betreibe, Automobilhersteller oder spezialisierte Flottenbetreiber wie z.B. Sixt o.ä. Damit wäre man im B2B-Bereich und es entstünden Synergien in der Kreislaufschließung. Für Automobilhersteller würden diese Systeme es erleichtern, die Rohstoffversorgung in bestimmten Bereichen zu sichern und etwa den Nachweis über „Responsible Sourcing“ Praktiken zu erbringen, denn es wäre bekannt, wo recycelt und in welchem Ausmaß recycelt werde und auch die Rechnung über die CO₂-Einspareffekte im Bereich Recycling versus Mining wäre klar positiv. Solche Modelle könnten also attraktiv sein. Es würde aber eine komplette Umstrukturierung des Geschäfts inklusive Bilanzkennzahlen bedeuten, denn die gesamte Produktion bliebe über 15 Jahre in den Büchern stehen und die Bilanzen der Hersteller würden extrem aufgeblasen werden.

Leasing und Pfandmodelle seien durchaus eine Option. Ein Stakeholder sieht zudem Pfandsysteme mit einem ausreichend hohen Pfand (z.B. 100 € pro Traktionsbatterie) als Möglichkeit, eine ausreichend hohe Sammelquote sicherzustellen. Solche Modelle müssten gut am Produkt durchdacht sein, etwa müsse die Frage geklärt werden, ob einzelherstellergetriebene oder gepoolte Pfandmodelle implementiert würden. Es wurde auch in diesem Zusammenhang auf die lange Dauer der Pfandleihgabe verwiesen. Leasingmodelle seien quasi in der Automobilindustrie erfunden oder zumindest stark ausgedehnt und seien gut etabliert und erfolgreich. Attraktiv ausgestaltet sei Leasing eine Möglichkeit, Fahrzeuge und Batterien wieder zurückzubekommen. Dies könne auch ein Ansatz sein, den Abfluss aus Europa einzudämmen. Ein Pfand werde von den meisten Stakeholdern jedoch eher skeptisch gesehen, da sämtliche Kanäle dabei sein müssten und der Aufwand entsprechend hoch sei. Weiters sei ein Pfand auch gegenüber dem Kunden nicht fair und was der Mitbewerber mit der Batterie mache, wäre unklar. Es solle jedoch evaluiert werden, ob Pfandsysteme für Batterien (Batterieleasing) positive Auswirkungen auf die Sammelquoten hätten.

Eine dezentrale Batterieannahme und Demontage könne Sammelkosten verringern und Rücklaufquoten erhöhen. Weiters solle die Herstellerverantwortung so weit ausgedehnt werden, dass das Bewusstsein auch bei

Herstellern für höhere Rücklaufquoten da sein sollte. Ein anderer Stakeholder meinte wiederum, dass ein Sammelsystem nicht das Interesse hätte, mehr zu sammeln als die Quote, da es kostenintensiv sei und daher der Konkurrenz gegenüber schlecht. Es brauche daher Anreizsysteme, die das Sammeln über die Quote hinaus attraktiver mache (M11). In Belgien sei ein Vorzeigebeispiel punkto Öffentlichkeitsarbeit. Dort werde eine Sammelquote von 80 % erreicht (www.bebat.be/en). Die Aufklärung der Konsumenten sei der Schlüssel.

5.3 Der Weg zu einer effizienten Sortierung

Das Hauptaugenmerk bei der Sortierung liege beim Erkennen der LIB-Chemie. Teilweise gäbe es Erkennungsmerkmale für die Zellchemie (z.B. bei Rundzellen mit Buchstabencodes). Grundsätzlich werden Geräte- und Industriebatterien unterschieden. Weiters werden Industriebatterien nach ihrer Zellchemie in unterschiedliche Fraktionen geteilt, um sie in die entsprechenden Recyclinganlagen schicken zu können. Der größte Teil der Sortierung erfolge manuell. Defekte Batterien werden bereits bei der Sammlung ausgeschleust und werden bei der Annahme auf ganz spezifische Merkmale (plus Erfahrung des Personals) überprüft. Es wird geschätzt, dass weniger als 10% der Batterien defekt sind.

Gerätebatterien werden nicht nach der Zellchemie sortiert. Eine Unterscheidung erfolge hier zwischen High-Grade (z.B. Akkumulatoren aus Mobiltelefonen und Laptops) und Low-Grade (z.B. Powertools), d.h. nach dem Anwendungsgebiet. Gerätebatterien werden teils manuell und teils per Röntgenanlage sortiert.

Bei Traktionsbatterien werden die unterschiedlichen Zellchemien unterschieden (z.B. Eisenphosphat und Nickel-Kobalt). Es gäbe auch eine eigene Fraktion für Batterien aus Tesla-Fahrzeugen. Weiters wird unterschieden in Kobaltreich und Kobaltarm.

Die manuelle Sortierung erfolge in einer enormen Geschwindigkeit, da das Sortierpersonal schon Erfahrung besitzt. Erkennungsmerkmale seien das Anwendungsgebiet, Gewicht und die Batterie an sich. Das Sortierpersonal verfüge über ein enormes Wissen über die Batterien, welches über die Jahre selbst angeeignet wurde. Sie kennen die Batterien jeder großen Automobilhersteller z.B. nach Gehäuse Zelltypen, Seriell- und Parallelkonfiguration, Spannungsniveaus (M9). Falls eine Batterie nicht eindeutig zuordenbar ist, dann komme die Batterie ins Labor. Batterien von neuen Herstellern werden dann im Labor getestet (Pyrolyse), um deren Metallgehalte festzustellen. Denn auch bei gleicher Zellchemie, könne es je nach Hersteller große Abweichungen geben. Aber ist die Zellchemie vom Hersteller eingestellt, bliebe diese im Normalfall für die nächsten Jahre konstant.

Eine klare Deklaration könne das Erkennen jedoch wesentlich erleichtern. Gerade im Consumer-Bereich wird eine Kennzeichnung gefordert, da vom Produkt nicht immer eindeutig auf den Batterietyp zurück geschlossen werden kann. Jede Batterie sei gekennzeichnet (z.B. durch eingravierten QR-Code). Dieser sei jedoch nicht immer für den Recycler zugänglich. Die meisten Batterien befänden sich in Packs oder Gehäusen und sind daher nicht identifizierbar. Von einem weiteren Interviewpartners wird geschätzt, dass ein Drittel der Zellen allerdings nicht gelabelt sei bzw. im Automotivbereich alle keinen Code besitzen.

Grundsätzlich sei eine reine Fraktion wie z.B. NMC-Fraktion nicht notwendig; Ziel sei es eine Fraktion zu erzeugen, die vermarktbare ist. Dies könne auch durch Mischung verschiedener Zellchemien erfolgen. Bestimmte Mischungen, wie z.B. von LFP und LCO seien allerdings für das Recycling problematisch.

Empfohlene Maßnahmen für die Sortierung:

- Labeling oder Codes zur Identifizierung des Zelltyps, die für den Sortierer/Recycler ersichtlich sind (d.h. nicht nur Codes in verbauten Zellen).
- Plattform für einen Informationsaustausch zwischen Batterie-Hersteller und Recycling zur Deklaration des Zelltyps und der Materialzusammensetzung.
- Diese Plattform könne nur durch Reglementierung z.B. seitens der Gesetzgebung funktionieren. Als Erzeuger sollte es kein Problem damit geben.

5.4 Potenziale für das Recycling von LIB

Alle Stakeholder sind der Auffassung, dass sich ein europäischer Markt für Elektromobilität konstituiert habe und dieser in den nächsten Jahren eine exponentielle Dynamik entfalten werde. Das betreffe alle Länder der Europäischen Union, jedoch mit unterschiedlicher Dynamik. Für das dynamische Wachstum sprechen nach Ansicht der Befragten die wirtschaftspolitischen Rahmenbedingungen sowie die Entwicklungen in Industrie und Infrastruktur: die CO₂-Politik im Verkehrsbereich der EU, die Förderung der Elektromobilität in den Konjunkturpaketen im Zuge der Covid-19 Pandemie sowie der Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur (Ladeinfrastruktur, E-Fahrzeugproduktion, sowie Batterie-, Zell -und Zellkomponentenproduktion). Der Hochlauf habe begonnen, wie mehrere Stakeholder betonten. Die Entwicklungen seien in diversen publizierten Szenarien dokumentiert, etwa in der vom Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer aktualisierten „Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030“ (VDMA 2020), die die Marktentwicklung für LIB der Anwendungsbereiche Konsumelektronik, Elektromobilität, stationäre Energiespeicher und industrielle Großspeicher analysieren. Es kommen immer bessere elektrische Automodelle auf den Markt. Die Nachfrage nach E-Autos steige stetig und könne z.T. nicht befriedigt werden. Es liegen z.T. Wartezeiten von mehreren Monaten bis zu einem halben Jahr für bestimmte E-Autos vor. Szenarien Berechnungen für die Europäische Kommission, zum Zeitpunkt der Interviews noch unveröffentlicht, gehen in den Stützjahren 2020, 2030 und 2050 von einem enormen exponentiellen Anstieg aus.

Während der Markt für portable Batterien aus Geräten schon relativ groß sei und weiterwachsen werde, werde der Markt für LIB in der Elektromobilität, bestehend aus Hybridfahrzeugen sowie mittelfristig aus vollelektrischen und auch aus Brennstoffzellen Fahrzeugen rasant wachsen. Ein Interview-Partner schätzt, dass der Anteil der Nachfrage, der auf Großbatterien für industrielle Anwendungen und die Elektromobilität entfalle, im Jahr 2030 weitaus dominieren und dass die Zellchemie in den nächsten 15 bis 20 Jahren vorherrschend lithiumbasiert sein werde. Deshalb werde in der EU noch lange Zeit ein Aufkommen von LIB erwartet, mindestens bis 2050.

Für das Recycling von Traktionsbatterien seien zunächst jedoch die Produktionsabfälle relevant. EoL-Batterien aus dem Fahrzeugbereich seien aufgrund ihrer Nutzungsdauer von ca. zehn Jahren erst in den Jahren 2025 – 2030 in einer für die Abfall- und Recyclingwirtschaft relevanten Menge zu erwarten. Es gebe viele Einflussfaktoren, die das genaue LIB-Mengenaufkommen beeinflussten. Ein wesentlicher Faktor sei die Frage, ob Traktionsbatterien aus der E-Mobilität für ein Second Life geeignet seien und genutzt würden. Darüber gebe es sehr unterschiedliche Auffassungen, auch sehr optimistische.

Die große Herausforderung sei, dass wir zwar wissen, dass die Welle an LIB ins Recycling komme, dass sie aber noch nicht da sei. Es stelle sich also die Frage, wer gehe in Vorleistung und investiere ein paar Jahre in die Zukunft, ohne genau zu wissen, wann die Mengen und die Auslastung da seien, um eine große effiziente Recyclinganlage kostendeckend zu betreiben.

Die meisten Befragten sehen das Recycling von LIB als sinnvoll, oder gar als alternativlos an, und zwar aus Gründen der Ressourcenschonung, der Brandgefahr, die von LIB ausgehe, als auch aufgrund der toxischen Inhaltsstoffe wie den Batteriechemikalien, den fluoridhaltigen Leitsalzen und den Kathodenaktivmaterialien, die als krebserregend eingestuft seien. Auch die CO₂-Einspareffekte der Sekundärrohstoffproduktion und die Versorgungssicherheit mit kritischen Ressourcen seien Argumente, die für das Recycling sprechen. So sei das Recycling von LIB hinsichtlich der Rückgewinnung und Beschaffungssicherheit von wichtigen Funktionsmaterialien¹⁰ und den Aufbau einer starken industriellen Wertschöpfungskette für die Herstellung von Batterien von Bedeutung. Dies sei auch ein Ziel der „European Battery Alliance“. Diese Materialien könnten gut zurückgewonnen werden, es müssten aber entsprechende Standards hinsichtlich der Ausbeuten festgelegt werden.

Die Erfolgchancen des Recyclings von LIB wurden insgesamt als gut bis sehr gut bewertet, wenn sich einzelne technische Prozesse auch noch in der Entwicklung befinden würden. Der Erfolg des Recyclings von LIB werde davon abhängen, wie ernsthaft das Recycling betrieben werde. Es wurde bemängelt, dass oftmals kein „wirkliches“ Recycling betrieben werde. So könne z.B. die in der aktuellen Batterierichtlinie erforderliche 50 % massenbasierte Recyclingquote theoretisch erreicht werden, ohne ein Gramm der Funktionsmaterialien Kobalt, Nickel oder Lithium zu recyceln. Es brauche daher bessere gesetzliche Vorgaben. Die EU-Batterierichtlinie werde derzeit überarbeitet und in eine Verordnung überführt. Die Frage sei, wie sie dann in nationales Recht und Praxis übersetzt werde. Die Zusammenarbeit entlang der Wertschöpfungskette sei sehr wichtig, müsse sich aber anders als heute gestalten, sonst gelinge keine Kreislaufwirtschaft im Sinne der EU-Kommission. Mit einem Business-as-usual werde man keine Kreislaufwirtschaft bekommen. Eine umfassende Kreislaufwirtschaft für deutlich mehr als Recycling brauche mehr Produzentenverantwortung und Transparenz.

Das Problem beim derzeitigen Recycling liege im Preiswettbewerb, der zu einer geringen Recyclingqualität führe. Es fehlen Standards, die definieren, was eigentlich erreicht werden solle. Wichtig sei die Festlegung bzw. saubere Definition und Beschreibung der Systemgrenzen: von wo bis wo werde die Recyclingquote berechnet. Es bedürfe einer sauberen Beschreibung der Begriffe Recycling und Rezyklate. Je schwerer das Gehäuse sei und je mehr Peripherie in die Recycling-Quote hinein gerechnet werde, desto leichter werden die Recycling Quoten erreicht, ohne dass sich an der Kreislaufwirtschaft der anderen Materialien (Ni, Li, Co) etwas verbessere. Das Recycling müsse sich auf den gesamten Prozess beziehen, mit dem Battery-Pack beginnend und den Feinmetallsalzen endend, die am Ende einer langen Prozesskette herauskommen müssten. Diese Endprodukte müssten eine bestimmte Qualität aufweisen, damit sie als Input für neue Produkte verwendet werden können. Wenn weiteres Refining nötig sei, dann sei das Recycling schlichtweg noch nicht abgeschlossen. Die derzeitige Batterie-Richtlinie sei diesbezüglich sehr unscharf formuliert. Oftmals werde behauptet, dass eine 90%ige Recycling Quote erreicht werde, diese beziehe sich aber lediglich auf einzelne Prozessschritte und nicht auf den ganzen Prozess. Ein deutsches Unternehmen erzeuge z.B. Schwarzmasse, bei der der Recyclingprozess jedoch noch nicht beendet sei, denn damit könne noch nichts Neues produziert werden. Bei den sich anschließenden Prozessen der Metallgewinnung träten nämlich wiederum Verluste auf.

¹⁰ Die Definition der kritischen Rohstoffe der EU ist nicht deckungsgleich mit den hier angesprochenen kritischen Funktionsmaterialien für LIB.

Ein Stakeholder war der Meinung, dass die neue EU-Batterieverordnung die Entwicklung und Wirtschaftlichkeit des Recyclings von LIB auf dem europäischen Markt ermöglichen, Rechtssicherheit in diesem Bereich schaffen und die Entwicklung von Unternehmen sicherstellen werde. Unter dieser Voraussetzung sei es im Prinzip undenkbar, dass der Teil der Elektromobilität, der ca. die Hälfte der Wertschöpfung eines E-Autos ausmache, nicht wirtschaftlich recycelt werden könne. Wie viele Unternehmen welcher Größenordnung sich am europäischen Markt etablieren werden, sei hingegen eine offene Frage.

5.5 Eco-Design als Chance für eine effiziente Nutzung und Verwertung

Eco-Design von LIB beinhaltet Möglichkeiten für Design for Re-Use und Design for Recycling (DfR). Für beide Varianten ist eine zerstörungsfreie und weitestgehend automatisierte Demontage, also Design for Disassembly eine wichtige Voraussetzung. Die Batterien der ersten und der zweiten Generationen seien noch nicht „recyclingfreundlich“ gestaltet. Der Aufwand beim Zerlegen ist sehr hoch, da der Aufbau der LIB sehr stark variiert. Die Demontagetiefe sei derzeit mindestens die Modulebene. Ein Zugriff auf die einzelnen Zellen ist meist nicht möglich, da die Zellen miteinander verschweißt seien. Außerdem sei es auf Zellebene zu komplex und insgesamt zu zeitaufwendig. Eine Hochvolt-Fachkraft könne die Zerlegung bis auf Modulgröße vornehmen. Personal mit Erfahrung könne den Demontage-Prozess durchführen. Die Demontagezeit für ein großes Pack betrage 15 bis 45 Minuten, je nach Größe (50-500 kg) und Grad der Komplexität. Aufgrund der Vielfalt der Batterien sei keine Roboterunterstützung möglich (M9). Alles was nicht zum Modul gehöre (Kühlkanäle, Elektronik, Kabel, ...) werde entfernt. Demontierte Bauteile würden in Metalle, Elektronikschrott etc. getrennt. Eine weitere Zerlegung der Module finde derzeit nicht statt, da Module so sicherer für die weiteren Schritte (thermische Behandlung) seien.

Eine zerstörungsfreie Zerlegung sei weiters eine Voraussetzung, um defekte Bauteile austauschen zu können. Grundsätzlich sei eine Wiederverwendung der Kühlkörper möglich, wenn der Ein- und Ausbau einfach gestaltet sei. Es werden auch Versuche durchgeführt, um Kühlkörper immer wieder ein- und auszubauen. Einschränkungen gäbe es bei der Lebensdauer. Wenn das Gehäuse leicht zu öffnen sei, könne die Kühlflüssigkeit gut ausgeblasen werden und der Kühlkörper entfernt werden. Fokussiert würden derzeit Lösungen, die zerlegbar sind. Nichtsdestotrotz hänge die Gestaltung des Endproduktes vom Kunden ab. Daher sei es am Ende die Kundenentscheidung, die eine Rolle spiele.

Wesentlicher Punkt beim Design for Disassembly seien die Verbindungstechnologien. Hier sollen einheitliche Materialien verwendet werden oder gänzlich auf das Verkleben von Bauteilen verzichtet werden (verschraubt und nicht verklebt oder verschweißt). Das Design solle so gestaltet sein, dass die unterschiedlichen Teile gut voneinander lösbar seien z.B. durch Verschrauben und die Verbindungen (z.B. Schrauben) auch für die Demontage gut platziert werden (Demontagerichtung oben/unten; kein Drehen). Verbindung an schwer zugänglichen Stellen solle verhindert werden, sowie wenn die Batterie nur mit zerstörenden Methoden zu öffnen sei (M9). So werde die Arbeitszeit verringert und es entstünden saubere Nebenfraktionen (M9). Viele Wertstoffe fielen daher bei der Demontage an. Dies sei auch der Grund, dass viele OEMs selbst die Batterie zurücknehmen und dass eher nur die Module in der Recyclinganlage landen.

Eine Modulare Bauweise wäre positiv und solle forciert werden. Es solle eine einfache Rückgewinnung von Wertstoffen ermöglicht werden, indem die Verbindungen (z.B. Schrauben) für eine Demontae gut platziert sind. Dies schaffe Effizienz im Ablauf einer möglichst automatisierten Demontage. Wenn eine einfache Entfrachtung

von Flüssigkeiten sowie eine einfache Montage funktionieren, dann solle auch eine einfache Demontage funktionieren.

Design for Disassembly würde eine zerstörungsfreie und weitestgehend automatisierte Demontage ermöglichen und damit ökonomisch auch in Hochlohnländern realisierbar machen. Eine Demontage sei sinnvoll bei größeren Batterie-Packs, die unterschiedliche Bauteile (Gehäuse, Kabel, Elektronik, ...) verbaut haben, da diese einen anderen Recyclingweg gehen als die Zellen selbst.

Herausforderungen

Aus der Sicht der Batterie-Pack-Hersteller seien bis jetzt noch keine konkreten Anfragen oder Anforderungen seitens der Kunden bezüglich DfR gekommen. Auch das Interesse der Automobilhersteller daran sei gering und Design for Recycling werde noch nicht mitgedacht.

Je nach Applikation kommen unterschiedliche Zellkonfigurationen und Zellchemien zur Anwendung, daher sei auch ein standardisierter Zellaufbau nicht möglich. Welche Zellen in den Packs verbaut werden, ist jedoch oft nicht bekannt. Bei E-Bikes werden die Batterien teilweise im Rahmen eingebaut, da sei die Trennbarkeit bei der Sammlung nicht mehr gegeben.

Es gab schon Bemühungen zur Modularisierung von Batterien, jedoch sei man wieder davon abgekommen, da man sich nicht einschränken wolle. In der jetzigen dynamischen Innovationsphase sei es noch zu früh von Modularisierung zu sprechen. Vielleicht in etwa 10 Jahren, wenn Batterien in größeren Mengen hergestellt werden und jedes Auto die gleiche Technologie einsetzt, dann könne man über Modularisierung reden.

5.6 Die Bedeutung des Re-Use von EoL-LIB

Die Einschätzung der Stakeholder zu der Bedeutung des Second Life von LIB war uneinheitlich und überwiegend verhalten, was die industrienahen Stakeholder betrifft. Während einige Interviewpartner davon überzeugt sind, dass die Wiederverwendung von LIB hohe Bedeutung einnehmen könne und dessen Potenziale genutzt werden sollen, ordnen andere dem Re-Use eine eher untergeordnete Nischenrolle zu. Viele waren sich aber einig, dass Second Life für die Zukunft nicht ausgeschlossen sei. Der Marktanteil von Second-Life-LIB vor allem in stationären Anwendungen könne steigen. Second Life von LIB sei definitiv ein Thema, welches inspiriert, aber es sei generell noch zu früh, um wissenschaftliche Aussagen zum Thema State of Health und Sicherheit treffen zu können. Es stecke noch in den Kinderschuhen. Insgesamt werde aber der Anteil an Second-Life-Batterien aufgrund unterschiedlicher Aspekte eher gering ausfallen.

So müssten die Batterien getestet werden und sicher sein, bevor sie einem Re-Use zugeführt werden. Der Umbau und die Feststellung des SoH seien zeit- und damit kostenintensiv. BMS, Kühlsystem, Ladeinfrastruktur, all dies müsse zusammenspielen. Technisch mache die Wiederverwendung vor allem von Traktionsbatterien Sinn. Das Potenzial zur weiteren Nutzung von Traktionsbatterien scheint auch aufgrund der Masse und dem damit verbundenen Wert ökologisch und ökonomisch möglich. Die größten Herausforderungen seien aber die Feststellung und Bewertung der Restkapazität (vor allem des State of Health), den SoH im laufenden Betrieb zu bestimmen, sei nicht das Problem, vielmehr sei es schwierig den SoH nach der Nutzung zu bestimmen. Hier gäbe es großen Forschungsbedarf. Alterungsmodelle hätten keinen stetigen Verlauf („irregular cell death“ oder auch „sudden death“ Mechanismen). Zellen sind derzeit für eine Lebensdauer von bis zu 30 % Kapazitätsverlust

getestet und freigegeben. Fragen zur Sicherheit, Garantie, Produkthaftung und Übertragung der Recyclingpflicht müssten geklärt werden. Angesichts der großen Bandbreite an unterschiedlicher Zellchemie sei es keine einfache Aufgabe, ein entsprechendes Risikomanagement zu etablieren. Damit ergeben sich hohe Risiken für Verreiber von Second Life-Batterien (Kostenrisiko, volatile Batteriepreisentwicklung, niedrige Zahlungsbereitschaft durch geringe Akzeptanz für gebrauchte Produkte) und auch für den Nutzer/Endkunden (Sicherheit, Qualität, Garantie, Performance, Kosten, Updatefähigkeit der Software, Restnutzungsdauer).

Die Interviewpartner sind sich jedoch einig: Solange die Batteriekosten weiter sinken und die Kosten für die Vorbereitung zur Wiederverwendung von Batterien so hoch sind, mache Second Life ökonomisch betrachtet, wenig Sinn. Der Preis einer Second Life-Batterie müsse unter dem Preis einer Primär-Batterie liegen. Neue Batterien werden aber nach einer Regelnutzungsdauer der LIB von ca. zehn Jahren preisgünstiger sein. Dies sei für das Etablieren von Second Life-Anwendungen zu berücksichtigen. Hinzu komme, dass Batterien sehr vielfältig und komplex sind, was eine industrielle Perspektive im Bezug einer Aufbereitung für eine Wiederverwendung erschwere. Dass es derzeit keine automatisierte Demontage gebe, sei auf zu wenig standardisierte Batteriesysteme zurück zu führen. Wenn Second Life angewendet werden solle, dann müsse gefördert werden bzw. bedürfe es Anreize seitens der Politik.

Einen gewissen Markt für Second-Life Anwendungen sehen manche Stakeholder in der Verwendung von Batterieersatzteilen (Modulen) aus Altbatterien zur Ertüchtigung von gebrauchten Altbatterien (Refurbishment). Wenn jemand ein zehn Jahre altes E-Auto habe, brauche er vermutlich keine nagelneue Batterie mehr und werde sich mit einer aufbereiteten Batterie zufriedengeben. Dies stelle aber kein riesiges Marktpotenzial dar.

Logistikunternehmen eignen sich gut als **Quelle** für Second-Life-Batterien, da jene Unternehmen regelmäßig und in großen Zahlen ihre Wagenflotten austauschten. Andererseits seien aber gerade Batterien aus den LKW stark beansprucht und möglicherweise nicht mehr geeignet für ein Second-Life. Der Nachteil bei Batterien aus PKW sei wiederum, dass sie bei der Wiederverwendung bereits ein Alter von vielleicht zehn Jahren aufweisen und daher mit der Technologie immer nachhinken würden im Vergleich zu neuen Batterien.

Größte Chance von **Second-Life-Anwendungen** böten Haushaltsanwendungen in Kombination mit eigener PV-Anlage. Bei einem Einsatz als Speicher im Haushaltsbereich könne auch ein gewissen Kapazitätsverlust in Kauf genommen werden, da die Speicherkapazität für ein Einfamilienhaus meist geringer sei. Es müsse aber nicht automatisch sinnvoll sein, weil für stationäre Anwendungen ein anderes technisches Anforderungsprofil als für mobile Anwendungen vorliege, u.a. in Bezug auf die Größe. So müsse die Batterie aufbereitet und dann vergrößert werden, dann gebe es vielleicht eine Möglichkeit, Altabatterien als Energiespeicher zu verwenden. Für stationäre Anwendungen werden i.d.R. jedoch Lithium-Eisenphosphat Akkus verwendet. Da Lithium-Eisenphosphat Akkus generell günstiger produziert werden, sei es fraglich, ob der Kostenvorteil von Second-Life LIB für den stationären Markt gegeben sei.

Ein Stakeholder war der Auffassung, dass es am nachhaltigsten sei, das Auto so lange wie irgend möglich zu fahren und somit die LIB für den Automobilbereich zu verwenden.

Die Vertreter aus der Recyclingindustrie äußerten sich skeptisch bezüglich des hohen Kobaltgehaltes von NMC-Batterien, der im Laufe der Zeit abnehmen werde. Die Frage sei, ob ein Re-Use dieser Batterien sinnvoll sei, weil damit der hohe Kobaltanteil der Altbatterien blockiert und die Produktion mehrerer neuer Batterien auf Basis des Kobaltgehalts einer Altbatterie blockiert werde.

Sollten sinnvolle Nischen für ein Second Life von LIB definiert werden können, bestehe immer noch die Frage, wie man die Second-Life Batterien verfügbar mache. Viele große Fahrzeughersteller (Renault, BMW, VW) betreiben Forschungsprojekte zum Thema Re-Use und Second-Life, um Erfahrungen zu gewinnen (z.B. VW Mobile Ladesäulen, Renault-Mobility House Batteriekraftwerke). Viele Artikel dazu befänden sich unter www.electrive.net. Auch Stromkonzerne beteiligen sich oder leiten Second-Life-Projekte. Andere Hersteller setzen Second-Life-Projekte bereits im großen Stil um, wie z.B. Renault. Da Renault sehr viele Batterien im Miet-System habe, würden viele Wiederverwendungswege geschaffen. Renault nutze LIB etwa 8 bis 10 Jahre in der Mobilität und weitere 10 Jahre als Pufferspeicher. Second-Life-Anwendung von Renault seien die Wasserstraße in Paris, Fossile Free Islands oder Batteriespeicherkraftwerke in FR und DE (mit Mobility House). Renault habe weiters ein Tochterunternehmen Renault MAI (mobility as an Industry), wo ausrangierte LIB retourniert, in intelligente Packs verbaut und mit Wechselrichter versehen würden und in verschiedenen Anwendungen Einsatz fänden (z.B. Schulen und Kindergärten mit Pufferspeicher sowie Kraftwerken).

Bei den ersten Versuchen, die heute gemacht werden (z.B. bei Remondis, Mercedes, BMW), werden die Batterien aus Testflotten entnommen. EoL-Batterien würden mit dem Auto jedoch an Zweit- und Drittnutzer weiterverkauft und landeten schlussendlich bei Autoverwertern. Die Nutzer seien zugleich auch Eigentümer der Batterien, so dass sich die Batterien dem Zugriff der Hersteller entziehen. Autoverwerter wiederum haben i.d.R. wenig Kenntnis von der Batteriechemie und könnten die Daten nicht auslesen. Die Batteriehersteller wollten diesen auch keinen Zugriff auf die Life-Cycle-Daten der Batterien gewähren, die man brauche, um eine sinnvolle Second-Life Anwendung bestimmen zu können. Autoverwerter würden sich mit einer riesigen Sammlung verschiedenartigster Batterien konfrontiert sehen und diese könne man nicht ohne weiteres zusammen schalten. Das berge ein gewisses Gefahrenpotenzial.

Solle also ein Second-Life etabliert werden, dann müssten auch **neue Geschäftsmodelle** aufgesetzt werden z.B. Product-Service Systems, bei denen Auto- oder Batteriehersteller das Eigentum an den Batterien behalten (wie z.B. bei Renault über Leasing Modelle geschehen) und auch gesetzliche Anreize geschaffen werden, um die Bedeutung an Re-Use für LIB zu erhöhen, sonst bleibe das Second Life ein Nischengeschäft für Bastler. Wenn man Second Life möchte, dann müsse man auch gefördert werden. Weiters könnten gesetzliche Anreize die Bedeutung von Re-Use für LIB nochmals steigern. Außerdem brauche es bewusstseinsbildende Maßnahmen, um die Vorteile von Second-Life-Batterien gegenüber neuen Batterien (Ressourcenschonung und Klimaschutz) aufzuzeigen. OEMs sollten unkritische Daten insbesondere zur Bestimmung des SoH der Batterien und zum Nutzungsverhalten sammeln und bereitstellen, um die restliche Lebensdauer besser abschätzen zu können. Zusätzlich müssten Schnelltests für die Alterungsmessung entwickelt werden

Es brauche intensive Forschung zur technischen Umsetzbarkeit im großen Stil in Verbindung mit einer Kostenreduktion und eine Errichtung geeigneter Vertriebslinien/Komplettsystemanbieter inkl. Elektroinstallationsbetriebe, die Second-Life-Batterien dem Endkunden anbieten; oder ebenfalls möglich wäre eine Errichtung eines Second-Life-Batterie-Pools in Österreich, um den Vertrieb zu erleichtern. OEMs könnten gebrauchte Batterien in gutem Zustand zu günstigerem Preis erneut anbieten und damit ein großes Angebot an Second Life-Batterien schaffen. Allenfalls brauche es eine rechtlich bindende Festlegung für die Übernahme der Garantie und Haftung von aufbereiteten Batterien/Produkten.

Geringe Chance für das Second Life von Gerätebatterien

Ein Second Life von Gerätebatterien aus dem Haushaltsbereich wurde unter den Interviewpartnern als eher weniger sinnvoll eingestuft. Zum einen herrscht eine zu große Vielfalt nach Form und Zellchemie, zum anderen

sei der Aufwand zur Aufbereitung zu groß. Ebenso ist das Potenzial zum Refurbishment von Gerätebatterien gering, da die vergleichsweise kleinen Batterien nur mit großem Aufwand und dadurch ökonomisch kaum tragbar aufbereitet werden können. Eine generell technische Wiederverwendung schiene aber möglich.

Die Wiederverwendung von Gerätebatterien erfolge derzeit nahezu ausschließlich in verbauten Zustand für Laptops und Handys. In Betrieben wie AFB Wien, DRW Wien, rwsanderskompetent in Salzburg, Reintegra Craftjobs werden Laptops, meist vom Businessbereich, einer Wiederverwendung zugeführt, da sie generell eine höhere Qualität und eine längere Lebensdauer haben, jedoch meist sehr früh aussortiert würden (z.B. wenn die Abschreibungsdauer erreicht ist).

Mobiltelefone werden über die Caritas (Ö3-Wundertüte) gesammelt und werden eher exportiert, da der Markt in Österreich für SecondHand-Mobiltelefone zu klein sei im Vergleich zu den Mengen, die gesammelt werden (S8). Ein Problemfeld gäbe es allerdings hier, da immer wieder Geräte gesammelt werden, deren Akkus nicht mehr entnehmbar seien. Dieses sei aber für den Transport notwendig. Jene Handys, deren Akku nicht mehr entnehmbar sind, seien daher für die Wiederverwendung nur bedingt nutzbar, da dann der Transportaufwand erhöht sei (entweder teurer oder bedingt bei Abfallstatus die Erfordernis einer Notifizierung als gefährlicher Abfall).

Akku-betriebene Werkzeuge oder andere Haushaltsgeräte würden nicht mehr für eine Vorbereitung zur Wiederverwendung verwendet, sobald diese entsorgt werden, da anzunehmen sei, dass die Restkapazität des Akkus schon sehr schwach sei. Auszuschließen sei es aber nicht (S8), dass es hier kein Re-Use-Potenzial mehr gäbe. Aber ein Funktionstest bzw. Sicherheitstest zahle sich nur aus, wenn große und regelmäßige Mengenströme zusammen kämen. Anzudenken wäre, dass dies direkt bei Entsorgungsfachbetrieben umgesetzt werden könne. Hier wäre es vielleicht wirtschaftlich möglich, derartige Funktionstests zu machen, um auch das letzte Potenzial an Wiederverwendung herausholen zu können nach dem Motto: „No Recycling without Reusability-Check!“. Hier brauche es allerdings noch eine Trendwende, denn Re-Use sei derzeit eher ein „Nice to have“, wobei der Entscheidungsbaum klar nach der Abfallhierarchie mit der obersten Priorität des Re-Use sein sollte. Auch hier seien Wirtschaftlichkeits-Überlegungen noch zu sehr ausgeprägt und Ausgleichsfinanzierung seitens Politik oder Systemen noch zu wenig vertreten.

Eine Wiederverwendung von Gerätebatterien in größeren Batteriespeichersystemen sei nicht vorstellbar, auch nicht mittelfristig. Auch Batterien aus E-Bikes hält er für ungeeignet für die Wiederverwendung, da hier in den letzten 10 Jahren viele unterschiedliche zum Teil minderwertige Batterien eingesetzt wurden, die von den Nutzern auch nicht gut gewartet wurden. Nutzer von Elektroautos betreiben ihre Fahrzeuge und damit auch die Batterie regelmäßiger als Nutzer von E-Bikes.

Ein Austausch der genutzten Akkumulatoren für E-Bikes erfolge generell nur für Akkus, die selbst vertrieben wurden. Jedoch sei der Aufwand sehr hoch. Manche Hersteller verwenden aber auch Batteriepacks, die „kaputt“ werden, wenn die Batterie vom BMS getrennt wird. Das heißt die Demontage und damit die Vorbereitung der Wiederverwendung werde noch aufwendiger.

5.7 Standortfaktoren für LIB Recyclinganlagen

Der überwiegende Teil der Stakeholder aus der eher wirtschaftlich orientierten Befragung war der Meinung, dass ein vollständiges (End)Recycling von LIB in Österreich nicht profitabel sei, dass es vielmehr sinnvoll sei,

die Kräfte und Kompetenzen europaweit zu bündeln, d.h. auf europäischer Ebene zu kooperieren, um ein vollständiges Recycling von LIB perspektivisch auch ökonomisch darstellbar zu machen. Allerdings habe Österreich gewisse Standortvorteile für Teile der Recycling-Wertschöpfungskette. Es seien viele erfolgreiche österreichische Unternehmen in der Kreislaufwirtschaft tätig, wie z.B. Saubermacher, das auch an der Redux-Anlage in Norddeutschland beteiligt sei. Hier werden wichtige Kräfte und Kompetenzen gebündelt. Die Frage sei, was ein kleines offenes Land wie Österreich innerhalb eines europäischen Systems leisten könne und wo eine sinnvolle Zusammenarbeit mit den Nachbarn gegeben sei. Die Frage der Rentabilität sei in erster Linie eine Frage der Anlagengröße. Im Bereich der Metallurgie seien die Investitionen in die Anlagen sehr hoch, so dass man hohe Durchsätze brauche, um diese ökonomisch darstellbar zu machen. Das sei dann der Bereich, den man auf jeden Fall europäisch denken müsse und in dem sich ohnehin europäische Konsortien bildeten, die verschiedene Abschnitte der gesamten Prozesskette abbildeten. Es könne nicht jedes Land eine eigene (End)Recyclinganlage betreiben. Diese müssten vielmehr strategisch und industrienah geplant werden. In Österreich gebe es Potenzial in der Demontage und die Frage sei, wo diese Demontagezentren unter logistischen Gesichtspunkten am besten errichtet werden sollten. Dies sei eine typische unternehmerische Herausforderung, die im Verbund mit interessierten Landesbehörden angegangen werden könne. Hier habe Österreich durch seine geostrategische Lage ökonomische Vorteile (Nähe zu Italien, Tschechien, Slowakei und den osteuropäischen Ländern). Als Vorteile im Bereich der Logistik wurden die zentrale Lage in Europa sowie die vorhandenen Bahnanschlüsse und Wassertransportwege angeführt, die man aufgrund der großen Massen, die bewegt werden müssten, brauche. Die Nähe zu Deutschland als Automobilland spiele eine Rolle.

Ein weiterer Standortvorteil sei die Verfügbarkeit regenerativer Energien, also der österreichische Strommix. Da der Druck wachse, CO₂-arm zu produzieren und zu recyceln, könnten energieintensive Prozesse gut in Österreich durchgeführt werden. Als ein Industriebeispiel wurde die Firma Northvolt genannt, die sich im Norden von Europa angesiedelt habe, um dort CO₂-arm produzieren zu können.

Es wurde weiters hervorgehoben, dass Österreich ein Hochtechnologieland sei und sich historisch in der Umwelttechnik sehr gut positioniert habe. Zudem gebe es erfolgreiche Unternehmen im Recyclingsektor und mit Samsung Battery in Graz auch Batteriekompetenz im Land. Es sei gut vorstellbar, dass bei einem gelungenen Mix aus Förderangebot und politischen Rahmenbedingungen ein Unternehmensumfeld entstehen und wachsen könne und somit Teile der Recyclingwertschöpfungskette für LIB in Österreich entstehen lasse. Das Recycling biete Potenziale im Bereich Hochtechnologieanwendungen, komplexe Verfahren sowie Nischenanwendungen, die Österreich ergreifen könne. Das gelte ebenso für den Re-Use-Bereich.

Ein anderer Stakeholder war der Auffassung die Entwicklung gehe dahin, das Recycling und die Sekundärrohstoffproduktion so nah wie möglich bei den großen Autoproduzenten und Verwertern der Materialien anzusiedeln. Die Standorte für Recyclinganlagen seien daher im wesentlichen Nord-Frankreich, Belgien, die Niederlande, Deutschland und auch Polen sowie Schweden (Northvolt) und Norwegen. Allerdings bewahre die Industrie Stillschweigen über die Standortpläne für Recyclinganlagen. Es scheine so zu sein, dass der produzierende Bereich und das Recycling sich in Regionen konzentrieren werden, in denen ein großer Absatzmarkt vorliege und in denen die E-Fahrzeuge als erstes in den Markt ausgerollt werden. Gleichwohl sei klar, dass dies ein europäischer Markt sein werde. Daher werden sich unterschiedliche Teile der Wertschöpfungskette in unterschiedlichen europäischen Ländern ansiedeln und jedes europäische Land sei damit beschäftigt zu schauen, welcher Teil der Wertschöpfungskette in welchem Land die größten wirtschaftlichen Chancen berge. Die Kosten des Transports und der CO₂-Emissionen der Produktion werden dabei eine entscheidende Rolle spielen ebenso

wie die Dimension der Skaleneffekte des Recyclings. Daher werde es wohl nationale, regionale Zentren für die Demontage geben und eine europäische Anlage für das metallurgische Recycling.

5.8 Wirtschaftspolitische Instrumente und Rahmenbedingungen für ein wettbewerbsfähiges Recycling

Das erhöhte Aufkommen an Altbatterien in der EU bietet auch die Chance durch ein nachhaltiges Recycling die Rohstoffversorgung zu sichern und klimaschonend zu agieren. Positive Effekte seien die Verringerung der Importabhängigkeit, die Milderung von Preisschwankungen, eine Steigerung der Wertschöpfung und Beschäftigung sowie eine Reduktion der Primärextraktion verbundenen negativen Umweltauswirkungen.

Es sei sinnvoll, wie jetzt mit der neuen EU-Batterie Verordnung anvisiert werde, Vorgaben für Recyclingquoten für kritische Elemente bzw. Funktionsmaterialien vorzugeben, die z.B. einen hohen CO₂-Fußabdruck haben oder anderweitig umweltschädlich oder kritisch im Sinne von knapp seien. Es sei wichtig, dass man von unspezifischen massenbezogenen Recyclingquoten wie bisher gesetzt wegkomme. Die neue EU-Batterie Verordnung gehe daher in die richtige Richtung.

Öko-Design Standards seien generell zu begrüßen, allerdings sei es fraglich, ob sie relevant seien, da man beobachten könne, dass die neueren Batteriegenerationen ohnehin relativ recycling-gerecht konstruiert seien. Die Hersteller haben gerade deshalb, weil sie für die Kosten des Recyclings verantwortlich seien, ein Eigeninteresse daran, dass die Produkte gut recycelbar seien. Denn wenn die Batterien nicht vernünftig demontierbar seien und jemand müsse die Batterie aufwendig zerlegen, wären das Kosten, an denen niemand Interesse habe.

Ein Stakeholder gab zu bedenken, dass es wichtig sei, dass man die Industrie nicht mit zu schnellen und überambitionierten Regulierungsmaßnahmen schockiere, die sie dann nicht erfüllen könne, was ja teilweise schon der Fall sei („...davor habe die Industrie am meisten Angst“), sondern dass man mit ihnen gemeinsam den Weg beschreite und etwa einen Weg für die nächsten fünf Jahre aufzeige. Die Industrie habe aufgrund der starken Konkurrenz schon erkannt, dass sie etwas machen müsse, aber sie habe die Sorge, dass zu strikte Regularien eher den asiatischen oder amerikanischen Markt stärken und die Industrie im eigenen Land schwächen werde.

CO₂-Steuern wurden als Schlüssel in der Klimaproblematik bezeichnet, spielten aber bei der Einschätzung der Stakeholder zu den wirtschaftspolitischen Rahmenbedingungen für das Recycling von LIB ebenso wie Ressourcensteuern keine wesentliche Rolle. Vielmehr wurde generell die zentrale Bedeutung von Verordnungen, Vorgaben und Quoten betont. Lücken gebe es im Bereich der Eco-Design Vorgaben für LIB, das letztlich zentral für das Recycling sei. Ein Stakeholder war der Auffassung, dass Eco-Design Vorgaben auch maßgeblich in die Zulassung von Batterien einfließen sollten.

Befragt zu der Rolle von Sekundärrohstoffpreisen für ein wettbewerbsfähiges Recycling, bemerkte ein Stakeholder, dass der Sekundärmaterialprozess – zumindest sobald das Batteriesystem demontiert sei – schon jetzt preisgünstiger sei als der Primärmaterialprozess und dass das Recycling von LIB daher wirtschaftlich ein gutes Potenzial biete. Die Herausforderung sei derzeit der Aufwand bei der Demontage, die noch wenig automatisiert sei und in der noch viele Kosten steckten. Wenn man das besser hinbekomme, sei schon per se die Wirtschaftlichkeit höher als das beim Einsatz von Primärmaterialien. Hier gebe es aber noch große Fragezeichen. Darüber hinaus würden aber die EU Battery Directive und entsprechende nationale Verordnungen auch dafür sorgen, dass die hohen Rückfuhr- bzw. Recyclingquoten gesetzlich vorgeschrieben seien, auch wenn es dadurch teurer

werde. Irgendwann werden auch die natürlichen Ressourcen knapper und die Materialpreise steigen, daher werde sich die Preisdifferenz ohnehin nivellieren. Wenn es wie heute teilweise noch teurer sei, weil die Massen-Recyclingwege noch nicht so erschlossen seien, dann sei eher die Frage, wer das Recycling bezahle. Daher gebe es durchaus die Vorschriften, dass die Fahrzeughersteller verpflichtet seien, die LIB wieder zurückzunehmen (Produzentenverantwortung).

5.9 Forschung & Entwicklung

Förderungen für R&D-Modellvorhaben bzw. für die R&D-Infrastruktur wurden in der ersten Phase der Implementierung einer Recyclingkette am wichtigsten erachtet, um das Know-How aufzubauen und voranzutreiben und um Pilotanlagen zu etablieren, in denen ordentlich geforscht werden könne, in Österreich z.B. in Leoben. Zu überlegen sei, inwieweit das im Schulterschluss mit der Industrie erfolgen solle. Es wurde beispielhaft auf eine spezielle Unternehmensform eines Industrieclusters in der pharmazeutischen Industrie in Österreich verwiesen, nämlich das Research Center Pharmaceutical Engineering GmbH (RCPE), das halb industriell, halb wissenschaftlich agiere. So ein Format mit einer engen industriell-wissenschaftlichen Kooperation, mit dem auch Förderungsanträge bei der Regierung gestellt werden können, sei, wenn man das für das Recycling aufbauen würde, wertvoll.

Ein deutscher Interview-Partner gab zu Protokoll, dass in Deutschland in den letzten 10 Jahren durchgängig und weithin gefördert wurde. Es gab Lob für die deutsche Industriepolitik in diesem Bereich, denn man habe vor dem großen Rücklauf von LIB gefördert. Es waren sehr erfolgreiche und sinnvolle Programme dabei, die zu einem großen Teil Eingang in die industrielle Praxis fanden, wie z.B. Projekte bei Duesenfeld, verschiedene Projekte der RWT Aachen und Accurec, Umicore Projekte etc. Das Modell von Verbundforschungsvorhaben aus Universitäten und Industrie sei ein gutes Modell, weil die Forschung an den Universitäten mit den industriellen Realitäten gekoppelt werde. Über diese Schiene werde entsprechend Nachwuchs ausgebildet anhand von Promotionen, Master- und Bachelorarbeiten. Letztlich finden diese Erkenntnisse Eingang in die Lehre in diesen Bereichen. Eine weitere Förderung sei durchaus sinnvoll, gerade bezüglich der zukünftigen Batteriegenerationen, weil sich LIB stark verändern werden.

Ein Stakeholder gab zu Protokoll, dass er in Österreich ein gut aufgesetztes Fördersystem sehe, mit Unternehmensförderungen als auch kooperativen Projekten mit Universitäten. Es gebe FFG Basisprogramme, in denen eher Single-Firm Projekte gefördert werden und es gebe Investitions-Umweltförderungen. Alle diese Förder-schienen seien wichtig. Vielleicht gebe es noch einen zu geringen Schwerpunkt im Bereich Batterien, das könne noch mit Expert*innen diskutiert werden.

Ein Stakeholder erklärt, dass es schwierig sein, Know-How Träger im Bereich der LIB-Technologie in Österreich zu rekrutieren. Österreich sei zwar ein Innovationsland, aus der Industrie vernehme man jedoch, dass es Probleme gebe, Fachkräfte im Bereich LIB zu rekrutieren. Arbeitskräfte mit Wissen im Bereich LIB gebe es fast gar nicht und wenn, werde das Wissen vor Ort aufgebaut. Auch die Unis, FHs und Lehrberufe seien nicht für den LIB Bereich ausgelegt, der Lehrplan wurde noch nicht spezifisch auf Batterien angepasst.

Know-How im Bereich LIB sowie allgemein das Wissen im Umgang mit Hoch-Volt-Batterien sei ein großes Thema. Es wurde das Beispiel eines Tesla, zitiert, der gebrannt habe und niemand habe gewusst, wie damit umzugehen sei. Es wurde darauf verwiesen, dass insbesondere auch die KFZ-Werkstätten dieses Wissen brauchen, um in Zukunft fachgerecht mit den LIB der Elektromobilität umgehen zu können. Das Wissen um den

Umgang mit LIB müsse breiter gestreut werden und dürfe nicht bei den Autoproduzenten und OEMs konzentriert werden.

Die Wiederaufbereitung von „guten“ Zellen zu neuen Batteriepacks sei technisch möglich. Ob Zellen ausgetauscht werden können, hänge sehr stark von den Rahmenbedingungen ab und auch wie die Kombination zwischen alten und neuen Zellen aussehen kann (beispielsweise könnten Second-Life-Zellen geladen und genutzt werden und erst für Spitzenlasten könnten die neuen Zellen anspringen). Aber dies sei alles noch Gegenstand der Forschung.

5.10 Internationale Konkurrenz als Innovationstreiber

Wie bereits in der Einleitung angeführt, sind die meisten Zellproduzenten im asiatischen oder amerikanischen Raum angesiedelt. Eine Produktion in Europa sei aus Sicht von einigen Stakeholdern daher nur mit asiatischen Partnern vorstellbar. Die Zellherstellung in Europa sei kaum konkurrenzfähig. Es bedürfe einerseits eines riesigen Investments. Andererseits sei man durch fehlendes Fertigungs-Know-how und die sinkenden Zellpreise kaum konkurrenzfähig. Dennoch kommen in den Medien immer öfter Berichte über große Unternehmen, die eine Zellproduktion in Europa forcieren möchten. In Europa und auch Österreich seien aber bereits viele Produzenten von LIB-Packs aktiv. Es werden Packs oder Module sowohl für kleine Geräte als auch für Anwendungen im Transport bis hin zu stationären Speicherlösungen hergestellt.

Ein Stakeholder äußerte Meinung, dass die internationale Konkurrenz im Bereich der E-Mobilität ein wichtiger Treiber von Innovation und Wettbewerbsfähigkeit sei. Der amerikanische Autobauer Tesla, der bei der Wertschöpfung des Autos alles abdecke, sei ein solcher Innovationstreiber („Ohne Tesla hätten wir jetzt möglicherweise noch nicht einmal das Thema Elektromobilität auf dem Tisch“). Tesla gehe durch die Veröffentlichung aller Patente auch andere Wege als beispielsweise BMW und Volkswagen und sei daher nicht als Konkurrent einzustufen. Es gebe auch genügend Nachfrage, die gar nicht von einem Unternehmen allein befriedigt werden könne. Von Asien könne man ebenfalls lernen, denn Asien habe jetzt die Probleme, die wir in 10 Jahren haben werden. Die Konkurrenz aus Asien und Amerika sei stark und würde Europa dazu bringen, die E-Mobilität einschließlich aller Recyclingstrategien jetzt auf Schiene zu bringen und loszulegen. In Europa werde schon seit 10 Jahren über die Elektromobilität gesprochen. „Wenn man ehrlich ist, hat sich in Deutschland und Österreich in dem Bereich fast nichts getan“.

5.11 Einschätzung der zukünftigen Entwicklungen

Mehrere Interviewte sind sich einig, dass der **LIB-Markt** weiter stark wachsen werde. Im Bereich der Stromnetze seien zukünftig Speicher notwendig, um das Netz stabil zu halten. Auch der Einsatz als Batteriespeicher in „Energy communities“ gewinne immer mehr an Bedeutung. Die Lithium-Ionen-Technologie sei dort technisch wirtschaftlich die spannendste Allround-Technologie. Die Mengen werden zudem davon abhängen, wie die E-Mobilität umgesetzt wird. Dies hänge von der Politik ab, wie die E-Mobilität gefördert wird und welche Maßnahmen gesetzt werden. Derzeit sei der Wunsch der Politik größer als es die Realität darstellt.

In der **Zellproduktion** aber auch bei den Batteriesystemen werde viel geforscht. Wohin sich die Technologie entwickeln werde, ist ungewiss. So wird derzeit mehr Nickel und weniger Kobalt eingesetzt. Hersteller seien offen für die nächste Generation an Batterien, wie z.B. die Solid State Batterie, die in vier bis fünf Jahren zur

Industriereife gelangen soll und weiter zu einer Lithium-Luft-Batterie, die aber frühestens in zehn bis 15 Jahren zu Produktion gelangt oder auch Lithium-Schwefel braucht noch. In den nächsten 10 Jahren wird aber LIB der dominierende Typ bleiben.

Es komme aber auf die Anwendung an wie zum Beispiel der Ladeleistung und Ladegeschwindigkeit sowie des Ladezustands. Dies sei bei NMC gut möglich, jedoch bei anderen Technologien wie LFP nicht. Im Moment ginge der Trend auch zum Schnellladen, welcher nicht unbedingt positiv im Bezug auf den Umweltaspekt sei. Wie weit man das Schnellladen brauchen werden, sei auch noch ungewiss.

Die Nennspannung der Zellen werde sich nicht ändern, aber die Leistungsanforderungen bei 48 V steigen. Bei EV-Packs werden die Zellformate größer, Kapazitäten größer 120 Ah und des weiteren seien Rundzellen ein Trend für BEV-Systeme um die Sicherheitsperformance eher erreichen zu können.

Die Forschung sei auch daran, die Chemie der Zellen zu verbessern. So soll in den nächsten Jahren die Feststoffzelle (Solid State LIB) kommen. Noch weiter in der Zukunft – erst in 10 bis 15 Jahren, wenn überhaupt – soll die Lithium-Luft-Batterie auf den Markt gebracht werden. Interessant werde es aber erst, wenn es nennenswerte Mengen gibt.

Versucht werde auch, Graphit mit Silizium zu ersetzen. Silizium habe aber den Nachteil, dass es sich ausdehnt. Diesbezüglich sei die Hoffnung, dass sich die Rundzelle durchsetzt, da sie eine stabilere Bauform hat. Durch die verbesserte Performanz der Zellen solle es möglich sein, dass Batterien ein ganzes Autoleben halten, nicht wie man früher gesagt hat, dass man eine zweite Batterie brauche.

Fokus bei der Entwicklung der LIB-Zellen sei vor allem die Reduktion des Kobaltgehaltes. Uneinigkeit herrscht bei der zukünftigen Prognose über die Verwendung von LFP-LIB in Europa. Einerseits wird den LFP-Batterien nur wenig Bedeutung zugesprochen und andererseits, dass sie mehr in Einsatz kommen werden.

Noch sei unklar, wie sich der Markt für **wasserstoff-betriebenen Fahrzeugen** entwickelt. Derzeit gibt es nur sehr wenige Anwendungen mit Wasserstoff im Verkehrssektor. Nach Einschätzung mehrerer Interviewpartner wird auch in naher Zukunft zumindest im PKW-Bereich kein Wasserstoff eingesetzt. Aus dem simplen Grund, da die Infrastruktur nicht vorhanden ist und heutzutage der Zugang zu Strom und damit auch die Möglichkeit, ein Auto zu laden, nahezu überall gegeben ist. Wasserstoff benötige eine komplexere Infrastruktur. Das Elektroauto habe das Wasserstoff-Auto bereits überholt. Als Alternativsysteme sei Wasserstoff definitiv Thema, die Anwendung jedoch noch offen. Wenn der Wasserstoff aus Erdgas kommt, dann könne Wasserstoff definitiv zum Thema werden, weil es dann billiger sei. Dies sei jedoch keine saubere Lösung/grüne Alternative.

Anders sehe es bei Langstrecken und hier vor allem im Transitverkehr aus, da Wasserstoff betriebene Fahrzeuge eine größere Reichweite haben. Aber sollte Tesla, wie angekündigt, mit der Produktion 2021 mit 800 km Reichweite aufwarten, gäbe es keinen großen Mehrwert mehr für Wasserstoff betriebene Fahrzeuge. Jedoch um nicht aufs falsche Pferd zu setzen, müsse dieser Bereich genau beobachtet werden.

Eine Herausforderung im **Schwerverkehr** sei Batterien innerhalb einer Lenkpause wieder vollständig aufladen zu können. Zum Beispiel müssten 740 kWh in 30 bis 45 Minuten geliefert werden können. Daran wird zurzeit gearbeitet.

Um den Schwerverkehr CO₂-frei zu gestalten, seien „Electric Road Systems“ (mittels Oberleitung oder auch Schienen gebunden) die effizienteste und ökonomischste Lösung. Fahrzeugtechnisch sei dies nicht sehr komplex, allerdings sei es eine Organisationsfrage, wie dies europaweit umgesetzt werden könnte. Falls es sich etablieren sollte, dann wäre die Folge davon, dass nur kleine Batterien (von Hub zu Hub) im Schwerverkehr eingesetzt werden.

Herausforderung bei der Verwendung von **LIB in Speichersystemen** sei, dass es im Gegensatz zur Verwendung in der Elektromobilität unterschiedliche Anforderungen gäbe. Für größere Batteriespeichersysteme brauche es eine Software (Energie-Management-System) welche eine detaillierte Datenanalyse und Energiewerte angibt und je nach Anwendungsfall unterschiedlich programmiert wird.

Planungsrisiko ergebe sich durch die ungewisse Degradation der Leistung und Kapazität von Batterien nach etwa 10 Jahren. Es brauche eine vertraglich definierte Leistung und Kapazität (SoH), um die Betriebsführung und Optimierung bei Batteriespeicherkraftwerken zu ermöglichen. Meistens seien 4.000 Vollzyklen auf zehn Jahre der Benchmark. Das hieße aber nicht, dass die Batterie im 11. Jahr kaputt ist. Die Kapazität könne danach sinken, jedoch wie schnell sie sinkt, sei ungewiss. Es gäbe dazu noch keine Erfahrungswerte. Diese wären jedoch notwendig, um eine Planungssicherheit über den Benchmark hinaus zu gewährleisten.

Batteriespeicher im industriellen Umfeld seien in Österreich nicht im Vordergrund, da derzeit kein Anreiz für Industrien bestehe. In Deutschland beispielsweise gäbe es starke ‚Incentives‘ für die Nutzung von Zwischenspeichern in Form von Netzentgelten (vgl. individuelles und vermiedenes Nutzentgelt in der Stromnetzentgelt-VO). So ein derartiges Regulatorium gäbe es in Österreich nicht. Auch der Strompreis sei in Österreich günstiger als in Deutschland, welches wiederum den Nutzen für die Zwischenspeicherung abschwächt.

Viele **KFZ-Händler und Werkstätten** seien noch auf Verbrennungsmotoren ausgelegt. Es sei viel Bewusstseinsarbeit bei den Händlern notwendig, um weiterhin dem Kunden ein gutes Händlernetz anbieten zu können. Problematisch sei es, wenn es keine Händler-Strukturen gäbe (Stichwort: Online-Handel) und der österreichische Kunde keinen Support vor Ort habe. Dies könne auch die Problematik der Verbringung von E-Fahrzeugen ins Ausland verstärken. Es sei schwer abzuschätzen, ob alte Elektrofahrzeuge in Österreich anfallen. Es sei auch möglich, dass das Fahrzeug beim OEM im Ausland (Herstellerland) lande. Zusätzlich sei die Frage, ob die Batterie ausgetauscht oder ob die Batterie mit dem Auto entsorgt werde. Und auch wenn die Batterie getauscht werde, sei es immer noch die Frage, ob sie in Österreich verbleibe.

Der Zusammenhang zwischen der Menge, die auf den Markt gebracht wird und der Sammelmenge sei bei den anderen Gerätebatterien einigermaßen stabil. Nicht jedoch bei Lithium-Ionen-Batterien. Hier wächst die Marktmenge noch stark an und LIB haben eine lange Lebensdauer, was sich auf die derzeitige Sammelmenge auswirkt. Daher sei es unsinnig die Marktmengen und Sammelmengen von LIB zu vergleichen. Nichtsdestotrotz seien einige **logistische Überlegungen** wichtig. Wenn die LIB-Mengen von Gerätebatterien steigen, werden größere Sammelgebilde (derzeit werden 60 L Metallfässer eingesetzt) oder gesteigerte Abfuhrintervalle notwendig sein. Entsprechende Behandlungskapazitäten seien ebenfalls wichtig. Es gäbe Vereinbarungen mit den Kommunen, dass die Infrastruktur zwar von ihnen beschaffen, jedoch von den Systemen bezahlt werde. Gewerbe-Betriebe, die mitunter TB500 Stahlkisten benötigen, würden sich selbst finanzieren. Nach ADR sind auch andere Sammelgebilde zugelassen. In Deutschland werden unter anderem Kunststofffässer eingesetzt. In Österreich war jedoch von vornherein die Anforderung gestellt, dass das Gebinde nicht nur für den Transport sondern auch für eine Lagerung ausreichen muss mit dem Aspekt, dass die Lagerung mitunter sehr lange ist, da noch sehr wenig LIB aus Gerätebatterien zurück kämen. Das Interesse nach 500 L ASB-Behälter als entsprechende Sammelgebilde sei groß und werde derzeit getestet.

6 Etablierung eines (idealen) Kreislaufsystems für Lithium-Ionen-Batterien (LIB): Ergebnisse des Expert*innenforums

Am 24. Februar 2021 wurde im Rahmen des laufenden Projekts ein Expert*innenforum mit dem Titel „Technische, ökonomische und umweltrelevante Aspekte für die Etablierung eines (idealen) Kreislaufsystems für Lithium-Ionen-Batterien (LIB): Österreich im Kontext einer europäischen Wertschöpfungskette 2040“ in Form eines Webinars abgehalten. Der komplette Bericht ist im Anhang 11.2 ersichtlich. In diesem Kapitel werden lediglich die Ergebnisse der Sessions und des Workshops wiedergegeben.

6.1 Gestaltung der Wertschöpfungskette

6.1.1 Ausgangspunkt und Fragestellung für Sessions

Bezugsszenario 2040 und Fragestellung

Damit das Ziel der Klimaneutralität für Österreich bis 2040 erreicht werden kann, muss die E-Mobilität stark ausgebaut werden. Dies hat zur Folge, dass das Aufkommen an gebrauchten LIB auf etwa 25.000 Tonnen im Jahr 2030 bis zu 200.000 Tonnen im Jahr 2040 ansteigen kann.

Die Kernfrage lautete:

Wie können diese Mengen im Sinne einer Kreislaufwirtschaft bestmöglich genutzt werden?

Dazu standen vier Teilbereiche der Wertschöpfungskette zur Diskussion, die in parallelen Sessions näher betrachtet werden sollten:

- Session 1A: First life – Batterieproduktion und Erstnutzung (First Life)
- Session 1B: Second Life – Re-Use
- Session 2A: Rücknahme und Sammlung
- Session 2B: Recycling

Kernfragen innerhalb der Sessions

Innerhalb der Sessions sollten folgende Fragen beantwortet werden:

- Welche Chancen und Potenziale sehen Sie in Österreich?
- Welche Hindernisse und Herausforderungen gibt es zu bewältigen?
- Welche Anreize und Maßnahmen müssen dazu geschaffen werden?

Darauf aufbauend wurde eine Prioritätenreihung von möglichen Maßnahmenpaketen erarbeitet.

6.2 Ergebnisse des Expert*innenforums

Die Ergebnisse der Sessions sind in den grünen Tabellen zusammengefasst, wobei für jedes thematische Maßnahmenbündel Chancen und Potenziale, Hindernisse und Herausforderungen skizziert sind. Maßnahmen, die von Teilnehmer*innen überwiegend als prioritär beurteilt wurden, sind in fetter Schrift hervorgehoben. Details zur Ausgestaltung sind nach Themenblöcken im Fließtext ausgeführt, wobei Wortmeldungen anonym wiedergegeben sind. Aussagen und Meinungen der teilnehmenden Expert*innen spiegeln weder die Meinungen der Autor*innen noch des Fördergebers wider.

6.2.1 First Life – Batterieproduktion und Erstnutzung (Session 1A)

Hintergrund und Rahmen

Bei der Erreichung des Ziels der Klimaneutralität bis 2040 nimmt die Bedeutung von LIB für die Elektromobilität stark zu. Dabei steigt der Bedarf an wertvollen und kritischen Rohstoffen, die derzeit überwiegend importiert werden, stark an. Die Ressourcensicherheit spielt dabei aus europäischer Sicht eine zentrale Rolle ebenso wie die Ressourceneffizienz.

Neben einer Verlängerung der Nutzungsdauer bereits im „First Life“ können durch smartes Produktdesign Materialkreisläufe geschlossen werden und der Einsatz von Sekundärmaterialien erfolgen. Informationen über die in LIB enthaltenen Materialien, etwa in Form von digitalen Produktpässen, sind dabei von Relevanz.

Relevante Service-Leistungen entlang der Wertschöpfungskette

Während der Abfallsammlung sei es sehr wichtig, das genaue Produktdesign von Gerätebatterien zu kennen. Nur so sei eine rasche und effiziente Vorsortierung der Batterietypen bei öffentlichen Sammelstellen möglich. Dieses Thema solle bei den Produzenten mehr beachtet werden. Es könne z.B. die Produktinformation standardisiert und digitalisiert werden. Digitale Lösungen, z.B. auf Basis der Block-Chain-Technologie, könnten die Informationsweitergabe – von der Batterieherstellung bis zum Recycling – ermöglichen, wobei zugleich IP-Rechte bewahrt würden.

Tabelle 8: First Life und Batterieproduktion – Zusammenfassung der Session 1A.

WELCHE CHANCEN UND POTENZIALE SEHEN SIE IN ÖSTERREICH?	WELCHE HINDERNISSE UND HERAUSFORDERUNGEN GIBT ES ZU BEWÄLTIGEN?	WELCHE ANREIZE UND MAßNAHMEN MÜSSEN DAZU GESCHAFFEN/GESETZT WERDEN?
Ressourcenparks / Altstoffsammelzentren	Entnahme von Batterien aus Elektroaltgeräten, Schulung von Mitarbeiter*innen	Produktdesign, Standardisierung? • Nutzung von IDIS (automotive) • Blockchain?
Branchenübergreifender Informationsfluss	Interessenskonflikte der einzelnen Stakeholder	Welche Form des Anreizes? • Fördersysteme (z.B. IPCEI) • Blockchain?
Lebensdauerverlängerung	Design for Repair, Repairability	Repairability-Index (gesetzliche Vorgabe, s. Frankreich)
Einsatz von Sekundärrohstoffen	Recyclingfähigkeit, Phasenverschiebung durch First Life, Standards hinsichtlich der Qualitätsanforderungen bei Outputfraktionen (gesetzliche Vorgabe – EU?)	Standards bei Qualitätsanforderungen (gesetzliche Vorgabe – EU?)
Digitale Produktpässe	International gehandelte Güter, Wettbewerbsverzerrung (u.a. Amazon, Alibaba)	Gesetzliche Maßnahmen
Alternative Geschäftsmodelle (Bsp. Batteriemiete bei Renault)	Mögliche Umsetzung auch im Gerätebereich?	Modularisierung (für erleichterten Tausch von Komponenten/Batterien)
Modularisierung vs. Cell-to-Pack	Erschwertes Handling in Recycling/Wiederverwendung; Verbindungstechnik (Eco-design); Trade-off: Produktionskosten vs. Kosten im Second Life	Verbindungstechnik (Eco-design, gesetzliche Vorgabe)
Erweiterte Produzentenverantwortung	Ökonomische Obsoleszenz, Schlupflöcher in gesetzlichen Vorgaben	Repairability-Index Initiativen einzelner Unternehmen (z.B. 1%-for the-planet)

Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer

Die „Repairability“ eines Produkts sei sehr wichtig. Der „Repairability-Index“ werde in Frankreich seit Neuestem vorgeschrieben (www.ecologie.gov.fr/indice-reparabilite). Es wäre interessant, ob es möglich ist, diesen Index auch in Österreich anzuwenden.

Anreize für erhöhten Einsatz von Sekundärrohstoffen

Generell müssten Qualitätsstandards, insbesondere Standards für Material-Mischungen bzw. für die Outputfraktionen von Recyclinganlagen geschaffen werden. Das generelle Problem beim Recycling sei, dass spezielle Verwertungspfade bei der Markteinführung neuer Produkte in der Regel fehlen und die Branche dadurch tendenziell technischen Entwicklungen hinterherhinkt. Beim Recycling sollten nationale sowie EU-weite Lösungen gesucht werden.

Wünschenswert seien Förderprogramme, die die LIB-Produktion wieder in die EU zurückholen. Es sollten gesetzliche Vorgaben für international gültige Produktpässe festgeschrieben werden. Neue Geschäftsmodelle für Leasing oder Services – analog zu Farbdruckern – sollten forciert werden.

Der Aufbau eines Batteriepacks auf Modulebene fördere die Möglichkeiten zur Reparatur, Demontage, etc. Es sei jedoch kosteneffizienter, neue LIB herzustellen. Am Ende seien die Handlingkosten entscheidend, die für das Auftrennen der Verbundwerkstoffe aufgewendet werden müssen.

Rolle für die erweiterte Produzentenverantwortlichkeit

Eine erweiterte Produzentenverantwortung (EPR = extended producer responsibility) sei wünschenswert. Entgegen der EPR stünden Argumente, wie ein verhältnismäßig zu hoher wirtschaftlicher Aufwand (z.B. durch den Einsatz von Technologien oder fachkundigem Personal). Dadurch sei die EPR nicht sehr wirksam.

6.2.2 Second Life und Re-Use (Session 1B)

Hintergrund und Rahmen

Ein Großteil der gebrauchten LIB sind nach der Erstnutzung immer noch funktionstüchtig und könnten in Second-Life-Anwendungen Einsatz finden.

Die Produktion von LIB verursache große Mengen an Treibhausgasemissionen. Eine verlängerte Nutzung kann daher die Zahl der Neuproduktionen und damit auch Umweltauswirkungen reduzieren. Diverse Pilotprojekte zu Second-Life-Anwendungen von LIB (z.B. als stationäre Energiespeicher) existieren bereits. Nun gilt es diese Second-Life-Anwendungen weiterzuentwickeln, um Sie ökonomisch und sicher betreiben zu können. Fragen der Garantie oder Verantwortung spielen dabei eine Rolle ebenso wie Informationen über den technischen Zustand der Batterien.

Mögliche Quellen von LIB für Second-Life-Nutzung

Mögliche Quellen wären LKW-Batterien. Sie besäßen im Durchschnitt 0,5 MW und nach ihrem Erfahrungswert besteht pro Betriebsgelände der Fuhrpark aus 20-50 Stück LKW. Sie besäßen ein klares Belastungsprofil.

Tabelle 9: Second Life und Re-Use – Zusammenfassung der Session 1B.

<u>WELCHE CHANCEN UND POTENZIALE SEHEN SIE IN ÖSTERREICH?</u>	<u>WELCHE HINDERNISSE UND HERAUSFORDERUNGEN GIBT ES ZU BEWÄLTIGEN?</u>	<u>WELCHE ANREIZE UND MAßNAHMEN MÜSSEN DAZU GESCHAFFEN/GESETZT WERDEN?</u>
Logistikketten eignen sich für Second Life (50 neue LKW pro Jahr)	Handlingkosten als Knackpunkt (Ausbau, Gefahrguttransport, Demontage, Bewertung der Batterie) 70 €/kWh?	Anreizprogramme von Seiten der Politik (Bonus für Second Life)
Privat-PKW	Gefahrguttransport als Herausforderung (z.B. bei Transport ins EU-Ausland) Kostendifferenz zur Neubatterie zu hoch/ungünstig	Maßnahmen zur Vermeidung von Gefahrguttransportthematik: Aufbereitung dezentral (innerhalb nationaler Grenzen; verwirklicht!) neues Business (Chance) Incentives für Besitzer den PKW mit besserem SoH abzugeben
Geringes Potenzial: Gerätebatterien	Garantiebedingungen (schwierig auszustellen)	CO ₂ -Zertifikathandel oder Strafzahlungen zweckwidmen
Testing: SoH als Schlüssel für Wirtschaftlichkeit (abh. von Nutzungsart, Temperatur)	Aufbau von Prüfstellen zur SoH-Bewertung	Mietmodell für Speicherleistung (um mit Garantie umgehen zu können)
Nutzung von E-Batterien in Privathaushalten und als Pufferspeicher	Rohstoffseite als Knackpunkt Höhere Ressourceneffizienz von Re-Use oder Nicht-Re-Use??	
Nutzung zur Spitzenlastabdeckung	Noch nicht kostendeckend in AT (in Deutschland schon), abh. vom Strommarkt	

Maßnahmen zur Senkung der Handlingkosten

Handlingkosten für Second-Life-Nutzung in Euro pro kWh seien ein kritischer Benchmark im Vergleich von Neupreisen von Batterien, die derzeit unter 50 Euro/kWh sanken. Handlingkosten müssten inklusive Transport, Qualifizierungskosten usw. ermittelt werden. Die Notwendigkeit, die Batterie bei Transporten als Gefahrgut zu behandeln, sorgte für sehr hohe Kostensteigerungen. Das sei viel zu teuer. Im Gegensatz zu den PKW, bei den LKW anzusetzen, sei eine gute Idee. Man könne den Fahrzeugbesitzer anregen, das Fahrzeug früher zu tauschen. Dieser bekomme im Gegenzug eine Art „Goodie“ vom Staat, um bessere Speicher zu liefern. Niedrige Handlingkosten seien mit Serienfertigung und Standardisierung verbunden. LIB aus PKW bedingten einen Gefahrguttransport nach ADR und führten bei internationaler Verbringung zur Verwertung oder Weiternutzung sehr hohe Kosten.

Garantie für Second-Life-LIB als Risiko

Neben den Handlingkosten sei die Garantie ein vertragliches Fragezeichen, da die Performance nicht garantiert werden könne. Der Akku werde in der Mobilitätsanwendung sehr gefordert (Spitzenlast vs. gemächlicher gleichmäßiger Last). Auf zellularer Ebene gäbe es momentan keine Möglichkeit Batterien zu tauschen, auf Modulebene i.d.R. schon. Es bestünden Überlegungen dahingehend, die Batterien nicht wieder zu verkaufen, weil das zu kompliziert und risikoreich sei und schon gar nicht für Haushalte geeignet sei. Pufferspeicher seien etwas besser kontrollierbar, aber nach mehrjähriger Auseinandersetzung gäbe es immer noch keine klare Aussage.

Rolle von Second-Life-LIB in Konkurrenz zum Batterierecycling

Innerhalb der EU bestehe derzeit kaum bis keine Möglichkeit, den Stoffkreislauf von Batterie zu Batterie („Bat2Bat“) zu schließen, wobei Second Life keine Lösung dazu sei. Der stark steigende Rohstoffbedarf könne nicht mit Recycling gedeckt werden. Mangels ausreichenden Inputs wisse man noch nicht viel über Batterierecyclinganlagen, womit ein spezialisierter EU-Recyclingweg noch nicht in Sicht sei. Second Life könne hier den Anfall puffern. Mögliche Incentives für Second Life könnten aber im Widerspruch zur Recyclingquote für Produktionsabfälle (bei 20%) stehen und seien daher nicht sinnvoll.

State of health (SoH) als Wegbereiter für Second Life

Die Bestimmung vom State of Health sei ein wesentlicher Schlüssel zur Ökonomie von Second-Life-LIB. Ein OEM (Original Equipment Manufacturer) habe durch den Zugriff auf das Batterie-Management-System (BMS) mehr Möglichkeiten als andere Stakeholder. Es bestehe die Möglichkeit zur Vermietung von Speicherleistung anstatt der Vermietung der Batterie. Zweckwidmung zu Pufferspeichern sei sinnvoller als Restwertleasing, da hier die Batterie das Hindernis darstellt.

“Optimale“ Anwendungsfälle von Second-Life-LIB

Mögliche Anwendungen hingen stark von der Anwendung in Abhängigkeit von der Nutzung und zeitlichen Verteilung der Last ab. Bei kontinuierlicher Nutzung mit gleichmäßiger Last könnte eine längere Lebensdauer erreicht werden. Batteriepufferspeicher könnten nur bestimmte Lasten abfedern. Ein Einsatz als Kurzzeitspeicher sei möglich. Die typische Einsatzdauer solcher Anwendungen betrage vier Stunden. Alles darüber sei derzeit nicht machbar. Sie seien als Tages-, oder saisonaler Speicher ungeeignet. Dazu bestünden Pilotanlagen. Einer sei seit Monaten in Österreich im Betrieb und decke Maschinestartspitzen ab. Aber die Strompreise seien in Österreich zu niedrig für einen wirtschaftlichen Betrieb. In Deutschland sei das dank höherer Strompreise eine gute Sache. Dort puffere er beim Shredder die Spitzen des An- und Abfahrens. Es werde ein zusätzlicher Speicher geplant, weil der betriebliche Fuhrpark auf E-Fahrzeuge umgestellt werde und so Spitzenlasten am Morgen abgedeckt werden könnten. Ideal wäre eine kaskadische Nutzung der Batterie.

Dezentrale Aufbereitung zur Vermeidung von Gefahrguttransporten

Dezentrale Aufbereitung vermeide Transporte, wobei vor allem internationale Transporte zum CO₂-Ausstoß beitragen und hohe Kosten verursachen. Es wäre sinnvoll, schon in Österreich auf Second Life-Fähigkeit zu testen, anstatt z.B. in Deutschland. Recycler könnten als Energiepufferdienstleister Jobs schaffen.

Mögliche Anreize für Second Life

Anreize sollten die Mitverantwortung für die effiziente Nutzung der Batterie stärken, da Kunden mit Eigentumbatterien nicht so gut umgingen, als wenn darauf Pfand eingehoben wurde. Die große Hürde bestehe in der Finanzierung eines geeigneten Bonusmodells.

6.2.3 Rücknahme und Sammlung (Session 2A)

Hintergrund und Rahmen

Das Recycling von LIB setze voraus, dass die Batterien nach dem Ende ihrer Lebensdauer gesammelt und zurückgeführt und nicht unsachgemäß entsorgt werde oder über den Export von Gebrauchtwagen den europäischen Markt verlasse. Neue Geschäftsmodelle, bei denen die Autoproduzenten Eigentümer der Batterie seien, oder Pfandsysteme könnten den Rückfluss von LIB sicherstellen.

Neben dem Ausbau von Sammelstellen (z.B. von Gerätebatterien durch Kommunen und Händler) sei die notwendige Infrastruktur für die Entladung, Identifikation inklusive Sortierung und Transport aufzubauen, wobei technische und rechtliche Aspekte (z.B. Haftung) zu lösen seien.

Herausforderungen bei der Sammlung von LIB aus dem Automobilbereich

Herausforderungen bestünden bei Prognosen zur Entwicklung des Gebrauchtwagenmarktes im Zusammenhang mit der Exportproblematik. Ob Karosserie und Batterie getrennt betrachten werden müssten und wie sich der State of Health bis zum Lebensende der Batterie im Zusammenhang mit dem Verkauf entwickle, sei weiters offen. Karosserien aus hochwertigen Legierungen sei für das Recycling interessant, komplexe Materialverbunde jedoch eine Herausforderung für Aufbereitungsprozesse. Die Überprüfung der Batterieleistung im Zuge von Ankaufstests werde vom Kunden eingefordert werden.

Verlängerung der Produktnutzungsdauer mittels Batteriepass

Die Einforderung von Mitverantwortung der Hersteller sei eine mögliche Lösung, da dem OEM die Nutzung und Leistungsdaten bekannt seien. Für 50% der LKW würden viele Parameter schon aufgezeichnet und für Prognosen genutzt. Kernthema sei der Zugriff auf diese Daten und der Datenschutz. Ein Batteriepass sei hier die Lösung, womit Daten als ökonomisches Zugpferd dienen.

Möglicher Beitrag der Sammlung zu Re-Use und Second Life

Bei der Sammlung sei zu unterscheiden, welcher Nutzung die Batterie zugeführt werden soll, wobei keine Re-Use-Ziele bestehen. Die Demontage sei als Knackpunkt zu betrachten, da erst nach einer Diagnose entschieden werden könne, ob es sich um Abfall oder ein Produkt handle. Standardisierung würde zu geringeren Demontagezeiten und zu geringeren Handlingkosten führen. Unabhängig von der Nutzung (d.h. Recycling oder Re-Use), wäre das ein wichtiger Beitrag zur einfachen Gewinnung von Information zum State of Health, der in der Batterieverordnung jedoch nicht aufscheint. Aktuell seien zu wenige Prüfstellen vorhanden, die eine Aussage dazu treffen können.

Lösung Pfandmodell?

Effektive Pfandsysteme müssten monetär ziemlich hoch angesetzt sein, da die Recyclingkosten mehrere Tausend Euro betragen. Pfandmodelle seien unbeliebt, da das Geld über Jahre in den Bilanzen gebunden ist. Eine

Abgrenzung von Karosserie und Batterie wäre im Falle einer Befandung notwendig, wobei auch andere Modelle wie z.B. Leasing überlegt werden können. Leasing werde als besserer Weg als reines Eigentum gesehen.

Einbindung der Hersteller

Die Diskussion mit Herstellern als Primärverpflichteten sei zu führen, wobei die Themen Standardisierung, Batterie-Management-Systeme und einheitliche Schnittstellen geführt werden müssten. Handlungsoptionen in Österreich seien begrenzt, weil die rechtlichen Vorgaben den Hersteller verpflichteten.

Tabelle 10: Rücknahme und Sammlung – Zusammenfassung der Session 2A (Teil 1 von 2).

WELCHE CHANCEN UND POTENZIALE SEHEN SIE IN ÖSTERREICH?	WELCHE HINDERNISSE UND HERAUSFORDERUNGEN GIBT ES ZU BEWÄLTIGEN?	WELCHE ANREIZE UND MAßNAHMEN MÜSSEN DAZU GESCHAFFEN/GESETZT WERDEN?
Privat-PKW	Frage des Batterieeigentums (Mietmodell vs. Eigentum) Rücknahme von PKW	Stärkung der Mitverantwortung für Produktnutzungsdauer Anreize notwendig
	Export und Privatverkäufe von Gebrauchtwagen mit zeitlicher Verzögerung	Getrennte Betrachtung von Karosserie und Batterie
	Haftungsfragen zu Sicherheit und bzgl. State of Health (SoH)	Ankaufstest für die Batterie für E-Auto umso wichtiger
	Technischer Aufwand bei Demontage der Batterie	
	Recyclingwert der Karosserie?	
Recycling von B2B-Industriebatterien	Herstellerverantwortung für Industriebatterien nicht geregelt [Anm. Arnberger: In der Bat-VO geregelt.] Abgrenzung von Gerätebatterien	Effiziente Regelung B2B-Bereichs
Datenmonitoring bei Nutzung	Datenweitergabe von OEMs	Batteriepass inkl. Verpflichtung der OEMs zur Weitergabe zur Optimierung der weiteren Nutzung
Re-Use innerhalb der Firma und dann kaskadisch im Stadtverkehr	Sehr unterschiedliche Behaltdauern bei Logistikketten	Steuerliche Abdeckung von Re-Use innerhalb Betrieb Incentives für längere Nutzung Standardisierte Schnittstellen und Typen

Tabelle 11: Rücknahme und Sammlung – Zusammenfassung der Session 2A (Teil 2 von 2).

WELCHE CHANCEN UND POTENZIALE SEHEN SIE IN ÖSTERREICH?	WELCHE HINDERNISSE UND HERAUSFORDERUNGEN GIBT ES ZU BEWÄLTIGEN?	WELCHE ANREIZE UND MAßNAHMEN MÜSSEN DAZU GESCHAFFEN/GESETZT WERDEN?
Datenmonitoring bei Nutzung	Datenweitergabe von OEMs	Batteriepass inkl. Verpflichtung der OEMs zur Weitergabe zur Optimierung der weiteren Nutzung
Re-Use innerhalb der Firma und dann kaskadisch im Stadtverkehr	Sehr unterschiedliche Behaltdauern bei Logistikketten	Steuerliche Abdeckung von Re-Use innerhalb Betrieb Incentives für längere Nutzung Standardisierte Schnittstellen und Typen
	Abgrenzung von Produkt und Abfall (sobald Abfall gut regulierbar)	
Optimierte Pfade für Recycling und Re-Use		
Pfandmodell	Finanzierung und Administration; Hohe und lange Kapitalbindung Identifikation des Abfallendes (ob erreicht oder nicht)	Aufbau von einheitlichen Prüfstellen
	Herstellerspezifische Systeme	Kommunikation und Zusammenarbeit mit Herstellern zu Schnittstellen und BMS
Sicherheit von Gerätebatterien		Technische Lösungen zur Rücknahme, Transport und Aufbereitung

6.2.4 Recycling (Session 2B)

Hintergrund und Rahmen

Mit zeitlicher Verzögerung durch die nutzungsbedingte Phasenverschiebung landen gebrauchte LIB in der Abfallwirtschaft. Obwohl es sich derzeit bei LIB aus der E-Mobilität noch um geringe Mengen handelt, stehen die Behandlungsbetriebe bereits jetzt vor Herausforderungen, wie den Sicherheitsthemen, dem Umgang mit unterschiedlichen elektrochemischen Systemen oder der Rückgewinnung edler und unedler Metalle.

Eine zeitnahe und europäische Zusammenarbeit über die gesamte LIB-Wertschöpfungskette kann das Treffen von Entscheidungen zum Ausbau der Recyclingkapazitäten positiv beeinflussen und somit den größtmöglichen Einsatz von Sekundärrohstoffen ermöglichen.

Herausforderungen im Recycling

In der Abfallwirtschaft müsse eine neue Anlage mit einer Kapazität von mindestens 40.000, eher 60.000 Jahrestonnen geplant werden. Zudem sei das Einzugsgebiet von Bedeutung. Je größer das Einzugsgebiet sei (z.B. LIB auch aus Nachbarländern), desto kleiner sei auch das wirtschaftliche Risiko. In der Planung von Anlagen werde grundsätzlich auf Modularität geachtet, d.h. dass die Anlage bei Bedarf erweitert werden könne.

Gerade im LIB-Recycling sei nicht klar, welche Recyclingtechnologie sich langfristig durchsetzen werde.

Eine weitere Herausforderung sei die Demontage. Eine Automatisierung sei durch die Vielfalt der LIB derzeit nicht erreichbar. Bei der manuellen Demontage seien die Personalkosten ein wesentlicher Faktor, der einen wirtschaftlichen Betrieb erschwere.

Herausfordernd sei auch die unterschiedliche Handhabung der Schlüsselnummern in der EU während der LIB-Sammlung und des Transports. Einzelne Länder kämen zu unterschiedlichen Interpretationen. Es sei nicht immer eindeutig, ob LIB als gefährlicher oder nicht-gefährlicher Abfall eingestuft würden.

Vermehrt kämen im Haushaltsbereich LIB aus Lithiumeisenphosphat (LFP) vor. Diese seien für das Recycling ein Problem, da sie in den derzeitigen Recyclingprozessen störten.

Mengeneinschätzung - Recycling

Vorerst würden die E-Fahrradbatterien zunehmen. Der Rücklauf von Traktionsbatterien werde noch länger dauern, jedoch dann dominant sein.

Ecodesign – Design for Recycle

„Ecodesign“ und „Design for Recycle“ bzw. „Design for Re-Use“ hingen zusammen. Diese würden von Produzenten intern gesteuert. Eine indirekte Steuerung könne über die Recyclingquoten erfolgen.

Auswirkung im Recyclingprozess sei vor allem bei der Demontage und wirke sich auf den Entsorgungspreis aus.

Einsatz von Rezyklat

Über die Recyclingquote auf Elementebene werde indirekt der Einsatz von Sekundärrohstoffen möglicherweise gefördert.

Ein Ansporn könnte über ein CO₂-Kompensationsmodell erfolgen oder ein Belohnungssystem für den Einsatz von Rezyklaten. Vor allem sollten die Entwicklungskosten über die Politik belohnt werden.

Ein wichtiger Weg führe über die Konsumenten. Hier bedürfe es an Bewusstseinsbildung. Dies könnte zum Beispiel über ein Rezyklat-Gütesiegel gestärkt werden.

Tabelle 12: Recycling – Zusammenfassung der Session 2B.

<u>WELCHE CHANCEN UND POTENZIALE SEHEN SIE IN ÖSTERREICH?</u>	<u>WELCHE HINDERNISSE UND HERAUSFORDERUNGEN GIBT ES ZU BEWÄLTIGEN?</u>	<u>WELCHE ANREIZE UND MAßNAHMEN MÜSSEN DAZU GESCHAFFEN/GESETZT WERDEN?</u>
Mögliche Recyclinganlage in Österreich (Modulares Upscaling)	Mengen – Wirtschaftlichkeit Unterschiedliche nationale Regelungen Recyclingtechnologie Zellchemie (LFP = derzeit keine Recyclinglösung im Industriemaßstab)	Recyclingquote, EU-weite gleichermaßen Deklaration von LIB/EoL-LIB
Einsatz von Rezyklat Urban Mining	(Illegaler) Export der LIB, Höherer Preis von EoL-LIB außerhalb EU, Geplante Obsoleszenz, Umweltschutzbemühungen (hier: Einsatz von Rezyklaten) schwierige Themen im Marketing	Rezyklat-Gütesiegel, Bewusstseinsbildende Maßnahmen, Mind. Einsatz von Sekundärrohstoffen
Deaktivierung/Vorbehandlung in Österreich als erster Schritt	Auf EU-Ebene denken Rechtliche Unterschiede innerhalb EU-Länder Große Player (auch außerhalb EU)	
Österreich als Verbindung zu Südosteuropa	Kaum E-Mobilität in Südosteuropa	
Design for Recycling	Eco-design = Herstellervorgabe	Gesetzliche Vorgaben

6.2.5 Prioritätenreihung von Maßnahmen innerhalb der Wertschöpfungskette

Aus jeder Session wurden die dort priorisierten drei bis vier Maßnahmenbündel ausgewählt. Alle Teilnehmer*innen wurden um Auswahl anhand der folgenden Frage per Webtool Slido© ersucht:

Welche Maßnahmen würden Sie priorisieren, um den Weg für eine österreichische/österreichische/europäische Kreislaufwirtschaft zu ebnen?

Die Teilnehmer*innen hatten die Möglichkeit drei von insgesamt 13 Maßnahmen auszuwählen. Es ist allerdings anzumerken, dass die Zeit für die Umfrage knapp bemessen war und dass eine Auswahl nur mittels kurzen Screenings der einzelnen Maßnahmen erfolgen musste. Die Auswahl ist daher mit Unsicherheiten behaftet, welche bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss.

Es nahmen insgesamt 22 Teilnehmer*innen an der Umfrage teil, folglich galt es 66 Votes zu berücksichtigen. Unter den Top-3 fielen Maßnahmen zur Förderung der weiteren Nutzung (Nutzungsdauerverlängerung) und des Second Lifes sowie für einen verstärkten Einsatz von Rezyklaten.

Ein „Batteriepass“ mit der Verpflichtung für OEMs für eine Weitergabe der Daten, um eine bessere qualitative Abschätzung für eine weitere Nutzung treffen zu können, wurde mehrheitlich als relevant angesehen, um die Kreislaufwirtschaft zu fördern. Unklar sei noch, ob der derzeit geplante Batteriepass gemäß der neuen BatterieVO, ausreichend Informationen liefert, um den State of Health einer Batterie zu bestimmen.

„Bonus-Modelle“ für Second-Life-Anwendungen (finanzielle Anreize/Förderungen) wurden ebenfalls mehrheitlich priorisiert. Wenn der Weg Richtung Second Life geebnet werden soll, dann könnte dies nur durch finanzielle Anreize ermöglicht werden, da die Handlingkosten (siehe Session 1B) noch zu hoch seien, um ein Second Life wirtschaftlich rentabel betreiben zu können.

Ein Gütesiegel für Produkte mit einem hohen Rezyklat-Anteil sowie bewusstseinsbildende Maßnahmen zur Förderung jener Produkte wurden ebenfalls von den Teilnehmer*innen favorisiert, um die Kreislaufwirtschaft zu fördern. Recyclingquoten sind für Ni, Co, etc. bereits vorgesehen, allerdings keine Vorgaben zur Qualität, welche jedoch den Wiedereinsatz begünstigen würde.

Abbildung 11: Maßnahmen zur Zielerreichung – Ergebnis des Expert*innenforums.



Participants can vote at [slido.com](https://www.slido.com) with code #51531

7 Szenarien und ökonomische Bewertung von Wertschöpfungsketten für LIB-Recycling bis 2040

7.1 Mengengerüst zum Aufkommen von EoL-LIB

Energie- und Treibhausgasszenarien für Österreich – das Transition-Szenario

Als Basis für die LIB-Mengenentwicklungen fungiert das Transition-Szenario, welches durch ein österreichisches Konsortium unter der Leitung des Umweltbundesamtes erstellt wurde (siehe Kapitel 2.2). Es beinhaltet politische Maßnahmen (CO₂-Preise, Ordnungsrecht), technologischen Wandel, Investitionen und Verhaltensänderungen in den Bereichen Energieerzeugung, Industrie, Wohnen und Verkehr, die für Österreich eine Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 darstellen können (Reduktion der energiebedingten THG-Emissionen um mindestens 80-95 % 2050/1990). Dies führt zu einer Reduktion der Endenergienachfrage in allen Sektoren sowie zu einem Shift in Richtung Erneuerbare Energieträger. Im Verkehrsbereich wurde eine Elektrifizierung der Fahrzeugflotte berechnet (siehe Abbildung 12). Diese Entwicklung wurde an das neuerliche Ziel des aktuellen Regierungsprogramms Klimaneutralität bis 2040 angepasst.

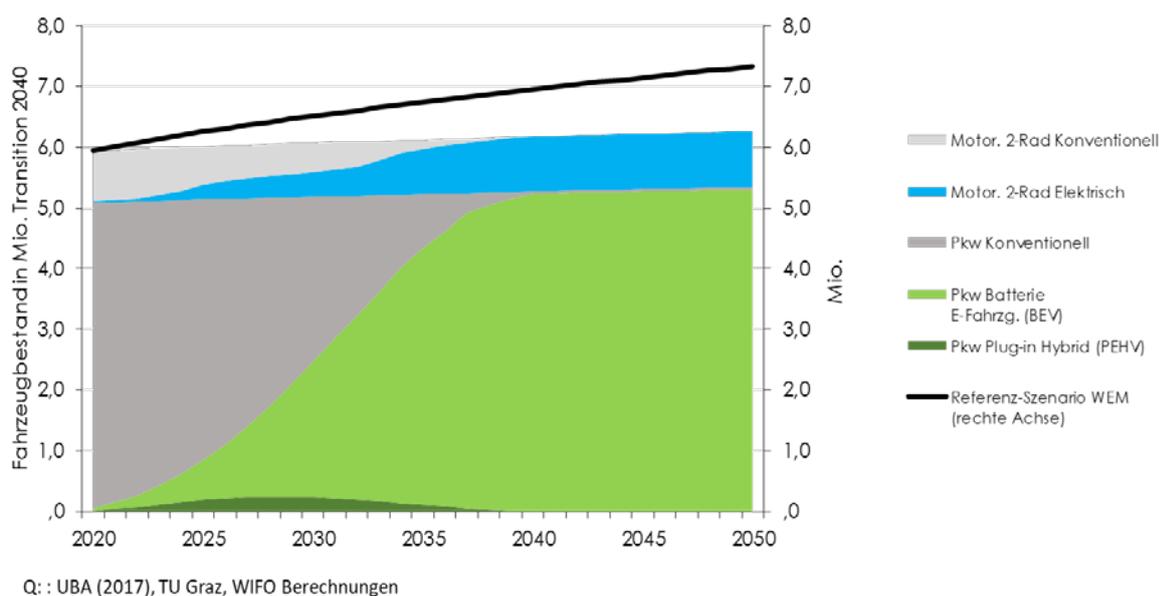


Abbildung 12: Bestand an Fahrzeugen im Szenario „Transition“ mit Ziel 2040.

Starker Anstieg der Elektroflotte bis 2040

Die Abschätzung der LIB-Mengen im End-of-Life (EoL) basiert auf jenen Bestandszahlen der Elektromobilität aus dem „Transition-Szenario“ mit dem vorgerückten Ziel 2040 lt. aktuellem Regierungsprogramm. Es wird daher angenommen, dass eine Elektrifizierung der Fahrzeugflotte bis zum Jahr 2040 erfolgt. Dies bedeutet, dass der Bestand an Batterie-E-Fahrzeugen auf 5,2 Mio Stück bis 2040 wächst. Verglichen mit einem Bestand von knapp 45.000 Stück im Jahr 2020, ist ein enormer Anstieg in den nächsten 20 Jahren zu erwarten. Dieser starke Anstieg zeigt sich folglich auch in den geschätzten Mengen an EoL-LIB.

Berechnungsparameter für die Abschätzung des LIB-Potenzials

Für die Berechnung des jährlichen Potenzials an EoL-LIB wurden zunächst die **jährlich in Verkehr gesetzten Mengen** ermittelt. Dazu wurde der Jahresbestand aus dem Transition-Szenario für folgende Produkte/Produktgruppen herangezogen: Batterie-E-Fahrzeuge, Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge, Hybrid-Fahrzeuge, Leichte E-Nutzfahrzeuge, Schwere E-Nutzfahrzeuge, Wasserstoff-Nutzfahrzeuge, motorisierte Zweiräder, sowie für Photovoltaikanlagen mit Speicher. Die Differenz zwischen Jahresbestand und Bestand des Vorjahres unter Berücksichtigung eines Austauschs der Altbestände bildete die Grundlage.

Für Gerätebatterien sind jährlich in Verkehr gesetzte Mengen aus den Tätigkeits-Berichten der Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH (EAK Austria, 2020) verfügbar. Es wurde ein jährlicher Zuwachs von 6 % bis 2025 nach Prognose It. Avicenne Energy (Pillote, 2017) angenommen.

Die verwendeten **Stückgewichte** der eingesetzten LIB in diesen Produktgruppen werden in Tabelle 13 angeführt.

Tabelle 13: Angenommene LIB-Stückgewichte für die Mengenabschätzung

Produktgruppe	LIB-Stückgewicht in kg	Quelle/Annahmen
Batterie-E-Fahrzeug	400	330 kg lt. Arnberger (2020) wurde jedoch erhöht, da Tendenz zu höheren Stückgewichten
Plug-In Hybrid-Fahrzeug	105	(Arnberger, 2020)
Hybrid-Fahrzeug	35	(Arnberger, 2020)
Leichte E-Nutzfahrzeuge	700	Beispiel Mercedes EQV
Schwere E-Nutzfahrzeuge	1200	Am Beispiel Bus aus CN
Wasserstoff-Nutzfahrzeug	100	Annahme
Motorr. Zweirad	3	Annahme
Speicher in einer Photovoltaikanlage	9,7 ¹	(Ellingsen et al., 2014)
Elektrogeräte	0,29	(WPA, 2019)

¹ in kg pro kWh installierte PV-Leistung

Für die Nutzungsdauer der Batterie sowie die Lebensdauer des Produkts indem die Batterie verwendet wird, wurden Verteilungskurven angenommen. Die Lebensdauer für das Projekt bzw. die Produktgruppen wurde errechnet, um die Menge an Altbeständen bei den jährlich in Verkehr gesetzten Mengen zu berücksichtigen. Die durchschnittliche Produktlebensdauer lag für Batterie-E-Fahrzeuge bei etwa elf Jahren und für Photovoltaikanlagen bei etwa 20 Jahren.

Während eines Produktlebens wurde weiters angenommen, dass die Batterie 1,1 mal ausgetauscht werden muss (bei leichten Nutzfahrzeugen 1,5 mal und bei schweren Nutzfahrzeugen 1,75 mal). Dies ergibt eine Verteilungskurve wie in Abbildung 13 angeführt. Bei schweren E-Nutzfahrzeugen erfolgt ein Austausch der Batterie nach etwa fünf bis neun Jahren sowie 13 bis 17 Jahren. Bei Batterie-E-Fahrzeugen fällt ein Großteil an EoL-LiB nach 9 bis 14 Jahren Nutzung an.

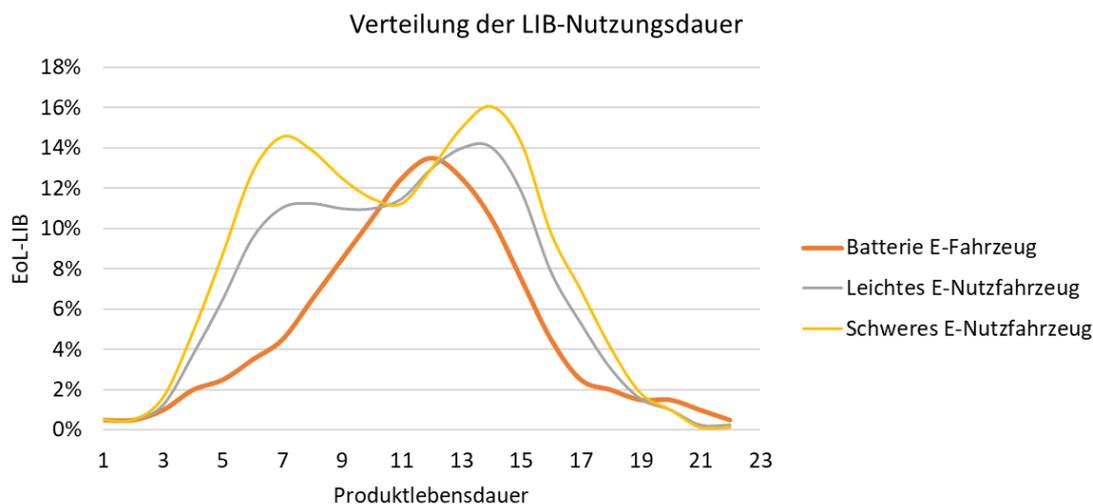


Abbildung 13: Angenommene Verteilungskurve für die Nutzungsdauer von LIB in E-Fahrzeugen, leichten E-Nutzfahrzeugen und schweren E-Nutzfahrzeugen.

Geschätztes jährliches Potenzial an EoL-LiB

Auf Basis des Transition-Szenarios, d.h. wenn eine Elektrifizierung des Verkehrssektors bis 2040 umgesetzt wird, ergibt sich ein Potenzial an EoL-LiB von etwa 25.000 Tonnen im Jahr 2030 mit stark ansteigenden Mengen von bis zu 200.000 Tonnen im Jahr 2040. Der Großteil stammt aus E-Fahrzeugen, gefolgt von leichten E-Nutzfahrzeugen (siehe Abbildung 14). Das Potenzial an EoL-LiB aus Gerätebatterien ist mit jährlich etwa 2.600 Tonnen verglichen mit den Mengen aus der Elektromobilität sehr gering. Nichtsdestotrotz sind jene Mengen gerade aus sicherheitstechnischen Gründen nicht vernachlässigbar. Das Potenzial nach dem Jahr 2040 wird in der Abbildung schattiert, da eine Abschätzung mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Die Entwicklung des E-Marktes ist schon für die nächsten Jahrzehnte schwer abzuschätzen, da die Entwicklung der Bestandszahlen stark von den politischen Rahmenbedingungen aber auch der Kundenakzeptanz abhängig sind (Klimaziele etc.) und auch die LIB-Technologie hinsichtlich Leistung, Stückgewicht und Zellchemie sich ständig weiterentwickelt. Eine Prognose über den Zeithorizont von 2040 hinaus ist daher nicht Fokus dieser Arbeit. Faktum ist, wenn der Autobestand bis 2040 elektrifiziert wird, werden sich die Mengen an EoL-LiB ab etwa 2050 einpendeln und daher die Kurve abflachen (wie in der Schattierung ersichtlich).

Abgesehen von den Unsicherheiten betreffend Lebensdauer sowie Bestandszahlen und deren tatsächliche Entwicklung bis 2040, müssen noch weitere wesentliche Einflussfaktoren berücksichtigt werden, um das tatsächliche Aufkommen an EoL-LiB abzuschätzen: Export von gebrauchten E-Fahrzeugen, Potenzial für Großspeichersysteme (Batteriekraftwerke), Sammelquote. Das Aufkommen an EoL-LiB wird daher für mehrere Szenarien in Kapitel 7.1 aufgezeigt.

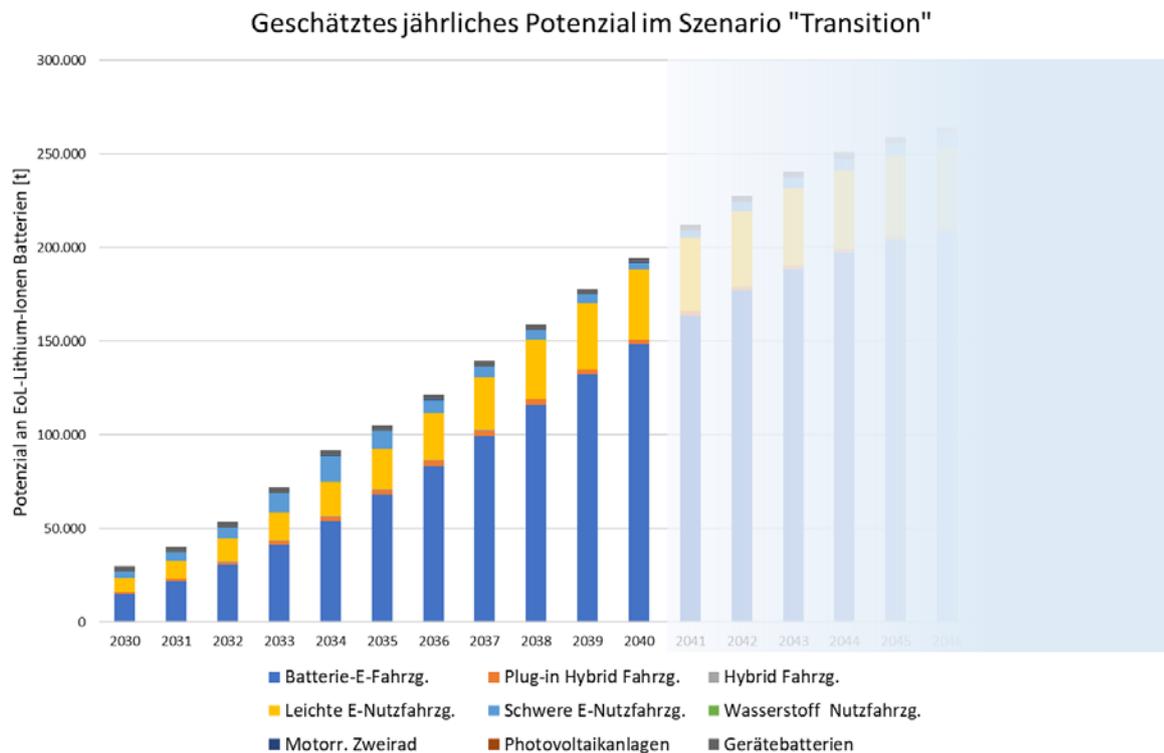


Abbildung 14: Geschätztes jährliches Potenzial an EoL-LIB in Österreich auf Basis des Szenarios „Transition“ mit Ziel 2040.

Das Transition-Szenario gibt ein sehr ambitioniertes Ziel vor, wenn man bedenkt, dass der E-Fahrzeug Bestand von derzeit etwa 45.000 Stück innerhalb von 20 Jahren auf 5,2 Mio. Stück ansteigen soll. Nichtsdestotrotz, wenn Österreich bis 2040 klimaneutral sein soll, wird es früher oder später zu einem rasanten Anstieg in der E-Mobilität kommen und dies wird sich auch auf die Mengen an EoL-LIB auswirken.

7.2 LIB-Mengenentwicklung nach vordefinierten Szenarien

Für die Abschätzung des Aufkommens an EoL-LIB in Österreich wurden vier Szenarien entwickelt, um die Variabilität in den Mengen näher zu betrachten. Die Szenarien unterscheiden sich nach dem Grad der Energiewende, dem Grad der Kreislaufwirtschaft, der Verfügbarkeit von Recyclinganlagen in Österreich oder nur im EU Ausland und der Export- und Importrate von gebrauchten oder alten LIB unterscheiden. Als Ausgangspunkt für die Berechnung der LIB-Mengenentwicklungen fungierten die vom Umweltbundesamt (Wien) entwickelten Energie- und Treibhausgasszenarien im Hinblick auf 2030 und 2050 (UBA 2017). Diese Szenarien wurden auf das aktuelle Ziel des österreichischen Regierungsprogrammes zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2040 angepasst.

Die Szenarien unterscheiden sich in folgenden Punkten und werden in Tabelle 14 zusammengefasst:

Zeitpunkt der Energiewende: Da lt. Regierungsprogramm Österreich bis 2040 klimaneutral sein soll, lag auch der Schwerpunkt bei den Abschätzungen zur Mengenentwicklung auf diesem Zeithorizont. Als Basis-Szenario und als Größenvergleich wurde jedoch auch die Energiewende mit geltenden Maßnahmen aus 2019 betrachtet

(WEM: „with existing measures“). Als Vergleich: Die Bestandszahlen für 2040 liegen im WEM Szenario bei etwa 2 Mio. und im Transition-Szenario bei etwa 5,2 Mio. Batterie-E-Fahrzeugen.

Recyclingort: Werden die Kapazitätsgrößen der derzeitigen Recyclinganlagen (Tabelle 7) betrachtet, so würde eine eigene Recyclinganlage in Österreich ab einem Aufkommen von jährlich etwa 10.000 bis 15.000 Tonnen EoL-LIB sinnvoll sein. Im Szen_HIGH und im Szen_LOW wurde daher angenommen, dass in Österreich Recyclinganlagen für LIB aufgebaut und betrieben werden. In den Basisszenarien Szen_TRANS und im Szen_WEM wurden hingegen keinerlei kreislaforientierte Maßnahmen angenommen und die EoL-LIB exportiert und in einer Recyclinganlage außerhalb Österreichs verbracht.

Ausmaß Second-Life-Batterie: Durch die unterschiedlich ausgeprägten Maßnahmensetzungen in den einzelnen Szenarien kommt es im Bereich des Second Life zu unterschiedlich angenommenen Anteilen. Im Szen_HIGH wurde angenommen, dass der Fokus verstärkt auf einen hohen Grad einer Kreislaufwirtschaft, inkl. Ressourcenschonung und Wiederverwendung liegt und damit die Wiederverwendung von Batterien einen hohen Grad erreicht. Dem gegenüber stehen aber begrenzte Einsatzmöglichkeiten von Second Life-Batterien, beispielsweise als stationärer Energiespeicher. Deshalb wurde hier ein Re-Use Anteil von maximal 40 % angenommen. Im Szen_LOW wurde ein Anteil von nur 20 % angenommen und im Szen_TRANS als Vergleich ein Anteil von 0 %.

Export von Gebrauchtwagen: Da der Export von Gebrauchtwagen ein wesentlicher Faktor für die Sammelmenge von EoL-LIB in Österreich darstellt und angenommen wird, dass die derzeitige Problematik des Exports von Gebrauchtwagen für den Aufbau einer Recycling-Wertschöpfungskette auch auf E-Fahrzeuge zutreffen wird (lt. Aussagen der Stakeholder) wurde prinzipiell ein Anteil von 50 % an exportierten Gebrauchtwagen angenommen. Das heißt, nur 50 % des jährlichen Potenzials an EoL-LIB würden in Österreich gesammelt. Dieser Anteil kann gesteigert werden, indem zusätzliche Maßnahmen eingeführt werden (siehe Maßnahmenpakete). Deshalb wurden für Szen_HIGH und Szen_LOW geringere Exportquoten von 30 % bzw. 40 % angenommen.

Import von EoL-LIB: Es wird angenommen, dass bestimmte Mengen an EoL-LIB auch aus anderen Ländern für eine Verwertung importiert werden, wenn eine Recyclinganlage in Österreich besteht. Diese Importmenge an EoL-LIB wurde mit 10 % des österreichischen Aufkommens angenommen.

Tabelle 14: Kernannahmen der Szenarien.

Szenario	Szen_HIGH	Szen_LOW	Szen_TRANS	Szen_WEM
Kurzbeschreibung der Szenarien	Energiewende mit Ziel 2040 und hohem Grad einer Kreislaufwirtschaft	Energiewende mit Ziel 2040 und Recycling in Österreich	Energiewende mit Ziel 2040	Energiewende mit geltenden Maßnahmen 2019
Recycling in Österr.	Ja	Ja	Nein	Nein
Second Life-Anwendung	40 %	20 %	0 %	0 %
Export von gebrauchten E-Fahrzeugen	30 % / 10 % ¹	40 % / 10 % ¹	50 % / 10 % ¹	50 % / 10 % ¹
Import von EoL-LIB	10 %	10 %	-	-

¹ für Nutzfahrzeuge

Die LIB-Mengen werden in Abbildung 15 für das Jahr 2040 und in drei Teilschritten gezeigt. Zunächst wird die potenzielle Gesamtmenge nach den Bestandszahlen der Umweltbundesamt-Szenarios Transition, wie im Kapitel 7.1 errechnet, dargestellt. Zusätzlich wird das Umweltbundesamt-Szenario WEM hier ebenfalls dargestellt, dass eine Entwicklung ohne ambitionierte Klimapolitik impliziert. Nach den LIB-Verlusten durch Gebrauchtwagen-Exporte, wird die LIB-Sammelmenge mit und ohne Re-Use gezeigt, wobei die Menge mit Re-Use eine zeitliche Verzögerung zur Folge hat, d.h. die LIB-Mengen gelangen zu einem späteren Zeitpunkt in die EoL-Phase. Die Recyclingmengen beinhalten schlussendlich die LIB-Mengen unter Berücksichtigung einer zeitlichen Verzögerung durch Re-Use, des Exports an Gebrauchtwagen und des Imports von EoL-LIB im Falle einer Anlage in Österreich. Daraus ergibt sich eine Menge von etwa 120.000 bis 135.000 Tonnen, die ab dem Jahr 2040 in Österreich jährlich recycelt werden kann.

Bei einer Anlagenkapazität von etwa 10.000 bis 15.000 Tonnen pro Jahr wird deutlich, dass eine Recyclinganlage auch in Österreich voll ausgelastet wäre, auch wenn der Exportanteil steigen würde. Wie in Abbildung 16 ersichtlich, ist bereits ab dem Jahr 2028 eine jährliche Recyclingmenge von etwa 10.000 Tonnen möglich. Es ist aber immer zu Bedenken, dass diese Abschätzung auf den enormen Anstieg an E-Fahrzeugen (in den nächsten 20 Jahren auf das Hundertfache) zurückzuführen ist, die im Transition-Szenario angenommen wurden. Es ist zu hinterfragen, ob die Energiewende und damit die Elektrifizierung des Verkehrssektors mit einer Bestandszahl von 5,2 Mio. Stück Batterie-E-Fahrzeuge im Jahr 2040 für Österreich hinsichtlich Ressourcenschonung als sinnvoll erachtet werden kann und ob nicht andere Maßnahmen für eine effizientere Nutzung unserer Ressourcen, wie z.B. Car-sharing oder Nutzung von öffentlichen Verkehrsmitteln, zielführender wäre.

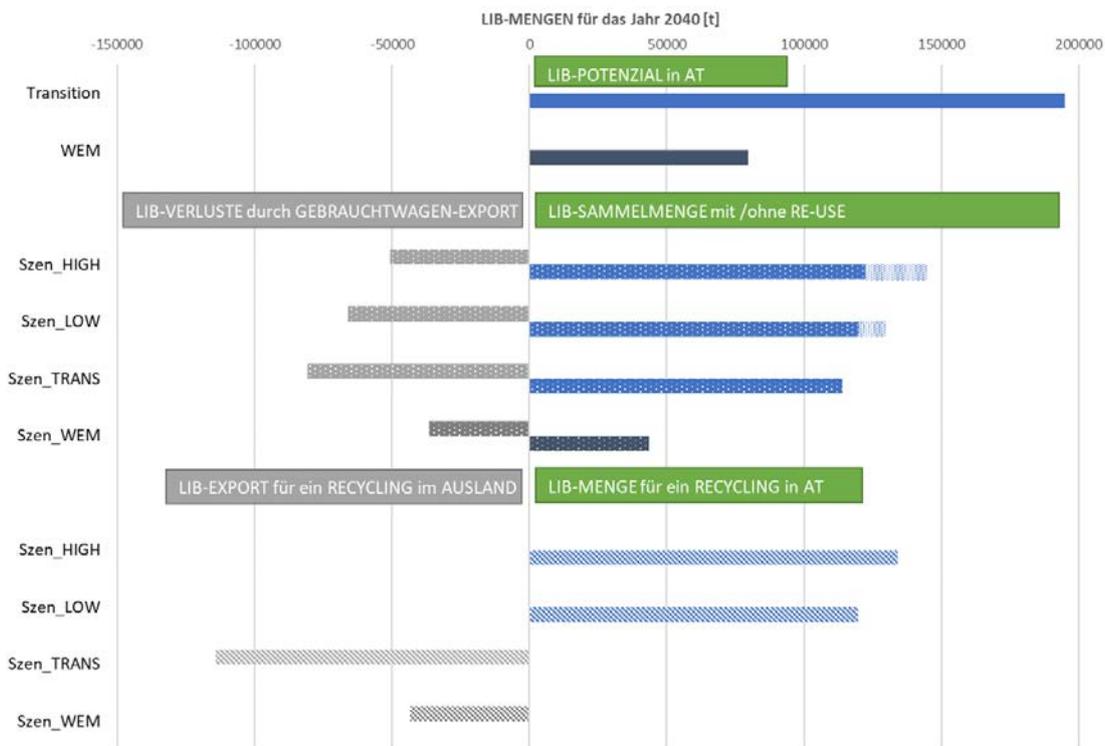


Abbildung 15: Abschätzung der LIB-Mengen für das Gesamtpotenzial an EoL-LIB, für die Sammlung und das Recycling nach vier vordefinierten Szenarien für das Jahr 2040 in Tonnen.

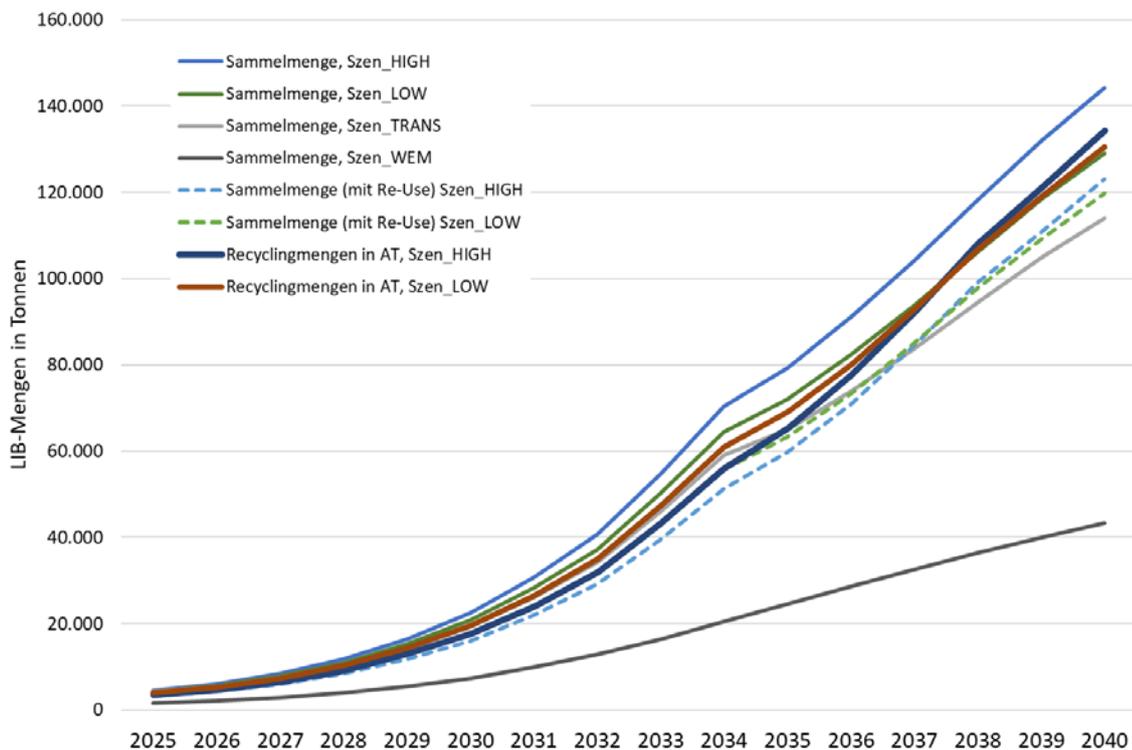


Abbildung 16: Abschätzung der LIB-Mengen nach den vier vordefinierten Szenarien von 2025-2040 in Tonnen

7.3 Szenarienbeschreibung für die ökonomische Modellierung

In der ökonomischen Analyse wird das Aufkommen an EoL-LIB des Szenarios Szen_HIGH zugrunde gelegt (Kapitel 7.1). Für die Analyse werden zwei Vergleichsszenarien erstellt. Einerseits das Recyclingszenario (szen_HIGH). Hier wird angenommen, dass das Recycling von EoL-LIB in Österreich stattfindet und das gesamte Aufkommen behandelt wird. Die entsprechenden Anlagen sind zu bauen und die daraus gewonnenen Materialien werden auf dem Weltmarkt veräußert. Dem wird die Situation gegenübergestellt, in der das gesamte Aufkommen der EoL-LIB exportiert wird, das Exportszenario.

Da die Profitabilität solcher Anlagen und damit auch die österreichische Wertschöpfung vom internationalen Umfeld, insbesondere dem Preisumfeld abhängig sind, werden Bandbreiten für die Preise wiedergewonnener Materialien definiert. Ein mittleres, oberes und unteres Preisband, wobei historische Höchst- und Niedrigstände die Bandbreite definieren. Das Recyclingszenario wird für alle 3 Preisbänder mit dem ökonomischen Modell WIFO.DYNK geschätzt.

Die resultierenden Wertschöpfungseffekten werden mit dem Exportszenario verglichen, in dem keine Anlage in Österreich erbaut wird und die Verkaufserlöse in Form von Betriebsgewinnen zur heimischen Wertschöpfung beitragen. Da die sich künftig ergebenden Exportpreise unklar sind, wurden ebenfalls Bandbreiten an Exportpreisen angenommen. Die verwendeten Exportpreise sind so gewählt, dass sie ähnliche Wertschöpfungseffekte aufweisen wie das Recyclingszenario. Daraus lässt sich abschätzen, ab welchen Preiskonstellationen (Exportpreis von EoL-LIB und Preise für Sekundärmaterialien) es positiv für die heimische Wertschöpfung ist, die Recyclingaktivität durchzuführen.

In der ökonomischen Analyse wird eine Musteranlage definiert. Je nach Aufkommen von EoL-LIB muss in eine solche Anlage investiert werden, um die Massenströme verarbeiten zu können. Für jede der 3 Preissituationen wird die Profitabilität des Betriebes der Anlagen, aus betriebswirtschaftlicher Sicht, anhand der Ermittlung des Kapitalwerts („net present value“, NPV) abgeschätzt. Die Herangehensweise ist analog zu Thies et al. (2018). Dieser Kapitalwert besteht aus dem summierten Cashflow (1) bis 2040. Dies sind die Kosten minus Erlöse aus verkauften Materialien zuzüglich dem Wiederverkaufswert¹¹ der Anlage

$$CF_t = \sum CF_t^{Investition} + \sum CF_t^{Wiederverkaufswert} + \sum CF_t^{Betriebskosten} + \sum CF_t^{Materialien} \quad (1)$$

Der Cashflow wird diskontiert und aufsummiert (2), wobei hier ein Diskontsatz von 5 % angenommen wurde. Ein NPV unter 0 bedeutet, dass die Anlage nicht profitabel ist.

$$NVP = \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+i)^t} \quad (2)$$

Folglich ist der NPV von der Preissituation und somit vom internationalen Umfeld abhängig. Wenn die Verkaufspreise der wiedergewonnenen Materialien niedrig sind, wirkt sich das negativ auf den NPV aus. Da in

¹¹ Wiederverkaufswert wird vereinfacht als Restwert (Anschaffungskosten minus kumulierte Abschreibungen) berechnet

dieser Analyse die Preise bis 2040 sowie die Investitions- und Betriebskosten die Eingangsgrößen sind, kann für jede Preiskonstellation ein NPV ermittelt werden.

Wenn in einem Szenario der NPV einer Anlage im Zeitraum bis 2040 negativ, also unter null ist, ist diese aus betriebswirtschaftlicher Sicht der Investoren unrentabel. Damit in einer solchen Situation die Investition trotzdem durchgeführt wird, wird angenommen, dass eine Entsorgungsgebühr eingeführt werden kann, die von den Konsumenten (private Haushalte) zu entrichten ist und die an die Betreiber der Recyclinganlagen fließt. Im makroökonomischen Modell bedeutet dies Zusatzausgaben für Haushalte und eine Reduktion von Ausgaben für andere Güter, was negative Wertschöpfungseffekte nach sich zieht. Hier ist anzumerken, dass ein Prozess, der aus betriebswirtschaftlicher Sicht unrentabel ist, aus gesamtwirtschaftlicher Sicht durchaus positiv wirken kann, und zwar in Form eines positiven Beitrags zum Bruttoinlandsprodukt (BIP). Ein negativer NPV bedeutet lediglich, dass eine Investition sich aus Investorensicht nicht lohnt und es unwahrscheinlich ist, dass diese ohne weitere Anreize, wie etwa Gebühren, Subventionen oder wirtschaftspolitische Rahmenbedingungen getätigt wird. Darüber hinaus bewertet ein negativer NPV auch keine positiven externen Effekte wie etwa positive Umwelt- und Klimaeffekte des Recyclings, Aspekte der Rohstoffsicherheit oder die Entwicklung industriellen Know-hows, das mit der Errichtung und dem Betrieb einer derartigen Recyclinganlage verbunden ist (Stichwort Umwelttechnik).

7.4 Ökonomische Effekte

7.4.1 Das Modell WIFO DYNK

Die Abschätzung der gesamtwirtschaftlichen Effekte der Investitionen bzw. der Betrieb von LIB-Recyclinganlagen wird mit einer traditionellen Input-Output-Analyse durchgeführt, welche im Modell WIFO.DYNK (Dynamic New Keynesian) umgesetzt wurde (Kirchner et al. 2019). Der WIFO.DYNK Modellansatz ist modular aufgebaut, hat einen Input-Output-Modellkern, ähnelt aber DSGE (Dynamic Stochastic General Equilibrium) Modellen da es einen expliziten Anpassungspfad beschreibt, der sich langfristig einem Gleichgewicht nähert. Die Bezeichnung „New Keynesian“ bezieht sich auf die Existenz der Vollbeschäftigung in der langen Frist, die in der kurzen Frist aufgrund von institutionellen Rigiditäten nicht erreicht wird. Diese Rigiditäten beinhalten Budgetbeschränkungen der Konsumenten (abgeleitet von der permanenten Einkommenshypothese), Lohnrigiditäten (Wettbewerb am Arbeitsmarkt) und unvollkommener Kapitalmärkte. Je nach Abstand zum langfristigen Gleichgewicht können sich die Reaktionen der makroökonomischen Aggregate (aufgrund exogener Schocks) substantziell unterscheiden.

Eine zentrale Anwendung von WIFO.DYNK ist die Möglichkeit, geänderte physische Materialströme an monetäre Strukturen der Input-Output-Tabelle anzuhängen und die damit verbundenen ökonomischen Effekte zu analysieren. Diese Materialstromänderung kann aus unterschiedlichen Hintergründen kommen. Es kann beispielsweise die Wiederverwendung vormals entsorgter oder exportierter Produkte sein, was zu geänderten Import- und Exportströmen führt, oder die Hebung von Sekundärmaterialien (z.B. Schrotte, Altpapier), deren Wiedereinsatz den Bedarf an Primärmaterialien (z.B. Holz und Erz) reduziert. Zu den ökonomischen Effekten der Materialstromänderung kommen zusätzlich die Effekte der Sammlungsaktivitäten, die Investition in Behandlungsanlagen und deren Betrieb.

Für das vorliegende Projekt wurden die Module, die die genannten „New Keynesianischen“ und dynamischen Elemente simulieren, nicht aktiviert, da dadurch das Ergebnis von Parametern (u.a. Arbeitslosenrate, Erwerbsbevölkerung, Stand des technischen Fortschritts) beeinflusst wäre und somit schwerer nachvollziehbar. Dieses vereinfachte WIFO.DYNK entspricht somit einer Input-Output-Analyse (IO-Analyse), die um endogenen Konsum erweitert ist. Auf Basis dieser kann dargestellt werden, wie viele Güter entlang der Vorleistungskette in einer Wirtschaft produziert werden, wenn Investitionen getätigt werden oder wenn sich Strukturen ändern, z.B. durch den Betrieb einer neuen Recyclinganlage. Die Effekte, die so dargestellt werden, umfassen direkte, indirekte und induzierte Effekte. Die direkten Effekte beziehen sich auf Investitionen und Betrieb der Anlagen. Indirekte Effekte berücksichtigen die Güterproduktion und Beschäftigung, die durch die geänderte Nachfragestruktur und die dafür notwendige Produktion an Vorleistungen in anderen Sektoren. Die mit der erhöhten Produktion verbundene Einkommenssteigerung wirkt positiv auf den privaten Konsum, der nochmals auf die Nachfrage wirkt. Dieser Effekt ist als „konsuminduzierter Effekt“ zu interpretieren.

Um die Existenz der Recyclinganlagen mittels IO-Analyse zu bewerten, wurde ein zusätzlicher Sektor in die IO-Tabelle eingefügt, der ausschließlich die Anlagen darstellt. Die erzeugten Materialien werden dem Export zugeführt und somit heimische Wertschöpfung und Beschäftigung direkt, indirekt und induziert geschaffen. Um den jährlichen Effekt des Betriebs der Anlagen analysieren zu können, wurde die Struktur und Endnachfrage für 20 Jahresperioden (2020 – 2040) fortgeschrieben und dazu die jährlichen Szenarien eingespeist. Somit ist der isolierte ökonomische Effekt der Existenz der Anlagen sichtbar.

7.4.2 Eingangsparemeter

7.4.2.1 Investitions- und Betriebskosten

Die Investitionskosten für Recyclinganlagen sind von einer Reihe von Parametern abhängig. Diese umfassen den Standort, ob die Anlage Teil eines größeren Komplexes ist oder freisteht, welcher Teil des Recycling-Prozesses abgehandelt wird, Kapazität, regionale Anforderungen oder sonstige spezifische Investitionen. In dieser Untersuchung wird vereinfachend von einem Mustertyp einer Anlage bzw. Anlagenkomplex ausgegangen, der alle Elemente des Recyclingprozesses vom Sammeln bis hin zur Bereitstellung der wiedergewonnenen Materialien beinhaltet.

Tabelle 15: Eingangsdaten für Modellierung: Investitions- und Betriebskosten einer exemplarischen Recyclinganlage für LIB in Österreich.

Kosten Recycling-Anlage

	Kapazität	Investition ³	Fixe Betriebskosten ¹	Variable Betriebskosten ¹	Ökonomische Lebensdauer ²
	t.a	€	€/a	€/t	a
Gebäude	-	3.648.000	66.000	0	20
Behandlung, Entladung und Transport	6.000	386.500	2.400	210	20
Zerlegung	6.000	44.000	480	430	20
Mechanische Behandlung (Lösungsmittel extraktion)	6.000	6.171.000	684.000	0	20
Hydro/Pyrometallurgische Behandlung	6.000	9.750.500	1.080.755	0	20
Gesamtanlage	6.000	20.000.000	1.833.635	640	

¹ abgeleitet aus Fig. 15.4 in Thies et al. 2018; ² Annahme, ³ Gesamtinvestitionsvolumen aus Experteninterview; Investitionen für Gebäude, Behandlung, Zerlegung und mechanische Behandlung aus Thies et al. 2018

Q: Thies et al 2018, Experteninterview, WIFO-Berechnungen

Bezüglich der angenommenen Investitionskosten werden hier zwei Quellen kombiniert (siehe Tabelle 14). Die erste Quelle umfasst die Investitionskosten für Gebäude, Behandlung (inkl. Entladung und Transport), Zerlegung und die mechanische Behandlung. Hierfür werden die Kostensätze als auch die Kapazität in Jahrestonnen aus Thies et al. (2018) herangezogen. Darin wird jedoch nicht von einer Hydro- und Pyrometallurgischen Behandlungsanlage ausgegangen. Da wir von einer solchen Anlage in Österreich ausgehen wurde die Musteranlage dahingehend erweitert. Auf Basis von Expert*inneninterviews wurden die Gesamtinvestitionskosten für einen solchen Komplex auf 20 Mio.€ für eine Kapazität von ca. 6.000 Tonnen pro Jahr geschätzt. Folglich wurden die Investitionskosten der Hydro- und Pyrometallurgischen Behandlungsanlage auf fast 10 Mio.€ festgelegt. Fixe Betriebskosten sind Kosten proportional zu den Investitionskosten (Instandhaltung, Versicherung etc.) und umfassen auch Lohnkosten von Produktion- und Kontrollpersonal deren Anwesenheit notwendig ist, unabhängig vom Durchfluss. Variable Betriebskosten, also Kosten die von der Durchflussmenge abhängig sind, wurden aus der Modellanwendung in Thies et al. (2018) abgeleitet¹².

7.4.2.2 Recyclingprodukte

Das Recycling von EoL-LIB wird hier vereinfacht als Prozess mit Input und Output-Größen angenommen. Als Input gehen Altbatterien und die dazu nötigen Kosten ein. Als Output stehen Materialien für den Verkauf zur Verfügung.

¹² Variable Betriebskosten werden in Thies et al. (2018) nicht direkt ausgewiesen. Auf Basis der Ergebnisse dargestellt in Fig. 15.4 in Kapitel „Results from Model Application - 15.5“ wurden die hinterlegten variablen Betriebskosten in der Höhe von 210 und 430 €/t hergeleitet.

Tabelle 16: Endprodukte und -materialien des Recyclingprozesses einer Tonne LIB.

Endprodukt/ -material	Anteil ¹		Ausbeute ²	
	an 1 t. LIB	%	bis 2025	bis 2030
Aluminium Schrott	30	%	95	95
Kupfer Schrott	11	%	99	99
Stahl Schrott	7	%	97	97
Elektronik Schrott	3	%	60	60
Mangan	6	%	30	70
Nickel	3	%	90	95
Lithium	1	%	35	70
Cobalt	1	%	90	95
Entsorgung; ungefährlicher Abfall	22	%		
Entsorgung; gefährlicher Abfall	10	%		
Sonstige Stoffe (Sauerstoff)	6	%		

¹ Basierend auf Pistoia, G. & Liaw, B. (2018)

² Experten-Annahmen

Tabelle 16 beschreibt in welche Produkte die EoL-LIB durch die Behandlungsschritte in der Recyclinganlage verarbeitet werden. Grundlage für diese Zusammensetzung¹³ wurde aus Pistoia, G. & Liaw, B. (2018) entnommen¹⁴. Bezüglich der Ausbeute wird von den in Tabelle 16 angegebenen Werten ausgegangen.

7.4.2.3 Preise der Recyclingprodukte

Für die jeweiligen Endprodukte und Materialien in Tabelle 17 wurden Verkaufspreise für das Anfangsjahr der Analyse (2020) festgelegt. Für jene Materialien, für die eine Prognose in der Weltbank-Publikation (World Bank 2021) existiert, wurde diese Prognose verwendet, um die Preise¹⁵ fortzuschreiben. Für jene Materialien, für die ein passendes „Proxy“-Material in der Weltbank-Prognose existiert (z.B. Eisenerz als Proxy für Stahl-Schrott), wird die Entwicklung des Proxypreises verwendet, um die Preise fortzuschreiben. Bei Materialien, für die keine Prognose existiert, wurde eine konstante Preisentwicklung angenommen. Weiters wurde ein oberes und unteres Preisband definiert, welche die Bandbreite möglicher Preisverläufe darstellen sollen. Diese Preisbänder beziehen sich auf historische Höchst- bzw. Niedrigstände der jeweiligen Materialien. Für alle drei Preisvarianten in Tabelle 18 wurde die ökonomische Analyse ausgeführt. Der Mittlere Preisverlauf orientiert sich an der Weltbank-Prognose (siehe Tabelle 18) bzw. an konstanten Preisen für die restlichen Materialien (siehe Preisverläufe

¹³ EMC (Ethyl Methyl Carbonat), DMC (Diethyl carbonat) und EC (Ethyl Carbonat) dem gefährlichen Abfall zugeordnet

¹⁴ Figure 4 General material composition of traction batteries 80 % NMC, 20 % NCA

¹⁵ Zu laufenden Preisen

in Anhang 11.3). Für die Oberen und Unteren Preisbänder wird angenommen, dass ein historischer Höchst- bzw. Niedrigstpreis im Jahr 2025 erreicht wird. Beispielsweise verläuft der Preis von Aluminium-Schrott im „oberen Preisszenario“ von 600 €/t in 2020 auf 1.000 €/t in 2025 und verbleibt danach auf diesem Niveau. Diese Variation der Preise ist nicht notwendigerweise realistisch und dient vielmehr dazu, die Bandbreite möglicher Ergebnisse anhand einer Sensitivitätsanalyse aufzudecken.

Tabelle 17: Historische Höchst- und Niedrigstpreise als Grundlage für die Berechnung von Preisbändern für wiedergewonnene Materialien.

Endprodukt/ -material	in 2020	Preise Höchst- preis €/t	Niedrigst- preis
Aluminium Schrott ¹	600	930	560
Kupfer Schrott ¹	3.800	5.430	2.260
Stahl Schrott ¹	700	1.080	360
Elektronik Schrott ¹	300	300	300
Mangan ²	1.700	2.300	1.700
Nickel ²	12.100	32.670	8.420
Lithium ³	5.400	20.210	5.400
Cobalt ³	28.900	62.970	23.300
Entsorgungskosten f. ungefährlichen Abfall ⁴	150	150	150
Entsorgungskosten f. gefährlichen Abfall ⁴	500	500	500

Q: Für 2020: ¹ Thies et al. (2018), ² World Bank (2021) ³ tradingeconomics.com (2021a,b), ⁴ Expertenmeinung

Für die Preise von Schrotten und Abfallentsorgung konnten die Werte aus Thies et al. (2018) verwendet werden. Jene Preise für Materialien, die aus der Schwarzmasse gewonnen werden, nämlich Lithium, Cobalt, Nickel und Mangan, sind darin nicht enthalten und wurden aus anderen Quellen bezogen (siehe Tabelle 17).

Tabelle 18 fasst die Grundlage für die Gestaltung der Preisbänder zusammen. Für die wiedergewonnenen Schrotte und Metalle wurde jeweils ein „Proxy“ Material definiert, das die Preisentwicklung vorgibt. Langfristige Preisentwicklungen für Sekundärrohstoffe sind in der Literatur nicht verfügbar. Das Obere und Untere Preisband orientiert sich jeweils an der historischen Entwicklung des Proxy-Materials. Beispielsweise wird für den Preis von Kupferschrott der Kupferpreis als Proxy herangezogen. Das umfasst die historische Entwicklung als auch die Prognose der Weltbank (World Bank (2021)). Der Kupferpreis schwankte historisch zwischen 38 % über dem Niveau von 2020 (Jahresdurchschnitt) und 32 % darunter. Diese Bandbreite wird übertragen auf den Kupferschrottpreis.

Tabelle 18: Proxymaterialien und Grundlage für Berechnung der Preisbänder.

Material	Proxy Material	Mittel	Preisband	
			Oben ²	Unten ²
			in%	
Aluminium Schrott	Aluminium	WB Prognose ¹	55	-6
Kupfer Schrott	Kupfer	WB Prognose ¹	43	-40
Stahl Schrott	Eisenerz	WB Prognose ¹	54	-49
Mangan	Mangan	konstant	0	0
Nickel	Nickel	konstant	35	0
Lithium	Lithium	konstant	170	-30
Cobalt	Cobalt	konstant	274	0

¹ World Bank (2021)

² Historische Höchst/Niedrigstände (soweit Verfügbar, max. 2005);

World Bank (2021) für Aluminium, Kupfer, Eisenerz, Nickel

Statista (2021) für Mangan

tradingeconomics.com (2021a, b) für Lithium Carbonat, Cobalt

7.4.3 Investitionen

In der ökonomischen Simulation wird vereinfachend angenommen, dass Anlagen gebaut werden, sobald die dafür notwendigen EoL-LIB Mengen zur Verfügung stehen. D.h. wenn aufgrund des Aufkommens eine Anlage mit einer Kapazität von 6.000 Jahrestonnen in Österreich benötigt wird, wird diese im gleichen Jahr erbaut, um das gesamte Aufkommen zu verarbeiten, ohne die EoL-LIB in Gänze zu exportieren bzw. wie in Szen_HIGH angenommen. Die aus dieser Mechanik und den aufkommenden Mengen resultierende Kapazität und Investitionsaktivität sind in Abbildung 17 zusammengefasst.

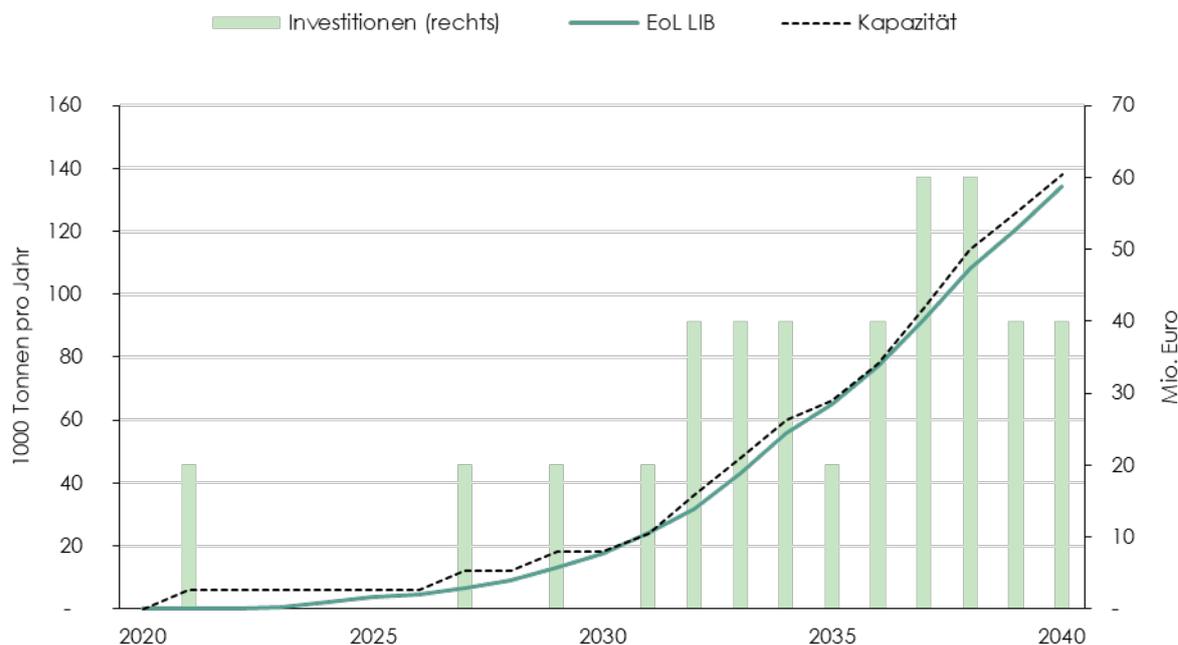


Abbildung 17: Entwicklung Aufkommen EoL-LIB; Recyclingkapazität und Investitionsvolumen.

Die Kapazität wird somit laufend mit dem aufkommenden Strom an EoL-LIB ausgebaut und angepasst. Im Jahr 2040 wird somit eine Kapazität von ca. 140.000 Jahrestonnen erreicht, was 23 Anlagen mit je einer Kapazität von 6000 Tonnen entspricht. . Kumuliert umfassen die notwendigen Investitionen 460 Mio.€ bis 2040.

7.4.4 Makroökonomische Effekte

Die makroökonomischen Effekte sind die Summe aus Investitionen sowie der Güter- und Dienstleistungsnachfrage aus dem Betrieb und dem induzierten Effekt, der durch die ausbezahlten Löhne und Gehältern der Recyclingbetriebe entsteht, sowie dem Effekt in den vorgelagerten Sektoren.

Bezüglich der Profitabilität der Anlagen wurde für die Situation im Oberen und Mittleren Preisband ein positiver NPV für die Aktivität von Anlagen bis 2040 und 5% Diskontsatz ermittelt. Wenn die Preise sich in das untere Preisband entwickeln, wird der NPV negativ, d.h. die diskontierten Kosten übersteigen die diskontierten Erlöse. Um den summierten NPV aller Anlagen auf 0 zu erhöhen, musste eine Entsorgungsgebühr („Gate Fee“) von 0,185 €/kg EoL-LIB, also 74 € für eine 400 kg schwere LIB, eingehoben werden. Bei dem gegebenen Massenstrom bedeutet dies im Jahr 2040 mit dem höchsten Aufkommen 25 Mio.€ an Kosten für die privaten Haushalte. Das verfügbare Einkommen reduziert sich entsprechend und wirkt negativ auf die Wertschöpfung. Die im Folgenden dargestellten Ergebnissen fokussieren sich auf gesamtwirtschaftliche Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte.

7.4.4.1 Wertschöpfung

Die Auswirkung auf die Wertschöpfung in Österreich ist in Abbildung 18 dargestellt. Mit der steigenden LIB Menge und der steigenden ökonomischen Aktivität der Recyclinganlagen steigen die Wertschöpfungseffekte in der gesamten Ökonomie. Die Entwicklung im Umfeld des mittleren Preisbandes ist in Balken dargestellt und untergliedert in die direkten, indirekten und induzierten Wertschöpfungseffekte. Der gesamte Wertschöpfungseffekt in einem internationalen Umfeld mit niedrigen Preisen und hohen Preisen ist mit den strichlierten

Pfaden angedeutet. Dies zeigt auf, wie groß die Bandbreite der Wertschöpfungseffekte bei gleicher Mengenentwicklung der EoL-LIB sein kann und wie stark der Einfluss des internationalen Marktes ist.

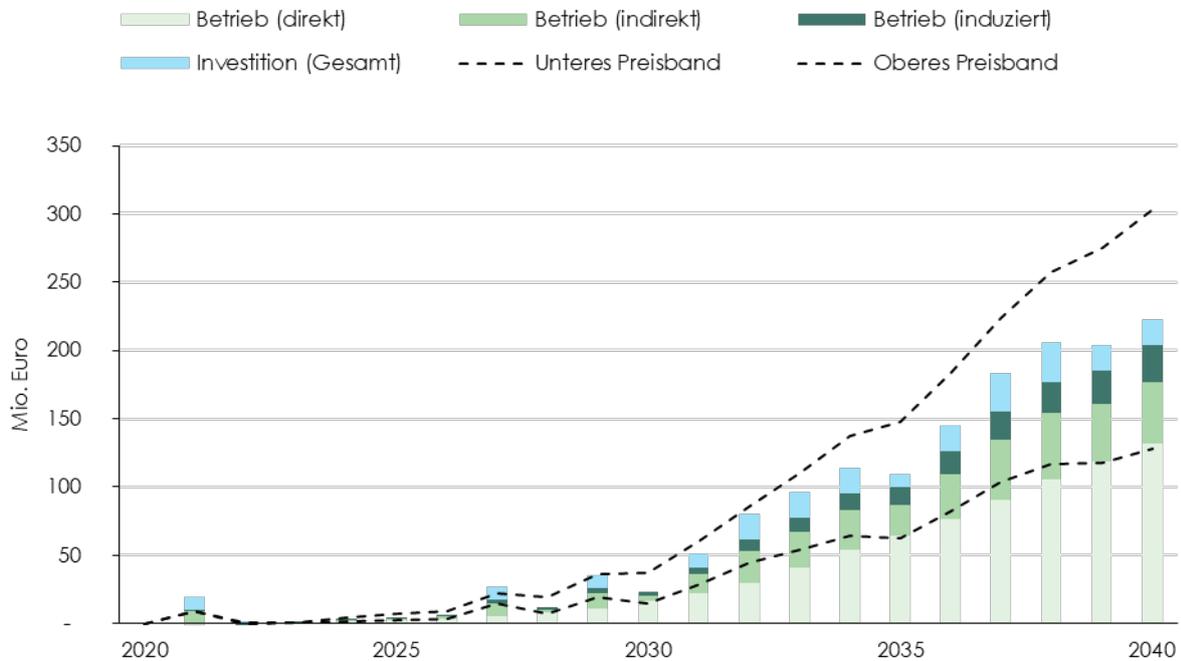


Abbildung 18: Ökonomische Effekte – Wertschöpfung, WIFO-Berechnungen.

Im Jahr 2040 im Mittleren Preisband werden etwas über 220 Mio. € generiert. Das entspricht etwas über 0,06 % des österreichischen BIP in 2019 (397 Mrd. €). Die Detaildaten sind im Anhang 11.3 zusammengefasst.

7.4.4.2 Beschäftigung

Analog zu den Wertschöpfungseffekten entwickelt sich die Beschäftigung (siehe Abbildung 19). Auch hier kann ebenfalls zwischen direkten, indirekten und induzierten Effekten unterschieden werden. Direkte Beschäftigungseffekte wurden hier anhand der Personalkosten (siehe Eingangsparameter) und einem Kostensatz pro Beschäftigten¹⁶ geschätzt. Es wurden 75 Beschäftigte pro Anlage mit einer Kapazität von 6.000 t/a angenommen. Im Jahr 2040 mit dem höchsten Beschäftigungseffekt sind ca. 2.600 Vollzeitäquivalente (VZÄ) verbundener Beschäftigung berechnet, was im Vergleich zu ca. 3,8 Mio. VZÄ der Beschäftigung in Österreich im Jahr 2018 ca. 0,07 % entspricht.

¹⁶ Annahme 42.000 €/Beschäftigten – in Anlehnung an den Kostensatz für Beschäftigte in Sektor NACE 38 („Sammlung, Behandlung und Beseitigung von Abfällen; Rückgewinnung“) lt. Leistungs- und Strukturerhebung von Statistik Austria für 2017

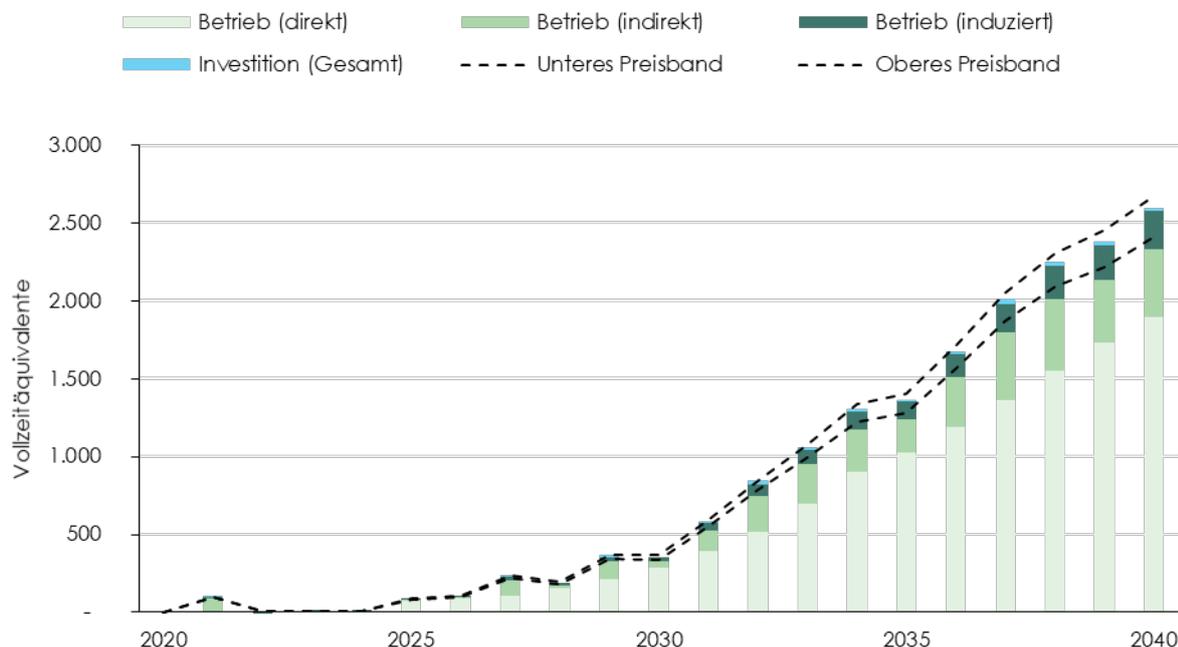


Abbildung 19: Ökonomische Effekte – Beschäftigung, WIFO-Berechnungen.

Da ein großer Teil der direkten Effekte aus Löhnen, Gehältern und Gewinnen besteht, fließt nur ein relativ kleiner Teil in den Kauf von Vorleistungsprodukten. Das bedeutet, dass zwar die Recyclingaktivität relativ arbeitsintensiv ist, aber in der Vorleistungskette nur wenig Arbeit benötigt wird. Das führt zu relativ niedrigen indirekten und induzierten Beschäftigungseffekten.

7.4.4.3 Szenarienvergleich: Recycling versus Export von EoL-LIB

Die Herstellung und der Betrieb heimischer Recyclinganlagen kann einer Situation gegenübergestellt werden in der die EoL-LIB ausschließlich exportiert werden. Es wird vereinfachend angenommen, dass die Exporterlöse ohne zusätzliche Kosten als Gewinne für die Exporteure (z.B. Händler) verbucht werden, somit direkt zum BIP beitragen – ohne Beschäftigungseffekte. Die möglichen Preise künftiger EoL-LIB Exporte sind noch unklar. Daher wurde eine Bandbreite an Exportpreisen gesetzt und die damit verbundene Wertschöpfung mit der Wertschöpfung des Betriebs der Recyclinganlagen verglichen. Abbildung 20 zeigt in blau die Wertschöpfungseffekte des Exports zu bestimmten Exportpreisen. Das erste blaue Band spiegelt die Bandbreite des Wertschöpfungseffekts bei einem Exportpreis bis zu 600 €/t LIB wider. Das zweite blaue Band den Bereich bei einem Exportpreis von 600 – 1.200 €/t und das dritte Band geht bis zu einem Exportpreis von 2.400 €/t. Letzteres ist der Exportpreis der ähnliche Wertschöpfungseffekte in Österreich generiert wie der Betrieb der Recyclinganlagen und der Verkauf der gewonnenen Materialien in günstigem internationalem Umfeld.

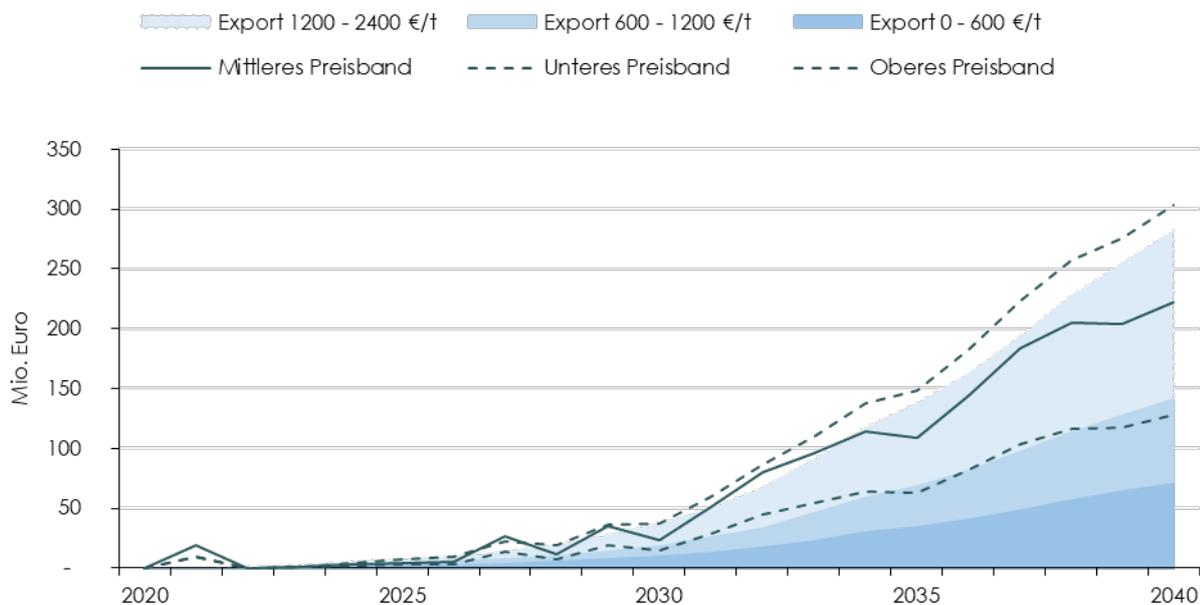


Abbildung 20: Ökonomische Effekte – Szenario-vergleich Wertschöpfung, WIFO-Berechnungen

7.3.4.4 Synopsis

Die hier vorgestellte Methode zur Bewertung von EoL-LIB Recycling in Österreich unterstellt vier Wirkungskanäle, die auf die heimische Wertschöpfung Einfluss nehmen. Der erste Wirkungskanal ist die Investition in Recyclinganlagen. Durch diese Tätigkeit werden Investitionsgüter nachgefragt die u.a. im Inland produziert werden und somit heimische Beschäftigung entfalten und Wertschöpfung generieren. Der zweite Wirkungskanal ist der Betrieb der Anlagen. Hierbei werden Güter, Dienstleistungen und Arbeitskraft eingesetzt, um die gewünschten Produkte zu erzeugen. Die Bereitstellung dieser Güter und Dienstleistungen geschieht unter anderem durch vorgelagerte heimische Firmen und somit werden dort indirekte positive Effekte initiiert. Die Entlohnung der Arbeitskräfte in der Recyclinganlage ist nicht nur Teil der direkten Wertschöpfung, sondern auch Grundlage für den induzierten Konsumeffekt, da ein Teil dieser ausbezahlten Löhne und Gehälter von den privaten Haushalten für Konsumzwecke verwendet wird. Der dritte Wirkungskanal sind die Erlöse aus dem Verkauf der wiedergewonnenen Materialien, die in der vorliegenden Simulation auf dem internationalen Markt veräußert werden. Da die Materialströme des Anlagenbetriebs gegeben sind, sind die Erlöse stark von den internationalen Verkaufspreisen abhängig. Die Erlöse werden einerseits für die Deckung der Kosten (Personal, Material) und andererseits für die Rückzahlungen der Investitionskredite (in Höhe der Abschreibungen) aufgewendet. Die Differenz aus Erlösen und Kosten stellen Betriebsgewinne dar. Betriebsgewinne sind Teil der direkten Wertschöpfung und tragen somit direkt zum BIP bei. Eine weitere Verwendung der Betriebsgewinne, beispielsweise für Gewinnausschüttungen oder weitere Investitionen, wird in dieser Simulation nicht analysiert. Somit haben Betriebsgewinne in dieser Analyse keine indirekten oder induzierten Effekte. Der vierte Wirkungskanal sind die Entsorgungsgebühren. Diese werden exogen definiert, wenn der Betrieb von Recyclinganlagen aufgrund der Höhe der Verkaufspreise nicht rentabel ist und werden von den Fahrzeugbetreibern (aus Vereinfachung auf private Haushalte begrenzt) bezahlt. Diese Gebühr reduziert das verfügbare Einkommen, den Konsum und die damit verbundene Wertschöpfung in der Volkswirtschaft.

Um die Höhe der Entsorgungsgebühr zu definieren, wurde die folgende Analyse angewendet. Da die Verkaufserlöse von den Preisen für Materialien auf dem internationalen Markt abhängen, sind die Betriebsgewinne (als Differenz aus Erlöse und Kosten) ebenfalls durch diese Preise bestimmt. Sind die Materialpreise hoch spiegelt sich das in hohen Betriebsgewinnen wider. Sind die Preise jedoch niedrig ergeben sich geringe oder gar negative Betriebsgewinne. In letzterer Situation ist eine Investition aus betriebswirtschaftlicher Sicht unrentabel und würde auch nicht getätigt werden. Um diese rein betriebswirtschaftliche Sicht auf unrentable Investitionen zu überwinden und – in diesem Fall - die weiteren umwelt-ökonomischen Funktionen des Recyclings von LIB, wie Bereitstellung von Sekundärrohstoffen und Ressourcensicherheit, reduzierte THG Emissionen und weitere positive Umwelteffekte zu valorisieren, wurde eine Entsorgungsgebühr eingeführt, die von den privaten Haushalte zu bezahlen ist und den Anlagenbetreibern zukommt, so dass der Betrieb der Anlage profitabel wird. Die Höhe ist so gesetzt, dass zumindest ein Kapitalwert von 0 erreicht wird, also die Anlagen gerade noch rentabel sind. In der vorliegenden Studie waren die Preise im unteren Preisband zu niedrig und eine Entsorgungsgebühr von 0,185 €/kg EoL-LIB wurde gesetzt. In diesem Fall zeigt sich, dass die Anlagen zwar aus betriebswirtschaftlicher Sicht unrentabel sind, aber auf der Grundlage eines gesellschaftlichen Finanzierungsmechanismus einen gesamtwirtschaftlichen positiven BIP-Effekt bewirken und zugleich umweltrelevante Effekte generieren können

8 Technologie-Roadmap und Maßnahmenpakete

Eine optimierte Kreislaufwirtschaft – auch für Lithium-Ionen-Batterien – beginnt mit dem Produktdesign und der Entwicklung von Systemen, die leicht wiederverwendet und recycelt werden können. Nicht minder wichtig ist die Minimierung der Mengen an Materialien, die deponiert oder verbrannt werden müssen. Darüber hinaus sollen ausgediente LIB getestet werden, um die Wiederverwendung zu fordern oder Wiederaufbereitungslösungen für neue sekundäre Anwendungen zu ermöglichen. Bei Recyclingverfahren sind jene Prozesse zu bevorzugen, die hohe Recyclingraten und eine gute Energieeffizienz aufweisen. Dies ermöglicht zudem eine Einsparung von Primärrohstoffen, eine Verringerung des Energieverbrauchs, eine Minimierung des Abfalls, ein sicheres Management von schädlichen Komponenten sowie eine Verbesserung der Rohstoffsicherheit (Mossali et al. 2020).

Da eine Etablierung einer Kreislaufwirtschaft die gesamte Wertschöpfungskette abdeckt, ist es unumgänglich, in jeder Ebene die Verknüpfungen und Wechselwirkungen zu vermitteln. Dies beginnt in den Ausbildungseinrichtungen und reicht bis in die Umsetzung in den einzelnen Betrieben.

8.1 Vorschlag für Maßnahmenpakete – Motivation, Chancen und Risiken

Auf Basis der Stakeholder-Befragungen und des Expert*innenworkshops konnten Maßnahmenpakete zur Erreichung folgender Ziele für Österreich abgeleitet und vorgeschlagen werden:

7. Erhöhung der Rücklaufquote für eine sichere Sammlung
8. Etablierung einer effizienten Demontage
9. Förderung der Wiederverwendung von LIB
10. Erhöhung der Recyclingeffizienz
11. Sicherstellung effektiver wirtschaftspolitischer Rahmenbedingungen
12. Investitionsförderungen und Aufbau von Know-How

Nachfolgend erläuterte Maßnahmenvorschläge gehen von einer gestaffelten Umsetzung aus, um die stufenweise Erreichung der Zielvorgaben entsprechend des Bezugsszenarios „Transition“ zu ermöglichen.

Maßnahmenpaket zur Erhöhung der Rücklaufquote für eine sichere Sammlung

Eine ordnungsgemäße Sammlung, Lagerung und Transport von LIB ist essentiell für einen sicheren Umgang mit LIB, um Kurschlüsse und Brände zu vermeiden. Die getrennte Sammlung von LIB ist dabei Grundvoraussetzung. Derzeit landen noch viele LIB als Fehlwürfe im Restmüll oder können aufgrund der großen Vielfalt an LIB nur schwer identifiziert werden.

Tabelle 19: Maßnahmenpaket zur Erhöhung der Rücklaufquote für eine sichere Sammlung).

Maßnahmen	Start-Jahr	Umsetzungspotenzial in Österreich	Hindernisse & Herausforderungen

Öffentlichkeitsarbeit und bewusstseinsbildende Maßnahmen zur richtigen Verwertung und Entsorgung von LIB und Geräten mit LIB	2021	Hoch	Erschwerte Identifikation von LIB
Erweiterte Herstellerverantwortung (z.B. Vorgaben für Design for Disassembly, DfR und Design for Re-Use)	2030	Niedrig	Noch erschwert da die Entwicklung von LIB in einer dynamischen Innovationsphase steckt. Langfristig gesehen, wäre es jedoch notwendig, um das EoL effizient gestalten zu können.
Klare und eindeutige Kennzeichnung von Geräten mit LIB (möglicherweise ist eine Einteilung nach Zellchemie notwendig)	2021	Mittel	Widerstand von Produzenten ist zu erwarten
Verbringung ins Ausland verringern (EoL-Auto und EoL-LIB getrennt behandeln, neue Geschäftsmodelle, um die Nutzungsdauer im Land zu verlängern)	2021	Hoch	Dynamischer Second-Hand Markt, Trennung zwischen funktionstüchtigen und nicht-funktionstüchtigen Fahrzeugen die ins Ausland verbracht werden, Kundenakzeptanz zur längeren Nutzung von Fahrzeugen (anstatt Kauf von Neufahrzeugen)
Product-Service Geschäftsmodelle (Leasing statt Eigentum) um der Verbringung ins Ausland gegen zu steuern	2021	Hoch	Kundenakzeptanz

Maßnahmenpaket zur Etablierung einer effizienten Demontage

Eine zerstörungsfreie Demontage ermöglicht bzw. erleichtert spezialisierte Recyclingwege und saubere Nebenfraktionen und bietet die Möglichkeit, LIB für eine Reparatur oder für eine Wiederverwendung aufzubereiten. Der hohe Aufwand bei der Zerlegung und die damit einhergehenden Kosten beeinträchtigen die Wirtschaftlichkeit einer manuellen Demontage. Die fehlende Standardisierung des Batterieaufbaus und die große Vielfalt erschweren allerdings eine automatisierte Demontage. Es wird daher folgendes Maßnahmenpaket zur Etablierung einer effizienten Demontage vorgeschlagen (siehe Tabelle 20).

Tabelle 20: Maßnahmenpaket zur Etablierung einer effizienten Demontage (Vorschlag).

Maßnahmen	Start-Jahr	Umsetzungspotenzial in Österreich	Hindernisse & Herausforderungen
Design for Disassembly, um eine zerstörungsfreie und automatisierte Demontage zu ermöglichen	2030	Niedrig	wird nicht von Österreich allein bestimmt; kann jedoch durch öffentlichen und politischen Druck forciert werden.
Standardisierte Aufbauweise und Modularisierung von Batterien	2030	Niedrig	Noch erschwert da die Entwicklung von LIB in einer dynamischen Innovationsphase steckt. Langfristig gesehen, wäre es jedoch notwendig, um das EoL effizient gestalten zu können.
Forschungsbedarf zur Kosteneffizienz einer dezentralen oder zentralen Demontage bzw. Deaktivierung (Transportkosten – ADR, Sicherheitsaspekt, ...)	2021	Hoch	Wirtschaftlichkeit der Demontage; Unsicherheit über weitere Verarbeitung von deaktivierten LIB

In Begleitung zu diesem Maßnahmenpaket werden Empfehlungen für Design für Recycling und Design für Re-Use in Abbildung 21 dargestellt, welche aus den Interviews mit den Expert*innen abgeleitet wurden.

Empfehlungen für Design für Recycling and Design für Re-Use von LIB

Design for Disassembly soll im Wesentlichen eine zerstörungsfreie Demontage ermöglichen. Dies kann erreicht werden durch:

- 1) Standardisierte und modulare Bauweise
- 2) Einheitliche Gestaltung der Verbindungstechnologien, um Zellen bzw. Packs von Modulen trennen zu können
- 3) Ein Verkleben der Bauteile vermeiden
- 4) Sichtbare Platzierung und leicht zugängliche Verbindungen wie Schrauben
- 5) Automatische Erkennung des Batterietyps und einzelner Komponenten, z.B. gekennzeichnet durch QR-Codes oder Blockchain-Technologie
- 6) Informationsweitergabe über Batteriekomponenten und Verbindungstechnologien von der Batterieherstellung bis zum Recycling

Durch **Design for Re-Use** sollen Batterien zur Wiederverwendung („Second Life“) effizient aufbereitet werden. Eine höhere Effizienz könnte erreicht werden durch:

- 1) bis 6) wie bei „Design for Disassembly“
- 2) Informationsweitergabe über „Batteriehistorie“, um State-of-Health feststellen zu können (z.B. Art der Nutzung, Anzahl der Ladezyklen, Ladetätigkeiten etc.)
- 3) Regelung von Gewährleistungspflichten zwischen Batterieherstellern, Automobilindustrie, Batterieaufbereitern und 2nd-Life-Batteriennutzern
- 4) Design der Batterie-„Zelle“ als Kernelement für eine mögliche 2nd-Life-Anwendung

Design for Recycling dient im Wesentlichen dazu, eine hohe Recyclingeffizienz zu erzielen. Dies kann durch folgende Aspekte forciert werden:

- 1) bis 6) wie bei „Design for Disassembly“ bzw. „Design for Re-Use“, um saubere Nebenfraktionen zu erhalten und somit die Recycling-Quote sowie Endproduktqualität zu erhöhen
- 2) Einheitliche Batterietypen mit ähnlichen stofflichen Zusammensetzungen
Einsatz von „recyclingfreundlichen“ bzw. recyclingfähigen Materialien beim Batteriedesign

Abbildung 21: Empfehlungen für Design für Recycling and Re-Use von LIB abgeleitet aus den Expert*innenbefragungen

Maßnahmenpaket zur Förderung der Wiederverwendung von LIB

Primäre Ressourcen sollen weitgehendst geschont werden bzw. so lange wie möglich im Kreislauf gehalten werden. Dies kann einerseits durch Etablierung einer „Closed-Loop“-Verwertung erreicht werden, aber auch durch ein längeres Verweilen in der Nutzungsphase, ermöglicht durch mittels besserer Instandhaltung, Reparatur oder Wiederverwendung. Zur Wiederverwendung von LIB gibt es noch großen Forschungsbedarf hinsichtlich der Feststellung der Rest-Lebensdauer (Lebensdauer im Second-Life), der Haftungs- und Garantiebedingungen, der Weitergabe der Recyclingpflicht sowie der Wirtschaftlichkeit.

Tabelle 21: Maßnahmenpaket zur Förderung der Wiederverwendung von LIB (Vorschlag).

Maßnahmen	Start-Jahr	Umsetzungspotenzial in Österreich	Hindernisse & Herausforderungen
Forschungsbedarf zur Bestimmung des SoH (State of Health) nach der Nutzung (Ex-Post Analysen)	2021	Hoch	Erschwerter Zugang zum Batterie-Management-System (BMS)
Entwicklung von Normen und Standards hinsichtlich Qualität-, Sicherheits- und Performance-Standards	2021	Mittel	Entscheidungen zu Normen und Standards treffen nicht nur Österreich allein. Österreich kann jedoch mit Forschungsprojekten unterstützen.
Besseres Monitoring während der Nutzung und Informationsaustausch (Informationsaustausch mittels neuer Informationsmöglichkeiten (Industrie 4.0, Blockchain), ...)	2025	Hoch	Der Batteriepass lt. BatterieVO ermöglicht ein besseres Monitoring; festzustellen wäre, ob diese Daten auch für eine Abschätzung der restlichen Lebensdauer einer Batterie ausreichend sind.
Entwicklung von Schnelltests für die Alterungsmessung um eine schnelle Identifikation von Re-Use-fähigen Batterien zu ermöglichen	2021	Hoch	Aufgrund der Sicherheitsvorkehrungen und Datenschutz ist der Zugang zum Batterie-Management-System (BMS) erschwert bis unmöglich
Modularer Aufbau und Design for Re-Use (gleichzusetzen mit Design for Disassembly)	2030	Niedrig	Der Einfluss auf Batteriehersteller ist mäßig bis gering.
Gesetzliche Anreize für die Wiederverwendung (z.B. Repairability-Index, Reparatur mit 0 % Steuern)	2030	Hoch	Entscheidungen können nicht von Österreich allein getroffen werden
Gesetzliche Anreize für die Nutzung von Second Life-Batterien (z.B. Bonus-Modelle,	2030	Hoch	Entscheidungen können nicht von Österreich allein getroffen werden
Verlängerung der LIB-Lebensdauer durch Nutzungshinweise und bewusstseinsbildende Maßnahmen, besonders für E-Bikes und EEG	2021	Niedrig	

Maßnahmenpaket zur Erhöhung der Recyclingeffizienz

Auch wenn ein „Closed-Loop“-Verwertung für Batterien nicht oder noch nicht für alle Materialien einer Batterie zu bewerkstelligen ist, so können Maßnahmen getroffen werden, um Technologien zu nutzen, welche die Recyclingeffizienz erhöhen. Dazu wird Maßnahmenpaket zur Erhöhung der Recyclingeffizienz vorgeschlagen.

Tabelle 22: Maßnahmenpaket zur Erhöhung der Recyclingeffizienz.

Maßnahmen	Start-Jahr	Umsetzungspotenzial in Österreich	Hindernisse & Herausforderungen
Verpflichtende Demontage, um saubere Nebenfraktionen zu erhalten und damit effizienteres Recycling zu ermöglichen	2025	Mittel	Wirtschaftlichkeit der Demontage
Bewusstseinsbildung zur Erhöhung der Kundenakzeptanz für recyclingfreundliche Produkte und damit Druck auf die Hersteller	2021	Mittel	
Förderung von Produktionsunternehmen mit nachhaltigen und recyclingfreundlichen Produkten (z.B. Eco-Label für Produkte, steuerliche Anreize [nachhaltig = niedrigere Steuern; nicht-nachhaltig = höhere Steuern], menschenrechtskonforme Rohstoffgewinnung, Recycling-Gütesiegel, ...)	2021	Hoch	Entscheidungen können nicht von Österreich allein getroffen werden
Definition von Recycling, Recycling-Quote, Recyclingfähigkeit,	2021	Hoch	Entscheidungen können nicht allein von Österreich allein getroffen werden
Planung und Errichtung einer Recyclinganlage in Österreich. Dabei ist auf die dynamische Entwicklung im LIB-Sektor auf einen flexiblen Anlagenbetrieb zu achten	2030	Hoch	Mengenverlauf ist zu beobachten und die geeignete Recyclingtechnologie ist danach auszurichten, welche LIB den österreichischen Markt dominieren.

Maßnahmenpaket zur Sicherstellung effektiver wirtschaftspolitischer Rahmenbedingungen

Für ein hochwertiges Recycling von LIB sind regulative gesetzliche Vorgaben von Recyclingquoten und Standards für die Ausbeute an Materialien von essenzieller Bedeutung. Es sollte ein Augenmerk darauf gerichtet werden, die Systemgrenzen des Recyclings klar zu definieren, um eine genaue Berechnung der Recyclingquoten sicherzustellen. Dies betrifft die Festlegung an welchem Punkt der Wertschöpfungskette das Recycling beginnt und an welchem Punkt das Recycling endet. Die Überarbeitung der alten Batterierichtlinie (2006/66/EG)

hin zu einer EU Batterie Verordnung mit entsprechenden Vorgaben für den CO₂-Fussabdruck, den Mindestgehalt an recycelten Materialien, Leistungs- und Haltbarkeitskriterien sowie Kennzeichnungs- und Informationspflichten gilt als ein wesentlicher regulatorischer Schritt in Richtung der Etablierung einer europäischen Wertschöpfungskette für das Recycling von LIB (Start-Jahr 2022). Marktbasierte Mechanismen, wie z.B. eine CO₂-Steuer, wurden von den Stakeholdern zwar als eine Grundlage und als effizientes Steuerungsinstrument für den Übergang zu einer klimaneutralen Wirtschaft betrachtet, sind im Bereich der Etablierung einer Kreislaufwirtschaft von LIB jedoch nicht zielgenau und daher wenig effektiv. Hier bedarf es regulatorischer Eingriffe.

Maßnahmenpaket für Investitionsförderungen und Aufbau von Know-How

Investitionsförderungen für Pilotanlagen im Bereich der Demontage und des Recyclings von LIB sind von zentraler Bedeutung für die Entwicklung von Innovationen im Bereich der Kreislaufwirtschaft von LIB. Dies gilt so lange der Recyclingprozess weder technisch ausgereift noch wirtschaftlich effizient läuft. Wesentliche zu fördernde Entwicklungsschritte bei der Etablierung einer Recycling Wertschöpfungskette von LIB sind der Aufbau von industriellen Strukturen, von Forschungs- und Entwicklungskapazitäten und von technologischem Know-How (Start-Jahr 2021). Neue Formen der Zusammenarbeit zwischen Industrie und Hochschulen werden als besonders erfolgversprechend gewertet, Die Förderung von Industrie-Hochschul-Kooperationen gilt insbesondere im Bereich der missionsorientierten Innovationspolitik, also der Ausrichtung von Innovationen auf gesellschaftlich wünschenswerte Ziele wie u.a. die der Kreislaufwirtschaft als erfolgversprechend. Förderungen von Kooperationen industrieller Partner entlang der gesamten Wertschöpfungskette von LIB unterstützten die Netzwerkbildung und den Austausch von Informationen, der grundlegend für die Kreislaufführung von Materialien ist.

8.2 Technologie-Roadmap

Bei der Batterietechnologie auf Lithium-Ionen-Basis handelt es sich um eine noch relativ junge Technologie, welche sich nach wie vor rasant entwickelt. Aufgrund dieses Umstands und der zeitlichen Verzögerung, bis eine ausgediente LIB im abfallwirtschaftlichen System landet, ist aus heutiger Sicht noch kein perfektes Recyclingverfahren abzuschätzen. Zudem befindet sich die Aufbereitung von EoL-LIB am Ende einer langen Wertschöpfungskette. Um den richtigen Verwertungsweg wählen zu können, müssen daher bereits im Vorfeld gezielte Aktivitäten abgestimmt sein. Diese sind unter anderem auch in den Maßnahmenpaketen (siehe Kapitel 8.1) angeführt. Je mehr Informationen über das Inputmaterial für einen Recyclingprozess vorhanden sind, desto genauer kann auch dieser abgestimmt werden. Einen wesentlichen Einfluss hat auch die Zellchemie (LCO, NMC, LFP, ... – siehe Kapitel 2.2). Da es bei den Lithium-Ionen-Batterien eine Vielzahl von unterschiedlichen Zelltypen gibt, ist es durchaus möglich, dass unterschiedliche Aufbereitungsverfahren sinnvoll sind. Im Folgenden werden wesentliche Überlegungen aufgezeigt, die zur Entscheidung von Recyclingverfahren ihren Einfluss haben.

Gerätebatterien und Industriebatterien

Hier liegt bereits der Unterschied in der Sammlung (siehe Kapitel 2.1). So kommen Gerätebatterien in gemischter Form – mit anderen Batterietypen – in den Abfallstrom. Weiters handelt es sich dabei um kleine Gebinde, welche zunehmend so verbaut sind, dass die Zelle kaum bis nicht herauslösbar ist. Hingegen müssen Industriebatterien vom Hersteller gesammelt werden, besitzen durchschnittlich ein hohes Gewicht (Batteriesystem) und bestehen normalerweise aus einer einheitlichen Zellchemie.

Daher kann für Industriebatterien der Recyclingprozess genauer auf die Zellchemie abgestimmt werden, wodurch eine höhere Recyclingquote möglich ist. Dieser wird sich möglicherweise vom Recyclingprozess für Gerätebatterien unterscheiden. Werden für Gerätebatterien keine wesentlichen Verbesserungen in der Sammlung, Kennzeichnung, Identifizierung und Sortierung vorgenommen, ist hier ein robuster Recyclingprozess sehr wahrscheinlich. Aus derzeitiger Sicht können vermutlich die geforderten Recyclingquoten nicht erreicht werden.

Zellchemie – Kathodenmaterial

Recycelt wird nur, was sich wirtschaftlich lohnt. So kommt Kobalt vor Nickel und Kupfer. Der Trend geht jedoch dazu, den Gehalt an wertvollen Metallen wie Kobalt massiv zu verringern. LIB auf Eisenphosphat-Basis (LFP) sind daher eher unerwünscht. In den derzeitigen Recyclinganlagen im industriellen Maßstab wird daher oft in „High-Grade“ und „Low-Grad“ – d.h. hoher bzw. geringer Anteil an wertvollen Metallen – unterschieden (siehe Kapitel 5). Auch hier bedarf es an wesentlichen Verbesserungen in der Kennzeichnung und Identifizierung, damit der passende Recyclingprozess angewandt werden kann.

Vorbehandlung (Demontage und Deaktivierung)

Die Vorbehandlung und die Aufbereitung sind unzertrennlich miteinander verbunden, will man eine hohe Recyclingquote erreichen (Windisch-Kern et al. unveröffentlicht). Die wesentlichen Schritte sind hier die Demontage und die Deaktivierung (siehe Kapitel 4.2). Da für EoL-LIB sehr hohe Transportkosten anfallen (gefährlicher Abfall > ADR), könnten kleine dezentrale Anlagen eine Lösung darstellen.

Batteriealter

Die rasche Entwicklung in der Zelltechnologie von LIB zeigt, dass womöglich für ein Kathodenmaterial – älter als zehn Jahre – in der gleichen Anwendung keinen Einsatz mehr gibt. Methoden wie das Direkte Recycling

(siehe Kapitel 4.4.6) eignet sich daher vermutlich am besten für Produktionsabfälle oder LIB, welche bereits sehr früh in den Recyclingprozess gelangen. Dabei soll das Kathodenmaterial nicht in die einzelnen Metalle aufgetrennt, sondern revitalisiert werden. Dies soll einen gleichwertigen Einsatz – wiederum als Kathodenmaterial – gewährleisten. Grundvoraussetzung dafür ist die Reinheit des Inputmaterials (gleiche Zellchemie) und dass dieser Zelltyp nach wie vor produziert wird. Zudem ist diese Methode noch nicht ausgereift und es bedarf an weiterer Forschung.

Fazit

Zusammenfassend zeigt sich, dass es vermutlich nicht die „eine“ Recyclinganlage geben wird. Vielmehr lässt ein aktueller Trend vermuten, dass es kleine dezentrale Anlagen zur Demontage und Deaktivierung gibt, welche ihre Outputströme zur weiteren Aufbereitung in zentral gelegene und spezialisierte Recyclinganlagen bringen. Wesentlich ist dabei, diese Anlagen so flexibel zu halten, dass sie mit den Entwicklungen in der LIB-Technologie Schritt halten können. Um die Recyclingquoten zu erreichen, bedarf es darüber hinaus einer guten Abstimmung zwischen Vorbehandlung und Aufbereitung sowie ein Umdenken von der linearen Wirtschaft zu einer Kreislaufwirtschaft und einer internationalen Zusammenarbeit über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg.

9 Schlussfolgerung

Die abgeschätzte Mengenentwicklung anhand des Transition-Szenarios zeigt klar, dass die Energiewende einen enormen Bedarf an Energiespeichern hervorbringt. Gedeckt wird dieser derzeit und voraussichtlich auch in den nächsten Jahren durch Lithium-Ionen-Batterien. Dies führt schon jetzt zu einem massiven Ressourcenverbrauch und zwangsläufig zu großen Mengen an EoL-LIB, die behandelt und verwertet werden müssen. Es wird notwendig, den derzeitigen Bestand an Recyclinganlagen in Europa auszubauen.

Wie in diesem Bericht gezeigt wurde, besteht für Österreich durchaus das Potenzial, sich hier gut zu positionieren. Es bedarf noch einiges an Forschung, jedoch ist zu erkennen, dass durch flexible und gut abgestimmte Verfahren – von der Vorbehandlung bis zur Aufbereitung – die gewünschten und geforderten Recyclingquoten erreicht werden können. Dies bedingt jedoch eine gesamtheitliche Betrachtung der Wertschöpfungskette und einen Wandel weg vom linearen Wirtschaften zu einer Kreislaufwirtschaft.

Weiters wurde in diesem Bericht sichtbar gemacht, dass sich die Wertschöpfungskette von Lithium-Ionen-Batterien über den gesamten Globus spannt und die Konkurrenz aus Asien und Amerika stark ist. Effizientes Ressourcenmanagement in einer Kreislaufwirtschaft bedarf einer guten Kommunikation aller beteiligten Stakeholder. Deshalb ist es nicht ausreichend national zu denken oder nur den Recyclingprozess zu betrachten. Die Kreislaufwirtschaft beginnt bereits bei der Entwicklung eines Produktes und spannt sich über den gesamten Lebenszyklus, bis es in der Aufbereitung landet. In den Maßnahmenpaketen sind daher Empfehlungen, die in Zusammenarbeit mit Stakeholdern aus allen Bereichen der Wertschöpfungskette ausgearbeitet wurden. So werden für ein effizientes Recycling neben Maßnahmen im Bereich des Eco-Designs, der Förderung der Wiederverwendung, der Erhöhung der Rücklaufquote auch für wirtschaftspolitische Rahmenbedingungen und Förderungen vorgeschlagen. Wobei klar wird, dass sofortiger Handlungsbedarf besteht.

10 Literatur- und Quellenverzeichnis

- Accurec Recycling GmbH, 2018. Battery Recycling Datasheet. https://accurec.de/wp-content/uploads/2018/04/Li-ion-RE_2018.pdf.
- Accurec. (2020). <https://accurec.de/geschichte?lang=de>. Zugriff am 5.11.2020.
- Akkuser. (2020). <https://www.akkuser.fi/>. Zugriff am 5.11.2020.
- Alfaro-Algaba, M.; Ramirez, F. Javier (2020): Techno-economic and environmental disassembly planning of lithium-ion electric vehicle battery packs for remanufacturing. In: Resources, Conservation and Recycling 154, S. 104461. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104461.
- Amberger, A. (2016). Entwicklung eines ganzheitlichen Recyclingkonzeptes für Traktionsbatterien basierend auf Lithium-Ionen-Batterien. Dissertation. Montanuniversität Leoben.
- Amberger, A. (2020). Recycling von Lithium-Ionen Akkus.
- Amberger, Astrid; Coskun, Eda & Rutrecht, Bettina (2018). Mehrstufiger Prozess und hohe Sicherheitsvorkehrungen. ReSource 3/2018.
- Amberger, Astrid; Coskun, Eda; Rutrecht, Bettina (2018): Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. In: Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann (Hg.): Recycling und Rohstoffe. Nietwerder: TKH2018.
- AZR. (2020). <https://azr.com/about/inmetco/>. Zugriff am 19.11.2020.
- BAM (2012): Amts- und Mitteilungsblatt. Amtliche Bekanntmachungen. Band 42 (4).
- BAM (2013): Amts- und Mitteilungsblatt. Amtliche Bekanntmachungen. Band 43 (1).
- BAM (2014): Amts- und Mitteilungsblatt. Amtliche Bekanntmachungen. Band 44 (2).
- Batrec. (2020). <https://batrec.ch/de/>. Zugriff am 5.11.2020.
- Battery Resourcers. (2020). Zugriff 19. November 2020, unter <https://www.batteryresourcers.com/>
- Batteryresourcers. (2020). <https://www.batteryresourcers.com/>. Zugriff am 19.11.2020.
- BGBl. II Nr. 159/2008 iF BGBl. II Nr. 109/2015. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Abfallvermeidung, Sammlung und Behandlung von Altbatterien und -akkumulatoren (Batterienverordnung). Zugriff 2. Juni 2020, unter <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20005815>
- Bittner (2018): Neues innovatives Recyclingverfahren. Elektrohydraulische Zerkleinerung. Expertenforum - Recycling aktueller und zukünftiger Batteriespeicher. Karlsruhe, 2018.
- BMLFUW. (2017). Abgrenzung der unterschiedlichen Batteriearten. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Zugriff 10. August 2020, unter <https://www.bmlrt.gv.at/umwelt/abfall-ressourcen/batterien/batterienarten.html>
- Brückner, L., Frank, J. & Elwert, T. (2020). Industrial Recycling of Lithium-Ion Batteries—A Critical Review of Metallurgical Process Routes. Metals 2020, 10, 1107; doi:10.3390/met10081107.
- Brückner, L., Frank, J. & Elwert, T. (2020). Industrial Recycling of Lithium-Ion Batteries—A Critical Review of Metallurgical Process Routes. Metals 2020, 10, 1107. doi:10.3390/met10081107.
- Buchert, M., Sutter, J., 2020. Stand und Perspektiven des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus der Elektromobilität. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Strategiepapier-Mercator-Recycling-Batterien.pdf>.
- Chen, C.H., Liu, J., Stoll, M.E., Henriksen, G., Vissers, D.R., Amine, K., 2004. Aluminum-doped lithium nickel cobalt oxide electrodes for high-power lithium-ion batteries. Journal of Power Sources 128, 278–285.
- Chen, M., Ma, X., Chen, B., Arsenault, R., Karlson, P., ... Wang, Y., et al. (2019). Recycling End-of-Life Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries, Joule (2019), <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.09.014>.
- Chen, Y., Kang, Y., Zhao, Y., Wang, L., Liu, J., Li, Y., Liang, Z., He, X., Li, X., Tavajohi, N., Li, B., 2021. A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards. Journal of Energy Chemistry 59, 83–99.

- Cheret, D., Santen, S., 2005. Battery recycling. US20050108321;EP20040076124;US20040563800P C22B7/00;C22B23/02;C22B23/06;C22B23/06 (US2005235775 (A1)).
- Clean Earth. (2020). <https://www.cleaneearthinc.com/universal-waste>. Zugriff am 19.11.2020.
- Curt, J. D. (2019). The potential and benefits of second life EV batteries. Paper presented at the E-Waste World Conference, Frankfurt
- Dahllöf, L., Romare, M. & Wu, A. (2019). Mapping of lithium-ion batteries for vehicles: A study of their fate in the Nordic countries. Nordic Council fo Ministers. <http://dx.doi.org/10.6027/TN2019-548>.
- Danino-Perraud, R. (2020). The recycling of Lithium-ion batteries: A Strategic Pillar for the European Battery Alliance. Études de l'Ifri.
- Diaz-Bone, R. (2015). Methoden-Lexikon für die Sozialwissenschaften. Weischer, C. (Hrsg.) Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. Online im Internet: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-531-18889-8>.
- Diekmann, J., Hanisch, C., Froböse, L., Schälicke, G., Loellhoeffel, T., Fölster, A.-S., Kwade, A., 2017. Ecological Recycling of Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles with Focus on Mechanical Processes. J. Electrochem. Soc. 164, A6184-A6191.
- Diekmann, J., Hanisch, C., Froböse, L., Schälicke, G., Loellhoeffel, T., Fölster, A.-S., Kwade, A., 2017. Ecological Recycling of Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles with Focus on Mechanical Processes. J. Electrochem. Soc. 164, A6184-A6191. VORLAGE
- Dowa. (2020). <https://www.dowa-eco.co.jp/en/news/archive/20181217.html>. Zugriff am 5.11.2020.
- Duesenfeld. (2020). <https://www.duesenfeld.com/>. Zugriff am 5.11.2020.
- Dutta, D., Kumari, A., Panda, R., Jha, S., Gupta, D., Goel, S., Jha, M.K., 2018. Close loop separation process for the recovery of Co, Cu, Mn, Fe and Li from spent lithium-ion batteries. Separation and Purification Technology 200, 327–334.
- EAK Austria. (2020). Tätigkeitsbericht 2019.
- EIT InnoEnergy (Hg.) (2019): EIT InnoEnergy invests €5.8m into Northvolt's "mission critical" battery recycling plant. Online verfügbar unter <https://www.innoenergy.com/news-events/eit-innoenergy-invests-58m-into-northvolt-s-mission-critical-battery-recycling-plant/>, zuletzt aktualisiert am 16.09.2020, zuletzt geprüft am 16.09.2020.
- EIT RawMaterials (2020): RelieVe: Recycling Li-ion batteries for electric Vehicles | EIT RawMaterials. Online verfügbar unter <https://eitrawmaterials.eu/project/relieve/>, zuletzt aktualisiert am 16.06.2020, zuletzt geprüft am 16.09.2020.
- El Mofid, W., Ivanov, S., Konkin, A., Bund, A., 2014. A high performance layered transition metal oxide cathode material obtained by simultaneous aluminum and iron cationic substitution. Journal of Power Sources 268, 414–422.
- Electrive.net., Diverse Online-Artikel auf <https://www.electrive.net/>
- Electrive, 2020, „Revolt“: Northvolt steigt in Batterie-Recycling ein, Online unter: <https://www.electrive.net/2019/12/13/revolt-northvolt-steigt-in-batterie-recycling-ein/>, Zugriff am 07.10.2020.
- Electrive. (2020). <https://www.electrive.com/2019/07/29/first-battery-recycling-in-south-korea-by-earthtech/>. Zugriff am 5.11.2020.
- Elektroauto-News, 2020, Batterie-Start-up Redwood Materials recycelt bereits Schrott aus Teslas Gigafactory Nevada, Online unter: <https://www.elektroauto-news.net/2020/batterie-start-up-redwood-materials-recycelt-schrott-tesla-gigafactory-nevada>, Zugriff am 07.10.2020.
- Elektroauto-News.net (2020): Batterie-Start-up Redwood recycelt Schrott aus Tesla Giga Nevada | Elektroauto-News.net. Online verfügbar unter <https://www.elektroauto-news.net/2020/batterie-start-up-redwood-materials-recycelt-schrott-tesla-gigafactory-nevada>, zuletzt aktualisiert am 14.09.2020, zuletzt geprüft am 16.09.2020.
- Elibama. (2020). https://elibama.files.wordpress.com/2013/01/euro_dieuze_industrie.pdf. Zugriff am 5.11.2020.

- Ellingsen, L. A.-W., Majeau-Bettez, G., Singh, B., Srivastava, A. K., Valøen, L. O., & Strømman, A. H. (2014). Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. *Journal of Industrial Ecology*, 18(1), 113-124. doi:10.1111/jiec.12072
- Elwert, T., Goldmann, D., Römer, F., Buchert, M., Merz, C., Schueler, D., Sutter, J. (2016). Current Developments and Challenges in the Recycling of Key Components of (Hybrid) Electric Vehicles. *Recycling* 1, 25–60.
- Elwert, Tobias; Frank, Julia (2020): Auf dem Weg zu einem geschlossenen Stoffkreislauf für Lithium-Ionen-Batterien. In: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Olaf Holm, Bernd Friedrich und Daniel Goldmann (Hg.): *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, S. 527–529.
- Envirostream. (2020). <https://envirostream.com.au/>. Zugriff am 5.11.2020.
- Eramet. (2020), ReLieVe: An innovative process for recycling Lithium-Ion Batteries form electric vehicles, Online unter: <https://www.eramet.com/en/activities/innovate-design/relieve-project>, Zugriff am 05.11.2020.
- Eramet. (2020). <https://www.eramet.com/en/activities/innovate-design/relieve-project>. Zugriff am 5.11.2020.
- Europäische Kommission. (2020). Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken, Online unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN>, Zugriff am 24.11.2020.
- Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2012. Richtlinie 2012/19/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEEE). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32012L0019>.
- Gaines, L. (2018). Lithium-ion battery recycling processes: Research towards a sustainable course. *Susmat* (2018), doi:10.1016/j.susmat.2018.e00068.
- Gaines, L. (2014). The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course. *Sustainable Materials and Technologies* 1-2, 2–7.
- Ganter, M., Landi, B., Babbitt, C., Anctil, A. & Gaustad, G. (2014). Cathode refunctionalization as a lithium ion battery recycling alternative. *Journal of Power Sources* 256 (2014) 274-280. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.078>.
- Ge. D. (2019). Direct Lithium-Ion battery recycling to yield Battery grade cathode materials. Master-Thesis. Zugriff 22. April 2020, unter <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/92800>
- Gem. (2020). <http://en.gem.com.cn/index.php/xinchanpin/>. Zugriff am 5.11.2020.
- Gentilini, Luca; Mossali, Elena; Angius, Alessio; Colledani, Marcello (2020): A safety oriented decision support tool for the remanufacturing and recycling of post-use H&EVs Lithium-Ion batteries. In: *Procedia CIRP* 90, S. 73–78. DOI: 10.1016/j.procir.2020.01.090.
- Georgi-Maschler, T., Friedrich, B., Weyhe, R., Heegn, H., Rutz, M. (2012). Development of a recycling process for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources* 207, 173–182.
- Ghtech. (2020). https://www.ghotech.com/Eapplication/recovery_10000000297454.html. Zugriff am 5.11.2020.
- Glencore. (2020). <https://www.glencore.com/who-we-are/at-a-glance>. Zugriff am 5.11.2020.
- Global Recycling. (2020). <https://global-recycling.info/archives/1211>. Zugriff am 5.11.2020.
- Golubkov, Andrey W.; Scheikl, Sebastian; Planteu, René; Voitic, Gernot; Wiltsche, Helmar; Stangl, Christoph et al. (2015): Thermal runaway of commercial 18650 Li-ion batteries with LFP and NCA cathodes – impact of state of charge and overcharge. In: *RSC Adv.* 5 (70), S. 57171–57186. DOI: 10.1039/C5RA05897J.
- Grandjean, Thomas R.B.; Groenewald, Jakobus; Marco, James (2019): The experimental evaluation of lithium ion batteries after flash cryogenic freezing. In *Journal of Energy Storage* 21, pp. 202–215. DOI: 10.1016/j.est.2018.11.027.
- Grützke, M., Mönningöff, X., Horsthemke, F., Kraft, V., Winter, M. & Nowak, S. (2015), Extraction of lithium-ion battery electrolytes with liquid and supercritical carbon dioxide and additional solvents, *RSC Adv.*, 2015, 5, 43209–43217, DOI: 10.1039/c5ra04451k.
- Harper, Gavin; Sommerville, Roberto; Kendrick, Emma; Driscoll, Laura; Slater, Peter; Stolkin, Rustam et al. (2019): Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. In: *Nature* 575 (7781), S. 75–86. DOI: 10.1038/s41586-019-1682-5.

- Heelan et al., 2015, Current and Prospective Li-Ion Battery Recycling and Recovery Processes, JOM, Vol. 68, No. 10, 2016, DOI: 10.1007/s11837-016-1994-y
- Heelan, J., Gratz, E., Zheng, Z., Wang, Q., Chen, M., ... Wang, Y. et al. (2015). Current and Prospective Li-Ion Battery Recycling and Recovery Processes, JOM, Vol. 68, No. 10, 2016, DOI: 10.1007/s11837-016-1994-y
- Helfferich, C. (Hrsg.) (2009). Die Qualität qualitativer Daten. Manual für die Durchführung qualitativer Interviews. 3. überarbeitete Auflage. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden. Online im Internet: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-531-91858-7>.
- Highpower. (2020). <https://www.highpowertech.com/products-recycling>. Zugriff am 6.11.2020.
- Holzer, A., Windisch-Kern, S., Ponak, C., Raupenstrauch, H., 2021. A Novel Pyrometallurgical Recycling Process for Lithium-Ion Batteries and Its Application to the Recycling of LCO and LFP. *Metals* 11, 149.
- Hoyer, 2015, Strategische Planung des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen in Deutschland, Dissertation Technische Universität Braunschweig, Springer, DOI 10.1007/978-3-658-10274-6.
- Hoyer, C. (2015). Strategische Planung des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen in Deutschland. Dissertation Technische Universität Braunschweig. Springer. DOI 10.1007/978-3-658-10274-6.
- Innoenergy, 2020, EIT InnoEnergy invests €5.8m into Northvolt's „mission critical“ battery recycling plant, Online unter: <https://www.innoenergy.com/news-events/eit-innoenergy-invests-58m-into-northvolt-s-mission-critical-battery-recycling-plant>, Zugriff am 07.10.2020.
- International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook 2016, Paris, 2016.
- Iru-Miru. (2020). https://www.iru-miru.com/en/article_detail.php?id=29876. Zugriff am 5.11.2020.
- Jing, X., Wang, Y., Zhang, X., Lang, J., Wang, W., 2020. Anchoring nitrogen-doped carbon particles on lithium titanate to enhance its lithium storage performance. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 871, 114293.
- Kim, S.-J., Kim, M.-C., Kwak, D.-H., Kim, D.-M., Lee, G.-H., Choe, H.-S., Park, K.-W., 2016. Highly stable TiO₂ coated Li₂MnO₃ cathode materials for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources* 304, 119–127.
- Kirchner, Mathias, Mark Sommer, Kurt Kratena, Daniela Kletzan-Slamanig, and Claudia Kettner-Marx. 2019. “CO₂ Taxes, Equity and the Double Dividend – Macroeconomic Model Simulations for Austria.” *Energy Policy* 126 (March): 295–314. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.11.030>.
- Kobar. (2020). <http://www.kobar.co.kr/?module=Default&action=English>. Zugriff am 6.11.2020.
- Kwon, O., Sohn, I., 2020. Fundamental thermokinetic study of a sustainable lithium-ion battery pyrometallurgical recycling process. *Resources, Conservation and Recycling* 158, 104809.
- Kyburz. (2020). <https://kyburz-switzerland.ch/batterierecyclinganlage>. Zugriff am 5.11.2020.
- Kyburz. (2020). Zugriff 5. November 2020, unter <https://kyburz-switzerland.ch/batterierecyclinganlage>
- Kyoei. (2020). <http://www.kyoeisangyo-ltd.co.jp/index.html>. Zugriff am 6.11.2020.
- Lebedeva, N., Di Persio, F. & Boon-Brett, L. (2016). Lithium ion battery value chain and related opportunities for Europe. European Commission. Petten.
- Lee, Christopher; Said, Ahmed O.; Stolarov, Stanislav I. (2019): Impact of State of Charge and Cell Arrangement on Thermal Runaway Propagation in Lithium Ion Battery Cell Arrays. In: *Transportation Research Record* 2673 (8), S. 408–417. DOI: 10.1177/0361198119845654.
- Li, J., Lu, Y., Yang, T., Ge, D., Wood, D. & Li, Z. (2020). Water-Based Electrode Manufacturing and Direct Recycling of Lithium-Ion Battery Electrodes-A Green and Sustainable Manufacturing System. *iScience* 23, 101081, May 22, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101081>.
- Li-Cycle. (2020). <https://li-cycle.com/>. Zugriff am 19.11.2020.
- Lin, J., Liu, C., Cao, H., Li, L., Chen, R., Sun, Z., 2018. Recovery of Spent Lithium Ion Batteries Based on High Temperature Chemical Conversion, in: *Progress in Chemistry* 2018, 30 (9): 1445-1454.
- Lithion. (2020). <https://www.lithionrecycling.com/>. Zugriff am 19.11.2020.
- Liu, K., Liu, Y., Lin, D., Pei, A., Cui, Y., 2018. Materials for lithium-ion battery safety. *Science advances* 4, eaas9820.

- Liu, S., Xiong, L., He, C., 2014. Long cycle life lithium ion battery with lithium nickel cobalt manganese oxide (NCM) cathode. *Journal of Power Sources* 261, 285–291.
- Liu, W.L., Tu, J.P., Qiao, Y.Q., Zhou, J.P., Shi, S.J., Wang, X.L., Gu, C.D., 2011. Optimized performances of core–shell structured LiFePO₄/C nanocomposite. *Journal of Power Sources*.
- Liu, Y., Mu, D., Zheng, R. & Dai, C., (2014), Supercritical CO₂ extraction of organic carbonate-based electrolytes of lithium-ion batteries, *RSC Adv.*, 2014, 4, 54525, DOI: 10.1039/c4ra10530c.
- Ma, J., Chen, B., Wang, L., Cui, G., 2018. Progress and prospect on failure mechanisms of solid-state lithium batteries. *Journal of Power Sources* 392, 94–115.
- Maheshwari, A., Heck, M., Santarelli, M., 2018. Cycle aging studies of lithium nickel manganese cobalt oxide-based batteries using electrochemical impedance spectroscopy. *Electrochimica Acta* 273, 335–348.
- Martens, H., Goldmann, D., 2016. *Recyclingtechnik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- Mayyas, A., Steward, D. & Mann, M. (2018). The case for recycling: Overview and challenges in the material supply chain for automotive li-ion batteries. *Sustainable Materials and Technologies* 17 (2018) e00087. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00087>.
- McLaughling, William; Adams, Terry (1999): Li reclamation process. Patent no. US 5888463
- Melin, 2019, State of the art in reuse and recycling of lithium-ion batteries – a research review
- Melin, 2019, State of the art in reuse and recycling of lithium-ion batteries – a research review
- Meng, X., 2019. Recent Progress of Graphene as Cathode materials in Lithium Ion Batteries. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 300, 42039.
- Meng, W.-W., Yan, B.-L., Xu, Y.-J., 2019. Scalable synthesis of Ti³⁺ self-doped Li₄Ti₅O₁₂ microparticles as an improved performance anode material for Li-ion batteries. *Journal of Alloys and Compounds* 788, 21–29.
- Meyer, 2021, Auf dem Weg zu einer Wertschöpfungskette für das Recycling von LIB aus der Elektromobilität – Die Sicht ausgewählter Stakeholder, WIFO Working Paper, in Review.
- Meyer, I.; Sommer, M.; Kratena, K., 2018, Energy Scenarios 2050 for Austria, Austrian Institute of Economic Research (WIFO), Centre of Economic Scenario Analysis and Research (CESAR), <http://www.wifo.ac.at/www/pubid/61089>.
- Meyer, I.; Sommer, M.; Kratena, K., 2020: How to reach Paris: a comprehensive long-term energy-economy scenario for Austria, in: Theodoros Zachariadis, Janet E. Milne, Mikael S. Andersen, Hope Ashiabor, *Economic Instruments for a Low-carbon Future, Critical Issues in Environmental Taxation*, 2020, S.127-140,
- Mohr, M., Weil, M., Peters, J. & Wang, Z. (2020). Recycling of Lithium-Ion Batteries. *Encyclopedia of Electrochemistry: Batteries*. DOI: 10.1002/9783527610426.bard110009
- Mohr, M., Weil, M., Peters, J. & Wang, Z. (2020). Recycling of Lithium-Ion Batteries. *Encyclopedia of Electrochemistry: Batteries*. DOI: 10.1002/9783527610426.bard110009
- Nickelhütte Aue. (2020). <https://www.nickelhuette-aue.de/index.asp?katid=30&seite=30050200&bodystart=1>. Zugriff am 5.11.2020.
- Nigl & Pomberger, 2020, Brandrisiko durch Lithium-Ionen-Batterien: Sind unsere Anlagen noch versicherbar?
- Nigl T., Baldauf M., Hohenberger M., Pomberger R. (2021) Lithium-Ion Batteries as Ignition Sources in Waste Treatment Processes – A Semi-Quantitative Risk Analysis and Assessment of Battery-Caused Waste Fires. *Processes* 9(1): 49. DOI: 10.3390/pr9010049.
- Nigl T., Pomberger R. (2018) Brandgefährlicher Abfall – Über Risiken und Strategien in der Abfallwirtschaft. Conference paper. *Recy & DepoTech 2018*. 7th–9th November, Leoben, Austria: pp. 85–102. ISBN: 978-3-200-05874-3.
- Nigl T., Pomberger R. (2020) Brandrisiko durch Lithium-Ionen-Batterien: Sind unsere Anlagen noch versicherbar? Conference paper. *Berliner Recycling- und Sekundärrohstoffkonferenz 2020*. 2nd–3rd March, Berlin, Germany: pp. 482–494. ISBN: 978-3-944310-51-0.

- Nigl T., Schwarz T.E., Walch C., Baldauf M., Rutrecht B., Pomberger R. (2020) Characterisation and Material Flow Analysis of End-of-Life Portable Batteries and Lithium-based Batteries in Different Waste Streams in Austria. *Waste Management and Research* 38(6): 649–659. DOI: 10.1177/0734242X20914717.
- Nissan. (2020). <https://global.nissannews.com/en/releases/180326-01-e>. Zugriff am 5.11.2020.
- NMM. (2020). <https://www.nmm.jx-group.co.jp/english/industry/recycling/>. Zugriff am 6.11.2020.
- Nohl, A.-M. (2012). Interview und dokumentarische Methode. Anleitungen für die Forschungspraxis. 4. Aufl. 2012. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften (Qualitative Sozialforschung). Online im Internet: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-531-19421-9>.
- Öhl, Johannes; Horn, Daniel; Zimmermann, Jörg; Stauber, Rudolph; Gutfleisch, Oliver (2019): Efficient Process for Li-Ion Battery Recycling via Electrohydraulic Fragmentation. In *MSF 959*, pp. 74–78. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.959.74.
- OnTo Technology. (2020). Zugriff 19. November 2020, unter <https://www.onto-technology.com/>
- Onto. (2020). <https://www.onto-technology.com/>. Zugriff am 19.11.2020.
- Peters, Jens F.; Baumann, Manuel; Weil, Marcel (2018): Recycling aktueller und zukünftiger Batteriespeicher: Technische, ökonomische und ökologische Implikationen : Ergebnisse des Expertenforums am 6. Juni 2018 in Karlsruhe. Ergebnisse des Expertenforums am 6. Juni 2018 in Karlsruhe. Hg. v. KIT. Karlsruhe.
- Pillote, C. (2017). The Rechargeable Battery Market and Main Trends 2016 – 2025. Paper presented at the The Battery Show North America 2017, Novi, Michigan, USA. http://www.avicenne.com/pdf/The%20Rechargeable%20Battery%20Market%20and%20Main%20Trends%202016-2025_C%20Pillot_M%20Sanders_September%202017.pdf
- Pinegar, H., Smith, Y.R., 2019. Recycling of End-of-Life Lithium Ion Batteries, Part I: Commercial Processes. *J. Sustain. Metall.* 5, 402–416.
- Pinna, E.G., Ruiz, M.C., Ojeda, M.W., Rodriguez, M.H., 2017. Cathodes of spent Li-ion batteries: Dissolution with phosphoric acid and recovery of lithium and cobalt from leach liquors. *Hydrometallurgy* 167, 66–71.
- Pistoia & Liaw, 2018, Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Battery Health, Performance, Safety and Cost, Springer, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-69950-9>.
- Pistoia, G. & Liaw, B. (2018). Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Battery Health, Performance, Safety and Cost, Springer, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-69950-9>.
- Pistoia, G. & Liaw, B. (2018). Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Battery Health, Performance, Safety and Cost, Springer, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-69950-9>.
- Planet Veolia. (2020). <https://www.planet.veolia.com/en/recycling-electric-car-batteries-renault>. Zugriff am 5.11.2020.
- Poschmann, Hendrik; Brüggemann, Holger; Goldmann, Daniel (2020): Robotergestützte Demontage als Treiber der Digitalisierung im Recycling der Zukunft. In: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Olaf Holm, Bernd Friedrich und Daniel Goldmann (Hg.): *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH.
- Primobius, 2020, Battery Recycling without limits, Online unter: <https://www.primobius.com/>, Zugriff am 05.11.2020.
- Primobius. (2020a). Telefonische Auskunft am 14.10.2020.
- Primobius. (2020b). <https://www.primobius.com/>. Zugriff am 5.11.2020.
- Promesa. (2020). <http://promesa-tec.de/>. Zugriff am 5.11.2020.
- PTJ, 2020, Definition des Technologischen Reifegrades, Online unter: https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/systemfiles/cbox/2373/live/lw_file/definition_des_technologischen_reifegrades.pdf, Zugriff am 23.11.2020.
- Rallo, H.; Benveniste, G.; Gestoso, I.; Amante, B. (2020): Economic analysis of the disassembling activities to the reuse of electric vehicles Li-ion batteries. In: *Resources, Conservation and Recycling* 159, S. 104785. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104785.
- Recupyl. (2020). <http://www.recupyl.com/>. Zugriff am 12.9.2020.

- Recycleinme. (2020). <https://www.recycleinme.com/rim-nipponrec/home>. Zugriff am 19.11.2020.
- Recyclico. (2020). <https://recyclico.com/>. Zugriff am 19.11.2020.
- Redux Recycling. (2020). <https://www.redux-recycling.com/de>. Zugriff am 5.11.2020.
- Redwood, 2020, Redwood Materials: About, Online unter: <https://www.redwoodmaterials.com/>, Zugriff am 07.10.2020.
- Retriev. (2020). <https://www.retrievtech.com/lithiumion>. Zugriff am 19.11.2020.
- RL 2006/66/EG. Richtlinie 2006/66/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. September 2006 über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren und zur Aufhebung der Richtlinie 91/157/EWG. Zugriff 10. August 2020, unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02006L0066-20180704>
- Rothermel, S., Evertz, M., Kasnatscheew, J., Qi, X., Gretzke, M., ... Nowak, S., et al. (2016), Graphite Recycling from Spent Lithium-Ion Batteries, *ChemSusChem* 2016, 9, 3473 – 3484, DOI: 10.1002/cssc.201601062
- Rutrecht, Bettina (2015): Entladen von Lithium Ionen Batterien in flüssigen Medien. Bachelorarbeit. Montanuniversität Leoben, Leoben. Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft.
- Sabisch, J., Anapolsky, A., Liu, G. & Minor, A. (2018). Evaluation of using pre-lithiated graphite from recycled Li-ion batteries for new LiB anodes. *Resources, Conservation & Recycling* 129 (2018) 129-134. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.029>.
- Saloojee, F. & Lloyd, J. (2015). Lithium Battery Recycling Process - Desktop Study. CM Solutions
- Satyavani, T., Srinivas Kumar, A., Subba Rao, P., 2016. Methods of synthesis and performance improvement of lithium iron phosphate for high rate Li-ion batteries: A review. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 19, 178–188.
- Saubermacher (2020): Battothek. Feldkirchen bei Graz: Denovo. Online verfügbar unter <https://battothek.saubermacher.at/login>.
- Schwarz, Therese; Rutrecht, Bettina (2018): Forecasting Real Disassembly Time of Industrial Batteries based on Virtual MTM-UAS Data. The 25th CIRP Conference on Life Cycle Engineering in Copenhagen. CIRP The International Academy for Production Engineering. Kopenhagen, Dänemark, 30.04.2018.
- Shi, Y., Chen, G. & Chen, Z. (2018). Effective regeneration of LiCoO₂ from spent lithium-ion batteries: a direct approach towards high-performance active particles. *Green Chem.*, 2018, 20, 851. DOI: 10.1039/c7gc02831h.
- Singh, Maharshi; Janardhan, Reddy K. (2019): Cloud based disassembly of electric vehicle battery. In: *Procedia Manufacturing* 30, S. 136–142. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.020.
- Sloop, S., Crandona, L., Allen, M., Koetje, K., Reed, L., ... Lerner, M., et al. (2020). A direct recycling case study from a lithium-ion battery recall. *Sustainable Materials and Technologies* 25 (2020) e00152. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00152>.
- Smith; Swoffer, Scott (2014): Reclaiming serviceable parts of waste accumulators. Patent no. US 8882007 B1.
- SMM. (2020). https://www.smm.co.jp/E/csr/activity_highlights/persistence/highlights4.html. Zugriff am 19.11.2020.
- SNAM. (2020). <http://www.snam.com/activites/recycling-snam.php>. Zugriff am 5.11.2020.
- Sojka, R., Pan, Q. & Billmann, L. (2020). Comparative study of Lithium-ion battery recycling processes. Krefeld.
- Song, X., Hu, T., Liang, C., Long, L., Zhou, L., ... Liu, J., et al. (2017). Direct regeneration of cathode materials from spent lithium iron phosphate batteries using a solid phase sintering method. *RSC Adv.*, 2017, 7, 4783. DOI: 10.1039/c6ra27210j.
- Sonoc, A., Jeswiet, J., Soo, V.K., 2015. Opportunities to Improve Recycling of Automotive Lithium Ion Batteries. *Procedia CIRP* 29, 752–757.
- Soundon. (2020). <http://en.e-soundon.com/index/Ecology/Recycling>. Zugriff am 19.11.2020.
- Statista (2021) Durchschnittspreise ausgewählter Mineralischer Rohstoffe URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/260427/umfrage/durchschnittspreise-ausgewaehelter-mineralischer-rohstoffe/>, abgerufen 1.5.2021

- Statistik Austria (2020a). KFZ-Bestand 2020
- Statistik Austria (2020b). KFZ-Neuzulassungen Jänner bis Dezember 2020
- Statistik Austria ,2021, Input-Output-Statistik; Tabellen für 2017;
http://www.statistik.at/web_de/statistiken/wirtschaft/volkswirtschaftliche_gesamtrechnungen/input-output-statistik/index.html
- Stein, V.; Arnberger, A.; Nickl, A.; Ungerböck, R.; Werinos, M. (2020): Batterien aus der E-Mobilität in Second Life Anwendungen. In: Roland Pomberger (Hg.): Konferenzband zur 15. Recy & DepoTech Konferenz. 18.-20. November 2020. Unter Mitarbeit von Josef Adam, Alexia Aldrian, Alex Curtis, Karl E. Lorber, Thomas Nigl, Selina Möllnitz, Renato Sarc, Theresa Sattler, Sabine Schlögl, Thomas Weißenbach, Martin Wellacher, Sandra Vidzec, Daniel Vollprecht. Leoben: Eigenverlag.
- Sudburyino. (2020). <https://www.sudburyino.ca/en/recycling/Pages/home.aspx>. Zugriff am 5.11.2020.
- Sun, L. & Qiu, K. (2011). Vacuum pyrolysis and hydrometallurgical process for the recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries. *Journal of Hazardous Materials* 194 (2011) 378–384. doi:10.1016/j.jhazmat.2011.07.114
- Sun, X., Luo, X., Zhang, Z., Meng, F., Yang, J., 2020. Life cycle assessment of lithium nickel cobalt manganese oxide (NCM) batteries for electric passenger vehicles. *Journal of Cleaner Production* 273, 123006.
- Sungeel. (2020). <http://www.sungeelht.com/>. Zugriff am 19.11.2020.
- Sziegoleit, H., 2013. Sortierung von Gerätebatterien, in: Thomé-Kozmiensky, K.J., Goldmann, D. (Eds.), *Recycling und Rohstoffe*. TK-Verl., Neuruppin, pp. 495–504.
- Taisen. (2020). <https://taisen-recytech.com/about/>. Zugriff am 5.11.2020.
- Tedjar, F., Foudraz, J.-C., 2008. Method for the recycling of mixed batteries and cells comprising lithium-based anodes (EP 1 733 451 B1).
- Telerecycle. (2020). <http://en.telerecycle.com/>. Zugriff am 19.11.2020.
- TES-AMM. (2020a). <https://www.tes-amm.com/services/environment-recycling/>. Zugriff am 5.11.2020.
- TES-AMM. (2020b). <https://www.tes-amm.com/tes-announces-expansive-new-battery-recycling-services/>. Zugriff am 19.11.2020.
- Thackeray, M.M., 1997. Manganese oxides for lithium batteries. *Progress in Solid State Chemistry* 25, 1–71.
- Thies, C., Kieckhäfer, K., Hoyer, C., & Spengler, T. (2018). Economic Assessment of the LithoRec Process. In A. Kwade, & J. Diekmann, *Recycling of Lithium-Ion Batteries* (p. 253-266). Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-70572-9
- Togasaki, N., Yokoshima, T., Oguma, Y., Osaka, T., 2020. Prediction of overcharge-induced serious capacity fading in nickel cobalt aluminum oxide lithium-ion batteries using electrochemical impedance spectroscopy. *Journal of Power Sources* 461, 228168.
- Tradingeconomics.com (2021a) Price for Lithium Carbonate <https://tradingeconomics.com/commodity/lithium>
- Tradingeconomics.com (2021b) Price for Cobalt <https://tradingeconomics.com/commodity/cobalt>
- UBA, 2017, Energie- und Treibhausgasszenarien im Hinblick auf 2030 und 2050, Synthesebericht 2017, Report REP-0628, Wien.
- UFS. (2020). Definition „Fahrzeuggatterie“. *Umweltforum Starterbatterien*. Zugriff 10. August 2020, unter https://www.ufs.at/index.php?option=com_content&view=article&id=95&Itemid=78
- Umicore. (2020). https://csm.umicore.com/en/battery-recycling/our-recycling-process/#3_guarantee_of_destruction_and_recycling. Zugriff am 5.11.2020.
- Ungerböck, R. (2020). Batterien aus der E-Mobilität - Second Life in Großspeichern. Paper presented at the 16. Symposium Energieinnovation Graz.
- Urecycle. (2020). <https://urecycle.eu/portable-batteries/recycling-process/>. Zugriff am 5.11.2020.

- Vandepaera, L., Cloutier, J. & Amor, B. (2017). Environmental impacts of Lithium Metal Polymer and Lithium-ion stationary batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 78 (2017) 46–60.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.057>.
- VDMA, 2020, Roadmap Batterieproduktionsmittel 2030, in Kooperation mit Fraunhofer ISI, RWTH Aachen, TU Braunschweig, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
- Velázquez-Martínez et al., 2019, A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective, *Batteries* 2019, 5, 68; doi:10.3390/batteries5040068
- Velázquez-Martínez, Valio, Santasalo-Aarnio, Reuter, Serna-Guerrero, 2019. A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective. *Batteries* 5, 68.
- Veolia. (2020). <https://www.veolia.org/en/solution/recycling-electric-car-batteries-ecological-issue>. Zugriff am 5.11.2020.
- Vest, M., 2016. Weiterentwicklung des pyrometallurgischen IME Recyclingverfahrens für Li-Ionen Batterien von Elektrofahrzeugen. Dissertation.
- Vieceli, N., Nogueira, C.A., Guimarães, C., Pereira, M.F.C., Durão, F.O., Margarido, F., 2018. Hydrometallurgical recycling of lithium-ion batteries by reductive leaching with sodium metabisulphite. *Waste management (New York, N.Y.)* 71, 350–361.
- Vonsien, S., Madlener, R., 2020. Li-ion battery storage in private households with PV systems: Analyzing the economic impacts of battery aging and pooling. *Journal of Energy Storage* 29, 101407.
- Wang, D., Liu, H., Li, M., Wang, X., Bai, S., Shi, Y., Tian, J., Shan, Z., Meng, Y.S., Liu, P., Chen, Z., 2019. Nanosheet-assembled hierarchical Li₄Ti₅O₁₂ microspheres for high-volumetric-density and high-rate Li-ion battery anode. *Energy Storage Materials* 21, 361–371.
- Wang, J., Yao, S., Yu, Y., Fu, T., Zhang, P., Zhao, J., 2016. Improving the stability properties of 5 V lithium nickel manganese oxide spinel by surface coating with cobalt aluminum oxides for lithium ion batteries. *Electrochimica Acta* 208, 310–317.
- Wang, K., Wan, J., Xiang, Y., Zhu, J., Leng, Q., Wang, M., Xu, L., Yang, Y., 2020. Recent advances and historical developments of high voltage lithium cobalt oxide materials for rechargeable Li-ion batteries. *Journal of Power Sources* 460, 228062.
- Warner, J., 2014. Lithium-Ion Battery Packs for EVs, in: *Lithium-Ion Batteries*. Elsevier, pp. 127–150.
- Weng, D., Duan, H., Hou, Y., Huo, J., Chen, L., Zhang, F., Wang, J., 2020. Introduction of manganese based lithium-ion Sieve-A review. *Progress in Natural Science: Materials International* 30, 139–152.
- Werner, D., Peuker, U. A. & Mütze, T. (2020). Recycling Chain for Spent Lithium-Ion Batteries. *Metals* 2020, 10, 316. doi:10.3390/met10030316.
- WHP Group. (2020). <https://www.wphgroup.de/RECYCLING/>. Zugriff am 5.11.2020.
- Windisch-Kern, S., Holzer, A., Ponak, C., Raupenstrauch, H., 2021. Pyrometallurgical Lithium-Ion-Battery Recycling: Approach to Limiting Lithium Slagging with the InduRed Reactor Concept. *Processes* 9, 84.
- Windisch-Kern, S., Gerold, E., Nigl, T., Jandric, A., Scherhauser, S., Altendorfer, M., Rutrecht, B., Raupenstrauch, H., Pomberger, R., Antrekowitsch, H. und Part, F. (unveröffentlicht) Recycling chains for lithium-ion batteries: A critical examination of current challenges, opportunities, and process dependencies.
- World Bank. (2021). Commodity Markets. „Pink Sheet“ Data & Commodity Markets Outlook (April 2021) <https://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets> abgerufen am 1.05.2021
- WPA. (2019). Durchschnittliche Behaltdauer von Sekundärbatterien. Retrieved from Wien:
- Xiao, J., Li, J., Xu, Z., 2017. Novel Approach for in Situ Recovery of Lithium Carbonate from Spent Lithium Ion Batteries Using Vacuum Metallurgy. *Environmental science & technology* 51, 11960–11966.
- Xu, Y., Li, X., Wang, Z., Guo, H., Huang, B., 2015. Structure and electrochemical performance of TiO₂-coated LiNi_{0.80}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂ cathode material. *Materials Letters* 143, 151–154.
- Yan, H., Zhang, D., Qilu, Duo, X., Sheng, X., 2021. A review of spinel lithium titanate (Li₄Ti₅O₁₂) as electrode material for advanced energy storage devices. *Ceramics International* 47, 5870–5895.

- Yan, S., Xue, Y., Shao, G., Liu, Z., 2020. Activity-structure relationship of electrocatalysts derived from lithium cobalt oxides for metal-air batteries. *Journal of Power Sources* 478, 228773.
- Yazicioglu, B., Tytgat, J., 2011. Life Cycle Assessments involving Umicore's Battery Recycling process.
- Yin, H., Xing, P., 2019. Pyrometallurgical Routes for the Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries, in: An, L. (Ed.), *Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries*. Springer International Publishing, Cham, pp. 57–83.
- Zhan, R., Oldenburg, Z. & Pan, L., (2018), Recovery of active cathode materials from lithium-ion batteries using froth flotation, *Sustainable Materials and Technologies* 17 (2018) e00062, <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00062>
- Zhang, G., He, Y., Feng, Y., Wang, H., Zhang, T., ... Zhu, X., et al. (2018). Enhancement in liberation of electrode materials derived from spent lithium-ion battery by pyrolysis. *Journal of Cleaner Production* 199 (2018) 62-68. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.143>.
- Zheng, R., Wang, W., Dai, Y., Ma, Q., Liu, Y., ... Dai, C., et al. (2017). A closed-loop process for recycling $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_{1-x-y}\text{O}_2$ from mixedcathode materials of lithium-ion batteries. *Green Energy & Environment* 2 (2017) 42-50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gee.2016.11.010>.
- Zheng, X., Li, X., Wang, Z., Guo, H., Huang, Z., Yan, G., Wang, D., 2016. Investigation and improvement on the electrochemical performance and storage characteristics of LiNiO_2 -based materials for lithium ion battery. *Electrochimica Acta* 191, 832–840.
- Zheng, X., Zhu, Z., Lin, X., Zhang, Y. He, Y., ... Sun, Z., et al. (2018). A Mini-Review on Metal Recycling from Spent Lithium Ion Batteries. *Engineering* 4 (2018) 361-370. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.018>.
- Zhu, J., Duan, R., Zhang, S., Jiang, N., Zhang, Y., Zhu, J., 2014. The application of graphene in lithium ion battery electrode materials. *SpringerPlus* 3, 585.

11 Anhang

11.1 Anhang 1 – Fragenkatalog Expert*inneninterviews

Leitfragen:

- a) Sind Sie (oder waren Sie) im Bereich der Sammlung und Behandlung von Lithium-Ionen-Batterien tätig?
- b) Wenn ja, in welchem Bereich?
 - i) Einordnung nach FlowChart
 - ii) Seit wann (Jahr):
- c) Wenn nein, in welchem Bereich sind Sie tätig:
 - i) Seit wann (Jahr):
- d) Wie schätzen Sie den zukünftigen Markt für Lithiumbatterien ein? Wie wird er sich entwickeln? Wie sollte die Abfallwirtschaft darauf reagieren?

Detailfragen nach Stakeholdergruppen:

Produktion (Zellen-Produzenten, Batteriepack-Produzenten, ...)

LIB Material-Produktion:

- a) Welche Stoffe werden produziert?
- b) Werden Sekundärrohstoffe aus LIB-Recyclinganlagen eingesetzt?
 - i) In welcher Menge (Anteil) ist das möglich?
 - ii) Woher beziehen Sie diese Sekundärrohstoffe?
- c) Welche Qualität (Reinheit & Verunreinigung) müssen Stoffe aus dem Recyclingprozess für den Einsatz aufweisen?
- d) Wie zeigt sich der ökonomische Vor-/Nachteil gegenüber Primärrohstoffen? Welche zukünftigen Entwicklungen erwarten Sie?

LIB Zellen-Produktion:

- a) Welche Typen von LIB werden produziert?
 - i) NCA, NMC, LFP, LMO, LCO, ...
- b) Sekundärrohstoffe/aufbereitete Materialien
 - i) Inwiefern werden Sekundärrohstoffe aus LIB-Recyclinganlagen eingesetzt?
 - ii) Werden aufbereitete Materialien (Elektrolyt, Kathoden-/Anodenmaterial) eingesetzt?
 - iii) Welche Voraussetzungen sind dafür (Sekundärrohstoffe/aufbereitete Materialien) notwendig?
 - iv) Bei welchen Stoffen ist der Einsatz von Sekundärrohstoffen/aufbereitete Materialien möglich bzw. besteht noch Potenzial?
- c) Inwiefern spielt die Rezyklierbarkeit der Zelle bei der Produktion eine Rolle?
- d) Welche Trends sind aktuell absehbar?
 - i) Veränderung der Nennspannung (48V-Systeme für erweiterte Bord- und Assistenzsysteme), Stromstärken, Kapazitäten?

LIB Pack-Produktion

- a) Welche LIB (Kategorie) werden produziert?
 - i) Geräte-/Fahrzeug-/Industriebatterien
- b) Welche Typen von LIB werden in den Packs verwendet?
 - i) NCA, NMC, LFP, LMO, LCO, ...
- c) Welche Trends sind aktuell absehbar?
 - i) Veränderung der Nennspannung (48V-Systeme für erweiterte Bord- und Assistenzsysteme), Stromstärken, Kapazitäten?
 - ii) Neue Sicherheitssysteme?
- d) Werden von Ihnen EoL-LIB Packs aufbereitet?

Produkt-Herstellung (Assembler, In-Verkehr-Bringer)

- a) Welche LIB (Kategorie) werden verbaut/produziert/verkauft?
 - i) Geräte-/Fahrzeug-/Industriebatterien
- b) Welche Typen von LIB werden verwendet?
 - i) NCA, NMC, LFP, LMO, LCO, ...
- c) Gibt es ein „internes“ Rücknahmesystem („reverse logistics“) bzw. alternative Geschäftsmodelle?
 - i) Sammelstellen
 - ii) Leasing/Miete/...
 - iii) Wie hoch ist die Rücklaufquote?
 - iv) Wie lang ist die durchschnittliche Lebensdauer im „First Life“?
- d) Werden zurückgenommene LIB Packs:
 - i) einem „Second Use“ zugeführt?
 - ii) Getestet?
 - iii) Repariert?
- e) Wie werden die Kosten für das Recycling integriert?

Umfang:

- a) Aufkommen:
 - i) Welche Mengen produzieren Sie pro Jahr? (Aufschlüsselung, wenn möglich)
 - ii) Wieviel decken Sie schätzungsweise vom österreichischen Markt ab?

Ökonomische Indikatoren:

- a) Beschäftigte:
 - i) Wie viele Personen (Arbeitnehmer) sind in der Produktion beschäftigt?
 - ii) Wieviel Personen sind insgesamt beschäftigt?
- b) Umsatzerlöse:
 - i) Wie hoch sind die Umsätze, die Sie mit der Produktion von LIB Batterien erzielen (in € oder als Prozent der gesamten Umsatzerlöse)
- c) Investitionen:
 - i) Haben Sie in den letzten 5-10 Jahren in LIB-Anlagen investiert, wenn ja, in welcher Größenordnung (€/Jahr im Durchschnitt)?

- ii) Planen Sie weitere Investitionen in den nächsten Jahren, wenn ja, in welcher Größenordnung (€/Jahr im Durchschnitt)?
- d) Außenhandel – internationale Wertschöpfungskette:
 - i) Gibt es signifikante Vorleistungen (Maschinen, Materialien, Dienstleistungen o.ä.), die importiert werden? Wenn ja, wie hoch ist der Importanteil der importierten Güter/Dienstleistungen an den gesamten Vorleistungen (in %)?
 - ii) Wie hoch ist der Anteil der Produktion, der in den Export geht?
 - iii) Produktionskosten
 - iv) Wie hoch sind die Kostenanteile von Material, Abschreibungen, Personal und Energie an den gesamten Produktionskosten?

Rücknahmesysteme, Sammler, ...

Sammlung, Vorsortierung, Zwischenlagerung:

- a) Welche Batteriekategorien werden übernommen? ... Geräte/Fahrzeug/Industriebatterien
- b) Welche Typen von Lithiumbatterien werden übernommen?
- c) Werden die jeweiligen Kategorien und Typen unterschiedlich
 - i) gesammelt?
 - ii) sortiert?
 - iii) gelagert?
- d) Wie wird zwischen den Kategorien und Typen unterschieden?
- e) Wie werden defekte Batterien erkannt?
- f) Wie gehen Sie mit defekten Batterien um?
- g) Welche Ausbildungen/Schulungen hat das Personal, damit der Umgang sicher ist?

Transport und Lagerung

- a) Wie werden die LIB vom Sammelort zum Lagerort transportiert?
 - i) Welches Transportmittel wird eingesetzt?
- b) Wie werden die LIB vom Lagerort zur Vorbehandlung/Demontage und dann zum Recycling transportiert? Bitte erläutern Sie den Verlauf.
- c) Wie werden die LIB gelagert?
- d) Welche Maßnahmen treffen Sie bezüglich der Lagerung von LIB (Brandgefahr!)?
 - i) Welche heutigen / zukünftigen Herausforderungen sehen Sie hier?
 - ii) Welche Maßnahmen sollten seitens Produzenten (Zellen, Packs, ...), Politik, etc. getroffen werden, um die Gefahren zu reduzieren?
- e) Gab es rechtliche Hürden und Herausforderungen? z.B. Genehmigung?

Reparatur, Wartung, Vorbereitung zur Wiederverwendung (für Re-Use/Second Life)

- a) Führen Sie Reparaturen an LIB durch?
- b) Wenn ja, Welche Reparaturen werden durchgeführt?
 - i) Zellen, Module, BMS, ...
- c) Wie werden defekte Batterien erkannt?
- d) Wie gehen Sie mit defekten Batterien um?

Demontage:

- a) Führen Sie eine Demontage bzw. eine Teil-Demontage der LIB durch?
- b) Wenn ja, in welchen Schritten erfolgt die Demontage?
- c) Anforderungen an LIB-Hersteller?
 - i) z.B. gerade bei großen Batterien (Traktionsbatterien) ist das Handling schwierig. Unterstützung durch den Produzenten (Design for Recycling: Schrauben statt Schweißnähte oder kleben; Zugänglichkeit der Schrauben; Anleitung zur Demontage; Unterstützung zur (teil-)automatisierten Demontage; ...)
- d) Welche Materialströme fallen an (Wertstoffe, Abfälle, ...)?
 - i) Wie ist die weitere Behandlung/Verbringung dieser Materialströme?

Entladung:

- a) Führen Sie eine Entladung der LIB durch?
 - i) Wenn ja, wie erfolgt die Entladung? Wird der zur Verfügung stehende Strom genutzt?
 - ii) Wenn ja, welche Ausbildungen/Schulungen hat das Personal, damit der Umgang sicher ist?
- b) Welche Anforderungen würden Sie an LIB-Hersteller stellen, um eine Entladung zu ermöglichen/erleichtern?
 - i) z.B. Wird vom Hersteller bereits im BMS die Möglichkeit einer Tiefenentladung für den Recyclingprozess vorgesehen, lässt sich hier viel Zeit sparen und Geld durch Energieeinspeisung gewinnen
- c) Gab es rechtliche Hürden und Herausforderungen? z.B. Genehmigung?

Umfang:

- a) Aufkommen:
 - i) Welche Mengen sammeln Sie pro Jahr? Aufschlüsselung in Geräte/Fahrzeug/Industrie, wenn möglich. Wie viele davon sind defekt?
 - ii) Wieviel decken Sie schätzungsweise vom österreichischen Markt ab?

Ökonomische Indikatoren:

- a) Beschäftigte:
 - i) Wie viele Personen sind für die Sammlung/Lagerung/Vorbehandlung/Transport beschäftigt?
 - ii) Wie viele Personen sind insgesamt beschäftigt?
 - iii) ... Preis für Serviceleistung ... (pro Tonne; pro 1.000 Tonnen; ...)
 - iv) ... Kosten für Vorbehandlung/Demontage ... (pro Tonne; pro 1.000 Tonnen; ...)
 - v) Gibt es signifikante Vorleistungen (Maschinen, Materialien, Dienstleistungen o.ä.) die importiert werden? Wenn ja, wie hoch ist der Importanteil der importierten Güter/Dienstleistungen an den Vorleistungen?
 - vi) Wie hoch ist der Anteil der Produktion, der in den Export geht?
 - vii) Wie hoch ist der Gesamtumsatz (evtl. gegliedert in Haupt- und Nebenprodukte)?
 - viii) Wie hoch sind die Kostenanteile von Material, Abschreibungen, Personal und Energie an den Gesamtkosten?

Aufbereitung und Recycling (Transporteure, Aufbereiter, Recycler, Hütten, ...)

Transport und Lagerung

- a) Wie werden die LIB vom Sammelort zum Lagerort transportiert?
 - i) Welches Transportmittel wird eingesetzt?
- b) Wie werden die LIB vom Lagerort zur Vorbehandlung/Demontage und dann zum Recycling transportiert? Bitte erläutern Sie den Verlauf.
- c) Wie werden die LIB gelagert?
- d) Welche Maßnahmen treffen Sie bezüglich der Lagerung von LIB (Brandgefahr!)?
 - i) Welche heutigen / zukünftigen Herausforderungen sehen Sie hier?
 - ii) Welche Maßnahmen sollten seitens Produzenten (Zellen, Packs, ...), Politik, etc. getroffen werden, um die Gefahren zu reduzieren?
- e) Gab es rechtliche Hürden und Herausforderungen? z.B. Genehmigung?

Identifizierung und Sortierung:

- a) Welche Batteriekategorien werden übernommen? ... Geräte/Fahrzeug/Industriebatterien
- b) Welche Typen von Lithiumbatterien werden übernommen?
- c) Werden die jeweiligen Kategorien und Typen unterschiedlich
 - i) gesammelt?
 - ii) sortiert?
 - iii) gelagert?
- d) Wie wird zwischen den Kategorien und Typen unterschieden?
- e) Wie werden defekte Batterien erkannt?
- f) Wie gehen Sie mit defekten Batterien um?

Demontage:

- a) Führen Sie eine Demontage bzw. eine Teil-Demontage der LIB durch?
- b) Wenn ja, in welchen Schritten erfolgt die Demontage?
- c) Welche Ausbildungen/Schulungen hat das Personal, damit der Umgang sicher ist?
- d) Anforderungen an LIB-Hersteller?
 - i) z.B. gerade bei großen Batterien (Traktionsbatterien) ist das Handling schwierig. Unterstützung durch den Produzenten (Design for Recycling: Schrauben statt Schweißnähte oder kleben; Zugänglichkeit der Schrauben; Anleitung zur Demontage; Unterstützung zur (teil-)automatisierten Demontage; ...)
- e) Welche Materialströme fallen an (Wertstoffe, Abfälle, ...)?
 - i) Wie ist die weitere Behandlung/Verbringung dieser Materialströme?

Entladung:

- a) Führen Sie eine Entladung der LIB durch?
 - i) Wenn ja, wie erfolgt die Entladung? Wird der zur Verfügung stehende Strom genutzt?
 - ii) Wenn ja, welche Ausbildungen/Schulungen hat das Personal, damit der Umgang sicher ist?
- b) Wie werden defekte Batterien erkannt?
- c) Wie gehen Sie mit defekten Batterien um?
- d) Welche Anforderungen würden Sie an LIB-Hersteller stellen, um eine Entladung zu ermöglichen/erleichtern?

- i) z.B. Wird vom Hersteller bereits im BMS die Möglichkeit einer Tiefenentladung für den Recyclingprozess vorgesehen, lässt sich hier viel Zeit sparen und Geld durch Energieeinspeisung gewinnen
- e) Gab es rechtliche Hürden und Herausforderungen? z.B. Genehmigung?

Aufbereitung:

- a) Welche LIB-Typen werden behandelt?
 - i) (primär LIB, sekundär LIB, gemischt mit anderen Batterien, ...)
- b) In welcher Form werden die LIB angeliefert (entladen, vorsortiert, Zelle vs. Pack, ...)
- c) Ist noch eine weitere Demontage notwendig?
- d) Werden die LIB-Typen identifiziert?
 - i) Wie erfolgt diese Identifikation?
- e) Welche Schritte/Prozesse/Behandlungen werden durchgeführt?
Bitte erläutern Sie den Ablauf.
- f) Welche Outputströme / Materialströme / Fraktionen entstehen?
 - i) Können die Outputströme direkt in der LIB-Produktion eingesetzt werden?
(Bsp: Aufbereitung von Kathoden-/Anodenmaterial, Elektrolyt)
 - ii) Welche weiteren Aufbereitungsschritte sind noch notwendig?
 - iii) Welche Qualität haben die Outputströme (hinsichtlich Weiterverarbeitung)?
- g) Wie hoch ist die Recyclingquote?
- h) Wohin werden die Fraktionen verbracht?
- i) Welche Herausforderungen gibt es bei der LIB-RecyAbgasreinigung?
- j) Gab es rechtliche Hürden und Herausforderungen? z.B. Genehmigung?

Rückgewinnung und Recycling:

- a) Werden EOL-LIB als Input eingesetzt?
 - i) In welcher Menge (Anteil) ist das möglich?
 - ii) Wie hoch ist dabei die Ausbeute (Recyclingquote)?
- b) Werden Sekundärrohstoffe aus LIB-Recyclinganlagen eingesetzt?
 - i) In welcher Menge (Anteil) ist das möglich?
 - ii) Wie hoch ist dabei die Ausbeute (Recyclingquote)?
- c) Welche Qualität müssen Stoffe aus dem Recyclingprozess für den Einsatz aufweisen?
- d) Gab es rechtliche Hürden und Herausforderungen? z.B. Genehmigung?

Entsorgung:

- a) Welche Fraktionen aus dem LIB-Recycling müssen entsorgt werden?
- b) Wie/Wohin werden diese Fraktionen entsorgt?

Umfang:

- a) Aufkommen:
 - i) Welche Mengen behandeln Sie pro Jahr? (Aufschlüsselung in Geräte/Fahrzeug/Industrie, wenn möglich)
 - ii) Wieviel decken Sie schätzungsweise vom österreichischen Markt ab?
 - iii) Wie groß ist das Einzugsgebiet

Ökonomische Indikatoren.

- a) Beschäftigte:
 - i) Wie viele Personen sind beschäftigt? (Aufschlüsselung wenn möglich, siehe oben)
 - ii) Gibt es signifikante Vorleistungen (Maschinen, Materialien, Dienstleistungen o.ä.) die importiert werden? Wenn ja, wie hoch ist der Importanteil (bezogen auf €) der importierten Güter/Dienstleistungen an den Vorleistungen?
 - iii) Wie hoch ist der Anteil der Produktion der in den Export geht?
 - iv) Wie hoch ist der Gesamtumsatz (evtl. gegliedert in Haupt- und Nebenprodukte)?
 - v) Wie hoch sind die Kostenanteile von Material, Abschreibungen, Personal und Energie an den Gesamtkosten?

Sonstige Stakeholder (Forschung), Second Life, ...

Fragenliste nicht vollständig, weil zu individuell.

Forschung:

- a) Wie groß sind die Projektvolumen (bezogen auf die LIB-Recycling-Forschung)?
- b) Welche (speziellen) Themengebiete werden beforscht?
- c) Welche Projektpartner sind in der Forschung involviert?
- d) Welche neue/zukünftige Recyclingverfahren sind im industriellen Maßstab vorstellbar?
- e) Welche Umweltauswirkung sehen Sie im Bereich des LIB-Recyclings

Second Life:

- a) Setzen Sie gebrauchte LIB ein? Wenn ja, in welchen Bereichen?
- b) Woher beziehen Sie die aufbereiteten Batterien?
- c) Wie lang ist die durchschnittliche Lebensdauer einer Second Life Batterie?
- d) Welche Herausforderungen gibt es bei der Nutzung von gebrauchten LIB?
- e) Gab es rechtliche Hürden und Herausforderungen? z.B. Genehmigung?
- f) Welche Anforderungen würden Sie an LIB-Hersteller stellen, um eine längere Nutzungsdauer von LIB zu ermöglichen/erleichtern?

Systemübergreifende Fragen:

Kreislaufwirtschaft/Wertschöpfungskette/Recycling:

- a) Gibt es Kooperationen mit anderen Stakeholdern?
- b) Welche Erfahrungen haben Sie im Bereich des Recyclings (gesamte EoL-Kette) von Li-Io-Batterien gemacht bzw. welche allgemeine Einschätzung haben sie bezüglich Recycling von Li-Io-Batterien...?
 - i) Sinnhaftigkeit,
 - ii) Erfolgchancen
 - iii) Zukunftspotenzialen
- c) Welche Herausforderungen sehen Sie für die Etablierung einer vollständigen und wettbewerbsfähigen Wertschöpfungskette für Li-Io-Batterien in Österreich?

- d) In welchen Bereichen der Wertschöpfungskette liegen die größten Herausforderungen, in welchen Bereichen die größten Potenziale für AT? Welche Herausforderungen sind dies genau?
- i) Prozesse/Technologien
 - ii) Sammlung
 - iii) Lagerung
 - iv) Sortierung
 - v) Recycling
 - vi) Vermarktung der gewonnenen Sekundärrohstoffe
 - vii) Entwicklung neuer Geschäftsmodelle
 - viii) Handel mit Altbatterien
- e) Wenn Sie eine vollständige Wertschöpfungskette für das Recycling von Li-Io-Batterien in Österreich für unwahrscheinlich halten, welche Aspekte sind hierfür verantwortlich?
- i) zu geringes Batterieaufkommen
 - ii) zu niedrige oder volatile Sekundärrohstoffpreise
 - iii) fehlende technische Innovationen
 - iv) ungünstige Standortfaktoren (welche?)
 - v) zu große Konkurrenz, im Ausland, wo?
 - vi) ...
- f) Wenn Sie eine vollständige Wertschöpfungskette für das Recycling von Li-Io-Batterien in Österreich für **unrentabel** halten, welche **wirtschaftspolitischen Maßnahmen** (regional, österreichweit, auf der europäischen Ebene) könnten das ändern?
- i) Welche Instrumente wären
 - (1) unbedingt notwendig...
 - (2) nützlich...
 - ii) **Regulierungsinstrumente**
 - (1) Herstellerverantwortung
 - (2) Recyclingquoten
 - (3) Ressourcenobergrenzen (Caps, Caps/Capita)
 - (4) Öko-Design
 - (5) Standards
 - (6) verbindliche Zielvorgaben
 - iii) **Wirtschaftliche und Fiskalische Instrumente**
 - (1) Fiskalische/finanzielle Anreize wie Ökosteuern, Subventionen, öffentliches Auftragswesen
 - iv) **Forschung, Entwicklung und Implementierung**
 - (1) Förderungen für R&D und Modellvorhaben
 - (2) R&D Infrastrukturförderung
 - (3) Innovationsgutscheine (innovation vouchers)
 - (4) Innovations- und Gründerzentren
 - (5) R&D Personalentwicklung
 - v) **Informations-, Bildungs- und Networkingmaßnahmen**
 - (1) wie z.B. Beratung, Schulung, direkte Unterstützung der Aktivitäten von KMU, Kunden, Technologieeinführung, Förderung der Vernetzung, Bereitstellung von Informationen und Unterstützung public-private Partnerships

vi) **Freiwillige Maßnahmen**

- (1) wie Leistungskennzeichnungen und Garantien für Produkte und Dienstleistungen oder freiwillige Vereinbarungen und sektorale Verpflichtungen
- g) Welche **anderen Voraussetzungen** müssten ggf. geschaffen werden oder vorliegen, um einen Markt bzw. vollständige Wertschöpfungsketten für das Recycling von Li-Io-Batterien in AT zu etablieren
 - i) Rücknahmesysteme
 - ii) Designelemente der Batterien
 - iii) Product Service Systems/Ownership an Batterien, ...
- h) Wäre ggf. die Etablierung einer internationalen Wertschöpfungskette wirtschaftlich vorteilhaft und welcher Teil wäre in AT anzusiedeln?
- i) Für den Fall einer positiven wirtschaftlichen Einschätzung für die Sammlung und Behandlung von Lithiumbatterien, mit welchen Investitionen rechnen Sie in Ihrem Bereich (der Wertschöpfungskette)?

Instrumente zur Förderung der Rücklaufquoten:

- a) Wie könnte die Rücklaufquote erhöht werden? Welche Maßnahmen sollten von seitens der Politik/der Unternehmen/der kommunalen Abfallsammlung/sonstigen Playern getroffen werden?
- b) Bestehen wirksame nicht-finanzielle Maßnahmen zur Förderung der Rücklaufquote?

Instrumente zur Förderung von Second Life: Die Nutzung von gebrauchten LIB beispielsweise in Großspeichersysteme oder für Privathaushalte mit Photovoltaik-Anlagen gewinnt immer mehr an Bedeutung.

- a) Welche **Bedeutung** messen sie der Wiederverwendung (**Re-Use**) von Li-Io-Batterien zu?
- b) Im Vergleich zum Recycling? In welchen Bereichen liegt das Re-Use Potenzial?
- c) In welchen Bereichen sehen Sie den größten Bedarf an Second Life-LIB?
 - i) Off-Grid-Systeme (autarke Versorgung)
 - ii) Privathaushalte (Notstromversorgung, Eigenverbrauch, Flexibilität)
 - iii) Gewerbe & Industrie (Notstromversorgung, Eigenverbrauch, Flexibilität, Peak Shaving, ...)
 - iv) Übertragungs- und Verteilungsnetz (Ausgleichsmarkt, Schwarzstart, Spannungsregulierung)
 - v) Erneuerbare Kraftwerke (Energiearbitrage, Asset-Optimierung, Schwarzstart, ...)
 - vi) Thermische Erzeugung (Energiearbitrage, Asset-Optimierung, Schwarzstart, ...)
 - vii) Direkte Wiederverwendung in Elektrofahrzeugen
- d) Gibt es rechtliche Hürden und Herausforderungen? z.B. Genehmigung?
- e) Wie könnte Second Life im derzeitigen System integriert werden?
- f) Wie stufen Sie die Risiken in Bezug auf einer Nutzung von gebrauchten LIB ein?
- g) Welche Anforderungen würden Sie an LIB-Hersteller stellen, um eine längere Nutzungsdauer von LIB zu ermöglichen/erleichtern?

Zukunft:

- a) Wie planen Sie zukünftig steigende Mengen mit ein? Treffen Sie schon jetzt Vorkehrungen (z.B. Lagerkapazitäten)?
- b) Welche politischen Maßnahmen könnten hierbei unterstützen?
- c) Welche Risiken könnten Sie als Unternehmen treffen und wie könnten diese minimiert werden?
- d) Welche Anforderungen würden Sie an LIB-Hersteller stellen, um die
 - i) Sammlung und Behandlung
 - ii) Identifizierung

- iii) Demontage zu erleichtern?
- e) Welche zukünftigen LIB-Technologien sehen Sie?

11.2 Anhang 2 – Workshopbericht vom Expert*innenforum Lithium-Ionen-Batterien

Expertenforum Lithium-Ionen-Batterien



Technische, ökonomische und umweltrelevante Aspekte für die Etablierung eines (idealen) Kreislaufsystems für Lithium-Ionen-Batterien (LIB): Österreich im Kontext einer europäischen Wertschöpfungskette 2040

24. Februar 2021

Bericht

*im Rahmen des Zero Emission Mobility Projekts
„Developing the Lithium-ion battery value chain for recycling in Austria“*

*Peter Beigl, Silvia Scherhauser, Florian Part, Stefan Salhofer
**Institut für Abfallwirtschaft
Universität für Bodenkultur Wien (BOKU)***

*Thomas Nigl, Michael Altendorfer, Bettina Rutrecht, Roland Pomberger
**Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Montanuniversität Leoben***

*Ina Meyer, Mark Sommer
Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung (WIFO)*

Dieser Bericht ist unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY-SA 3.0 AT veröffentlicht.
Weitere Hinweise unter: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/at/>.

Vorwort

Dieser Workshop wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „Developing the Lithium-ion battery value chain for recycling in Austria“ unter der Ausschreibung Zero Mission Mobility durchgeführt, welches durch den Klima- und Energiefonds, vertreten durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH gefördert wird (Projektnummer: 878117).

Wir möchten uns auch bei allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern herzlich bedanken, die unserer Einladung gefolgt sind und so engagiert, fachkundig und konstruktiv zum Expertenforum beigetragen haben.

Der Bericht fasst die wichtigsten Punkte des Expertenforums zusammen.

Ein besonderes Dankeschön geht an die Referentinnen Patrizia Ilda Valentini und Astrid Arnberger, die auf eigene Kosten ihre Zeit und ihr Wissen zur Verfügung gestellt haben.

Die Ergebnisse aus den Workshopssessions sind Aussagen und Meinungen der teilnehmenden Expert*innen und spiegeln nicht zwangsläufig die Meinungen der Autor*innen oder des Fördergebers wider.

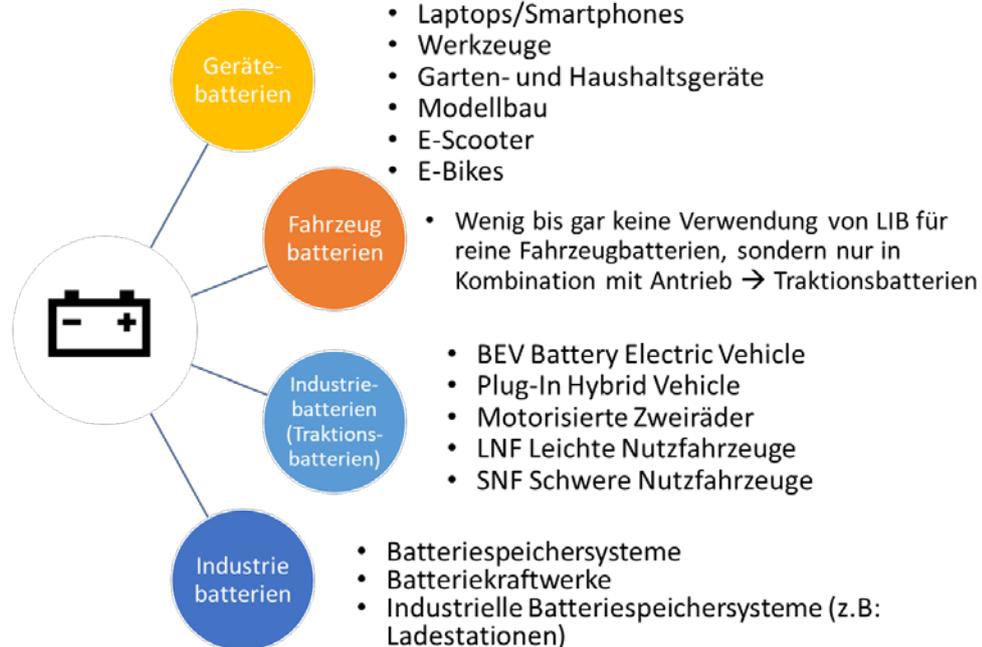


Abbildung 1. Begriffsbestimmungen und Einsatzfelder von Lithium-Ionen Akkumulatoren

1 Motivation

Hintergrund

Die Bedeutung von Elektrofahrzeugen und damit die Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien (LIB) wird auf Basis der Ziele, die EU bis zum Jahr 2050 vollständig zu dekarbonisieren, deutlich zunehmen. In Österreich wird ein maßgeblicher Anstieg des Anteils an elektrisch angetriebenen Transportfahrzeugen erwartet. LIB enthalten wertvolle Metalle und Komponenten mit steigendem Recycling- und Wiederverwendungspotenzial. Maßnahmen, um diese knappen Materialien in der Wirtschaft zu halten, sind frühzeitig zu setzen und erfordern fundierte Entscheidungen hinsichtlich Recyclings, Re-Use, Technologiemix, Systemaufbau und wirtschaftspolitischem Rahmen.

Projekt LIBRAT:

Entwicklung einer Wertschöpfungskette

Ziel der Studie ist die Entwicklung einer Wertschöpfungskette für das Recycling von LIB. Es werden die Rahmenbedingungen für einen vollständigen Recyclingprozess in Österreich bewertet und eine Technologie-Roadmap für ein ganzheitliches System – von Second-Life-Ansätzen bis zu Rücknahme-/Sammelsystemen und innovativen Recyclingtechnologien erstellt. Schließlich wird diese Roadmap auf der Grundlage eines kohlenstoffarmen Energieszenarios der österreichischen Wirtschaft mit zirkulärer Ressourcennutzung hinsichtlich der wirtschaftlichen Effekte analysiert.

2 Workshop

Ziele

1. Identifizierung von Hemmnissen, Chancen, Forschungs- und Förderbedarf, um eine „ideale“ Kreislaufwirtschaft von Lithium-Ionen-Batterien zu ermöglichen
2. Entwurf eines Maßnahmenkatalogs für ein „best-case“ Szenario mit angenommener Mengenentwicklung
3. Entwicklung der österreichischen Kreislaufwirtschaft für LIB
4. Schaffen eines gemeinsamen Verständnisses und Bewusstseins zur Relevanz der Problematik

Ablauf

Nach einem herzlichen Willkommen wurden die Teilnehmer*innen mit Impulsreferaten aus Industrie und Wirtschaft in das Thema eingeführt, bevor es nach einem Vortrag zum Thema Lithium-Ionen-Batterien (LIB) in Österreich – Status quo und Ausblick durch das LIBRAT-Projektteam in den interaktiven,

online-moderierten Stakeholderdialog zu vier Themenbereichen übergang.

Diskutiert wurden in je zwei parallelen Sessions die Themen:

- Session 1A: First life – Batterieproduktion und Erstnutzung
- Session 1B: Second Life – Reuse
- Session 2A: Rücknahme und Sammlung
- Session 2B: Recycling

Abschließend folgte eine Plenardiskussion über die erarbeiteten Maßnahmen.

Teilnehmer*innen

Beim Workshop waren Stakeholder im Bereich der Kreislaufwirtschaft anwesend, die sich grob auf folgende Tätigkeitsbereiche zuordnen lassen:

- Forschung und Entwicklung (10)
- Produzierende Industrie (8)
- Recyclingwirtschaft inkl. Sammelsysteme (7)
- Behörden und sonstige Stakeholder (2)

3 Herausforderungen für Industrie und Recycler – Keynotes

Kreislaufwirtschaft in der Automobilindustrie am Beispiel der E-Autobatterie

Patrizia Ilda Valentini, Renault Österreich

Wesentliche Treiber für verstärkte Kreislaufwirtschaft in der Automobilindustrie betreffen die Ressourcenseite, wie Rohstoffmangel, soziale Verantwortung beim Rohstoffabbau und Erschöpfung von weltweiten Reserven (z.B. Kupfer) ebenso wie die Kostenseite mit tendenziell steigenden Rohstoffpreisen für Batterien, Auswirkungen der Rohstoffpreise auf die operative Marge und der internationale Trend in Richtung CO₂ Steuer. Die seit 2017 verfolgte Umweltstrategie DRIVE THE FUTURE umfasst die Themen Kreislaufwirtschaft, Elektroautos und neue Mobilität, wobei neben der Reduktion der Treibhausgase auch die Ressourcenoptimierung verfolgt wird: Eco-Design durch Einsatz von Sekundärrohstoffen, Closed-Loop Recycling, Wiederverwendung von Autoteilen, die Verlängerung des Produkteinsatzes und effiziente Nutzung sind dabei wesentliche Aspekte.

Vorgestellte Projekte umfassen u. a. ein Zentrum für Kreislaufwirtschaft zur Reparatur von Elektroautobatterien und Wiederaufbereitung von Gebrauchtwagen namens REFACTORY in Flins (FR), welches eng mit dem Reparaturzentrum in Leonding (OOE, AT) zusammenarbeitet und die Umsetzung einer fossilfreien Insel Porto Santo zur Einführung von E-Mobi-

lität inkl. Ladestationen mit Smart Charging und Nutzung von Pufferspeichern aus Second-Life-Elektro-batterien.

E-Mobilität – Herausforderungen und Wege aus Sicht der Recycler

Astrid Arnberger, Saubermacher AG

Die Aufbereitung von Lithium-Ionen-Batterien durch die Fa. Redux als führendes Batterierecyclingunternehmen in Europa, umfasst Entladung inklusive Einspeisung in das eigene Netz, Demontage, thermische Behandlung und mechanische Aufbereitung mit einer Kapazität von 10.000 Tonnen pro Jahr. Wesentliche Outputs des Aufbereitungsprozesses umfassen elektrische Energie, Elektronik, Kabeln, Kunststoffe und Metalle aus der Demontage sowie Fe, Al, Cu und Aktivmaterial aus der mechanischen Behandlung. Wichtige Meilensteine auf Basis des Vorschlags der EU-Batterieverordnung sind die diversen Vorgaben zu Verwertungsquoten, Recyclingeffizienzen und Sammelquoten für Co, Ni, Cu, Li und Gerätebatterien bis 2025 bzw. 2030. Ein wesentliches Thema aus Sicht der Recycler ist das Brandschadenrisiko, wobei in den letzten Jahren ein starker Anstieg an Brandschäden dokumentiert ist. Daher werden eine hohe Sammelquote und ein Pfandsystem befürwortet. Reuse für Second Life wird auf Basis bisheriger Erfahrungen als ökologisch sinnvoll, jedoch nicht wirtschaftlich rentabel gesehen, wobei die Vorgabe einer Reuse-Quote zu hinterfragen ist.

4 LIB in Österreich – Status quo und Ausblick - Einführung des Projektteams

Relevanz von LIB

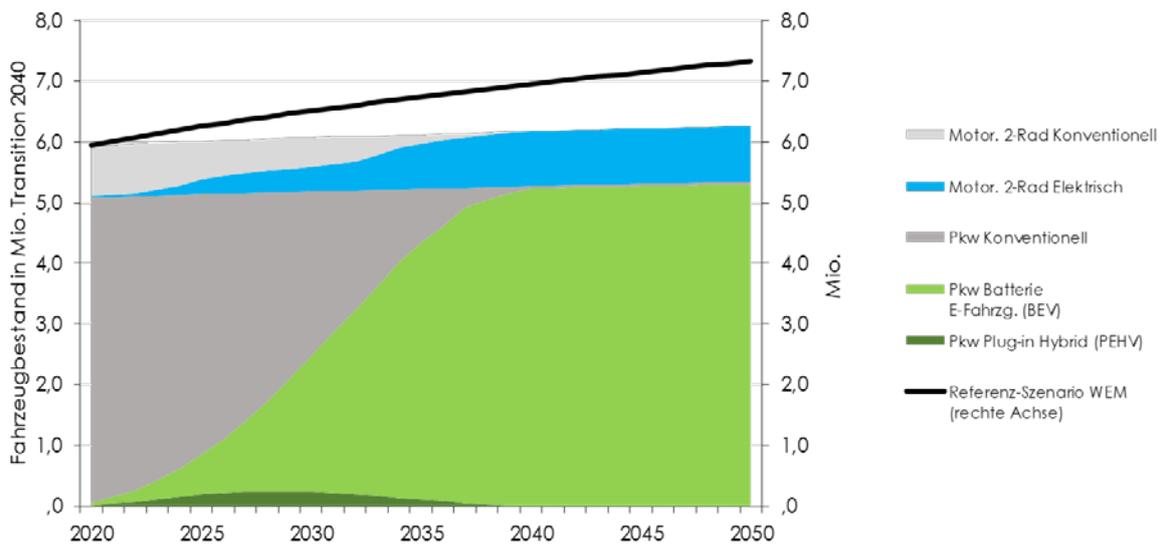
Die hohe Relevanz von Lithium-Ionen-Batterien basiert auf dem Ressourcenaspekt bezüglich wertvoller und kritischer Rohstoffe, der Nachhaltigkeit mit Bezug zu Abbau unter zumeist schlechten Arbeitsbedingungen im globalen Kontext und der energieintensiven Herstellung der Batterien, Sicherheitsaspekten mit Gefährdungspotenzial bei Sammlung und Behandlung, den hohen zu erwartenden Mengen im Zuge von Energiewende und Dekarbonisierung und der Komplexität aufgrund der Vielfalt an Bauweisen und Zellchemien.

Umweltpolitische Eckpunkte für das Projekt LIBRAT sowie das Expertenforum bilden die angestrebte fossilfreie Mobilität bis 2040 mit der Lithiumbatterie als Schlüsseltechnologie und das Kreislaufwirtschaftspaket im Konnex zum Green Deal der EU, die den Fokus auf Ressourcenschonung, Werterhaltung und Wertschöpfung im EU-Raum legen.

Auf dem Weg zur fossilfreien Mobilität – Das „Transition Szenario“

Ina Meyer, WIFO

Als Basis für die LIB-Mengenentwicklungen fungiert das "Transition Szenario". Es wurde durch ein österreichisches Konsortium unter der Leitung des Umweltbundesamtes erstellt und beinhaltet politische Maßnahmen (CO₂-Preise, Ordnungsrecht), technologischen Wandel, Investitionen und Verhaltensänderungen in den Bereichen Energieerzeugung, Industrie, Wohnen und Verkehr, die für Österreich eine Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 darstellen können (Reduktion der energiebedingten THG-Emissionen um mindestens 80-95% 2050/1990). Dies führt zu einer Reduktion der Endenergienachfrage in allen Sektoren sowie zu einem Shift in Richtung Erneuerbare Energieträger. Im Verkehrsbereich wurde eine Elektrifizierung der Fahrzeugflotte berechnet (siehe Abb. 2). Diese Entwicklung wurde an das neuerliche Ziel des aktuellen Regierungsprogramms Klimaneutralität bis 2040 angepasst.



Q.: UBA (2017), TU Graz, WIFO Berechnungen

Abbildung 2. Modellierung der End-of-Life Mengen für Mobilität in Österreich auf Basis des Szenarios „Transition“

Mengenentwicklung von End-of-Life LIB bis 2040

Silvia Scherhauser, BOKU Wien

Die Abschätzung der LIB-Mengen im End-of-Life (EoL) basiert auf den Bestandszahlen des „Transition

Szenarios“. Für Elektrogeräte wurde ein jährlicher Zuwachs von 6% bis 2025 angenommen. Folgende Berechnungsparameter wurden berücksichtigt:

- Jährlich in Verkehr gesetzte Mengen an Produkten/Produktgruppen mit Li-Ionen Batterien (Differenz zwischen Jahresbe-

stand und Bestand des Vorjahres unter Berücksichtigung eines Austauschs der Altbestände)

- LIB Batterie-Stückgewicht für verschiedene Fahrzeugtypen und Elektrogeräte (siehe Folien im Anhang)
- Verteilungskurve für Produktlebens- und Batterie-Nutzungsdauer: Der Großteil an E-Autos erreicht nach etwa 8 bis 14 Jahren das Ende ihrer Nutzungsdauer. Für leichte und schwere E- Nutzfahrzeuge wird angenommen, dass die Batterien schon früher ihre Kapazitätsgrenzen erreichen und daher die Batterie ausgetauscht wird

Auf der Basis des Transition-Szenarios, d.h. wenn eine Elektrifizierung des Verkehrssektors bis 2040 umgesetzt wird, ergibt sich ein Potenzial an EoL Li-Ionen Batterien von etwa 25.000 Tonnen im Jahr 2030 mit stark ansteigenden Mengen von bis zu 200.000 Tonnen im Jahr 2040. Der Großteil stammt aus E-Fahrzeugen, gefolgt von leichten E-Nutzfahrzeugen (Abb.3). Abgesehen von den Unsicherheiten betreffend Produktlebensdauer und Batterienutzungsdauer, müssen noch weitere wesentliche Einflussfaktoren berücksichtigt werden: Import und Export von Gebrauchtwagen, Potenzial für Großspeichersysteme (Batteriekraftwerke), Abweichung zwischen Ist-Bestand und Bestand im Szenario.

Das Transition-Szenario gibt ein sehr ambitioniertes Ziel vor, wenn man bedenkt, dass der derzeitige Bestand an E-Fahrzeugen noch weit darunter liegt (E-Auto Stand Ende 2020: 45.000; im Transition-Szenario für 2021: 104.000 Stück). Nichtsdestotrotz, wenn Österreich bis 2040 klimaneutral sein soll, wird es früher oder später zu einem rasanten Anstieg in der E-Mobilität kommen und dies wird sich auch auf die Mengen an Altbatterien auswirken.

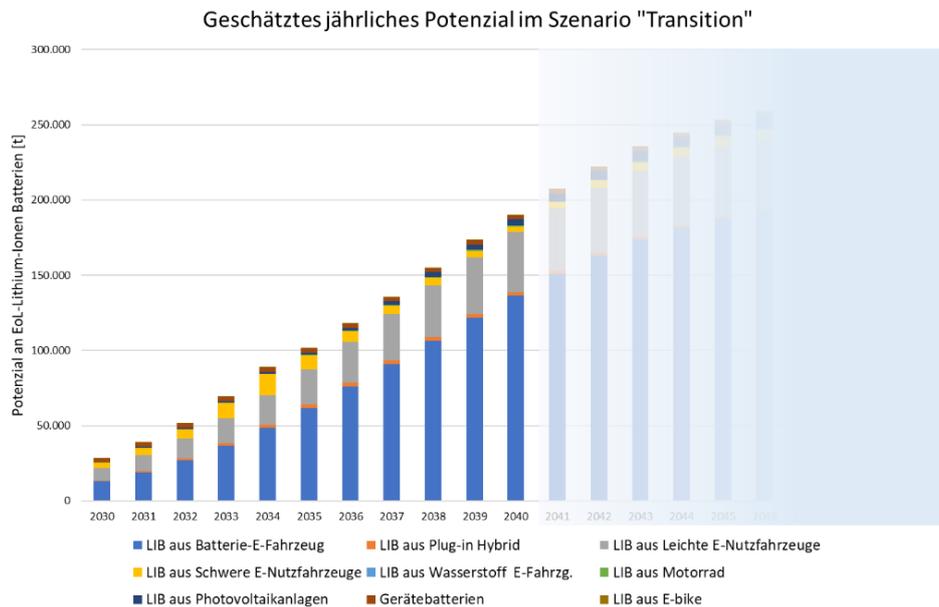


Abbildung 3. Geschätztes jährliches Potenzial an End-of-Life Mengen für Lithium-Ionen Batterien in Österreich auf Basis des Szenarios „Transition“ (Quelle: Nigl T., Scherhauser S., Meyer I., Altendorfer M., Part F., Rutrecht B. und Beigl P. (2021) Aktuelle und zukünftige Recyclingkapazitäten für Lithium-Ionen-Batterien mit Fokus auf den österreichischen Markt. Conference paper. Berliner Recycling- und Sekundärrohstoffkonferenz 2021. 15th–16th March, Berlin, Germany.)

5 Gestaltung der Wertschöpfungskette

5.1 Ausgangspunkt und Fragestellung für Sessions

Bezugsszenario 2040 und Fragestellung

Damit das Ziel der Klimaneutralität für Österreich bis 2040 erreicht werden kann, muss die E-Mobilität stark ausgebaut werden. Dies hat zur Folge, dass das Aufkommen an gebrauchten LIB auf etwa 25.000 Tonnen im Jahr 2030 bis zu 200.000 Tonnen im Jahr 2040 ansteigen kann.

Die Kernfrage lautete:
Wie können diese Mengen im Sinne einer Kreislaufwirtschaft bestmöglich genutzt werden?

Dazu standen vier Teilbereiche der Wertschöpfungskette zur Diskussion, die in parallelen Sessions näher betrachtet werden sollten:

- Session 1A: First life – Batterieproduktion und Erstnutzung (First Life)
- Session 1B: Second Life – Reuse
- Session 2A: Rücknahme und Sammlung
- Session 2B: Recycling

Kernfragen innerhalb der Sessions

Innerhalb der Sessions sollten folgende Fragen beantwortet werden:

- Welche Chancen und Potenziale sehen Sie in Österreich?
- Welche Hindernisse und Herausforderungen gibt es zu bewältigen?
- Welche Anreize und Maßnahmen müssen dazu geschaffen werden?

Darauf aufbauend wurde eine Prioritätenreihung von möglichen Maßnahmenpaketen erarbeitet.

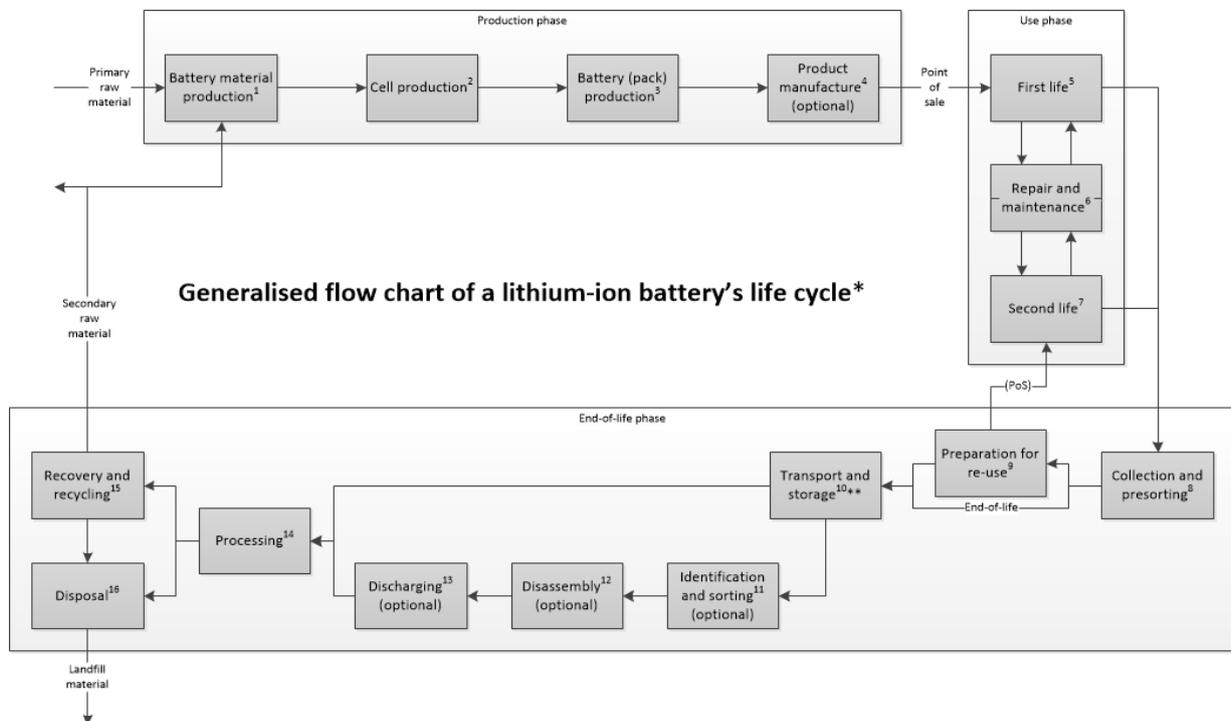


Abbildung 4. Vereinfachte Prozesskette für den Produktlebenszyklus von Lithium-Ionen-Batterien

6 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Sessions sind in den grünen Tabellen zusammengefasst, wobei für jedes thematische Maßnahmenbündel Chancen und Potenziale, Hindernisse und Herausforderungen skizziert sind. Maßnahmen, die von Teilnehmer*innen überwiegend als prioritär beurteilt wurden, sind in fetter Schrift hervorgehoben. Details zur Ausgestaltung sind nach Themenblöcken im Fließtext ausgeführt, wobei Wortmeldungen anonym wiedergegeben sind. Aussagen und Meinungen der teilnehmenden Expert*innen spiegeln weder die Meinungen der Autor*innen noch des Fördergebers wider.

6.1 First Life – Batterieproduktion und Erstnutzung (Session 1A)

Hintergrund und Rahmen

Bei der Erreichung des Ziels der Klimaneutralität bis 2040 nimmt die Bedeutung von LIB für die Elektromobilität stark zu. Dabei steigt der Bedarf an wertvollen und kritischen Rohstoffen, die derzeit überwiegend importiert werden, stark an. Die Ressourcensicherheit spielt dabei aus europäischer Sicht eine zentrale Rolle ebenso wie die Ressourceneffizienz.

Neben einer Verlängerung der Nutzungsdauer bereits im „First Life“ können durch smartes Produktdesign Materialkreisläufe geschlossen werden und der Einsatz von Sekundärmaterialien erfolgen. Informationen über die in LIB enthaltenen Materialien, etwa in Form von digitalen Produktpässen, sind dabei von Relevanz.

Relevante Service-Leistungen entlang der Wertschöpfungskette

Während der Abfallsammlung sei es sehr wichtig, das genaue Produktdesign von Gerätebatterien zu kennen. Nur so sei eine rasche und effiziente Vorsortierung der Batterietypen bei öffentlichen Sammelstellen möglich. Dieses Thema solle bei den Produzenten mehr beachtet werden. Es könne z.B. die Produktinformation standardisiert und digitalisiert werden. Digitale Lösungen, z.B. auf Basis der Blockchain-Technologie, könnten die Informationsweitergabe – von der Batterieherstellung bis zum Recycling – ermöglichen, wobei zugleich IP-Rechte bewahrt würden.

Session 1A – First Life und Batterieproduktion – Zusammenfassung (Teil 1 von 2)

Welche <u>Chancen und Potenziale</u> sehen Sie in Österreich?	Welche <u>Hindernisse und Herausforderungen</u> gibt es zu bewältigen?	Welche <u>Anreize und Maßnahmen</u> müssen dazu geschaffen/gesetzt werden?
Ressourcenparks / Altstoffsammelzentren	Entnahme von Batterien aus Elektroaltgeräten, Schulung von Mitarbeitern	Produktdesign, Standardisierung? • Nutzung von IDIS (automotive) • Blockchain?
Branchenübergreifender Informationsfluss	Interessenskonflikte der einzelnen Stakeholder	Welche Form des Anreizes? • Fördersysteme (z.B. IPCEI) • Blockchain?
Lebensdauerverlängerung	Design for Repair, Repairability	Repairability-Index (gesetzliche Vorgabe, s. Frankreich)

Session 1A – First Life und Batterieproduktion – Zusammenfassung (Teil 2 von 2)

Welche Chancen und Potenziale sehen Sie in Österreich?	Welche Hindernisse und Herausforderungen gibt es zu bewältigen?	Welche Anreize und Maßnahmen müssen dazu geschaffen/gesetzt werden?
Einsatz von Sekundärrohstoffen	Recyclingfähigkeit, Phasenverschiebung durch First Life, Standards hinsichtlich der Qualitätsanforderungen bei Outputfraktionen (gesetzliche Vorgabe – EU?)	Standards bei Qualitätsanforderungen (gesetzliche Vorgabe – EU?)
Digitale Produktpässe	International gehandelte Güter, Wettbewerbsverzerrung (u.a. Amazon, Alibaba)	Gesetzliche Maßnahmen
Alternative Geschäftsmodelle (Bsp. Batteriemiete bei Renault)	Mögliche Umsetzung auch im Gerätebereich?	Modularisierung (für erleichterten Tausch von Komponenten/Batterien)
Modularisierung vs. Cell-to-Pack	Erschwertes Handling in Recycling/Wiederverwendung; Verbindungstechnik (Eco-design); Trade-off: Produktionskosten vs. Kosten im Second Life	Verbindungstechnik (Eco-design, gesetzliche Vorgabe)
Erweiterte Produzentenverantwortung	Ökonomische Obsoleszenz, Schlupflöcher in gesetzlichen Vorgaben	Repairability-Index Initiativen einzelner Unternehmen (z.B. 1%-for the-planet)

Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer

Die „Repairability“ eines Produkts sei sehr wichtig. Der „Repairability-Index“ werde in Frankreich seit Neuestem vorgeschrieben (www.ecologie.gov.fr/index-reparabilite). Es wäre interessant, ob es möglich ist, diesen Index auch in Österreich anzuwenden.

Anreize für erhöhten Einsatz von Sekundärrohstoffen

Generell müssten Qualitätsstandards, insbesondere Standards für Material-Mischungen bzw. für die Output-Fraktionen von Recyclinganlagen geschaffen werden. Das generelle Problem beim Recycling sei, dass spezielle Verwertungspfade bei der Markteinführung neuer Produkte in der Regel fehlen und die

Branche dadurch tendenziell technischen Entwicklungen hinterherhinkt. Beim Recycling sollten nationale sowie EU-weite Lösungen gesucht werden.

Wünschenswert seien Förderprogramme, die die LIB-Produktion wieder in die EU zurückholen. Es sollten gesetzliche Vorgaben für international gültige Produktpässe festgeschrieben werden. Neue Geschäftsmodelle für Leasing oder Services – analog zu Farbdruckern – sollten forciert werden.

Der Aufbau eines Batteriepacks auf Modulebene fördere die Möglichkeiten zur Reparatur, Demontage, etc. Es sei jedoch kosteneffizienter, neue LIB herzustellen. Am Ende seien die Handlingkosten entscheidend, die für das Auftrennen der Verbundwerkstoffe aufgewendet werden müssen.

Rolle für die erweiterte Produzentenverantwortlichkeit

Eine erweiterte Produzentenverantwortung (EPR = extended producer responsibility) sei wünschenswert. Entgegen der EPR stünden Argumente, wie ein verhältnismäßig zu hoher wirtschaftlicher Aufwand

(z.B. durch den Einsatz von Technologien oder fachkundigem Personal). Dadurch sei die EPR nicht sehr wirksam.

6.2 Second Life und Reuse (Session 1B)

Hintergrund und Rahmen

Ein Großteil der gebrauchten LIB sind nach der Erstinutzung immer noch funktionstüchtig und könnten in Second-Life-Anwendungen Einsatz finden.

Die Produktion von LIB verursache große Mengen an Treibhausgasemissionen. Eine verlängerte Nutzung kann daher die Zahl der Neuproduktionen und damit auch Umweltauswirkungen reduzieren. Diverse Pilotprojekte zu Second-Life-Anwendungen von LIB (z.B. als stationäre Energiespeicher) existieren bereits. Nun gilt es diese Second-Life-Anwendungen

weiterzuentwickeln, um Sie ökonomisch und sicher betreiben zu können. Fragen der Garantie oder Verantwortung spielen dabei eine Rolle ebenso wie Informationen über den technischen Zustand der Batterien.

Mögliche Quellen von LIB für Second-Life-Nutzung

Mögliche Quellen wären LKW-Batterien. Sie besäßen im Durchschnitt 0,5 MW und nach ihrem Erfahrungswert besteht pro Betriebsgelände der Fuhrpark aus 20-50 Stück LKW. Sie besäßen ein klares Belastungsprofil.

Session 1B – Second Life und Reuse – Zusammenfassung (Teil 1 von 2)

Welche Chancen und Potenziale sehen Sie in Österreich?	Welche Hindernisse und Herausforderungen gibt es zu bewältigen?	Welche Anreize und Maßnahmen müssen dazu geschaffen/gesetzt werden?
Logistikketten eignen sich für Second Life (50 neue LKWs pro Jahr)	Handlingkosten als Knackpunkt (Ausbau, Gefahrguttransport, Demontage, Bewertung der Batterie) 70 €/kWh?	Anreizprogramme von Seiten der Politik (Bonus für Second Life)
Privat-Pkw	Gefahrguttransport als Herausforderung (z.B. bei Transport ins EU-Ausland) Kostendifferenz zur Neubatterie zu hoch/ungünstig	Maßnahmen zur Vermeidung von Gefahrguttransportthematik: Aufbereitung dezentral (innerhalb nationaler Grenzen; verwirklicht!) neues Business (Chance) Incentives für Besitzer den PKW mit besserem SoH abzugeben

Session 1B – Second Life und Reuse – Zusammenfassung (Teil 2 von 2)

Welche Chancen und Potenziale sehen Sie in Österreich?	Welche Hindernisse und Herausforderungen gibt es zu bewältigen?	Welche Anreize und Maßnahmen müssen dazu geschaffen/gesetzt werden?
Geringes Potenzial: Gerätebatterien	Garantiebedingungen (schwierig auszustellen)	CO ₂ -Zertifikathandel oder Strafzahlungen zweckwidmen
Testing: SoH als Schlüssel für Wirtschaftlichkeit (abh. von Nutzungsart, Temperatur)	Aufbau von Prüfstellen zur SoH-Beurteilung	Mietmodell für Speicherleistung (um mit Garantie umgehen zu können)
Nutzung von E-Batterien in Privathaushalten und als Pufferspeicher	Rohstoffseite als Knackpunkt Höhere Ressourceneffizienz von Reuse oder Nicht-Reuse??	
Nutzung zur Spitzenlastabdeckung	Noch nicht kostendeckend in AT (in Deutschland schon), abh. vom Strommarkt	

Maßnahmen zur Senkung der Handlingkosten

Handlingkosten für Second-Life-Nutzung in Euro pro kWh seien ein kritischer Benchmark im Vergleich von Neupreisen von Batterien, die derzeit unter 50 Euro/kWh sanken. Handlingkosten müssten inklusive Transport, Qualifizierungskosten usw. ermittelt werden. Die Notwendigkeit, die Batterie bei Transporten als Gefahrgut zu behandeln, sorgte für sehr hohe Kostensteigerungen. Das sei viel zu teuer. Im Gegensatz zu den PKWs, bei den LKWs anzusetzen, sei eine gute Idee. Man könne den Fahrzeugbesitzer anregen, das Fahrzeug früher zu tauschen. Dieser bekomme im Gegenzug eine Art „Goodie“ vom Staat, um bessere Speicher zu liefern. Niedrige Handlingkosten seien mit Serienfertigung und Standardisierung verbunden. LIB aus PKWs bedingten einen Gefahrguttransport nach ADR und führten bei internationaler Verbringung zur Verwertung oder Weiternutzung sehr hohe Kosten.

Garantie für Second-Life-LIBs als Risiko

Neben den Handlingkosten sei die Garantie ein vertragliches Fragezeichen, da die Performance nicht garantiert werden könne. Der Akku werde in der Mobilitätsanwendung sehr gefordert (Spitzenlast vs. gemächlicher gleichmäßiger Last). Auf zellularer

Ebene gäbe es momentan keine Möglichkeit Batterien zu tauschen, auf Modulebene i.d.R. schon. Es bestünden Überlegungen dahingehend, die Batterien nicht wieder zu verkaufen, weil das zu kompliziert und risikoreich sei und schon gar nicht für Haushalte geeignet sei. Pufferspeicher seien etwas besser kontrollierbar, aber nach mehrjähriger Auseinandersetzung gäbe es immer noch keine klare Aussage.

Rolle von Second-Life-LIBs in Konkurrenz zum Batterierecycling

Innerhalb der EU bestehe derzeit kaum bis keine Möglichkeit, den Stoffkreislauf von Batterie zu Batterie („Bat2Bat“) zu schließen, wobei Second Life keine Lösung dazu sei. Der stark steigende Rohstoffbedarf könne nicht mit Recycling gedeckt werden. Mangels ausreichenden Inputs wisse man noch nicht viel über Batterierecyclinganlagen, womit ein spezialisierter EU-Recyclingweg noch nicht in Sicht sei. Second Life könne hier den Anfall puffern. Mögliche Incentives für Second Life könnten aber im Widerspruch zur Recyclingquote für Produktionsabfälle (bei 20%) stehen und seien daher nicht sinnvoll.

State of health (SoH) als Wegbereiter für Second Life

Die Bestimmung vom State of Health sei ein wesentlicher Schlüssel zur Ökonomie von Second-Life-LIB.

Ein OEM (Original Equipment Manufacturer) habe durch den Zugriff auf das Batteriemanagementsystem (BMS) mehr Möglichkeiten als andere Stakeholder. Es bestehe die Möglichkeit zur Vermietung von Speicherleistung anstatt der Vermietung der Batterie. Zweckwidmung zu Pufferspeichern sei sinnvoller als Restwertleasing, da hier die Batterie das Hindernis darstellt.

“Optimale” Anwendungsfälle von Second-Life-LIBs

Mögliche Anwendungen hingen stark von der Anwendung in Abhängigkeit von der Nutzung und zeitlichen Verteilung der Last ab. Bei kontinuierlicher Nutzung mit gleichmäßiger Last könnte eine längere Lebensdauer erreicht werden. Batteriepufferspeicher könnten nur bestimmte Lasten abfedern. Ein Einsatz als Kurzzeitspeicher sei möglich. Die typische Einsatzdauer solcher Anwendungen betrage vier Stunden. Alles darüber sei derzeit nicht machbar. Sie seien als Tages-, oder saisonaler Speicher ungeeignet. Dazu bestünden Pilotanlagen. Einer sei seit Monaten in Österreich im Betrieb und decke Maschinestartspitzen ab. Aber die Strompreise seien in Österreich zu niedrig für einen wirtschaftlichen Betrieb. In Deutschland sei das dank höherer Strompreise eine

gute Sache. Dort puffere er beim Shredder die Spitzen des An- und Abfahrens. Es werde ein zusätzlicher Speicher geplant, weil der betriebliche Fuhrpark auf E-Fahrzeuge umgestellt werde und so Spitzenlasten am Morgen abgedeckt werden könnten. Ideal wäre eine kaskadische Nutzung der Batterie.

Dezentrale Aufbereitung zur Vermeidung von Gefahrguttransporten

Dezentrale Aufbereitung vermeide Transporte, wobei vor allem internationale Transporte zum CO₂-Ausstoß beitragen und hohe Kosten verursachen. Es wäre sinnvoll, schon in Österreich auf Second Life-Fähigkeit zu testen, anstatt z.B. in Deutschland. Recycler könnten als Energiepufferdienstleister Jobs schaffen.

Mögliche Anreize für Second Life

Anreize sollten die Mitverantwortung für die effiziente Nutzung der Batterie stärken, da Kunden mit Eigentum-Batterien nicht so gut umgingen, als wenn darauf Pfand eingehoben wurde. Die große Hürde bestehe in der Finanzierung eines geeigneten Bonusmodells.

6.3 Rücknahme und Sammlung (Session 2A)

Hintergrund und Rahmen

Das Recycling von LIB setze voraus, dass die Batterien nach dem Ende ihrer Lebensdauer gesammelt und zurückgeführt und nicht unsachgemäß entsorgt werde oder über den Export von Gebrauchtwagen den europäischen Markt verlasse. Neue Geschäftsmodelle, bei denen die Autoproduzenten Eigentümer der Batterie seien, oder Pfandsysteme könnten den Rückfluss von LIB sicherstellen.

Neben dem Ausbau von Sammelstellen (z.B. von Gerätebatterien durch Kommunen und Händler) sei die notwendige Infrastruktur für die Entladung, Identifikation inklusive Sortierung und Transport aufzubauen, wobei technische und rechtliche Aspekte (z.B. Haftung) zu lösen seien.

Herausforderungen bei der Sammlung von LIB aus dem Automobilbereich

Herausforderungen bestünden bei Prognosen zur Entwicklung des Gebrauchtwagenmarktes im Zusammenhang mit der Exportproblematik. Ob Karosserie und Batterie getrennt betrachten werden müssten und wie sich der State of Health bis zum Lebensende der Batterie im Zusammenhang mit dem Verkauf entwickle, sei weiters offen. Karosserien aus hochwertigen Legierungen sei für das Recycling interessant, komplexe Materialverbunde jedoch eine Herausforderung für Aufbereitungsprozesse. Die Überprüfung der Batterieleistung im Zuge von Ankaufstests werde vom Kunden eingefordert werden.

Verlängerung der Produktnutzungsdauer mittels Batteriepass

Die Einforderung von Mitverantwortung der Hersteller sei eine mögliche Lösung, da dem OEM die Nutzung und Leistungsdaten bekannt seien. Für 50% der Lkw würden viele Parameter schon aufgezeichnet und für Prognosen genutzt. Kernthema sei der Zugriff auf diese Daten und der Datenschutz. Ein Batteriepass sei hier die Lösung, womit Daten als ökonomisches Zugpferd dienen.

Möglicher Beitrag der Sammlung zu Reuse und Second Life

Bei der Sammlung sei zu unterscheiden, welcher Nutzung die Batterie zugeführt werden soll, wobei keine Reuse-Ziele bestehen. Die Demontage sei als Knackpunkt zu betrachten, da erst nach einer Diagnose entschieden werden könne, ob es sich um Abfall oder ein Produkt handle. Standardisierung würde zu geringeren Demontagezeiten und zu geringeren Handlingkosten führen. Unabhängig von der Nutzung (d.h. Recycling oder Reuse), wäre das ein wichtiger Beitrag zur einfachen Gewinnung von Information zum State of Health, der in der Batterieverordnung jedoch nicht aufscheint. Aktuell seien zu wenige Prüfstellen vorhanden, die eine Aussage dazu treffen können.

Session 2A – Rücknahme und Sammlung – Zusammenfassung (Teil 1 von 2)

Welche <u>Chancen und Potenziale</u> sehen Sie in Österreich?	Welche <u>Hindernisse und Herausforderungen</u> gibt es zu bewältigen?	Welche <u>Anreize und Maßnahmen</u> müssen dazu geschaffen/gesetzt werden?
Privat-Pkws	Frage des Batterieeigentums (Mietmodell vs. Eigentum)	Stärkung der Mitverantwortung für Produktnutzungsdauer
	Rücknahme von Pkws	Anreize notwendig
	Export und Privatverkäufe von Gebrauchtwagen mit zeitlicher Verzögerung	Getrennte Betrachtung von Karosserie und Batterie
	Haftungsfragen zu Sicherheit und bzgl. State of Health (SoH)	Ankaufstest für die Batterie für E-Auto umso wichtiger
	Technischer Aufwand bei Demontage der Batterie	
	Recyclingwert der Karosserie?	
Recycling von B2B-Industriebatterien	Herstellerverantwortung für Industriebatterien nicht geregelt [Anm. Arnberger: In der Bat-VO geregelt.]	Effiziente Regelung B2B-Bereichs
	Abgrenzung von Gerätebatterien	

Session 2A – Rücknahme und Sammlung – Zusammenfassung (Teil 2 von 2)

Welche Chancen und Potenziale sehen Sie in Österreich?	Welche Hindernisse und Herausforderungen gibt es zu bewältigen?	Welche Anreize und Maßnahmen müssen dazu geschaffen/gesetzt werden?
Datenmonitoring bei Nutzung	Datenweitergabe von OEMs	Batteriepass inkl. Verpflichtung der OEMs zur Weitergabe zur Optimierung der weiteren Nutzung
Reuse innerhalb der Firma und dann kaskadisch im Stadtverkehr	Sehr unterschiedliche Behaltdauern bei Logistikketten	Steuerliche Abdeckung von Reuse innerhalb Betrieb Incentives für längere Nutzung Standardisierte Schnittstellen und Typen
	Abgrenzung von Produkt und Abfall (sobald Abfall gut regulierbar)	
Optimierte Pfade für Recycling und Reuse		
Pfandmodell	Finanzierung und Administration; Hohe und lange Kapitalbindung	
	Identifikation des Abfallendes (ob erreicht oder nicht)	Aufbau von einheitlichen Prüfstellen
	Herstellerspezifische Systeme	Kommunikation und Zusammenarbeit mit Herstellern zu Schnittstellen und BMS
Sicherheit von Gerätebatterien		Technische Lösungen zur Rücknahme, Transport und Aufbereitung

Lösung Pfandmodell?

Effektive Pfandsysteme müssten monetär ziemlich hoch angesetzt sein, da die Recyclingkosten mehrere Tausend Euro betragen. Pfandmodelle seien unbeliebt, da das Geld über Jahre in den Bilanzen gebunden ist. Eine Abgrenzung von Karosserie und Batterie wäre im Falle einer Befandung notwendig, wobei auch andere Modelle wie z.B. Leasing überlegt werden können. Leasing werde als besserer Weg als reines Eigentum gesehen.

Einbindung der Hersteller

Die Diskussion mit Herstellern als Primärverpflichteten sei zu führen, wobei die Themen Standardisierung, Batteriemanagementsysteme und einheitliche Schnittstellen geführt werden müssten. Handlungsoptionen in Österreich seien begrenzt, weil die rechtlichen Vorgaben den Hersteller verpflichteten.

6.4 Recycling (Session 2B)

Hintergrund und Rahmen

Mit zeitlicher Verzögerung durch die nutzungsbedingte Phasenverschiebung landen gebrauchte LIB in der Abfallwirtschaft. Obwohl es sich derzeit bei LIB aus der E-Mobilität noch um geringe Mengen handelt, stehen die Behandlungsbetriebe bereits jetzt vor Herausforderungen, wie den Sicherheitsthemen, dem Umgang mit unterschiedlichen elektrochemischen Systemen oder der Rückgewinnung edler und unedler Metalle.

Eine zeitnahe und europäische Zusammenarbeit über die gesamte LIB-Wertschöpfungskette kann

das Treffen von Entscheidungen zum Ausbau der Recyclingkapazitäten positiv beeinflussen und somit den größtmöglichen Einsatz von Sekundärrohstoffen ermöglichen.

Herausforderungen im Recycling

In der Abfallwirtschaft müsse eine neue Anlage mit einer Kapazität von mindestens 40.000, eher 60.000 Jahrestonnen geplant werden. Zudem sei das Einzugsgebiet von Bedeutung. Je größer das Einzugsgebiet sei (z.B. LIB auch aus Nachbarländern), desto kleiner sei auch das wirtschaftliche Risiko. In der Planung von Anlagen werde grundsätzlich auf Modularität geachtet, d.h. dass die Anlage bei Bedarf erweitert werden könne.

Session 2B – Recycling – Zusammenfassung

Welche Chancen und Potenziale sehen Sie in Österreich?	Welche Hindernisse und Herausforderungen gibt es zu bewältigen?	Welche Anreize und Maßnahmen müssen dazu geschaffen/gesetzt werden?
Mögliche Recyclinganlage in Österreich (Modulares Upscaling)	Mengen – Wirtschaftlichkeit Unterschiedliche nationale Regelungen Recyclingtechnologie Zellchemie (LFP = derzeit keine Recyclinglösung im Industriemaßstab)	Recyclingquote, EU-weite gleichermaßen Deklaration von LIB/EoL-LIB
Einsatz von Rezyklat Urban Mining	(Illegaler) Export der LIB, Höherer Preis von EoL-LIB außerhalb EU, Geplante Obsoleszenz, Umweltschutzbemühungen (hier: Einsatz von Rezyklaten) schwierige Themen im Marketing	Rezyklat-Gütesiegel, Bewusstseinsbildende Maßnahmen, Mind. Einsatz von Sekundärrohstoffen
Deaktivierung/Vorbehandlung in Österreich als erster Schritt	Auf EU-Ebene denken Rechtliche Unterschiede innerhalb EU-Länder Große Player (auch außerhalb EU)	
Österreich als Verbindung zu Südosteuropa	Kaum E-Mobilität in Südosteuropa	
Design for Recycling	Eco-design = Herstellervorgabe	Gesetzliche Vorgaben

Gerade im LIB-Recycling sei nicht klar, welche Recyclingtechnologie sich langfristig durchsetzen werde.

Eine weitere Herausforderung sei die Demontage. Eine Automatisierung sei durch die Vielfalt der LIB derzeit nicht erreichbar. Bei der manuellen Demontage seien die Personalkosten ein wesentlicher Faktor, der einen wirtschaftlichen Betrieb erschwere.

Herausfordernd sei auch die unterschiedliche Handhabung der Schlüsselnummern in der EU während der LIB-Sammlung und des Transports. Einzelne Länder kämen zu unterschiedlichen Interpretationen. Es sei nicht immer eindeutig, ob LIB als gefährlicher oder nicht-gefährlicher Abfall eingestuft würden.

Vermehrt kämen im Haushaltsbereich LIB aus Lithiumeisenphosphat (LFP) vor. Diese seien für das Recycling ein Problem, da sie in den derzeitigen Recyclingprozessen störten.

Mengeneinschätzung - Recycling

Vorerst würden die E-Fahrradbatterien zunehmen. Der Rücklauf von Traktionsbatterien werde noch länger dauern, jedoch dann dominant sein.

Ecodesign – Design for Recycle

„Ecodesign“ und „Design for Recycle“ bzw. „Design for Reuse“ hingen zusammen. Diese würden von Produzenten intern gesteuert. Eine indirekte Steuerung könne über die Recyclingquoten erfolgen.

Auswirkung im Recyclingprozess sei vor allem bei der Demontage und wirke sich auf den Entsorgungspreis aus.

Einsatz von Rezyklat

Über die Recyclingquote auf Elementebene werde indirekt der Einsatz von Sekundärrohstoffen möglicherweise gefördert.

Ein Ansporn könnte über ein CO₂-Kompensationsmodell erfolgen oder ein Belohnungssystem für den Einsatz von Rezyklaten. Vor allem sollten die Entwicklungskosten über die Politik belohnt werden.

Ein wichtiger Weg führe über die Konsumenten. Hier bedürfe es an Bewusstseinsbildung. Dies könnte zum Beispiel über ein Rezyklat-Gütesiegel gestärkt werden.

6.5 Prioritätenreihung von Maßnahmen innerhalb der Wertschöpfungskette

Aus jeder Session wurden die dort priorisierten drei bis vier Maßnahmenbündel ausgewählt. Alle Teilnehmer*innen wurden um Auswahl anhand der folgenden Frage per Webtool Slido© ersucht:

Welche Maßnahmen würden Sie priorisieren, um den Weg für eine österreichische/österreichische/europäische Kreislaufwirtschaft zu ebnet?

Die Teilnehmer*innen hatten die Möglichkeit drei von insgesamt 13 Maßnahmen auszuwählen. Es ist allerdings anzumerken, dass die Zeit für die Umfrage knapp bemessen war und dass eine Auswahl nur mittels kurzen Screenings der einzelnen Maßnahmen erfolgen musste. Die Auswahl ist daher mit Unsicherheiten behaftet, welche bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss.

Es nahmen insgesamt 22 Teilnehmer*innen an der Umfrage teil, folglich galt es 66 Votes zu berücksichtigen. Unter den Top-3 fielen Maßnahmen zur Förderung der weiteren Nutzung (Nutzungsdauerverlängerung) und des Second Lifes sowie für einen verstärkten Einsatz von Rezyklaten.

Ein „Batteriepass“ mit der Verpflichtung für OEMs für eine Weitergabe der Daten, um eine bessere qualitative Abschätzung für eine weitere Nutzung treffen zu können, wurde mehrheitlich als relevant angesehen, um die Kreislaufwirtschaft zu fördern. Unklar sei noch, ob der derzeit geplante Batteriepass gemäß der neuen BatterieVO, ausreichend Informationen liefert, um den State of Health einer Batterie zu bestimmen.

„Bonus-Modelle“ für Second-Life-Anwendungen (finanzielle Anreize/Förderungen) wurden ebenfalls mehrheitlich priorisiert. Wenn der Weg Richtung Second Life geebnet werden soll, dann könnte dies nur durch finanzielle Anreize ermöglicht werden, da die Handlingkosten (siehe Session 1B) noch zu hoch seien, um ein Second Life wirtschaftlich rentabel betreiben zu können.

Ein Gütesiegel für Produkte mit einem hohen Rezyklat-Anteil sowie bewusstseinsbildende Maßnahmen zur Förderung jener Produkte wurden ebenfalls von den Teilnehmer*innen favorisiert, um die Kreislaufwirtschaft zu fördern. Recyclingquoten sind für Ni, Co, etc. bereits vorgesehen, allerdings keine Vorgaben zur Qualität, welche jedoch den Wiedereinsatz begünstigen würde.

Maßnahmen zur Zielerreichung einer Kreislaufwirtschaft

0 2 2



Participants can vote at slido.com with code #51531

7 Liste der Teilnehmer*innen

Teilnehmer*innen		
Expertenforum Lithium-Ionen-Batterien am 24. Februar 2021		
Webinar im Rahmen des Projekts LIBRAT (Universität für Bodenkultur, Montanuniversität Leoben, Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung)		
Astrid	Arnberger	Saubermacher Dienstleistungs AG / Redux GmbH
Stefan	Doose	TU Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF)
Christian	Ehrengruber	O.Ö. LAVU GmbH
Mario	Ernst	VERBUND Energy4Business GmbH – Center Batteriespeicher
Eva	Gerold	Nichteisenmetallurgie der Montanuniversität Leoben
Elisabeth	Giehser	EAK Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle
Tobias	Glatter	VERBUND Energy4Business GmbH – Center Batteriespeicher
Ferdinand	Gudenus	EAK Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle
Birgit	Harg	Green Tech Cluster Styria
Vera	Immitzer	Bundesverband PHOTOVOLTAIC AUSTRIA
Gerfried	Jungmeier	Joanneum Research, LIFE – Institut für Klima, Energie und Gesellschaft
Sabine	Jung-Waclik	BRIMATECH Services GmbH
Alexander	Kaluza	TU Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF)
Petra	Lehner	UFH Elektroaltgeräte System Betreiber GmbH
Thomas	Maier	ERA Elektro Recycling Austria GmbH
Mark	Mennenga	TU Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF)
Werner	Müller	Universität für Bodenkultur Wien - Council für nachhaltige Logistik
Tanja	Nemeth	Fraunhofer Austria Research GmbH, Produktions- und Logistikmanagement
Markus	Österreicher	Primobius GmbH
Michael	Pörnbacher	Klima- und Energiefonds
Stefanie	Prenner	BRIMATECH Services GmbH
Laura	Rußbach	Fraunhofer Austria Research GmbH, Produktions- und Logistikmanagement
Josef-Peter	Schögggl	Universität Graz, Christian-Doppler-Labor für nachhaltiges Produktmanagement
Therese	Schwarz	Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 14
Patrizia Ilda	Valentini	Renault Österreich GmbH
Bertram	Weiss	VERBUND Energy4Business GmbH – Center Batteriespeicher
Annette	Zeinlinger	Universität für Bodenkultur Wien - Council für nachhaltige Logistik
Peter	Beigl	Universität für Bodenkultur, Institut für Abfallwirtschaft
Roland	Pomberger	Montanuniversität Leoben, Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Thomas	Nigl	Montanuniversität Leoben, Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Ina	Meyer	Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung (WIFO)
Silvia	Scherhauser	Universität für Bodenkultur, Institut für Abfallwirtschaft
Michael	Altendorfer	Montanuniversität Leoben, Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Mark	Sommer	Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung (WIFO)
Florian	Part	Universität für Bodenkultur, Institut für Abfallwirtschaft
Stefan	Salhofer	Universität für Bodenkultur, Institut für Abfallwirtschaft
Bettina	Rutrecht	Montanuniversität Leoben, Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

8 Anhang

11.3 Anhang 3 – Ökonomische Analyse

Tabelle 23: Proxy Preise – Oberes Band.

	Iron Ore	Aluminium	Copper	Nickel US\$/t	Lithium	Cobalt	Mangan
2005	74	2.164	4.195	16.811	-	-	-
2006	77	2.858	7.475	26.971	-	-	-
2007	129	2.765	7.459	39.013	-	-	-
2008	152	2.502	6.764	20.529	-	-	-
2009	83	1.726	5.339	15.192	-	-	-
2010	146	2.173	7.535	21.809	-	-	-
2011	151	2.163	7.954	20.641	-	31.300	-
2012	117	1.836	7.227	15.927	-	30.300	-
2013	123	1.683	6.684	13.703	-	27.100	2.300
2014	90	1.726	6.342	15.611	-	29.100	2.200
2015	57	1.701	5.631	12.122	-	29.800	1.800
2016	62	1.706	5.177	10.204	-	26.600	1.700
2017	74	2.022	6.340	10.696	23.200	41.100	1.800
2018	69	2.072	6.416	12.885	17.700	71.900	2.200
2019	94	1.804	6.042	13.987	9.900	53.000	1.800
2020	110	1.721	6.237	13.928	6.200	33.000	1.700
2021	135	2.000	8.500	16.500	6.200	33.000	1.700
2022	139	2.214	8.500	22.128	10.450	42.725	1.850
2023	143	2.429	8.500	27.756	14.700	52.450	2.000
2024	148	2.643	8.500	33.385	18.950	62.175	2.150
2025	152	2.858	8.500	39.013	23.200	71.900	2.300
2026	152	2.858	8.500	39.013	23.200	71.900	2.300
2027	152	2.858	8.500	39.013	23.200	71.900	2.300
2028	152	2.858	8.500	39.013	23.200	71.900	2.300
2029	152	2.858	8.500	39.013	23.200	71.900	2.300
2030	152	2.858	8.500	39.013	23.200	71.900	2.300
2031	152	2.858	8.500	39.013	23.200	71.900	2.300
2032	152	2.858	8.500	39.013	23.200	71.900	2.300
2033	152	2.858	8.500	39.013	23.200	71.900	2.300
2034	152	2.858	8.500	39.013	23.200	71.900	2.300
2035	152	2.858	8.500	39.013	23.200	71.900	2.300
2036	152	2.858	8.500	39.013	23.200	71.900	2.300
2037	152	2.858	8.500	39.013	23.200	71.900	2.300
2038	152	2.858	8.500	39.013	23.200	71.900	2.300
2039	152	2.858	8.500	39.013	23.200	71.900	2.300
2040	152	2.858	8.500	39.013	23.200	71.900	2.300

Tabelle 24: Proxy Preise – Mittleres Band.

	Iron Ore	Aluminium	Copper	Nickel US\$/t	Lithium	Cobalt	Mangan
2005	65	1.898	3.679	14.744			
2006	69	2.570	6.722	24.254			
2007	123	2.638	7.118	37.230			
2008	156	2.573	6.956	21.111			
2009	80	1.665	5.150	14.655			
2010	146	2.173	7.535	21.809			
2011	168	2.401	8.828	22.910		31.300	
2012	128	2.023	7.962	17.548		30.300	
2013	135	1.847	7.332	15.032		27.100	2.300
2014	97	1.867	6.863	16.893		29.100	2.200
2015	56	1.665	5.510	11.863		29.800	1.800
2016	58	1.604	4.868	9.595		26.600	1.700
2017	72	1.968	6.170	10.410	23.200	41.100	1.800
2018	70	2.108	6.530	13.114	17.700	71.900	2.200
2019	94	1.794	6.010	13.914	9.900	53.000	1.800
2020	109	1.704	6.174	13.787	6.200	33.000	1.700
2021	135	2.000	8.500	16.500	6.200	33.000	1.700
2022	100	2.050	7.500	16.000	6.200	33.000	1.700
2023	98	2.075	7.555	16.146	6.200	33.000	1.700
2024	97	2.100	7.611	16.293	6.200	33.000	1.700
2025	95	2.126	7.667	16.441	6.200	33.000	1.700
2026	93	2.153	7.724	16.593	6.200	33.000	1.700
2027	92	2.179	7.781	16.746	6.200	33.000	1.700
2028	90	2.206	7.839	16.898	6.200	33.000	1.700
2029	89	2.232	7.896	17.050	6.200	33.000	1.700
2030	87	2.259	7.953	17.203	6.200	33.000	1.700
2031	86	2.287	8.012	17.362	6.200	33.000	1.700
2032	84	2.315	8.072	17.522	6.200	33.000	1.700
2033	83	2.344	8.131	17.681	6.200	33.000	1.700
2034	81	2.372	8.191	17.841	6.200	33.000	1.700
2035	80	2.400	8.250	18.000	6.200	33.000	1.700
2036	80	2.400	8.250	18.000	6.200	33.000	1.700
2037	80	2.400	8.250	18.000	6.200	33.000	1.700
2038	80	2.400	8.250	18.000	6.200	33.000	1.700
2039	80	2.400	8.250	18.000	6.200	33.000	1.700
2040	80	2.400	8.250	18.000	6.200	33.000	1.700

Q: Worldbank (Historic data and Forecast of Iron Ore, Aluminium; Copper, Nickel)

Q: tradingeconomics.com (Historic Data of Lithium Carbonate; Cobalt)

Q: de.statista.com (Historic Data of Manganese)

Tabelle 25: Proxy Preise – Oberes Band.

	Iron Ore	Aluminium	Copper	Nickel US\$/t	Lithium	Cobalt	Mangan
2005	74	2.164	4.195	16.811	-	-	-
2006	77	2.858	7.475	26.971	-	-	-
2007	129	2.765	7.459	39.013	-	-	-
2008	152	2.502	6.764	20.529	-	-	-
2009	83	1.726	5.339	15.192	-	-	-
2010	146	2.173	7.535	21.809	-	-	-
2011	151	2.163	7.954	20.641	-	31.300	-
2012	117	1.836	7.227	15.927	-	30.300	-
2013	123	1.683	6.684	13.703	-	27.100	2.300
2014	90	1.726	6.342	15.611	-	29.100	2.200
2015	57	1.701	5.631	12.122	-	29.800	1.800
2016	62	1.706	5.177	10.204	-	26.600	1.700
2017	74	2.022	6.340	10.696	23.200	41.100	1.800
2018	69	2.072	6.416	12.885	17.700	71.900	2.200
2019	94	1.804	6.042	13.987	9.900	53.000	1.800
2020	110	1.721	6.237	13.928	6.200	33.000	1.700
2021	135	2.000	8.500	16.500	6.200	33.000	1.700
2022	116	1.921	7.424	14.926	6.200	31.400	1.700
2023	96	1.842	6.347	13.352	6.200	29.800	1.700
2024	77	1.763	5.271	11.778	6.200	28.200	1.700
2025	57	1.683	4.195	10.204	6.200	26.600	1.700
2026	57	1.683	4.195	10.204	6.200	26.600	1.700
2027	57	1.683	4.195	10.204	6.200	26.600	1.700
2028	57	1.683	4.195	10.204	6.200	26.600	1.700
2029	57	1.683	4.195	10.204	6.200	26.600	1.700
2030	57	1.683	4.195	10.204	6.200	26.600	1.700
2031	57	1.683	4.195	10.204	6.200	26.600	1.700
2032	57	1.683	4.195	10.204	6.200	26.600	1.700
2033	57	1.683	4.195	10.204	6.200	26.600	1.700
2034	57	1.683	4.195	10.204	6.200	26.600	1.700
2035	57	1.683	4.195	10.204	6.200	26.600	1.700
2036	57	1.683	4.195	10.204	6.200	26.600	1.700
2037	57	1.683	4.195	10.204	6.200	26.600	1.700
2038	57	1.683	4.195	10.204	6.200	26.600	1.700
2039	57	1.683	4.195	10.204	6.200	26.600	1.700
2040	57	1.683	4.195	10.204	6.200	26.600	1.700

Tabelle 26: Preise für Modelinput – Oberes Band.

	Aluminium Schrott	Kupfer Schrott	Stahl Schrott	Elektronik Schrott	Mangan	Nickel	Lithium	Cobalt	Entsorgung: ungefährlicher Abfall	Entsorgung: gefährlicher Abfall
	€/kg									
2020	0,6	3,8	0,7	0,3	1,7	12,1	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2021	0,7	5,2	0,9	0,3	1,7	14,5	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2022	0,8	5,3	0,9	0,3	1,9	19,0	9,1	37,4	-0,2	-0,5
2023	0,8	5,3	1,0	0,3	2,0	23,6	12,8	45,9	-0,2	-0,5
2024	0,9	5,4	1,0	0,3	2,2	28,1	16,5	54,5	-0,2	-0,5
2025	0,9	5,4	1,1	0,3	2,3	32,7	20,2	63,0	-0,2	-0,5
2026	0,9	5,4	1,1	0,3	2,3	32,7	20,2	63,0	-0,2	-0,5
2027	0,9	5,4	1,1	0,3	2,3	32,7	20,2	63,0	-0,2	-0,5
2028	0,9	5,4	1,1	0,3	2,3	32,7	20,2	63,0	-0,2	-0,5
2029	0,9	5,4	1,1	0,3	2,3	32,7	20,2	63,0	-0,2	-0,5
2030	0,9	5,4	1,1	0,3	2,3	32,7	20,2	63,0	-0,2	-0,5
2031	0,9	5,4	1,1	0,3	2,3	32,7	20,2	63,0	-0,2	-0,5
2032	0,9	5,4	1,1	0,3	2,3	32,7	20,2	63,0	-0,2	-0,5
2033	0,9	5,4	1,1	0,3	2,3	32,7	20,2	63,0	-0,2	-0,5
2034	0,9	5,4	1,1	0,3	2,3	32,7	20,2	63,0	-0,2	-0,5
2035	0,9	5,4	1,1	0,3	2,3	32,7	20,2	63,0	-0,2	-0,5
2036	0,9	5,4	1,1	0,3	2,3	32,7	20,2	63,0	-0,2	-0,5
2037	0,9	5,4	1,1	0,3	2,3	32,7	20,2	63,0	-0,2	-0,5
2038	0,9	5,4	1,1	0,3	2,3	32,7	20,2	63,0	-0,2	-0,5
2039	0,9	5,4	1,1	0,3	2,3	32,7	20,2	63,0	-0,2	-0,5
2040	0,9	5,4	1,1	0,3	2,3	32,7	20,2	63,0	-0,2	-0,5

Tabelle 27: Preise für Modelinput – Mittleres Band.

	Aluminium Schrott	Kupfer Schrott	Stahl Schrott	Elektronik Schrott	Mangan	Nickel	Lithium	Cobalt	Entsorgung; ungefährlich er Abfall	Entsorgung; gefährlicher Abfall
	€/kg									
2020	0,6	3,8	0,7	0,3	1,7	12,1	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2021	0,7	5,2	0,9	0,3	1,7	14,5	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2022	0,7	4,6	0,6	0,3	1,7	14,0	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2023	0,7	4,7	0,6	0,3	1,7	14,2	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2024	0,7	4,7	0,6	0,3	1,7	14,3	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2025	0,7	4,7	0,6	0,3	1,7	14,4	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2026	0,8	4,8	0,6	0,3	1,7	14,6	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2027	0,8	4,8	0,6	0,3	1,7	14,7	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2028	0,8	4,8	0,6	0,3	1,7	14,8	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2029	0,8	4,9	0,6	0,3	1,7	15,0	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2030	0,8	4,9	0,6	0,3	1,7	15,1	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2031	0,8	4,9	0,6	0,3	1,7	15,2	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2032	0,8	5,0	0,5	0,3	1,7	15,4	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2033	0,8	5,0	0,5	0,3	1,7	15,5	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2034	0,8	5,0	0,5	0,3	1,7	15,7	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2035	0,8	5,1	0,5	0,3	1,7	15,8	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2036	0,8	5,1	0,5	0,3	1,7	15,8	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2037	0,8	5,1	0,5	0,3	1,7	15,8	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2038	0,8	5,1	0,5	0,3	1,7	15,8	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2039	0,8	5,1	0,5	0,3	1,7	15,8	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2040	0,8	5,1	0,5	0,3	1,7	15,8	5,4	28,9	-0,2	-0,5

Tabelle 28: Preise für Modelinput – Unteres Band.

	Aluminium Schrott	Kupfer Schrott	Stahl Schrott	Elektronik Schrott	Mangan	Nickel	Lithium	Cobalt	Entsorgung: ungefährlicher Abfall	Entsorgung: gefährlicher Abfall
	€/kg									
2020	0,6	3,8	0,7	0,3	1,7	12,1	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2021	0,7	5,2	0,9	0,3	1,7	14,5	5,4	28,9	-0,2	-0,5
2022	0,7	4,5	0,7	0,3	1,7	13,0	5,4	27,5	-0,2	-0,5
2023	0,6	3,7	0,6	0,3	1,7	11,5	5,4	26,1	-0,2	-0,5
2024	0,6	3,0	0,5	0,3	1,7	9,9	5,4	24,7	-0,2	-0,5
2025	0,6	2,3	0,4	0,3	1,7	8,4	5,4	23,3	-0,2	-0,5
2026	0,6	2,3	0,4	0,3	1,7	8,4	5,4	23,3	-0,2	-0,5
2027	0,6	2,3	0,4	0,3	1,7	8,4	5,4	23,3	-0,2	-0,5
2028	0,6	2,3	0,4	0,3	1,7	8,4	5,4	23,3	-0,2	-0,5
2029	0,6	2,3	0,4	0,3	1,7	8,4	5,4	23,3	-0,2	-0,5
2030	0,6	2,3	0,4	0,3	1,7	8,4	5,4	23,3	-0,2	-0,5
2031	0,6	2,3	0,4	0,3	1,7	8,4	5,4	23,3	-0,2	-0,5
2032	0,6	2,3	0,4	0,3	1,7	8,4	5,4	23,3	-0,2	-0,5
2033	0,6	2,3	0,4	0,3	1,7	8,4	5,4	23,3	-0,2	-0,5
2034	0,6	2,3	0,4	0,3	1,7	8,4	5,4	23,3	-0,2	-0,5
2035	0,6	2,3	0,4	0,3	1,7	8,4	5,4	23,3	-0,2	-0,5
2036	0,6	2,3	0,4	0,3	1,7	8,4	5,4	23,3	-0,2	-0,5
2037	0,6	2,3	0,4	0,3	1,7	8,4	5,4	23,3	-0,2	-0,5
2038	0,6	2,3	0,4	0,3	1,7	8,4	5,4	23,3	-0,2	-0,5
2039	0,6	2,3	0,4	0,3	1,7	8,4	5,4	23,3	-0,2	-0,5
2040	0,6	2,3	0,4	0,3	1,7	8,4	5,4	23,3	-0,2	-0,5

Tabelle 29: Details Beschäftigungseffekt.

	Makroökonomische Effekte der Investitionen in Mio.€				Makroökonomische Effekte des Betriebs														
	direkt	indirekt	induziert	Gesamt	Unteres Preisband in Mio.€				Mittleres Preisband in Mio.€				Oberes Preisband in Mio.€						
	direkt	indirekt	induziert	Gesamt	direkt	indirekt	induziert	Gesamt	direkt	indirekt	induziert	Gesamt	direkt	indirekt	induziert	Gesamt			
2020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
2021	-	8	1	9	-	0	9	1	9	-	1	9	1	9	-	1	9	1	9
2022	-	-	0	0	-	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-	0	0	0	0
2023	-	-	0	0	-	0	1	0	0	-	0	1	0	1	-	0	1	0	1
2024	-	-	0	0	-	1	1	0	2	-	1	1	0	3	-	3	1	0	4
2025	-	-	0	0	-	2	1	0	3	-	3	1	1	4	-	5	1	1	7
2026	-	-	0	0	-	2	1	0	4	-	4	1	1	6	-	7	1	1	9
2027	-	8	1	9	-	3	10	1	14	-	5	10	2	17	-	10	10	3	22
2028	-	-	0	0	-	5	2	0	7	-	8	2	1	11	-	14	2	2	19
2029	-	8	1	9	-	6	11	2	20	-	11	11	3	26	-	20	11	5	36
2030	-	-	0	0	-	10	4	1	14	-	16	4	3	23	-	29	4	5	37
2031	-	8	1	9	-	13	13	2	29	-	23	13	5	41	-	39	13	8	60
2032	-	16	2	19	-	17	24	4	45	-	30	24	8	61	-	52	24	11	86
2033	-	16	2	19	-	23	26	5	54	-	41	26	10	77	-	70	26	14	110
2034	-	16	2	19	-	30	29	5	64	-	54	29	12	95	-	91	29	17	137
2035	-	8	1	9	-	36	22	5	63	-	64	22	13	99	-	107	22	19	148
2036	-	16	2	19	-	43	33	6	82	-	76	33	16	126	-	127	33	23	183
2037	-	25	4	28	-	50	45	8	103	-	90	45	20	155	-	151	45	28	223
2038	-	25	4	28	-	59	48	9	116	-	106	48	23	177	-	177	48	32	257
2039	-	16	2	19	-	66	43	9	118	-	118	43	24	185	-	198	43	35	275
2040	-	16	2	19	-	74	45	9	128	-	132	45	27	204	-	219	45	38	303

Tabelle 30: Details Wertschöpfungseffekte.

	Makroökonomische Effekte der Investitionen in VZA				Unteres Preisband in VZA				Makroökonomische Effekte des Betriebs in VZA				Mittleres Preisband in VZA				Oberes Preisband in VZA			
	direkt	indirekt	induziert	Gesamt	direkt	indirekt	induziert	Gesamt	direkt	indirekt	induziert	Gesamt	direkt	indirekt	induziert	Gesamt	direkt	indirekt	induziert	Gesamt
2020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2021	-	82	11	93	-	86	10	96	-	86	10	96	-	86	10	96	-	86	10	96
2022	-	-	0	0	-	4	1	4	-	4	1	4	-	4	1	4	-	4	1	4
2023	-	-	0	0	-	5	0	5	-	5	0	5	-	5	0	5	-	5	0	5
2024	-	-	0	0	-	7	1	8	-	7	3	10	-	7	4	11	-	7	4	11
2025	70	-	0	70	70	9	1	80	70	9	5	84	70	9	8	87	70	9	8	87
2026	86	-	0	86	86	10	2	98	86	10	7	103	86	10	11	107	86	10	11	107
2027	110	82	11	203	110	98	13	221	110	98	20	228	110	98	25	234	110	98	25	234
2028	155	-	0	155	155	20	4	179	155	20	14	189	155	20	22	197	155	20	22	197
2029	215	82	11	308	215	111	16	342	215	111	30	356	215	111	41	367	215	111	41	367
2030	289	-	0	289	289	35	8	333	289	35	28	353	289	35	43	367	289	35	43	367
2031	396	82	11	489	396	129	22	547	396	129	50	575	396	129	70	595	396	129	70	595
2032	521	164	22	706	521	229	37	786	521	229	73	823	521	229	99	849	521	229	99	849
2033	698	164	22	884	698	252	42	992	698	252	92	1.042	698	252	127	1.077	698	252	127	1.077
2034	899	164	22	1.085	899	277	48	1.224	899	277	114	1.290	899	277	158	1.334	899	277	158	1.334
2035	1.025	82	11	1.118	1.025	211	42	1.279	1.025	211	119	1.356	1.025	211	171	1.407	1.025	211	171	1.407
2036	1.190	164	22	1.376	1.190	317	59	1.566	1.190	317	151	1.658	1.190	317	211	1.718	1.190	317	211	1.718
2037	1.364	246	33	1.643	1.364	430	76	1.871	1.364	430	185	1.980	1.364	430	258	2.052	1.364	430	258	2.052
2038	1.550	246	33	1.829	1.550	463	84	2.097	1.550	463	212	2.225	1.550	463	296	2.309	1.550	463	296	2.309
2039	1.732	164	22	1.918	1.732	406	79	2.216	1.732	406	222	2.360	1.732	406	317	2.454	1.732	406	317	2.454
2040	1.899	164	22	2.085	1.899	431	85	2.416	1.899	431	244	2.574	1.899	431	349	2.679	1.899	431	349	2.679