

Recycling von Lithium-Ionen-Batterien

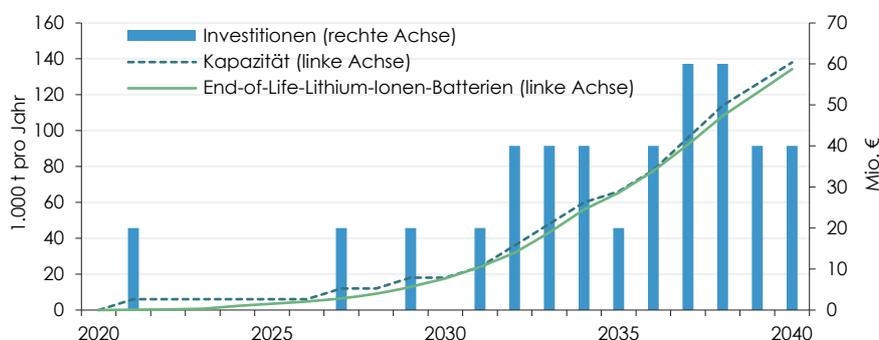
Ökonomische Effekte im Kontext von Klimaschutz und Ressourcenschonung

Ina Meyer, Mark Sommer

- Seit 2015 steigt der Bestand an batteriebetriebenen Pkw in Österreich um 50% pro Jahr. Der Anteil an den Neuzulassungen lag von Jänner bis Oktober 2021 bei 13% bzw. einschließlich Hybridfahrzeugen bei 36%. Dies impliziert ein potentiell hohes künftiges Aufkommen an End-of-Life-Lithium-Ionen-Batterien (EoL-LIB).
- Laut Transition-Szenario wird der Bestand an batteriebetriebenen Pkw in Österreich bis 2040 auf 5,2 Mio. steigen. Dies entspräche einer geschätzten Sammelmenge an EoL-LIB von 16.000 t bis 18.000 t im Jahr 2030 bzw. 129.000 t bis 144.000 t im Jahr 2040.
- Um diese Mengen in Österreich zu recyceln, müssten bis 2040 Investitionen von insgesamt rund 460 Mio. € bzw. 23 Mio. € pro Jahr getätigt werden.
- Ein profitabler Betrieb von Recyclinganlagen ist von den Verkaufspreisen der erzeugten Materialien, d. h. von den Rohstoff- und Sekundärrohstoffpreisen, abhängig.
- Bei einer mittleren Entwicklung der Sekundärrohstoffpreise könnte das LIB-Recycling im Jahr 2040 etwa 220 Mio. € an inländischer Wertschöpfung generieren.
- Im Falle geringer Rohstoffpreise könnten Entsorgungsgebühren von zumindest 0,185 € je kg LIB (74 € je 400 kg LIB) die Profitabilität der Recyclinganlagen sicherstellen. Der gesamtwirtschaftliche Effekt des LIB-Recyclings ist in allen drei untersuchten Preisszenarien positiv.

Entwicklung des Aufkommens von End-of-Life-Lithium-Ionen-Batterien, erforderliche Recyclingkapazität und Investitionsvolumina

Laut Szenario "Transition 2040"



Sollen die errechneten Mengen an End-of-Life-Lithium-Ionen-Batterien – 2040 etwa 140.000 t pro Jahr – im Inland recycelt werden, müssten die entsprechenden Kapazitäten aufgebaut werden. Kumuliert wären dafür bis 2040 Investitionen von rund 460 Mio. € erforderlich (Q: WIFO-Berechnungen).

"Für 2040 ergibt sich unter Berücksichtigung von grenzüberschreitendem Handel und Re-Use ein geschätztes potentielles EoL-LIB-Aufkommen von etwa 120.000 t bis 134.000 t, das im Inland behandelt werden und Wertschöpfung generieren könnte."

Recycling von Lithium-Ionen-Batterien

Ökonomische Effekte im Kontext von Klimaschutz und Ressourcenschonung

Ina Meyer, Mark Sommer

Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. Ökonomische Effekte im Kontext von Klimaschutz und Ressourcenschonung

Die Transformation zu einer CO₂-armen Wirtschaft auf der Basis von erneuerbaren Energietechnologien führt zu einem erheblichen Anstieg der Nachfrage nach Rohstoffen. Auf globaler Ebene würde eine konzentrierte Umsetzung der Pariser Klimaziele nach Berechnungen der Internationalen Energieagentur eine Vervielfachung des Materialbedarfs für saubere Energietechnologien bis 2040 bedeuten. Österreich hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2040 klimaneutral zu sein. Dies hat direkte Auswirkungen auf die Nachfrage nach batteriebetriebenen Fahrzeugen, da deren Bestand stark steigen müsste, um den Verkehr zu dekarbonisieren. Die Zahl der elektrisch betriebenen Pkw könnte daher bis 2040 auf über 5 Mio. ansteigen (Maximalszenario). Aufgrund der begrenzten Lebensdauer von Energiespeichern folgt daraus ein wachsendes Aufkommen an End-of-Life-Lithium-Ionen-Batterien (EoL-LIB) von bis zu 144.000 t pro Jahr, das entsprechend entsorgt werden müsste. Der vorliegende Beitrag analysiert die ökonomischen Auswirkungen der Sammlung, Behandlung und des Recyclings von verbrauchten Lithium-Ionen-Batterien in Österreich. Die Bewertung der notwendigen Investitionen und der Betriebskosten zeigt, dass die Profitabilität von Recyclinganlagen wesentlich vom Verkaufspreis der gewonnenen Rohstoffe auf dem Weltmarkt abhängt. Bei ungünstiger Preisentwicklung muss die Profitabilität durch die Einhebung einer Entsorgungsgebühr von zumindest 0,185 € je kg EoL-LIB sichergestellt werden. Der gesamtwirtschaftliche Effekt ist in allen drei untersuchten Preisszenarien positiv. Das Recycling von LIB trägt nicht zuletzt zu öffentlichen Gütern wie Klimaschutz und Ressourcensicherheit bei.

JEL-Codes: O31, Q30, Q43, Q54 • **Keywords:** Klimawandel, Kreislaufwirtschaft, Recycling, Lithium-Ionen-Batterien, Elektromobilität, ökonomische Effekte

Der vorliegende Beitrag basiert auf einer Studie von ABF-BOKU, Montanuniversität Leoben und WIFO im Auftrag des Klima- und Energiefonds: Peter Beigl, Silvia Scherhauer, Florian Part, Aleksander Jandric, Stefan Salhofer (ABF-BOKU), Thomas Nigl, Michael Altendorfer, Bettina Rutrecht, Roland Pomberger (Montanuniversität Leoben), Ina Meyer, Mark Sommer (WIFO), Entwicklung einer Wertschöpfungskette für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) in Österreich (September 2021, 185 Seiten, kostenloser Download: <https://www.wifo.ac.at/wwa/pubid/67942>).

Begutachtung: Michael Peneder • **Wissenschaftliche Assistenz:** Susanne Markytan (susanne.markytan@wifo.ac.at) • Abgeschlossen am 3. 12. 2021

Kontakt: Dipl.-Vw. Dr. Ina Meyer (ina.meyer@wifo.ac.at), Dr. Mark Sommer (mark.sommer@wifo.ac.at)

Recycling of Lithium-ion Batteries. Economic Effects in the Context of Climate Mitigation and Resource Conservation

The transformation to a low-carbon economy based on renewable energy technologies will lead to a significant increase in demand for raw materials. On a global level, a concerted implementation of the Paris climate targets would mean a quadrupling of material demand for clean energy technologies by 2040 according to estimates by the International Energy Agency. Austria has set a goal to be climate neutral by 2040, which has a direct impact on the demand for battery-powered vehicles. Accordingly, the stock of battery-powered vehicles would have to increase substantially to decarbonise transport. For passenger cars, this could mean an increase to over 5 million electrically powered vehicles in a maximum scenario. Due to the limited lifetime of batteries, this could result in a growing flow of end-of-life lithium-ion-batteries (EoL-LIB) of up to 144,000 tons per year in Austria, which would have to be treated. The study analyses the economic impact of a domestic collection, treatment and recycling of LIB. The evaluation of the necessary investments and the operating costs show that the profitability of recycling plants depends on the sales price, i.e., on the international raw material prices. In case of low-price development, the profitability of domestic recycling plants has to be ensured by charging disposal costs at the rate of 0.185 € per kg EoL-LIB. The overall economic effect is positive in each of the three price developments examined. Last but not least, the recycling of LIB contributes to public goods such as climate protection and resource security.

1. Einleitung

Klimaschutz erfordert eine weitgehende Dekarbonisierung von Wirtschaft und Gesellschaft bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts. Mit den entsprechenden sektoralen und sektorübergreifenden europäischen und nationa-

len Klimapolitiken rücken insbesondere Batterien als Speichertechnologie immer mehr in das Zentrum der Diskussion. Dieser Bedeutungsgewinn beruht nicht nur auf dem rasanten Anstieg der Elektromobilität, sondern

auch auf der Fähigkeit von Energiespeichern, Angebot und Nachfrage innerhalb eines auf erneuerbaren Energieträgern beruhenden, volatilen Stromsystems auszugleichen. Batterien sind die am schnellsten wachsende Speichertechnologie und werden eine Schlüsselrolle bei der Erreichung des EU-Zieles spielen, die Treibhausgasemissionen bis 2030 um 55% gegenüber 1990 zu senken. Neben dem Energiesystem kommt Batterien vor allem im Transportsystem entscheidende Bedeutung für die Elektrifizierung des motorisierten Individualverkehrs sowie – teilweise – des Straßengüterverkehrs zu.

Das rasante Wachstum in der Batteriefertigung führt über die ressourcenintensive Wertschöpfungskette zu erheblichen Materialflüssen. So wird für die Herstellung von Energiespeichern für die Elektromobilität, insbesondere für die Produktion von Lithium-Ionen-Batterien, eine exponentiell steigende Nachfrage nach Funktionsmaterialien wie Lithium, Kobalt und Nickel prognostiziert (Hund et al., 2020; Internationale Energieagentur, 2021). Die ungleiche weltweite Verteilung dieser kritischen Funktionsmaterialien sowie die Konzentration einiger kritischer Rohstoffe in wenigen Ländern bergen geopolitische Risiken für die Versorgungssicherheit und können zu Produktionseinschränkungen aufgrund von volatilen oder steigenden Rohstoffpreisen führen. Die Resilienz der Lieferketten für jene Mineralien und Ausgangsstoffe, die in der Herstellung von Energiespeichertechnologien wie Lithium-Ionen-Batterien benötigt werden, ist in vielen Ländern zu einem wirtschaftsstrategischen Thema geworden (Nakano, 2021; Europäische Kommission, 2020a).

Das aktuelle österreichische Regierungsprogramm 2020-2024 (Bundeskanzleramt Österreich, 2020) zielt u. a. darauf ab, geeignete Maßnahmen zur CO₂-Reduktion im Hinblick auf das Ziel der Klimaneutralität bis 2040 zu entwickeln und umzusetzen. Als Beispiele werden u. a. Maßnahmen im Bereich Elektromobilität und Modelle der Kreislaufwirtschaft, wie Re-Use und Recycling, genannt. Im Rahmen der Österreichischen Klima- und Energiestrategie (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2018) liegt der Fokus klar auf der "Zero Emission"-Mobilität im Straßenverkehr, wobei die Themen Ressourceneffizienz,

Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe und Recycling im Rahmen des neuen EU-Aktionsplans für die Kreislaufwirtschaft (Europäische Kommission, 2020b) aktiv zu berücksichtigen sind. Die Entscheidung für eine stärker kreislauforientierte Wirtschaft fand darüber hinaus auch Eingang in die Industriestrategie der Europäischen Union (Europäische Kommission, 2020a; Europäische Kommission, o. J.).

Auf Basis des Zieles der Klimaneutralität ist davon auszugehen, dass die Bedeutung von Elektrofahrzeugen und damit die Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien deutlich zunehmen wird. In Österreich wird ein kräftiger Anstieg des Anteils elektrisch angetriebener Fahrzeuge erwartet. Vor diesem Hintergrund müssen frühzeitig Maßnahmen ergriffen werden, um die knappen und wertvollen Materialien für die Elektromobilität, insbesondere Lithium-Ionen-Batterien, in einer kreislauforientierten Wirtschaft zu halten. Dies erfordert fundierte Entscheidungen hinsichtlich Recycling und Re-Use, des Technologiemicx, des Systemaufbaus und des wirtschaftspolitischen Rahmens.

Treibhausgasemissionen aus der Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen für erneuerbare Energiesysteme stellen eine weitere Herausforderung für den Klimaschutz dar. Die für die Energiewende erforderlichen Rohstoffe weisen eine relativ hohe Emissionsintensität auf. Die Herstellung von Sekundärrohstoffen, insbesondere von Metallen, durch Recycling erfordert oft weniger als halb so viel Energie und erzeugt damit deutlich geringere CO₂-Emissionen als die Aufbereitung von Erzen (Internationale Energieagentur, 2021). Durch die Rückgewinnung von Ressourcen aus Abfallströmen entlastet das Recycling die Versorgung mit Primärressourcen.

Der vorliegende Beitrag basiert auf der Studie von Beigl et al. (2021) und beschäftigt sich mit den ökonomischen Aspekten des Recyclings von LIB im Kontext von Klimaschutz und Ressourcenschonung. Auf der Grundlage eines CO₂-armen Energieszenarios der österreichischen Wirtschaft werden die ökonomischen Effekte analysiert, die mit Investitionen in Recyclinganlagen für Lithium-Ionen-Batterien und dem Betrieb solcher Anlagen in Österreich verbunden sein können.

Durch die Rückgewinnung von Ressourcen aus Abfallströmen entlastet das Recycling die Versorgung mit Primärressourcen. Es ist in der Regel weniger energieintensiv als die Produktion von Primärrohstoffen.

2. Ein Paris-konformes Energieszenario zur Abschätzung des Aufkommens an verbrauchten Lithium-Ionen-Batterien

Die hohe Unsicherheit über das zukünftige Aufkommen von Lithium-Ionen-Batterien, die sich am Ende ihrer Lebensdauer befinden (End-of-Life – EoL), erschwert eine Prognose dazu, ob bzw. wann in Österreich eine entsprechende Recyclinganlage gebaut werden soll. Unklar ist auch, welche Recycling-

technologie verwendet werden soll. Obwohl in anderen Ländern bereits Anlagen im industriellen Maßstab bestehen, hat sich bisher noch keine bestimmte Methode zur Rückgewinnung der Batteriematerialien durchgesetzt. Der derzeitige Trend deutet auf kleine dezentrale Anlagen zur Demontage und

Der Berechnung des potentiellen zukünftigen Aufkommens an verbrauchten Lithium-Ionen-Batterien liegt ein mit den Klimazielen von Paris konformes Energieszenario zugrunde.

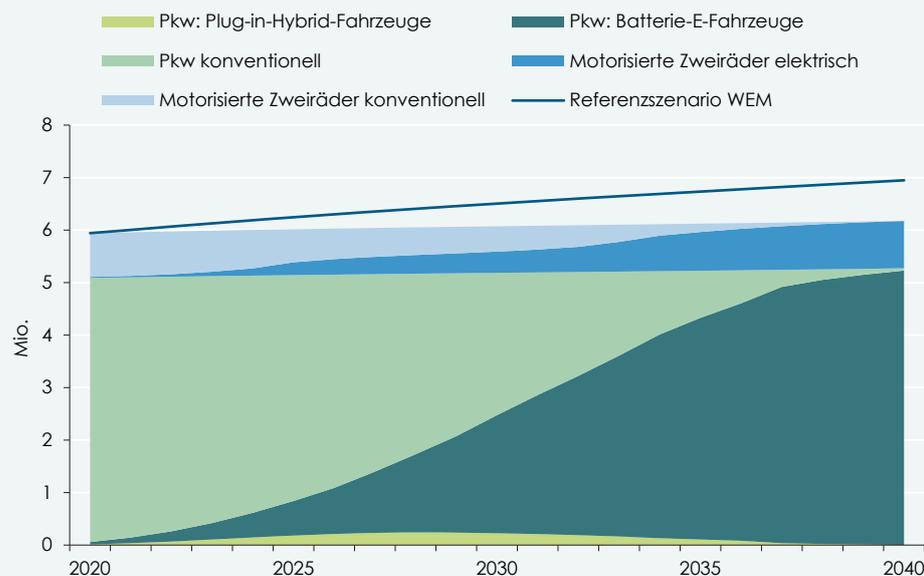
Deaktivierung sowie zentral gelegene Aufbereitungsanlagen für LIB – unabhängig davon, welche Verfahren letztlich eingesetzt werden (Beigl et al., 2021). Ob sich Österreich als Standort für das LIB-Recycling etablieren wird, hängt vor allem von den tatsächlichen Rücklaufmengen ab, die schwer zu prognostizieren sind. Um dennoch eine Abschätzung der in Österreich potentiell mit dem LIB-Recycling verbundenen Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte vornehmen zu können, wurde ein Szenario verwendet.

Als Ausgangspunkt für die Berechnung des EoL-LIB-Aufkommens dient das unter der Leitung des Umweltbundesamtes entwickelte Energie- und Treibhausgasszenario "Transition" (Umweltbundesamt, 2017; Meyer et al., 2018, 2020). Das Transition-Szenario ist ein Energieszenario für Österreich, das den Zeitraum 2015/2050 umfasst. Es beschreibt eine mögliche Entwicklung der österreichischen Wirtschaft mit dem Ziel der Klimaneutralität, d. h. einer Reduktion der energiebedingten Treibhausgasemissionen um mindestens 80% bis 95% (2050 gegenüber 1990). Das Szenario folgt somit dem Ziel des Klimaübereinkommens von Paris (COP21), das eine Begren-

zung der globalen Erwärmung auf deutlich unter +2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau vorsieht. Der Fokus des Transition-Szenarios liegt auf Energieeffizienz und Ressourcenschonung. Dementsprechend wird nicht nur ein hocheffizientes, erneuerbares Energiesystem entwickelt, sondern es werden auch Maßnahmen in nichtenergetischen Sektoren (etwa im Bereich der Raumplanung) hinterlegt, die Nachfrageänderungen implizieren, z. B. im Mobilitätsverhalten. Zentrale Annahmen des Szenarios sind:

- Alle Volkswirtschaften setzen Maßnahmen und Handlungen, um das Pariser Klimaabkommen zu erfüllen (weltweites Klimaschutzszenario).
- Eine ökosoziale Steuerreform schafft über einen steigenden CO₂-Preis Anreize für mehr Klimaschutz sowie sozialen Ausgleich. Die Entwicklung der CO₂-Preise (2015: 8 € je t, 2020: 15 € je t, 2030: 40 € je t, 2050: 200 € je t) folgt dem World Energy Outlook 2016 (Internationale Energieagentur, 2016¹⁾).
- Es gelten kohärente rechtliche Rahmenbedingungen, die eine Dekarbonisierung des Energiesystems sicherstellen.

Abbildung 1: **Entwicklung des Bestandes an Pkw und motorisierten Zweirädern – Szenario "Transition 2040"**



Q: Technische Universität Graz, Umweltbundesamt (2017), WIFO-Berechnungen. WEM . . . With Existing Measures.

Wesentliche Maßnahmen im Verkehrsbereich betreffen die Veränderung des Modal Split im Personen- und Güterverkehr hin zu umweltfreundlichen Verkehrsmodi bzw.

Verkehrsträgern, und führen zu einer starken Reduktion der jährlichen Pkw-Fahrleistung und einer Verkleinerung der Automobiflotte (im Vergleich zu einem Szenario ohne

¹⁾ Die Entwicklung des Transition-Szenarios erfolgte im Anschluss an die Verabschiedung des Klimaabkommens von Paris. Der unterstellte CO₂-Preisfad

entspricht den damals aktuellen Preisszenarien der Internationalen Energieagentur und wurde nicht an aktuelle Entwicklungen angepasst.

ambitionierte Klimapolitik; Szenario WEM – With Existing Measures²⁾). Ordnungsrechtliche Vorgaben tragen maßgeblich zur Ausweitung der Elektromobilität innerhalb der österreichischen Fahrzeugflotte bei: Ab 2030 müssen in Österreich alle neu zugelassenen Pkw über einen CO₂-freien Antrieb verfügen. Für leichte Nutzfahrzeuge gilt diese Anforderung ab 2035, für schwere Nutzfahrzeuge (3,5 t bis 40 t höchstzulässiges Gesamtgewicht) ab 2040.

Für die Projektion des LIB-Aufkommens wurde das Transition-Szenario an die Klimaschutzziele des aktuellen österreichischen Regierungsprogrammes (Bundeskantleramt

Österreich, 2020) angepasst und zeitlich auf das Jahr 2040 komprimiert. Es wurde also unterstellt, dass die heimische Fahrzeugflotte bereits 2040 und nicht erst 2050 vollständig elektrifiziert ist. Abbildung 1 stellt die Entwicklung der elektrisch und konventionell angetriebenen Pkw sowie der motorisierten Zweiräder laut komprimiertem Transition-Szenario dar. Hierbei wird deutlich, dass neben der Elektrifizierung für 2040 von einer Bestandsreduktion um über 1 Mio. Fahrzeuge gegenüber einem Vergleichsszenario ohne stringente Klimaschutzpolitik ausgegangen wird, da eine effizientere Verwendung von Fahrzeugen, z. B. durch Car-Sharing, unterstellt wird.

3. Projektion des Aufkommens an End-of-Life-Lithium-Ionen-Batterien

Nach der Festlegung der Bestandsentwicklung wurde im nächsten Schritt das jährliche Potential an EoL-LIB ausgehend von den jährlich neu in Umlauf gebrachten Mengen abgeschätzt. Ausgangspunkt war der Bestand an Fahrzeugen laut Szenario "Transition 2040", unterschieden nach den Produktgruppen Batterie-E-Fahrzeuge, Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge, Hybrid-Fahrzeuge, leichte E-Nutzfahrzeuge, schwere E-Nutzfahrzeuge, Wasserstoff-E-Fahrzeuge und motorisierte Zweiräder. Photovoltaikanlagen mit Energiespeichern wurden ebenfalls berücksichtigt. Die jährliche Bestandsveränderung unter Berücksichtigung eines Austausches der Altbestände bildete die Berechnungsgrundlage

für die Ermittlung der jährlich in Umlauf gebrachten Menge an LIB.

Außerdem wurden für die jeweiligen Anwendungsfelder LIB-Stückgewichte festgelegt. Für die Nutzungs- und Lebensdauer der Batterien wurden Verteilungskurven angenommen. Die durchschnittliche Produktlebensdauer liegt für Batterie-E-Fahrzeuge bei etwa elf Jahren und für Photovoltaikanlagen bei etwa 20 Jahren. Weiters wurde unterstellt, dass die Batterie während eines Produktlebens 1,1-mal ausgetauscht werden muss (bei leichten Nutzfahrzeugen 1,5-mal und bei schweren Nutzfahrzeugen 1,75-mal).

Da die Zahl der Elektrofahrzeuge zwischen 2020 und 2040 annahmegemäß kräftig zunehmen wird, steigt auch das Aufkommen an EoL-LIB exponentiell an. Ab 2028 ist in Österreich mit einer jährlichen Recyclingmenge von etwa 10.000 t zu rechnen.

Übersicht 1: **Aufkommen von End-of-Life-Lithium-Ionen-Batterien unter verschiedenen Annahmen zu grenzüberschreitendem Handel und Re-Use**

	Szenario "Transition Low" 2040	Szenario "Transition High" 2040
	In t	
End-of-Life-Lithium-Ionen-Batterien	195.000	195.000
Verluste bzw. Exporte	- 66.000	- 51.000
Sammelmenge	129.000	144.000
Wiederverwertung (Re-Use)	- 9.000	- 21.000
Sammelmenge nach Re-Use	120.000	123.000
Nettoimport	0	11.000
Verfügbar für das Recycling	120.000	134.000

Q: Beigl et al. (2021), WIFO-Berechnungen.

Ausgehend vom Ziel einer vollständigen Elektrifizierung des heimischen Verkehrssektors bis 2040 ist bereits 2028 mit einer jährlichen Recyclingmenge von etwa 10.000 t EoL-LIB zu rechnen. Das erwartete Aufkommen schwankt je nach den Annahmen zur Wiederverwendung (Re-Use) und zum Außenhandel mit gebrauchten E-Fahrzeugen, liegt im Jahr 2030 aber bereits zwischen 20.000 t und 23.000 t. Wird eine Wiederverwendung berücksichtigt, verschiebt sich das Aufkom-

men etwas in die Zukunft, da das Recycling zu einem späteren Zeitpunkt stattfindet. 2030 sinkt es in diesem Fall auf 16.000 t bis 18.000 t. Im Jahr 2040 fallen schon 129.000 t bis 144.000 t EoL-LIB an, bzw. 120.000 t bis 123.000 t unter Berücksichtigung einer Wiederverwendung (Übersicht 1). Unter der Annahme von Importaktivitäten kann das Aufkommen im Jahr 2040 auf 120.000 t bis 134.000 t ansteigen. Die Marke von 100.000 t wird 2038 durchbrochen. Wenn die Maßnah-

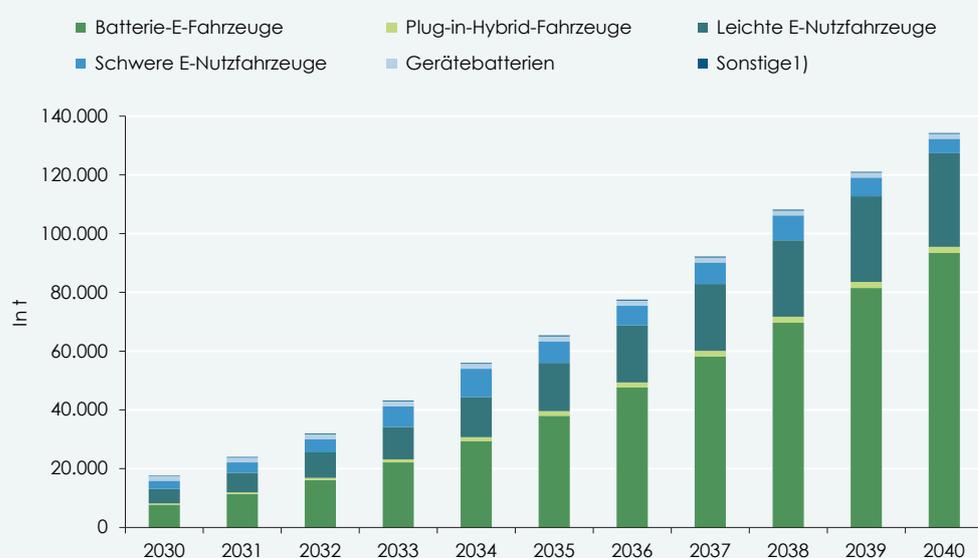
²⁾ Zu den Maßnahmenbündeln in den Sektoren Gebäude, Industrie, Energie und Landwirtschaft siehe Umweltbundesamt (2017).

men zur Energiewende nicht oder nur eingeschränkt umgesetzt werden oder es zu einer Neuausrichtung kommt, die keine Forcierung der Elektromobilität mehr vorsieht, ist mit wesentlich geringeren Recyclingmengen von etwa 7.000 t im Jahr 2030 bzw. 43.000 t im Jahr 2040 zu rechnen. Abbildung 2 veranschaulicht die zu erwartenden EoL-LIB-Mengen gemäß der Variante mit höherem Aufkommen (Transition High), auf der die nachfolgende ökonomische Analyse aufbaut. Sie berücksichtigt auch die Wiederverwertung sowie den Export und Import von EoL-LIB. Die für die Behandlung im Inland zur

Verfügung stehende Menge steigt dabei bis 2040 auf 134.000 t.

2040 werden in Österreich voraussichtlich rund 5,2 Mio. batterieelektrisch angetriebene Pkw im Umlauf sein. Der hohe Zuwachs an Elektrofahrzeugen zur Erreichung der Energiewende lässt jedoch auch das Aufkommen an EoL-LIB exponentiell ansteigen. Daher ist zu fragen, ob die Energiewende und damit die Elektrifizierung des Pkw-Bestandes ressourcenschonend ist bzw. ob nicht andere Maßnahmen für eine effizientere Nutzung der Ressourcen zielführender wären.

Abbildung 2: **Geschätztes jährliches Aufkommen an recyclebaren End-of-Life-Lithium-Ionen-Batterien (EoL-LIB) nach Quelle – Szenario "Transition High"**



Q: Beigl et al. (2021), WIFO-Berechnungen. Annahmen im Szenario "Transition High": Energiewende bis zum Jahr 2040, Second-Life bzw. Re-Use-Nutzung von Lithium-Ionen-Batterien im Ausmaß von 40%, Export von gebrauchten E-Fahrzeugen (30% bei Pkw und 10% bei Nutzfahrzeugen) sowie Import von End-of-Life-Lithium-Ionen-Batterien im Ausmaß von 10%. – 1) Hybrid-Fahrzeuge, Wasserstoff-E-Fahrzeuge, motorisierte Zweiräder, Photovoltaikanlagen.

4. Ökonomische Analyse des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien

4.1 Methode

Zur Abschätzung der gesamtwirtschaftlichen Effekte der Investitionen bzw. des Betriebs von LIB-Recyclinganlagen dient eine traditionelle Input-Output-Analyse mittels einer vereinfachten Version des Modells WIFO.DYNK (Dynamic New Keynesian; Kirchner et al., 2019)³⁾. Auf Basis einer solchen Input-Output-Analyse kann dargestellt werden, wie viele Güter in einer Volkswirtschaft entlang der Vorleistungskette produziert werden, wenn Investitionen getätigt werden

oder wenn sich Strukturen ändern, z. B. durch den Betrieb einer neuen Recyclinganlage. Dabei werden direkte, indirekte und induzierte Effekte unterschieden. Die direkten Effekte beziehen sich auf Investitionen und den Betrieb der Anlagen. Indirekte Effekte berücksichtigen die Güterproduktion und die Beschäftigung, die durch die geänderte Nachfragestruktur und die dafür notwendigen Vorleistungen in anderen Sektoren entstehen. Die mit der erhöhten Produktion verbundene Einkommenssteigerung wirkt positiv auf den privaten Konsum, was wiederum die

³⁾ Für die vorliegende Analyse wurden im DYNK-Modell jene Module, die die "neu-keynesianischen" und dynamischen Elemente simulieren, nicht aktiviert, da das Ergebnis ansonsten von bestimmten Parametern (u. a. Arbeitslosenquote, Erwerbsbevölkerung,

Stand des technischen Fortschrittes) beeinflusst würde und somit schwerer nachvollziehbar wäre. Dieses vereinfachte WIFO.DYNK entspricht somit einer Input-Output-Analyse, die um den endogenen Konsum erweitert wurde.

Neben der zu verarbeitenden Menge an EoL-LIB beeinflussen insbesondere die am Weltmarkt erzielbaren Preise für Sekundärrohstoffe die einzelwirtschaftliche Profitabilität von Recyclinganlagen.

Nachfrage erhöht ("konsuminduzierter Effekt").

Zur Ermittlung der ökonomischen Auswirkungen von Recyclinganlagen wurde ein zusätzlicher Sektor in die Input-Output-Tabelle eingefügt, der ausschließlich die Anlagen umfasst. Die wiedergewonnenen Materialien werden dem Export zugeführt, was direkt, indirekt und über induzierte Effekte die heimische Wertschöpfung und Beschäftigung erhöht. Um den jährlichen Effekt des Betriebs der Anlagen analysieren zu können, wurde die Struktur und Endnachfrage dieses Sektors bis 2040 fortgeschrieben. Dazu wurden die jährlichen Daten aus dem Transition-Szenario in das Modell eingespeist. So lässt sich der ökonomische Effekt der Errichtung und des Betriebs der Anlagen isolieren.

4.2 Szenario

Für die Input-Output-Analyse wurde angenommen, dass das Recycling von EoL-LiB in Österreich stattfindet und das gesamte Aufkommen an EoL-LiB laut Szenario "Transition High" behandelt wird. Die entsprechenden Anlagen müssen errichtet werden und die daraus gewonnenen Sekundärrohstoffe werden auf dem Weltmarkt veräußert.

Da die Profitabilität solcher Anlagen und damit auch die in Österreich generierte Wertschöpfung vom internationalen Umfeld, insbesondere von den Weltmarktpreisen für Rohstoffe, abhängt und eine Prognose der Rohstoffpreise bis 2040 nicht sinnvoll möglich ist, wurden unterschiedliche Bandbreiten für die Preisentwicklung der wiedergewonnenen Materialien definiert. Angesetzt wurden ein mittleres, ein oberes und ein unteres Preisband, wobei die historischen Höchst- und Tiefststände der Ressourcenpreise die Bandbreite definieren (siehe Kapitel 4.3.2).

Für die ökonomische Analyse wurde eine Musteranlage definiert. Je nach dem Aufkommen an EoL-LiB muss in eine solche Anlage investiert werden, um die nötige Kapazität sicherzustellen. Für jedes der drei Preisszenarien wurde aus betriebswirtschaftlicher Sicht die Profitabilität des Betriebs der Anlagen anhand des Kapitalwertes (Net Present Value – NPV) abgeschätzt. Die Herangehensweise ist analog zu Thies et al. (2018). Für die Ermittlung des NPV wird der Cash-Flow (1) bis 2040 errechnet, der die Errichtungs- und Betriebskosten, die Erlöse aus dem Verkauf von Materialien und den Wiederverkaufswert⁴⁾ der Anlage berücksichtigt:

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

⁴⁾ Der Wiederverkaufswert wird vereinfacht als Restwert (Anschaffungskosten minus kumulierte Abschreibungen) berechnet.

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

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

Der Kapitalwert ist demnach wesentlich von den Rohstoffpreisen und somit vom internationalen Umfeld abhängig. Wenn die Verkaufspreise für die wiedergewonnenen Materialien niedrig sind, wirkt sich das negativ auf den NPV aus. Da in der vorliegenden Analyse die Preise bis 2040 sowie die Investitions- und Betriebskosten die Eingangsgrößen sind, kann für jede Preiskonstellation ein NPV ermittelt werden. Drei Preisszenarien wurden zugrunde gelegt: ein mittleres, ein optimistisches und ein pessimistisches (Übersicht 3).

Wenn in einem Szenario der NPV einer Anlage im Zeitraum bis 2040 negativ ist, ist diese aus betriebswirtschaftlicher Sicht der Investorinnen und Investoren unrentabel. Damit die Investition in diesem Fall trotzdem durchgeführt wird, wurde angenommen, dass eine von den Konsumentinnen und Konsumenten, d. h. den privaten Haushalten, zu entrichtende Entsorgungsgebühr eingeführt wird, die an die Betreiber der Recyclinganlagen fließt. Im makroökonomischen Modell bedeutet dies Zusatzausgaben für die privaten Haushalte und eine Reduktion der Ausgaben für andere Güter, was kompensierende Wertschöpfungseffekte nach sich zieht.

Ein Prozess, der aus betriebswirtschaftlicher Sicht unrentabel ist, kann aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive dennoch das BIP erhöhen. Im Vergleich zu alternativen, betriebswirtschaftlich rentableren Verwendungsmöglichkeiten sind solche Investitionen dann positiv zu bewerten, wenn sie zur Erreichung gesamtgesellschaftlicher Ziele bzw. "öffentlicher Güter" wie Klimaschutz und Ressourcensicherheit beitragen. In diesen Bereich fallen auch positive externe Effekte der Entwicklung von industriellem Know-how, die mit der Errichtung und dem Betrieb von Recyclinganlagen verbunden sind und die zur Entwicklung von Umweltinnovationen und -technologien führen können. Ein negativer NPV bedeutet also lediglich, dass eine Investition sich aus Sicht der Investorinnen und Investoren nicht lohnt und es daher unwahrscheinlich ist, dass diese ohne weitere Regulierungen oder Anreize – etwa Gebühren, Subventionen oder wirtschaftspolitische Rahmensetzungen wie die Batterierichtlinie (2006/66/EG) – getätigt würde⁵⁾.

⁵⁾ Die EU arbeitet an einer Novellierung der Batterierichtlinie, um der Elektrifizierung des Energiesystems

Im Falle eines negativen Kapitalwertes (NPV) können Entsorgungsgebühren für LiB, die an die Betreiber von Recyclinganlagen fließen, den Betrieb solcher Anlagen profitabel machen. Die gesamtwirtschaftlichen Effekte des Recyclings sind dabei positiv.

4.3 Datenbasis für die Modellierung

4.3.1 Investitions- und Betriebskosten einer Muster-Recyclinganlage

Zur Abschätzung der Investitionskosten wurden zwei Quellen kombiniert (Übersicht 2). Die Investitionskosten für Gebäude, Behandlung (einschließlich Entladung und Transport), Zerlegung und die mechanische Behandlung wurden auf Grundlage der in Thies et al. (2018) angeführten Kostensätze je Tonne pro Jahr errechnet. Diese Quelle unterstellt jedoch keine hydro- bzw. pyrometallurgische Behandlung, wie sie für die Anlage in Österreich und daher auch für die Musteranlage angenommen wurde⁶⁾. Da Expertinnen- und Experten die Gesamtinvestitionskosten für einen solchen integrierten Komplex mit einer Kapazität von etwa 6.000 t pro

Jahr auf 20 Mio. € schätzten, wurden die Investitionskosten für die Teilanlage zur hydro- und pyrometallurgischen Behandlung auf rund 10 Mio. € festgelegt. Die fixen Betriebskosten (für Instandhaltung, Versicherung usw.) sind proportional zu den Investitionskosten und umfassen auch die Lohnkosten für das notwendige Produktions- und Kontrollpersonal. Im Gegensatz dazu sind die variablen Betriebskosten von der tatsächlichen Durchflussmenge abhängig. Sie wurden aus der Modellanwendung in Thies et al. (2018) abgeleitet⁷⁾. Für den hydro- und pyrometallurgischen Teil der Anlage konnten keine variablen Betriebskosten ermittelt werden. Es wurde daher angenommen, dass es sich um einen vollautomatisierten Prozess handelt, bei dem pro Einheit nur geringe variable Kosten anfallen.

Übersicht 2: **Kosten einer Muster-Recyclinganlage**

	Kapazität	Errichtungs-	Fixe Betriebs-	Variable	Wirtschaft-
	t pro Jahr	kosten ¹⁾	kosten ²⁾	Betriebs-	liche Lebens-
		In €	€ pro Jahr	kosten ²⁾	dauer ³⁾
				€ je t	Jahre
Gebäude	.	3,648.000	66.000	0	50
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- bzw. pyrometallurgische Behandlung	6.000	9,750.500	1,080.755	0	20
Gesamtanlage	6.000	20,000.000	1,833.635	640	.

Q: Thies et al. (2018), Experteninterview, WIFO-Berechnungen. – ¹⁾ Gesamtinvestitionsvolumen laut Experteninterview; Investitionen für Gebäude, Behandlung, Zerlegung und mechanische Behandlung laut Thies et al. (2018). Basisjahr 2020. – ²⁾ Abgeleitet aus Abbildung 15.4 in Thies et al. (2018). Basisjahr 2020. – ³⁾ Annahmen.

4.3.2 Recyclingmaterialien und Rohstoffpreise

Das Recycling von EoL-LIB wurde vereinfachend als Prozess mit Input- und Output-Größen verstanden. Als Input gehen Altbatterien in den Recyclingprozess. Dieser verursacht Kosten. Als Output stehen Sekundärrohstoffe für den Verkauf zur Verfügung, wodurch Erlöse erzielt werden. Übersicht 3 gibt an, welche Produkte durch die Behandlung von EoL-LIB in der Recyclinganlage entstehen.

Für die jeweiligen Endprodukte und Materialien wurden Verkaufspreise für 2020, das Basisjahr der Analyse, festgelegt⁸⁾. Für jene Materialien, für die es eine Preisprognose der Weltbank gibt (World Bank, 2021), wurde diese Prognose verwendet, um die Preise bis 2040 fortzuschreiben (nominell). Die

Preisentwicklung anderer Materialien wurde angenähert, indem die Weltbank-Prognose für ähnliche Güter herangezogen wurde (z. B. die Preisprognose für Eisenerz zur Fortschreibung des Preises für Stahlschrott). Für alle übrigen Materialien wurde vereinfachend eine konstante Preisentwicklung angenommen. Weiters wurden, wie erwähnt, drei Preisbänder definiert, welche die Bandbreite der möglichen Preisentwicklung darstellen sollen. Das mittlere Preisband orientiert sich an der Weltbank-Prognose bzw. geht für die restlichen Materialien von konstanten Preisen aus. Im oberen bzw. unteren Preisband wird angenommen, dass ein historischer Höchst- bzw. Tiefstpreis im Jahr 2025 erreicht wird. So steigt etwa der Preis von Aluminiumschrott im oberen Preisszenario von 600 € je t im Jahr 2020 bis 2025 auf 930 € je t und verbleibt danach auf diesem

und damit den neuen Herausforderungen der Batterieversorgung und des Recyclings Rechnung zu tragen.

⁶⁾ Viele Expertinnen und Experten bezweifeln jedoch aufgrund der geringen Stückzahlen, dass eine pyrometallurgische Aufbereitung in Österreich realistisch ist. Sie gehen auf diesem Gebiet vielmehr von einer europäischen Kooperation aus.

⁷⁾ Variable Betriebskosten werden in Thies et al. (2018) nicht direkt ausgewiesen. Die in Übersicht 2

angegebenen variablen Betriebskosten in Höhe von 210 € je t für Behandlung, Entladung, Transport und 430 € je t für die Zerlegung wurden auf Basis der Ergebnisse hergeleitet, die Thies et al. in Fig. 15.4 (Kapitel "Results from Model Application – 15.5") darstellen.

⁸⁾ Die Preise für die Materialien wurden verschiedenen, in Übersicht 3 angeführten Quellen entnommen (siehe auch Beigl et al., 2021).

Niveau. Diese Preisentwicklung ist nicht notwendigerweise realistisch und dient vielmehr dazu, die Bandbreite möglicher Ergebnisse

anhand einer Sensitivitätsanalyse zu ermitteln.

Übersicht 3: Rohstoffpreise, Anteile und Ausbeute der durch Recycling von Lithium-Ionen-Batterien anfallenden Sekundärrohstoffe

Endprodukt bzw. -material	Preise 2020	Höchstpreis	Tiefstpreis	Anteil je t Lithium-Ionen-Batterien ¹⁾	Ausbeute ²⁾	
	€ je t				Bis 2025	2026/2030
					In %	
Aluminiumschrott ³⁾	600	930	560	30	95	95
Kupferschrott ³⁾	3.800	5.430	2.260	11	99	99
Stahlschrott ³⁾	700	1.080	360	7	97	97
Elektronikschrott ³⁾	300	300	300	3	60	60
Mangan ⁴⁾	1.700	2.300	1.700	6	30	70
Nickel ⁴⁾	12.100	32.670	8.420	3	90	95
Lithium ⁵⁾	5.400	20.210	5.400	1	35	70
Cobalt ⁵⁾	28.900	62.970	23.300	1	90	95
Ungefährlicher Abfall ⁶⁾⁷⁾	150	.	.	22	.	.
Gefährlicher Abfall ⁶⁾⁷⁾	500	.	.	10	.	.
Sonstige Stoffe (Sauerstoff)	.	.	.	6	.	.

Q: WIFO-Darstellung basierend auf Pistoia und Liaw (2018). EMC (Ethylmethylcarbonat), DMC (Diethylcarbonat) und EC (Ethylcarbonat) wurden dem gefährlichen Abfall zugeordnet. – ¹⁾ Basierend auf Pistoia und Liaw (2018). – ²⁾ Laut Expertenannahmen. – ³⁾ Preise laut Thies et al. (2018). – ⁴⁾ Preise laut World Bank (2021). – ⁵⁾ Preise laut tradingeconomics.com (2021a, 2021b). – ⁶⁾ Preise laut Expertenannahmen. – ⁷⁾ Angegebener Preis entspricht den Entsorgungskosten.

4.4 Makroökonomische Effekte

Die makroökonomischen Effekte sind die Summe aus den Investitionen in die Recyclinganlagen und der Güter- und Dienstleistungsnachfrage, die durch deren Betrieb erzeugt wird. Neben direkten Effekten entstehen dabei indirekte Effekte in den vorgelagerten Sektoren sowie induzierte Effekte durch die ausbezahlten Löhne und Gehälter (siehe Kapitel 4.1).

Bezüglich der Profitabilität der Anlagen wurde im oberen und mittleren Preisszenario ein positiver Kapitalwert für die Aktivität bis 2040 ermittelt (bei einem Diskontsatz von 5%). Wenn die Preise das untere Preisband erreichen, wird der Kapitalwert negativ, d. h. die diskontierten Kosten übersteigen die diskontierten Erlöse. Um in diesem Fall den gesamten Kapitalwert aller Anlagen auf null zu erhöhen, müsste eine Entsorgungsgebühr ("Gate Fee") von 0,185 € je kg EoL-LIB, also z. B. 74 € für eine 400 kg schwere LIB, eingehoben werden. 2040, im Jahr mit dem höchsten EoL-LIB-Aufkommen, würden dadurch 25 Mio. € an Entsorgungskosten anfallen, die von den privaten Haushalten zu tragen wären. Das verfügbare Haushaltseinkommen würde sich entsprechend reduzieren, was den Wertschöpfungseffekt der Anlagen dämpft.

Die ermittelten Effekte der Errichtung und des Betriebs von EoL-LIB-Recyclinganlagen in Österreich auf die Wertschöpfung sind in Abbildung 3 dargestellt. Bei einer mittleren

Entwicklung der Sekundärrohstoffpreise könnte das LIB-Recycling im Jahr 2040 etwa 220 Mio. € an inländischer Wertschöpfung generieren. Mit der Ausweitung der behandelten EoL-LIB-Menge und der steigenden ökonomischen Aktivität der Recyclinganlagen verstärken sich über die Zeit auch die Wertschöpfungseffekte. Die Entwicklung auf Basis des mittleren Preisszenarios wurde in Abbildung 3 in Balkenform dargestellt, wobei die direkten, indirekten und induzierten Effekte getrennt ausgewiesen wurden. Die Wertschöpfungseffekte, die sich in einem internationalen Umfeld mit niedrigen bzw. hohen Preisen ergeben würden, wurden mittels strichlierter Linien dargestellt. Der Abstand zwischen dem unteren und dem oberen Preisband zeigt, wie groß die Bandbreite der Effekte bei gleicher Entwicklung des EoL-LIB-Aufkommens sein kann, und wie stark daher der Einfluss des Weltmarktes ist.

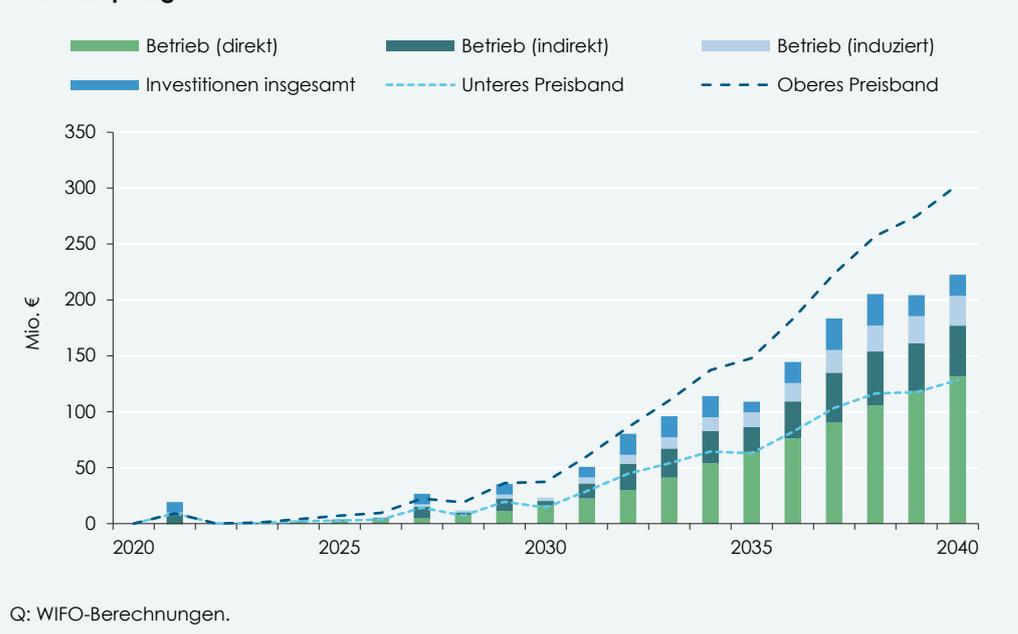
Die hier vorgestellte Methode zur wirtschaftlichen Bewertung von EoL-LIB-Recycling in Österreich unterstellt vier Wirkungskanäle auf die heimische Wertschöpfung. Der erste Wirkungskanal sind die Investitionen in Recyclinganlagen. Dadurch werden Investitionsgüter nachgefragt, die zum Teil im Inland produziert werden und in Österreich somit Wertschöpfung (und Beschäftigung) erzeugen. Der zweite Wirkungskanal ist der Betrieb der Anlagen. Hierbei werden Güter, Dienstleistungen und Arbeitskraft eingesetzt, um die gewünschten Produkte zu erzeugen, sowie vorgelagerte heimische Güter und Dienstleistungen nachgefragt, wodurch indirekte

Bei einer mittleren Entwicklung der Sekundärrohstoffpreise könnte das LIB-Recycling im Jahr 2040 etwa 220 Mio. € an inländischer Wertschöpfung generieren.

Effekte entstehen. Die Entlohnung der Beschäftigten in der Recyclinganlage ist nicht nur Teil der direkten Wertschöpfung, sondern auch Grundlage für den induzierten Konsumeffekt, da ein Teil dieser Löhne und Gehälter von den privaten Haushalten für Konsumzwecke verwendet wird. Der dritte Wirkungskanal sind die Erlöse aus dem Verkauf der wiedergewonnenen Materialien, die annahmegemäß auf dem Weltmarkt veräußert werden. Da die Materialströme des Anlagenbetriebs gegeben sind, sind die Erlöse 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 ergibt die Betriebsgewinne.

Diese sind Teil der direkten Wertschöpfung und tragen somit direkt zum BIP bei. Eine weitere Verwendung der Betriebsgewinne, beispielsweise für Gewinnausschüttungen oder zusätzliche Investitionen, wurde in der vorliegenden Analyse nicht unterstellt. Somit erzeugen die Betriebsgewinne 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 entrichtet, wobei diese zur Vereinfachung auf die privaten Haushalte eingegrenzt wurden. Die Entsorgungsgebühr schmälert das verfügbare Haushaltseinkommen, den Konsum und die damit verbundene gesamtwirtschaftliche Wertschöpfung.

Abbildung 3: **Ökonomische Effekte des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien – Wertschöpfung**



Abschließend ist anzumerken, dass der CO₂-Preis in der Herstellung von energieintensiven Rohstoffen wie z. B. Stahl und Aluminium eine zentrale Rolle spielt. Ein Anstieg des CO₂-Preises, wie er im Transition-Szenario angenommen wurde, kann sich daher positiv auf den potentiellen Verkaufspreis der Recyclingprodukte und somit auf die Profitabilität der Recyclinganlagen auswirken. Allerdings können durch die Verteuerung von

CO₂-Emissionen auch zentrale, energieintensive Prozesse des Recyclings teurer werden. Weiters kann durch höhere Verkaufspreise der Sekundärrohstoffe die Nachfrage nach EoL-LIB steigen, wodurch sich diese verteuern. Die Wirkung eines höheren CO₂-Preises auf die Profitabilität ist also von mehreren Faktoren abhängig und a priori nicht eindeutig.

5. Schlussfolgerungen

Die anhand des Transition-Szenarios abgeschätzte LIB-Mengenentwicklung zeigt klar, dass die Energiewende einen enormen Bedarf an Energiespeichern hervorbringt. Gedeckt wird dieser Bedarf derzeit und voraussichtlich auch in den nächsten Jahrzehnten durch Lithium-Ionen-Batterien. Dies führt

schon jetzt zu einem hohen Ressourcenverbrauch und lässt zwangsläufig große Mengen an EoL-LIB anfallen, die behandelt und verwertet werden müssen. Es ist daher notwendig, den Bestand an Recyclinganlagen in Europa auszubauen. Wie eine Analyse für Österreich zeigte, ist die einzelwirtschaftliche

Das Recycling von LIB erhöht nicht nur die Wertschöpfung, sondern trägt auch zur Erreichung gesamtgesellschaftlicher Ziele bei.

Profitabilität solcher Anlagen wesentlich von den Weltmarktpreisen für Rohstoffe und Sekundärrohstoffe abhängig. Bei einer ungünstigen Preiskonstellation auf den Rohstoffmärkten lässt sich die Profitabilität durch eine Entsorgungsgebühr gewährleisten. Wirtschaftspolitische Rahmenbedingungen – etwa eine Vorgabe von Recyclingquoten,

wie sie derzeit im Zuge der Novellierung der EU-Batterierichtlinie vorbereitet wird – können das Recycling des hohen Aufkommens an EoL-LiB sicherstellen. Dies erhöht nicht nur die Wertschöpfung, sondern trägt auch zur Erreichung gesamtgesellschaftlicher Ziele wie Klimaschutz und Ressourcenschonung bei.

6. Literaturhinweise

- Beigl, P., Scherhauser, S., Part, F., Jandric, A., Salhofer, S., Nigl, T., Altendorfer, M., Rutrecht, B., Pomberger, R., Meyer, I., & Sommer, M. (2021). Entwicklung einer Wertschöpfungskette für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien (LiB) in Österreich. WIFO. <https://www.wifo.ac.at/www/pubid/67942>.
- Bundeskanzleramt Österreich (2020). *Aus Verantwortung für Österreich. Regierungsprogramm 2020-2024*. <https://www.bundeskanzleramt.gv.at/dam/jcr:7b9e6755-2115-440c-b2ec-cbf64a931aa8/RegProgramm-lang.pdf>.
- Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (2018). #mission2030. *Die österreichische Klima- und Energiestrategie*.
- Europäische Kommission (2020a). *A New Industrial Strategy for Europe. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions*. COM(2020) 102 final.
- Europäische Kommission (2020b). *Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. Für ein sauberes und wettbewerbsfähiges Europa. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen*. COM(2020) 98 final.
- Europäische Kommission (o. J.). *European Battery Alliance*. https://ec.europa.eu/growth/industry/policy/european-battery-alliance_en (abgerufen am 23. 9. 2021).
- Hund, K., La Porta, D., Fabregas, T. P., Laing, T., & Drexhage, J. (2020). *Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. Climate-Smart Mining Facility*. World Bank.
- Internationale Energieagentur (2016). *World Energy Outlook*.
- Internationale Energieagentur (2021). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transition*.
- Kirchner, M., Sommer, M., Kratena, K., Kletzan-Slamanig, D., & Kettner-Marx, C. (2019). CO₂ taxes, equity and the double dividend – Macroeconomic model simulations for Austria. *Energy Policy*, 126, 295-314. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.11.030>.
- Meyer, I., Sommer, M., & Kratena, K. (2018). *Energy Scenarios 2050 for Austria*. WIFO, CESAR. <https://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 Zachariadis, T., Milne, J. E., Andersen, M. S., & Ashiabor, H. (Hrsg.), *Economic Instruments for a Low-carbon Future. Critical Issues in Environmental Taxation* (Volume XXII, 127-140). Edward Elgar.
- Nakano, J. (2021). *The Geopolitics of Critical Minerals Supply Chains*. Center for Strategic & International Studies.
- 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>.
- Thies, C., Kieckhäfer, K., Hoyer, C., & Spengler, T. (2018). Economic Assessment of the LithoRec Process. In Kwade, A., & Diekmann, J. (Hrsg.), *Recycling of Lithium-Ion Batteries. The LithoRec Way* (253-266). Springer International Publishing. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-70572-9>.
- Tradingeconomics.com (2021a). Price for Lithium Carbonate. <https://tradingeconomics.com/commodity/lithium> (abgerufen am 20. 7. 2021).
- Tradingeconomics.com (2021b). Price for Cobalt. <https://tradingeconomics.com/commodity/cobalt> (abgerufen am 21. 7. 2021).
- Umweltbundesamt (2017). *Energie- und Treibhausgasszenarien im Hinblick auf 2030 und 2050. Synthesebericht 2017*. Report REP-0628.
- World Bank (2021). *Commodity Markets. "Pink Sheet" Data and Commodity Markets Outlook* (April 2021). <https://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets> (abgerufen am 1. 5. 2021).