

Themenpapier Cluster Elektromobilität Süd-West

Wertstoffkreislauf von Traktionsbatterien aus Europa: Potenziale von Second-Life- Anwendungen



Inhaltsverzeichnis

Management Summary	4
1 Anwendungen für Second-Life von Traktionsbatterien	5
1.1 Einleitung und Vorgehensweise	5
1.2 End-of-Life-Szenarien von Traktionsbatterien und EV	5
1.2.1 Wiederinstandsetzung	7
1.2.2 Umwidmung für Second-Life	7
1.2.3 Recycling	8
1.2.4 End-of-Life von EV	8
1.3 Second-Life-Anwendungen für Traktionsbatterien	9
1.3.1 Hausspeichersysteme als Zwischenspeicher zur Erhöhung des Solarstrom-Eigenverbrauchs	10
1.3.2 Industriespeichersysteme in einem Gleichstromnetz	10
1.3.3 Primär- und Sekundärregelleistung zur Erhaltung der Netzstabilität	11
1.3.4 Energierückgewinnung bei Schienenfahrzeugen	12
1.3.5 Leistungspuffer für Schnellladesäulen	12
1.4 Aktuelle Second-Life-Akteure und -Aktivitäten in der EU	12
1.5 Umwidmungsprozess für Second-Life-Anwendungen	16
1.5.1 Batterierücknahme	16
1.5.2 Batterieumwidmung und -integration	17
1.6 Chancen und Herausforderungen von Second-Life	18
1.6.1 EOL, Sammlung und Transport der Batterie	18
1.6.2 Zustandsanalyse der Batterie	19
1.6.3 Umwidmung und Integration	20
1.6.4 Rentabilität	20
1.6.5 Rechtlicher Rahmen	21
1.6.6 Weitere Chancen und Risiken	21
1.7 Schlussfolgerungen der bisherigen Erkenntnisse zu Second-Life-Anwendungen	22
2 Wirtschaftlichkeit und CO₂-Fußabdruck	23
2.1 Einleitung und Vorgehen	23
2.2 Wirtschaftliche Analyse von Second-Life und Recycling	23
2.2.1 Recycling	24
2.2.2 Preisgestaltung für EOFL-Batterien und Preise für Second-Life-Anwendungen	28
2.2.3 Preise für First-Life-Batterien und Second-Life-Alternativen	30
2.2.4 Zusammenfassung der Wirtschaftlichkeit von Second-Life-Batterien und Recycling	33

2.3	Berechnung des CO ₂ -Fußabdrucks von Second-Life und Recycling	36
2.3.1	Recycling	36
2.3.2	PCF von Batterien mit Rezyklat, First- und Second-Life-Batterien	38
2.4	Schlussfolgerung und technische Machbarkeit zur Wirtschaftlichkeit und zum CO ₂ -Fußabdruck von Second-Life und Recycling	40
3	Analyse des Batterie-EOL-Volumens, Markthochlauf von Second-Life-Anwendungen und Auswirkungen auf das Recycling	42
3.1	Einleitung und Vorgehen	42
3.2	Hochlauf elektrischer Fahrzeuge in der EU (PKW, LKW, Bus)	42
3.3	Hochlauf des Batteriebedarfs in der EU (PKW, LKW, Bus)	45
3.4	Hochlauf des EOL-Volumens	47
3.5	Batterienachfrage und -angebot in der EU	50
3.6	Rezyklatquote der EU	52
3.7	Schlussfolgerungen für den Markthochlauf und das potenzielle Marktvolumen von Second-Life-Anwendungen sowie Auswirkungen auf das Recycling	53
4	Handlungsempfehlungen für Politik und Industrie	56
4.1	Handlungsempfehlungen für die Industrie	56
4.2	Handlungsempfehlungen für die Politik	58
	Zusammenfassung und Ausblick	61
	Literaturverzeichnis	65
	Abkürzungsverzeichnis	75
	Anhang	76
	Impressum	77

Management Summary

Mit der zunehmenden Marktdurchdringung der Elektrofahrzeuge im Personen- und Transportverkehr steigt auch die jährlich installierte Kapazität der Traktionsbatterien von 270 GWh im Jahr 2024 auf voraussichtlich 1.800 GWh im Jahr 2035 an. Bedingt durch das Laden und Entladen (Zyklisierung) sowie die Alterung der Batterie sinkt deren Kapazität und die damit verbundene Reichweite, sodass sich die Batterie zu einem spezifischen Zeitpunkt nicht mehr für den Einsatz im Fahrzeug eignet und demontiert werden muss. Jedoch kann die Batterie hinreichend gut sein, um außerhalb des Fahrzeugs umgewidmet in Second-Life-Anwendungen eingesetzt zu werden. Besonders stationäre Energiespeicher mit geringeren Anforderungsprofilen als im Automotive-Bereich können mit Second-Life-Batterien ausgestattet werden und zur Netzstabilisierung, zur Notstromversorgung oder in Schnellladesäulen zur Vermeidung eines Hochvoltanschlusses beitragen. Im Vergleich zur Verwendung einer First-Life-Batterie in der gleichen stationären Anwendung können durch die Nutzung von Second-Life-Batterien der Product Carbon Footprint gesenkt und Kosteneinsparpotenziale realisiert werden, die stark von der jeweiligen Anwendung abhängen.

Für die Umwidmung einer End-of-First-Life-Batterie muss diese zunächst aus dem Fahrzeug demontiert, getestet und anschließend zu einem Umwidmungsbetrieb transportiert werden. Hier können weitere Tests zur Qualifizierung der Batterie und zur Bestimmung des Zustandes erfolgen. Zudem kann die Traktionsbatterie weiter auf Modullevel demontiert werden, um sie anschließend in eine Second-Life-Anwendung zu integrieren. Eine Alternative ist die Nutzung gesamter Batteriepacks zur Verwendung in der neuen Anwendung, wodurch zusätzlicher Demontageaufwand entfällt und Schlüsselkomponenten wie das Batteriemanagementsystem weiterverwendet werden können. Vor allem intransparente Daten aus dem ersten Lebenszyklus, fehlende Standardisierung und zeitintensive Testingprozesse erschweren bislang die Nutzung von Traktionsbatterien in einem zweiten Lebenszyklus. Weitere Einflussfaktoren sind der prognostizierte sinkende Neubatteriepreis sowie der Recyclingwert, die das wirtschaftliche Fenster für Second-Life eingrenzen. Zudem können Regularien wie die

Rezyklatquote in Neubatterien in der EU ab 2031 zu einer höheren Priorisierung des Recyclings führen und Second-Life-Bestrebungen hemmen. Unter Berücksichtigung des Szenarios mit mittleren Lebenserwartungen der Batterie berechnet sich das End-of-Life-Volumen für 2030 zu 5 GWh und steigt bis 2035 auf 133 GWh an. Dadurch bedingt, dass ein Teil der Traktionsbatterien nicht umgewidmet werden kann oder nicht in der EU sein Lebensdauerende erreicht und somit nicht zur Verfügung steht, reduziert sich das entsprechend für Second-Life-Anwendungen zur Verfügung stehende Volumen.

Die generelle Machbarkeit von Second-Life-Anwendungen wurde bereits in mehreren europäischen Pilotprojekten sowie auch durch Serienprodukte verifiziert. Vor allem enge Partnerschaften und Kooperationen zwischen Automobil-OEM und Umwidmungsbetrieben können zu mehr Datentransparenz und einer Vereinfachung des Umwidmungsprozesses führen. Verstärkt könnten in Zukunft LKW- und Bus-Batterien für ein Second-Life in Betracht gezogen werden, da hier von einer kürzeren ersten Lebensdauer ausgegangen werden kann.

Der digitale Batteriepass wird seitens der Industrie und Politik wie angekündigt bis 2027 entwickelt werden und sollte notwendige Daten aus dem ersten Lebenszyklus für die Umwidmung und Beurteilung eines Second-Life-Einsatzes bereitstellen. Außerdem sollten Standardisierungsvorhaben vorangetrieben und verstärkt Fachkräfte ausgebildet werden. Auch die Förderung von Industrie- und Forschungsprojekten könnte auf Landes-, Bundes- und EU-Ebene fortgesetzt werden und vor allem Unternehmen befähigen, Second-Life als Alternative zu bewerten und lokale Geschäftsmodelle aufzubauen, um die Transformation zur Energiewende zu beschleunigen.

1.

Anwendungen für Second-Life von Traktionsbatterien

1.1 Einleitung und Vorgehensweise

In einer Welt, die zunehmend von den Auswirkungen des Klimawandels und den Notwendigkeiten der Nachhaltigkeit geprägt ist, gewinnt die Energie- und Transportbranche angesichts steigender Emissionsvorschriften und Ressourcenknappheit an Bedeutung. In diesem Kontext rücken Traktionsbatterien, die in Elektrofahrzeugen (z. B. PKW, LKW, Bus) Verwendung finden, in den Mittelpunkt der Aufmerksamkeit. Diese Hochleistungsbatterien sind nicht nur ein Schlüsselbestandteil der Elektromobilität, sondern stellen gleichzeitig eine zentrale Technologie dar, die erhebliche Auswirkungen auf die lokale Reduzierung von Kohlenstoffemissionen im Straßenverkehr und den Übergang zu einer nachhaltigen Energiezukunft haben kann.

Die Traktionsbatterie ist ein elektrochemisches Energiespeichersystem und durchläuft im Verlauf ihres Lebenszyklus mehrere entscheidende Phasen. Sie fungiert zunächst als Energielieferant für die Fortbewegung des elektrischen Fahrzeugs. Aufgrund sinkender Kapazität, altersbedingter Defizite oder anderer Einflussfaktoren eignet sich die Batterie ab einem gewissen Zeitpunkt nicht mehr für den Einsatz im Elektrofahrzeug (engl. EV, Electric Vehicle) und muss aus diesem demontiert werden. Während ihre Primäranwendung endet, ergeben sich vielfältige Möglichkeiten für die erneute Verwendung der Traktionsbatterie. So genannte Second-Life-Anwendungen können die Lebensdauer der Batterie in anderen Anwendungen außerhalb des Elektrofahrzeugs verlängern und damit den ökologischen Fußabdruck der Batterie reduzieren. Nachfolgend werden daher zunächst mögliche End-of-Life(EOL)-Szenarien von Traktionsbatterien und EV definiert und aktuelle Aktivitäten und Akteure im Bereich Second-Life von Traktionsbatterien in Europa aufgezeigt. Anhand dieser Erkenntnisse werden die für ein Second-Life vorteilhaften Anwendungen näher spezifiziert.

Die notwendigen Prozessschritte, vom End-of-First-Life (EOFL) der Batterie über die Demontage aus dem Fahrzeug bis hin zur Integration in eine Second-Life-Anwendung werden erörtert. Abschließend werden Chancen und Herausforderungen bei der Verwendung von Traktionsbatterien für Second-Life-Anwendungen auf Basis einschlägiger Literatur identifiziert und mittels Experteninterviews überprüft.

1.2 End-of-Life-Szenarien von Traktionsbatterien und EV

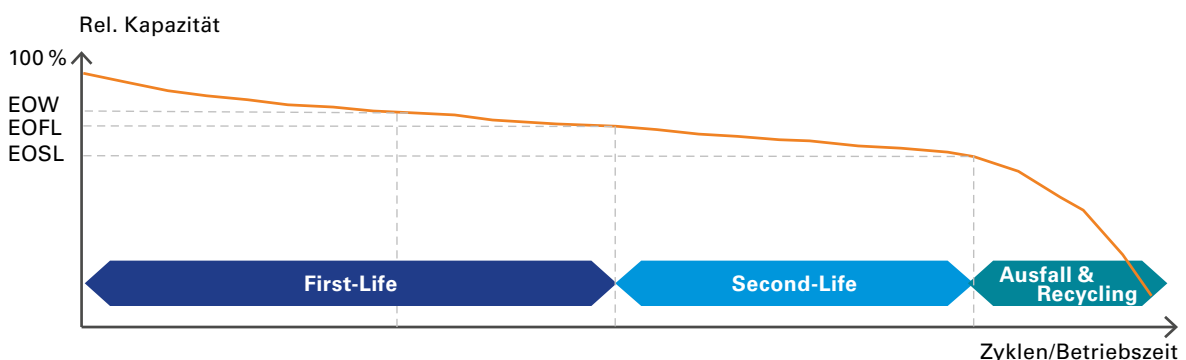
Lithium-Ionen-Batterien altern in allen Anwendungen mit der Zeit und eignen sich ab einem gewissen Kapazitätslevel ggf. nicht mehr für den Einsatz in ihrer ursprünglichen Anwendung. Bei EV wirkt sich diese verminderte Leistungsfähigkeit unter anderem auf die mögliche maximale Reichweite aus. Zu unterscheiden ist zwischen der kalendarischen und der zyklischen Alterung. Bei der kalendarischen Degradation altert die Batteriezelle durch chemische Prozesse, ohne dass die Zelle geladen oder entladen wird. Diese Form der Alterung wird wesentlich durch hohe Temperaturen und hohe Ladezustände beschleunigt. Zyklische Alterung findet während der Nutzung der Batterie durch wiederholte Lade- und Entladezyklen statt und wird durch hohe Ströme (z. B. während des Ladens), hohe Temperaturen und niedrige Ladezustände (engl. SOC, State-of-Charge) beschleunigt [Becker, 2019].

Durch die Alterung der Batterie sinkt der State-of-Health (engl. SOH), der die verbliebene Kapazität im Vergleich zur initialen Nennkapazität der Batterie abbildet. Automobilhersteller gewähren auf ihre Traktionsbatterien momentan eine Garantie für einen SOH von 70–80% in Verbindung mit einer durchschnittlichen Laufzeit von ~8 Jahren und ~170.000 Kilometern [ADAC, 2022]. Das End-of-First-Life der Traktionsbatterie muss bei 70–80% SOH allerdings noch nicht erreicht sein, vielmehr

kann das Lebensdauerende sehr stark vom Nutzerverhalten und von individuellen Fahrpräferenzen abhängen. Außerdem beeinflusst die Gesamtkapazität der Batterie in Verbindung mit dem Verbrauch die maximale Reichweite. Somit ist der absolute Reichweitenverlust bei gleicher prozentualer Verringerung des SOH zwischen verschiedenen Batterietypen und EV unterschiedlich und kann zu unterschiedlichem Nutzerempfinden führen. Darüber hinaus altert die Batterie über den gesamten SOH-Bereich nicht konstant, sondern ab einem bestimmten Punkt schneller und nicht-linear, sodass die Bestimmung des optimalen EOFL-Zeitpunkts der Traktionsbatterie zusätzlich erschwert wird (siehe Abbildung 1) [Neubauer, 2015].

End-of-Warranty (EOW), End-of-First-Life (EOFL) und End-of-Second-Life (EOSL):

Generell zu unterscheiden ist zwischen dem End-of-Warranty, dem End-of-First-Life und dem End-of-Second-Life. Das End-of-Warranty gibt den Zeitpunkt an, ab dem die Herstellergarantie aufgrund der gefahrenen Kilometer oder der Betriebsdauer erlischt. Bis zu diesem Zeitpunkt wird ein Mindest-SOH seitens der Automobil-OEM gewährt. Ist das End-of-Warranty erreicht, kann die Batterie weiterhin im Fahrzeug eingesetzt werden, wenn der SOH für den Betrieb des Fahrzeugs noch ausreichend ist. Erst mit dem End-of-First-Life (EOFL) endet die Nutzung der Batterie im Fahrzeug. Eignet sich die Batterie anschließend für eine weitere Nutzung in anderen Applikationen, beginnt das Second-Life. Erst nach Ende dieser verlängerten Lebensdauer wird der End-of-Second-Life erreicht und die Batterie muss dem Recycling zugeführt werden, da sie sich für keine weiteren Anwendungen eignet.



Quelle: IFFE, 2016

Abbildung 1: Schematischer Kapazitätsverlauf mit qualitativ angegebenen EOL-Kriterien

Weitere mögliche Ereignisse neben dem Kapazitätsverlust, die zum Austausch der Traktionsbatterie führen, sind Fahrzeugunfälle und Defekte der Batterie. Traktionsbatterien, die vor Einbau im Fahrzeug als Ausschuss deklariert werden, weil sie Automotive-Standards nicht erfüllen (z. B. zu lange Lagerdauer), können noch vor Inbetriebnahme den EOFL erreichen.

Eignet sich die Batterie nach Erreichen des EOFL nicht mehr für einen Einsatz im EV, bestehen verschiedene End-of-Life-Szenarien:

1. Wiederinstandsetzung für die Wiederverwendung (Reparatur/Aufbereitung/Instandsetzung)
2. Umwidmung für die Weiterverwendung/Second-Life
3. Wieder- und Weiterverwertung (Recycling)

1.2.1 Wiederinstandsetzung

Die Möglichkeit der Untersuchung und gegebenenfalls des Austauschs einzelner Batteriekomponenten, um die Wiederherstellung und erneute Verwendung in Elektrofahrzeugen zu ermöglichen, variiert je nach Art des Batteriedefekts und des gewünschten Ergebnisses. Zu unterscheiden ist zwischen der Reparatur, der Aufbereitung/Instandsetzung und der Refabrikation/Wiederinstandsetzung. Während Reparaturen mit geringem Aufwand durchgeführt werden können und den ursprünglichen Betriebszustand vor dem Defekt wiederherstellen, sind Prozesse zur Aufbereitung und Instandsetzung (engl. Refurbishment) des Batteriesystems komplexer. Diese Prozesse umfassen eine aufwendige Fehlersuche und Zerlegung mit dem Ziel der Anpassung des Batteriesystems an neue (Fahrzeug-)Anwendungen. Die Refabrikation oder Wiederinstandsetzung (engl. Remanufacturing) einer Traktionsbatterie ist mit dem höchsten Aufwand verbunden. Dabei erlangt das System Neuproduktstatus mit entsprechenden Garantien und der Aufbereitung von Systemkomponenten [Kwade, 2020].

Während des Refurbishment-Prozesses der Traktionsbatterie werden mehrere Schritte durchlaufen, um sie in einen Zustand zu versetzen, der den Anforderungen für eine erneute Verwendung in ihrer ursprünglichen Anwendung gerecht wird. Diese Prozesse beinhalten die Sammlung der Batterien, eine gründliche Inspektion zur Fehleridentifikation, Sortierung, Demontage, Reinigung, Aufbereitung, Wiedermontage und abschließende Qualitätstests [Becker, 2019; Hatcher, 2011]. Dabei stellt die Heterogenität der Batteriesysteme und -designs eine Herausforderung für die Standardisierung von Reparaturprozessen dar. Zusätzlich sind einige Batteriekonzepte,

wie beispielsweise „Cell-to-Pack“, nicht optimal für die Reparatur, Aufbereitung oder Instandsetzung ausgelegt.

Cell-to-Pack und Cell-to-Chassis sind Konzepte im Bereich der Elektrofahrzeugtechnologie. Beim Cell-to-Pack-Ansatz werden Batteriezellen direkt in Batteriepacks integriert, ohne dass zusätzliche Module erforderlich sind. Dies optimiert den Platzbedarf, reduziert das Gewicht und verbessert die Energiedichte des Batteriepacks. Beim Cell-to-Chassis-Ansatz werden die Batteriezellen in die Struktur des Fahrzeugchassis integriert, wodurch die volumetrische Energiedichte weiter erhöht werden kann und einige Modul- sowie Packkomponenten nicht benötigt werden. Beide Konzepte zielen darauf ab, Elektrofahrzeuge leistungsfähiger, leichter und kostengünstiger zu machen, indem sie herkömmliche Bauteile eliminieren und die Integration der Batterietechnologie verbessern. [Kampker, 2023]

1.2.2 Umwidmung für Second-Life

Kann oder soll die Batterie aus ökonomischen oder technischen Aspekten nicht repariert werden, so ist eine Umwidmung für die Weiterverwendung in anderen Applikationen außerhalb der ursprünglichen Form im First-Life möglich. Mit der verbliebenen Restkapazität lässt sich die Traktionsbatterie in anderen, weniger anspruchsvollen Anwendungen in einem „Second-Life“ weiterhin nutzen. Unterschieden wird dabei zwischen der Demontage der Batteriepacks in Batteriemodule und ihrer Neuzusammenstellung zu einem Batteriesystem abhängig vom SOH (engl. Remanufacturing) und der Verwendung gesamter Batteriepacks ohne vorherige Demontage (engl. Re-Use) [Kampker, 2024].

Die vorgestellten Strategien am Ende des Produktlebenszyklus verfolgen vielfältige Ziele, jedoch haben sie alle das gemeinsame Ziel, Komponenten und Materialien wiederzuverwenden, um ihre Lebensdauer im Produktkreislauf möglichst zu verlängern. Dies trägt in erster Linie zur Vermeidung und Reduzierung von Abfall bei und führt zudem zu indirekten Einsparungen von Energie und Material, die gebraucht würden, wenn das Produkt komplett neu hergestellt werden müsste. Durch den Verkauf von wiederaufbereiteten und umgewidmeten Batterien ergeben sich außerdem neue Geschäftsfelder [Hatcher, 2011].

Auf spezifische ökonomische und ökologische Vorteile des Second-Life wird in Abschnitt 2 eingegangen. Neben diesen

Chancen, die eine Zweitverwendung bietet, ergeben sich darüber hinaus Risiken und Herausforderungen, die in Abschnitt 1.6 diskutiert werden.

1.2.3 Recycling

Erreicht die Traktionsbatterie ihr endgültiges Lebensdauerende, ist ein Recycling anzustreben, um die in der Batterie enthaltenen wertvollen Materialien zurückzugewinnen und erneut für die Batterieproduktion einzusetzen. Die EU hat 2023 neue Vorschriften erlassen, in denen die Rückgewinnungsquoten im Recycling definiert werden. So sollen bis Ende 2027 etwa 50% des Lithiums und 90% des Kobalts im Recycling wiedergewonnen werden, bis Ende 2031 verschärfen sich diese Richtlinien dann auf 80% für Lithium und 95% für Kobalt [Europäisches Parlament, 2023]. Außerdem ist ein verpflichtender Mindestzyklusanteil für Traktionsbatterien von 16% für Kobalt, 6% für Lithium und 6% für Nickel ab 2031 vorgesehen, der sich 2036 auf 26% für Kobalt, 12% für Lithium und 15% für Nickel erhöht [Europäisches Parlament, 2023]. Die Auswirkungen auf Second-Life-Anwendungen werden in Abschnitt 3.6 diskutiert.

1.2.4 End-of-Life von EV

Es stellt sich die Frage, an welchem Punkt zukünftig Elektrofahrzeuge ihr Lebensdauerende erreichen und wie die Kreislaufwirtschaft für Traktionsbatterien sichergestellt werden kann.

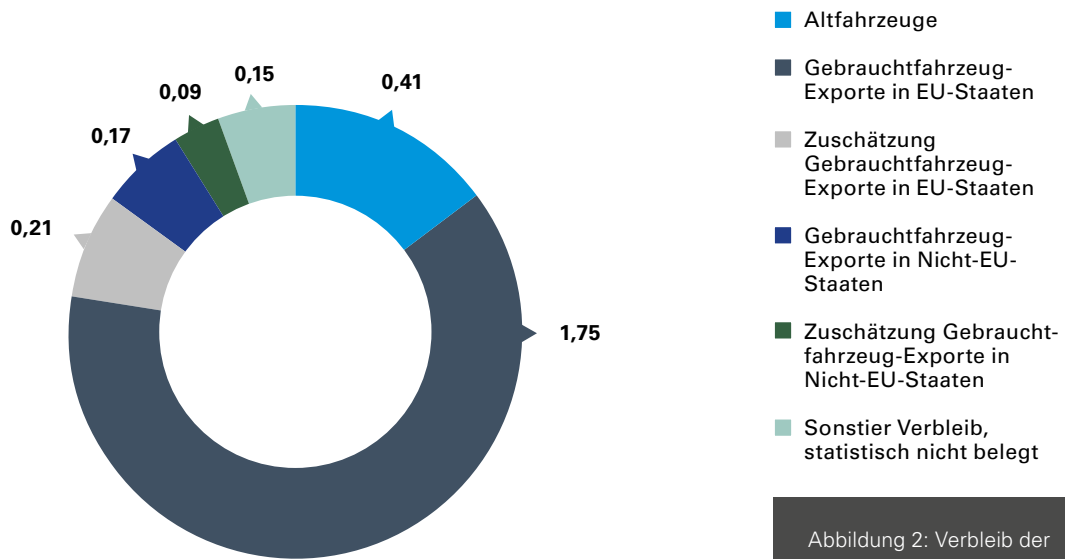
PKW (M1) und leichte Nutzkraftfahrzeuge (N1) haben einen Nutzungszyklus, der als Neuwagen beginnt und im Zuge des Verkaufs als Gebrauchtwagen seinen Fortgang findet. Viele Gebrauchtwagen werden mit zunehmender Fahrleistung und zunehmendem Alter und einhergehendem sinkenden Fahrzeugwert in Länder exportiert, die ein geringeres durchschnittliches Sozialprodukt haben. Die meisten Exporte finden in Länder der Europäischen Union statt. Ein Problem für die Beschaffung gebrauchter Traktionsbatterien kann darin liegen, dass ca. 40% der exportierten Gebrauchtfahrzeuge aus der EU in Länder außerhalb der EU verkauft werden [e-mobil BW, 2023]. Zielländer sind hauptsächlich Entwicklungs- und Transformationsländer mit mittlerem und niedrigem Einkommen [UNEP, 2020]. Diese Fahrzeuge sind in der Regel weder sicherheitstechnisch noch umwelttechnisch auf einem angemessenen Stand und verursachen in den Zielländern erhebliche Gesundheits- und Umweltschäden.

Deshalb entstehen Initiativen, die den Verbleib von Gebrauchtfahrzeugen regulieren. Seit 2023 liegt ein Vorschlag zur Erneuerung der Altfahrzeug-Richtlinie vor, der Maßnahmen vorsieht, um geltende Vorschriften durchzusetzen und die Transparenz zu erhöhen. Dazu gehören u. a. vernetzte nationale Kfz-Zulassungssysteme, Verbot der Ausfuhr von Fahrzeugen, die nicht verkehrssicher sind, mehr Inspektionen und Bußgelder und eine klarere Unterscheidung zwischen Alt- und Gebrauchtfahrzeugen [European Commission, 2023].

Traktionsbatterien können auch Altfahrzeugen entnommen werden. Wenn eine Fahrtüchtigkeit nicht mehr gegeben ist, spricht man von einem Altfahrzeug, das wertvolle Bauteile und Materialien enthält. Sie werden in speziellen Betrieben demontiert und geschreddert.

Zur Ermittlung der Anzahl der endgültigen Außerbetriebsetzungen in Deutschland gibt es eine Abschätzung für das Jahr 2020 mit einem, aus der Pandemie zu erklärenden, Rückgang von ca. 10% gegenüber dem Vorjahr [Umweltbundesamt, 2023]. Statistische Angaben gibt es nicht. Deshalb wurde für das Jahr 2020 eine umfassende Auswertung durch das KBA vorgenommen [Umweltbundesamt, 2023]. Für die nachfolgende Verbleibsberechnung wurde bei den endgültigen Außerbetriebsetzungen eine Anzahl von 2,78 Mio. hergeleitet (M1 und N1).

Mit 2,2 Mio. Fahrzeugen wurde 2020 der weitaus größte Teil der in Deutschland endgültig außer Betrieb gesetzten Fahrzeuge als Gebrauchtfahrzeuge exportiert. Der Großteil davon wurde in anderen EU-Staaten wieder in Betrieb gesetzt. Nach den Bewirtschaftungszahlen des Kraftfahrt-Bundesamtes sowie einigen ergänzenden Daten der Außenhandelsstatistik des Statistischen Bundesamtes wurden im Jahr 2020 1,75 Mio. Fahrzeuge in anderen EU-Staaten wieder zugelassen (siehe Abbildung 2) [Umweltbundesamt, 2023]. Aufgrund unvollständiger Daten erfolgt eine Zuschätzung von weiteren 210.000 Gebrauchtfahrzeugen. Rund 260.000 Fahrzeuge, also lediglich rund 9% der endgültig außer Betrieb gesetzten Fahrzeuge, wurden als Gebrauchtfahrzeuge von Deutschland ins Nicht-EU-Ausland exportiert (Außenhandelsstatistik plus Zuschätzung). Darin enthalten sind 67.000 Gebrauchtfahrzeuge, die nach Westafrika exportiert wurden (2,4%).



Quelle: [Umweltbundesamt, 2023]

Abbildung 2: Verbleib der endgültig stillgelegten Fahrzeuge in Deutschland 2020 in Mio.

Die EU hat Zielvorgaben für die Wiederverwendung, das Recycling und die Verwertung von Altfahrzeugen festgelegt. Laut dem Umweltbundesamt wurden im Jahr 2020 in Deutschland rund 406.000 Altfahrzeuge zur Verwertung angenommen. Die durchschnittliche Verwertungsquote lag bei 94%, wobei 86,8% stofflich verwertet und damit recycelt wurden. Damit wurde die EU-weite Vorgabe von 95% leicht verfehlt.

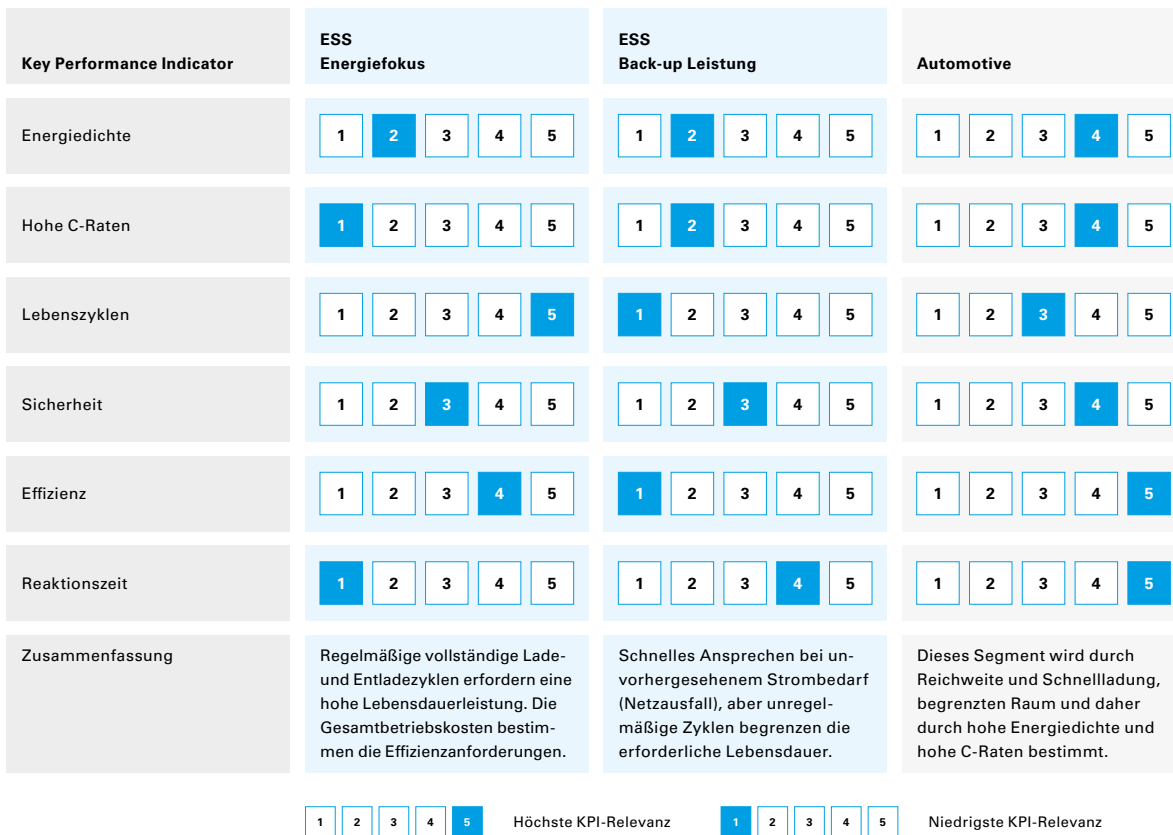
Für Europa liegen die neuesten Daten aus dem Jahr 2020 vor [Eurostat, 2020]. Demnach wurden in der EU-27 rund 5,37 Millionen Altfahrzeuge statistisch erfasst. Die durchschnittliche Quote für die stoffliche Verwertung lag bei 89,1% und somit höher als in Deutschland. Von den 5,37 Millionen Altfahrzeugen waren die allermeisten Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor ausgestattet. Die Durchdringung von Fahrzeugen mit Traktionsbatterie, die in dieser Ausarbeitung von Relevanz ist, wird noch mehrere Jahre dauern.

Unter dem Abfallschlüssel 160121* (gefährliche Bauteile) können unterschiedliche Bauteile entsorgt werden. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz geht davon aus, dass es sich um Traktionsbatterien von Elektrofahrzeugen handelt. Eine statistische Aus-

sage zur Tonnage dieses Abfallschlüssels liegt den Verfassern dieser Studie nicht vor.

1.3 Second-Life-Anwendungen für Traktionsbatterien

Eine wichtige Maßnahme zur Verbesserung der Gesamteffizienz der Batterienutzung ist die Umwidmung zur Weiterverwendung einer Traktionsbatterie. Hierbei wird der Lebenszyklus der Batterie mit einer Anwendung verlängert, die auch mit geringeren Kapazitäten zurechtkommt als die initiale Nutzung in einem Fahrzeug. Für einen Second-Life einer Traktionsbatterie gibt es viele denkbare Anwendungen insbesondere im stationären Umfeld, das geringere Anforderungen an Leistungsdichte, hohe C-Raten, Effizienz und Reaktionszeit der Batterie stellt (siehe Abbildung 3). Stationäre Energiespeicher können entweder dem Bereich „Energiefokus“ oder „Backup-Leistung“ zugeordnet werden. Während Systeme mit Energiefokus regelmäßig vollständig ge- und entladen werden, an sie somit hohe Anforderungen in Bezug auf die Lebensdauer gestellt werden, werden Stationärspeicher als Backup-Leistung unregelmäßiger zyklisiert, müssen allerdings innerhalb kürzester Zeit ansprechen.



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 3: Technische KPI-Relevanz und Anforderungen für verschiedene ESS- und Automotive-Anwendungen

1.3.1 Hausspeichersysteme als Zwischenspeicher zur Erhöhung des Solarstrom-Eigenverbrauchs

Der starke Ausbau der Erneuerbaren Energien (EE) wurde durch die finanzielle Förderung von Photovoltaik(PV)-Anlagen in Deutschland durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) unterstützt. Die EEG-Fördersätze für PV-Neuanlagen sind jetzt an die stark gefallenen neuen PV-Systempreise angepasst und somit deutlich geringer als früher. Auch die Netzeinspeisung von Neuanlagen wird sehr viel geringer vergütet als der haushaltsübliche Strom-Bezugspreis, der insbesondere 2022 deutlich gestiegen ist. Deshalb lohnen sich die private Zwischenspeicherung von überschüssig erzeugter Energie und die Nutzung dieser Energie zu Zeiten von höherem Energiebedarf und/oder bei geringerer Stromerzeugung.

Hausspeichersysteme bieten somit den Endverbrauchern die Möglichkeit, den Eigenverbrauch und somit die Wirtschaftlichkeit ihrer PV-Anlagen zu erhöhen und eine höhere Unabhängigkeit von der Preisgestaltung der Energieversorgungsunternehmen zu erhalten. Ein Hausspeichersystem besteht u. a. aus der Steuerungselektronik, einem Wechselrichter und der eigentlichen Batterie, die aufgrund der Einsatzbedingungen auch als Second-Life-Batterie ausgeführt sein kann.

1.3.2 Industriespeichersysteme in einem Gleichstromnetz

In industriellen Produktionsstätten werden ebenfalls PV-Anlagen zur Stromversorgung eingesetzt. Für diese gilt die gleiche Motivation zur Eigenverbrauchserhöhung wie für Haushalte. Zusätzlich kann aber auch ein Gleichstromnetz zur Versorgung der Industrieanlagen (z. B. Roboter im Automobil-

bau) aufgebaut werden. Hier ist der Second-Life-Batteriespeicher sowohl ein Zwischenspeicher für den erzeugten PV-Strom als auch ein Booster für die Energieentnahme und kann bei entsprechender Ausgestaltung der versorgten Maschinen Energie durch Rekuperation z. B. beim Abbremsen eines Roboterarms aufnehmen. Die Anforderungen an das Energiespeichersystem sind deutlich höher als bei Hausspeichersystemen. Deshalb eignen sich hochwertig spezifizierte Batterien aus dem Second-Life einer Fahrzeug-Traktionsbatterie sehr gut für diese Anwendung.

1.3.3 Primär- und Sekundärregelleistung zur Erhaltung der Netzstabilität

Die Gleichgewichtsfrequenz im europäischen Verbundnetz beträgt 50 Hertz. Sie liegt vor, wenn Strom einspeisung und -bezug im Gleichgewicht stehen. Kann dieses Gleichgewicht nicht gehalten werden, kommt es zu einer Abweichung von der Gleichgewichtsfrequenz. Es ist Aufgabe der Übertragungsnetzbetreiber, die Gleichgewichtsfrequenz durch den Einsatz von Regelleistung wieder herzustellen. Zu diesem Zweck stehen ihnen drei verschiedene Regelleistungsarten zur Verfügung (siehe Abbildung 4). Die Primärregelleistung (PRL) muss innerhalb von 30 Sekunden vollständig aktiviert sein. Um die Leistung der PRL wieder verfügbar zu machen, werden bei länger währenden Störungen die Sekundärregelleistung (SRL) und anschließend die Minutenreserve zur Kompensation der

fehlenden oder überschüssigen Leistung im Netz eingesetzt [FFE, 2016].

Die Sekundärregelleistung wird wie die Primärregelleistung automatisch aktiviert. Im Unterschied zur Primärregelleistung ist die Sekundärregelleistung nicht im Verbund der europäischen Übertragungsnetzbetreiber organisiert, sondern liegt in der Verantwortung des regionalen oder nationalen Übertragungsnetzbetreibers. Die Bereitstellung oder der Bezug von Energie wird zunehmend auch über virtuelle Kraftwerke aus zusammengeschlossenen Anlagen aus Stromspeichern gedeckt. Der Handel mit Sekundärregelleistung funktioniert im Rahmen eines Auktionsprinzips: Anbieter von Sekundärregelleistung geben an jedem Kalendertag Gebote für positive (dem Netz zufließende) oder negative (dem Netz zu entnehmende) Sekundärregelleistung ab. Anschließend werden diese Gebote in einer sogenannten Merit-Order-Liste von niedrig nach hoch angeordnet. Die günstigsten Angebote erhalten schnell den Zuschlag, je nach tatsächlichem Bedarf an Regelenergie kommen auch die teureren bis teuersten Gebote zum Zug. Die Vergütung in der Sekundärregelleistung teilt sich in Leistungspreis und Arbeitspreis auf. Beide Preise müssen bereits bei der Gebotsabgabe genannt werden. Der Leistungspreis entscheidet über die Höhe der Vergütung für die Bereitstellung der Regelenergie, der Arbeitspreis über die Vergütung des tatsächlichen Abrufs [FFE, 2016].

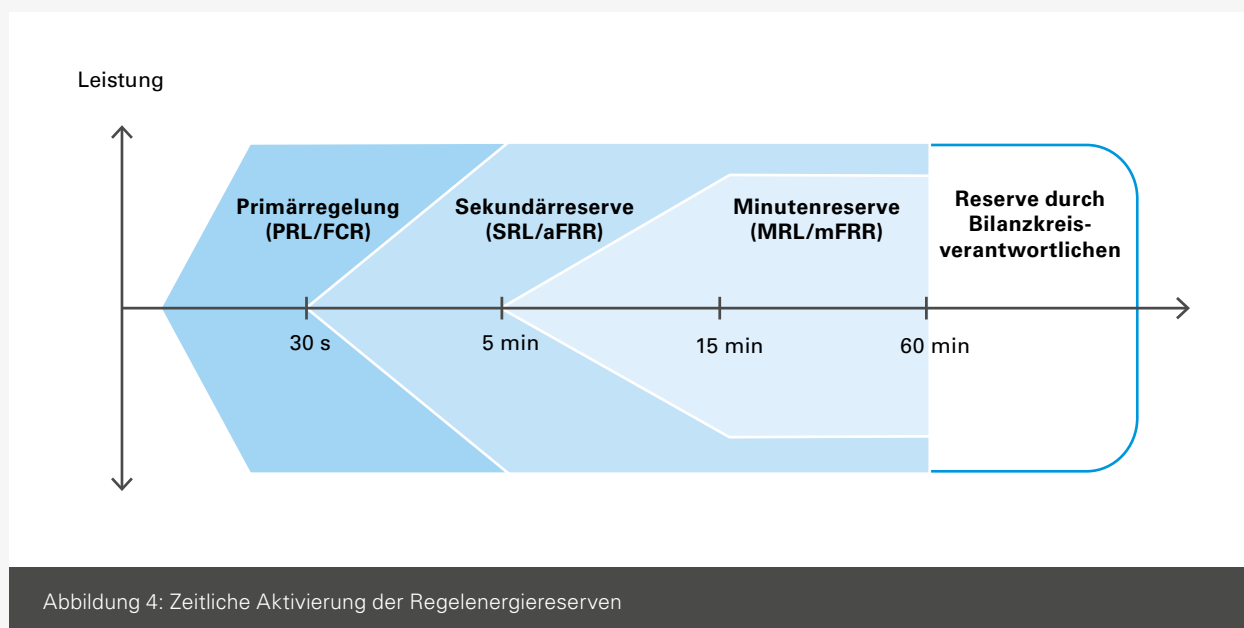


Abbildung 4: Zeitliche Aktivierung der Regelleistungsreserven

Eine Second-Life-Batterie kann durch den Lade- und Entladevorgang zur Frequenzhaltung eingesetzt werden und somit einen Beitrag zur Netzstabilität leisten. Im Falle eines Einsatzes für die PRL und SRL erfolgt die Aktivierung des Speichers vollautomatisch bei Frequenzabweichungen im Netz. Aufgrund der kurzen Aktivierungszeit sind Batteriespeicher, die zudem hohe Leistungsgradienten erzielen können, für die Primärregelleistung- und Sekundärregelleistung-Bereitstellung besonders attraktiv. Die Speicher werden dabei im SOC-Bereich von 25–75% in Teilzyklen mit geringem Ladungsdurchsatz betrieben, was sich positiv auf die Lebensdauer auswirkt. Allerdings ist eine Mindestangebotsgröße von ~1 MW notwendig, um am PRL-Markt teilzunehmen. Es gibt außerdem die Beobachtung, dass die geringen Ruhezeiten gegebenenfalls negative Auswirkungen auf das (Zell-)Balancing haben könnten [Next, 2023].

1.3.4 Energierückgewinnung bei Schienenfahrzeugen

Zur Optimierung der Effizienz von Schienenfahrzeugen und zur Stabilisierung der Peak-Leistung im Stromnetz beim Anfahren von Schienenfahrzeugen dient das Puffern und Bereitstellen von rekuperierter Energie, die beim Abbremsen von Schienenfahrzeugen bereitgestellt wird. Diese Energie kann, wenn sie nicht sofort durch einen Anfahrvorgang eines anderen Schienenfahrzeugs genutzt wird, in einem Energiespeichersystem gespeichert und bei hoher Lastanforderung auch wieder ausgespeichert werden. Auf diese Weise geht die Energie nicht verloren und es kann ein effektives Spitzenlastmanagement aufgebaut werden. Dieses senkt die laufenden Kosten des Netzanschlusses und ermöglicht den Verzicht auf den Ausbau des Netzanschlusses mit höheren Spitzenleistungen. In dieser Anwendung bieten sich Second-Life-Batterien an, die aufgrund ihrer Spezifikation mit hohen Leistungen zurechtkommen und eine hohe Zykluszahl besitzen.

1.3.5 Leistungspuffer für Schnellladesäulen

Die Verkehrswende geht einher mit einer zunehmenden Anzahl an batterieelektrischen Elektrofahrzeugen (BEV). Die öffentliche Ladeinfrastruktur wird für das Laden von PKW und LKW umfangreich ausgebaut. Die modernen Ladeparks werden mit Schnellladefunktionen (HPC) ausgestattet. Diese sind in der Regel netzgekoppelt und belasten das Stromnetz durch die hohen Ladeleistungen (bei PKW bis zu 350 kW und bei LKW sogar im 1.000-kW-/Megawatt-Bereich). Durch die Ausstattung der Ladesäulen mit einem Energiespeichersystem mit

Second-Life-Batterien können Leistungsspitzen abgefangen und einer Aufrüstung des Netzanschlusses mit Mittelspannungsanschlüssen entgegengewirkt werden. Hohe Ladeleistungen, hohe C-Raten, tiefe Entladezyklen und hohe Vollzyklen können die Second-Life-Batterie allerdings stark belasten und sich negativ auf die Lebensdauer auswirken [Kampker, 2024].

Die C-Rate einer Batterie bezieht sich auf die Entladerate, also darauf, wie schnell die Batterie Energie abgeben kann. Zum Beispiel bedeutet eine C-Rate von 1, dass die Batterie in einer Stunde ihre gesamte Kapazität entladen kann [MIT, 2008]. Bei Second-Life-Batterien spielt die C-Rate eine wichtige Rolle, da sie angibt, wie schnell die Batterien in neuen Anwendungen, etwa stationären Speichersystemen, entladen werden können und ob sie den Anforderungen der jeweiligen Anwendung gerecht werden [Powertech Energy, 2023].

1.4 Aktuelle Second-Life-Akteure und -Aktivitäten in der EU

Erste Second-Life-Projekte und -Aktivitäten mit Traktionsbatterien starteten bereits in den frühen 2010er Jahren in Europa [Zhu, 2021]. Seitdem wurden weitere Pilotprojekte und Aktivitäten verschiedener Akteure initiiert. Aktuelle Akteure mit Bezug zu Second-Life-Anwendungen von Traktionsbatterien sind in Abbildung 5 dargestellt. Zu den Akteuren gehören unter anderem Automobil-OEM, Second-Life-Umwidmungsbetriebe und -Integratoren, Anbieter von Batterietestverfahren, Hersteller von stationären Speichern, Energieversorger, Logistikunternehmen, Entwicklungsdienstleister, Verkehrsunternehmen, Hersteller von mobilen Ladesystemen, Unternehmen der Kreislaufwirtschaft und Marktplattformanbieter/Trader.



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 5: Akteure und Aktivitäten mit Bezug zu Second-Life-Anwendungen von Traktionsbatterien in Europa

Eine starke Konzentration der Akteure und Aktivitäten innerhalb Europas befindet sich in Deutschland (~50% aller identifizierten Aktivitäten in Europa finden in Deutschland statt). Vor allem OEM, die bereits verstärkt in der Elektromobilität aktiv sind, haben in Kooperationen und Partnerschaften zum Teil mehrere Pilotanlagen in Betrieb genommen und testen unterschiedliche Anwendungsfälle, so auch in Frankreich, Großbritannien und Schweden. Neben Pilotprojekten mit Second-Life-Batterien existieren auf dem Markt bereits Second-Life-Serienlösungen.

Insgesamt ist eine verstärkte Zunahme der Projekte in den letzten Jahren zu verzeichnen, außerdem werden zunehmend größere stationäre Second-Life-Energiespeichersysteme in Betrieb genommen. Gleichzeitig werden die Anwendungsfälle diverser. Eine Aufteilung der Anwendungsbereiche identifizierter Second-Life-Projekte in der EU ist in Abbildung 6 dargestellt. Demnach entfallen 39% der Anwendungen und Projekte auf Industriespeicher, 21% auf die Netzregelleistung. Weitere 16% dienen der EV-Ladeinfrastruktur. Projekte zur Notstromversorgung, mobile sowie Mirco-Grid-Anwendungen sind mit jeweils unter 10% unterrepräsentiert. Eine Aufstellung der identifizierten Projekte mit Beteiligung von Clustermitgliedern der e-mobil BW ist darüber hinaus in Tabelle 1 dargestellt.

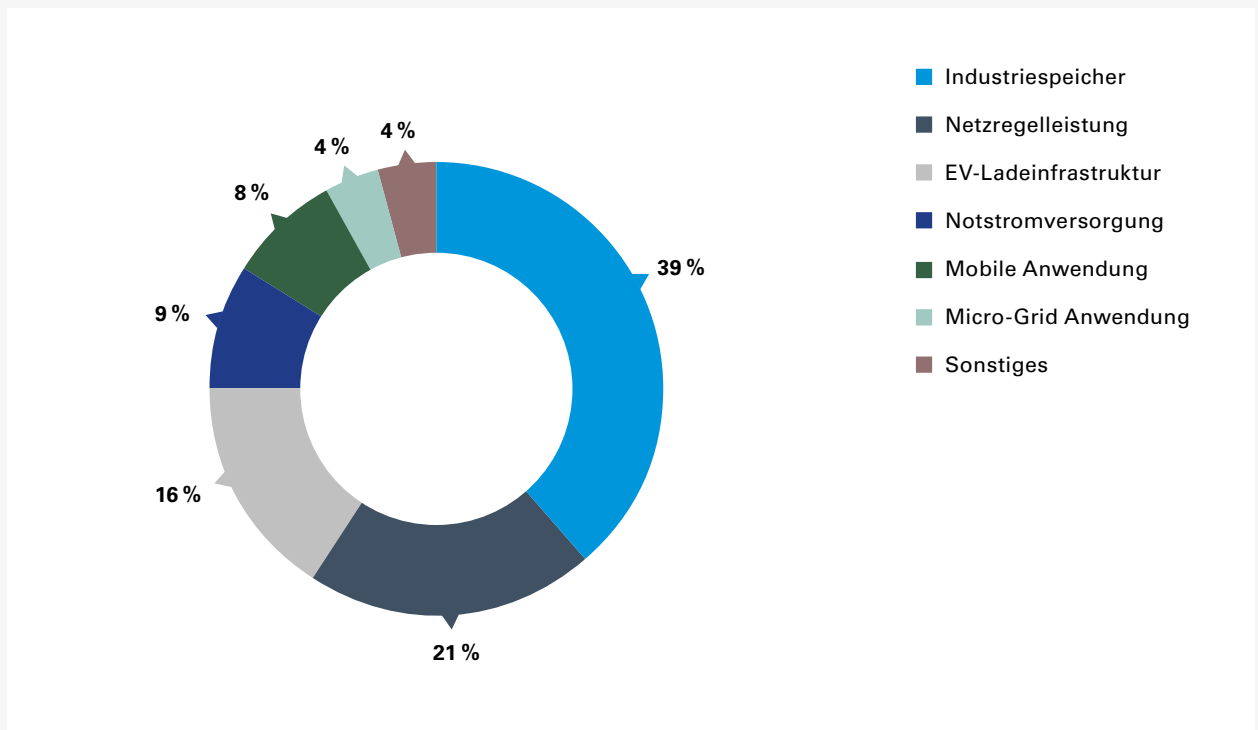






















Abbildung 6: Anwendungsbereiche europäischer Second-Life-Projekte

Quelle: [eigene Darstellung]

Anwendung	Use-Case-Beschreibung	Standort	Batterieherkunft	ESS-Integrator	Endnutzer
Lastspitzenkappung	Im Jahr 2023 installiert BatteryLoop mit Stena Fastigheter und Ikano Bostad Schwedens größtes Speichersystem aus wiederverwendeten Mercedes-Benz-Batterien. Der 2,8-MW-Speicher senkt in dem nachhaltigen Viertel Humlestaden Energiekosten und versorgt das örtliche Netz während Spitzenzeiten mit Strom (electrive, 2023).	Göteborg, Schweden	 *		 
Notstromversorgung, Eigenverbrauchsoptimierung	Ein 1,6-MWh-Energiespeicher von e.battery systems wird im September 2023 in Betrieb genommen. Gekoppelt an eine über 9.000 m ² große Photovoltaik-Anlage, dient der Speicher der Bischof Lagerhaus AG zur Eigenverbrauchsoptimierung sowie der Notstromversorgung mit einem Autarkiegrad von etwa 2 Tagen (e.battery systems AG, 2024).	Sennwald, Schweiz	 *		
Referenzspeicher für den kommerziellen Betrieb	Im Mai 2022 beginnt EnBW in Zusammenarbeit mit Audi ein Pilotprojekt zur Nutzung von Second-Life-Batterien. Auf dem Betriebsgelände in Heilbronn entsteht ein Referenzspeicher aus 12 Traktionsbatterien der Audi-e-tron-Testflotte mit einer Gesamtleistung von etwa 1 MW (EnBW, 2022).	Heilbronn, Deutschland		 *	 *
Lastspitzenkappung, Netzstabilisierung	Im Rahmen eines Forschungsprojekts mit dem Fraunhofer ISE und Enel X unterstützt seit Januar 2022 ein 5-MWh-Speichersystem die Energieversorgung des Flughafens „Leonardo da Vinci“ in Rom. Der Speicher besteht aus gebrauchten Fahrzeugbatterien verschiedener OEM und dient der optimierten Nutzung überschüssiger Photovoltaik-Energie, um den abendlichen Spitzenbedarf zu decken und zusätzlich Netzdienstleistungen zu erbringen (Fraunhofer ISE, 2024).	Rom, Italien	-	 * 	
EV-Ladeinfrastruktur	Das Start-up Mob-Energy setzt im Jahr 2022 einen autonom agierenden Laderoboter für Elektrofahrzeuge um, der durch Second-Life-Batterien von Mercedes-Benz angetrieben wird. Der Roboter lädt Fahrzeuge mit einer Gleichstrom-Ladeleistung von 7,4 kW bis 30 kW und ist am Hauptsitz von Mercedes-Benz Frankreich im Einsatz (Mercedes-Benz France, 2022).	Montigny-le-Bretonneux, Frankreich	 *		 *
Netzregelleistung, Frequenzstabilisierung	Im Herbst 2016 installiert Vattenfall im Hamburger Hafen einen 2-MW-Speicher, in dem ausgemusterte BMW-Batteriemodule der Modelle Active-e und i3 zum Einsatz kommen. Systementwicklung und Integration erfolgten durch Bosch. Das Projekt dient dem Ausgleich von Frequenzschwankungen, um die Netzfrequenz zu stabilisieren (Vattenfall, 2018).	Hamburg, Deutschland		 *	
Notstromversorgung, Lastspitzenausgleich	In Kooperation mit Eaton, The Mobility House und BAM wird im Jahr 2018 ein 3-MW-Speichersystem in der Johan-Cruiff-Arena in Betrieb genommen. Mit ausgemusterten Nissan-LEAF-Batterien ausgestattet, dient das Batteriespeichersystem der Notstromversorgung sowie dem Ausgleich von Lastspitzen während Konzerten (The Mobility House, 2018).	Amsterdam, Niederlande		 *  * 	
Industriespeicher	Im November 2021 erhält TGN Energy ein 216-kWh-Energiespeichersystem, in dem wiederverwendete Batterien von Mercedes-Benz zum Einsatz kommen und Industrie- und Gewerbeanwendungen mit Energie versorgen (Evyon, 2022).	Oslo, Norwegen	 *		
Eigenverbrauchsoptimierung, Lastspitzenausgleich	Im Rahmen eines Forschungsprojekts liefert die Smart Power GmbH im Jahr 2018 ein 100-kWh-Speichersystem aus ausgemusterten Mercedes-Benz-Batterien. Es wird für die Eigenbedarfsoptimierung der Saubermacher AG eingesetzt und dient der Datengewinnung über die Batterielebensdauer im industriellen Einsatz (Smart Power, 2023).	Graz, Österreich	 *		

*Mitglieder des Clusters Elektromobilität Süd-West: Robert Bosch GmbH, Fraunhofer ISE, Eaton Germany GmbH, EnBW Baden-Württemberg AG, Mercedes-Benz Group.

Tabelle 1: Exemplarische Beschreibung von Second-Life-Projekten mit Beteiligung von Clustermitgliedern des Clusters Elektromobilität Süd-West

Quelle: lelectrive, 2023; e.battery systems AG, 2024; EnBW, 2022; Fraunhofer ISE, 2024; Mercedes-Benz France, 2022; Vattenfall, 2018; The Mobility House, 2018; Evyon, 2022; Smart Power, 2023; Eigene Darstellung

Aus Experteninterviews geht hervor, dass aktuelle Pilotprojekte und auch Second-Life-Serienlösungen momentan vorwiegend mit Batterien aus Produktionsausschuss und aus Überkapazitäten (so genannte „New-Life-Batterien“) sowie Versuchs-, Test- und Prototypenfahrzeugen versorgt werden und damit oftmals einen höheren SOH aufweisen, als OEM für ihre Batterien über die Laufzeit von ~8 Jahren garantieren [P3 Interview – Energieversorger, 2023; PV Magazine, 2023]. Dies sei auf die Lebensdauer der Batterien von aktuell prognostizierten 15 Jahren und mehr zurückzuführen, sodass Batterien im Fahrzeug ihr End-of-Life wesentlich später erreichen werden als ursprünglich angenommen [P3 Interview – OEM, 2023]. Eine exakte Volumenvorhersage für EOL-Batterien sei zum aktuellen Zeitpunkt aus Expertensicht allerdings weiterhin schwer zu treffen [P3 Interview – Marktplattformanbieter, 2023]. In Kapitel 3 wird daher unter zuvor definierten Prämissen das jährliche Batterie-EOL-Volumen bestimmt, um daraus das Volumen für Second-Life-Anwendungen zu diskutieren.

1.5 Umwidmungsprozess für Second-Life-Anwendungen

Der Umwidmungsprozess für EOFL-Traktionsbatterien kann in zwei übergeordnete Prozessschritte mit Teilprozessen untergliedert werden, die sich im Detail je nach Anwendung und Unternehmen unterscheiden können:

1. Batterierücknahme
2. Batterieumwidmung und Integration

Die Prozesskette zur Rücknahme, Umwidmung und Integration von Traktionsbatterien beginnt mit der Demontage der Batterie aus dem Fahrzeug, sobald die Traktionsbatterie ihr erstes Lebensdauerende (EOFL) erreicht hat. Neben der Demontage aus dem Fahrzeug ist die Bestimmung des EOL-Szenarios ein wesentlicher erster Schritt in diesem Prozess. Die Batterie kann entweder durch Reparatur für die Verwendung in derselben Anwendung wiederhergestellt werden oder so umgewidmet werden, dass sie in anderen Anwendungen eingesetzt werden kann. Falls keine dieser Alternativen in Betracht kommt, sollte ein Recycling angestrebt werden, bei dem möglichst viele Rohstoffe wiedergewonnen und in die Batterieproduktion zurückgeführt werden.

Im Schritt der Batterieumwidmung und Integration folgt entweder die Demontage des Batteriepacks in einzelne Module oder das gesamte Pack wird weiterverwendet. Es können anschließend Modifikationen am Batteriesystem folgen. Schließ-

lich werden die einzelnen Batterien zu einem Gesamtsystem integriert und miteinander verschaltet. Auf nachfolgende Prozessschritte, wie die Verwendung der Second-Life-Anwendung, Service und ein abschließendes Recycling wird bei dieser Prozessbeschreibung verzichtet. Da bislang sehr wenige EV und deren Traktionsbatterien ihr EOFL erreicht haben, wurden die nachfolgenden Beschreibungen der Prozesse auf Basis von Studien und Experteninterviews abgeleitet.

1.5.1 Batterierücknahme

Der Prozess der Batterierücknahme wird durch eines von mehreren möglichen EOFL-Szenarien initiiert, in denen die Batterie aus dem Fahrzeug demontiert werden muss. Verschiedene EOFL-Ursachen wurden bereits in Abschnitt 1.2 vorgestellt (u. a. geringer SOH). Je nach Szenario sind unterschiedliche Akteure in die Prozesskette involviert: Fahrzeug-eigentümer, Batterieeigentümer, Automobil-OEM, Werkstätten, Abschleppunternehmen, Demontagebetriebe, Verwerter und Versicherungen.

Zunächst wird das Fahrzeug zu einer Werkstatt oder einem Demontagebetrieb transportiert, um dort die Batterie auszubauen. Handelt es sich um Test- oder Prototypenfahrzeuge, kann der Ausbau auch direkt beim OEM stattfinden. Stammt die Batterie aus Produktionsausschuss und wurde somit nicht im EV eingesetzt, findet keine Demontage statt.

Spezifische Demontageinformationen können mittels der IDIS-Datenbank (engl. International Dismantling Information System) abgerufen werden. Sie ermöglicht den Zugang zu Informationen wie dem Einbauort der Batterie, grafischen Ansichten und notwendigen Demontagewerkzeugen für das spezifische Fahrzeug [Idis, 2023]. Weitere Informationen liefern die Fahrzeug-Identifikationsnummer (FIN) und die Reparatur- und Wartungsinformation (engl.: repair and maintenance information; RMI) [Gibson, 2014].

Um die Batterie zu entfernen, muss das Fahrzeug stromfrei geschaltet werden, anschließend wird die Spannung kontrolliert und die Traktionsbatterie ist demontagebereit. Zur Demontage werden spezielles Hochvoltequipment sowie eine Hochvoltausbildung der Mitarbeitenden benötigt. Diese Qualifikation besitzen aktuell nur wenige Recyclingunternehmen und Autoverwerter.

Vor oder nach der Demontage der Traktionsbatterie erfolgt die Klassifizierung, ob sich die Batterie für ein mögliches Second-

Life eignet oder dem Recycling zugeführt werden soll. Wichtige Daten kann das Batteriemanagementsystem (BMS) bereitstellen, allerdings muss dafür der Zugriff darauf möglich sein. Können historische Daten aus dem BMS ausgelesen werden, ist es mittels künstlicher Intelligenz (KI) inzwischen möglich, einen SOH der gesamten Batterie zu ermitteln [Novum, 2023]. Eine weitere Variante stellt der Kapazitätstest dar, bei dem mit unterschiedlichen C-Raten der Zustand der Batterie bestimmt wird. Dieses Testverfahren ermöglicht es, für einzelne Batteriemodule eine Diagnose des SOH zu erhalten, allerdings ist der Test sehr zeitintensiv. Weitere deutlich kürzere Testverfahren sind die Impedanzspektroskopie und die Bestimmung des Innenwiderstandes. Zur Interpretation der gemessenen Werte müssen allerdings historische Daten vorliegen [Becker, 2019].

Ein Batteriemanagementsystem (BMS) überwacht und steuert den Betrieb von Batterien, indem es Parameter wie Spannung, Ladestatus und Temperatur reguliert. Im Kontext von Second-Life-Batterien ist ein effizientes BMS entscheidend, um gebrauchte Batterien sicher in neue Anwendungen zu integrieren, ihre Leistung zu maximieren und die nachhaltige Nutzung zu fördern. Es gleicht Unterschiede in Alterung und Kapazität aus, optimiert die Lade- und Entladeraten und gewährleistet eine präzise Steuerung für eine langfristige und effektive Zweitverwendung. [Pass Testing Solutions, 2023]

Aktuell findet der Klassifizierungsprozess überwiegend bei Fahrzeug-OEM statt, da EOFL-Batterien aus Test- und Pilotfahrzeugen stammen und OEM den direkten Zugriff auf diese Fahrzeuge besitzen. Zukünftig könnte dieser Test in zertifizierten Werkstätten und Demontagebetrieben stattfinden, die über entsprechendes Testequipment verfügen. Außerdem müssten standardisierte Testkriterien definiert werden, anhand derer entschieden werden kann, ob sich die Batterie in einem Second-Life weiterverwenden lässt.

Zusätzlich kann der Identifikations- sowie Zustandsbestimmungsprozess durch den digitalen Batteriepass unterstützt werden, der ab dem 18. Februar 2027 in Europa verpflichtend für neue Traktionsbatterien eingeführt wird [Europäisches Parlament, 2023]. Der Batteriepass soll das nachhaltige und zirkuläre Management von Batterien unterstützen, indem er eine digitale Infrastruktur für die Dokumentation und den Austausch von wertvollen Geschäfts- und Nachhaltigkeitsinformationen bereitstellt. Mit diesen Informationen soll künftig der gesamte Lebenszyklus und Wertschöpfungsprozess transparent dargestellt werden, um Produktions- und Wertschöpfungsprozesse nach zirkulären Prinzipien gestalten zu können.

Letztlich soll der Lebenszyklus des gesamten Batteriesystems so weit wie möglich verlängert werden und das Recycling der eingesetzten Rohstoffe, Materialien und Komponenten am Ende des Lebenszyklus gefördert werden. Darüber hinaus soll die Schaffung transparenter Lieferketten für Batterierohstoffe ermöglicht werden [Battery Pass, 2023].

Die Batterie muss nicht nur klassifiziert werden, um die weitere Wiederverwendungs-/Recyclingstrategie zu bestimmen, sondern auch um einen möglichen Transport zu Integratoren/Umwidmungsbetrieben nach geltenden Vorschriften durchzuführen. Die Gefahrgutvorschriften für den Transport von gebrauchten Traktionsbatterien können sich je nach Land unterscheiden und müssen auch über Ländergrenzen hinweg berücksichtigt werden. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal für den Transport ist der Grad der Beschädigung der Batterie. In Deutschland wird etwa zwischen kritisch und nicht kritisch beschädigten Batterien unterschieden sowie nach Batteriekapazität und Ort der Lieferung [Ziamba, 2019].

1.5.2 Batterieumwidmung und -integration

Die Batterieumwidmung hat das Ziel, die EOFL-Batterie in einen Zustand zu versetzen, in der sie in einer weiteren Anwendung eingesetzt werden kann. Folgende Akteure können dabei in die Wertschöpfungskette involviert sein: OEM, Händler/Vermittler von Traktionsbatterien, Second-Life-Integratoren und -Umwidmungsbetriebe sowie Testingunternehmen.

Umwidmungsbetriebe erhalten EOFL-Batterien aktuell entweder direkt von Automobil-OEM durch Rahmenverträge oder durch Vermittler, die verschiedene Batterietypen in einer Art B2B-Marktplattform anbieten. Es werden sowohl Batteriemodule als auch Batteriepacks angeboten, Zellen werden in aktuellen Projekten nicht umgewidmet [P3 Interview – Marktplattformanbieter, 2023].

Bei der Handhabung der Batterien ist im Betrieb Vorsicht geboten, um Schäden durch Stöße oder Stürze zu vermeiden [Becker, 2019]. Um mögliche Transportschäden frühzeitig zu entdecken, wird nach der Anlieferung der Batterien im Betrieb eine Sichtkontrolle durchgeführt.

Im Anschluss an die visuelle Begutachtung folgt die detaillierte Analyse der Batterie. Dazu werden alle zur Verfügung stehenden Daten aus bereits durchgeführten Tests genutzt, um eine eventuelle Nichteignung zur Weiterverwendung möglichst

frühzeitig im Prozess auszuschließen. Im Fall schlechter Informationslage oder nicht aussagekräftiger Tests kann es notwendig sein, spezielle elektrische Tests nachzuholen [P3 Interview – Second-Life-Akteur 1, 2023] P3 (2023): Experteninterview mit Second-Life-Akteur 1.

Für die Weiterverwendung der Batterie in Second-Life-Anwendungen kommt die Nutzung sowohl ausschließlich von Modulen als auch von ganzen Packs in Betracht. Sollen Module verwendet werden, müssen diese gegebenenfalls erst aus den Batteriepacks durch qualifizierte Mitarbeitende demontiert werden, wenn dies noch nicht im Schritt der Batterierücknahme erfolgt ist. Erste automatische Demontagelinien befinden sich zurzeit ebenfalls in der Erprobung [Comau, 2023].

Der eigentliche Umwidmungsprozess wird durch einen Charakterisierungs- und Sortierungsprozess eingeleitet, der das Ziel hat, möglichst gleiche Batteriemodule oder Packs zu identifizieren, um diese dann in eine Anwendung integrieren zu können. Werden Batterien mit gleichen Eigenschaften wie Lebensdauer, SOH, interne Impedanz oder auch Batteriegeneration gewählt, wird die Gefahr verringert, dass ein einzelnes Modul oder Pack die Leistung des gesamten Systems negativ beeinflusst [Becker, 2019].

Die weiteren Prozesse sind abhängig von der Wahl des Batterielevels für die Integration (Batteriemodul, Batteriepack). Beide Varianten haben dabei sowohl Vor- als auch Nachteile: Module ermöglichen eine Speicherkonzeption, in der kleinere Einheiten im Fall eines Defekts ausgetauscht werden können und flexiblere Lösungen in Bezug auf den Platzbedarf und die Kühlung möglich sind. Allerdings entsteht dadurch ein größerer Integrationsaufwand, da alle Module einzeln verschaltet werden müssen und mit zusätzlicher Kühlung ausgestattet werden. Außerdem muss ein neues BMS entwickelt und mit den Modulen verschaltet werden. Diese Aufwände verursachen zusätzliche Kosten, die bei der Integration ganzer Packs minimiert werden.

Für die Packintegration kann das im Fahrzeug verwendete BMS weiterverwendet werden, außerdem kann die im Pack integrierte Kühlung genutzt werden [Montes, 2022]. Allerdings reicht für einige Anwendungen mit hoher Belastung die interne Packkühlung nicht aus, sodass zusätzliche Kühlkomponenten installiert werden können [P3 Interview – Second-Life-Akteur 2, 2023].

Nach passender Wahl der Peripheriekomponenten werden die Batterien in die Second-Life-Anwendung verbaut und verschal-

tet. Das Thermalsystem sowie zusätzliche Sicherheitsmechanismen wie Sensoren und Brandschutzkomponenten werden integriert und das Batteriesystem wird mit Leistungselektronik, Umrichtertechnologie und Schaltelektronik ausgestattet. Ein Energiemanagementsystem wird eingebaut, um die Kommunikation zwischen BMS und Umrichter sicherzustellen [Montes, 2022].

Anschließend an die Montage werden alle Komponenten konfiguriert und das Batteriesystem wird getestet. Vor dem Inverkehrbringen muss das System zertifiziert werden. Stationäre Batteriespeicher müssen etwa die Elektrizitätssicherheitsrichtlinien wie elektromagnetische Verträglichkeit und Energy-Identification-Code(EIC)- Richtlinien erfüllen (EIC 62619). Zudem werden die Systeme auf ihre funktionale und elektrische Sicherheit geprüft. Nach bestandener Prüfung ist die Second-Life-Anwendung einsatzbereit [P3 Interview – Second-Life-Akteur 1, 2023].

1.6 Chancen und Herausforderungen von Second-Life

Das Second-Life von Traktionsbatterien wird in der Industrie wie auch der Wissenschaft kontrovers diskutiert. Die hohe Unsicherheit ist unter anderem darin begründet, dass aktuell wenige Batterien ihr EOFL erreichen, sich viele Second-Life-Aktivitäten noch in der Pilotphase befinden, Geschäftsmodelle sich entwickeln müssen und Veränderungen im Recycling die gesamte Kreislaufwirtschaft beeinflussen können. Nachfolgend werden daher sowohl die Chancen als auch die Herausforderungen von Second-Life diskutiert und dazu geclustert [Kampker, 2023].

1.6.1 EOL, Sammlung und Transport der Batterie

Durch die erweiterte Nutzung der Traktionsbatterie wird die Lebensdauer der Batterie verlängert und kosten- sowie ökologisch intensive Prozesse aus der Batterieproduktion vermieden. So entstehen bei der Zellherstellung von Lithiumeisenphosphat-Batterien (LFP) in Europa ca. 29 kg CO₂e/kWh und ca. 54 kg CO₂e/kWh für Nickel-Mangan-Kobalt-Batterien (NMC), die durch die Umwidmung zur Second-Life-Anwendung vermieden werden (siehe Kapitel 2.3.2). Durch die Weiternutzung der Batterie werden Ressourcen effizienter genutzt und Umweltauswirkungen der Batterieproduktion vermieden.

CO₂-Äquivalente (CO₂e) umfassen verschiedene Treibhausgase, darunter Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O), Schwefelhexafluorid (SF₆) und Fluorkohlenwasserstoffe (FKW). Diese Gase werden aufgrund ihrer unterschiedlichen globalen Erwärmungspotenziale in CO₂-Äquivalente umgerechnet, um einen einheitlichen Vergleich ihres Klimaeffekts zu ermöglichen [Shine, Keith P., et al., 2005].

Aufgrund der erwarteten langen Lebensdauer von Traktionsbatterien ist das prognostizierte Volumen an Batterien am Ende ihrer ersten Lebensdauer (EOFL) mittelfristig begrenzt und wird voraussichtlich erst ab etwa 2030 deutlich ansteigen. Diese Unsicherheit in Bezug auf zukünftige EOFL-Volumina stellt Second-Life-Betriebe vor Herausforderungen hinsichtlich der Planung und Skalierung ihrer Geschäftsmodelle [Gunther, 2022; National Grid Group, 2022].

Zusätzliche Unsicherheit besteht darüber, mit welchem SOH zukünftig Batterien ihr EOFL im Fahrzeug erreichen und für eine Second-Life-Anwendung zur Verfügung ständen. Obwohl OEM in ihren Garantiebedingungen einen SOH von 70–80% festlegen, muss zu diesem Zeitpunkt noch nicht der EOFL der Batterie erreicht sein. Der EOFL wird maßgeblich durch die verbleibende maximale Restreichweite des Fahrzeugs und damit den persönlichen Bedürfnissen des Fahrzeughalters bestimmt.

Weiterhin fehlt es an Expertise mit älteren EOFL-Batterien und geringerem SOH in Second-Life-Anwendungen, da aktuelle Second-Life-Projekte ihre Batterien nach Angaben von Branchenexperten hauptsächlich aus Versuchs- und Testfahrzeugen sowie Produktionsausschuss beziehen [P3 Interview – OEM, 2023; P3 Interview – Energieversorger, 2023]. Dies führt dazu, dass viele Batterien mit einem hohen SOH in Second-Life-Anwendungen wiederverwendet werden. Expert:innen zufolge sind Batterien mit einem SOH von unter 50% nicht mehr für Second-Life-Anwendungen geeignet und werden recycelt [P3 Interview – OEM, 2023; P3 Interview – Energieversorger, 2023; P3 Interview – Marktplattformanbieter, 2023; Cready, 2003].

Eine große Herausforderung sowohl für First-Life als auch für Second-Life-Batterien ist die Lebensdauerprognose. Ab einem gewissen Zeitpunkt zeigt sich eine beschleunigte, nichtlineare Alterung der Fahrzeugbatterie, was auch die Vorhersage des weiteren Alterungsverhaltens erschwert [Neubauer, 2015]. Die Ursache hierfür ist, dass die Batteriealterung stark zwischen

Batteriesystemen variiert, da Einflussfaktoren wie Temperatur und individuelles Belastungsprofil auf das System einwirken. Daher gibt es Batterien, die selbst bei einem SOH unter 70% ohne beschleunigte Alterung weiterhin funktionieren können. Dies erschwert die Prognose der verbleibenden Lebensdauer des Batteriesystems, selbst wenn der SOH bekannt ist. Statistische Analysen auf Basis von Felddaten könnten in dieser Hinsicht dazu beitragen, Entscheidungen über die weitere Nutzung gealterter Batterien zu treffen.

Die Demontage des Batteriepacks aus dem Fahrzeug wird durch neue Batteriedesigns und Konzepte wie „Cell-to-Pack“ oder „Cell-to-Chassis“ erschwert, außerdem gibt es bislang kein standardisiertes Demontagekonzept, sodass die Arbeiten nur manuell und nur mit qualifiziertem Personal durchgeführt werden können [Kelly, 2020].

Gebrauchte Traktionsbatterien unterliegen außerdem verschärften Transportbedingungen und Regularien, sodass dafür geschultes Personal sowie spezielle Einsatzmittel wie Transportvorrichtungen und Fahrzeuge benötigt werden [Olsson, 2018].

1.6.2 Zustandsanalyse der Batterie

Wesentliche Herausforderungen bestehen aktuell in der Zustandsanalyse und Bestimmung wesentlicher Merkmale der Batterien. Zunächst müssen Batterien identifiziert werden, dazu gibt es aktuell keine standardisierten Konzepte und Vorgehensweisen und keine automatisierten Prozesse, sodass die Prozesszeit lang sein kann [Becker, 2019; Nigl, 2021].

Die Transparenz von Daten des Batteriesystems gegenüber dem Kunden ist laut Expert:innen ausbaufähig [P3 Interview – Energieversorger, 2023]. Vor allem der Zugriff auf Daten des BMS ist manchen Unternehmen verwehrt oder es werden nicht alle Daten geteilt.

Um die Eignung der Batterien für ein Second-Life festzustellen, müssen zurzeit aufwendige Tests durchgeführt werden. Für die Preisgestaltung, die Integration der Batterien in das System und die Lebensdauerprognose ist unter anderem der SOH von Bedeutung. Die SOH-Bestimmung an sich ist aufgrund unterschiedlicher Batteriedesigns und -typen individuell auf die jeweilige Batterie abzustimmen, wodurch der Testingaufwand zunimmt, sobald mehr als ein Batteriemodell in Umwidmungsbetrieben verarbeitet wird [Casals, 2016; Haram, 2021]. Abhängig von der angewendeten Testmethode variiert der er-

forderliche Zeitaufwand zur Bestimmung des Zustands des Energiespeichers erheblich; dies illustriert die Dringlichkeit von schnelleren Testverfahren [Groenewald, 2017]. Außerdem sind das erforderliche Testequipment und die fachliche Expertise vor allem bei Demontagebetrieben, Werkstätten und Recyclingunternehmen noch nicht (vollständig) vorhanden [Ahmadi, 2017; Cimprich, 2015].

Um die Lebensdauer der Batterie zu prognostizieren, müsste auch die Historie der Batterie bekannt sein, um Batteriedefekte etwa aus Fahrzeugkollisionen einfließen zu lassen. Da der Zugriff auf diese historischen Daten momentan nicht vorhanden ist oder die Daten nicht gesammelt werden, ist die Lebensdauerprognose der Batterie herausfordernd und die Nutzung der Second-Life-Batterie mit Unsicherheiten behaftet [Catton, 2017].

Verbesserungen in der Datenanalyse mittels künstlicher Intelligenz (KI) in Verbindung mit dem Batteriepass, der ab 2027 in der EU eingeführt wird, können den Evaluierungsprozess der Batterie beschleunigen und zukünftig zu mehr Transparenz führen [Hua, 2021; Neubauer, 2015].

Neben den Daten der Batterie sind auch die spezifischen Anforderungen und Belastungen der Second-Life-Anwendung für einen erfolgreichen Betrieb und eine Lebensdauerprognose erforderlich, da durch unterschiedliche Lastprofile in den jeweiligen Second-Life-Anwendungen die Batterien unterschiedlich altern [Elkind, 2014]. Dieses spezifische Verhalten der Batterien kann zwar ansatzweise abgeschätzt werden, muss in der Praxis aber erst durch (Pilot-)Projekte evaluiert werden [Becker, 2019]. Für die zukünftige Nutzung von Second-Life-Anwendungen könnten damit Unternehmen im Vorteil sein, die bereits Second-Life-Pilotprojekt-Expertise vorweisen und Erfahrungen aus First-Life-Anwendungen sammeln konnten.

1.6.3 Umwidmung und Integration

Der Aufwand für Umwidmung und Integration variiert je nach Art der Second-Life-Anwendung, der gewählten Integrationsstrategie und des Designs des Batteriepacks. Eine umfassende Standardisierung in diesem Bereich ist bisher nur begrenzt vorhanden [Wrålsen, 2021; Abdel-Monem, 2017].

Aufgrund der starken Varianz in den Batteriepackdesigns, den Verkabelungen und den Modulkonzepten erfolgt der Demontageprozess größtenteils manuell, was zu zusätzlichen Personalkosten führt. Diese Kosten variieren je nach Land und dem

Aufwand der Demontage und können die Profitabilität des Betriebs erheblich beeinflussen [Rallo, 2020; Nigl, 2021]. Die Automatisierung dieses Demontageprozesses bedingt erhebliche Investitionen und spezifische Anpassungen für jeden Batterietyp, solange keine standardisierten Batteriedesigns etabliert sind [Olsson, 2018; Nigl, 2021; Catton, 2017]. Neben dem Demontageprozess ist auch die Integration von Second-Life-Batterien selbst herausfordernd, da einzelne Batteriepacks oder -module in Bezug auf ihren SOH aufeinander abgestimmt sein müssen, um ausreichend Leistung und eine lange Lebensdauer zur Verfügung zu stellen [Kelly, 2020]. Dabei beeinflusst die schwächste Batterie das gesamte System [P3 Interview – Second-Life-Akteur 2, 2023].

Werden Batteriemodule in der Second-Life-Anwendung genutzt oder der Zugriff auf das vorhandene OEM-BMS ist nicht vorhanden, muss ein eigenes BMS entwickelt werden [Kelly, 2020]. Dieser zusätzliche Entwicklungsaufwand verursacht höhere Aufwände und Kosten und kann vermieden werden, wenn gesamte Packs inklusive der vorhandenen BMS genutzt werden. In allen Fällen (auch First-Life-Anwendungen) muss jedenfalls ein Energiemanagementsystem implementiert werden, das die Kommunikation mit dem BMS und dem Umrichter sicherstellt [Montes, 2022].

1.6.4 Rentabilität

Die Zweitnutzung führt zu neuen Geschäftsmodellen, die gleichzeitig allerdings mit dem Recycling, First-Life-Batterien und anderen Substituten konkurrieren.

Der Recyclingwert einer Traktionsbatterie ist stark abhängig von der chemischen Zusammensetzung sowie dem Industrialisierungsgrad von Recyclingprozessen selbst. Recyclinganlagen befinden sich momentan im Aufbau, außerdem fehlt es bislang an Recyclingvolumen aus EOL-Batterien und der Großteil des Materials setzt sich aus Produktionsausschüssen zusammen. Dies führt dazu, dass momentan Batterieeigentümer für das Recycling (zum Teil) zahlen. Mit zunehmender Industrialisierung und Auslastung der Recyclinganlagen, stärkerem Wettbewerb und zunehmender Regulatorik wird erwartet, dass zukünftig der Recyclingwert positiv wird und so mit dem Geschäftsmodell von Second-Life-Anwendungen konkurrieren kann.

Steigende Rohmaterialpreise und damit erhöhte Batterieproduktionskosten könnten Second-Life-Batterien attraktiver gegenüber First-Life machen. Allerdings konkurrieren bei hohen Rohmaterialpreisen EOL-Batterien mit dem Recycling. Die

Notwendigkeit, recycelte Rohmaterialien in zukünftigen Batterieproduktionen einzusetzen, wie von der EU vorgesehen, könnte den Effekt hin zu Recycling verstärken und sogar dazu führen, dass Rezyklate einen höheren Wert als Primärrohstoffe aufweisen [P3 Interview – OEM, 2023]. Second-Life-Anwendungen könnten damit kurzfristig als „Rohstofflager“ dienen, solange Recyclingprozesse noch nicht skaliert sind [P3 Interview – OEM, 2023].

Während EOFL-Batterien für den Second-Life-Einsatz in Zukunft 10–20 Jahre im Fahrzeug verbracht haben können, müssen sich diese Batterien gegenüber neuen First-Life-Batterien mit weiterentwickelter Technologie durchsetzen können. Zusätzliche Aufwände für EOFL-Batterien entstehen durch das Testing und eventuelle Umwidmungsprozesse, die dazu führen können, dass der Second-Life-Batterie-Business-Case unattraktiv wird [Haram, 2021].

Die Rentabilität von Second-Life-Systemen wird im Betrieb außerdem durch Aufwände im Service und Maintenance gesenkt, da die Chance für Ausfälle einzelner Batterien im Second-Life erhöht ist [Becker, 2019]. Zudem gehen Nutzer von Second-Life-Systemen im Vergleich zu First-Life ein höheres Risiko ein, was die Zahlungsbereitschaft gegenüber Second-Life-Systemen senken kann [Wu, 2020]. Diese Effekte führen dazu, dass ausreichend hohe Produktgarantien gewährt werden müssen, um Second-Life-Anwendungen als attraktive Lösung zu vermarkten [Becker, 2019].

1.6.5 Rechtlicher Rahmen

Bisherige Unsicherheiten gegenüber Second-Life-Anwendungen wurden bislang auch mit fehlender Regulierung und fehlendem rechtlichen Rahmen begründet. In der neuen Verordnung über Batterien und Altbatterien der EU, auf die sich das Europäische Parlament und der Rat im Juli 2023 geeinigt haben, werden Second-Life-Anwendungen explizit genannt und es wird zwischen Altbatterie (Batterie, die Abfall ist) und Batterie zur Wiederverwendung unterschieden [Europäisches Parlament, 2023]. Durch die erweiterte Herstellerverantwortung wird die Obliegenheit des Batterierecyclings inkl. entstehender Kosten dem Inverkehrbringer des Second-Life-Systems zugeschrieben, allerdings werden Haftungsfragen nicht geklärt, wodurch in der Vergangenheit EOL-Batterien durch OEM nicht für Second-Life-Anwendungen durch Dritte freigegeben wurden und nur dem OEM bestimmt war, die Second-Life-Anwendung zu betreiben [P3 Interview – OEM, 2023; Catton, 2017; Europäisches Parlament, 2023].

Aufgrund des Mangels an historischen Statistiken zu Second-Life-Anwendungen gestaltet sich die Versicherung dieser Produkte als problematisch, da Versicherungsunternehmen das Risiko nicht angemessen beurteilen können [Catton, 2017]. Zudem beeinflussen negative Vorkommnisse in Second-Life-Anwendungen die zukünftigen Versicherungsprämien [P3 Interview – Second-Life-Akteur 2, 2023]. Zusätzlich können bestehende Vorschriften von Stromversorgungsunternehmen und Bedenken hinsichtlich der Brandsicherheit und negativer Eigenschaften die Wiederverwendung von EOL-Batterien behindern [Elkind, 2014; Jiao, 2018]. Zudem stoßen Bestrebungen zur Integration von Second-Life-Batterien in kritischen Infrastrukturen bei Stromversorgungsunternehmen auf Widerstand [P3 Interview – Energieversorger, 2023]. Auch die Datenverwendung aus dem First-Life kann zukünftig zu Datenschutzbedenken führen, die noch nicht vollumfänglich geklärt sind und mit dem Batteriepass diskutiert werden sollten [Nigl, 2021].

1.6.6 Weitere Chancen und Risiken

In der zweiten Phase ihres Lebenszyklus sind Traktionsbatterien verschiedenen Herausforderungen ausgesetzt, darunter auch Sicherheitsaspekten. Neue Lithium-Ionen-Batterien durchlaufen umfassende Sicherheitstests, um mögliche Risiken zu minimieren, bevor sie in ihren vorgesehenen Anwendungen eingesetzt werden [Chen, 2021]. In ihrer zweiten Lebensphase ergeben sich jedoch zusätzliche Sicherheitsfragen, da diese Batterien nicht mehr in der ursprünglichen Anwendung genutzt werden, für die sie entwickelt wurden. Zudem neigen gebrauchte Batterien aufgrund möglicher kleinerer Defekte im Inneren tendenziell zu erhöhten Sicherheitsrisiken im Vergleich zu neuen Batterien [Ziegler, 2020]. Da Second-Life-Batterien jedoch hauptsächlich in stationären Speichersystemen verwendet werden, in denen die Anforderungen geringer sind als bei Elektrofahrzeugen, dürften große Sicherheitsprobleme eher die Ausnahme sein und durch entsprechende Analytik frühzeitig erkannt werden. Ein Monitoring einzelner Zellen hilft, überbeanspruchte Batterien frühzeitig zu identifizieren und zu tauschen [P3 Interview – Second-Life-Akteur 2, 2023]. Dennoch bleibt die Notwendigkeit von Sicherheitstests für EOL-Batterien dringend bestehen [Börner, 2022]. Wie bereits in den vorherigen Abschnitten betont wurde, besteht ein dringender Bedarf an mehr experimentellen Daten, um die industrielle Anwendbarkeit von Second-Life-Batterien zu bewerten. Das Fehlen dieser Daten stellt eine Herausforderung dar, da es die genaue Vorhersage der Batterielebensdauer beeinträchtigt und somit die Festlegung von

Garantiezeiten und Batteriebesitzmodellen erschwert [Martinez-Laserna, 2018]. Die Förderung von Second-Life-Anwendungen bietet darüber hinaus die Chance, neue Technologien für spätere Anwendungen wie Vehicle-to-Grid-Lösungen zu testen und daraus wichtige Erkenntnisse zu gewinnen [P3 Interview – Second-Life-Akteur 2, 2023]. Weiterhin besteht erhebliche Unsicherheit bezüglich der Leistung von Batterien in ihrer zweiten Lebensphase sowie ihres Alterungsverhaltens [Becker, 2019; Jiao, 2018]. Fortschreitende Zellchemieentwicklungen sowie Kostenentwicklungen der Rohmaterialien und Batterien erschweren die Entwicklung von Business-Case-Modellen weiter [Olsson, 2018].

Eine weitere Herausforderung besteht in der notwendigen Koordination aller Akteure in der Lieferkette des Umwidmungsprozesses, einschließlich Automobilherstellern, Umwidmungsunternehmen, Systemintegratoren, Käufern von Second-Life-Batterien und späteren Verwertungsunternehmen. Die gemeinsame Nutzung sensibler Daten wie Batterieparametern und Nutzungsverläufen könnte hierbei eine Herausforderung darstellen [Becker, 2019]. Andererseits könnte die Zusammenarbeit zwischen OEM und Energiespeichersystemintegratoren die Entwicklung von Second-Life-Batterien durch die Schaffung tragfähiger Geschäftsmodelle fördern [Hu, 2022].

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der berücksichtigt werden sollte, ist die Verzögerung des Materialrecyclings aufgrund der Wiederverwendung von Batterien. Wenn EOFL-Batterien aus Elektrofahrzeugen für eine zusätzliche Lebensdauer von 4–20 Jahren verwendet werden, könnte dies zu einer Verknappung von Rohstoffen bzw. Rezyklat führen, das sonst durch Recycling gewonnen worden wäre [Ahmadi, 2014].

1.7 Schlussfolgerungen der bisherigen Erkenntnisse zu Second-Life-Anwendungen

Auf Basis der obenstehenden Ausführungen werden hier die Erkenntnisse zu Second-Life-Anwendungen, aktuellen Aktivitäten und Einsatzgebieten sowie deren Chancen und Risiken zusammenfassend behandelt.

Erreichen Traktionsbatterien aus Elektrofahrzeugen ihr Lebensdauerende durch erhöhten Kapazitätsverlust, aufgrund eines Fahrzeugunfalls oder Defekts, müssen sie aus dem Elektrofahrzeug demontiert werden. Neben der Reparatur der Batterie, die nicht für alle Batteriesysteme verfügbar ist, und dem Recycling, um Rohstoffe wiederzugewinnen, bietet sich das

Second-Life an, um die Lebensdauer der Batterie in anderen Anwendungen zu verlängern und gleichzeitig weiteren Umsatz zu generieren. Das Konzept der Second-Life-Anwendung wurde bereits in mehreren Pilotprojekten seit den 2010er Jahren vor allem von OEM mit ausgewählten Partnern erprobt. In den letzten Jahren sind weitere Projekte mit unterschiedlichem Anwendungskontext gestartet, außerdem wurden Start-ups gegründet, um Batteriesysteme mit Second-Life-Batterien herzustellen. Aktuell ist vor allem in Deutschland eine hohe Konzentration von Second-Life-Aktivitäten und Akteuren feststellbar. Die möglichen Anwendungen für Second-Life-Batterien sind vielfältig und versprechen vor allem in der Sekundärregelleistung steigende Renditen. Darüber hinaus können die Speicher zur Lastspitzenkappung in Industriebetrieben eingesetzt werden oder auch als Pufferspeicher in Schnellladesäulen. Je nach Anwendungsfall betragen die erwarteten Lebensdauern in der Zweitanwendung zwischen 4 und 20 Jahren.

Damit Traktionsbatterien in Second-Life-Anwendungen eingesetzt werden können, ist ein Umwidmungs- und Integrationsaufwand notwendig, der im Vergleich zu First-Life-Batterien erhöht ist. Vor allem fehlende Datentransparenz führt dazu, dass Batterien nach der Demontage aufwendig getestet werden müssen. Allerdings wird ab 2027 in der EU der Batteriepass eingeführt, mit dem entlang der gesamten Wertschöpfungskette die Informationsweitergabe vereinfacht werden soll. Weiterer Demontageaufwand kann im Umwidmungsprozess vermieden werden, wenn komplette Batteriepacks in die Second-Life-Anwendung integriert werden, anstatt einzelne Module auszubauen und miteinander zu verschalten. Eine große technische Hürde liegt darin, die einzelnen Batteriesysteme optimal aufeinander abzustimmen, damit das Gesamtsystem nicht negativ von einer einzelnen Batterie beeinflusst wird. Weitere Chancen und Risiken wurden für die Kategorien „EOL, Sammlung und Transport“, „Zustandsanalyse“, „Umwidmung und Integration“, „Rentabilität“, „Rechtlicher Rahmen“ sowie zu weiteren Aspekten diskutiert. Wesentlich beeinflusst wird das Geschäftsmodell der Second-Life-Anwendung vom Preis für Neubatterien, den Kosten für den Umwidmungsaufwand, den Recyclingkosten und dem Recyclingwert der Batterie. Auch neue EU-Regularien können dazu führen, dass die Nachfrage nach Rezyklaten zukünftig steigt und damit ein Recycling attraktiver sein wird als Second-Life. Aktuell bietet Second-Life die große Chance, neue Technologien wie Vehicle-to-Grid-Anwendungen zu testen und das Recycling zu verzögern, bis entsprechende Recyclingkapazitäten aufgebaut sind und die Recyclingkosten sinken.

2.

Wirtschaftlichkeit und CO₂-Fußabdruck

2.1 Einleitung und Vorgehen

In Kapitel 1 wurden umfassend potenzielle Anwendungen, der Umwidmungsprozess, die rechtlichen Rahmenbedingungen und die Potenziale von Second-Life-Anwendungen erörtert. Entscheidende Faktoren für die erfolgreiche Etablierung von Second-Life sind die Wirtschaftlichkeit dieser Anwendungen und die Zahlungsbereitschaft für EOFL-Batterien im Vergleich zum Recycling. Insbesondere die wachsende Bedeutung der CO₂-Emissionen stellt einen bedeutenden Treiber dar, der sowohl die Industrie als auch die politischen Entscheidungsträger beeinflussen kann.

Im vorliegenden Kapitel erfolgt zunächst eine wirtschaftliche Analyse von Second-Life-Anwendungen im Vergleich zum Recycling. Dies wird durch eine Untersuchung der Prozesskosten und EOFL-Batteriekosten und der damit zusammenhängenden Zahlungsbereitschaft der Unternehmen ermöglicht. Weiterhin werden die zu erwartenden Batteriepackkosten der Fahrzeugindustrie bis in das Jahr 2030 dargestellt und die Kosten potenzieller Second-Life-Anwendungen den Kosten der First-Life-Anwendungen gegenübergestellt. Parallel dazu wird eine eingehende Analyse der Product Carbon Footprints (PCF) von First-Life-Batteriezellen durchgeführt, um diese dann den Emissionen von Batteriezellen aus Rezyklat gegenüberzustellen. Für den Vergleich mit Second-Life-Batterien wird die Betrachtung zusätzlich auf Packebene stattfinden.

Die Ergebnisse der durchgeführten Analysen werden in Form von Diagrammen visualisiert, die, sofern nicht anders angegeben, auf Analysen von P3-Referenzkalkulationen aus der Industrie basieren. Diese Methode stellt sicher, dass die vorliegenden Erkenntnisse auf einer fundierten Datenbasis und gleichzeitig auf praxiserprobtem Fachwissen aus der Branche beruhen.

2.2 Wirtschaftliche Analyse von Second-Life und Recycling

Bei der Beurteilung der Rentabilität von Second-Life-Batterien sind mehrere Faktoren von entscheidender Bedeutung:

- Preis für neue First-Life-Batterien, der wesentlich durch Rohstoff- und Prozesskosten beeinflusst wird und mit Second-Life-Batterien konkurriert
- Preis für EOFL-Batterien, der von der Zahlungsbereitschaft von Umwidmungsbetrieben abhängt
- Umwidmungsaufwand und dessen Kosten
- Lebensdauermultiplikator, der die verkürzte Lebensdauer der Second-Life-Batterie im Vergleich zu einer neuen First-Life-Batterie berücksichtigt
- Recyclingwert, der maßgeblich von chemischen Eigenschaften, dem Industrialisierungsgrad des Recyclings und den Rohstoffpreisen abhängt

Um ein profitables Geschäftsmodell zu etablieren, muss der Preis von aufbereiteten Second-Life-Batterien innerhalb des Fensters für Second-Life, also zwischen Neupreis und Recyclingwert von Batterien, liegen, da ansonsten ein Scheitern des Vorhabens droht und die alternativen Optionen aus wirtschaftlicher Perspektive attraktiver sind. Eine zu geringe Differenzierung zu First-Life-Batterien oder dem Recyclingwert würde den Mehraufwand für die Umwidmung nicht rechtfertigen.

Die grafische Darstellung dieses Preisfensters für Second-Life-Batterien findet sich in Abbildung 7. Es ist anzumerken, dass die Preise von First-Life-Batterien voraussichtlich durch Verbesserungen in der Zellchemie, kostenorientiertes Design und Produktionsprozessoptimierungen sinken werden. Parallel dazu wird der Recyclingwert in den kommenden Jahren aufgrund der Prozessindustrialisierung bei den Recyclingunternehmen

und der Zunahme rückgeführter Mengen positiv beeinflusst. Infolgedessen wird das Fenster für die Preisgestaltung von Second-Life-Batterien tendenziell kleiner. Diese Studie präsentiert sowohl verschiedene Recyclingbeispiele als auch wirtschaftliche Analysen für First- und Second-Life-Batterien und -Anwendungen. Das Fenster für Second-Life-Batterien wird anhand eines Großspeichers für stationäre Anwendungen mit umgewidmeten Automobil-Batteriepacks illustriert.

2.2.1 Recycling

Im vorliegenden Kapitel erfolgt zunächst eine detaillierte Analyse der Kosten zweier unterschiedlicher Recyclingprozesse, einschließlich einer Allokation auf die zurückgewinnbaren

Metalle. Anschließend wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den maximalen Preis zu ermitteln, den Recycler für EOL-Module zahlen können, damit ihr Geschäft weiterhin wirtschaftlich betrieben werden kann. Es ist wichtig zu betonen, dass der ermittelte Preis lediglich für dieses spezifische Szenario und unter den getroffenen Annahmen Gültigkeit besitzt.

Die untersuchten Prozesse werden wie folgt definiert: Der „Mech + Hydro“-Prozess (Mech = mechanisch, Hydro = hydrometallurgisch) beginnt mit Demontage, Tests und Entladung der Module, gefolgt von einem Schredderprozess und anschließender mechanischer Separierung. Die hydrometallurgische Aufbereitung, ein chemischer Prozess, löst das gesamte Ma-

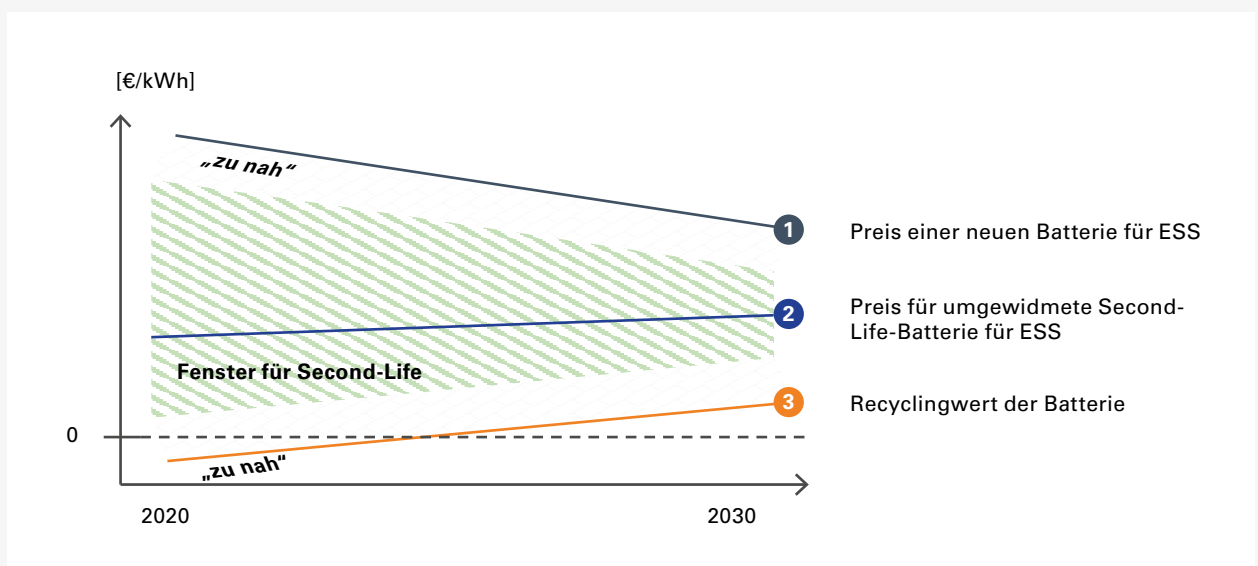


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Fensters für Second-Life-Batterien

Quelle: |eigene Darstellung|

material auf und trennt die wertvollen Metalle mittels Extraktion und Fällungsprozessen bei verschiedenen pH-Werten voneinander. Im Gegensatz dazu unterscheidet sich der „Pyro + Mech + Hydro“-Prozess (Pyro = pyrometallurgisch) durch eine Pyrolyse nach der Entladung, wodurch Elektrolyt und Kunststoffkomponenten verbrannt werden. Die Kosten wurden bottom-up für Europa im Jahr 2030 berechnet und sind in Abbildung 8 dargestellt. Die zugrunde liegenden Annahmen sind in Tabelle 3 im Anhang aufgeführt.

Beide Prozesse verursachen Prozesskosten von etwa 2,50 €/kg Input Material, wobei der wesentliche Unterschied darin liegt, dass der „Pyro + Mech + Hydro“-Prozess zusätzliche Kosten für die Pyrolyse aufweist. Diese werden jedoch durch die vereinfachte mechanische Separierung im Vergleich zum „Mech + Hydro“-Prozess kompensiert. Trotzdem bleibt die hydrometallurgische Verarbeitung in beiden Prozessen der Hauptkostentreiber, da beträchtliche Mengen an Chemikalien und Energie für die Heiz- und Kühlprozesse erforderlich sind. Die Ausbringungsmenge variiert jedoch zwischen den beiden

Prozessen, wobei beim „Mech + Hydro“-Prozess etwa 70% der Inputmenge zurückgewonnen werden können und beim Prozess mit Pyrolyse nur ~50%. Dies führt dazu, dass die Kosten für den „Pyro + Mech + Hydro“-Prozess bezogen auf die Ausbringungsmenge höher ausfallen.

Im nachfolgenden Schritt erfolgte unter Berücksichtigung der Prozesskosten pro Kilogramm Output sowie der Kosten für EOL-Module eine Allokation der Gesamtkosten auf die zurückgewonnenen Metalle. Die Modulkosten wurden im Modell mit etwa 30% des enthaltenen Metallwerts (Payable) angesetzt, wobei dieser Wert in der Industrie von 20% bis weit über 40% variiert. Die Festlegung des Payable hängt maßgeblich von der Qualität der zu recycelnden Materialien ab. Ein höherer Anteil des Metallwerts wird beispielsweise für Kathodenaktivmaterial-Ausschuss oder Elektrodenabfälle gezahlt im Vergleich zu ganzen Modulen oder Packs, da der Recyclingaufwand in diesen Fällen höher ist.

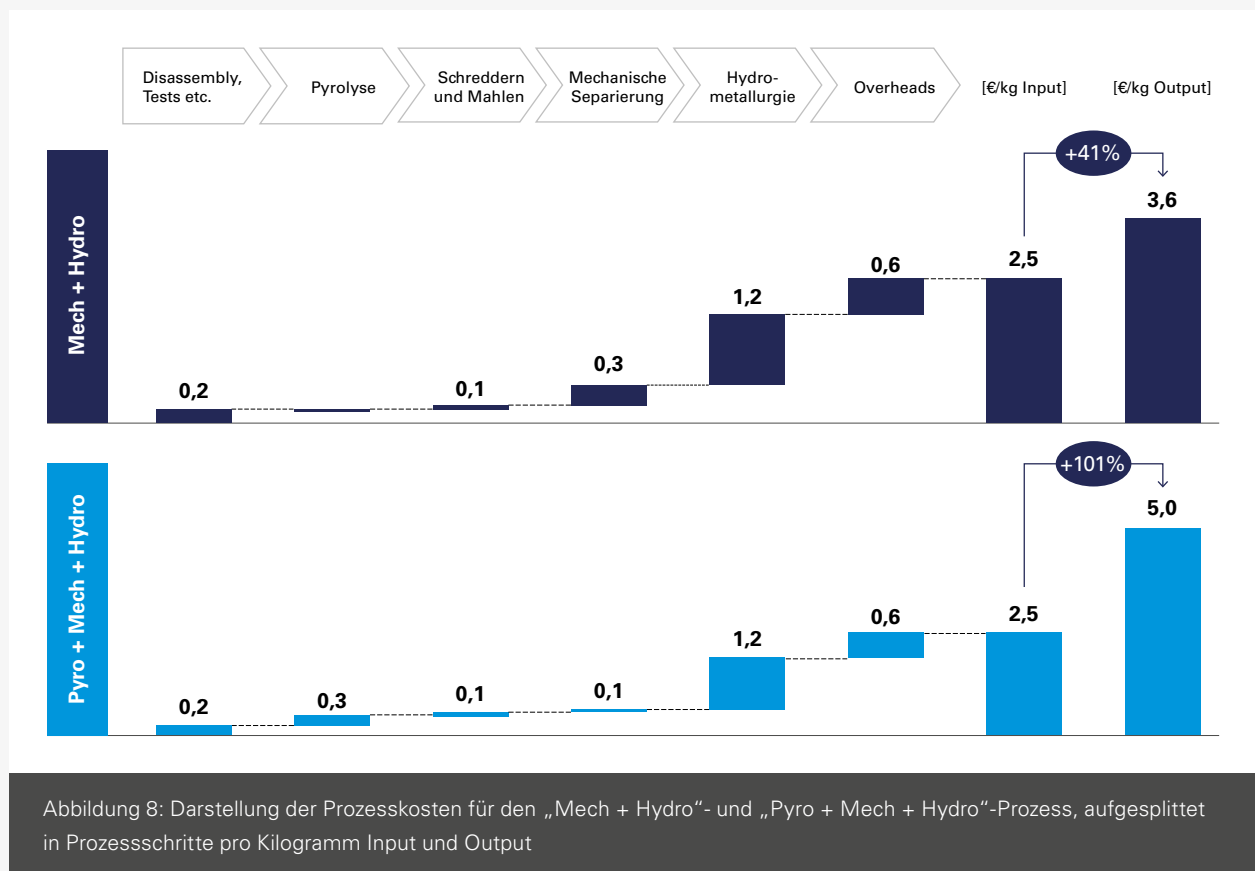


Abbildung 8: Darstellung der Prozesskosten für den „Mech + Hydro“- und „Pyro + Mech + Hydro“-Prozess, aufgesplittet in Prozessschritte pro Kilogramm Input und Output

Metall-Payable bezieht sich darauf, wie viel Prozent des enthaltenen Metallwertes bezahlt werden. In der Rohstoffindustrie, beispielsweise bei Zwischenprodukten für Batteriematerialien wie Mischmetallhydroxid-Feststoffen (Mischung aus Nickel, Kobalt und anderen Metallen), wird der Metall-Payable verwendet, um den Preis basierend auf den enthaltenen Metallen zu berechnen. Analog wird er verwendet, um den Preis von EOL-Batterien und Abfall aus der Batterieproduktion für Recycler zu bestimmen. Dieser Prozentsatz, multipliziert mit der Menge und dem Wert der spezifischen Metalle, bestimmt den Verkaufspreis und orientiert sich an den Marktpreisen für diese Materialien. [Vaughan, J., et al., 2013]

Abbildung 9 präsentiert eine Auswahl relevanter Materialien für die Aktivmaterialien in den Zellen, wobei zu beachten ist, dass aktuell Graphit noch nicht in Batteriequalität zurückgewonnen werden kann [Jegan Roy, Joseph, et al., 2023]. Auf Grundlage des ökonomischen Werts der zurückgewinnbaren Materialien und der Ausbringungsmenge wurden Faktoren abgeleitet, um die Prozesskosten und EOL-Modulkosten auf die Metalle umzurechnen. Es ist anzumerken, dass diese Umrechnung auf dem jeweiligen ökonomischen Wert der Metalle basiert und somit eine differenzierte Kostenallokation ermöglicht.

Um eine Vergleichbarkeit mit den Kosten von Batterien in €/kWh herzustellen, ist es erforderlich, die Recyclingkosten und den Recyclingwert in diese Einheit zu übertragen. Hierbei wird zunächst von den Kosten pro Kilogramm Input ausgegangen, da diese basierend auf der Bill-of-Materials (Stückliste, die die Zusammensetzung der EOL-Module wiedergibt) der zu recycelnden Module und dem darin enthaltenen Aktivmaterial in Kilowattstunden umgerechnet werden können. Im vorliegenden Fall handelt es sich um NMCA-Module mit einem Energiegehalt von ~0,26 kWh/kg.

Diesem Wert wird der Metallwert der zurückgewinnbaren Metalle gegenübergestellt. Aus der Differenz ergibt sich der Recyclingwert. Abbildung 10 veranschaulicht beispielhaft die Zusammensetzung des Recyclingwerts für das Jahr 2030 für den „Mech + Hydro“-Prozess. Dieser setzt sich wie folgt zusammen: Die Kosten belaufen sich auf ~18 €/kWh, während der Metallwert ~23 €/kWh entspricht, wodurch ein positiver Recyclingwert von ~5 €/kWh erzielt werden kann. Zur Vereinfachung und aufgrund schwer vorhersehbarer Preisschwankungen der Metalle wurden die Werte von 2023 konstant bis in das Jahr 2030 angenommen. Die zugrunde liegenden Annahmen zu den Metallpreisen können Tabelle 4 im Anhang entnommen werden.

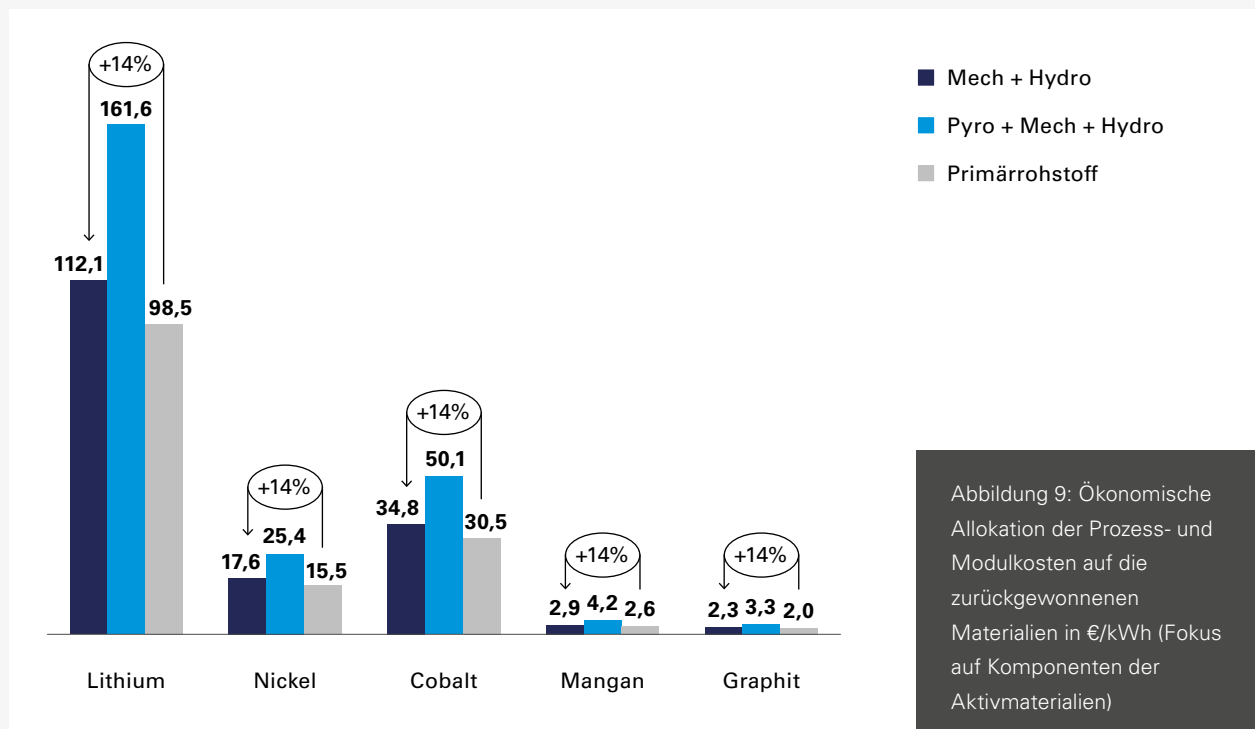
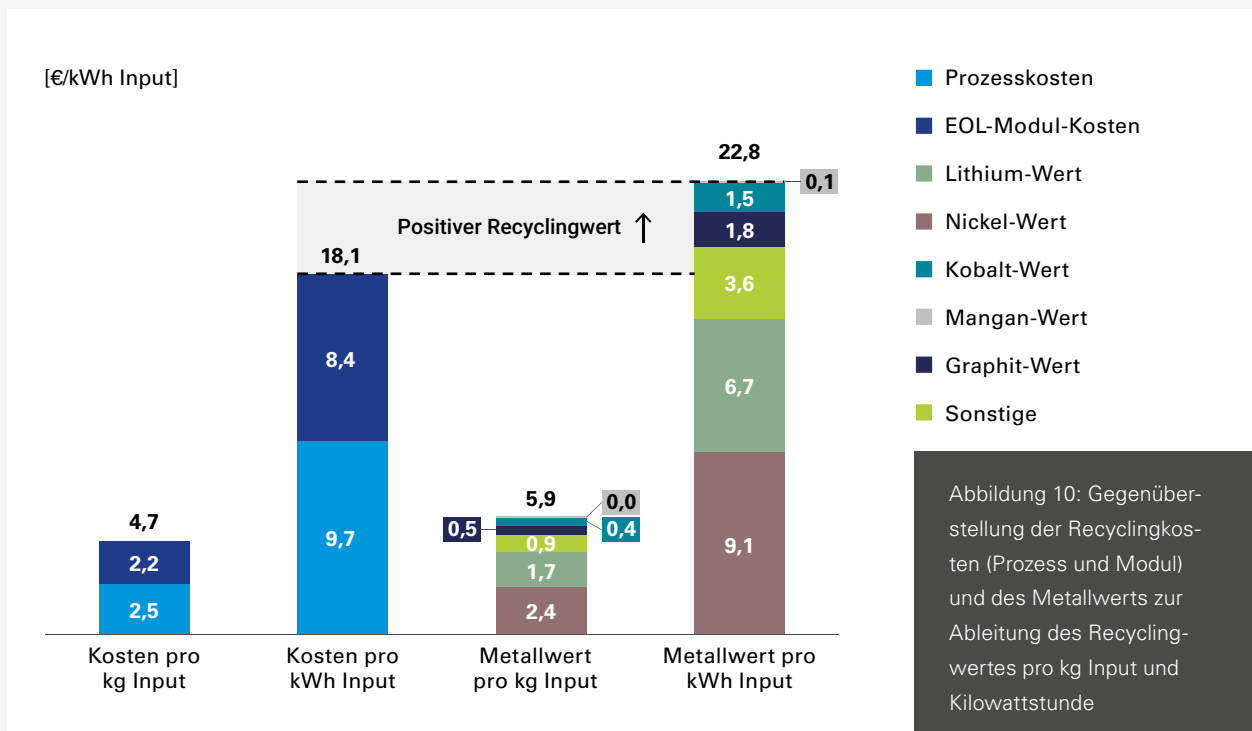


Abbildung 9: Ökonomische Allokation der Prozess- und Modulkosten auf die zurückgewonnenen Materialien in €/kWh (Fokus auf Komponenten der Aktivmaterialien)



Der maximale Preis, den der Recycler unter den hier getroffenen Annahmen bereit ist, für die EOL-Module zu zahlen, kann mittels einer Sensitivitätsanalyse ermittelt werden. Im Referenzbeispiel wurden 30% des Metallwerts (2,20 €/kg, 8,40 €/kWh) als Payable angesetzt, wodurch ein positiver Recyclingwert entsteht (siehe 1 in Abbildung 11). Mit steigendem Metall-Payable erhöhen sich jedoch die Gesamtkosten des Recyclers. Dies führt dazu, dass der Wert der zurückgewinnbaren Metalle bei einem Payable von etwa 46% überschritten wird. Infolgedessen würden in dem gewählten Szenario und bei den ermittelten Kosten niemals mehr als diese 46% als Zahlungsbereitschaft des Recyclers erwartet werden (siehe 3 in Abbildung 11). Im Gegensatz dazu könnte die tatsächliche Zahlungsbereitschaft des Recyclers sogar etwas darunter liegen, da sich der Aufwand für den Recyclingprozess sonst nicht wirtschaftlich lohnen würde (siehe 2 in Abbildung 11). Dies verdeutlicht, dass die Festlegung des maximalen Zahlungspreises im Rahmen einer Analyse der spezifischen Prozesskosten und des angestrebten Gewinns ermittelt werden kann.

Das Recycling von Lithiumeisenphosphat (LFP) ist grundsätzlich machbar und es sind Verfahren entstanden, die das selektive Herauslösen von Lithium aus LFP erlauben, was durch wissenschaftliche Arbeiten und Patente belegt ist [Wang, Mengmeng, et al., 2022; Schurmans, M., und B. Thijs, 2021]. Jedoch wird das Recycling von LFP mit einem hohen negativen Recyclingwert von -10 bis -30 USD/kWh nicht als wirtschaftlich erachtet [Lander, Laura, et al., 2021], was daran liegt, dass zum einen die Energiedichte von LFP gering ist und zum anderen lediglich Lithium einen nennenswerten Metallwert aufweisen kann. Aus diesem Grund wird das Recycling von LFP-Batterien nicht weiter betrachtet. Für die wirtschaftliche Verwendung von LFP-Batterien in Second-Life-Anwendungen kann ein negativer Recyclingwert einen positiven Einfluss haben, da in diesem Fall eine Umwidmung der EOFL-Batterie gegenüber dem Recycling wirtschaftlich vorteilhafter sein kann.

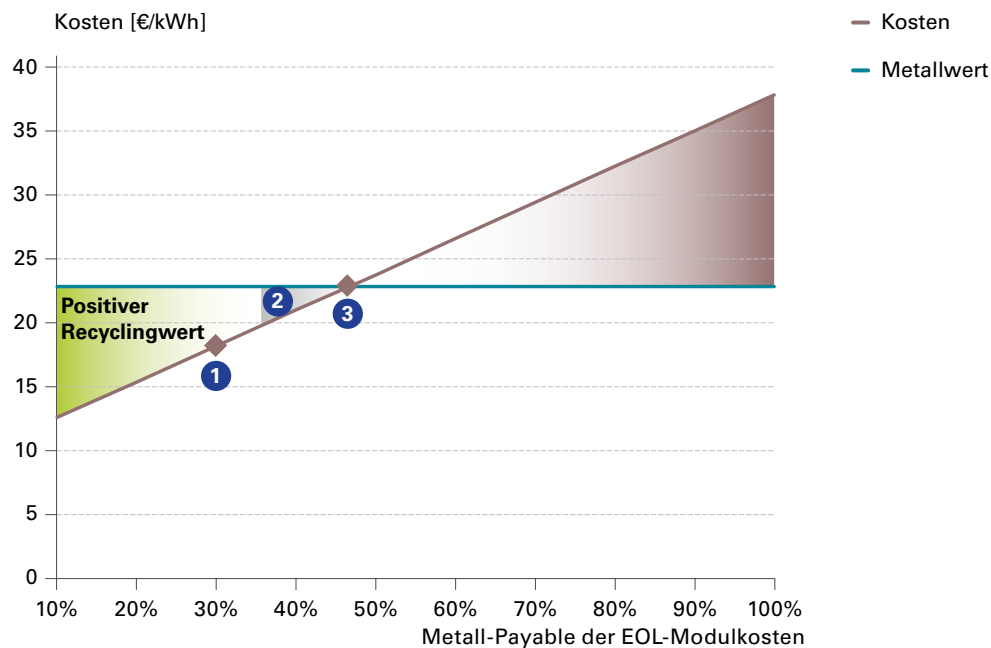


Abbildung 11: Sensitivitätsanalyse zur Ermittlung des Break-even-Punktes für die Modulkosten für den definierten „Mech + Hydro“-Recyclingprozess

Quelle: [eigene Darstellung]

2.2.2 Preisgestaltung für EOFL-Batterien und Preise für Second-Life-Anwendungen

Der Preis für EOFL-Batterien wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Dazu zählen unter anderem der SOH, wobei ein hoher SOH und damit verhältnismäßig hohe Kapazität den Preis steigert. Es gibt Akteure, die den Preis nach der verfügbaren Kapazität der EOFL-Batterie ausrichten, wodurch jede einzelne Batterie getestet werden muss. Weiterhin gibt es Garantiezertifikate, deren Existenz ebenfalls die Zahlungsbereitschaft erhöht, da der Käufer die Sicherheit hat, dass die EOFL-Batterie über einen definierten Zeitraum funktionsfähig ist oder zumindest keine Kosten für ihn anfallen. Da der Zustand der EOFL-Batterie aktuell nur durch aufwendige Testverfahren ermittelt werden kann, ist ein valides Testverfahren auf Seiten des Batterieverkäufers, das mit dem Second-Life-Akteur abgestimmt ist, ein weiteres Argument für eine höhere Zahlungsbereitschaft. Diese Testverfahren können allerdings auch stark begrenzt werden, sofern Daten aus dem First-Life im Fahrzeug zur Verfügung stehen oder der Zugriff auf das

BMS gegeben werden kann, wodurch zuverlässigere Prognosen über die Lebensdauer in der Second-Life-Anwendung getroffen werden können. Weiterhin kann gegebenenfalls das BMS sogar in der Second-Life-Anwendung genutzt werden, wodurch Zusatzaufwände für ein eigenes BMS entfallen. Eine Standardisierung von Anschlüssen wie Steckern und Sensoren, aber auch des Kühlsystems, würde die Zahlungsbereitschaft weiterhin ansteigen lassen, da der Umwidmungsaufwand deutlich reduziert werden kann und „Drag-and-Drop“-Lösungen etabliert werden könnten. Letztendlich spielt die Planungssicherheit für benötigte EOL-Batterie-Volumina eine wesentliche Rolle für den Ankaufspreis, damit die Akteure auch wie geplant ihre Produkte verkaufen können. Eine Methode, sich langfristig EOL-Batterien zu sichern, ist, Rahmenverträge über definierte Volumina mit OEM abzuschließen [P3 Interview – Second-Life-Akteur, 2023, P3 Interview – Energieversorger, 2023, P3 Interview – Marktplattformanbieter, 2023, P3 Interview – OEM, 2023].

Laut Aussagen aktueller Marktplatzbetreiber ist der Verkaufspreis für EOFL-Batterien stark schwankend und kann sich zwischen 30 und 400 €/kWh bewegen. Andere Experten beziehen laut eigenen Aussagen die EOFL-Batterien zu einem Preis von 40–50 €/kWh für Module oder Batteriepacks für ~70% des Neupreises [P3 Interview – Second-Life-Akteur 1, 2023; P3 Interview – Marktplatzformanbieter, 2023]. Ohne genaue Spezifikationen wurden weiterhin weniger als 75 €/kWh genannt [P3 Interview – Energieversorger, 2023]. Dem gegenüber stehen nach Angaben eines First-Life-Akteurs Modulkosten in Höhe von 140–200 €/kWh [P3 Interview – First-Life-Akteur, 2023]. Die sehr unterschiedlichen Expertenaussagen verdeutlichen, dass der Markt für EOL-Batterien aufgrund der geringen Rückläufer noch nicht ausgeprägt ist.

Um auf das weiter oben bereits erwähnte Beispiel des ~15 MWh Großspeichers aus umgewidmeten Automotive-Packs zurückzukommen, wird an dieser Stelle auf die Zusammensetzung der Batteriekosten und der Stationärspeicherherstellung für das Jahr 2023 eingegangen, die den Kosten einer Anwendung mit First-Life-Batterien gegenübergestellt werden. Die Kosten für die Second-Life-Batterien setzen sich wie folgt zusammen: Zunächst ist der Mindestverkaufspreis des OEM der Recyclingwert, den er vom Recycler erhalten würde. Unter

den hier getroffenen Annahmen liegt dieser bei ~12 €/kWh. Zusätzlich fallen beim Verkäufer Kosten für den Ausbau des Packs aus dem Fahrzeug, die Logistik und Lizenzen an, die er in den Verkaufspreis einrechnet, sodass zusätzlich ~11 €/kWh anfallen und durch 5 €/kWh Marge vervollständigt werden. Für die EOFL-Batterie entstehen somit Kosten für den Second-Life-Akteur von ~28 €/kWh. Dieser hat zusätzlich noch Umwidmungskosten, die durch Tests und Zerlegung der Systeme anfallen können, um die Batterien in einen Zustand zu bringen, dass sie in die Second-Life-Anwendung verbaut werden können. Um die Lebensdauer von Second-Life-Anwendungen mit First-Life-Anwendungen vergleichbar zu machen, müssen die umgewidmeten Batterien aufgrund des geringeren SOH nach einer gewissen Zeit ausgetauscht werden, was in den Kosten durch die Lebenszeitverlängerung dargestellt wird. Der Kostenpunkt setzt sich aus den Kosten für eine EOFL-Batterie sowie einem Multiplikator zusammen, der die Anzahl der notwendigen Batterien beschreibt, um die Lebensdauer auf dasselbe Niveau von First-Life-Batterien zu bringen. Letztendlich werden die Kosten des Second-Life-Großspeichers durch Energiespeichersystem-Komponenten und der -herstellung vervollständigt, sodass in diesem Beispiel 106 €/kWh für diese Anwendung anfallen (siehe Abbildung 12).

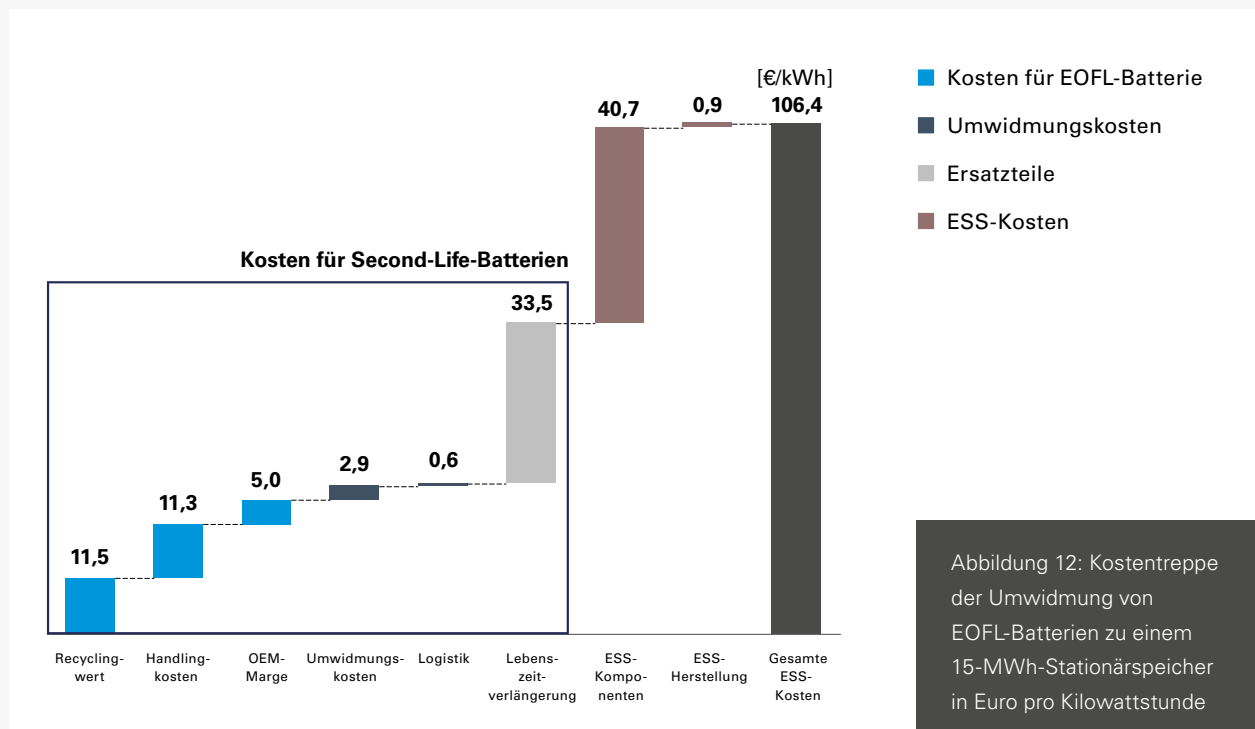


Abbildung 12: Kostentreppe der Umwidmung von EOFL-Batterien zu einem 15-MWh-Stationärspeicher in Euro pro Kilowattstunde

2.2.3 Preise für First-Life-Batterien und Second-Life-Alternativen

Die letzte Komponente der in Abbildung 7 dargestellten notwendigen Preispunkte bezieht sich auf die Kosten von First-Life-Batterien. Auf der Grundlage von Analysen von Bain & P3, unter Berücksichtigung von Materialpreisen, darunter die an der London Metal Exchange, wurden Prognosen für die Zellkosten erstellt. Diese Prognosen spiegeln ideale Bedingungen wider, wie etwa eine vollständige Auslastung der Anlagen und optimierte Prozesse [Bain & P3, 2023]. Basierend auf Industrievergleichen hinsichtlich des Anteils der Zellkosten an den Gesamtpackkosten wurde eine Prognose für die Packkosten abgeleitet.

Aufgrund einer unerwarteten Stagnation der Zellkostensenkung und anhaltend hoher Materialpreise wurde 2019 eine stärkere Kostensenkung prognostiziert, als sie tatsächlich eingetreten ist und voraussichtlich eintreten wird. Die ursprüngliche Annahme ging davon aus, dass die Packkosten auf unter 80 €/kWh sinken könnten. Aktuellere Analysen zeigen, dass nach einem starken Anstieg im Jahr 2022 aufgrund sehr hoher Materialpreise eine Senkung der Packkosten auf unter 100 €/kWh für LFP (Lithiumeisenphosphat) möglich ist. Für Batterie-

packs in der Automobilindustrie mit hochnickelhaltigen Batteriezellen wird erwartet, dass die Kosten bis zum Jahr 2030 auf etwa ~115 €/kWh fallen. Die entsprechenden Prognosen sind in Abbildung 13 veranschaulicht.

Im Folgenden werden exemplarisch First-Life- mit Second-Life-Batterien in verschiedenen Anwendungen verglichen.

Im Beispiel des Großspeichers mit 15 MWh Kapazität belaufen sich die Kosten für einen neuen Speicher auf etwa ~191 €/kWh. Durch die Nutzung von Second-Life-Batterien kann eine erhebliche Kosteneinsparung von 45% erzielt werden. Es ist jedoch wichtig, zwischen den beiden Szenarien zu unterscheiden.

Im First-Life-Szenario wird eine Batterie direkt vom Hersteller erworben, die analog zur Second-Life-Batterie aufgebaut ist und einen SOH von 100% aufweist. Hier entstehen die Kosten für die Anschaffung der Batterie, die Stationärspeicherkomponenten und deren Herstellung, jedoch entfällt der Bedarf für einen Umwidmungsprozess.

Im Second-Life-Szenario hingegen muss die Batterie einen Umwidmungsprozess durchlaufen. Aufgrund der reduzierten Lebensdauer und eines SOH von ~80% wird ein Batteriewech-

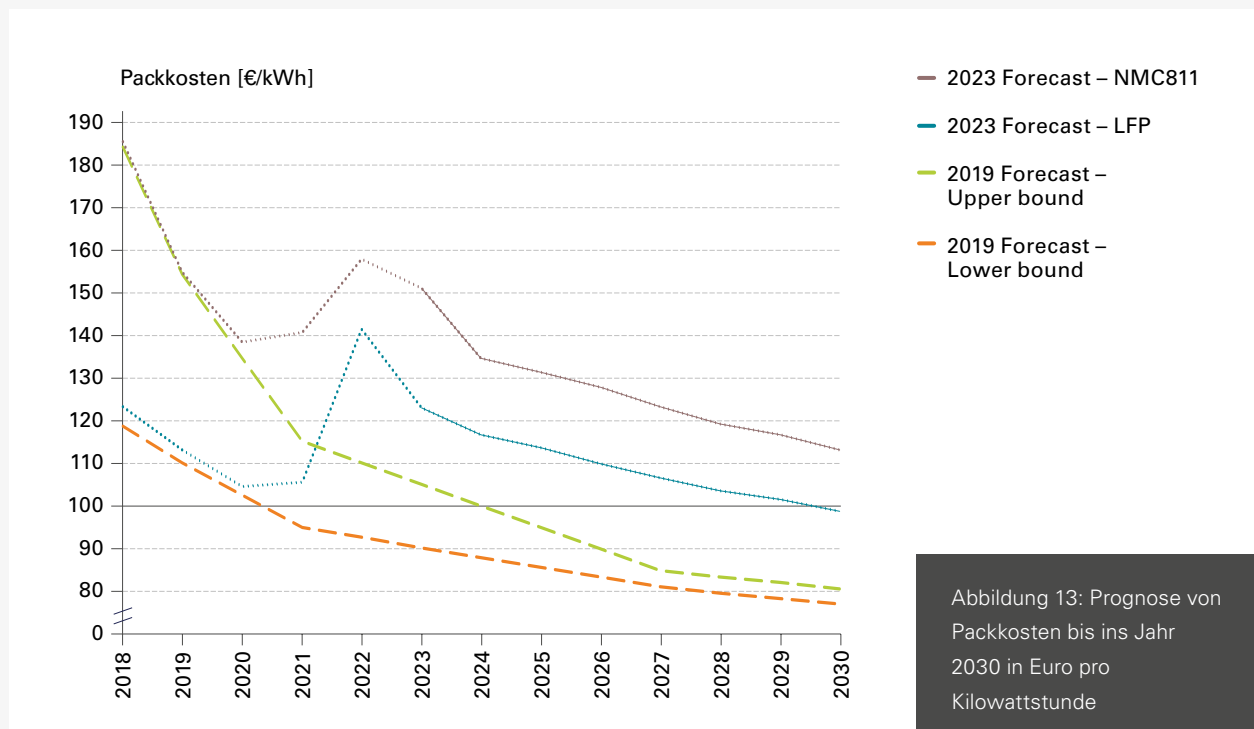


Abbildung 13: Prognose von Packkosten bis ins Jahr 2030 in Euro pro Kilowattstunde

Quelle: [eigene Darstellung]

sel notwendig (siehe Lebenszeitverlängerung in Abbildung 12), um die Lebensdauer mit der First-Life-Alternative vergleichbar zu machen. Dieser Wechsel trägt zu den Gesamtkosten der Second-Life-Batterien bei, was dennoch zu geringeren Kosten als für Großspeicher mit neuen Batterien führt. Der Kostenvergleich ist in Abbildung 15a in Euro pro Kilowattstunde dargestellt.

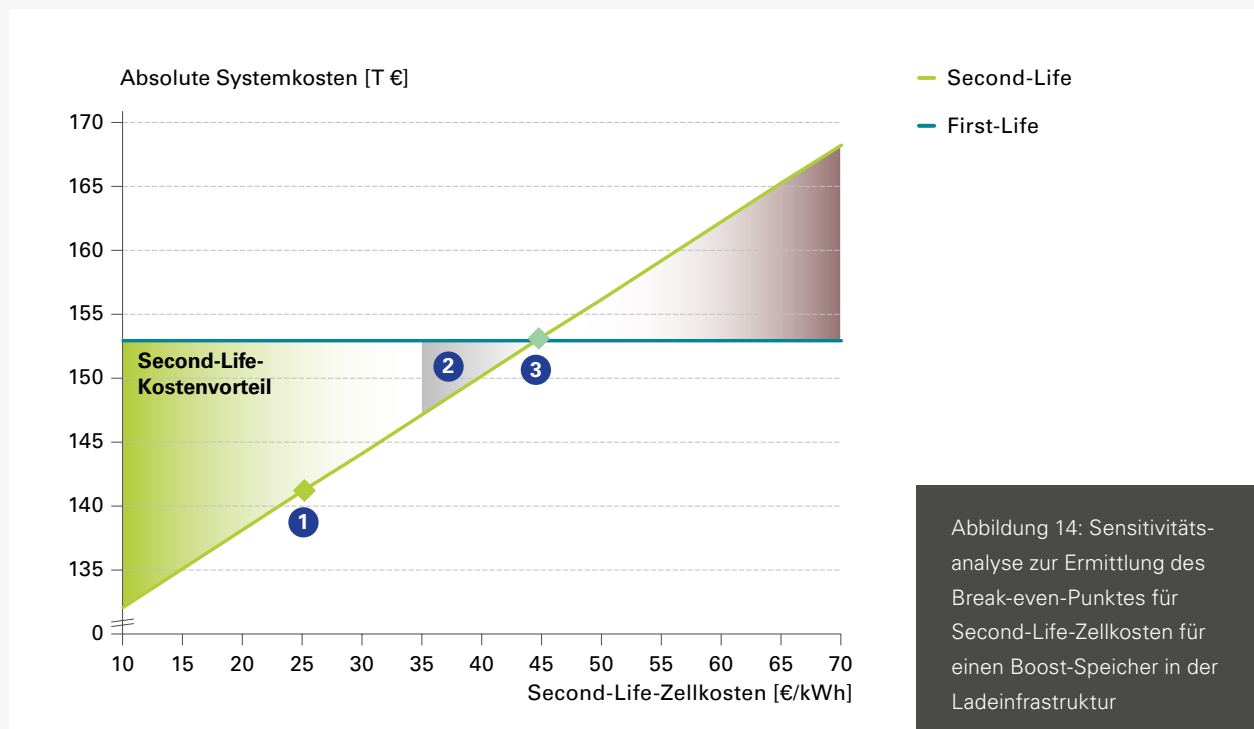
Die Entscheidung zwischen First-Life und Second-Life hängt somit von verschiedenen Faktoren ab, darunter die Anschaffungskosten, die Umwidmungskosten und die tatsächliche Lebensdauer, die unter Umständen einen Batteriewechsel im Second-Life-Szenario erfordert.

Beispiel b) in Abbildung 15 repräsentiert einen Boost-Speicher in der Ladeinfrastruktur mit einer Kapazität von 300 kWh. Die zugrunde liegenden Annahmen beziehen sich auf Nickel-Mangan-Kobalt-Batterien (NMC-Batterien) mit einer Lebensdauer von 10 Jahren, bis ein SOH von 60% erreicht ist und die Batterien somit das Lebensende erreichen. In diesem Fall kann der Recyclingwert zurückgewonnen werden. Im Gegensatz dazu müssen die Second-Life-Batterien überdimensioniert werden, um die gleiche Kapazität zu erreichen, da sie mit einem SOH von nur 80% eingebaut werden. Dies ist auch der

Grund für einen Batteriewechsel nach 5 Jahren, wodurch zweimal Kosten für die EOFL-Batterien anfallen. Der Recyclingwert kann jedoch ebenfalls zurückgewonnen werden.

In dem betrachteten Szenario können durch die Verwendung von Second-Life-Batterien Kostenvorteile von 6% realisiert werden. Eine Sensitivitätsanalyse in Abbildung 14 zeigt, dass in diesem Beispiel die absoluten Systemkosten der Second-Life-Anwendung die der First-Life-Anwendung überschreiten, wenn der Preis für die EOFL-Batterien auf über 45 €/kWh ansteigt. Analog zu Abbildung 11 spiegelt Punkt 1 das Referenzszenario wider, Punkt 3 zeigt den Break-even, und Punkt 2 stellt exemplarisch einen Bereich dar, der zwar theoretisch mit einem Kostenvorteil verbunden wäre, aber den Aufwand für die Umwidmung nicht rechtfertigt.

Letztendlich ist die Zahlungsbereitschaft für Second-Life-Batterien nicht sonderlich hoch und die Kosten sollten in diesem Beispiel nicht mehr als 30% des Neupreises von Batterien betragen. Diese Erkenntnis unterstreicht die Bedeutung einer präzisen Abwägung zwischen Kostenvorteilen und dem Mehraufwand für den Umwidmungsprozess bei der Entscheidung für Second-Life-Batterien.



Im dritten Beispiel, das einen Notstromspeicher für unterbrechungsfreie Stromversorgung darstellt (Abbildung 15c), wird davon ausgegangen, dass dieser im Idealfall nicht genutzt wird, da die Stromversorgung stabil ist. Unter dieser Prämisse altern die Zellen lediglich kalendarisch, und die genutzte LFP-Technologie wird mit einer Alterungsrate von 1% pro Jahr angenommen, vorausgesetzt, dass sie bei Temperaturen unter 30 °C gelagert wird und einen SOC von 50–60% aufweist [EP-Technologies, 2023].

Die First-Life-Batterien erreichen nach 20 Jahren einen SOH von 80% und können nach einem Umwidmungsprozess einer zweiten Nutzung zugeführt werden, wodurch ein Gewinn durch den Verkauf erzielt werden kann. Die Second-Life-Batterien starten, wie im vorherigen Beispiel, mit einem SOH von 80% in ihre zweite Nutzungsphase und erreichen nach 20 Jahren einen SOH von 60%, wodurch der Recyclingwert zurückgewonnen werden kann.

Insgesamt kann für dieses Szenario ein Kostenvorteil von ~16% erreicht werden, wenn Second-Life-Batterien genutzt werden, die über ihre zweite Nutzungsphase hinweg nicht ausgetauscht werden müssen. Dies verdeutlicht, wie die spezifischen Anwendungsanforderungen und die Lebensdauer der Batterien die Wirtschaftlichkeit von Second-Life-Anwendungen beeinflussen können.

Abschließend sollen in diesem Kapitel die First-Life-Zellkosten mittels einer Top-down-Analyse ermittelt werden. In Abbildung 16 ist ein LFP-Container mit einer Kapazität von 3,4 MWh dargestellt, dessen Gesamtkosten sich auf 165 €/kWh belaufen. Nach Abzug von Marge, Logistikkosten und einer für fehlerhafte Produkte angesetzten Garantie verbleiben ~145 €/kWh. Der Zusammenbau und die Komponenten des Containers sind mit ungefähr 23% der zweitgrößte Kostenanteil. Die Bestandteile und der Zusammenbau der Racks und Module machen zusammen etwa 13% der Gesamtkosten aus. Die LFP-Zellen selbst tragen den größten Anteil mit etwa 52% der gesamten Kosten für den Energiespeicher, was etwa 85 €/kWh entspricht.

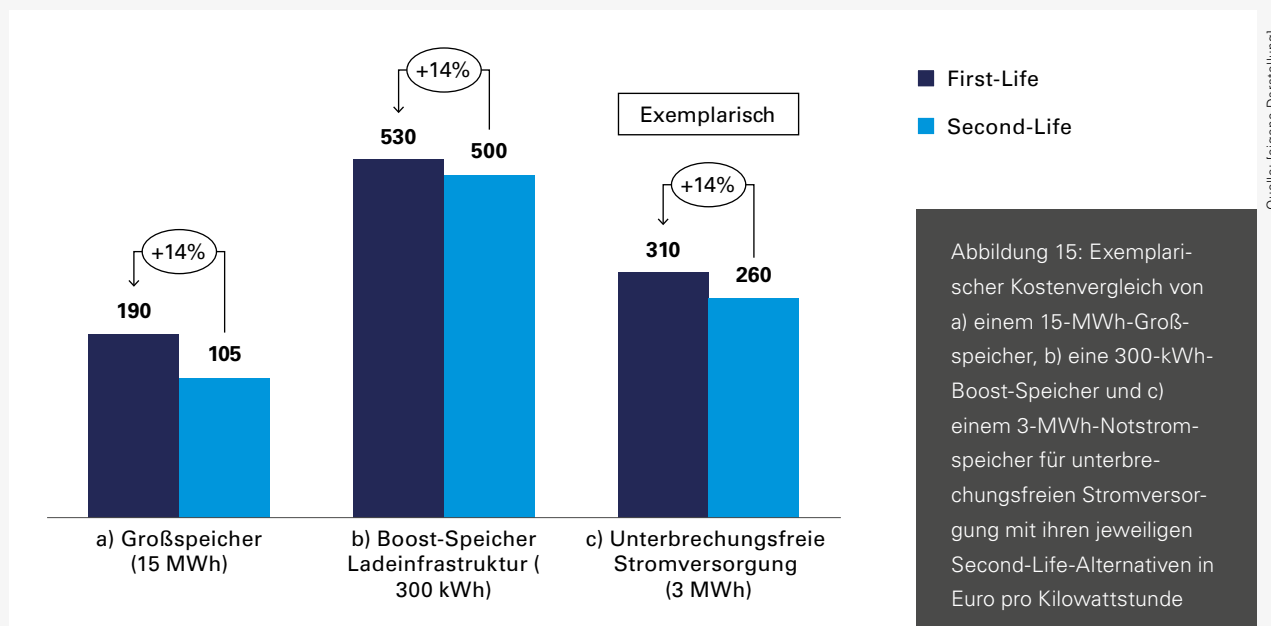
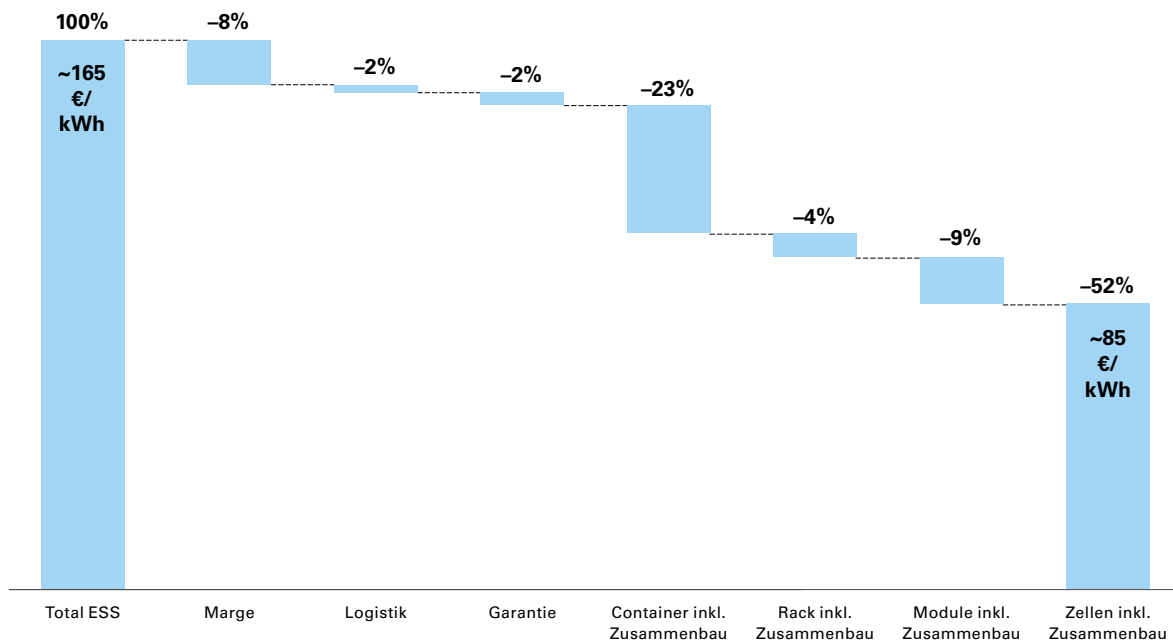


Abbildung 15: Exemplarischer Kostenvergleich von a) einem 15-MWh-Großspeicher, b) eine 300-kWh-Boost-Speicher und c) einem 3-MWh-Notstromspeicher für unterbrechungsfreien Stromversorgung mit ihren jeweiligen Second-Life-Alternativen in Euro pro Kilowattstunde



Quelle: [eigene Darstellung]

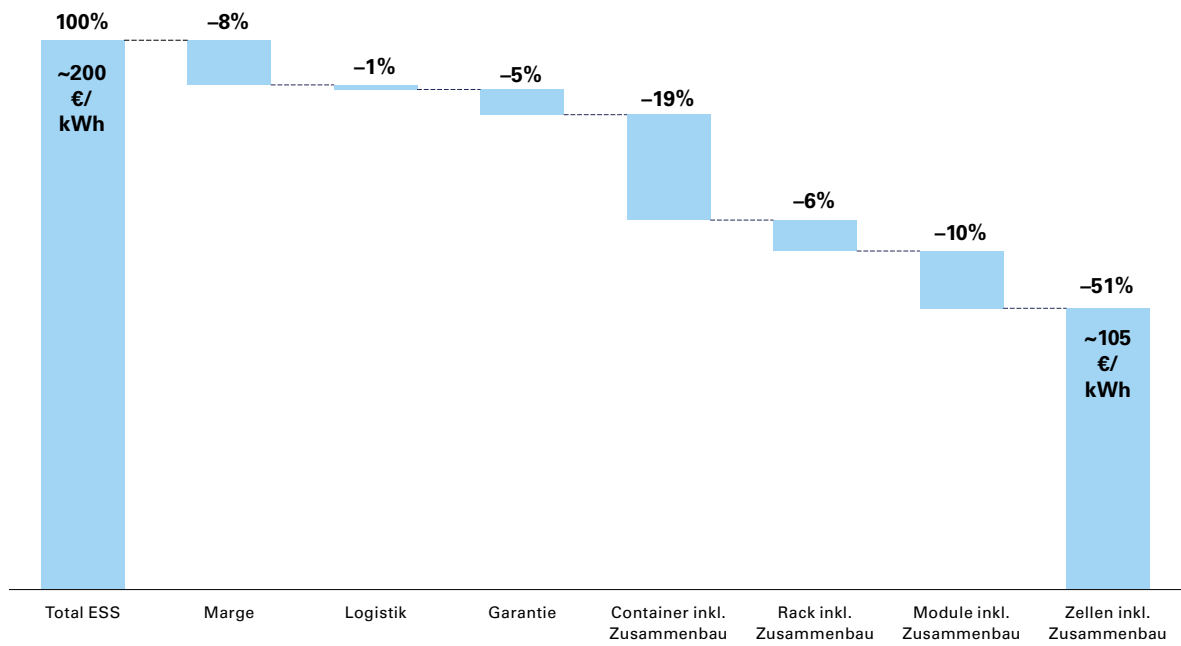
Abbildung 16: Top-down-Kostenkalkulation für einen 3,4-MWh-LFP-ESS-Container zur Ermittlung der Zellkosten in Euro pro Kilowattstunde

Aufgrund der höheren Wahrscheinlichkeit des Ausfalls von NMC-Zellen im Vergleich zu LFP-Zellen und auch aufgrund des größeren monetären Werts ist der Kostenpunkt für die Garantie entsprechend größer. Analog zum LFP-Container ist der Kostenanteil von Container, Racks und Modulen in Summe ähnlich. Auch der Zellkostenanteil ist mit 51% vergleichbar, entspricht jedoch ~105 €/kWh.

2.2.4 Zusammenfassung der Wirtschaftlichkeit von Second-Life-Batterien und Recycling

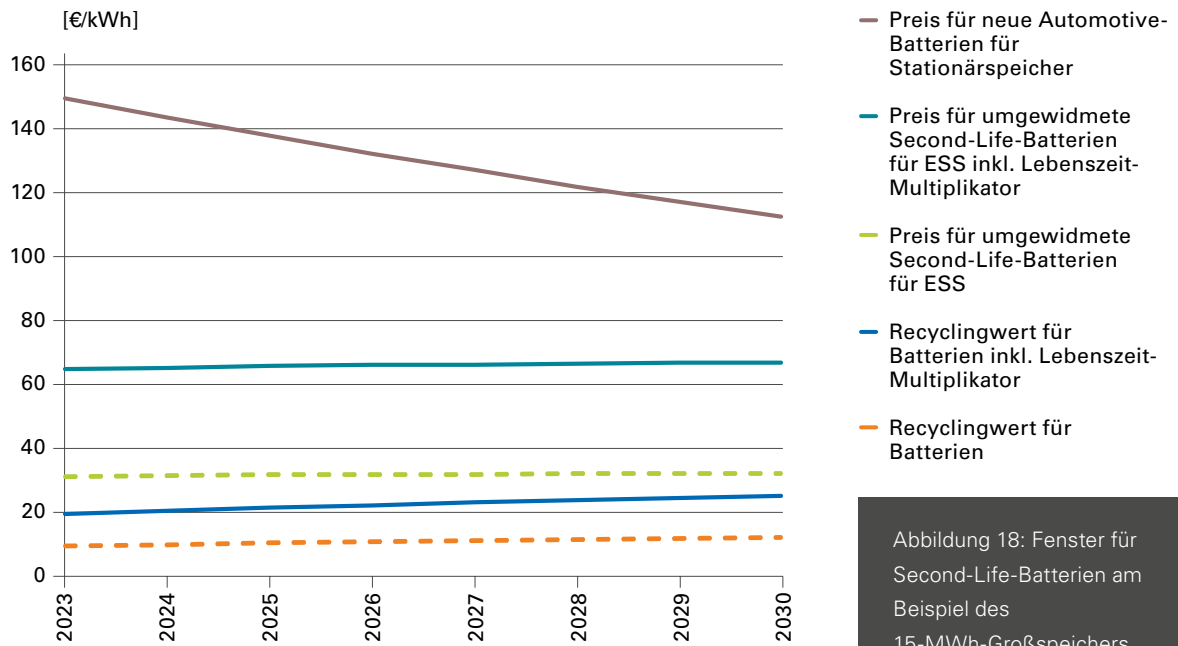
Zusammenfassend kann das Fenster für Second-Life für das Beispiel des 15-MWh-Stationärspeichers bestimmt werden (Abbildung 18). Die braune Linie zeigt die Kosten für neue Automotive-Batterien für Stationärspeicher, die von ~150 €/kWh auf ~110 €/kWh im Jahr 2030 sinken. Der Recyclingwert hingegen steigt bis 2030 von ~10 €/kWh auf ~12 €/kWh an (gestrichelte orangefarbene Linie). Aufgrund des gewählten Szenarios und des Ersetzens der Second-Life-Batterie ungefähr zur Hälfte der Lebensdauer der First-Life-Batterie muss der

Lebenszeit-Multiplikator berücksichtigt werden. Dadurch wird die untere Grenze des Second-Life-Fensters gesetzt (durchgehende dunkelblaue Linie). Auch der Preis für umgewidmete Second-Life-Batterien erhöht sich unter Berücksichtigung des Lebenszeit-Multiplikators (durchgezogene türkisfarbene Linie). Im dargestellten Szenario liegt die Second-Life-Batterie innerhalb des Fensters für Second-Life und eine rentable Nutzung ist gegeben. Diese Darstellung verdeutlicht die entscheidende Rolle der verschiedenen Kostenkomponenten und des Recyclingwerts bei der wirtschaftlichen Bewertung von Second-Life-Anwendungen.



Quelle: [eigene Darstellung]

Abbildung 17: Top-down Kostenkalkulation für einen 2,9-MWh-NMC-ESS-Container zur Ermittlung der Zellkosten in Euro pro Kilowattstunde



Quelle: [eigene Darstellung]

Abbildung 18: Fenster für Second-Life-Batterien am Beispiel des 15-MWh-Großspeichers

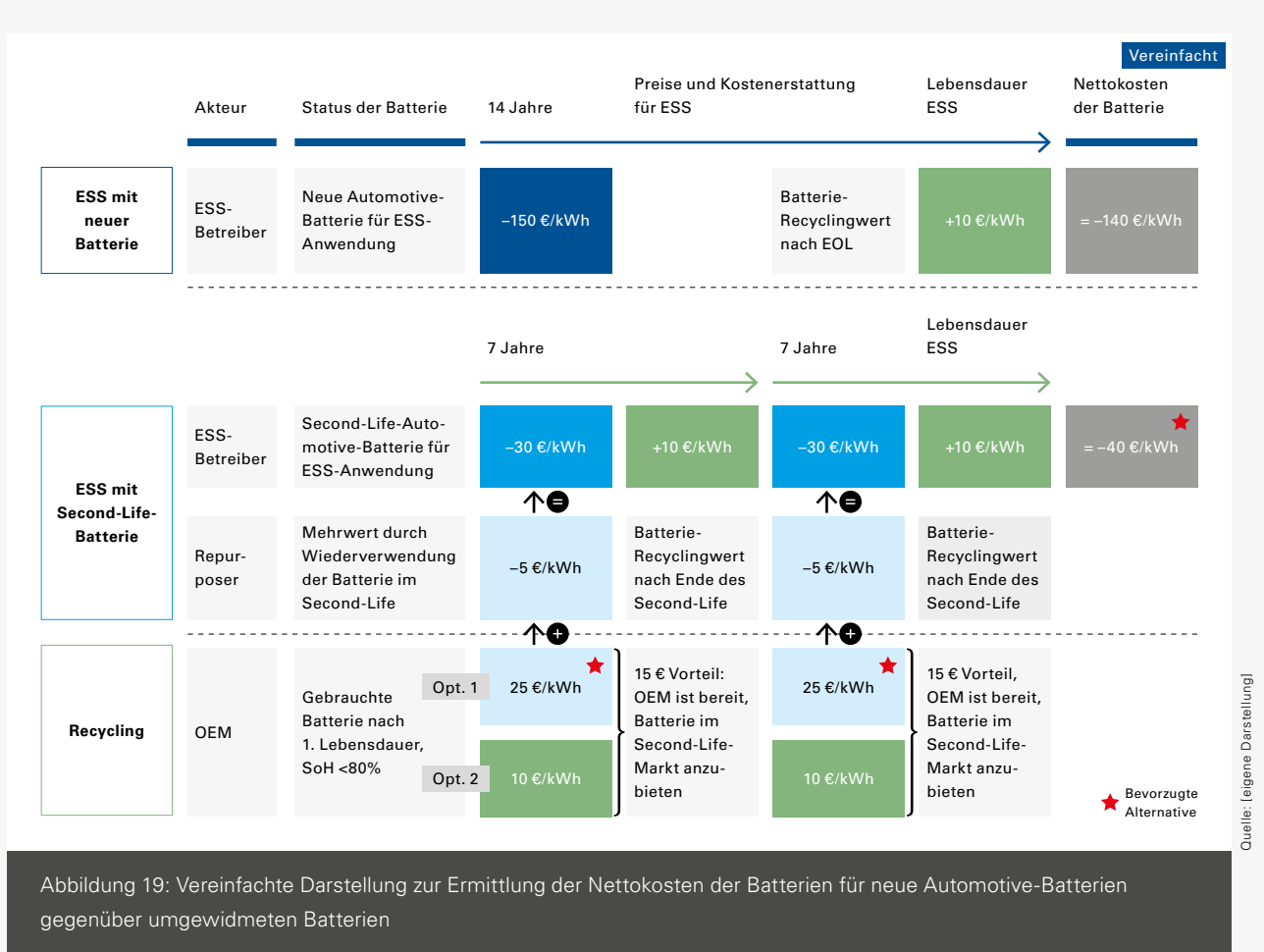


Abbildung 19: Vereinfachte Darstellung zur Ermittlung der Nettokosten der Batterien für neue Automotive-Batterien gegenüber umgewidmeten Batterien

Eine weitere Betrachtungsweise zur wirtschaftlichen Rentabilität von Second-Life-Batterien besteht darin, die Nettokosten mit First-Life-Batterien zu vergleichen. Abbildung 19 zeigt diese vereinfacht für das Stationärspeicher-Beispiel. Zunächst würde der ESS-Hersteller eine neue Automotive-Batterie für ESS-Anwendungen kaufen. Am Ende der Lebensdauer, nach ungefähr 14 Jahren, würde er den Recyclingwert von ~10 €/kWh zurückerhalten, was zu Nettokosten von ~140 €/kWh führt. Auf der anderen Seite hat der OEM zwei Optionen für die zurückgegebenen Batterien. Zum einen könnte er die Batterie dem Recycling zuführen, wodurch er 10 €/kWh erhalten könnte. Andererseits liegt die Zahlungsbereitschaft des Second-Life-Umwidmungsbetriebs bei >10 €/kWh, was bedeutet, dass der OEM mehr Gewinn erzielt, wenn er die Batterie an ihn verkauft. Der Second-Life-Akteur muss dann die EOFL-Batterie umwidmen, wodurch ihm ~5 €/kWh an Kosten entstehen. Er hat Gesamtkosten für einsetzbare Batterien in Höhe von ~30 €/kWh. Nach ungefähr der Hälfte der Lebensdauer

der First-Life-Batterien muss für die Second-Life-Anwendung ein Batteriewechsel stattfinden. Hierbei entstehen erneut Kosten von 30 €/kWh, aber gleichzeitig erhält er den Recyclingwert von 10 €/kWh zurück. Insgesamt belaufen sich seine Nettokosten für die Batterie auf ~40 €/kWh. Dieses Szenario ermöglicht somit ein profitables Second-Life-Geschäft, das mit Blick auf die Batteriekosten gegenüber der Nutzung einer First-Life-Batterie zu bevorzugen ist.

Bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit ist zu beachten, dass Batterien und Verfahren sehr individuell sind und äußerst sensibel auf Preisschwankungen einzelner Komponenten reagieren können. Daher ist diese Analyse nur für die hier dargestellten Prämissen gültig.

In der Recyclinganalyse wurde gezeigt, dass die Kosten pro Kilogramm Output für recycelte Materialien teurer ausfallen als für die Primärrohstoffe. Diese Dynamik kann sich durch

ansteigende Materialpreise in die andere Richtung ändern. Zum Beispiel befindet sich der aktuelle Lithiumpreis auf einem Niveau von Mitte 2021 [Trading Economics, 2023], und ein Anstieg ist keineswegs ausgeschlossen. Außerdem zeigt der Vergleich auf Kilowattstunden-Basis einen positiven Recyclingwert. Erhöhte Materialpreise würden das Szenario weiter begünstigen. Allerdings kann sich die Rentabilität in Abhängigkeit vom Metall-Payable schnell ändern.

Der Vergleich von First- mit Second-Life-Anwendungen deutet auf Kostenvorteile für die Second-Life-Anwendungen hin. Dabei ist zu beachten, dass im Falle des Boost-Speichers maximal 30% des Neupreises von Batterien gezahlt werden würden und die Zahlungsbereitschaft sowohl von Recyclern als auch von Second-Life-Akteuren nicht sonderlich hoch ist.

Im Zusammenhang mit der Rohstoffverfügbarkeit bleibt fraglich, inwiefern EOFL-Batterien direkt recycelt werden sollten oder ob Second-Life-Anwendungen als Rohstofflager dienen und gleichzeitig Umsatz generieren können [P3 Interview – Second-Life-Akteur, 2023]. Ein OEM unterstreicht im Interview, dass das eigentliche Geschäftsmodell darin liegt, Fahrzeuge zu verkaufen, und dass Rohstoffe für die Batterieproduktion essenziell wichtig sind, sodass Recycling tendenziell bevorzugt würde. Aufgrund hoher Kosten für Recycling sei die Second-Life-Anwendung aber eine attraktive Alternative, da ein besonderes Interesse darin läge, die Batterie im Besitz zu halten [P3 Interview – OEM, 2023]. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Anpassung und Überprüfung der Wirtschaftlichkeitsannahmen an sich ändernde Marktbedingungen und Preisschwankungen.

2.3 Berechnung des CO₂-Fußabdrucks von Second-Life und Recycling

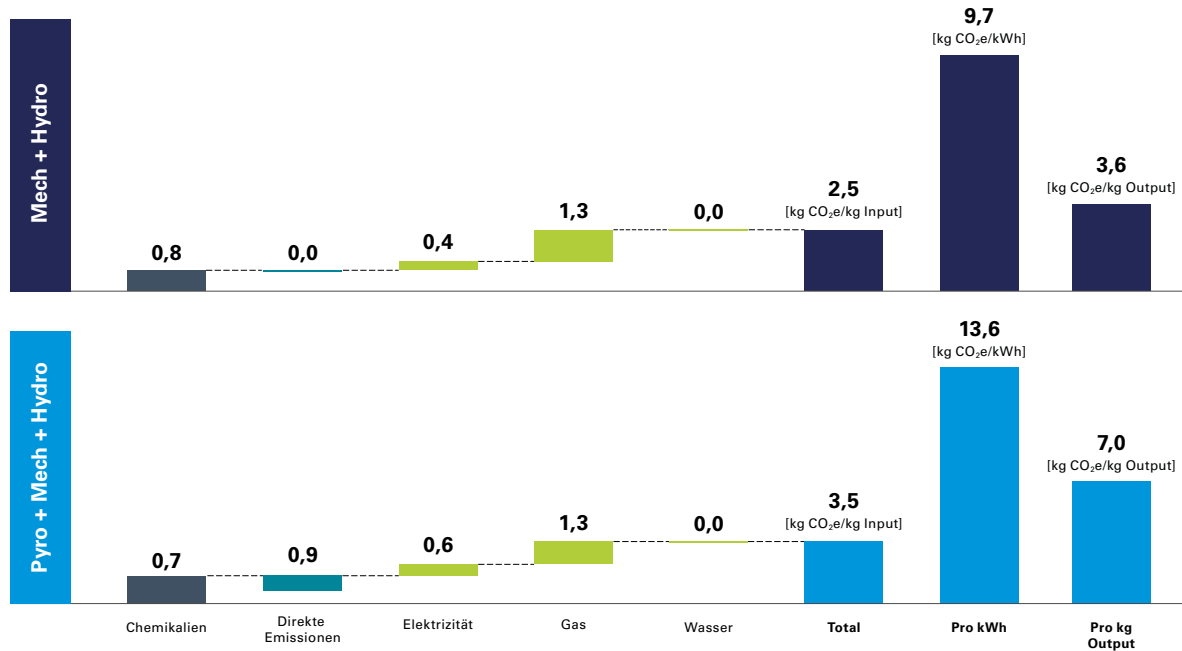
Die steigende Aufmerksamkeit und die fortlaufenden Bemühungen zur Reduzierung des PCF machen eine ökologische Analyse von Batterien und deren Materialien unerlässlich. In dieser Studie werden daher die Emissionen entlang des Recyclingprozesses analysiert und analog zur Allokation der Kosten auf die Metalle aufgeteilt. Anschließend werden die PCF einer LFP- und einer NMC811-Batteriezelle zunächst mit Primärmaterialien berechnet und in einem zweiten Schritt mit dem Rezyklat aus dem Recyclingprozess. Abschließend wird ein Vergleich auf Packebene durchgeführt, da EOFL-Batterien nicht bis auf Zellebene auseinandergenommen werden.

Die ökologische Analyse spielt eine entscheidende Rolle, um nicht nur wirtschaftliche, sondern auch ökologische Aspekte bei der Bewertung von Batteriesystemen zu berücksichtigen. Dieser Ansatz ermöglicht eine umfassende Beurteilung der Nachhaltigkeit von Batterietechnologien.

2.3.1 Recycling

Die zugrundeliegenden Recyclingprozesse entsprechen denen aus Kapitel 2.2.1 und werden an dieser Stelle hinsichtlich entstehender CO₂-Emissionen bewertet. Der Aufwand für die Chemikalien unterscheidet sich nur leicht, sodass 1,4–1,6 kg CO₂e/kg Input anfallen. Der Haupttreiber der Emissionen in beiden Prozessen ist die Energie, die für das Heizen und Kühlen während der Hydrometallurgie aufgewendet werden muss. Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass bei der Pyrolyse organische Komponenten verbrannt werden und dadurch direkte Emissionen in Höhe von 0,9 kg CO₂e/kg Input im „Pyro + Mech + Hydro“-Prozess anfallen. Basierend auf dem Energie- und Chemikalienverbrauch entspricht der „Mech + Hydro“-Prozess 2,5 kg CO₂e/kg (9,7 kg CO₂e/kWh) und der „Pyro + Mech + Hydro“-Prozess 3,5 kg CO₂e/kg (13,6 kg CO₂e/kWh). Auch hier sollte ein Vergleich aufgrund der unterschiedlichen Ausbringungsmengen pro Kilogramm Output stattfinden, wodurch die Lücke zwischen beiden Prozessen von 1,0 kg CO₂e/kg Input auf 3,4 kg CO₂e/kg Output ansteigt (Abbildung 20). Diese Bewertung verdeutlicht die Umweltauswirkungen der verschiedenen Recyclingansätze und unterstützt die Entscheidungsfindung im Hinblick auf eine nachhaltige Batterierückgewinnung.

CO₂-Äquivalente (CO₂e) umfassen verschiedene Treibhausgase, darunter Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O), Schwefelhexafluorid (SF₆) und Fluorkohlenwasserstoffe (FKW). Diese Gase werden aufgrund ihrer unterschiedlichen globalen Erwärmungspotenziale in CO₂-Äquivalente umgerechnet, um einen einheitlichen Vergleich ihres Klimaeffekts zu ermöglichen. [Shine, Keith P., et al., 2005]



Quelle: [eigene Darstellung]

Abbildung 20: CO₂e-Emissionen des „Mech + Hydro“- und „Pyro + Mech + Hydro“-Recyclingprozesses in kg CO₂e pro Kilogramm Input, Kilowattstunde und Kilogramm Output

Die entstehenden Emissionen, die durch den Recyclingprozess anfallen, können im nächsten Schritt mittels einer ökonomischen Allokation auf die Outputmaterialien verteilt werden. Dafür werden analog zu den Kosten Faktoren basierend auf dem ökonomischen Wert und der Ausbringungsmenge gebildet und mit den gesamten Emissionen verrechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 21 dargestellt und beziehen sich auf Kilogramm CO₂e pro Kilogramm Output ohne Berücksichtigung des Transports und Logistik. Primärrohstoff-Daten wurden aus Datenbanken entnommen.

Aufgrund des hohen ökonomischen Werts von Lithium entfallen darauf große Mengen der entstandenen Emissionen. Demgegenüber ist der PCF von Lithiumcarbonat geringer, weil dieses in der Regel aus Salzseen gewonnen wird und der Verarbeitungsprozess durch die natürliche Trocknung CO₂-arm verläuft. Lithiumhydroxid hingegen wird meist aus Erzen mit geringen Konzentrationen an Lithium und einem hohen PCF hergestellt, wodurch der „Mech + Hydro“-Prozess einen deutlich geringeren PCF aufweist. Gleiches gilt für Nickel- und Kobaltsulfat, und der PCF des Sekundärrohstoffs kann signi-

fikant reduziert werden. Diese ökonomische Allokation ermöglicht eine präzisere Zuordnung der Emissionen zu den verschiedenen Outputmaterialien, trägt somit zu einer detaillierten Bewertung der Umweltauswirkungen des Recyclingprozesses bei und bildet die Grundlage zur Berechnung der PCF von Batteriezellen mit Rezyklat.

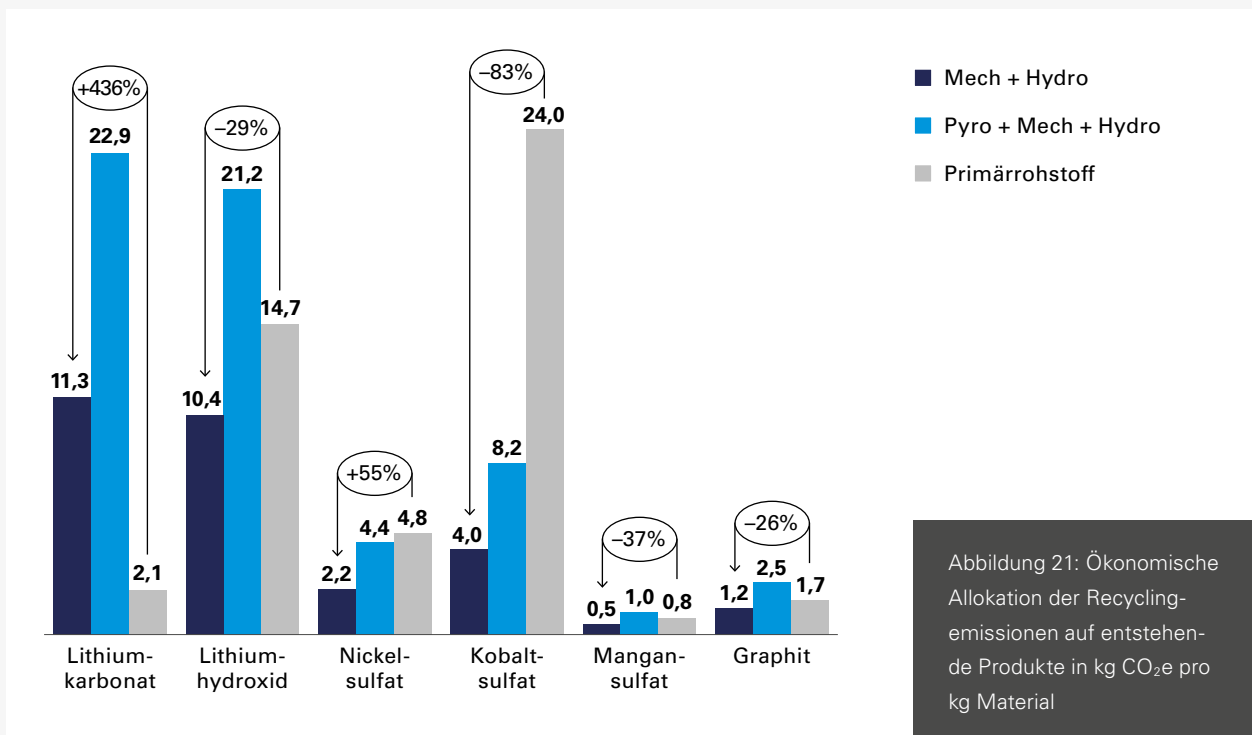


Abbildung 21: Ökonomische Allokation der Recycling-emissionen auf entstehende Produkte in kg CO₂e pro kg Material

2.3.2 PCF von Batterien mit Rezyklat, First- und Second-Life-Batterien

Um den PCF von Batteriezellen zu ermitteln, wird zunächst eine Stückliste erstellt, die auf P3 Teardown-Daten basiert. Der Produktionsprozess umfasst mehrere Schritte: Die Herstellung der Elektroden beginnt mit dem Mischen des Aktivmaterials mit Bindemittel und Carbon Black. Diese Mischung wird dann auf einen Stromsammler aufgetragen, getrocknet und verdichtet. Schließlich werden die Elektroden auf die benötigte Größe zugeschnitten. Nachdem die Elektroden vorbereitet sind, folgt die eigentliche Zusammensetzung der Zellen. Dies beinhaltet das Ausschneiden von Tabs aus den Elektroden und das abwechselnde Stapeln oder Wickeln der Elektroden mit einem Separator dazwischen. Die Tabs werden verschweißt und der Stapel oder die Spule wird in das Gehäuse gesetzt und mit Elektrolyt getränkt. Die Zelle wird vorläufig verschlossen und die Formierung findet statt. Je nach Prozess kann die Zelle ein weiteres Mal mit Elektrolyt befüllt und erneut formiert werden. Vor dem endgültigen Verschließen wird die Zelle entgast. Für die kontrollierte Bildung des Solid Electrolyte Interface wird die Zelle bei verschiedenen Temperaturen gealtert. Abschließend werden die Zellen getestet, nach Eigenschaften sortiert

und verpackt. Eine detaillierte Definition des Produktionsprozesses ermöglicht eine genaue Analyse der Umweltauswirkungen jedes Schrittes bei der Herstellung von Batteriezellen. Die Berücksichtigung dieser Informationen ist entscheidend für die Bestimmung des PCF und trägt dazu bei, den ökologischen Fußabdruck von Batterietechnologien besser zu verstehen.

Bei den analysierten Zellen handelt es sich um prismatische Zellen mit LFP und NMC811 als Kathodenaktivmaterial und Graphit auf der Anodenseite. Erstere hat ungefähr 1.000 Wh Kapazität und letztere ungefähr 650 Wh, wodurch sie sich für ESS-Anwendungen eignen würden. Die Produktionskapazität entspricht für beide Zellen 14 Gigawattstunden pro Jahr. Die Emissionsfaktoren für die Materialien zur Berechnung der Zell-PCF wurden, bis auf die Kathodenaktivmaterialien, aus der Datenbank Ecoinvent entnommen. Der Emissionsfaktor für Elektrizität wurde mit ~350 g CO₂/kWh und der für Gas mit ~270 g CO₂/kWh angesetzt. Basierend auf den ermittelten PCF aus dem Recyclingprozess für die Rohmaterialien (Abbildung 21) wurde anschließend ein PCF für die Zellen mit Rezyklat aus den verschiedenen Prozessen berechnet. Zwar ist das Recycling von LFP wirtschaftlich nicht lohnend [Lander,

Laura, et al., 2021], wird an dieser Stelle aber als theoretisches Szenario für einen Vergleich dennoch berücksichtigt.

Die PCF der betrachteten Zellen zeigen, dass der Haupttreiber der Emissionen für alle Szenarien das Kathodenaktivmaterial ist, wie in Abbildung 22 dargestellt. Im Falle von LFP entfallen 60% der Emissionen auf die Kathode. Auch die Anode trägt einen bedeutenden Anteil bei, während Gehäuse, Elektrolyte und Separator geringere Auswirkungen der Materialien zeigen. Der Energieaufwand unterscheidet sich in den Prozessen, wobei der Trocknungsschritt und die Formierung die Haupttreiber sind. Die Schaffung einer trockenen und reinen Umgebung erfordert erhebliche Mengen an Energie, was sich im PCF der Zelle mit mehr als 3 kg CO₂e/kWh widerspiegelt. Durch den Einsatz von Sekundärmaterial aus Recyclingprozessen kann der PCF für LFP um bis zu 20% gesenkt werden, wobei die Emissionen des Herstellungsprozesses unverändert bleiben.

Die PCF-Zusammensetzung der NMC811-Zelle ist im Wesentlichen sehr ähnlich zur LFP-Zelle. Die Unterschiede liegen darin, dass die Kathode fast 80% des gesamten PCF ausmacht und die Anode aufgrund der höheren Energiedichte von NMC811 einen geringeren Einfluss hat. Die Energie für den Trocken- und Reinraum teilt sich ebenfalls anders auf, da die

Verarbeitung von NMC811 im Gegensatz zu LFP eine Trockenraumatmosferaere erfordert. Letztendlich kann auch hier ein Effekt von bis zu 38% Reduktion erzielt werden, und der PCF kann auf ~34 kg CO₂e/kWh gesenkt werden. Aufgrund der Tatsache, dass Second-Life-Batterien nicht bis auf Zellebene zerlegt werden, wird an dieser Stelle auf einen Vergleich verzichtet, und die Emissionen werden auf Packebene gegenübergestellt.

Die Solid Electrolyte Interphase ist eine schützende Schicht in Lithium-Ionen-Batterien, die sich zwischen Anode und Elektrolyt bildet. Sie stabilisiert die Batterie, kann aber auch den Innenwiderstand erhöhen, was zu Effizienzverlusten führen kann. Durch eine kontrollierte Bildung am Ende der Zellproduktion und durch die richtige Auswahl von Materialien und Zusätzen kann man diese Effekte mildern. In Second-Life-Batterien ist es wichtig, diese Schicht zu pflegen, um die Leistung und Lebensdauer der wiederverwendeten Batterien zu optimieren. [Huang, Chenghuan, et al., 2011; Tokranov, Anton, et al., 2016]

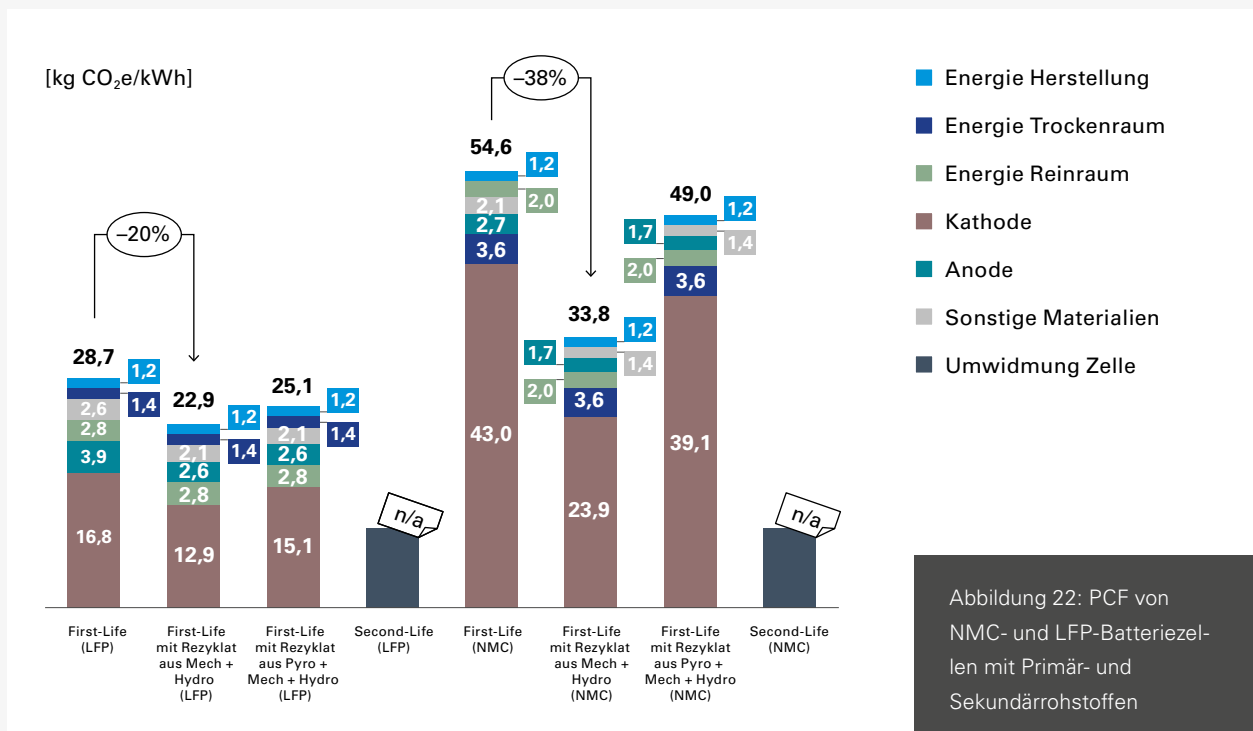


Abbildung 22: PCF von NMC- und LFP-Batteriezellen mit Primär- und Sekundärrohstoffen

Quelle: [eigene Darstellung]

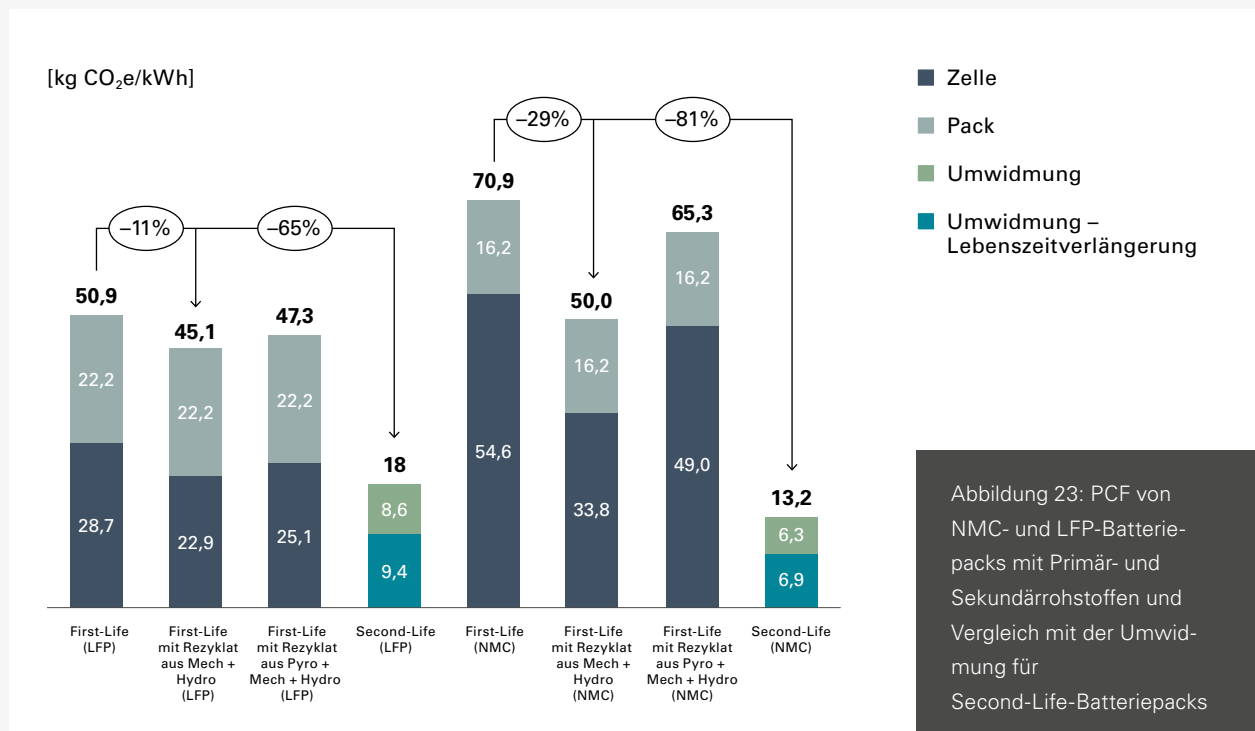
Basierend auf Literaturdaten eines NMC111-Batteriepacks wurden die CO₂-Emissionen, die durch die Weiterverarbeitung zum Pack anfallen, durch das Verhältnis der Energiedichteunterschiede der Kathodenaktivmaterialien auf die theoretischen LFP- und NMC811-Batteriepacks umgerechnet (Abbildung 23) [Koroma, Michael Samsu, et al., 2022]. Die Emissionen für die Umwidmung des NMC111-Batteriepacks wurden ebenfalls entsprechend umgerechnet, und der Lebensdauermultiplikator wurde berücksichtigt. Dadurch ergeben sich ~50 kg CO₂e/kWh für LFP und es kann eine Reduktion des PCF um ~11% erreicht werden, sofern Batteriezellen mit Rezyklat verwendet werden. Der Umwidmungsprozess verursacht deutlich weniger Emissionen, da der Prozess größtenteils manuell verläuft. Weiterhin werden BMS, Kühlsystem und Batteriegehäuse ausgetauscht [Koroma, Michael Samsu, et al., 2022], was zu einer Verringerung um ~65% im Vergleich zur First-Life-Alternative führt.

Ähnlich zum Vergleich auf Zellebene ist der Effekt der Reduktion aufgrund des deutlich größeren Einflusses von NMC811 auch auf Packebene größer. So kann der PCF von First-Life-Packs zu Second-Life-Packs um 29% verringert werden, und bei Umwidmung sogar um 81%. Der Vergleich der umgewidmeten LFP- und NMC811-Packs spiegelt nicht den Eindruck

der First-Life-Packs wider. Das liegt daran, dass die NMC811-Chemie an dieser Stelle besonders von der höheren Energiedichte profitiert, da keine Komponenten hinzukommen, die nicht in beiden Packs zu finden sind.

2.4 Schlussfolgerung und technische Machbarkeit zur Wirtschaftlichkeit und zum CO₂-Fußabdruck von Second-Life und Recycling

Das dargestellte Szenario für Recycling stellt einen positiven Recyclingwert dar. Vom Gesetzgeber vorgeschriebene Rezyklat-Quoten, steigende Rohstoffpreise und Rohstoffknappheit würden dazu führen, dass EOFL-Batterien des OEM bevorzugt ins Recycling gegeben werden, wodurch Skaleneffekte erzielt werden können, und Second-Life-Anwendungen weniger interessant sind. Sinkende Rohstoffpreise und hohe Recyclingkosten fördern jedoch die Nutzung von Second-Life-Anwendungen, da die Kosten der Verarbeitung den Metallwert überschreiten können. Aktuell ist die Menge der Rückläufer noch so gering, dass selbst wenn es schon eine etablierte Recyclingindustrie geben würde, die Auslastung sehr gering wäre, was zu höheren Kosten führt. Aufgrund des unwirtschaftlichen Recyclings von LFP eignet sich diese Zellchemie



besser für Second-Life, was durch ihre bessere Zyklenstabilität und erhöhte Sicherheit zusätzlich unterstrichen wird. Ein entscheidender Punkt, der dem entgegensteht, ist, dass die aktuellen Rückläufer meist auf NMC-Chemie basieren, und wenig Anwendungsfälle mit LFP bekannt sind [P3 Interview – OEM, 2023; P3 Interview – Second-Life-Akteur, 2023].

Ob sich die Umwidmung von Batteriezellen lohnt, hängt stark vom Preis für die EOFL-Batterien ab und davon, dass sinkende Kosten für First-Life-Batterien. Auch kann sich der Umwidmungsaufwand für verschiedene Akteure stark unterscheiden. Die Kosten sind beispielsweise am geringsten, wenn gesamte Packs mit vorhandenen Kühlsystemen und Elektronik genutzt werden können. Die Kosten steigen, sobald die Anschlussstellen nicht kompatibel sind, Kühlsysteme ersetzt und eigene BMS entwickelt werden müssen oder sogar die Packs bis auf Modulebene demontiert werden [P3 Interview - Second-Life-Akteur, 2023, P3 Interview – Energieversorger, 2023]. Die Nettokosten von Second-Life-Batterien über die Lebensdauer im dargestellten Szenario einer Stationärspeicher-Anwendung liegen auf jeden Fall deutlich unter denen für First-Life-Batterien, wobei zu erwarten ist, dass der Unterschied bei der Umwidmung auf Modulebene kleiner wird.

Hinsichtlich CO₂-Emissionen stehen wohl alle Szenarien besser da als die Produktion von First-Life-Batterien mit Primärrohstoffen, weshalb hier die klare Empfehlung ist, Recycling oder die Umwidmung der Neuproduktion vorzuziehen. Im Rahmen von Vorgaben der EU mit der Batterie-Regulatorik wird der Druck steigen, den CO₂-Footprint zu senken, weshalb umgewidmete Batteriepacks die präferierte Option darstellen würden. Gleichzeitig besteht aber auch die Notwendigkeit, bestimmte Rezyklat-Anteile in den Batterien zu erreichen, so dass bei fehlenden Sekundärmaterialien das Recycling wieder stärker in den Vordergrund rücken würde [Europäisches Parlament, 2023 – Artikel 7 und 8].

Technisch machbar sind grundsätzlich alle dargestellten Szenarien. Das schließt das Recycling von NMC ein, das außerhalb Europas schon etabliert ist, und auch das von LFP, was durch Literatur belegt werden kann, aber auch die Umwidmung von Batteriepacks und Modulen. Letzterem stehen einige Herausforderungen gegenüber. So besteht ein großer Umwidmungsaufwand, wenn Module genutzt werden sollen. Aufgrund der aktuell geringen Rücklaufmengen und der unterschiedlichen Bauformen findet der Prozess manuell statt [Fraunhofer, 2021, P3 Interview – OEM, 2023]. Die erste Herausforderung stellen fehlende Daten zu den EOL-Batterien dar. Für eine sichere

Integration sind beispielsweise Informationen über den Innenwiderstand, der durch die Solid Electrolyte Interphase beeinflusst wird, und Nutzungsverhalten aus dem First-Life essenziell. Aufgrund der unterschiedlichen Nutzung von EOFL-Batterien stellt das die nächste Herausforderung dar, weil die Batterien für die zweite Nutzung ausbalanciert werden müssen. Ein hoher Innenwiderstand ist beispielsweise mit einer größeren Wahrscheinlichkeit mit thermischem Durchgehen verbunden, weshalb der Aufwand für Sicherheitssysteme und Kühlung steigt. Eine fehlende Standardisierung der Anschlussstellen, Kühlsysteme und fehlender Zugriff auf das BMS führen zu einer weiteren Komplexität der Umwidmung. Einige Second-Life-Akteure nutzen deshalb ihr eigenes BMS und Kühlsysteme. Im Idealfall können Batteriepacks durch eine „Drag-and-Drop“-Lösung in eine Second-Life-Anwendung integriert werden [P3 Interview – Second-Life-Akteur, 2023]. Weitere Herausforderungen und Chancen sind in Kapitel 1 dargestellt.

In der Betrachtung von Second-Life-Anwendungen und dem Recycling von Batterien zeigt sich, dass beide Ansätze vielversprechendes Potenzial für eine nachhaltige und wirtschaftliche Batterienutzung bieten können. Die Wahl zwischen Second-Life und Recycling hängt von einer komplexen Interaktion verschiedener Faktoren ab. Entscheidende Aspekte sind die Anzahl der Rückläufer, die Zellchemie und vor allem Marktdynamiken wie schwankende Rohstoffpreise und Kosten für EOFL-Module. All das kann die dargestellten Szenarien beeinflussen. Aufkommende Regulatorik kann ebenfalls dazu führen, dass Akteure im Markt dazu gedrängt werden, die Batterien bevorzugt ins Recycling zu geben. Das führt dazu, dass für jeden spezifischen Anwendungsfall eine wirtschaftliche und ökonomische Analyse durchgeführt werden sollte, um das jeweilige Potenzial zu bestimmen.

3.

Analyse des Batterie-EOL-Volumens, Markthochlauf von Second-Life-Anwendungen und Auswirkungen auf das Recycling

3.1 Einleitung und Vorgehen

Second-Life-Konzepte können, wie in Kapitel 2 gezeigt wurde, im Vergleich zu Neubatterien einen positiven Effekt auf die Ökobilanz der Anwendung haben und sind unter bestimmten Prämissen wirtschaftlich First-Life-Batterien überlegen. Für einen erfolgreichen Einsatz von Second-Life-Anwendungen müssen allerdings End-of-Life-Batterien in ausreichender Zahl vorhanden sein, sich für das Second-Life eignen und zusätzlich, wie in Kapitel 2 gezeigt, die bevorzugte Variante für den Batteriebesitzer gegenüber dem Recycling darstellen.

In diesem Kapitel wird daher zunächst das Volumen für EOL-Batterien aus PKW, LKW und Bussen in unterschiedlichen Szenarien hergeleitet und mit den prognostizierten Bedarfen für stationäre Anwendungen in der EU verglichen. Dann werden die Auswirkungen für das Recycling und die Zellproduktion sowie Potenziale für Second-Life-Anwendungen diskutiert.

Die Simulation des EOL-Volumens basiert auf dem Markthochlauf für Elektrofahrzeuge zwischen 2013 und 2035, den jeweiligen durchschnittlichen Batteriegrößen pro Fahrzeugklasse und Jahr sowie einer Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Zeitpunkt des EOL nach Jahren.

Da der Zeitpunkt des EOL einer Traktionsbatterie aktuell aufgrund fehlender Felddaten und Erfahrungen nicht mit Sicherheit prognostiziert werden kann, werden in dieser Studie drei Szenarien gebildet, die jeweils unterschiedliche mittlere Lebenserwartungen der Batterien berücksichtigen. Das Vorgehen ist in Abbildung 24 dargestellt.

3.2 Hochlauf elektrischer Fahrzeuge in der EU (PKW, LKW, Bus)

Im Rahmen dieser Untersuchung dienen die historischen Verkaufszahlen von elektrischen Personenkraftwagen, Lastkraftwagen und Bussen von 2013 bis 2022 sowie Projektionen für die zukünftige Entwicklung der Neuzulassungen von 2023 bis 2035 als Basis für die Modellierung des Hochlaufs von End-of-Life-Batterien. Diese historischen Daten wurden mithilfe von ACEA- und Marklines-Datenbanken erfasst [ACEA, 2023; Marklines, 2023]. Zukünftige Marktentwicklungen wurden unter Berücksichtigung der regulatorischen Anforderungen der Europäischen Union sowie spezifischer Elektrifizierungs- und CO₂-Flottenziele der Hersteller im P3 Marktmodell berechnet [P3 Marktmodell, 2023]. Der Modellansatz integriert sowohl Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV) als auch reine Elektrofahrzeuge (BEV). Gemäß der EU-Verordnung 2023/851 werden CO₂-Emissionen für PKW und leichte Nutzfahrzeuge auf europäischer Ebene reguliert, wobei spezifische Flottengrenzwerte festgelegt sind. Die Verordnung zielt darauf ab, dass bis 2035 alle neu zugelassenen PKW und leichten Nutzfahrzeuge emissionsfrei sein sollen, was eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 55% bis 2030 (im Vergleich zu 2021) bei PKW und um 50% bei leichten Nutzfahrzeugen sowie eine vollständige Reduktion bis 2035 vorsieht [EU, 2023].

	Berechnungsschritte	Einheit	Input Faktoren
1	Projektion Markthochlauf Elektrifizierung PKW, LKW und Busse	PKW-/LKW-/Bus-Neuzulassungen in Europa	# Fzg.
		Anteil EV-Neuverkäufe	%
		EV-Neuzulassungen (BEV und PHEV)	# Fzg.
2	Batterievolumen First-Life und Zelltechnologie	Durchschnittliche BatteriespeichergroÙe	kWh
		Verkaufsmix Zelltechnologie PKW	%
		Installiertes Batterievolumen nach Fahrzeugklasse	GWh
3	Batterievolumen End-of First-Life	Fahrzeugklassenspezifische Lebensdauerrate	%
		Verfügbares Volumen aus EOFL-Batterien	GWh
		Aufteilung Batterievolumen nach Technologie für PKW	GWh
4	Batterievolumen Second-Life	Verfügbares Volumen für Second-Life	GWh
		Verwendungsquote Second-Life	%
		Batterievolumen Second-Life	GWh

→ Elektrifizierungsziele der Fahrzeughersteller (OEM)
 → EU-Elektrifizierungsziele
 → Historische Neuzulassungen von EV
 → Aktueller Bestand an EV
 → Unterscheidung nach Fahrzeugklassen

→ Ø BatteriespeichergroÙe Kurzstrecken-BEV/-PHEV
 → Ø BatteriespeichergroÙe Langstrecken-BEV/-PHEV
 → % Verteilung Zellchemie PKW (LFP, NCA, NMC)

→ Verteilungskurve zu Batterierückläufern für unterschiedliche Fahrzeugklassen und Szenarien

→ Normierungsfaktor SOH 80% für EOL-Batterien
 → Verwendungsquote der Batterierückläufer für Second-Life-Anwendungen (3 Szenarien: Basis, optimistisch, pessimistisch)

Quelle: [eigene Darstellung]

Abbildung 24: Vorgehen zur Berechnung des EOFL-Volumens von Traktionsbatterien

Einige OEM haben in ihren Elektrifizierungsstrategien noch ambitioniertere Ziele festgelegt, die teilweise 100% elektrische Neuzulassungen bis 2030 vorsehen [AMS, 2021; Mercedes-Benz, 2023]. In den meisten dieser Strategien werden lediglich BEV und PHEV berücksichtigt, weshalb im Hochlaufmodell keine Brennstoffzellenfahrzeuge und Fahrzeuge mit E-Fuels (synthetischem Kraftstoff) einbezogen werden. Die historischen Daten ab 2019 sowie die Prognose des Hochlaufs der Neuzulassungen elektrischer PKW in der EU bis 2035 unter Berücksichtigung der spezifischen Elektrifizierungsstrategien der OEM und der EU-CO₂-Flottenziele sind in Abbildung 25 dargestellt. Es wird erwartet, dass der Absatz von 3,5 Millionen Einheiten im Jahr 2023 auf 13,1 Millionen Fahrzeuge im Jahr 2030 steigt und im Jahr 2035 17,2 Millionen verkaufte Einheiten erreicht werden. Neuzulassungen von PHEV, die als Übergangstechnologie bis zur vollständigen Elektrifizierung der PKW angesehen werden, werden voraussichtlich ab 2027 kontinuierlich abnehmen und aufgrund der EU-CO₂-Ziele bis 2035 nicht mehr verkauft werden.

Der Markthochlauf von elektrischen Lastkraftwagen (LKW) wird gemäß der EU-Klassifikation für Kraftfahrzeuge zur Güterbeförderung in die Klassen N1, N2 und N3 eingeteilt. Hierbei umfasst die Klasse N1 leichte Nutzfahrzeuge mit einer zuläs-

sigen Gesamtmasse bis zu 3,5 Tonnen. Die Klasse N2 schließt leichte (LDT: Light Duty Truck) bis mittlere (MDT: Medium Duty Truck) LKW mit einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 3,5 Tonnen und bis zu 12 Tonnen ein. Die N3-Klasse bezieht sich auf schwere Lastkraftwagen mit einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 12 Tonnen [KBA, 2023].

Gemäß der EU-Verordnung 2019/1242 sind Hersteller dazu verpflichtet, die flottenweiten CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2025 um 15% und bis zum Jahr 2030 um 30% im Vergleich zum Basisjahr 2019 zu reduzieren [EU, 2019]. Eine von der EU-Kommission vorgeschlagene Verschärfung der Reduzierungsziele wurde im November durch das EU-Parlament bestätigt [EU Parlament, 2023]. In dieser Verschärfung sind die Reduktionsziele für CO₂-Emissionen von LKW bis zum Jahr 2030 auf 45%, bis 2035 auf 65% und bis 2040 auf 90% festgesetzt worden. Des Weiteren beabsichtigt die Kommission, ab 2030 ausschließlich den Verkauf von emissionsfreien Stadtbussen zu ermöglichen [European Commission, 2023]. Eine zu schaffende Ausnahmeregelung für die Beschaffung von Biogas-Bussen wird 2035 auslaufen. Es folgen nun Verhandlungen mit dem Europäischen Rat (d.h. mit den Mitgliedstaaten) um den Gesetzestext im Jahr 2024 fertigzustellen [EU Parlament, 2023].

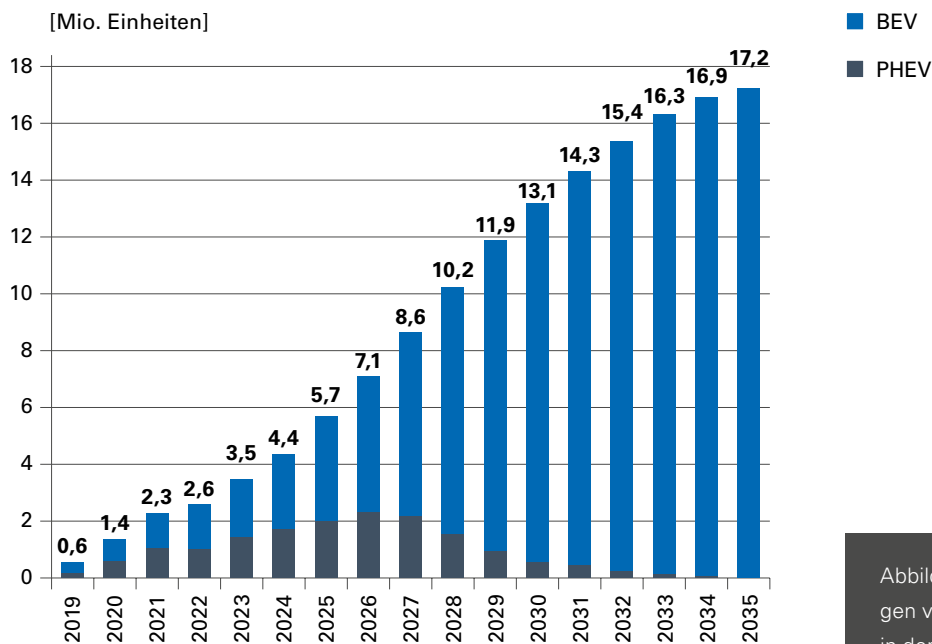


Abbildung 25: Neuzulassungen von elektrischen PKW in der EU

Quelle: eigene Darstellung

Der Markthochlauf der LKW und Busse von 2019 bis 2035 ist in Abbildung 26 auf Basis des P3 Marktmodells dargestellt und beinhaltet sowohl PHEV als auch BEV. Es wird prognostiziert, dass die Neuzulassungen von elektrischen LKW und Bussen in den kommenden Jahren deutlich ansteigen werden und bis zum Jahr 2030 voraussichtlich 1,6 Millionen Einheiten erreichen können. Insbesondere leichte elektrische Nutzfahrzeuge der Klasse N1 werden bis 2030 voraussichtlich auf 1,4 Millionen Fahrzeugverkäufe steigen, was einen wesentlichen Anteil der Neuzulassungen im Segment der LKW bedeuten würde. Für 2035 wird anhand des P3 Marktmodells mit gesamten Neuzulassungen von 2,2 Millionen Einheiten in der EU gerechnet.

3.3 Hochlauf des Batteriebedarfs in der EU (PKW, LKW, Bus)

Der Batteriebedarf der elektrischen Fahrzeuge wird benötigt, um das Volumen der Traktionsbatterien zu bestimmen, das pro Jahr von den OEM auf den europäischen Markt gebracht wird. Dazu werden die jährlichen Neuzulassungen der einzelnen Fahrzeugklassen mit den entsprechenden Batteriegrößen verrechnet. Die spezifischen durchschnittlichen Batteriegrößen je Fahrzeugklasse und Jahr werden aus aktuellen Felddaten

und Ankündigungen von OEM abgeleitet. Dabei werden die Hochläufe und Batteriegrößen der elektrischen PKW in Kurz- und Langstrecken unterteilt, um so die Unterschiede zwischen einzelnen PKW-Segmenten zu berücksichtigen. Die angenommenen durchschnittlichen Batteriegrößen für 2030 sind exemplarisch in Tabelle 2 zusammengefasst.

Aus den Markthochläufen der Fahrzeugklassen und den spezifischen Batteriegrößen wird der Batteriebedarf zwischen 2019 und 2035 hergeleitet (Abbildung 27). Dieser steigt laut den Prognosen von 186 GWh im Jahr 2023 auf 1.291 GWh im Jahr 2030 und 1.799 GWh im Jahr 2035 an. Der überwiegende Teil des Batteriebedarfs bis 2035 wird aus PKW mit einem Anteil von 85% im Jahr 2035 stammen. Weiterhin werden laut Hochrechnungen für den Hochlauf der elektrischen PLDV (Passenger Light Duty Vehicle, leichte Nutzfahrzeuge) und HDT (Heavy Duty Trucks, Schwerlastkraftwagen) 2035 je 125 GWh an Traktionsbatterien für den europäischen Markt benötigt. Die elektrifizierten Klassen N2 und Busse werden 2035 Batteriekapazitäten von voraussichtlich 17 bzw. 11 GWh benötigen und damit einen Anteil von insgesamt rund 2% des Gesamtbedarfs ausmachen.

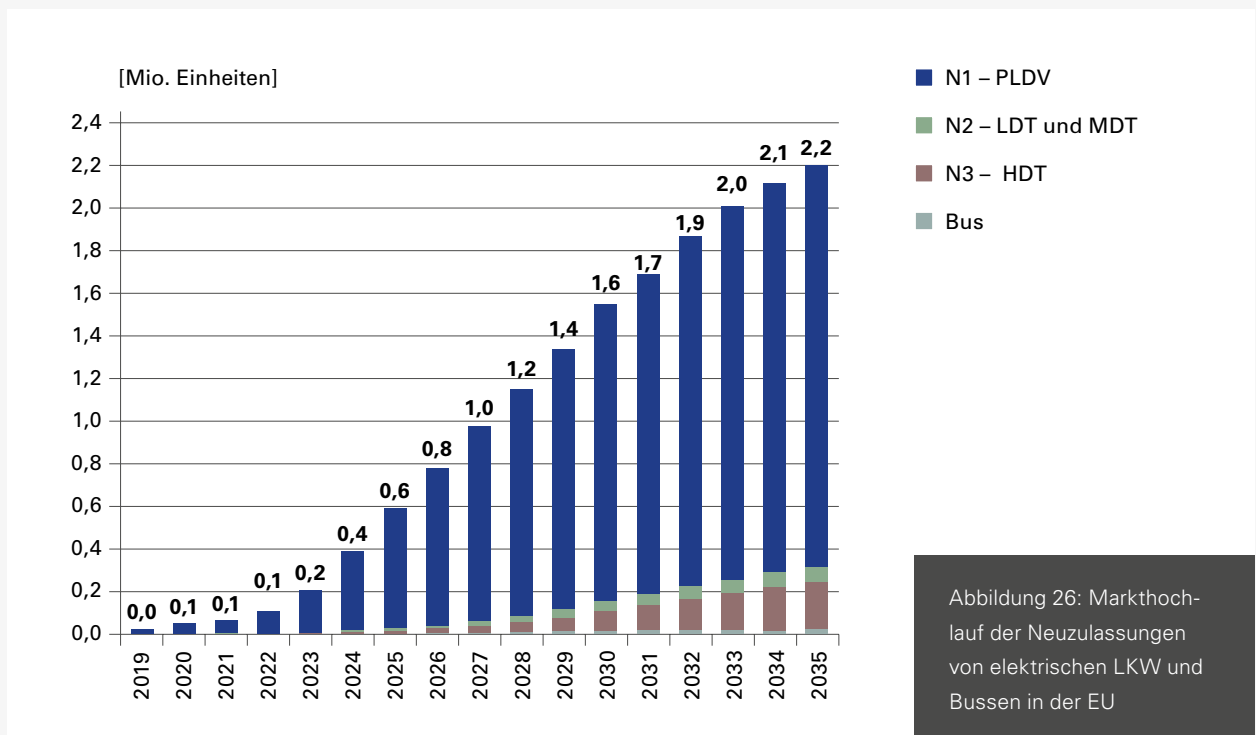


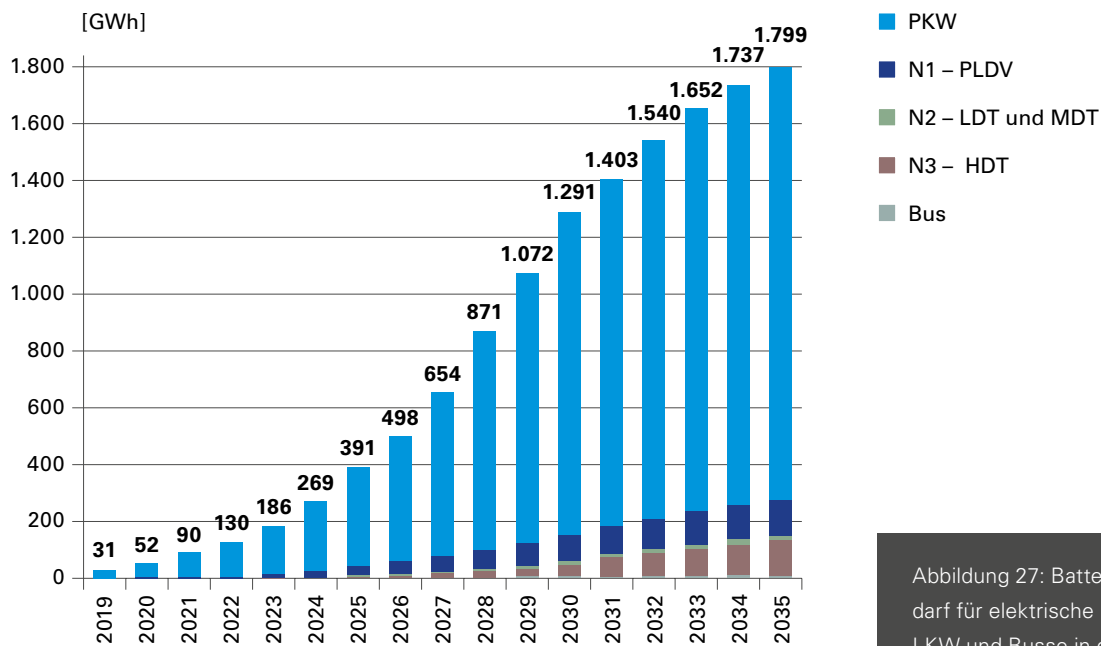
Abbildung 26: Markthochlauf der Neuzulassungen von elektrischen LKW und Bussen in der EU

Quelle: [eigene Darstellung]

Fahrzeugklasse	Ø Batteriegröße 2030 [kWh]
PKW – PHEV	18
PKW – BEV Kurzstrecke	65
PKW – BEV Langstrecke	100
N1 – BEV	65
N2 – PHEV	72
N2 – BEV	250
N3 – PHEV	115
N3 – BEV	500
Bus – PHEV	140
Bus – BEV	450

Quelle: |eigene Darstellung|

Tabelle 2: Durchschnittliche Batteriegröße je Fahrzeugklasse im Jahr 2030



Quelle: |eigene Darstellung|

Abbildung 27: Batteriebedarf für elektrische PKW, LKW und Busse in der EU

3.4 Hochlauf des EOL-Volumens

Zur Berechnung des EOL-Volumens ist die Batterielebensdauer entscheidend bzw. der Zeitpunkt, an dem die Batterie aus dem Fahrzeug demontiert wird. Da dieser Zeitpunkt höchst individuell und abhängig vom Nutzungs- und Ladeverhalten der Fahrzeugführer ist und da sich Unterschiede zwischen den Zellchemien ergeben, ist von einer breiten Streuung des EOL auszugehen.

In dieser Studie wird die Prognose für das erste Ende der Lebensdauer (EOFL) der Traktionsbatterie im Fahrzeug aufgrund bestehender Unsicherheiten in drei unterschiedlichen Szenarien modelliert (Szenario A: kurze Lebensdauer; Szenario B: mittlere Lebensdauer; Szenario C: lange Lebensdauer). Diese Einteilung ermöglicht eine detaillierte Analyse der Auswirkungen der Batterielebensdauer auf das Volumen der EOL-Batterien. Da die Traktionsbatterien in den einzelnen Fahrzeugklassen unterschiedlich stark beansprucht werden und sich die Ladezyklen pro Jahr unterscheiden, werden drei Zyklen-Cluster gebildet. PKW werden dem Cluster mit wenigen Zyklen, N1-Fahrzeuge dem Cluster mit mittleren Zyklen und N2/N3/Busse zum Cluster mit vielen Zyklen zugeordnet. Aus diesen Clustern ergeben sich unterschiedliche mittlere Lebensdauern für die Traktionsbatterie. Trotz dieser Unterschiede werden die Szenarien identisch benannt, um einen direkten Vergleich der kurzen, mittleren und langen Lebensdauern über alle Cluster hinweg zu ermöglichen. Die prozentuale Wahrscheinlichkeitsfunktion für das EOL wird in jedem Szenario durch eine Gaußverteilung mit einer Standardabweichung von zwei Jahren modelliert, um damit die erwartete Streuung des EOL zu berücksichtigen. Der Mittelwert dieser Gaußfunktion variiert je nach Szenario und innerhalb der drei definierten Cluster.

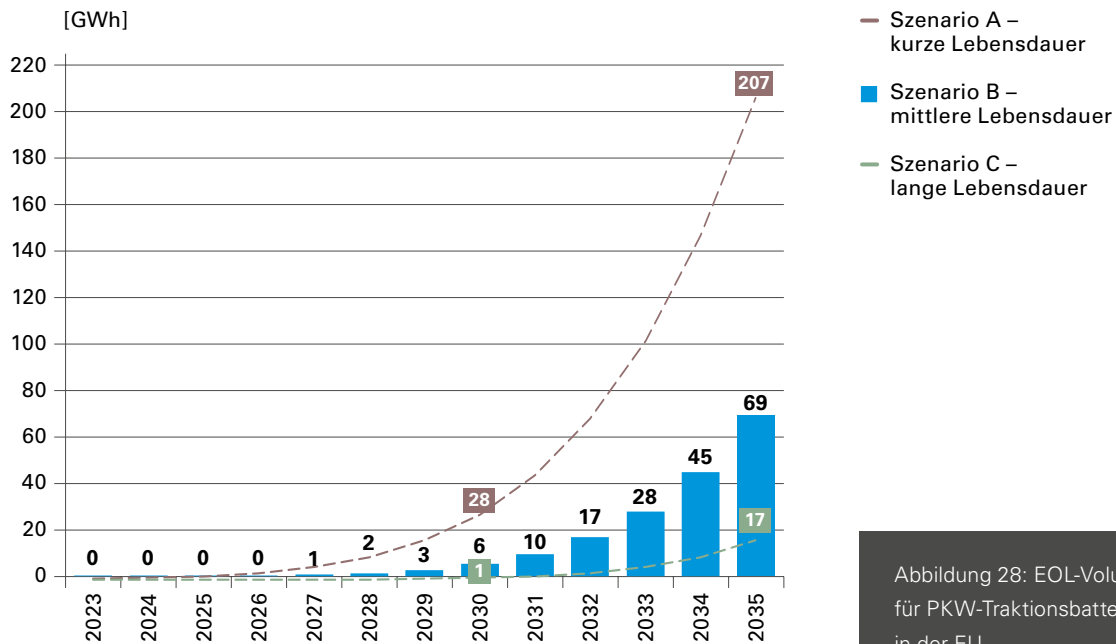
Szenario A – kurze Lebensdauer: Dieses Szenario modelliert kurze Lebensdauern für die Traktionsbatterien, indem sich der Mittelwert an den Garantien der OEM für die Batterien orientiert. Während OEM auf PKW-Traktionsbatterien im Schnitt ~8 Jahre und ~175.000 km gewährleisten, reduziert sich diese Gewährleistung für elektrische LKW auf ~5–7 Jahre bei steigender Gesamtleistung von 500.000–700.000 km [P3 Interview – Industrie, 2023]. Für PKW wird ein EOL-Zeitpunkt von im Mittel 12 Jahren gewählt, nachdem die Batterie einen SoH von 80% erreicht. Für PLDV wird in diesem Szenario eine mittlere Lebenserwartung für die Traktionsbatterien von 8 Jahren und für Fahrzeuge der Klasse N2/N3/Busse mit der höchsten Zyklenzahl pro Jahr werden 7 Jahre angenommen.

Szenario B – mittlere Lebensdauer: In diesem Szenario wird eine Lebensdauer der Traktionsbatterien in PKW von 15 Jahren prognostiziert. Dieses Szenario wird etwa auch in aktuellen Studien genutzt und von Experten in Interviews benannt [Fraunhofer, 2021; [P3 Interview – OEM, 2023]. Die mittlere Lebensdauer für die N1-Klasse wird mit 10 Jahren und für N2-/N3-Fahrzeuge sowie Busse mit 8 Jahren modelliert.

Szenario C – lange Lebensdauer: Das Szenario beschreibt eine lange Nutzung der Traktionsbatterien im Fahrzeug von im Mittel 18 Jahren für PKW, 12 Jahren in der N1-Klasse und 9 Jahren in den übrigen Klassen.

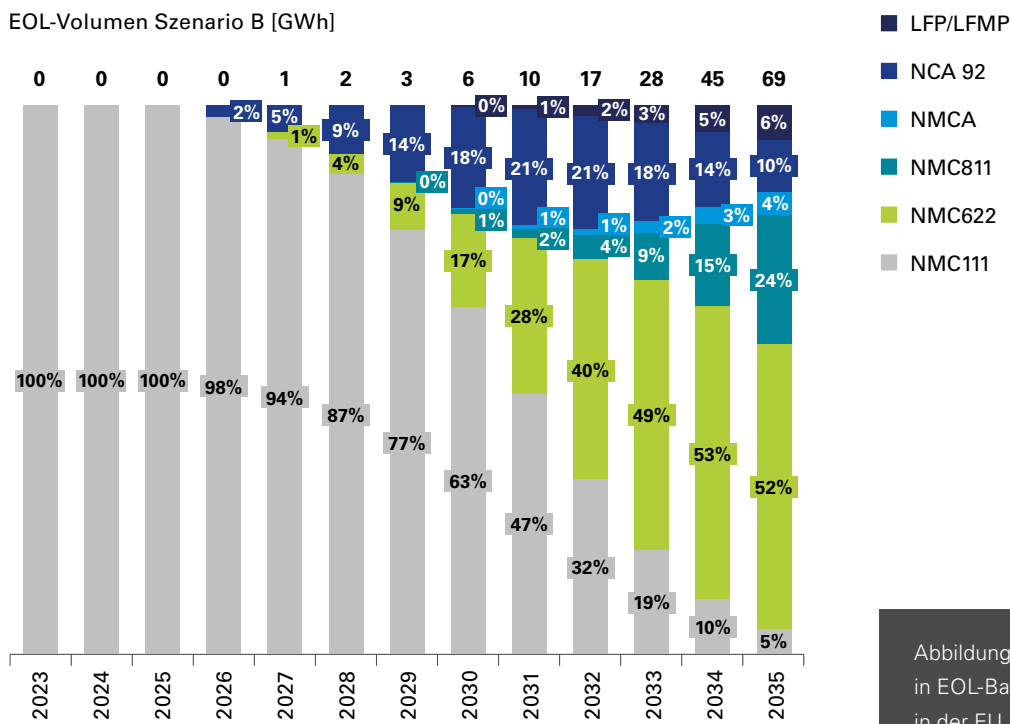
Aus den verschiedenen Szenarien wird der Hochlauf des EOL-Volumens bis 2035 modelliert. Das EOL-Volumen berücksichtigt dabei Rückläufer, die aufgrund des SOH oder aus anderen Gründen nach Ablauf der Garantie nicht mehr im Fahrzeug eingesetzt werden. Traktionsbatterien, die schon während der Garantiezeit einen Defekt haben und ausgetauscht werden müssen, werden mit 0,01% aller in Verkehr gebrachten Traktionsbatterien modelliert und für die weitere EOL-Betrachtung nicht berücksichtigt [Huang, 2021].

Die berechneten EOL-Volumina beziehen sich auf die ursprüngliche Kapazität mit 100% SOH. Der Kapazitätsverlust während der ersten Lebensdauer wird in der Diskussion zum Marktvolumen für Second-Life-Anwendungen berücksichtigt. Für PKW-Traktionsbatterien ist das EOL-Volumen in Abbildung 28 dargestellt. Demnach ist 2023 lediglich ein Volumen bis zu 0,38 GWh in Szenario A zu erwarten. Ein Volumen von 1 GWh pro Jahr wird erstmals 2025 in Szenario A, 2028 in Szenario B und 2031 in Szenario C erreicht. 2030 berechnet sich das EOL-Volumen auf 0,83–28,1 GWh (Szenario B: 5,61 GWh). Ab 2030 steigt das prognostizierte Volumen stark an und erreicht 2035 Werte zwischen 17 und 207 GWh (Szenario B: 69 GWh).



Quelle: [eigene Darstellung]

Abbildung 28: EOL-Volumen für PKW-Traktionsbatterien in der EU



Quelle: [eigene Darstellung]

Abbildung 29: Zellchemien in EOL-Batterien aus PKW in der EU

Aus den in Umlauf gebrachten PKW-Traktionsbatterien und deren spezifischer Zellchemie lässt sich der prozentuale Anteil der Zellchemien für EOL-Batterien aus PKW in der EU bestimmen. Eventuelle unterschiedliche Lebensdauern von Zellchemien wurden in diesem Modell nicht berücksichtigt, da die mittlere Verteilung der EOL-Rücklaufzeiten schon eine breite Streuung der Rückläufer berücksichtigt. Für Szenario B wurde das prozentuale Volumen der Zellchemien der EOFL-Batterien bestimmt und in Abbildung 29 dargestellt. Daraus ergibt sich, dass zwischen 2023 und 2025 lediglich NMC111-Zellchemien im gesamten EOL-Volumen enthalten sind. Ab 2026 nehmen Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Zellchemien (NCA-Zellchemien) im EOFL-Volumen zu und erreichen 2032 mit 21% ihren maximalen Anteil. Ab 2027 werden voraussichtlich auch Batterien mit NMC622-Chemie das EOFL erreichen und ab 2032 bis 2035 den größten Anteil am Volumen ausmachen. NMC811-Zellchemien werden ab 2030 im EOFL-Volumen erwartet, wobei deren Anteil kontinuierlich bis 2035 steigt. Sowohl NMCA- als auch LFP-Zellchemien erreichen bis 2035 einen maximalen Anteil von 6% im Jahr.

Die Ergebnisse zeigen, dass die EOL-Batterien aus PKW bis 2030 eine NMC-, NMCA- oder NCA-Zellchemie besitzen und LFP-Zellchemien erst ab 2031 in geringem Umfang ihr EOL erreichen. Für Second-Life-Anwendungen bedeutet dies, dass

EOL-Batterien aus PKW mit LFP-Zellchemie bis 2030 in keinem großen Maßstab zur Verfügung stehen werden, sondern vielmehr NMC111- und NMC622-Batterien ihr EOL erreichen, deren Technologie gegenüber Neubatterien dann schon veraltet sein kann. Generell wurde allerdings die Machbarkeit von Second-Life-Anwendungen sowohl für LFP- als auch für NMC-Zelltechnologie in Experteninterviews bestätigt, wobei LFP-Batterien eine bessere Zyklenstabilität und Sicherheit und damit längere Lebensdauer besitzen.

Das EOL-Volumen für Traktionsbatterien aus LKW und Bussen errechnet sich für das Jahr 2023 auf unter 0,46 GWh (vgl. Abbildung 30). Ein Volumen von 1 GWh pro Jahr wird, wie für PKW auch, 2025 in Szenario A erreicht. In Szenario B wird bereits im Jahr 2026 ein EOL-Volumen von über 1 GWh/Jahr errechnet, in Szenario C im 2028. Durch die prognostizierte kürzere Lebenserwartung der Batterien in LKW und Bussen steigt das modellierte EOL-Volumen schnell an und erreicht 2030 4–17 GWh (Szenario B: 8 GWh). 2035 ist im Szenario B schon mit einem Volumen von 63 GWh zu rechnen – das ist vergleichbar mit dem Volumen von PKW. Die modellierte Spannweite des Volumens errechnet sich für 2035 auf 37–96 GWh. Damit ist das minimal errechnete Volumen 2035 mit 37 GWh im Vergleich zu den PKW-EOL-Batterien mehr als doppelt so groß.

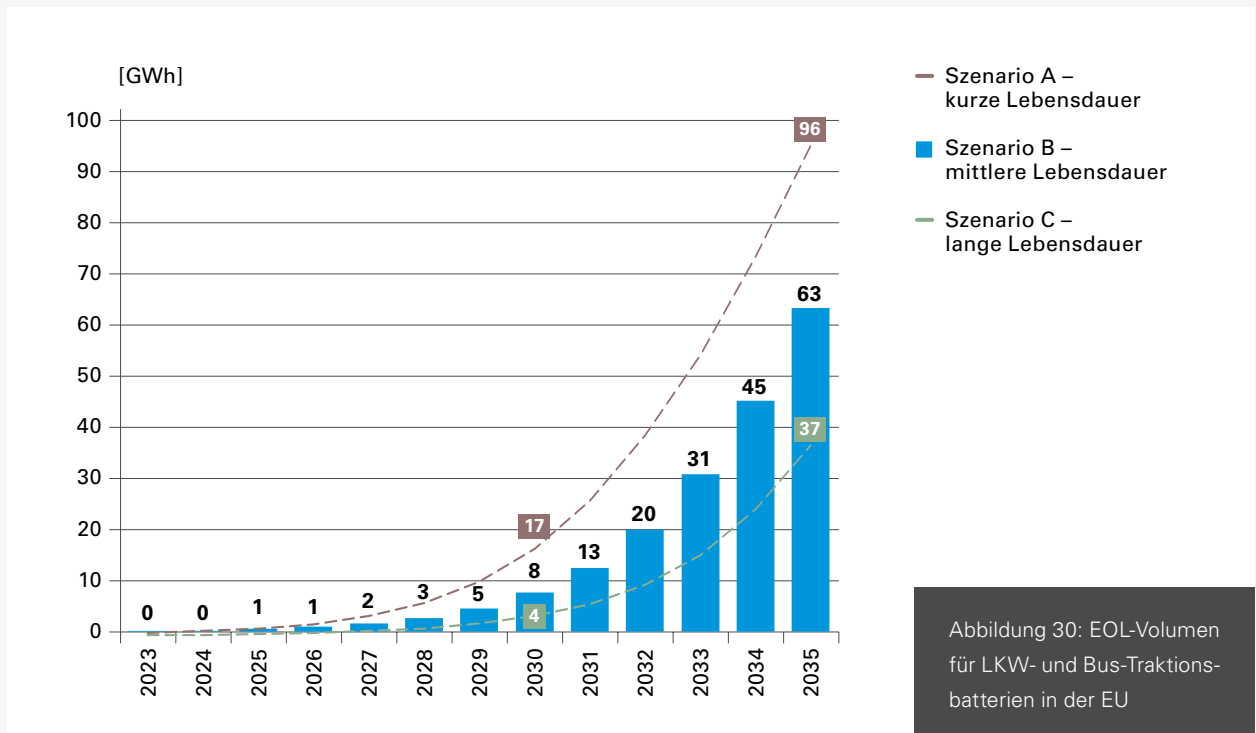


Abbildung 30: EOL-Volumen für LKW- und Bus-Traktionsbatterien in der EU

Quelle: eigene Darstellung

Aus den beschriebenen EOL-Volumen für die gezeigten Fahrzeugklassen berechnet sich das gesamte EOL-Volumen für automotiv Traktionsbatterien in der EU zwischen 2023 und 2035 (siehe Abbildung 31). Es beträgt im Jahr 2023 bis zu 0,84 GWh, steigt 2030 voraussichtlich auf 5–45 GWh an und erreicht 2035 54–302 GWh. In Szenario A, in dem kurze Lebensdauern modelliert werden, erreicht das EOL-Volumen erstmals 2024 über 1 GWh pro Jahr und steigt bis 302 GWh im Jahr 2035 an. In Szenario B ist das Rückläufer-Volumen verzögert und steigt erst ab 2026 über 1 GWh pro Jahr an. Während 2030 noch ca. 13 GWh erwartet werden, steigt das Volumen bis 2035 auf ca. 133 GWh an. Szenario C modelliert den Fall der längsten Lebensdauer und des spätesten EOL der Traktionsbatterien, sodass das Gesamtvolumen im Jahr 2028 über 1 GWh steigt und bis 2035 auf ca. 54 GWh ansteigt.

3.5 Batterienachfrage und -angebot in der EU

Um das Marktvolumen für Second-Life-Anwendungen diskutieren zu können, werden zunächst die europäische Batterienachfrage und das Angebot analysiert. Wie in Abbildung 32 dargestellt, steigt die prognostizierte Gesamtnachfrage in der EU von 218 GWh im Jahr 2023 auf 1.425 GWh im Jahr 2030

und 1.978 GWh im Jahr 2035 an. Dabei stammen über 90% der Nachfrage aus dem Automotive-Bereich. Die restliche Nachfrage setzt sich aus anderen Anwendungen wie ESS, Marine oder Elektrowerkzeugen zusammen, deren Marktanteile auf Basis der Datenbanken BloombergNEF und Marklines modelliert werden [BloombergNEF, 2023; Marklines, 2023]. Das Angebot an Batteriezellen in der EU wird auf Basis der öffentlich angekündigten Batteriezellproduktionskapazitäten in der EU modelliert. Diese steigen von 232 GWh im Jahr 2023 auf 1.737 GWh im Jahr 2030 und bleiben bis 2035 aufgrund fehlender weiterer Ankündigungen und Ramp-ups für diese Jahre konstant. Die angekündigten Zahlen ergeben einen steilen Hochlauf der Produktionskapazitäten, berücksichtigen dabei jedoch nicht: Ausrüstungsprobleme, Verzögerungen beim Beginn der Serienproduktion, einen Mangel an geschultem Personal, ein realistisches Ausmaß an Ausschuss, Lieferverzögerungen und Engpässe bei den Batteriekomponenten; sie beruhen im Allgemeinen auf niedrigen Risikobewertungen.

Um realistischere Zahlen zu erhalten, wurde ein Korrekturfaktor für ein wahrscheinlicheres Szenario entwickelt, der auf dem Wissen aus über 10 Jahren Beratungserfahrung im Bereich Li-Ionen-Batterien und Zellfertigung beruht. Demnach beträgt die realistische Zellproduktionskapazität im Jahr 2023

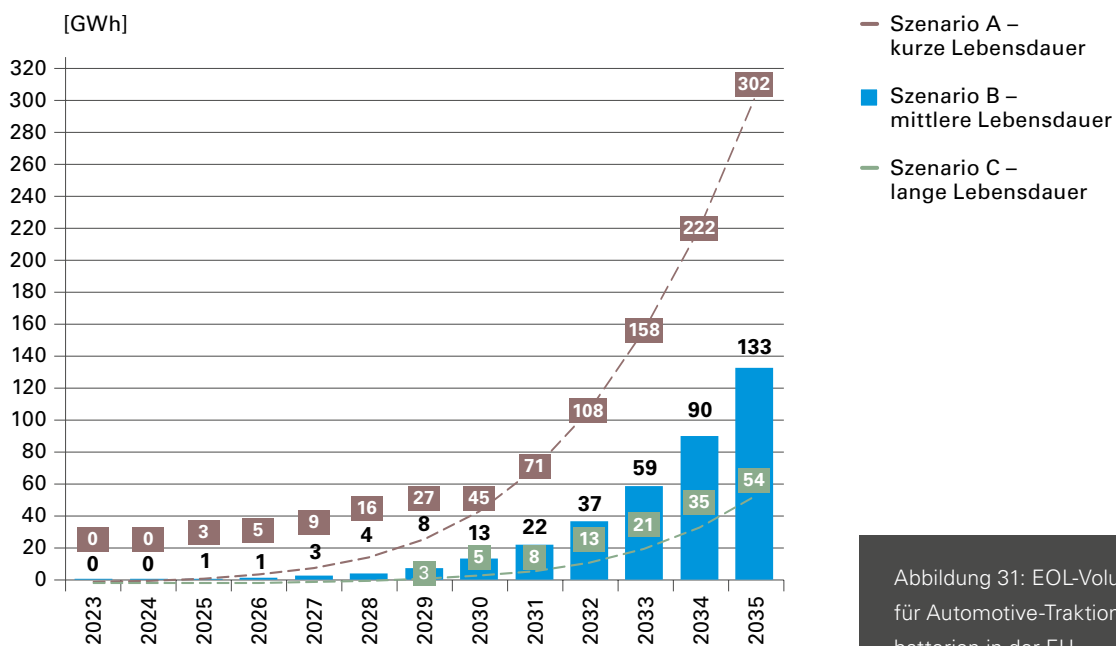


Abbildung 31: EOL-Volumen für Automotive-Traktionsbatterien in der EU

Quelle: [eigene Darstellung]

160 GWh, steigt 2030 auf 1.100 GWh an und erreicht 2033–2035 1.355 GWh. Damit übersteigt die gesamte Nachfrage nach Batterien in allen relevanten Segmenten die Zellproduktionskapazität der EU, die von P3 als realistisch betrachtet wird. In den Jahren 2033 bis 2035 ist die Nachfrage außerdem größer als alle bis dahin angekündigten Produktionskapazitäten in der EU.

Da die prognostizierte Nachfrage nach Batteriezellen das angekündigte und geprüfte Angebot in der EU übersteigt, werden Batteriezellen aus Nicht-EU-Ländern beschafft werden müssen. Eine Alternative stellen die EOFL-Batterien dar, die in einem Second-Life in Energiespeichersystemen (ESS) eingesetzt werden und damit die Zellproduktionsnachfrage entlasten könnten. Solche EOFL-Batterien sind aufgrund des niedrigeren SOH verglichen mit Neuzellen keine Alternative für Neufahrzeuge. Die Entwicklung der Nachfrage nach ESS ist in Abbildung 33 dargestellt. Die Werte basieren auf Daten von BloombergNEF [BloombergNEF, 2023] und dem P3 Marktmodell [P3 Marktmodell, 2023]. Während 2023 ein ESS-Bedarf von 7 GWh besteht, steigt dieser 2030 auf 47 GWh und bis 2035 auf 61 GWh an. Von den 47 GWh im Jahr 2030 entfallen ~72% auf die Energieversorgung und ~2% auf gewerbliche Speicher, die in Kapitel 1 als besonders geeignet für Second-

Life-Anwendungen identifiziert wurden. 24% des Bedarfs im Jahr 2030 werden für private Haushalte prognostiziert, 1% entfällt entfallen auf andere Anwendungen, die sich weniger für Second-Life eignen. Damit ergibt sich ein gesamtes potenzielles Marktvolumen für Second-Life-Anwendungen in der EU von ~35 GWh im Jahr 2030 und ~46 GWh im Jahr 2035.

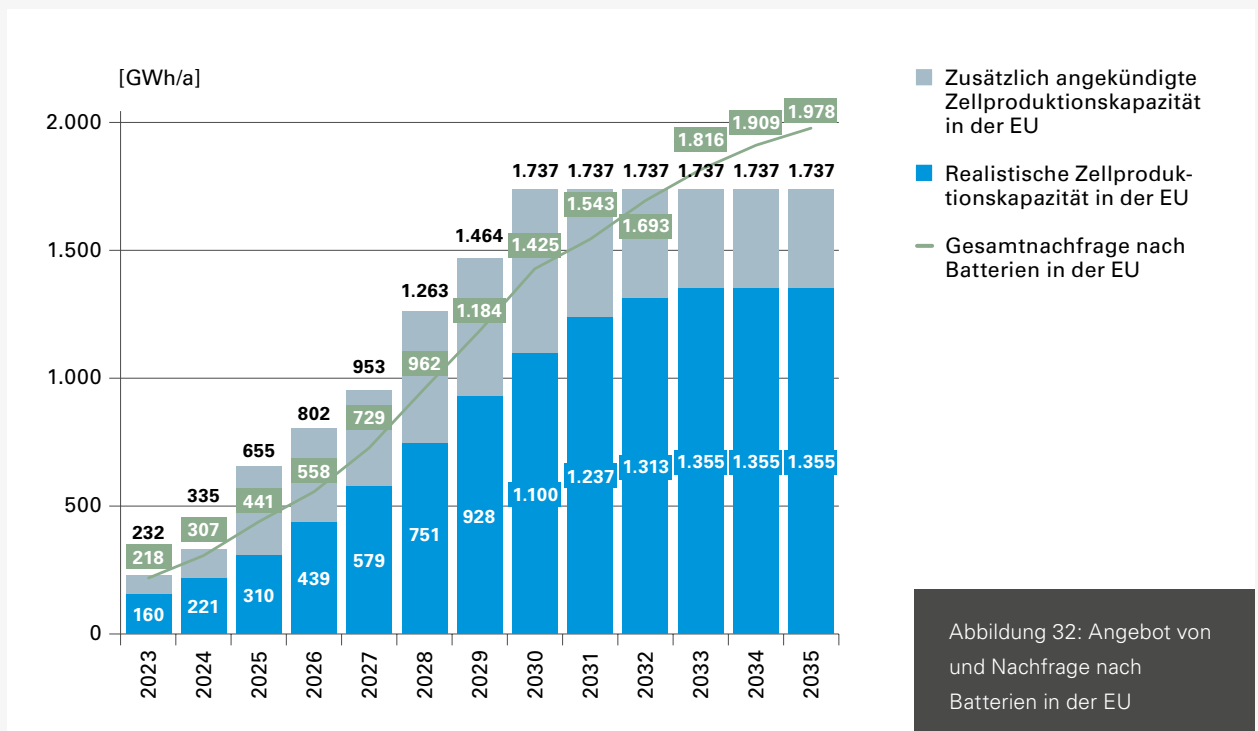


Abbildung 32: Angebot von und Nachfrage nach Batterien in der EU

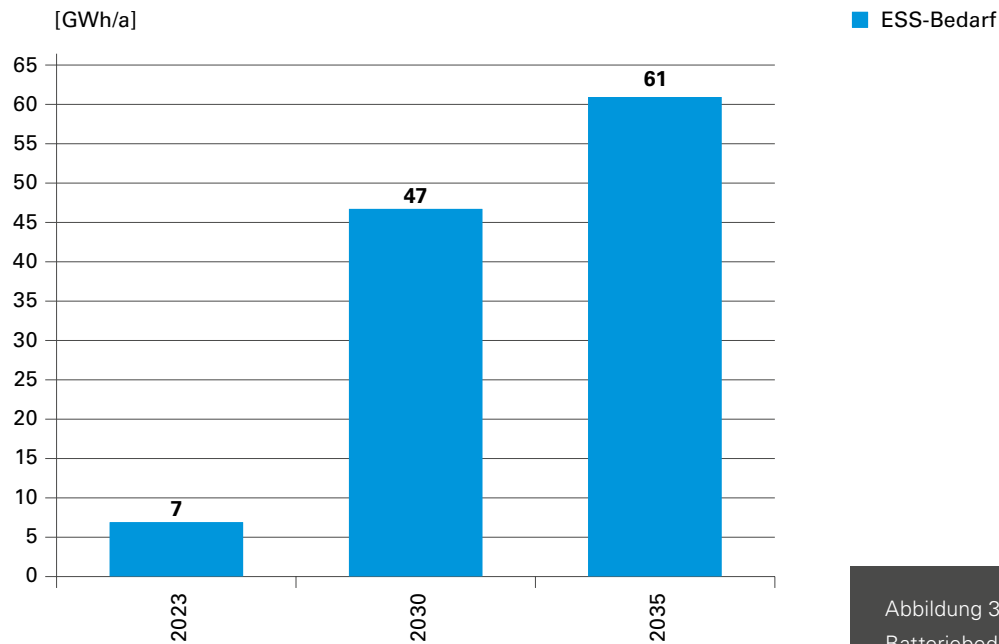


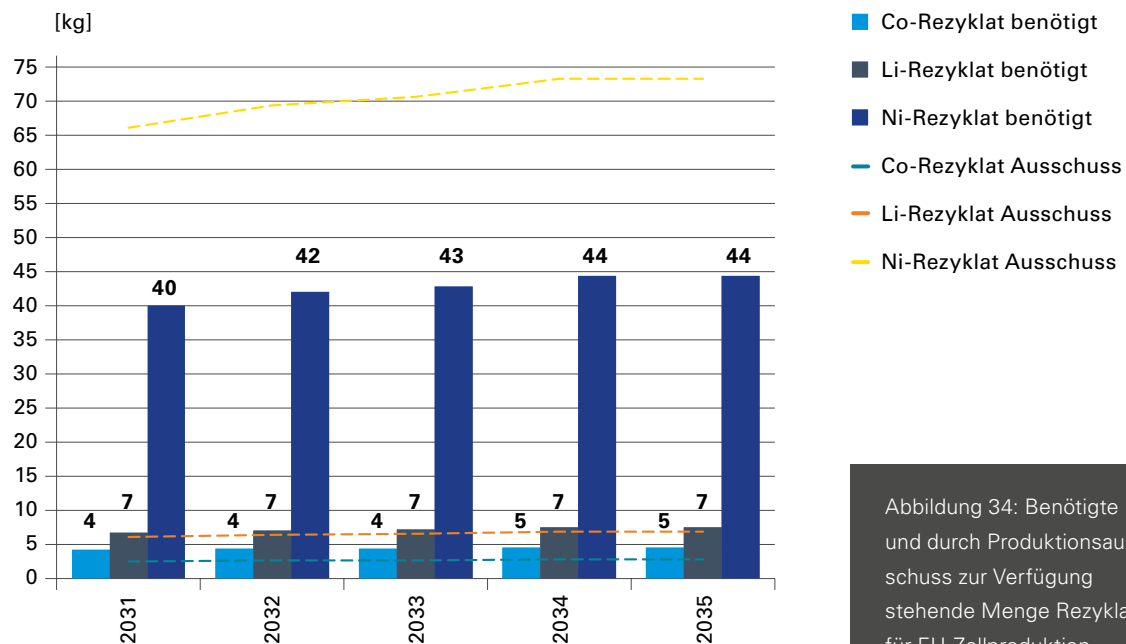
Abbildung 33: Europäischer Batteriebedarf für ESS

Quelle: (BloombergNEF, 2023; P3 Marktmodell, 2023); eigene Darstellung

3.6 Rezyklatquote der EU

Ab 2031 gelten laut der EU-Verordnung 2023/1542 Artikel 8, Absatz 2–3 in der EU Rezyklatquoten für die Herstellung von Neubatterien. Demnach ist ein Anteil von 16% Kobalt, 6% Lithium und 6% Nickel vorgesehen. Ab 2036 verschärfen sich diese Quoten für verwendetes Rezyklat in Neubatterien auf 26% Kobalt, 12% Lithium und 15% Nickel [EU, 2023 b]. Diese Quoten könnten sich auf die Entscheidung der OEM auswirken, EOFL-Batterien ohne ein Second-Life direkt dem Recycling zuzuführen, um damit schnell den Zugriff auf benötigtes Rezyklat sicherzustellen. Im Folgenden wird daher analysiert, welchen Einfluss die Rezyklatquote auf den Hochlauf von Second-Life-Anwendungen nehmen kann.

Ausgehend von den angekündigten und realistischen Produktionskapazitäten, den jeweiligen Zellchemiesplits und stofflichen Zusammensetzungen der Zellchemien wird die benötigte Rohmaterialmenge für Kobalt, Lithium und Nickel für 2031–2035 bestimmt. Auf dieser Basis und der vorgeschriebenen Rezyklatquote wird die Masse an benötigtem Rezyklat berechnet (siehe Abbildung 34). Für die angekündigte und als realistisch eingestufte Zellproduktion in der EU werden 4–5 kt Kobalt-, 7 kt Lithium- und 40–44 kt Nickelrezyklate zwischen 2031 und 2035 benötigt. Unter Berücksichtigung einer durchschnittlichen üblichen Produktionsausschussquote der Batteriezellfabriken von 11% sowie der von der EU vorgeschriebenen Recyclingquoten von 90% für Kobalt und Nickel und 50% für Lithium ergeben sich Rezyklatmengen aus Produktionsausschuss von 3 kt für Kobalt, 6–7 kt für Lithium und 66–73 kt für Nickel [EU, 2023 b].



Quelle: |eigene Darstellung|

Abbildung 34: Benötigte und durch Produktionsausschuss zur Verfügung stehende Menge Rezyklat für EU-Zellproduktion

Unter diesen Voraussetzungen kann der benötigte Rezyklatanteil durch Produktionsausschuss für Kobalt zu 62%, für Lithium zu 92% und für Nickel zu 165% erfüllt werden. Das fehlende Rezyklat, das nicht durch Produktionsausschuss aus der Zellfertigung gewonnen werden kann, kann entweder aus Verbraucherabfällen, anderen Ausschüssen oder EOFL-Batterien stammen. Das zur Verfügung stehende EOL-Volumen in Szenario B und die darin enthaltenen Rohstoffe allein aus PKW würden ausreichen, um die fehlenden Rezyklatmengen zu kompensieren. Dazu müssten im Jahr 2031 unter Berücksichtigung von Szenario B 94% des EOL-Volumens aus PKW-Traktionsbatterien dem Recycling zugeführt werden. Der benötigte Anteil würde sich auf 20% bis 2035 reduzieren. Damit ergibt sich das zur Verfügung stehende EOL-Volumen aus Szenario B für Second-Life-Anwendungen nach Abzug des für das direkte Recycling vorgesehenen Volumens wie in Abbildung 35 (grün gestrichelt) dargestellt. Das EOL-Volumen für Second-Life-Anwendungen muss, um mit der Batterienachfrage vergleichbar zu sein, auf die tatsächliche Kapazität der EOFL-Batterien normiert werden. Diese wird mit 80% für EOFL-Batterien angenommen und ist in Abbildung 35 (grün) dargestellt.

Es gilt zu beachten, dass die geforderten Rezyklatquoten ab 2036 weiter verschärft werden und für Kobalt ein Anteil von 26% gefordert wird. Dieser Anteil wird durch Produktionsausschuss in der Batteriezellproduktion nicht gedeckt werden können, sodass weitere Quellen, wie EOFL-Batterien, vermutlich direkt dem Recycling zugeführt werden müssen und das verfügbare EOFL-Volumen weiter reduzieren.

3.7 Schlussfolgerungen für den Markthochlauf und das potenzielle Marktvolumen von Second-Life-Anwendungen sowie Auswirkungen auf das Recycling

Nach Analyse des EOL-Volumens in verschiedenen Szenarien, der Modellierung des Batteriebedarfs und der Batterienachfrage in der EU sowie einer Untersuchung der Rezyklatquote in Bezug auf das EOL-Volumen, werden in diesem Kapitel Schlussfolgerungen für den Markthochlauf von Second-Life-Anwendungen getroffen sowie Auswirkungen diskutiert.

Die Einflüsse des Recyclings und der Rezyklatquote auf das zur Verfügung stehende Volumen für Second-Life-Anwendungen wurden bereits in Abbildung 35 berücksichtigt. Es ist da-

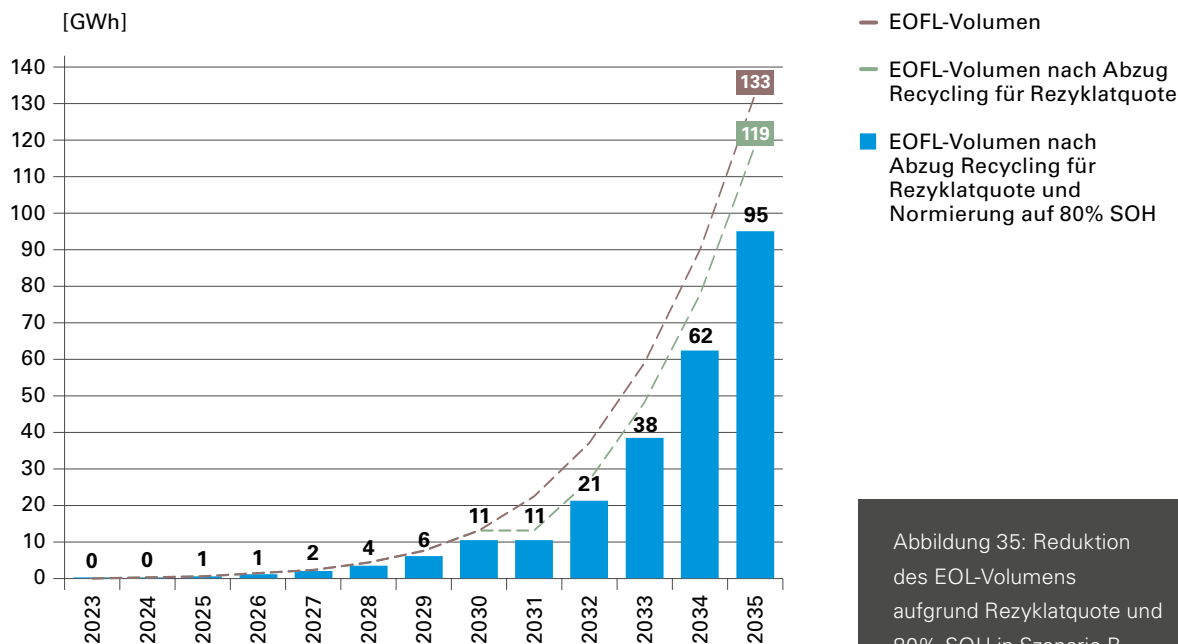


Abbildung 35: Reduktion des EOL-Volumens aufgrund Rezyklatquote und 80% SOH in Szenario B

Quelle: [eigene Darstellung]

von auszugehen, dass darüber hinaus weitere EOFL-Batterien direkt dem Recycling zugeführt werden müssen, da sich einige der Batterien nicht für ein Second-Life eignen oder sich nicht im Wertstoffkreislauf der EU befinden. Folgende Einflussfaktoren wirken sich direkt auf die Verfügbarkeit von EOFL-Batterien für Second-Life-Anwendungen aus und reduzieren damit das zur Verfügung stehende Volumen.

1. Unterschiedliche Batteriepack- und Moduldesigns

sowie Sonderformen wie „Cell-to-Pack“ oder „Cell-to-Chassis“ erschweren die Integration von EOFL-Batterien oder machen eine Integration unmöglich. Aus Experteninterviews geht hervor, dass hohe Volumina der gleichen Batteriedesigns zur Verfügung stehen müssen, um den Integrationsaufwand in der Second-Life-Anwendung so gering wie möglich zu gestalten [Experteninterview Second-Life-Akteur, 2023].

2. Falls die EOFL-Batterie nicht den spezifischen **Batterieanforderungen** des Umwidmungsbetriebs entspricht, ist eine Berücksichtigung der Batterie für ein Second-Life nicht möglich. Der SOH der Batterie in Kombination mit der Energiedichte ist entscheidend für die Nutzung in einer Second-Life-Anwendung. Es ist nicht auszuschlie-

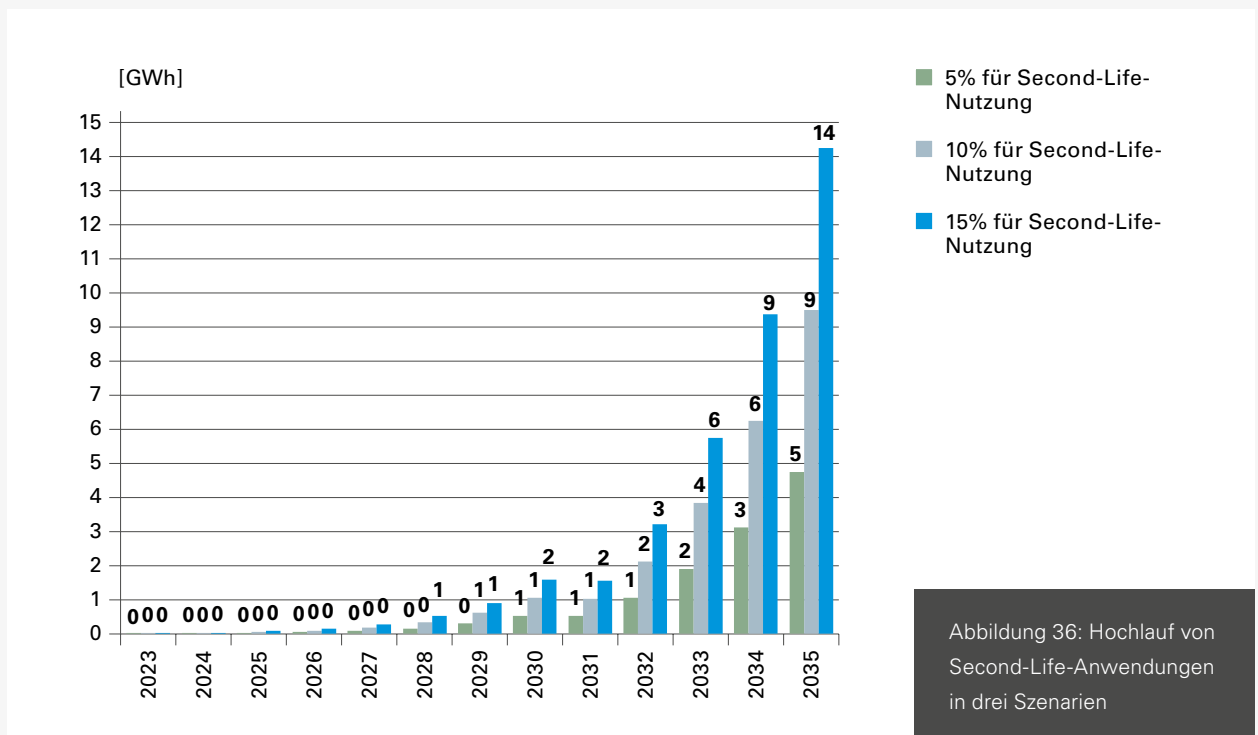
ßen, dass der Fahrzeugbesitzer eine verringerte Kapazität und damit reduzierte Reichweiten toleriert und die Traktionsbatterie ihr EOL mit einer deutlich geringeren Kapazität als 80% erreicht, in der sie aus ökonomischen Aspekten nicht mehr für eine Second-Life-Anwendung eingesetzt werden kann. Weitere Anforderungen werden an die Kompatibilität mit Peripheriegeräten, die Datenweitergabe und den Zugriff auf das BMS sowie auch an bestimmte Zellchemien gestellt. Wenn diese Anforderungen nicht erfüllt sind, kann dies entweder zum vollständigen Ausschluss der Batterie führen oder in einem verringerten Ankaufspreis für den Second-Life-Umwidmungsbetrieb resultieren. Jedoch ist dieser Preis ständig im Wettbewerb zum Recyclingwert und kann nicht willkürlich festgelegt werden.

3. Der **Fahrzeugverbleib** am Ende des Lebenszyklus in Europa ist in den letzten Jahren bis 2022 in durchschnittlich 33% der Fälle unbekannt gewesen. Außerdem wurden im Schnitt 9% der Fahrzeuge (1 Mio. von 11,4 Mio. pro Jahr) am Ende ihres Lebenszyklus aus der EU exportiert [e-mobil BW, 2023]. Sollte sich dieser Trend für elektrische PKW fortsetzen und die Batterie nicht in der EU, sondern in Drittstaaten aus dem Fahrzeug am EOL

demontiert werden, würde dies dazu führen, dass der Wertstoffkreislauf der EU durchbrochen würde und weniger EOL-Batterien in der EU zur Verfügung ständen.

4. Die **Rezyklatquote** der EU kann nicht allein durch Produktionsausschuss aus der Batteriezellfertigung in der EU erfüllt werden, sodass EOFL-Batterien direkt dem Recycling zugeführt werden. **Sinkende Produktionsausschussraten** würden die Nachfrage nach EOFL-Batterien weiter verstärken. Spätestens ab 2036 ist mit einer deutlich erhöhten Nachfrage nach Rezyklat aus EOFL-Batterien zu rechnen, sodass OEM das Recycling der Second-Life-Anwendung vorziehen könnten, um so selbst auf die Rohstoffe zuzugreifen. Damit könnte für den OEM ein geschlossener Batterierohstoffkreislauf entstehen.
5. **Batteriedefekte** nach Ablauf der Garantie, die etwa durch einen Unfall oder fehlerhafte Batterien verursacht werden können, mindern das verfügbare Volumen für Second-Life-Anwendungen.

Die Faktoren, die den Hochlauf von Second-Life-Anwendungen beeinflussen, sind komplex. Drei Szenarien bilden die verschiedenen Möglichkeiten ab (siehe Abbildung 36). Die prozentualen Anteile für das Second-Life-Volumen werden zwischen 5% und 15% der gesamten EOL-Volumen definiert, die als realistisch betrachtet werden [Fraunhofer, 2021]. Während im 5%-Szenario die definierten Faktoren einen großen negativen Einfluss auf die Verwendung und Verfügbarkeit der EOFL-Batterien für Second-Life-Anwendungen haben, sind die Einflüsse im 15%-Szenario geringer und es können generell mehr EOFL-Batterien einem Second-Life zugeführt werden. Mit den theoretisch zur Verfügung stehenden EOFL-Batterien, die sich für ein Second-Life eignen, könnten 2030 2–5% und 2035 10–31% (je nach gewähltem Szenario) des Bedarfs für Energiespeichersysteme in der EU gedeckt werden. Es ist hervorzuheben, dass nicht nur die technischen Voraussetzungen für die erfolgreiche Verwendung der EOFL-Batterien in einem Second-Life gegeben sein müssen, sondern auch ökonomische, ökologische und politische Faktoren Einfluss auf den Hochlauf der Second-Life-Anwendungen nehmen werden.



4.

Handlungsempfehlungen für Politik und Industrie

Im Rahmen der Diskussion um die Potenziale von Second-Life-Batterien sind sowohl wirtschaftliche als auch politische Maßnahmen von Bedeutung, um die Kreislaufwirtschaft und die damit verbundenen Geschäftsmodelle zu fördern. Im Folgenden werden Handlungsempfehlungen ausgearbeitet, die sich an Entscheidungsträger in der Politik sowie Akteure in der Wirtschaft richten. Diese Empfehlungen sollen dazu beitragen, die Potenziale von Second-Life-Anwendungen auszuschöpfen.

4.1 Handlungsempfehlungen für die Industrie

In den vorangehenden Kapiteln wurde aufgezeigt, dass der Einsatz von Second-Life-Batterien im Vergleich zu First-Life-Batterien, die direkt dem Recycling zugeführt werden, das Potenzial aufweist, Materialien aus wertvollen Rohstoffen länger in der Nutzung zu halten und den ökologischen Fußabdruck einer Anwendung zu reduzieren, und gleichzeitig ökonomische Vorteile bieten kann. Allerdings wird die wirtschaftliche Attraktivität von Second-Life-Anwendungen durch zwei entscheidende Faktoren beschränkt: zum einen durch den Rückgang der Preise von First-Life-Batterien und zum anderen durch den Recyclingwert von Batterien. Diese Entwicklungen schränken das wirtschaftliche Fenster für Second-Life-Anwendungen ein und unterstreichen die Notwendigkeit eines effizienten Geschäftsmodells, das sämtliche Akteure berücksichtigt, um die Wirtschaftlichkeit dieser Anwendungen aufrechtzuerhalten. Damit die Potenziale von Second-Life-Anwendungen voll ausgeschöpft werden können und zu einem geschlossenen Wertstoffkreislauf innerhalb der EU beitragen, sind die aktuell vorhandenen Hürden abzubauen und Second-Life-Anwendungen als Option zum direkten Recycling nach der First-Life-Anwendung zu etablieren.

Seitens der OEM gilt es, einen geschlossenen Wertstoffkreislauf innerhalb der EU zu etablieren, um den Anforderungen der EU gerecht zu werden, bis 2050 eine Gesellschaft mit geschlossenen Stoffkreisläufen aufzubauen und nachhaltige Praktiken zu fördern. Eine Schlüsselstrategie zur Realisierung dieser ambitionierten Ziele besteht in der Etablierung von Partnerschaften zwischen OEM und spezialisierten Unternehmen für die Umwidmung sowie das Recycling von Batterien. Solche Kooperationen ermöglichen es, Batterien nach ihrem ersten Lebenszyklus in Elektrofahrzeugen einer Zweitnutzung zuzuführen und anschließend, am Ende ihres Second-Life-Einsatzes, die wertvollen Rohstoffe durch Recyclingprozesse zurückzugewinnen. Durch diesen geschlossenen Kreislauf (oft als „Closed-Loop“-System bezeichnet) können OEM eine nachhaltige Kontrolle über die Batterien behalten, was nicht nur ökologischen, sondern auch ökonomischen Mehrwert für die beteiligten Akteure schafft. Diese Partnerschaften bieten zudem die Plattform, um Produkthaftungsfragen präzise zu adressieren. Indem klare Vereinbarungen und Richtlinien zwischen OEM und Umwidmungsbetrieb etabliert werden, können OEM-Traktionsbatterien offiziell für den Einsatz in Second-Life-Anwendungen freigegeben werden. Dies minimiert rechtliche Unsicherheiten und fördert die Verwendung von Batterien in stationären Speicheranwendungen, indem es einen regulierten Rahmen für die Nutzung von End-of-First-Life-Batterien bietet. Ohne derartige kooperative Ansätze könnten der Einsatz und die Umwidmung von Batterien am Ende ihres ersten Lebenszyklus in neue Anwendungen von OEM eingeschränkt oder aufgrund erhöhter juristischer Risiken gänzlich untersagt werden.

Batteriepacks sollten bereits im Produktentstehungsprozess für ein Second-Life ausgelegt werden. Dazu gehört, dass Anschlüsse, Stecker und Sensoren in der Second-Life-Anwendung weiterverwendet werden können und der Demontage-

aufwand des Packs auf Modulebene etwa durch lösbare Verbindungen vereinfacht wird. Eine Standardisierung von Komponenten wie Anschlüssen würde dazu beitragen, dass der Umwidmungsaufwand für verschiedene Batteriepacks vereinfacht wird.

Das Batteriemanagementsystem (BMS) stellt einen zentralen Bestandteil der Batteriesteuerung dar. Derzeit wird es oft von Second-Life-Herstellern ersetzt. Damit das ursprüngliche BMS wiederverwendet werden kann, sollten OEM den Zugang zu diesem System, einschließlich der Kommunikation, ermöglichen. Dies könnte in vertraglich geregelten Partnerschaften realisiert werden, um geschütztes Know-how nicht öffentlich zugänglich zu machen.

Die Verbesserung der Datentransparenz auf Batterieebene sollte für sämtliche Akteure innerhalb der Wertschöpfungskette angestrebt werden. In diesem Zusammenhang kann der geplante Batteriepass der EU, der ab dem Jahr 2027 eingeführt wird, als wertvolles Instrument dienen. Der Batteriepass wird Informationen über die Batterie für verschiedene Akteure in der Wertschöpfungskette bereitstellen. Um den Aufwand für Tests nach der Demontage der Batterie aus dem Fahrzeug zu minimieren, sollte der Batteriepass zumindest Informationen über die verbleibende Restkapazität (SOH) enthalten. Idealerweise sollte er zusätzlich Prognosen zur verbleibenden Restlebensdauer für verschiedene Anwendungen sowie die Empfehlung für ein Recycling- oder Second-Life-Szenario ermöglichen beziehungsweise die Daten für eine externe (KI-) Analyse bereitstellen. Hierfür müssen die OEM technische Möglichkeiten entwickeln und im Batteriemanagementsystem umsetzen, um Daten aus dem ersten Lebenszyklus zu messen, transparent darzustellen und mit den relevanten Second-Life-Akteuren teilen zu können. Um die Implementierung und Standardisierung der Verfahren zu gewährleisten, ist es empfeh-

lenswert, diese als Anforderung in den Arbeitskreis für die Entwicklung des digitalen Batteriepasses einzubringen und sie in den entsprechenden Regelwerken zu verankern. Aufgrund der Verpflichtung der OEM, die Vorgaben des digitalen Batteriepasses umzusetzen, würde dies die erforderliche Datentransparenz schaffen.

Umwidmungsbetriebe sollten den Prozess der Umwidmung kontinuierlich weiterentwickeln und dabei in Betracht ziehen, ganze Batteriepacks für die Weiterverwendung zu nutzen, da der Umwidmungsaufwand in solchen Fällen minimiert wird. Die Umwidmung auf Modulebene kann durch Fortschritte in der automatischen Demontagetechnik vereinfacht werden.

Die Fachkräftequalifizierung ist für die gesamte Kreislaufwirtschaft von Bedeutung und sollte von allen beteiligten Akteuren in der Wertschöpfungskette durch Aus- und Fortbildungen angetrieben werden. Schon für die Demontage der Batterie aus dem Fahrzeug wird eine Hochvoltausbildung benötigt, die in vielen Betrieben bislang nicht vorhanden ist. Weitere spezielle Kenntnisse sind für die Umwidmung der Batterie, den Umgang mit dem Batteriemanagementsystem und dessen Programmierung sowie für die Auslegung, das Testing und die Wartung der Systeme notwendig. Hierfür werden zukünftig ausgebildete Fachkräfte benötigt. Vor allem Unternehmen selbst sollten in die Weiterbildung und Qualifizierung ihrer Mitarbeitenden investieren, um sicherzustellen, dass zusätzliche Kapazitäten in relevante Themenbereiche eingeführt werden. Dies erfordert, dass erfahrene Angestellte, die sich bereits mit den entsprechenden Lehrinhalten vertraut gemacht haben, auch Zeitressourcen erhalten, um ihr Wissen effektiv an andere Teammitglieder weiterzugeben. Vor allem in der Ausbildung neuer Mitarbeitender sollten Aspekte der Kreislaufwirtschaft sowohl im Ausbildungsbetrieb als auch in der Berufsschule in den Lehrplan integriert werden. Angesichts der schnellen tech-

nologischen Entwicklungen im Bereich von Batterietechnologie und Kreislaufwirtschaft sollten Fachkräfte ermutigt werden, sich kontinuierlich weiterzubilden. Dies kann durch Online-Kurse, Workshops und Seminare unterstützt werden, die aktuelle Trends und technologische Fortschritte der Technik abdecken. Außerdem sollte die Zusammenarbeit zwischen Ausbildungseinrichtungen, Unternehmen und Forschungsinstituten gefördert werden, um den Austausch von Wissen und Best Practices zu erleichtern und Auszubildenden Zugang zu den neuesten Technologien und Forschungsergebnissen zu bieten. Dies kann etwa durch vom Land initiierte Programme geschehen.

Derzeit beziehen Hersteller von Second-Life-Anwendungen hauptsächlich Batterien aus Prototypen- und Testfahrzeugen sowie aus nicht mehr für den automobilen Einsatz geeigneten Lagerbeständen von OEM. Obwohl steigende Volumina an ausgedienten End-of-First-Life-Batterien erst in den kommenden Jahren erwartet werden, sollten aktuelle Projekte zur Weiterentwicklung und Optimierung der gesamten Prozesse für die Second-Life-Nutzung genutzt werden. In diesem Zusammenhang ist es empfehlenswert, dass OEM Obsolete-Batterien aus ihren Lagerbeständen sowie Batterien, die für den After-Sales vorgehalten werden, für stationäre Applikationen freigeben. Dies ermöglicht die frühzeitige Erprobung und Validierung der Integration von Automobilbatterien in stationäre Anwendungen. Durch diese Maßnahme können eventuell bestehende Hemmnisse identifiziert und abgebaut werden, bevor größere Mengen von ausgedienten Batterien verfügbar werden.

Betriebe, die sich auf die Umwidmung von Batterien für Second-Life-Anwendungen spezialisieren, sollten neben PKW-Traktionsbatterien auch jene aus LKW und Bussen berücksichtigen. Der Vorteil von Batterien aus LKW und Bussen liegt darin, dass sie aufgrund ihrer kürzeren erwarteten Einsatzdauer im Fahrzeug über eine aktuellere Zelltechnologie verfügen. Des Weiteren lässt sich die Verfügbarkeit von End-of-First-Life-Batterien aus dem Bus- und LKW-Sektor besser planen, so dass entsprechende Volumina vertraglich gesichert werden können, was eine kontinuierliche Versorgung der Umwidmungsbetriebe gewährleistet. Batteriepacks aus LKW und Bussen bieten zudem eine höhere Kapazität im Vergleich zu jenen aus PKW, wodurch für die Integration von End-of-First-Life-Batterien in stationäre Systeme prinzipiell weniger Packs benötigt werden. Die Herausforderung seitens OEM, Kontrolle über PKW-Batterien zu behalten, ist größer als im LKW- und Bus-Sektor und nach 15 Jahren im Einsatz könnten PKW-Bat-

terien technologisch zu veraltet sein, um mit neueren Batterien konkurrieren zu können.

Zusätzlich wird erwartet, dass die Variantenzahl unterschiedlicher Batteriesysteme in LKW- und Busfahrzeugsegmenten aufgrund der geringen Anzahl von Herstellern im Vergleich zu PKW-Herstellern niedriger sein wird. Dies bedeutet, dass eine größere Anzahl identischer Batterien für die Umnutzung zur Verfügung stehen wird, was die Skalierung von Second-Life-Anwendungen erleichtert. Außerdem werden für das Segment der elektrischen LKW und Busse zukünftig LFP-Zellchemien erwartet, die sich aufgrund ihrer Zyklusstabilität und ihres geringen Recyclingwerts eher für Second-Life-Anwendungen eignen könnten.

4.2 Handlungsempfehlungen für die Politik

Die neue Batterieverordnung der EU, die am 28.07.2023 veröffentlicht wurde und am 18.02.2024 in allen EU-Mitgliedsstaaten in Kraft treten wird, hat bereits Richtlinien zur Wiederverwendung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien festgelegt. Gemäß Artikel 56 Absatz 2 gilt eine erweiterte Herstellerverantwortung für Akteure, die erstmals zur Umnutzung vorbereitete, umgenutzte oder wiederaufgearbeitete Batterien auf den Markt bringen [EU, 2023b]. Diese Akteure werden als Hersteller betrachtet und tragen somit eine Verantwortung für die ordnungsgemäße Entsorgung der Batterien. Es ist jedoch zu beachten, dass die Verordnung keine konkreten Ziele oder Quoten für Second-Life-Anwendungen festlegt.

Um Second-Life-Batterien nutzen zu können, muss die Rückführung von Traktionsbatterien in den europäischen Wertstoffkreislauf nach ihrem ersten Lebenszyklus gewährleistet werden, indem verhindert wird, dass nicht fahrtaugliche Elektrofahrzeuge in Nicht-EU-Länder exportiert werden. Dies kann durch die Einführung subventionierter Verschrottungsprogramme und die Festlegung klarer Regeln für den Export von ausgedienten und schrottreifen Fahrzeugen erreicht werden. Die EU hat sich zum Ziel gesetzt, die Richtlinie zu End-of-Life-Fahrzeugen (ELV) zu überarbeiten und bereits am 13.07.2023 einen Vorschlag für die neue ELV-Verordnung unterbreitet. Dieser sieht ein verbessertes Design bereits in der Produktdefinitionsphase von Fahrzeugen zur besseren Demontierbarkeit, den Einsatz von recycelten Materialien in Neufahrzeugen, ein Verbot für die Ausfuhr von Fahrzeugen ohne Verkehrstauglichkeit, besseres Recycling der einzelnen Fahrzeugkomponenten, eine erweiterte Herstellerverantwortung

und den Einschluss von weiteren Fahrzeugen wie Bussen und Motorrädern vor. Um Traktionsbatterien im europäischen Kreislauf zu halten, sollte der von Interessensgruppen hart umkämpfte Vorschlag der EU in den o.g. Punkten in den kommenden Beratungen bestätigt werden.

Die von der EU festgelegten Quoten für Recyclingmaterial in Neubatterien werden voraussichtlich zwischen 2031 und 2035 durch den Einsatz von Materialien aus der Produktion europäischer Batteriezellfabriken sowie ausgedienten EOFL-Batterien erfüllt werden können. Ab 2036 könnte jedoch aufgrund einer Verschärfung dieser Quoten ein größerer Anteil an EOFL-Batterien für das Recycling benötigt werden, was potenziell Geschäftsmodelle im Zusammenhang mit Second-Life-Anwendungen beeinträchtigen könnte. Deshalb sollte eine Verschärfung der festgelegten Rezyklatquote mit einer erweiterten Erfüllungsoption für den Verpflichteten einhergehen, indem Volumina für Second-Life-Anwendungen berücksichtigt werden.

Der Batteriepass sollte als ein wichtiges Instrument zur effizienten Förderung von Second-Life-Anwendungen genutzt und entsprechend gestaltet werden. Dies beinhaltet die Gewährung von Zugang zu Daten aus dem ersten Lebenszyklus der Batterie für Umwidmungsbetriebe, um den Zustand der Batterie beurteilen zu können und somit zusätzliche Tests in den Umwidmungsbetrieben zu reduzieren oder zu vermeiden. Hierfür sind klare Regelungen erforderlich, die seitens der Politik mit der Einführung des Batteriepasses im Jahr 2027 umgesetzt werden sollten.

Ziel politischer Entscheidungsträger sollte es sein, die Kreislaufwirtschaft von Traktionsbatterien in der EU zum Erfolg zu bringen und die Förderung von Forschungsinitiativen, Pilot- und Industrieprojekten zu unterstützen, die sich mit der Weiterentwicklung von Second-Life-Anwendungen und der Kreislaufwirtschaft beschäftigen, um auf die erwarteten steigenden Rückläufe ab 2030 angemessen vorbereitet zu sein.

Auf EU- und Bundesebene gibt es bereits mehrere geförderte Forschungsprojekte zu Second-Life-Anwendungen in verschiedenen Themenschwerpunkten. Zusätzliche Forschungsschwerpunkte könnten im Bereich der Energienetze in Verbindung mit Second-Life-Speichern ausgebaut werden, wie etwa die Untersuchung von Einflüssen von bidirektionalem Laden auf die Lebensdauer der Batterie oder die Untersuchung der optimalen Betriebsparameter für Second-Life-Batterien für verschiedene Anwendungen der Netzstabilisierung. Allerdings

wurden die Gelder für die Batterieforschung seitens des Bundesministeriums für Bildung und Forschung bis zum Jahr 2028 von ursprünglich 180 Millionen Euro auf 70 Millionen Euro gekürzt [Tagesschau, 2023]. Zwar müssen bereits laufende Projekte keine Kürzungen befürchten, allerdings stehen damit neuen Projekten bis 2028 110 Millionen Euro weniger zu Verfügung und das beeinflusst maßgeblich die Förderung auch von Projekten im Bereich Second-Life-Anwendungen. Die Befürchtung, dass Fachkräfte und Forschende im Themenbereich Batterie in Länder mit besseren Bedingungen abwandern, verstärkt auch die Sorge um den Verlust von Know-how und Innovationspotenzial in Deutschland. Dies könnte die Nachwuchsförderung im Bereich der Batterieforschung beeinträchtigen und zu einem verstärkten Fachkräftemangel führen.

Für Baden-Württemberg, als führendes Zentrum der deutschen Automobilindustrie, könnten die Konsequenzen besonders spürbar sein. Die Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit Baden-Württembergs im Bereich Elektromobilität und Batterietechnologien, einschließlich Second-Life-Anwendungen, könnte durch die geplanten Einsparungen gefährdet werden und die Landesförderpolitik vor Herausforderungen stellen.

Daher ist es von besonderer Bedeutung, die Unterstützung von Industrieprojekten auf Landesebene zu intensivieren, um lokale Wertschöpfungsketten für Second-Life-Anwendungen zu entwickeln. Als initialer Schritt gilt es, Schlüsselakteure innerhalb der Second-Life-Wertschöpfungskette, beispielsweise Hersteller von Stationärspeichern oder Energieversorgungsunternehmen, zu befähigen, Second-Life-Strategien in ihre Geschäftsmodelle zu integrieren. Dies kann etwa durch einmalige Innovationsgutscheine für Beratungsleistungen für einen definierten Zeithorizont oder durch Förderungen zu Seminaren und Fortbildungen aktiv vorangetrieben werden. Außerdem sollten Bildungsinitiativen oder Workshops für Fachkräfte sowie Studierende angeboten werden, um frühzeitig Fachkräfte aufzubauen. Das Ausrichten von Fachtagungen kann den Wissenstransfer sowie die Zusammenarbeit und Kooperation untereinander stärken und in gemeinsamer Organisation von Land und Industrie ausgerichtet werden. In einem zweiten Schritt sollten lokale Investitionsvorhaben im Bereich der erneuerbaren Energien und des Second-Life als Kopplungsvorhaben finanziell gefördert werden. So könnten stationäre Energiespeicher, die im Rahmen von neuen Solar- und Windkraftanlagen benötigt werden, mit Second-Life-Batterien ausgestattet und gefördert werden. Darüber hinaus kann das Land

weitere Unterstützung bieten, indem es Flächen für derartige Kopplungsprojekte zur Verfügung stellt, eine Hilfe, die bei reinen Stationärspeicherprojekten möglicherweise nicht im Vordergrund steht. Auf Landesebene sollten solche Vorhaben zusätzlich etwa durch verkürzte Genehmigungsverfahren unterstützt werden.

Es ist von großer Bedeutung, auch die Öffentlichkeit über die potenziellen Second-Life-Anwendungen und deren Chancen aufzuklären und die Informationsbasis durch Studien und andere Projekte zu erweitern. Clusterinitiativen wie die von e-mobil BW können ebenfalls dazu beitragen, derartige Studien zu fördern und lokale Kooperationen zwischen Unternehmen sowie die Verständigung mit der Politik zu unterstützen, was zu einem besseren Verständnis und Erkenntnisgewinn führt. Die Autoren dieser Studie sind davon überzeugt, dass dies eine lohnenswerte Anstrengung ist, um Europa in eine Zukunft mit geschlossenen und effizienten Stoffkreisläufen zu führen und nicht zuletzt damit einen Zielbeitrag zur Klimaneutralität zu leisten.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Traktionsbatterie in elektrischen Fahrzeugen unterliegt einer kalendarischen und zyklischen Alterung, sodass die ursprüngliche Kapazität der Batterie mit zunehmendem Alter sinkt und sich diese ab einem speziellen Zeitpunkt nicht mehr für die Verwendung im Elektrofahrzeug eignet, da Reichweite und Leistung nicht mehr den Anforderungen entsprechen. Mit Erreichen dieses Zeitpunkts, dem End-of-First-Life (EOFL), besteht die Möglichkeit, die Batterie in einer Anwendung außerhalb des Elektrofahrzeugs in einem so genannten „Second-Life“ weiterzuverwenden. Vor diesem Hintergrund wurden in dieser Studie die Potenziale für Second-Life-Anwendungen aus Traktionsbatterien in Europa untersucht und bewertet.

Kapitel 1: Anwendungen für Second-Life von Traktionsbatterien

Second-Life ist neben der Wiederinstandsetzung bzw. Reparatur der Batterie zur erneuten Verwendung im Fahrzeug und dem Recycling eine mögliche End-of-Life-Strategie, um die Lebensdauer der Traktionsbatterie zu verlängern. Als potenzielle Second-Life-Anwendungen wurden im Rahmen von Experteninterviews besonders stationäre Energiespeicher identifiziert, deren Anforderungsprofile unter denen im Automotive-Bereich liegen. Im Bereich der stationären Energiespeicher konnten Anwendungsfälle wie die Primär- und Sekundärregelleistung zur Erhaltung der Netzstabilität, Industriespeichersysteme zur Eigenverbrauchsoptimierung sowie Leistungspuffer für Schnellladesäulen identifiziert werden, die sich potenziell für Second-Life-Batterien eignen. Etwa 75% der bisherigen und neu initiierten Second-Life-Projekte in der EU haben sich sowohl in Pilotprojekten als auch in kommerziellen Anwendungen mit den genannten Einsatzmöglichkeiten auseinandergesetzt. Besonders in Deutschland, Frankreich, Großbritannien und Schweden wurden verstärkt Second-Life-

Aktivitäten initiiert, meist in Kooperation oder Partnerschaft mit einem OEM. Die dabei verwendeten Batterien stammen überwiegend aus Prototypen- und Testfahrzeugen sowie Produktionsausschuss und besitzen damit meist noch eine höhere Kapazität, als dies für End-of-First-Life-Batterien aus dem Fahrzeugmarkt in Zukunft angenommen wird. Für die Verwendung der Traktionsbatterie in einer Second-Life-Anwendung muss sie zunächst aus dem Fahrzeug demontiert und für eine mögliche Weiterverwendung in anderen Anwendungen analysiert werden. Dabei kann die Traktionsbatterie als gesamtes Batteriepäckchen oder in kleineren Einheiten, den Batteriemodulen, in Second-Life-Anwendungen integriert werden. Die Integration des Batteriepäckchens hat dabei den Vorteil eines geringeren Umwidmungsaufwands und der Weiterverwendung der meisten Komponenten. Bei der Verwendung von Modulen kann dagegen der Bauraum individueller genutzt werden und einzelne Module können besser aufeinander abgestimmt werden. Neben der Wahl der geeigneten Batterien ergeben sich weitere Herausforderungen im Umwidmungsprozess, wie die fehlende Standardisierung von Komponenten, Anschlüssen und Sensoren und mangelnder Zugriff auf das Batteriemanagementsystem zum Auslesen von Batterieparametern. Der digitale Batteriepass, der 2027 in der EU eingeführt wird, sollte die Datentransparenz verbessern und damit aufwendige Batterie-Tests zur Zustandsbestimmung mindern. Neben den Herausforderungen der Demontage, Umwidmung und Integration der Second-Life-Batterie an sich, ist das Geschäftsmodell der Second-Life-Anwendung maßgeblich vom Preis für Neubatterien, von den Kosten für den Umwidmungsaufwand, den Recyclingkosten und dem Recyclingwert der Batterie abhängig. Außerdem kann EU-Regulatorik, wie die beschlossene Rezyklatquote ab 2031, Second-Life-Aktivitäten beeinflussen, indem Batteriezellhersteller kurzfristig Rezyklat aus EOFL-Batterien benötigen und damit mögliches Volumen für Second-Life-Anwendungen entfällt.

Kapitel 2: Wirtschaftlichkeit und CO₂-Fußabdruck

Für die Wirtschaftlichkeitsbeurteilung von Second-Life-Anwendungen sind mehrere Faktoren von Bedeutung: der Preis für die Second-Life-Batterie sowie der zusätzliche Umwidmungsaufwand, die eventuelle Berücksichtigung einer zweiten Second-Life-Batterie, um die Lebensdauer einer First-Life-Batterie zu erreichen, der Preis der First-Life-Batterie selbst sowie der Recyclingwert der Batterie. Wenn der Preis (inklusive des Lebensdauermultiplikators) der Second-Life-Batterie unter der einer First-Life-Batterie liegt sowie der Recyclingwert geringer ist als der Ankaufspreis der EOFL-Batterie für den Umwidmungsbetrieb, ist ein wirtschaftliches Handeln möglich.

Der **Recyclingwert** wird größer, je niedriger die Prozesskosten des Recyclings und der Ankaufspreis der EOFL-Batterie sind und je höher der Metallwert der zu recycelnden Batterie ist. Der Metallwert unterliegt Marktschwankungen, außerdem haben die Zellchemie sowie der Recyclingprozess großen Einfluss auf die Rentabilität des Recyclings.

Der **Preis**, den Umwidmungsbetriebe für **EOFL-Batterien** bereit sind zu zahlen, ist stark abhängig von den Batterieeigenschaften wie einem hohen SOH, der Kompatibilität mit Anschlüssen und Sensoren sowie dem Zugriff auf das BMS. Außerdem können bereits durchgeführte Tests den Umwidmungsaufwand reduzieren und damit die Zahlungsbereitschaft für die EOFL-Batterie steigern. Der Preis für EOFL-Batterien schwankt aktuell aufgrund eines fehlenden Marktes sehr stark, sollte sich zukünftig aber stärker am Recyclingwert der Batterie orientieren. Zusätzlich werden Handlingkosten und eine Marge anfallen und damit den Preis definieren.

Für den Umwidmungsbetrieb fallen zusätzlich **Umwidmungskosten**, **Logistikkosten** sowie die Kosten für die **Lebenszeit-**

verlängerung an, bei der die Lebensdauer der Second-Life-Batterie mit der einer First-Life-Batterie gleichgestellt wird. Wenn diese Kosten zuzüglich der Komponenten und Aufwendungen für die Herstellung der Second-Life-Anwendung niedriger sind als die Gesamtkosten für ein vergleichbares First-Life-System, ist die Second-Life-Batterie ökonomisch vorteilhafter.

Die Kosten für **Automotive-First-Life-Batteriepacks** werden voraussichtlich bis 2030 auf 115 €/kWh für hochnickelhaltige Zellen und auf 100 €/kWh für Lithium-Eisenphosphat-Zellen sinken und damit das ökonomische Fenster für Second-Life-Batterien mit First-Life-Batterien in verschiedenen Anwendungen unter Berücksichtigung spezifischer Anforderungen, Prämissen und erwarteten Lebensdauern eine Kostenersparnis von 7–45% für die Second-Life-Batterie. Durch sich ständig verändernde Marktbedingungen und individuelle Speicheranforderungen sollten diese Annahmen kontinuierlich überprüft werden.

Die Second-Life-Batterie wurde hinsichtlich ihres **Product Carbon Footprint** mit den Alternativen der First-Life-Batterie mit und ohne Anteil von Rezyklat aus dem Recycling verglichen. Auf Packebene werden für die Umwidmung und die Lebenszeitverlängerung demnach 21,4 kg CO₂e/kWh (LFP) bzw. 15,7 kg CO₂e/kWh (NMC) verbraucht. Bei vergleichbaren Batteriepacks mit Primärrohstoffen wird für LFP-Packs mehr als zweimal so viel CO₂e ausgestoßen (50,9 kg CO₂e/kWh), für NMC-Packs sogar mehr als viermal so viel (80,9 kg CO₂e/kWh). Die Verwendung von Sekundärrohstoffen aus dem Recycling führt zu einer Reduzierung des PCF von 11% (LFP) und 29% (NMC). Die Verwendung von Second-Life-Batterien ist im Vergleich zu First-Life-Batterien von Vorteil in Bezug auf den PCF.

Kapitel 3: Analyse des Batterie-EOL-Volumens, Markthochlauf von Second-Life-Anwendungen und Auswirkungen auf das Recycling

Der Markthochlauf für Second-Life-Batterien wird auf Basis des prognostizierten Hochlaufs der verschiedenen Fahrzeugklassen, deren durchschnittlicher Batteriegrößen sowie der erwarteten Lebensdauer modelliert. Der Markthochlauf für Neuzulassungen von elektrischen PKW sowie LKW und Bussen wird bis 2035 signifikant steigen, sodass mit einem Batteriebedarf von 391 GWh im Jahr 2025, 1.291 GWh im Jahr 2030 und 1.799 GWh im Jahr 2035 gerechnet wird. Der überwiegende Bedarf, 85%, wird von elektrischen PKW stammen. LKW sowie Leichtkraftfahrzeuge werden einen geringeren Anteil am Gesamtbedarf ausmachen. Unter Berücksichtigung von drei Szenarien für die Lebensdauer (kurze, mittlere, lange Lebensdauer) der Batterien unter Berücksichtigung der verschiedenen Klassen wurde das End-of-Life-Volumen berechnet, das theoretisch auf dem europäischen Markt zur Verfügung stehen würde. Für PKW-Traktionsbatterien wird das prognostizierte Volumen im mittleren Szenario unter Annahme einer durchschnittlichen Lebensdauer von 15 Jahren auf 6 GWh im Jahr 2030 und auf 69 GWh im Jahr 2035 steigen. Das EOL-Volumen für LKW sowie Busse wird bedingt durch die erwartet kürzere Lebensdauer voraussichtlich bereits 2030 8 GWh und 63 GWh im Jahr 2035 im mittleren Szenario erreichen. Wegen des ab 2031 in der EU vorgeschriebenen Rezyklatanteils in Neubatterien wird erwartet, dass ein Teil der auf dem Markt verfügbaren EOL-Batterien direkt dem Recycling zugeführt werden muss, um den Rezyklatanteil zu erfüllen. Unter Berücksichtigung eines reduzierten Kapazitätslevels von End-of-First-Life-Batterien ergibt sich damit ein EOL-Volumen in der EU von 1 GWh im Jahr 2025, 11 GWh im Jahr 2030 und 95 GWh im Jahr 2035. Weitere Faktoren beeinflussen die Verfügbarkeit von EOL-Batterien für Second-Life-Anwendungen: Unterschiedliche Batteriepack- und Moduldesigns sowie spezifische Batterieanforderungen der Umwidmungsbetriebe limitieren die Verfügbarkeit. Ebenso können Fahrzeugexporte in Drittstaaten dazu führen, dass Traktionsbatterien nicht zurück auf den europäischen Markt gelangen und damit Second-Life-Anwendungen nicht zur Verfügung stehen. Auch die Rezyklatquote, Batteriedefekte sowie sinkende Produktionsausschussraten können dazu führen, dass das Recycling gegenüber der Second-Life-Anwendung bevorzugt wird. Unter diesen Herausforderungen kann der Second-Life-Anteil des EOL-Volumens auf 5–15% prognostiziert werden, sodass 2030 1–2 GWh und 2035 5–14 GWh für Second-Life-Anwendungen zur Verfügung stehen könnten.

Kapitel 4: Handlungsempfehlungen für Politik und Industrie

Damit die Potenziale von Second-Life-Anwendungen voll ausgeschöpft werden können und damit zu einem geschlossenen Wertstoffkreislauf innerhalb der EU beitragen, sind die aktuell vorhandenen Hürden abzubauen und Second-Life-Anwendungen als weitere Option neben dem direkten Recycling nach der First-Life-Anwendung zu etablieren. OEM sollten geschlossene Kreisläufe schaffen, um EU-Anforderungen für nachhaltige Praktiken zu erfüllen, was durch Partnerschaften mit Umwidmungs- und Recyclingbetrieben unterstützt werden kann. Klare Haftungsregelungen in diesen Partnerschaften könnten zusätzlich die Rechtssicherheit erhöhen. Batteriepacks sollten von Anfang an für ein Second-Life konzipiert werden, mit wiederverwendbaren Komponenten und vereinfachter Demontage. Eine Standardisierung dieser Komponenten würde den Umwidmungsaufwand außerdem verringern. Zusätzlich sollte der Zugang zum Batteriemagementsystem von OEM erleichtert werden, um eine Wiederverwendung des ursprünglichen Systems zu ermöglichen. Eine verbesserte Datentransparenz ist für alle Beteiligten in der Wertschöpfungskette anzustreben. Der geplante EU-Batteriepass kann dabei helfen, wichtige Informationen bereitzustellen und aktuell aufwendige Prozesse wie das Testing zu vereinfachen. Umwidmungsbetriebe sollten den Integrationsprozess weiterentwickeln und ganze Batteriepacks berücksichtigen, um den Aufwand zu minimieren. Fortschritte in der automatischen Demontage-technik könnten die Umwidmung auf Modulebene erleichtern. Second-Life-Hersteller nutzen derzeit hauptsächlich Batterien aus Prototypen und OEM-Lagerbeständen. Es wird empfohlen, dass OEM auch zukünftig solche Batterien für stationäre Anwendungen freigeben, um frühzeitig die Integration von Automobilbatterien in stationäre Anwendungen zu erproben und zu validieren. Schließlich könnten Batterien aus LKW und Bussen, die eine erwartete kürzere Lebensdauer als PKW-Batterien haben, eine geeignete Quelle für Second-Life-Anwendungen darstellen. Diese Batterien könnten aufgrund ihrer geringeren Variantenvielfalt und potenziell besser geeigneten Zellchemie einfacher für Second-Life-Anwendungen genutzt werden.

Auf Seiten der Politik gilt es, die neue Batterieverordnung der EU konsequent umzusetzen sowie eine Verschärfung der Rezyklatquote nur mit einer erweiterten Erfüllungsoption für den OEM umzusetzen, bei der Volumina für Second-Life-Anwendungen berücksichtigt werden können. Die Entwicklung des Batteriepasses sollte weiter forciert werden, um damit Second-Life-Anwendungen zu fördern. Außerdem sollten inno-

vative Themen wie Second-Life an Unternehmen herangetragen werden, sodass sie befähigt werden, mögliche Konzepte zu bewerten und in ihre Geschäftsmodelle zu integrieren. Darüber hinaus gilt es, konkrete Industrieprojekte der Kreislaufwirtschaft und der Transformation zu erneuerbaren Energien, wie Second-Life-Projekte, finanziell zu fördern und etwa Genehmigungsverfahren zu verkürzen, um Europa in eine Zukunft mit geschlossenen und effizienten Stoffkreisläufen zu führen.

Ausblick

Die Zukunft von Second-Life-Anwendungen bietet vielversprechende Potenziale. Diese Anwendungen könnten eine Schlüsselrolle bei der Förderung nachhaltiger und kreislauforientierter Wirtschaftsmodelle einnehmen. Durch die Wiederverwendung von Batterien aus Elektrofahrzeugen lässt sich der Lebenszyklus dieser Batterien deutlich verlängern. Dies trägt nicht nur zur Reduktion von Abfall und zur Schonung von Ressourcen bei, sondern bietet auch ökonomische Vorteile, da der Wert der Batterien über einen längeren Zeitraum genutzt wird.

Ein flächendeckender Einsatz der Technologie wurde bislang durch fehlende End-of-First-Life-Batterien und Unsicherheiten bezüglich Haftung und Lebensdauerprognosen verhindert. Zukünftig wird eine größere Zahl Traktionsbatterien ihr erstes Lebensdauerende erreichen und somit für mögliche Second-Life-Anwendungen zur Verfügung stehen. Außerdem wird erwartet, dass durch neue Regularien und die Einführung des Batteriepasses die Attraktivität von Second-Life gesteigert werden kann und rentable Geschäftsmodelle entstehen.

Für eine erfolgreiche Implementierung dieser Second-Life-Anwendungen sind weitere technologische Fortschritte insbesondere in Bezug auf das Batteriemangement sowie die Standardisierung von Schnittstellen und Komponenten notwendig. Ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Verfügbarkeit von End-of-First-Life-Batterien wird die Rezyklatquote der EU sein, die dazu führen könnte, dass Batterien früher recycelt werden, um die Rohstoffe zurückzugewinnen. Politische Unterstützung in Form von Durchsetzung der Gesetzgebung und Förderprogrammen ist ebenfalls entscheidend, um die erforderlichen Rahmenbedingungen für den Markt zu schaffen und Anreize für Investitionen zu setzen.

Literaturverzeichnis

(Abdel-Monem, 2017)

Abdel-Monem, Mohamed, et al. „Lithium-ion batteries: Comprehensive technical analysis of second-life batteries for smart grid applications.“ 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe). IEEE, 2017. Online verfügbar unter <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8099385>.

(ACEA, 2023)

ACEA: The EU Auto Industry. Online verfügbar unter: <https://www.acea.auto/nav/?vehicle=passenger-cars>.

(ADAC, 2022)

ADAC (2022): Elektroauto-Batterie: Lebensdauer, Garantie, Reparatur. 25.10.2022. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-batterie/>.

(Ahmadi, 2014)

Ahmadi, Leila, et al. „Environmental feasibility of re-use of electric vehicle batteries.“ Sustainable Energy Technologies and Assessments 6 (2014): 64–74. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213138814000071>.

(Ahmadi, 2017)

Ahmadi, Leila, et al. „A cascaded life cycle: reuse of electric vehicle lithium-ion battery packs in energy storage systems.“ The International Journal of Life Cycle Assessment 22 (2017): 111–124. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-015-0959-7>.

(AMS, 2021)

Auto Motor Sport (2021): Renault will 2030 zu 100% elektrisch sein. Online verfügbar unter: <https://www.auto-motor-und-sport.de/verkehr/renault-zukunft-renaulution-2021-mit-r5-und-dacia-bigster/>.

(Bain & P3, 2023)

Bain & P3 (2023): Kostenmodellierung zukünftiger Zellkosten bis 2023 in Euro pro Kilowattstunde.

(Battery Pass, 2023)

The Battery Pass (2023): Advancing the implementation of the battery passport in Europe and beyond. Online verfügbar unter: <https://thebatteryepass.eu/>.

(Becker, 2019)

Becker, Jörg, et al. Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien. Wiesbaden, Germany: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-21021-2>.

(BloombergNEF, 2023)

BloombergNEF: Research & Data

(Börner, 2022)

Börner, Martin F., et al. „Challenges of second-life concepts for retired electric vehicle batteries.“ Cell Reports Physical Science 3.10 (2022). Online verfügbar unter [https://www.cell.com/cell-reports-physical-science/pdf/S2666-3864\(22\)00397-6.pdf](https://www.cell.com/cell-reports-physical-science/pdf/S2666-3864(22)00397-6.pdf).

(Börse Frankfurt, 2023)

Börse Frankfurt (2023): Aluminiumpreis. Online verfügbar unter: <https://www.boerse-frankfurt.de/rohstoff/aluminiumpreis>.

(Businessanalytiq, 2023a)

Businessanalytiq (2023): Manganese price index. Online verfügbar unter: <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/manganese-price-index/>.

(Businessanalytiq, 2023b)

Businessanalytiq (2023): Natural graphite price index. Online verfügbar unter: <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/graphite-price-index/>.

(Casals, 2016)

Canals Casals, Lluç, and Beatriz Amante García. „Assessing electric vehicles battery second life remanufacture and management.“ *Journal of Green Engineering* 6.1 (2016): 77–98. Online verfügbar unter <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/91224>.

(Catton, 2017)

Catton, John, et al. „Comparative safety risk and the use of repurposed EV batteries for stationary energy storage.“ 2017 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE). IEEE, 2017. Online verfügbar unter <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8052799>.

(Chen, 2021)

Chen, Yuqing, et al. „A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards.“ *Journal of Energy Chemistry* 59 (2021): 83–99. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095495620307075>.

(Cimprich, 2015)

Cimprich, A., et al. „Responsible Stewardship of Electrified Vehicles.“ University of Waterloo: Waterloo, ON, Canada (2015).

(Comau, 2023)

Comau (2023): Technologie für flexible Batteriedemontage. 29.05.2023. Online verfügbar unter <https://www.comau.com/de/2023/05/29/flex-bd-comau-technologie-fuer-flexible-batteriedemontage/>.

(Cready, 2003)

Cready, Erin, et al. Technical and economic feasibility of applying used EV batteries in stationary applications. No. SAND2002-4084. Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States); Sandia National Lab. (SNL-CA), Livermore, CA (United States), 2003. Online verfügbar unter <https://www.osti.gov/biblio/809607>.

(e.battery systems AG, 2024)

e.battery systems AG (2024): Energy Storage System mit Second-Life Batterien. Online verfügbar unter: <https://e-batterysystems.com/casestudies/bischof-lebensmittellogistik/>.

(electrive, 2023)

electrive (2023): Göteborg erhält 2nd-Life-Speicher mit 2,8 MW von Batteryloop. Online verfügbar unter: <https://www.electrive.net/2023/10/16/goeteborg-erhaelt-2nd-life-speicher-mit-28-mw-von-battery-loop/>.

(Elkind, 2014)

Elkind, Ethan. „Reuse and repower: How to save money and clean the grid with second-life electric vehicle batteries.“ (2014). Online verfügbar unter <https://escholarship.org/content/qt32s208mv/qt32s208mv.pdf>.

(e-mobil BW, 2023)

Herrmann, Florian & Stegmüller, Sebastian & Block, Lukas & Keicher, Lukas & Borrmann, Daniel. (2023). Themenpapier Cluster Elektromobilität Süd-West Wertstoffkreislauf von Traktionsbatterien aus Europa. Online verfügbar unter: https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Potenzialanalyse_bidirektionales_Laden.pdf.

(EnBW, 2022)

EnBW Energie Baden-Württemberg AG (2022): Second-Life-Batterien: Stromspeicher aus gebrauchten E-Auto-Akkus. Online verfügbar unter: <https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/second-life-batterien.html>.

(EPTechnologies, 2023)

EPTechnologies (2023): LFP Batterien. Online verfügbar unter: <https://eptechologies.dk/de/lfp-2/>.

(EU Parlament, 2023)

EU Parlament (2023): Parliament backs new rules to reduce air pollution from trucks and buses. Online verfügbar unter: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20231117IPR12204/parliament-backs-new-rules-to-reduce-air-pollution-from-trucks-and-buses>.

(EU, 2019)

EU-Verordnung (2019): VERORDNUNG (EU) 2019/1242 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 20. Juni 2019 zur Festlegung von CO₂-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 595/2009 und (EU) 2018/956 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Richtlinie 96/53/EG des Rates. Online verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019R1242>.

(EU, 2023 b)

EU-Verordnung (2023): VERORDNUNG (EU) 2023/1542 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 12. Juli 2023 über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG. Online verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:JOL_2023_191_R_0001.

(EU, 2023)

EU-Verordnung (2023): Verringerung der CO₂-Emissionen von neuen Personenkraftwagen und von neuen leichten Nutzfahrzeugen. Online verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:4396542>.

(Euronews, 2023)

Yanatma, Servet (2023): Energiekrise in Europa: Wo sind Strom und Gas am teuersten? Online verfügbar unter: <https://de.euronews.com/business/2023/10/31/energiekrise-in-europa-wo-sind-strom-und-gas-am-teuersten#:~:text=Die%20durchschnittlichen%20Gaspreise%20f%C3%BCr%20Haushalte,%2C6%20Euro%20am%20h%C3%B6chsten>.

(Europäisches Parlament, 2023)

Das Europäische Parlament (2023): VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG. 28.06.2023. Online verfügbar unter: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-2-2023-INIT/de/pdf>.

(European Commission, 2023)

European Commission: End-of-life vehicles Regulation. Online verfügbar unter https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/end-life-vehicles/end-life-vehicles-regulation_en.

(Eurostat, 2020)

Eurostat (2020): End-of-life vehicle statistics. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=End-of-life_vehicle_statistics#Number_of_end-of-life_vehicles.

(Evyon, 2022)

Evyon (2022): Delivering our first C&I system to TGN Energy. Online verfügbar unter: <https://www.evyon.com/news/2022/02/delivering-our-first-c-i-system-to-tgn-energy/>.

(FFE, 2016)

Fischhaber, Sebastian, et al. „Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen.“ Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW) (2016). Online verfügbar unter <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/second-life-konzepte-fuer-lithium-ionen-batterien-aus-elektrofahrzeugen/>.

(Fraunhofer, 2021)

Neef, Christoph, Thomas Schmaltz, and Axel Thielmann. „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau.“ (2021). Online verfügbar unter: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2021/VDMA_Kurzstudie_Batterierecycling.pdf.

(Fraunhofer ISE, 2024)

Fraunhofer ISE (2024): PIONEER – Airport Sustainability Second Life Battery Storage. Online verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/pioneer.html>.

(Gibson, 2014)

Gibson, Gena, et al. „Study on the operation of the system of access to vehicle repair and maintenance information.“ (2014). Online verfügbar unter <https://tarunkumar.in/member/wp-content/uploads/2021/10/143.pdf>.

(Groenewald, 2017)

Groenewald, Jakobus, Thomas Grandjean, and James Marco. „Accelerated energy capacity measurement of lithium-ion cells to support future circular economy strategies for electric vehicles.“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69 (2017): 98–111. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116308024>.

(Gunther, 2022)

Gunther, C. „How Long Do EV Batteries Last.“ *Review Geek* 19 (2022).

(Haram, 2021)

Haram, Mohammed Hussein Saleh Mohammed, et al. „Feasibility of utilising second life EV batteries: Applications, lifespan, economics, environmental impact, assessment, and challenges.“ *Alexandria Engineering Journal* 60.5 (2021): 4517–4536. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016821001757>.

(Hatcher, 2011)

Hatcher, G. D., W. L. Ijomah, and J. F. C. Windmill. „Design for remanufacture: a literature review and future research needs.“ *Journal of Cleaner Production* 19.17-18 (2011): 2004–2014. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652611002319>.

(Hu, 2022)

Hu, Xiaosong, et al. „A review of second-life lithium-ion batteries for stationary energy storage applications.“ *Proceedings of the IEEE* 110.6 (2022): 735–753. Online verfügbar unter <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9788509>.

(Hua, 2021)

Hua, Yang, et al. „Toward sustainable reuse of retired lithium-ion batteries from electric vehicles.“ *Resources, Conservation and Recycling* 168 (2021): 105249. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344920305644>.

(Huang, 2021)

Huang, Wensheng, et al. „Questions and answers relating to lithium-ion battery safety issues.“ *Cell Reports Physical Science* 2.1 (2021). Online verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666386420303118>.

(Huang, Chenghuan, et al., 2011)

Huang, Chenghuan, et al. „The effect of solid electrolyte interface formation conditions on the aging performance of Li-ion cells.“ *Journal of Solid State Electrochemistry* 15 (2011): 1987–1995. Online verfügbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10008-010-1219-1>.

(Idis, 2023)

Idis (2023): The International Dismantling Information System. Online verfügbar unter <https://idis2.com/>.

(Jegan Roy, Joseph, et al., 2023)

Jegan Roy, Joseph, et al. „Closed-Loop Graphite Recycling from Spent Lithium-Ion Batteries through Bioleaching.“ *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 11.17 (2023): 6567–6577. Online verfügbar unter: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acssuschemeng.2c07262>.

(Jiao, 2018)

Jiao, Na, and Steve Evans. „Business models for repurposing a second-life for retired electric vehicle batteries.“ behaviour of lithium-ion batteries in electric vehicles: battery health, performance, safety, and cost (2018): 323–344. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-69950-9_13.

(Kampker, 2023)

Kampker, Achim, et al. „Identification of Challenges for Second-Life Battery Systems – A Literature Review.“ World Electric Vehicle Journal 14.4 (2023): 80. Online verfügbar unter <https://www.mdpi.com/2032-6653/14/4/80>.

(Kampker, 2024)

Kampker, Achim et al. Elektromobilität: Grundlagen einer Fortschrittstechnologie. Springer Nature, 2024. Online verfügbar unter <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/76776>.

(KBA, 2023)

KBA Glossar (2023): N-Fahrzeug. Online verfügbar unter: https://www.kba.de/SharedDocs/Glossareintraege/DE/N/N_Fahrzeug.html.

(Kelly, 2020)

Kelly, J.C.; Winjobi, O. Battery Second Life: A Review of Challenges and Opportunities. In Proceedings of the 33rd Electric Vehicle Symposium (EVS33), Portland, OR, USA, 14–17 June 2020.

(Koroma, Michael Samsu, et al., 2022)

Koroma, Michael Samsu, et al. „Life cycle assessment of battery electric vehicles: Implications of future electricity mix and different battery end-of-life management.“ Science of the Total Environment 831 (2022): 154859. Online verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722019520>.

(Kwade, 2020)

Kwade, A., et al. „Ressourcenschonende Batteriekreisläufe – mit Circular Economy die Elektromobilität Antreiben.“ Acatech: München, Germany (2020).

(Lander, Laura, et al., 2021)

Lander, Laura, et al. „Financial viability of electric vehicle lithium-ion battery recycling.“ Iscience 24.7 (2021). Online verfügbar unter: [https://www.cell.com/iscience/pdf/S2589-0042\(21\)00755-0.pdf](https://www.cell.com/iscience/pdf/S2589-0042(21)00755-0.pdf).

(LME, 2023a)

LME (2023): LME Nickel. <https://www.lme.com/Metals/Non-ferrous/LME-Nickel#Summary>.

(LME, 2023b)

LME (2023): LME Cobalt. Online verfügbar unter: <https://www.lme.com/Metals/EV/LME-Cobalt#Summary>.

(LME, 2023c)

LME (2023): LME Copper. Online verfügbar unter: <https://www.lme.com/Metals/Non-ferrous/LME-Copper#Summary>.

(Marklines, 2023)

Marklines: Automotive Industry Portal

(Martinez-Laserna, 2018)

Martinez-Laserna, Egoitz, et al. „Technical viability of battery second life: A study from the ageing perspective.“ IEEE Transactions on Industry Applications 54.3 (2018): 2703–2713. Online verfügbar unter <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8279474>.

(Mercedes-Benz France, 2022)

Mercedes-Benz France (2022): Charles, le robot chargeur autonome pour véhicule électrique. Online verfügbar unter: <https://media.mercedes-benz.fr/charles-le-robot-chargeur-autonome-pour-vehicule-electrique/>.

(Mercedes-Benz, 2023)

Mercedes-Benz (2023): 100% elektrisches Pkw-Portfolio. Online verfügbar unter: <https://group.mercedes-benz.com/innovation/digitalisierung/industrie-4-0/europaeische-produktionsordnung.html>.

(MIT, 2008)

Massachusetts Institute of Technology (2008): A Guide to Understanding Battery Specifications. Online verfügbar unter: https://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf.

(Montes, 2022)

Montes, Tomás, et al. „Procedure for assessing the suitability of battery second life applications after ev first life.“ Batteries 8.9 (2022): 122. Online verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/2313-0105/8/9/122>.

(National Grid Group, 2022)

National Grid Group (2022): What Happens to Old Electric Car Batteries? 15.07.2022. Online verfügbar unter <https://www.nationalgrid.com/stories/journey-to-net-zero-stories/what-happens-old-electric-car-batteries>.

(Neubauer, 2015)

Neubauer, Jeremy, et al. Identifying and overcoming critical barriers to widespread second use of PEV batteries. No. NREL/TP-5400-63332. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2015. Online verfügbar unter <https://www.osti.gov/biblio/1171780>.

(Next, 2023)

Next-Kraftwerke (2023): Sekundärregelung (SRL). Online verfügbar unter <https://www.next-kraftwerke.at/wissen/sekundaerregelung-srl#die-sekundreserve-im-unterschied-zur-primr-und-tertirreserve>.

(Nigl, 2021)

Nigl, Thomas, et al. „Lithium-Ionen-Batterien – Kreislaufwirtschaftliche Herausforderungen am Ende des Lebenszyklus und im Recycling.“ Berg Huettenmaenn Mon 166 (2021): 144–149. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s00501-021-01087-1>.

(Novum, 2023)

Novum (2023): Stationäre Testsysteme. Online verfügbar unter: <https://novum-engineering.com/stationaere-testsysteme/>.

(Olsson, 2018)

Olsson, Linda, et al. „Circular business models for extended EV battery life.“ Batteries 4.4 (2018): 57. Online verfügbar unter <https://www.mdpi.com/2313-0105/4/4/57>.

(P3 Interview – Energieversorger, 2023)

P3 (2023): Experteninterview mit Energieversorger.

(P3 Interview – First-Life-Akteur, 2023)

P3 (2023): Experteninterview mit First-Life-Akteur.

(P3 Interview – Industrie, 2023)

P3 (2023): Experteninterview mit Industriekontakt.

(P3 Interview – Marktplattformanbieter, 2023)

P3 (2023): Experteninterview mit Marktplattformanbieter.

(P3 Interview – OEM, 2023)

P3 (2023): Experteninterview mit Automotive OEM.

(P3 Interview – Second-Life-Akteur 1, 2023)

P3 (2023): Experteninterview mit Second-Life-Akteur 1.

(P3 Interview – Second-Life-Akteur 2, 2023)

P3 (2023): Experteninterview mit Second-Life-Akteur 2.

(P3 Marktmodell, 2023)

P3: Market Model & Market Intelligence

(Pass Testing Solutions, 2023)

Pass Testing Solutions (2023): The importance of a functional battery management system for second life batteries. Online verfügbar unter: <https://www.pass-testing.de/post/the-importance-of-a-functional-battery-management-system-for-second-life-batteries-1>.

(Powertech Energy, 2023)

Powertech Energy (2023): Understanding C-Rate for Battery Energy Storage Systems. Online verfügbar unter: <https://www.powertechenergy.com.au/a/understanding-c-rate-for-battery-energy-storage-systems>.

(PV Magazine, 2023)

Enkhardt, Sandra: Voltfang bringt Gewerbespeicher „New Life“ mit 45 Kilowattstunden Kapazität auf den Markt; in PV Magazine. Online verfügbar unter: <https://www.pv-magazine.de/2023/10/24/voltfang-bringt-gewerbespeicher-new-life-mit-45-kilowattstunden-kapazitaet-auf-den-markt/>.

(Rallo, 2020)

Rallo, Héctor, et al. „Economic analysis of the disassembling activities to the reuse of electric vehicles Li-ion batteries.“ Resources, conservation and recycling 159 (2020): 104785. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344920301063>.

(SalaryExpert, 2023)

Salary Expert (2023). Online verfügbar unter: <https://www.salaryexpert.com/>.

(Schurmans, M. and B. Thijs, 2021)

Schurmans, M., and B. Thijs. „Process for the Recovery of Lithium and Iron from LFP Batteries.“ World Patent WO 72619 (2012): A1. Online verfügbar unter: <https://patents.google.com/patent/WO2012072619A1/en>.

(Shine, Keith P., et al., 2005)

Shine, Keith P., et al. „Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases.“ Climatic change 68.3 (2005): 281–302. Online verfügbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-005-1146-9>.

(Smart Power, 2023)

Smart Power GmbH (2023): Forschungsprojekt „2ndLife Batteries 4Storage“. Online verfügbar unter: <https://smart-power.net/portfolio/2nd-life-batteries-4storage/>.

(SSM, 2023)

SSM (2023): Lithium carbonate (99.5% Battery Grade) Price, CNY/mt. Online verfügbar unter: <https://www.metal.com/Lithium/201102250059>.

(Stromreport, 2023)

Stromreport: Strompreise Europa. Online verfügbar unter: <https://strom-report.com/strompreise-europa/>.

(Tagesschau, 2023)

Online verfügbar unter: <https://www.tagesschau.de/inland/regional/sachsen/mdr-millionenschwere-kuerzungen-fuer-batterieforschung-in-sachsen-100.html>.

(The Mobility House, 2018)

The Mobility House (2018): The 3 megawatt energy storage system in Johan Cruijff Arena is now live. Online verfügbar unter: https://www.mobilityhouse.com/int_en/our-company/newsroom/article/johan-cruijff-arena-3mw-energy-storage-system-launch.

(Tokranov, Anton, et al., 2016)

Tokranov, Anton, et al. „Control and optimization of the electrochemical and mechanical properties of the solid electrolyte interphase on silicon electrodes in lithium ion batteries.“ Advanced Energy Materials 6.8 (2016): 1502302.

(Trading Economics, 2023)

Trading Economics (2023): Lithium. Online verfügbar unter: <https://tradingeconomics.com/commodity/lithium>.

(Umweltbundesamt, 2023)

Umweltbundesamt (2023): Altfahrzeugverwertung und Fahrzeugverbleib. 06.02.2023. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altfahrzeugverwertung-fahrzeugverbleib#altfahrzeuge-2020-niedrigste-anzahl-seit-beginn-der-aufzeichnungen-in-2004>.

(UNEP, 2020)

UNEP: Global Trade in Used Vehicles Report. 26.10.2020. Online verfügbar unter <https://www.unep.org/resources/report/global-trade-used-vehicles-report>.

(Vattenfall, 2018)

Vattenfall (2018): Second Life Batterien: Potential für Energiespeicher. Online verfügbar unter: <https://group.vattenfall.com/de/newsroom/blog/2018/september/second-life-batterien-energiespeicher>.

(Vaughan, J., et al., 2013)

Vaughan, J., et al. „Engineering aspects of the selective acid leaching process for refining mixed nickel-cobalt hydroxide.“ (2013): 473–473. Online verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/290998158_Engineering_aspects_of_the_selective_acid_leaching_process_for_refining_mixed_nickel-cobalt_hydroxide.

(Wang, Mengmeng, et al., 2022)

Wang, Mengmeng, et al. „Recycling of lithium iron phosphate batteries: Status, technologies, challenges, and prospects.“ Renewable and Sustainable Energy Reviews 163 (2022): 112515. Online verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032122004191>.

(Wrålsen, 2021)

Wrålsen, Benedikte, et al. „Circular business models for lithium-ion batteries-Stakeholders, barriers, and drivers.“ Journal of Cleaner Production 317 (2021): 128393. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621026068>.

(Wu, 2020)

Wu, Wei, et al. „Does energy storage provide a profitable second life for electric vehicle batteries?“ *Energy Economics* 92 (2020): 105010. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140988320303509>.

(Zhu, 2021)

Zhu, Juner, et al. „End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries.“ *Cell Reports Physical Science* 2.8 (2021). Online verfügbar unter: [https://www.cell.com/cell-reports-physical-science/pdf/S2666-3864\(21\)00248-4.pdf](https://www.cell.com/cell-reports-physical-science/pdf/S2666-3864(21)00248-4.pdf).

(Ziegler, 2020)

Ziegler, Andreas, et al. „Run to failure: aging of commercial battery cells beyond their end of life.“ *Energies* 13.8 (2020): 1858. Online verfügbar unter <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/8/1858>.

(Ziemba, 2019)

Ziemba, Alexander, and Fabian Prevolnik. „The reverse logistics of electric vehicle batteries: challenges encountered by 3PLs and recyclers.“ (2019). Online verfügbar unter <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1319328&dswid=-6072>.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematischer Kapazitätsverlauf mit qualitativ angegebenen EOL-Kriterien	6
Abbildung 2:	Verbleib der endgültig stillgelegten Fahrzeuge in Deutschland 2020 in Mio.	9
Abbildung 3:	Technische KPI-Relevanz und Anforderungen für verschiedene ESS- und Automotive-Anwendungen	10
Abbildung 4:	Zeitliche Aktivierung der Regelergiesreserven	11
Abbildung 5:	Akteure und Aktivitäten mit Bezug zu Second-Life-Anwendungen von Traktionsbatterien in Europa	13
Abbildung 6:	Anwendungsbereiche europäischer Second-Life-Projekte	14
Abbildung 7:	Schematische Darstellung des Fensters für Second-Life-Batterien	24
Abbildung 8:	Darstellung der Prozesskosten für den „Mech + Hydro“- und „Pyro + Mech + Hydro“-Prozess, aufgesplittet in Prozessschritte pro Kilogramm Input und Output	25
Abbildung 9:	Ökonomische Allokation der Prozess- und Modulkosten auf die zurückgewonnenen Materialien in €/kWh (Fokus auf Komponenten der Aktivmaterialien)	26
Abbildung 10:	Gegenüberstellung der Recyclingkosten (Prozess und Modul) und des Metallwerts zur Ableitung des Recyclingwertes pro kg Input und Kilowattstunde	27
Abbildung 11:	Sensitivitätsanalyse zur Ermittlung des Break-even-Punktes für die Modulkosten für den definierten „Mech + Hydro“-Recyclingprozess	28
Abbildung 12:	Kostentreppe der Umwidmung von EOFL-Batterien zu einem 15-MWh-Stationärspeicher in Euro pro Kilowattstunde	29
Abbildung 13:	Prognose von Packkosten bis ins Jahr 2030 in Euro pro Kilowattstunde	30
Abbildung 14:	Sensitivitätsanalyse zur Ermittlung des Break-even-Punktes für Second-Life-Zellkosten für einen Boost-Speicher in der Ladeinfrastruktur	31
Abbildung 15:	Exemplarischer Kostenvergleich von a) einem 15-MWh-Großspeicher, b) eine 300-kWh-Boost-Speicher und c) einem 3-MWh-Notstromspeicher für unterbrechungsfreien Stromversorgung mit ihren jeweiligen Second-Life-Alternativen in Euro pro Kilowattstunde	32
Abbildung 16:	Top-down-Kostenkalkulation für einen 3,4-MWh-LFP-ESS-Container zur Ermittlung der Zellkosten in Euro pro Kilowattstunde	33
Abbildung 17:	Top-down Kostenkalkulation für einen 2,9-MWh-NMC-ESS-Container zur Ermittlung der Zellkosten in Euro pro Kilowattstunde	34
Abbildung 18:	Fenster für Second-Life-Batterien am Beispiel des 15-MWh-Großspeichers	34
Abbildung 19:	Vereinfachte Darstellung zur Ermittlung der Nettokosten der Batterien für neue Automotive-Batterien gegenüber umgewidmeten Batterien	35
Abbildung 20:	CO ₂ e-Emissionen des „Mech + Hydro“- und „Pyro + Mech + Hydro“-Recyclingprozesses in kg CO ₂ e pro Kilogramm Input, Kilowattstunde und Kilogramm Output	37
Abbildung 21:	Ökonomische Allokation der Recyclingemissionen auf entstehende Produkte in kg CO ₂ e pro kg Material	38
Abbildung 22:	PCF von NMC- und LFP-Batteriezellen mit Primär- und Sekundärrohstoffen	39
Abbildung 23:	PCF von NMC- und LFP-Batteriepacks mit Primär- und Sekundärrohstoffen und Vergleich mit der Umwidmung für Second-Life-Batteriepacks	40
Abbildung 24:	Vorgehen zur Berechnung des EOFL-Volumens von Traktionsbatterien	43
Abbildung 25:	Neuzulassungen von elektrischen PKW in der EU	44
Abbildung 26:	Markthochlauf der Neuzulassungen von elektrischen LKW und Bussen in der EU	45
Abbildung 27:	Batteriebedarf für elektrische PKW, LKW und Busse in der EU	46
Abbildung 28:	EOL-Volumen für PKW-Traktionsbatterien in der EU	48

Abbildung 29: Zellchemien in EOL-Batterien aus PKW in der EU	48
Abbildung 30: EOL-Volumen für LKW- und Bus-Traktionsbatterien in der EU	49
Abbildung 31: EOL-Volumen für Automotive-Traktionsbatterien in der EU	50
Abbildung 32: Angebot von und Nachfrage nach Batterien in der EU	51
Abbildung 33: Europäischer Batteriebedarf für ESS	52
Abbildung 34: Benötigte und durch Produktionsausschuss zur Verfügung stehende Menge Rezyklat für EU-Zellproduktion	53
Abbildung 35: Reduktion des EOL-Volumens aufgrund Rezyklatquote und 80% SOH in Szenario B	54
Abbildung 36: Hochlauf von Second-Life-Anwendungen in drei Szenarien	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Exemplarische Beschreibung von Second-Life-Projekten mit Beteiligung von Clustermitgliedern des Clusters Elektromobilität Süd-West	15
Tabelle 2: Durchschnittliche Batteriegröße je Fahrzeugklasse im Jahr 2030	46
Tabelle 3: Prämissen für Recyclingkosten in Europa (Ungarn)	76
Tabelle 4: Prämissen der Material- und Metallwerte	76

Abkürzungsverzeichnis

BEV	Battery Electric Vehicle	PLDV	Passenger Light Duty Vehicle
BMBF	Bundesministeriums für Bildung und Forschung	PRL	Primärregelleistung
BMS	Batteriemanagementsystem	PV	Photovoltaik
C-Rate	Lade- und Entladerate	Pyro	Pyrometallurgisch
EE	Erneuerbaren Energien	RMI	Repair and Maintenance Information
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz	SOC	State-of-Charge
EIC	Energy Identification Code	SOH	State-of-Health, Zustand der Batterie bezogen auf die verbliebene Kapazität
EOFL	End-of-First-Life	SRL	Sekundärregelleistung
EOL	End-of-Life		
EOSL	End-of-Second-Life		
EOW	End-of-Warranty		
ESS	Energy Storage System		
EU	Europäische Union		
EV	Electric Vehicle		
FCR	Frequency Controlled Normal Operation Reserve		
FIN	Fahrzeug-Identifikationsnummer		
FKW	Fluorkohlenwasserstoffe		
FRR	Frequency Resoration Reserve		
GWh	Gigawattstunde		
HDT	Heavy Duty Truck		
HPC	High Power Charging		
Hydro	Hydrometallurgisch		
IDIS	International Dismantling Information System		
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt		
KI	Künstliche Intelligenz		
KPI	Key-Performance-Indicator/Leistungskennzahl		
kt	Kilotonne		
LDT	Light Duty Truck		
LFP	Lithiumeisenphosphat		
LKW	Lastkraftwagen		
MDT	Medium Duty Vehicle		
Mech	Mechanical		
MW	Megawatt		
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid		
NMC	Nickel-Mangan-Kobaltoxid		
NMCA	Nickel-Mangan-Kobalt-Aluminiumoxid		
OEM	Abkürzung für englisch original equipment manufacturer = Hersteller von Originalgeräten		
PCF	Product Carbon Footprint		
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle		
PKW	Personenkraftwagen		

Anhang

Parameter	Wert
Kapazität [kt/y]	100 [P3 Annahme]
Gesamtanlageneffektivität (Overall Equipment Effectiveness, OEE) 2030 [%]	92 [P3 Interview – Industrie, 2023]
Arbeitstage im Jahr [#]	330 [P3 Annahme]
Elektrizitätspreis [€/kWh]	0,11 [Stromreport, 2023]
Erdgaspreis [€/kWh]	0,04 [Euronews, 2023]
Arbeitslohn [€/h]	8,7–11,3 [SalaryExpert, 2023]

Tabelle 3: Prämissen für Recyclingkosten in Europa (Ungarn)

Quelle: [P3 Interview – Industrie, 2023; Stromreport, 2023; Euronews, 2023; SalaryExpert, 2023]; eigene Darstellung

Metall	Wert [€/kg]
Lithium (LCE-Preis pro kg Li-Metall)	98,5 [SSM, 2023]
Nickel	15,5 [LME, 2023a]
Kobalt	30,5 [LME, 2023b]
Aluminium	2,2 [Börse Frankfurt, 2023]
Mangan	2,6 [Businessanalytiq, 2023a]
Kupfer	7,7 [LME, 2023c]
Kohlenstoff/Graphit	2,0 [Businessanalytiq, 2023b]
Elektrolyt	1,5 [P3 Interview – Industrie, 2023]

Tabelle 4: Prämissen der Material- und Metallwerte

Quelle: [SSM, 2023; LME, 2023a; Börse Frankfurt, 2023; Businessanalytiq, 2023a; LME, 2023b; Businessanalytiq, 2023b; P3 Interview – Industrie, 2023]; eigene Darstellung

Impressum

Herausgeber

Cluster Elektromobilität Süd-West c/o e-mobil BW GmbH –
Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg

Autoren

P3 automotive GmbH
Niklas Bittniok, Jürgen Döring, Rachel Höss, Jannik Pfeuffer, Hermann Pyschny

Redaktion und Koordination des Themenpapiers

e-mobil BW GmbH
Felicitas Behr, Walter Holderried

Layout/Satz/Illustration

markentrieb
Die Kraft für Marketing und Vertrieb

Fotos

Umschlag: © kynny/istockphoto
Die Quellennachweise aller weiteren Bilder befinden sich auf der jeweiligen Seite.

Auslieferung und Vertrieb

e-mobil BW GmbH, Leuschnerstraße 45, 70176 Stuttgart
Telefon +49 711 892385-0, Fax +49 711 892385-49, info@e-mobilbw.de, www.e-mobilbw.de

April 2024

© Copyright liegt bei den Herausgebern

Alle Rechte vorbehalten. Dieses Werk ist einschließlich seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Herausgebers unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Für die Richtigkeit der Herstellerangaben wird keine Gewähr übernommen.



www.e-mobilbw.de

e-mobil BW GmbH

Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und
Automotive Baden-Württemberg

Leuschnerstraße 45 | 70176 Stuttgart

Telefon +49 711 892385-0 | Fax +49 711 892385-49

info@e-mobilbw.de