

Rücklaufmengen und Verwertungswege von Altbatterien aus Elektromobilen in Deutschland

Simon Glöser-Chahoud*, Sandra Huster, Sonja Rosenberg und Frank Schultmann

DOI: 10.1002/cite.202100112

 This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Die Elektromobilität wird als Schlüsseltechnologie zur Senkung der CO₂-Emissionen im Straßenverkehr gesehen. In der Diskussion um die Klimabilanz der Elektromobilität wird allerdings der hohe ökologische Fußabdruck in der Herstellung batterieelektrischer Fahrzeuge wenig adressiert, der sich insb. durch die ressourcenintensive Traktionsbatterie ergibt. Neben der Bereitstellung von regenerativem Ladestrom ist eine effiziente Kreislaufführung der Batteriematerialien und eine möglichst lange Nutzung der Batteriesysteme und Komponenten Voraussetzung für die nachhaltige Gestaltung der Elektromobilität. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick zur kreislaufwirtschaftlichen Wertschöpfungskette von obsoleten Traktionsbatterien aus Elektromobilen. Mithilfe eines systemdynamischen und eines ereignisdiskreten Simulationsansatzes werden zukünftige Rücklaufmengen obsoletter Traktionsbatterien auf Basis aktueller Diffusionsszenarien abgeschätzt sowie unterschiedliche Verwertungsoptionen von 2nd-Life-Konzepten bis hin zu alternativen Recyclingverfahren dargestellt und diskutiert.

Schlagwörter: Circular Economy, Elektromobilität, Recycling, Second-Life, Traktionsbatterien

Eingegangen: 16. Juni 2021; *revidiert:* 12. Juli 2021; *akzeptiert:* 03. August 2021

Return Rates and Recovery Options of Used Electric Vehicle Traction Batteries in Germany

Electro-mobility is considered a key technology for reducing CO₂ emissions in road traffic. However, an aspect that is little addressed in the discussion about the advantages of electro-mobility for the reduction of greenhouse gas emission is the high ecological footprint of the manufacturing of electric vehicles, especially due to the resource-intensive traction battery. In addition to the provision of renewable electricity for vehicle charging, efficient recycling of the battery materials and the longest possible use of the battery systems and components are prerequisites for the sustainable design of electro-mobility. This article provides an overview of the circular value chain of obsolete traction batteries from electric vehicles. Based on a system-dynamics and a discrete-event simulation approach, future return quantities of obsolete traction batteries are estimated on the basis of current diffusion scenarios, and various utilization options from 2nd-life concepts to alternative recycling processes are presented and discussed.

Keywords: Circular economy, Electromobility, Recycling, Second-life, Traction batteries

1 Einleitung

Batterieelektrische Fahrzeuge (*battery electric vehicles* (BEVs)) werden als eine zentrale Strategie zur Senkung der Treibhausgasemissionen im Straßenverkehr gesehen. Während andere Sektoren im Vergleich zu 1990 signifikante Emissionsminderungen realisieren konnten, sind die CO₂-Emissionen im Straßenverkehr nahezu konstant geblieben und tragen mit ca. 20 % zu den sektorübergreifenden Gesamtemissionen in Deutschland bei [1]. Die Klimaziele der Bundesregierung sehen eine Reduktion der CO₂-Emissionen im Straßenverkehr um über 40 % bis 2030 vor [1].

Batterieelektrische Fahrzeuge haben das Potenzial, entscheidend zu diesen ambitionierten Reduktionszielen beizutragen. Ein Aspekt, der in der Diskussion um die Vorteilhaftigkeit der Elektromobilität allerdings häufig nicht ausreichend adressiert wird, ist der hohe ökologische

Dr.-Ing. Simon Glöser-Chahoud, Sandra Huster, Sonja Rosenberg, Prof. Dr. Frank Schultmann
simon.gloeser-chahoud@kit.edu
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Industriebetrieb-
slehre und Industrielle Produktion (IIP), Hertzstraße 16,
76187 Karlsruhe, Deutschland.

Fußabdruck der Herstellung eines batterieelektrischen PKW. Wie Abb. 1a zeigt, liegen die Treibhausgasemissionen bei der Herstellung eines BEV um nahezu Faktor 2 höher als bei einem vergleichbaren Verbrenner, was in erster Linie auf die ressourcenintensive Batterie zurückzuführen ist. Ähnliches gilt für weitere Umweltwirkungskategorien in Lebenszyklusanalysen wie „Resource Depletion“ [2] oder „Human Toxicity Potential“ [3]. Jedoch gleicht ein batterieelektrischer PKW diese höheren Anfangsemissionen im Laufe seiner Nutzungsdauer i. Allg. aus, insb. wenn dieser mit regenerativem Strom geladen wird (s. Abb. 1b). Auch weitere Vorteile der Elektromobilität bezüglich Luftschadstoffen des Straßenverkehrs, insb. in urbanen Ballungszentren, sind unumstritten. Nicht zuletzt besteht bei der Herstellung eines BEV noch hohes Verbesserungspotenzial hinsichtlich CO₂-Emissionen, z. B. durch die Nutzung von regenerativem Strom in der Zellfertigung. Dennoch zeigen die Ergebnisse von aktuellen Ökobilanzen und Lebenszyklusanalysen zu batterieelektrischen Fahrzeugen [4–6], dass für die nachhaltige Gestaltung der Elektromobilität neben der Bereitstellung von regenerativem Strom vor allem eine effiziente Kreislaufführung der eingesetzten Komponenten, Materialien und Rohstoffe von zentraler Bedeutung ist.

Dem Batteriesystem, bestehend aus verschalteten Modulen, die wiederum die Zellen als eigentliche elektrochemische Speicher enthalten, kommt dabei eine entscheidende Rolle zu: Nur mit einem funktionierenden Kreislaufsystem dieser Traktionsbatterien kann die Elektromobilität nachhaltig gestaltet werden. Wie in Abb. 2 anhand der allgemeinen Abfallhierarchie dargestellt, sollten dabei möglichst alle Ebenen der *Circular Economy* berücksichtigt werden. Dies beinhaltet eine Weiternutzung der Batteriesysteme oder einzelner Komponenten, nachdem sie für die Anwendung im Automobil unbrauchbar geworden sind, sowie das anschließende möglichst hochwertige und effiziente Recycling.

Ein Li-Ionen-Akku, derzeitiger Standard bei den Batteriesystemen in E-Fahrzeugen, verliert über die Nutzungsdauer und Ladezyklen kontinuierlich an nutzbarer Speicherkapazität. Dieser Leistungsabfall des Batteriesystems ist von zahlreichen Faktoren (Leistungsbeanspruchung, Anzahl der Schnellladezyklen, klimatische Bedingungen etc. [10]) abhängig und kann sehr unterschiedlich verlaufen. Auch altern die einzelnen Zellen i. Allg. unterschiedlich schnell, wobei die Performanz der Module von den schwächsten Zellen bzw. die Leistung des Gesamtbatteriesystems von den schwächsten Modulen bestimmt wird [10]. Es wird davon ausgegangen, dass ein Batteriesystem ab einem

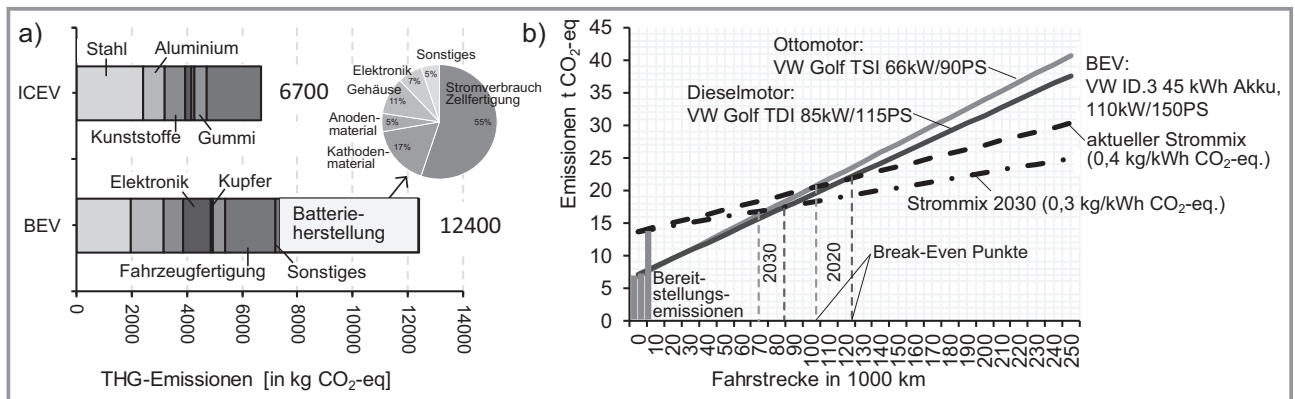


Abbildung 1. Global warming potential (GWP) eines batterieelektrischen PKW (BEV) im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (*internal combustion engine vehicle*, ICEV). a) Emissionen bei der Herstellung eines Kleinwagens (35-kWh-Batteriekapazität für das BEV) basierend auf Berechnungen des IFEU-Instituts [7]. b) CO₂-Emissionen über die Fahrstrecke im Vergleich aktueller VW Golf-Modelle mit dem VW ID.3. Herstellungsemissionen und Verbrauchswerte basieren auf Angaben von VW und VDI [8]. Für die CO₂-Emissionen der Kraftstoffverbrennung wurden für Diesel 2,6 kg L⁻¹ und für Benzin 2,3 kg L⁻¹ angenommen.

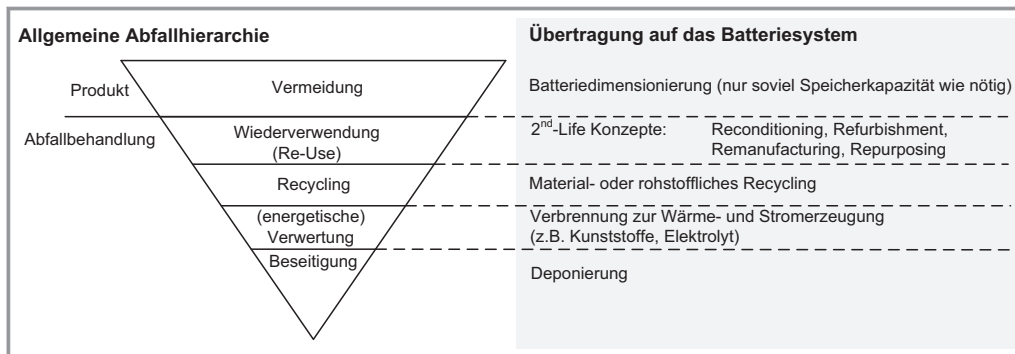


Abbildung 2. Abfallhierarchie nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz, bzw. der EU-Abfall-Direktive [9], sowie deren Übertragung auf unterschiedliche Verwertungswege der Traktionsbatterien von Elektroautos.

State-of-Health (SOH, berechnet als Quotient aus aktueller Speicherkapazität und anfänglicher Kapazität) von unter 70–80 % nicht mehr für den Gebrauch im Elektrofahrzeug geeignet ist [11, 12]. Dies bedeutet aber nicht, dass das Batteriesystem bzw. dessen Komponenten (Module oder Zellen) nicht mehr nutzbar sind. Es bestehen, wie nachfolgend dargestellt, verschiedene Möglichkeiten der Weiternutzung, von der Aufbereitung (*Reconditioning* oder *Refurbishment*) über die (vollständige) Demontage und Remontage (*Remanufacturing*) zur Weiternutzung als Ersatzbatterie im Automobilbereich bis hin zur Umnutzung als stationäre Speichersysteme (*Repurposing*), z. B. zum Einsatz im Energiesystem mit fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung. Bezüglich der Abgrenzung der oben genannten Begriffe, die in der Literatur teilweise als ebenbürtig angesehen werden (vor allem Remanufacturing, Reconditioning und Refurbishment) [13], ist zu berücksichtigen, dass die spezifische Definition für Remanufacturing die Aufarbeitung bzw. Aufwertung eines Rückläufers auf oder über die Qualität des erstmals in Verkehr gebrachten Produkts vorsieht [14]. Zwar würde die Aufbereitung einer Batterie die Abfolge einer gewissen Demontage (auf Modul- oder Zellebene) und eine anschließende Remontage vorsehen. Ob hier allerdings die Qualität einer neuwertigen Batterie erreicht werden kann, ist fraglich. Unabhängig von der exakten Begriffsdefinition erscheint es sehr sinnvoll, noch funktionierende Batteriesysteme bzw. deren Komponenten (Module oder sogar Zellen) durch Umwidmung zum stationären Speicher oder zur Weiterverwendung als Ersatzteile im Automobilbereich zu verwerten, bevor am Ende des Gesamtlebenszyklus das Recycling im Sinne der stofflichen Verwertung ansteht.

Während sowohl die Zulassungszahlen als auch die Produktionszahlen von Elektroautos in Deutschland stark ansteigen, ist die Verwertung obsoleter Batteriesysteme erst in der Entwicklung und bietet nach wie vor viel Ungewissheit über zukünftige Verwertungswege und Geschäftsmodelle. Das Ziel dieses Beitrags liegt daher in der Quantifizierung zu erwartender Rücklaufmengen an obsoletem Traktionsbatterien und in der Darstellung potenzieller Verwertungs- und Nutzungsmöglichkeiten dieser Batteriesysteme. Auch werden aktuelle Entwicklungen, Herausforderungen und Hemmnisse in der Demontage und Verwertung dargestellt. Während bisherige Studien vor allem auf bestimmte Verwertungskonzepte und Technologien, wie Recyclingrouten [15] oder 2nd-Use Anwendungen [16], fokussieren, ist dieser Artikel eher als breite Übersicht aktueller Entwicklungen in der Kreislaufführung von obsoletem Batteriesystemen aus Elektrofahrzeugen zu verstehen.

Im nachfolgenden Methodik-Kapitel werden die verwendeten Simulationsmodelle zur Abbildung der Produktlebenszyklen dargestellt. Aufbauend auf aktuellen Zulassungszahlen und Hochlaufsenarien zur Elektromobilität erfolgt anschließend eine Abschätzung der zu erwartenden Rücklaufmengen an Altbatterien in Deutschland. Deren Verwertung wird sowohl aus Sicht unterschiedlicher Recycling-Routen als auch hinsichtlich 2nd-Life-Konzepten wie

Remanufacturing (bzw. Reconditioning) und Repurposing untersucht. Dabei wird auch auf aktuelle Recyclinganlagen und Pilotprojekte in Deutschland eingegangen. Abschließend erfolgt eine Diskussion der Herausforderungen und Hemmnisse auf dem Weg hin zu einer nachhaltigen Kreislaufführung der Traktionsbatterien von Elektromobilen.

2 Methodik

Zur Abschätzung des zukünftigen Aufkommens an Altbatterien aus BEVs wird zunächst eine Simulation des gesamten Lebenszyklus auf Basis von Nutzungsdauerverteilungen durchgeführt. Hierfür hat sich in der Vergangenheit *System Dynamics* als Modellierungsumgebung bewährt [17]. Das Zusammenspiel aus Bestands- und Flussvariablen ermöglicht, wie in Abb. 3 dargestellt, die präzise Modellierung von kalendarischen Alterungsprozessen basierend auf Annahmen oder empirischen Daten zur Lebensdauerverteilung. Dabei stellen die Kästchen den Bestand der Produkte einer Altersklasse dar, wobei nach jedem Jahr basierend auf Ausfallwahrscheinlichkeiten aus den Verteilungsfunktionen errechnet wird, welcher Anteil in den Bestand nächsthöheren Alters fließt (Ventile als Flussvariablen) bzw. welcher Anteil ausfällt oder verschrottet wird. Mithilfe der Simulation solcher Alterungsketten (*Aging Chains*) in Kaskadensystemen lässt sich basierend auf vergangenen Verkaufszahlen und erwarteten zukünftigen Diffusionsszenarien auf einfache Weise das zukünftige Aufkommen an obsoletem Produkten abschätzen. Dieser Modellansatz wird hier zur groben Abschätzung des zukünftigen Altbatterieaufkommens, wie im nachfolgenden Ergebnisteil dargestellt, umgesetzt. Dabei wird ein Zeithorizont bis 2040 gewählt, da von Batterienutzungsdauern zwischen 10 und 15 Jahren ausgegangen wird und ein entsprechendes Aufkommen an großen Mengen an Altbatterien erst nach 2030 zu erwarten ist.

Während das Konzept der Aging Chain geeignet ist, um einfache Produktlebenszyklen abzubilden, ist es mit diesem Ansatz nicht möglich, den Alterungsprozess einzelner Komponenten und deren Rückwirkung auf die Gesamtnutzungsdauer des Systems abzubilden. Derartige Überlegungen sind vor allem dann relevant, wenn davon auszugehen ist, dass das Gesamtfahrzeug länger hält als die Batterie oder umgekehrt. Hierzu wurde ein weiteres Simulationsmodell mit stochastischen Nutzungsdauern entwickelt. Dieser Ansatz ist als ereignisdiskretes Modell (im Englischen als *Discrete-Event Simulation* bezeichnet) implementiert, wobei vereinfachend lediglich die Batterie bzw. das Fahrzeug als unabhängige Entitäten mit unterschiedlichen (voneinander unabhängigen) Lebensdauerverteilungen betrachtet werden. Durch die iterative Wiederholung von diskreten Nutzungsdauerkonstellationen, können verschiedene Zustände wie z. B. das zu erwartende Alter der Fahrzeuge bei Ausfall der Batterie untersucht werden. Dies kann für die Analyse gewisser Verwertungswege, wie z. B. der Aufbereitung von Altbatterien als Ersatzteile für ältere Fahrzeuge, genutzt

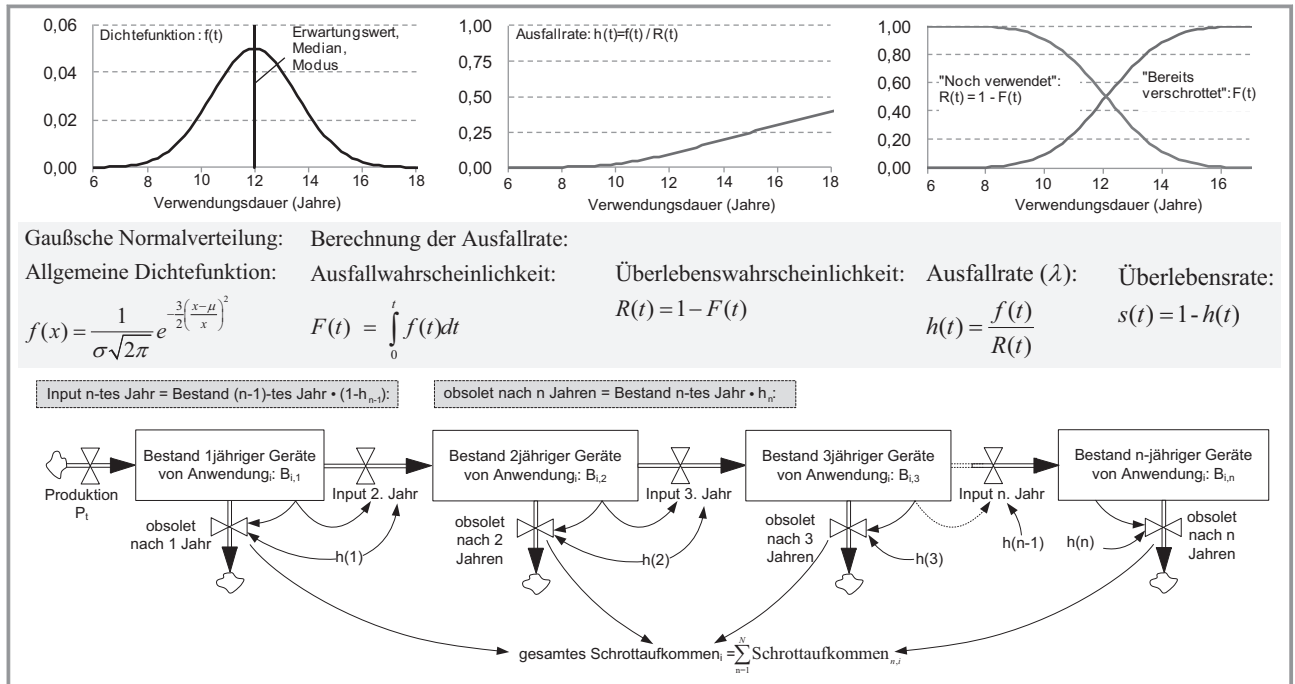


Abbildung 3. Prinzip einer in systemdynamischer Entwicklungsumgebung implementierten Aging Chain zur Simulation des Alterungsprozesses eines Produktes über dessen Lebensdauer in einem kontinuierlichen Kaskadenmodell. Nach jedem Jahr werden basierend auf der Ausfallwahrscheinlichkeit, die aus den zugrundeliegenden Verteilungsfunktionen berechnet wird, die Anteile bestimmt, die in die nächsthöhere Altersklasse fließen bzw. verschrottet werden.

werden. So kann konkret abgebildet werden, in welchem Umfang Konstellationen zu erwarten sind, bei denen ein an sich noch gut funktionierendes Fahrzeug aufgrund einer defekten Batterie nicht länger nutzbar ist bzw. ob in diesem Fall eine Versorgung mit aufbereiteten Ersatzbatterien möglich ist. Abb.4 stellt das für diesen Beitrag verwendete Simulationsmodell vereinfachend dar, das für die anschließende Diskussion unterschiedlicher Nutzungskonzepte als quantitative Grundlage dient. Da es sich um eine Simulation diskreter Nutzungsdauerkonstellationen basierend auf Wahrscheinlichkeitsverteilungen handelt, ist eine hohe Anzahl an iterativen Simulationsläufen notwendig, um stabile Ergebnisse zu erzielen. Für das hier eingesetzte Modell

haben sich 2 Millionen Simulationsläufe als sinnvolle Größenordnung ergeben, bei der trotz stochastischer Nutzungsdauern eine Wiederholung der iterativen Simulation zu nahezu identischen Ergebnissen führt.

3 Ergebnisse

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse der Simulationsläufe werden mit einer Analyse der jeweils relevanten Verwertungswege kombiniert. Wie in Abb. 2 bereits dargestellt, sind aus kreislaufwirtschaftlicher Sicht vor allem 2nd-Life-Konzepte im Sinne einer Wiederverwendung der Batterien oder ihrer Komponenten und verschiedene Recyclingverfahren relevant. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich diese alternativen Verwertungswege nicht grundsätzlich ausschließen, sondern idealerweise in einer zeitlichen Abfolge stehen: Nach einer zweiten Verwendungsphase steht für eine Batterie immer das möglichst hochwertige Recycling an. Zunächst werden im ersten Abschnitt unterschiedliche Recyclingwege vorgestellt, da das Recycling unabhängig von einer

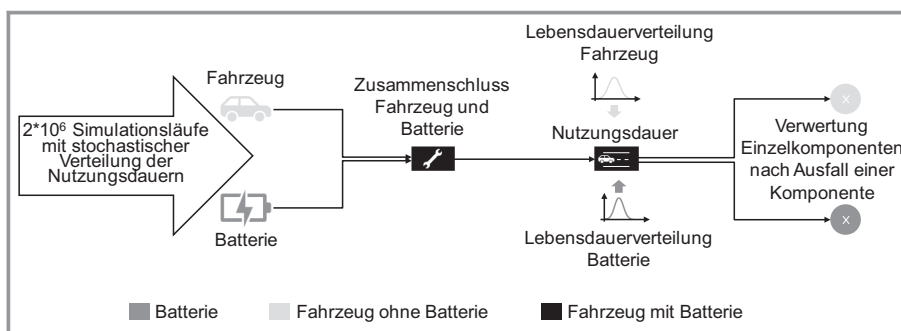


Abbildung 4. Prinzip des entwickelten ereignisdiskreten Modells, in dem die Batterie und das Fahrzeug jeweils als separate Entitäten betrachtet werden, die unterschiedliche Lebensdauererwartungen haben. Über iterative stochastische Simulation lassen sich so unterschiedliche Konstellationen hinsichtlich des frühzeitigen Ausfalls der Batterie bzw. des Fahrzeuges darstellen.

möglichen zweiten Nutzungsphase grundsätzlich umgesetzt werden muss.

3.1 Rücklaufmengen und Recycling

Wie im Methodikteil bereits erläutert, basiert die Abschätzung des zukünftigen Aufkommens an obsoleten Traktionsbatterien auf einer Simulation der Nutzungsdauern der Batterien unter Berücksichtigung von historischen und zukünftig erwarteten Zulassungszahlen an Elektrofahrzeugen (BEV und PHEV (*plug-in hybrid electric vehicle*)). Es gab in den vergangenen Jahren zahlreiche Studien zu Hochlaufszenerarien der Elektromobilität, die sich in ihrer Einschätzung der Technologiediffusion stark unterscheiden und schnell obsolet werden, da sich die technischen und politischen Rahmenbedingungen rasch ändern. Die hier durchgeführte Abschätzung der Rücklaufmengen an Altbatterien orientiert sich an aktuellen Studien von Deloitte [18] und der Nationalen Plattform zur Zukunft der Mobilität (NPM) [19], welche die aktuelle Fördersituation von Elektroautos in Deutschland berücksichtigt (Umweltpremie von bis zu 9000 €, wobei der Bund 6000 € und die Hersteller 3000 € übernehmen). Für die historischen Zulassungen wurde auf Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) zurückgegriffen. Wie Abb. 5 oben links zeigt, haben sich die Zulassungszahlen für BEVs und PHEVs im Jahr 2020 mehr als verdreifacht und erreichen jeweils ca. 200 000 Zulassungen. Im Jahr 2021 erscheinen ca. 300 000 Zulassungen an reinen BEVs nach aktuellem Stand realistisch, was bereits ca. 10 % der Gesamtzulassungen an PKW in Deutschland entspräche. Für die Abschätzung der zukünftigen Rücklaufmengen an Altbatterien wurden zwei Szenarien zur Entwicklung der Neuzulassungen an BEVs und PHEVs kombiniert mit zwei Annahmen zur Nutzungsdauerverteilung der Batteriesysteme. Im ersten Fall wird lediglich ein Erwartungswert der Verteilfunktion von 10 Jahren angenommen, während im zweiten Fall von 15 Jahren ausgegangen wird (dieser Bereich zwischen 10 und 15 Jahren Nutzungsdauer der Batte-

rien entspricht gängigen Annahmen aus aktueller Literatur [20–23]). Weiterhin ist zu erwarten, dass die Batterien in PHEVs aufgrund der geringeren Beanspruchung tendenziell langlebiger sind als die Batterien in BEVs, hier wird allerdings vereinfachend davon ausgegangen, dass der Bereich zwischen 10 und 15 Jahren beiden Fällen gerecht wird. Wie in Abb. 5 rechts dargestellt, ergibt sich aus der Kombination der optimistischen Entwicklung zur Elektromobilität und der niedrigeren Lebensdauererwartung sowie der moderaten Entwicklung und der längeren Lebensdauererwartung ein Trichter an zu erwartenden Rücklaufmengen. Was hier allerdings zunächst nicht berücksichtigt wird, ist der Export an gebrauchten Elektrofahrzeugen und die Frage, ob diese Batterien wirklich in Deutschland zugänglich sein werden. Diese Frage wird im Diskussionsteil nochmals aufgegriffen.

Neben den Altbatterien ist für einen Automobilstandort wie Deutschland natürlich auch das Aufkommen an Produktionsausschüssen zu berücksichtigen. Während in Deutschland jährlich ca. 3 Mio. PKW zugelassen werden, werden fast 5 Mio. PKW produziert [24]. Es bleibt zu hoffen, dass Deutschland auch mit der Technologietransformation hin zur Elektromobilität diese hohen Exportquoten halten kann. Für das Aufkommen an Produktionsausschüssen ist zu erwarten, dass auch hier erhebliche Mengen verwertet werden müssen. Dabei muss allerdings klar zwischen den Ausschüssen der Zellfertigung, die sehr hoch ausfallen (im oberen einstelligen Prozentbereich [25]) und häufig in internen Kreisläufen direkt verwertet werden, und Produktionsausschüssen bei der Modul- und Packfertigung unterschieden werden. Eine Abschätzung der Ausschussquote bei der Modul- und Packfertigung ist sehr schwierig, da fehlerhafte Komponenten auch häufig nachgearbeitet werden können und nicht zwingend direkt als Ausschuss anfallen. Dennoch sollte die Ausschussquote gerade beim Hochfahren der Produktion neuer Modelle nicht unterschätzt werden. Gleichzeitig fallen in der Entwicklungsphase, bei Vorserienfahrzeugen und Testfahrzeugen zusätzliche Ausschüsse an. Insgesamt ist zu erwarten, dass besonders in den kommenden 10 Jahren, in denen noch verhältnismäßig

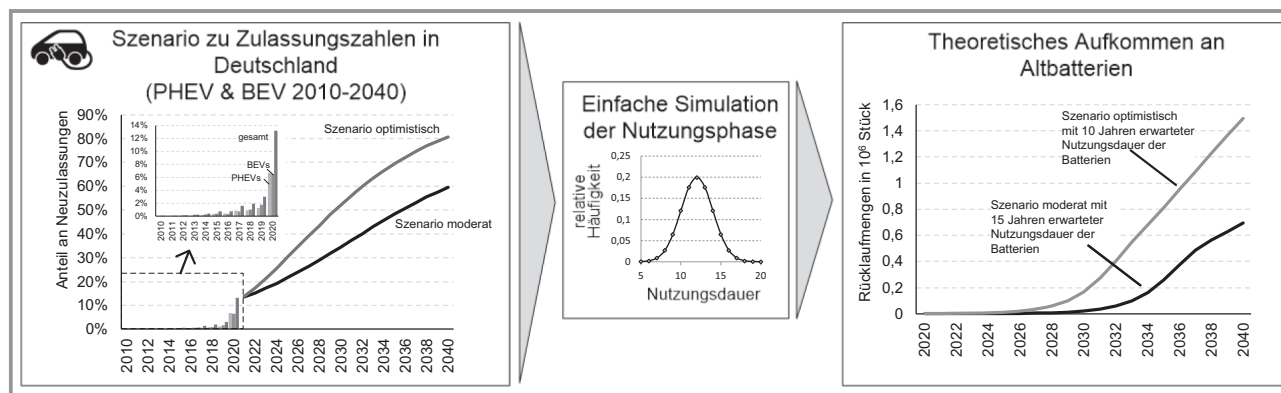


Abbildung 5. Ergebnisse der Lebenszyklus-Simulation zur Abschätzung zukünftiger Rücklaufmengen an Batterien. Basierend auf dem Szenario zur Diffusion von BEVs und PHEVs in Deutschland wurden zwei pauschale Verteilfunktionen für die Gesamtnutzungsdauern angenommen (einmal mit Erwartungswert 10 Jahre und einmal mit Erwartungswert 15 Jahre).

wenige Rückläufer in Form von Altbatterien zu erwarten sind (Abb. 5 rechts), Produktionsausschüsse einen erheblichen Anteil an den zu verwertenden Batteriekomponenten haben werden.

Die hier dargestellten Rücklaufmengen an Altbatterien müssen in Zukunft verwertet werden, was das aktuelle Aufkommen an Batterieschrotten aus Elektro-Altgeräten bei Weitem überschreitet. So ist davon auszugehen, dass die Recyclingkapazitäten für die Verwertung von Li-Ionen-Batterien in den kommenden Jahren stark ausgebaut werden. Dabei lassen sich nach heutigem Stand drei grundsätzliche Typen von Recyclingverfahren unterscheiden. Es ist nicht Ziel dieses Beitrags, einen detaillierten Überblick aktueller Recyclingprozesse zu geben, da dies schon umfangreich in der Fachliteratur zu finden ist [26–28]. Daher soll hier nur ein kurzer Überblick über die drei grundsätzlichen Verfahrenstypen gegeben werden. Wie Abb. 6 zeigt, lässt sich zwischen pyrometallurgischen Verfahren mit anschließender hydrometallurgischer Aufbereitung der Schmelzlegierungen, mechanischer Zerkleinerung der Module, Sortierung und anschließender hydrometallurgischer Rückgewinnung der

Elektrodenmetalle aus der Schwarzmasse und sog. direkten Recyclingverfahren (*Direct Recycling*) unterscheiden. Direkte Recyclingverfahren gewinnen Elektrodenmaterialien in ausreichend hoher Qualität zurück, sodass sie unmittelbar in der Elektrodenfertigung wiederverwendet werden können. Industriell werden hauptsächlich die ersten beiden Verfahren eingesetzt, da das Direct Recycling noch keinen industriellen Reifegrad erreicht hat und auch tendenziell vor allem für Produktionsausschüsse und Batterien jüngerer Generation in Frage kommt. Dies liegt daran, dass sich die Zelltechnologien, insb. die Elektrodenmaterialien, rasant entwickeln und es daher nicht realistisch erscheint, aus älteren Rückläufern Materialien zu gewinnen, die direkt wieder in der Zellfertigung einsetzbar sind. In diesem Fall kommt nur das rohstoffliche Recycling zum Tragen, wobei natürlich auch hier eine Zellöffnung zur präzisen Trennung der Materialien wie in Abb. 6 rechts dargestellt sinnvoll sein kann.

Pyrometallurgische Verfahren gelten als robust und können mit einer gewissen Breite an Zellmaterialien umgehen, was vor allem für die Verwertung von heterogenen

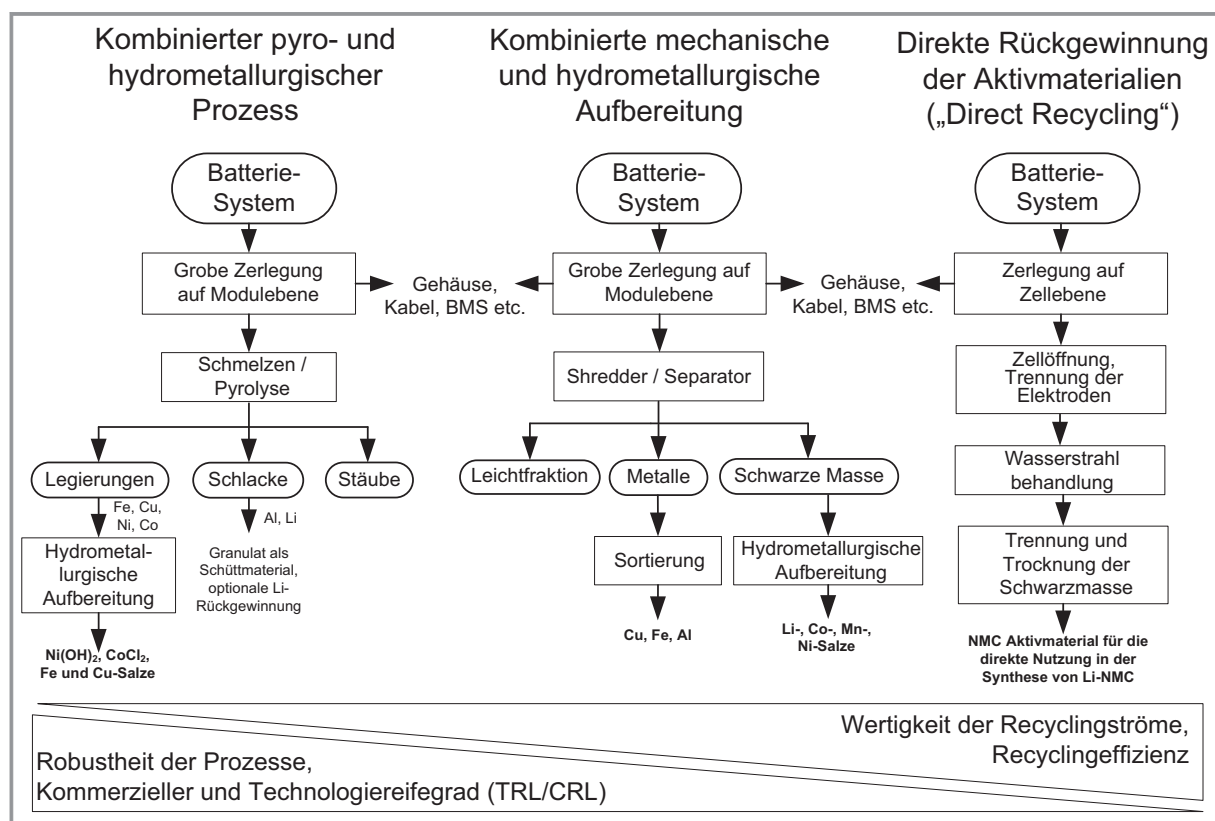


Abbildung 6. Grundsätzliche Ansätze zum Recycling von Li-Ionen-Batterien [26, 29]. Zur Rückgewinnung von Rohstoffen in der notwendigen Qualität zur Batteriefertigung (Co-, Ni-, Li-Salze) ist immer eine hydrometallurgische Aufbereitung notwendig. Pyrometallurgische Prozesse haben den Vorteil, eine breite Palette an unterschiedlichen Zellchemien verwerten zu können, was vor allem für Akkus aus Elektronikschrotten einen entscheidenden Vorteil bringt. Die mechanische Zerkleinerung, Trennung und hydrometallurgische Aufbereitung weist höhere Effizienzen, insb. hinsichtlich der Rückgewinnung von Lithium und Aluminium auf. Das Direct Recycling zielt auf eine spezifische Trennung der Aktivmaterialien der Elektroden ab (Kathodenmaterial (NMC) und Anodenmaterial (Graphit)), die dann wiederum direkt in der Zellfertigung zu Primärmaterialien beigemischt werden könnten (hier besteht allerdings noch viel Entwicklungsbedarf) [29].

Altbatterien aus Elektronikanwendungen entscheidend ist. Diese Verfahren zielen hauptsächlich auf die Rückgewinnung der hochwertigen Kathodenmetalle (Co, Ni, Mn) ab, während Metalle wie Lithium oder Aluminium aber auch Graphit meist nicht zurückgewonnen werden. Die mechanische Zerkleinerung und Trennung mit anschließender hydrometallurgischer Aufbereitung erreicht i. Allg. höhere Recyclingeffizienzen, was auch die Rückgewinnung von Lithium, Aluminium, oder Graphit beinhaltet und gegebenenfalls die Trennung von Kunststoffen sowie des Elektrolyten ermöglicht [30]. Diese Prozesse sind allerdings meist anfälliger gegen Kontamination durch z. B. Lithium-Eisen-Phosphat (LFP)-Zellen oder andere Zellmaterialien. Nichtsdestotrotz erscheint eine vorherige Sortierung bei großen Traktionsbatterien weit realistischer als bei Altbatterien aus Elektroschrotten. Auch schreibt die im Dezember 2020 vorgeschlagene Batterieverordnung der EU [31] hohe Recyclingquoten für Traktions-Altbatterien vor, die mit mechanischer Zerkleinerung und Sortierung sowie anschließender Hydrometallurgie besser zu erreichen sind. So sind in Zukunft weiterhin pyro- und hydrometallurgische Verfahren relevant, die Verwertung von Traktionsaltbatterien wird aber aufgrund der höheren Recyclingeffizienzen (insb. hinsichtlich des Lithiums) tendenziell stärker ohne pyrometallurgische Vorbehandlung stattfinden. Tab. 1 gibt einen Überblick über aktuelle Recyclinganlagen sowie geplante Anlagen in Deutschland. Diese Kapazitäten werden in den kommenden Jahren weiter ausgebaut werden, wobei vor allem mit Kapazitätssteigerungen bei Prozessen zu rechnen ist, die konkret auf die Verwertung von Traktionsaltbatterien aus Elektroautos ausgelegt sind.

Eine grundsätzliche Herausforderung beim Recycling von Altbatterien aus Elektrofahrzeugen wird die Wirtschaftlichkeit des Recyclings sein. Zwar weisen Li-Ionen-Akkus einen hohen Materialwert auf (vgl. Abb. 7a), aber die Lagerung, der Transport und die Zerlegung der als Gefahrgut eingestuftes Hochvoltbatterien ist mit hohen Kosten verbunden. Wie Abb. 7a zeigt, hat die systematische Substitution des hochpreisigen Kobalts in NMC-Zellen zwar die Material- und damit die Produktionskosten reduziert (derzeit läuft bei vielen Herstellern die Umstellung von NMC622 zu NMC811), allerdings mindert dies auch die Erträge des abschließenden Recyclings. LFP-Batterien werden in Europa wegen der geringeren Energiedichte kaum in PKWs, sondern hauptsächlich in Bussen und größeren Nutzfahrzeugen eingesetzt. Hier wird eine wirtschaftliche Verwertung aufgrund der niedrigen Materialwerte noch herausfordernder. Eine zentrale Rolle kommt, wie Abb. 7b auf Basis einer aktuellen Studie aus England aufzeigt, einer Reduktion der Transport- und Demontagekosten zu [32]. Während Altbatterien heute noch hauptsächlich manuell zerlegt werden, ist mit höheren Rücklaufmengen eine höhere Automatisierung der Demontage unumgänglich [33]. Dezentrale Demontagestrukturen, wo die Batteriesysteme frühzeitig auf Modulebene zerlegt werden, können zusätzlich Transportkosten sparen, was ebenfalls zu einer Steigerung der Wirtschaftlichkeit beitragen kann. Zwar sind die Hersteller (original equipment manufacturer, OEMs) nach Kreislaufwirtschafts- und Batteriegesetz verpflichtet, die Altbatterien zurückzunehmen und für deren Verwertung zu sorgen, dennoch ist für die effiziente Gestaltung der Kreislaufführung die Wirtschaftlichkeit des hochwertigen Recyclings von

Tabelle 1. Übersicht zu Recyclinganlagen von Li-Ionen-Batterien in Deutschland. Zu unterscheiden ist zwischen Anlagen, die ein breites Spektrum an Altbatterien verwerten (insb. die mit pyrometallurgischem Prozess) und solchen Anlagen, die auf die Verwertung von Traktions-Altbatterien aus BEVs und PHEVs fokussieren (z. B. Düsenfeld GmbH, ERLOS GmbH, VW Group Components).

Unternehmensname	Hauptsitz/Standort der Anlage	Kapazität [t a ⁻¹]	Prozesskomponenten			
			Mechanische Zerkleinerung	Hydrometallurgie	Pyrometallurgie	Direktes Recycling
Accurec GmbH	Krefeld	6000	x	x	x	
Chemetall bzw. Rockwood Lithium GmbH	Frankfurt a.M.	5000		x		
Düsenfeld GmbH	Wendeburg	3000	x	x		
ERLOS GmbH	Zwickau	1500				x
Nickelhütte Aue GmbH	Aue	n.a.		x	x	
Primobius (Neometals & SMS Group)	Hilchenbach	geplant 20 000	x	x		
PROMESA GmbH & Co. KG	Hettstadt	3200	x			
REDUX GmbH	Bremerhaven	10 000	x		x	
Roth International GmbH	Wernberg-Köblitz	n.a.				
VW Group Components	Salzgitter	1500	x	x		

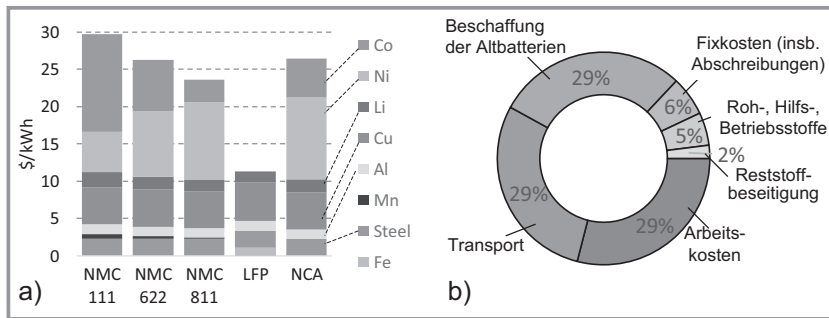


Abbildung 7. Potenzielle Erträge und Kostenstruktur des Recyclings. a) Materialwerte basierend auf aktuellen Rohstoffpreisen (für Materialzusammensetzung s. [34], Preisdaten basieren auf London Metal Exchange (LME) und U.S. Geological Survey (USGS)). b) Kostenstruktur der Verwertung einschließlich Beschaffung, Transport und Zerlegung basierend auf einer aktuellen Studie aus England [32].

großer Bedeutung. Hier spielen auch zukünftige Rohstoffpreise eine wichtige Rolle, die starken Volatilitäten ausgesetzt sind und daher einen weiteren Unsicherheitsfaktor bilden.

3.2 2nd-Life-Konzepte

Zentrales Element einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft ist neben der Kreislaufführung der Rohstoffe eine möglichst lange Nutzung der Produkte, da hierdurch die Nachfrage nach neuen, ressourcenintensiven Produkten reduziert wird. In diesem Zusammenhang werden neben dem Recycling, das grundsätzlich am Ende des Lebenszyklus ansteht, immer wieder 2nd-Life-Konzepte für Traktionsbatterien untersucht [35]. Wie eingangs bereits angesprochen kann dies sinnvoll sein, da eine Batterie, die nur noch 70–80 % ihrer ursprünglichen Speicherkapazität besitzt, für die Anwendung im Automobil als unbrauchbar gilt [11], dies aber nicht bedeutet, dass sie nicht für andere Energiespeicheranwendungen, z. B. als stationärer Speicher, verwendet werden kann. Weiterhin altern die einzelnen Zellen unterschiedlich schnell, wobei die schwächsten Zellen innerhalb der Module bzw. die schwächsten Module die Leistung des Gesamtsystems bestimmen. So ist es sehr wahrscheinlich, dass eine Batterie mit einem SOH von unter 80 % noch einzelne Module oder Zellen enthält, die nach wie vor in sehr gutem Zustand sind. Hier wäre eine Demontage und eine Weiternutzung einzelner Komponenten (z. B. Module) oder eine Aufbereitung der Batterie als Ersatz für ältere Fahrzeuge gleicher Baureihe denkbar, für die die Investition in eine neue Batterie gegebenenfalls nicht wirtschaftlich sinnvoll erscheint. Gleichzeitig ist es aus Sicht der ökologischen Nachhaltigkeit natürlich nicht wünschenswert, wenn die Nutzungsdauer des gesamten Fahrzeugs durch die Lebensdauer der Batterie beschränkt ist.

Im Zusammenhang mit 2nd-Life-Konzepten von Traktionsbatterien lassen sich, wie in Abb. 2 bereits angedeutet, zwei grundsätzliche Ansätze unterscheiden: die Umwidmung der Batterie z. B. als stationärer Speicher (Repur-

posing) oder die Aufbereitung und der weitere Einsatz im Automobilbereich (je nach Tiefe der Aufbereitung als Refurbishment, Reconditioning oder Remanufacturing bezeichnet). Zur grundsätzlichen Untersuchung, unter welchen Umständen die beschriebenen 2nd-Life-Konzepte, insb. die Wiederverwendung im Automobilbereich, sinnvoll sein können, wurde das in Abb. 4 dargestellte ereignisdiskrete Modell für zwei Szenarien mit jeweils 2 Millionen Simulationsläufen eingesetzt. Ziel dieses Simulationsansatzes ist es, darzustellen, wie die Situation von Elektromobilen aussehen könnte, wenn zwischen der Lebensdauer

der Batterie und der des Restfahrzeugs stärkere Diskrepanzen auftreten. Dabei wurde im ersten Szenario davon ausgegangen, dass die Batterie eine Lebenserwartung im Automobil von 10 Jahren hat, während der Erwartungswert der Nutzungsdauer des Fahrzeugs bei 15 Jahren liegt (Szenario 10-15). Im zweiten Szenario haben beide Komponenten eine erwartete Nutzungsdauer von 15 Jahren (Szenario 15-15). Die Nutzungsdauern von Fahrzeugen und Batterien sind in beiden Fällen normalverteilt, wobei die Erwartungswerte zwischen 10 und 15 Jahren gängige Annahmen in aktuellen Studien wiedergeben [20–23]. Weiterhin werden die Modellannahmen hinsichtlich Nutzungsmöglichkeiten in Abb. 8a zusammengefasst. Dabei sind vor allem die folgenden Punkte relevant:

- 85 % der frühzeitig ausgefallenen Batterien sind grundsätzlich für die Umwidmung (Repurposing) brauchbar [36]. Frühzeitig in diesem Zusammenhang bedeutet, dass die Batterie aufgrund eines niedrigen SOHs nicht mehr im Fahrzeug eingesetzt wird, während das Fahrzeug aber noch weiter nutzbar ist.
- Fällt das Fahrzeug, nicht aber die Batterie aus, können die noch funktionierenden Batterien direkt oder nach einem Aufbereitungsschritt (Remanufacturing, Reconditioning) als Ersatzbatterien wieder in Fahrzeugen eingesetzt werden.
- Fahrzeuge, deren Batterie frühzeitig ausfällt, erhalten innerhalb des Garantiezeitraums von 8 Jahren eine Ersatzbatterie. Diese muss nicht neu sein, sondern lediglich dem normalen, zu erwartenden Abnutzungszustand entsprechen [37]. Folglich erhalten junge Fahrzeuge eine neue Ersatzbatterie, ältere Fahrzeuge können innerhalb des Garantiezeitraums auch eine gebrauchte bzw. aufbereitete Batterie erhalten.
- Bei Fahrzeugen, deren Batterie nach Ende des Garantiezeitraums ausfällt, wird anhand der Restlebensdauer der Zustand bestimmt. Fahrzeuge in einem guten Zustand (laut Simulation hohe Restlebensdauer) fragen gebrauchte bzw. aufbereitete Batterien nach. Fahrzeuge in einem schlechten Zustand (laut Simulation niedrige Restlebensdauer) werden vorzeitig verschrottet.

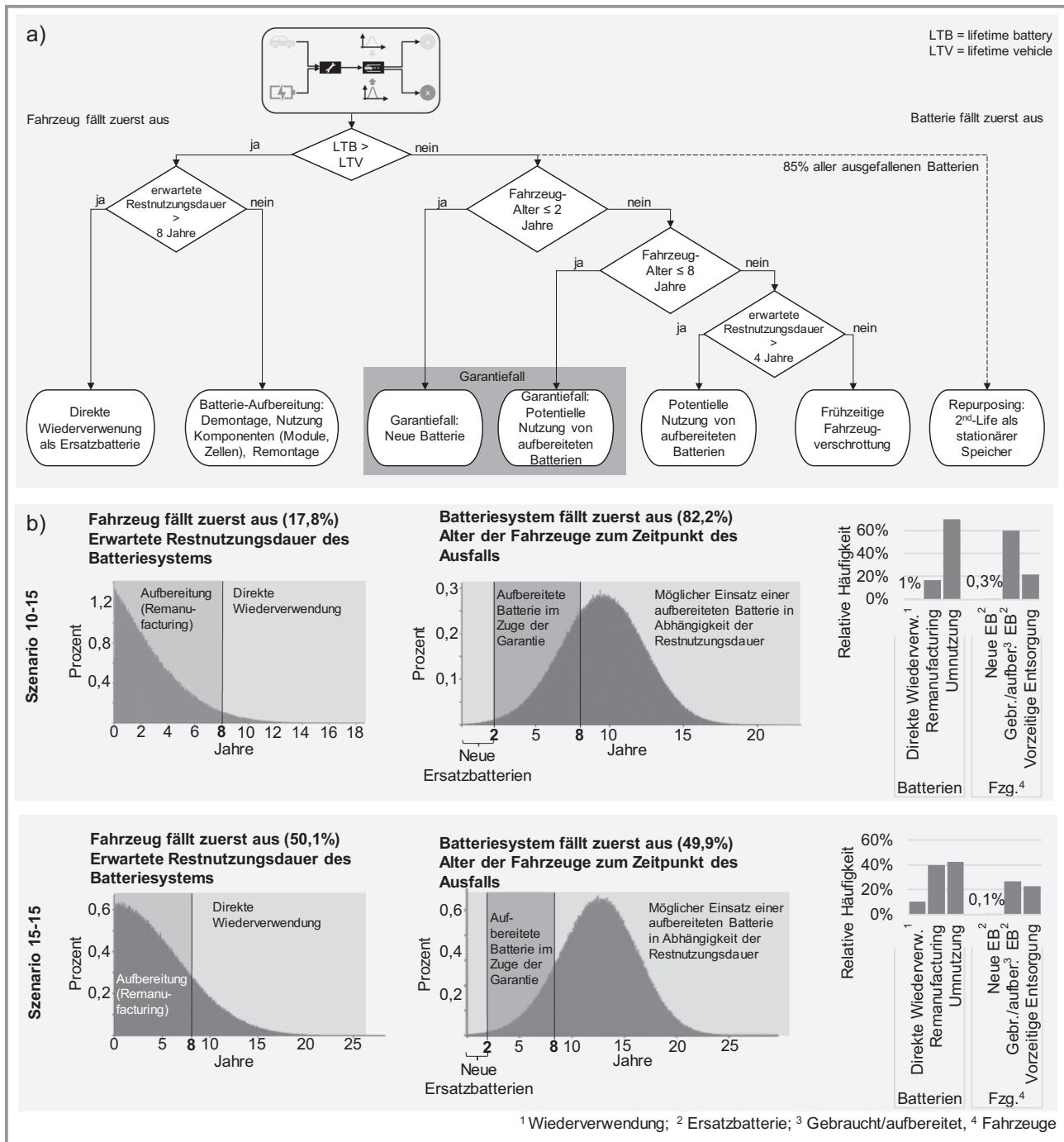


Abbildung 8. Beispielhafte Ergebnisse der stochastischen ereignisdiskreten Simulation. a) Darstellung der potenziellen Situationen abhängig von den eingetretenen Nutzungsdauern der jeweiligen Komponenten. b) Erwartete Restnutzungsdauer der Batterien im Falle eines frühzeitigen Ausfalls des Fahrzeugs sowie Alter der Fahrzeuge zum Zeitpunkt des Ausfalls der Batterie.

Wie die Ergebnisse der Simulationsläufe in Abb.8b zeigen, tritt die Konstellation, dass eine Aufbereitung von Altbatterien als Ersatzteil für ältere Fahrzeuge sinnvoll wäre, um eine frühzeitige Verschrottung der noch funktionierenden Altfahrzeuge zu vermeiden, auf. Dies gilt sowohl für das (10-15)-Szenario als auch für das (15-15)-Szenario. Die

Nutzung aufbereiteter Batterien als Ersatz während der Garantiezeit (8 Jahre) erscheint erwartungsgemäß vor allem dann sinnvoll, wenn von einer geringeren Batterielebensdauer ausgegangen wird. Der Anteil der Batterien, die zur Aufbereitung geeignet sind, ist wiederum im (15-15)-Szenario höher, da es in diesem Szenario durch die höhere

Lebenserwartung der Batterien mehr geeignete Rückläufer gibt. Weiterhin zeigen beide Szenarien, dass es unter den genannten Annahmen zu Situationen kommen kann, in denen die Nutzungsdauer des Fahrzeugs durch die Lebensdauer der Batterie beschränkt ist. Der frühzeitige Kauf neuer Fahrzeuge ist natürlich aus Sicht einer Absatzmaximierung der Produzenten (OEMs) positiv zu sehen, dient aber nicht der ökologischen Nachhaltigkeit, die wiederum in der Debatte um die Notwendigkeit der Elektromobilität regelmäßig hervorgehoben wird. Die Aufbereitung gebrauchter Batteriesysteme (Reconditioning oder Remanufacturing) als Ersatzteile für ältere Elektrofahrzeuge kann hier einen sinnvollen Beitrag leisten. Eine Umnutzung im Sinne des hier beschriebenen Repurposing ist unter den gegebenen Annahmen das am häufigsten umgesetzte 2nd-Life-Konzept. Die direkte Wiederverwendung des Batteriesystems, was dem Fall einer erwarteten Restnutzungsdauer der Batterie von über 8 Jahren zum Zeitpunkt des Ausfalls des Fahrzeugs entspricht, ist in allen Szenarien sehr gering. Dies hebt auch nochmals die Notwendigkeit einer systematischen, indus-

triellen Demontage hervor, durch die eine optimale Verwendung bzw. Verwertung auf Komponentenebene (Module oder sogar Zellen, vgl. Abb. 10) ermöglicht wird.

Während Konzepte der Umnutzung von Traktionsbatterien in zahlreichen Projekten und einigen Pilotanlagen bereits realisiert wurden, bleibt die Aufbereitung von Altbatterien für automobiler Anwendungen bisher eher ein Nischenmarkt. Dies liegt allerdings auch an der derzeit geringen Nachfrage. Ob und wie sich das Remanufacturing von Traktionsbatterien etabliert bleibt abzuwarten.

Hinsichtlich der Nutzung von Rückläuferbatterien als stationäre Speicher, aber auch für andere Umnutzungskonzepte, zeigt Tab. 2 einige aktuelle Anlagen, in denen in erster Linie Automobilhersteller mit Energieversorgern kooperieren. Dabei sind grundsätzlich Anlagen zu unterscheiden, die das gesamte Batteriesystem direkt in einem vorgefertigten Containersystem nutzen, und Anlagen, die eine Zerlegung der Batterien auf Modulebene vorsehen und diese dann separat verschalten. Erstgenannte Lösungen eignen sich auch im Zusammenhang mit der Einlagerung neuer

Tabelle 2. Übersicht aktueller Pilotprojekte zum Einsatz von Altbatterien als stationäre Energiespeicher oder für weitere Konzepte der Umnutzung (Repurposing). Die Angaben wurden den jeweiligen Firmenwebseiten entnommen.

Projektbeschreibung	Beteiligte Unternehmen	Ort
13 MWh Kapazität des Batteriespeichers Verwendung von neuen und umgewidmeten Batterien des Smart-for-Two Elektro (1000 Stück) Einsatz zur Stabilisierung der Primärregelleistung Speicher dient auch als lebendes Ersatzlager	Daimler; The Mobility House AG, GETEC	Lünen
2600 Batteriemodule aus 100 Elektrofahrzeugen aus Entwicklungsfahrzeugen (Active E und BMW i3) 2 MW Leistung und 2,8 MWh Speicherkapazität sowohl als Energiespeicher für eine PV-Anlage verwendet als auch als Puffer-Speicher für Schnellladesäulen	BMW; Bosch; Vattenfall	Hamburg
2nd-Life als mobile Schnellladesäulen mit bis zu 360 kWh Speicher und 100 kW Leistung für gleichzeitiges Laden von bis zu vier E-Pkw kann sowohl autonom genutzt werden als auch mit dem Stromnetz verbunden werden, z. B. zur Anwendung bei Veranstaltungen oder auf öffentlichen Parkplätzen Pilotphase startet 2019 mit sechs Stationen an deutschen Autobahnen	VW, E.ON	landesweit (Start in Wolfsburg)
Energiespeicher mit 1,9 MWh Kapazität Verwendung von 20 Audi e-tron Batteriesystemen aus Test- und Entwicklungsfahrzeugen Verwendung zur Netzstabilisierung und zum Peak-Shaving von umliegenden Gebäude-PV-Anlagen	Audi, BELECTRIC	Berlin
gebrauchte Li-Ionen-Batteriemodule ersetzen Blei-Säure-Batterien von Intra-Logistikfahrzeugen zwei gebrauchte Audi e-tron Batteriesysteme werden auf Module zerlegt und bilden drei 2nd-Life-Batteriesysteme für Intra-Logistikfahrzeuge	Audi	Ingolstadt

Tabelle 2. Fortsetzung.

Projektbeschreibung	Beteiligte Unternehmen	Ort
Energiespeicher aus 500 neuen und gebrauchten Batteriesystemen des BMW i3 (im Jahr 2017)	BMW, Energy2Market GmbH	Leipzig
modularer Aufbau, so dass bis zu 700 Batteriesysteme integriert werden können und zusätzliche Erweiterungen möglich sind		
der Energiespeicher befindet sich auf dem Produktionsgelände des BMW-Werks Leipzig und ist mit dem eigenen Windpark verbunden, dies erlaubt eine Senkung der CO ₂ -Fußabdrücke der produzierten Fahrzeuge		
der Energiespeicher ist auch mit dem öffentlichen Netz verbunden, so dass auch eine Einspeisung möglich ist (gegen entsprechende Vergütung)		

Batterien als Ersatzteile, die während der Lagerzeit schonend als Speicher genutzt werden, was den Alterungsprozess sogar positiv beeinflussen kann (eine eingelagerte nicht genutzte Li-Ionen-Batterie altert ebenfalls, nicht nur kalendarisch, sondern auch hinsichtlich der Performanz [10]). Wenn es dazu kommt, dass ein Fahrzeug eine Ersatzbatterie benötigt, kann diese aus dem Speicher bedient werden, während die Altbatterie aus dem Fahrzeug eingelagert wird (ein solches Konzept verfolgt z. B. Daimler Energy mit den Batterien für den Elektro-Smart, s. Tab. 2). Da die Herstellung von Ersatzteilen außerhalb der Serienfertigung sehr teuer ist, kann eine solche Einlagerung über einen längeren Zeitraum durchaus sinnvoll sein, um auch langfristig Ersatzbatterien bereitstellen zu können. Während die meisten stationären Speicherkonzepte als Industriespeicher in Containersystemen umgesetzt sind (für Peak-Shaving an Solar- oder Windparks, zur Bereitstellung von Regenergie oder um grundsätzlich von zeitlicher Arbitrage am Strommarkt zu profitieren), gibt es auch Ansätze, einzelne Module für kleinere Hausspeicher (5–10 kWh Speicherkapazität) zu verschalten [38]. Hier bilden allerdings Haftungsfragen im Falle einer Fehlfunktion oder eines Brandes relativ starke Hürden für eine breite Realisierung. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass bei Anwendungen von aufbereiteten Batterien als Heimspeicher die Wahrscheinlichkeit eines Personenschadens oder hohen Sachschadens im Falle einer Fehlfunktion verhältnismäßig hoch ist.

4 Diskussion

Wie zuvor aufgezeigt, bestehen bezüglich der Verwertung von obsoleten Traktionsbatterien aus Elektromobilen unterschiedliche Verwertungsoptionen, die alle für eine effiziente Ausgestaltung der Kreislaufführung in Erwägung gezogen werden sollten. So kann es sinnvoll sein, Batterien oder deren Komponenten vor dem Recycling einer zweiten Nutzungsphase zuzuführen. Dies wird vor allem dann interessant, wenn durch neue Zelltechnologien (z. B. die Festkör-

perbatterie) und verbesserte Batterie-Managementsysteme (*battery management system*, BMS) die Lebensdauer-Erwartung der Batterien weiter gesteigert wird. Die empirische Datenlage zur Degradierung der Traktionsbatterien ist aufgrund des derzeit geringen Alters der meisten Elektrofahrzeuge recht dünn. Auch ist zu berücksichtigen, dass die Batteriekühlung, die Zelltechnologie und das BMS in den vergangenen Jahren kontinuierlich verbessert wurden, wodurch historische Erfahrungswerte nicht zwingend auf die Gegenwart und Zukunft übertragbar sind. Weiterhin zeigen unterschiedliche Fahrzeugsegmente mit unterschiedlich dimensionierten Batterien sehr verschiedene Alterungsvorgänge [39]. Ein Grund liegt darin, dass die Alterung der Batterie stark mit den Ladezyklen korreliert, weshalb ein Kleinwagen mit entsprechend kleiner dimensionierter Batterie bei gleicher Fahrleistung eine schnellere Batteriealterung aufweist als Fahrzeuge aus dem Premiumsegment mit eher groß dimensionierten Batterien. So lassen sich die hier aufgezeigten Simulationsergebnisse und Nutzungskonzepte nicht zwingend auf alle Fahrzeugsegmente übertragen, geben aber auch Hinweise darauf, wie eine nachhaltige Elektromobilität mit kleiner dimensionierten Fahrzeugen und Batterien und einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft aussehen kann.

Wie in Abb. 9 dargestellt, setzen hochwertige Verwertungswege wie 2nd-Life-Ansätze, aber auch das direkte Recycling von Aktivmaterialien, eine enge Kooperation verschiedener Akteure entlang der Wertschöpfungskette oder eine stärkere Integration der Automobilwirtschaft in nachgelagerte Bereiche (Energiewirtschaft, Recycling) voraus. Bezüglich der drei grundsätzlichen Recyclingrouten ist auch in Zukunft, wie in Abb. 9 dargestellt, von unterschiedlichen Prozessen auszugehen: Während pyrometallurgische Ansätze vor allem von ihrer Robustheit profitieren und eine Vielzahl an Zellmaterialien verwerten können (z. B. auch kleine Batterien aus Hybridfahrzeugen und Kleinstelektromobilen oder Elektro-Zweirädern), ist für das gezielte Recycling von Traktionsbatterien bekannter Zellchemie eher von kombinierten mechanischen und hydrometallurgischen Prozessen

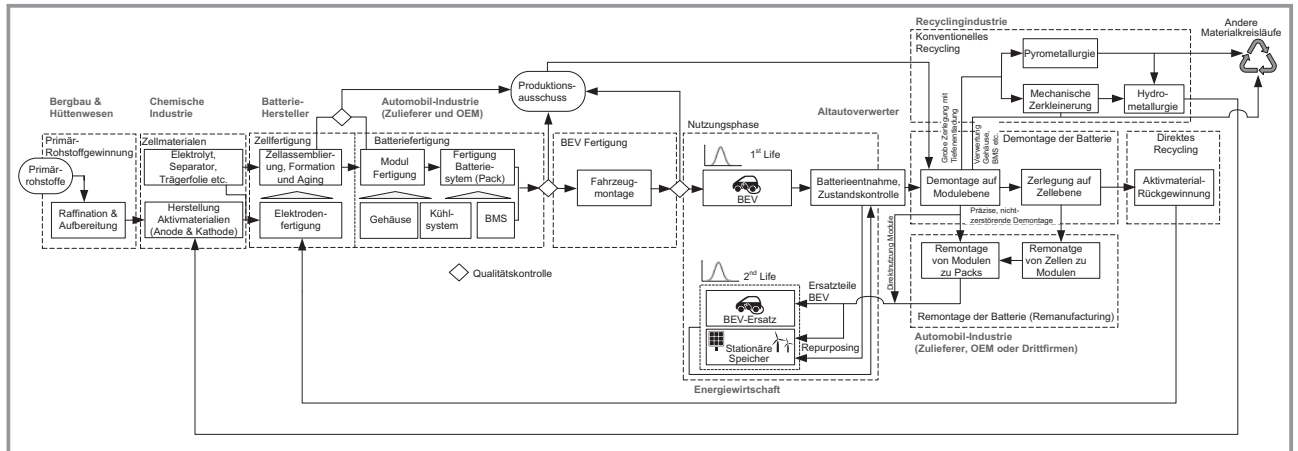


Abbildung 9. Allgemeine Struktur der kreislaufwirtschaftlichen Wertschöpfungskette von Traktionsbatterien einschließlich der hier betrachteten und relevant erscheinenden Verwertungswege.

auszugehen. Dies spiegelt sich auch bereits jetzt in der deutschen Anlagenstruktur wider (s. Tab. 1). Direktes Recycling erscheint vor allem für Produktionsausschüsse und sehr frühzeitige Rückläufer z. B. aus Testfahrzeugen und Vorseifenfahrzeugen realistisch, da die rückgewonnenen Materialien nur dann direkt in die laufende Zellproduktion eingeschleust werden können, wenn diese möglichst identisch sind. Auch für die Verwertung der hohen Ausschussquoten der Zellfertigung ist das direkte Recycling geeignet, da so hochwertige Materialien unmittelbar wiederverwendet werden könnten. So ist zu erwarten, dass Automobilhersteller vor allem dann stärker in das hochwertige Recycling von Li-Ionen-Batterien einsteigen werden, wenn sie auch eine eigene Zellfertigung betreiben, da so sinnvolle Synergieeffekte erzielt werden können.

Die Demontage der Batterien spielt in der kreislaufwirtschaftlichen Wertschöpfung eine zentrale Rolle. Alle Verwertungswege setzen eine Zerlegung der Batterie mindestens bis auf Modulebene voraus. Derzeit wird dies auch aufgrund der geringen Rücklaufmengen hauptsächlich manuell durchgeführt. Mit höheren Rücklaufmengen ist allerdings die Entwicklung von einer Teilautomatisierung bis hin zu vollautomatischen Demontageprozessen vergleichbar zur Automatisierung in der Batterieherstellung zu erwarten. Wie Abb. 7 zeigt, kommt der Demontage aufgrund der derzeit hohen Arbeitskosten bei der Zerlegung und wegen des Preisdrucks durch die Substitution des hochwertigen Kobalts eine zentrale Rolle zu. Auch hinsichtlich der Transportkosten können dezentrale Demontagekonzepte einen entscheidenden Vorteil bringen. Wie in Abb. 10 anhand eines Entscheidungsbaums dargestellt, sollte bezüglich jedes obsoleten Batteriesystems abhängig vom Zustand (SOH), aber idealerweise auch unter Nutzung weiterer Lebenszyklusdaten, eine optimale Verwertung umgesetzt werden.

Hierbei sind auch die unterschiedlichen Formen der Demontage zu berücksichtigen. Während für das reine Recycling eine Tiefentladung der Batterie (was sie für die

weitere Nutzung unbrauchbar macht) und eine grobe Zerlegung auf Modulebene ausreichend ist, setzt die Weiterverwendung einzelner Komponenten (Module oder gar Zellen) eine präzise, nicht-zerstörerische Demontage voraus, die mit höheren Zeit- und Kostenaufwänden verbunden ist. Daher bedarf es für die Demontage präziser Entscheidungsunterstützungsmodelle, die je nach Batterietyp und -zustand die optimalen Demontagestrategien und Verwertungswege festlegen. Vor allem für die hochwertige Demontage für 2nd-Life-Konzepte ist das Batteriedesign von zentraler Bedeutung. Nur mit einem demontagerechten Design scheinen Verwertungswege auf Komponentenebene, wie in Abb. 10 dargestellt, realisierbar. Hier stellt sich wie regelmäßig in kreislaufwirtschaftlichen Wertschöpfungsketten die Frage nach den Anreizen der Hersteller zu demontagerechtem Design. Neben regulatorischen Vorgaben, was z. B. den Zugang zum Batteriemanagementsystem angeht (s. hierzu z. B. den Entwurf der neuen EU-Batterieverordnung [31]), erscheinen einige der in Abb. 9 dargestellten Konzepte nur dann sinnvoll, wenn eine starke Integration der Hersteller in die kreislaufwirtschaftliche Wertschöpfung stattfindet.

Abschließend stellt sich die Frage, inwiefern die durch die Simulation der Lebenszyklen abgeschätzten Rücklaufmengen auch wirklich für die Verwertung in Deutschland zur Verfügung stehen. Diese Frage lässt sich zum jetzigen Zeitpunkt kaum klären. Tatsache ist, dass von den jährlich in Deutschland ca. 3 Mio. endgültig stillgelegten PKW lediglich ca. 0,5 Mio. Fahrzeuge in Deutschland verwertet werden. Der Rest wird als Gebrauchtwagen ins europäische und nicht europäische Ausland exportiert. Ob diese hohe Exportquote auch für gebrauchte Elektrofahrzeuge gilt, ist fraglich, da in vielen bisherigen Zielländern der Gebrauchtwagenexporte gegebenenfalls nicht ausreichend Infrastruktur für eine Verbreitung der Elektromobilität besteht. Allerdings ist zu erwarten, dass nicht die vollständige Menge der in Abb. 5 dargestellten Rückläufer auch wirklich für die

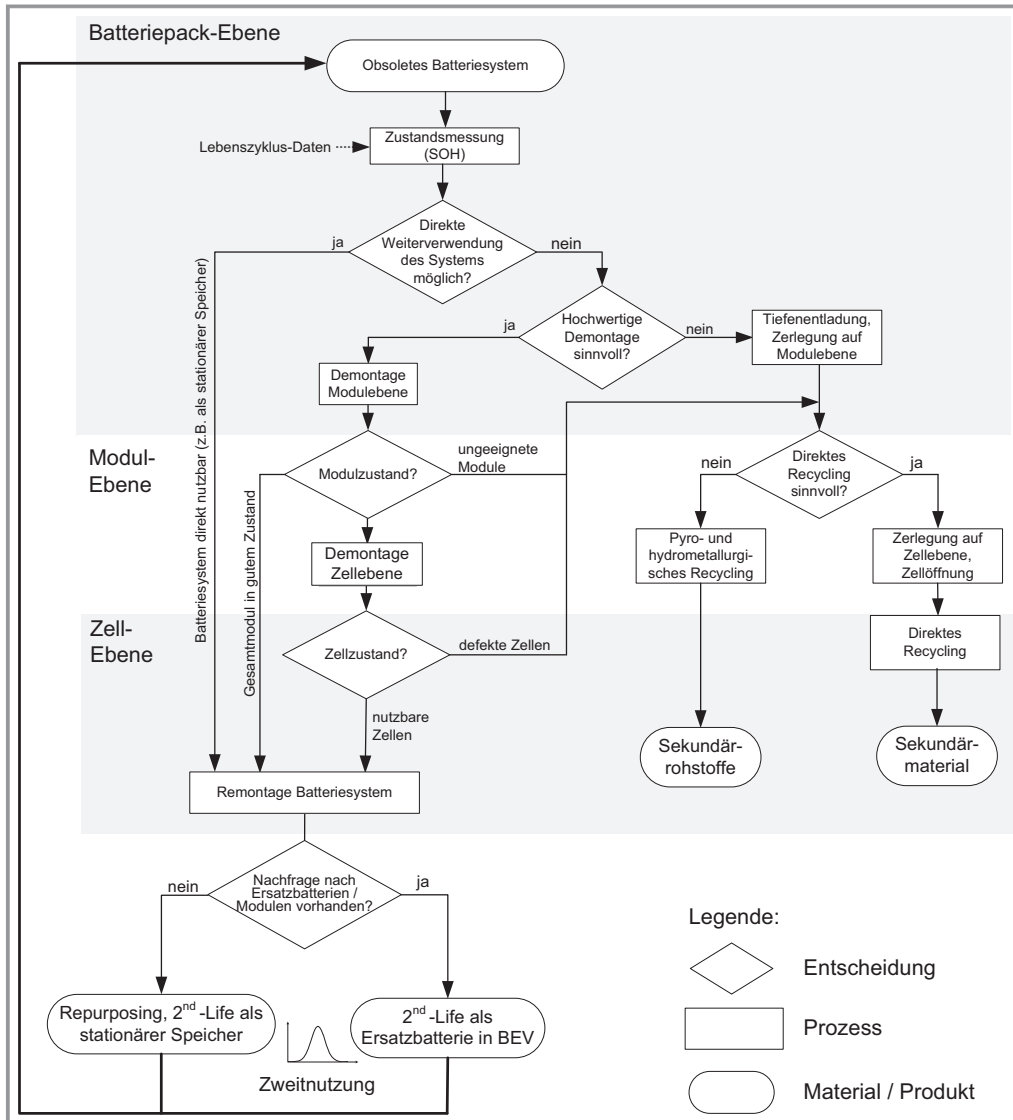


Abbildung 10. Entscheidungsbaum zur Verwertung von Altbatterien. Idealerweise wird am Ende der ersten Nutzungsphase einer Traktionsbatterie, auf Basis des Zustands und weiterer Informationen über den gesamten Lebenszyklus der Batterie, der optimale Verwertungsweg festgelegt. Im Laufe der Demontage fallen weitere Entscheidungen auf Modul- und gegebenenfalls sogar Zellebene an.

Verwertung in Deutschland zur Verfügung steht. Entscheidend für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft der Elektromobilität ist, dass eine effiziente Kreislaufführung unabhängig vom endgültigen Stilllegungsort des BEV ist, d. h. ein weltweites Recyclingsystem aufgebaut wird.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Batterieelektrische Fahrzeuge weisen in der Herstellung einen weit höheren ökologischen Fußabdruck auf als vergleichbare Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Dies ist in erster Linie auf die ressourcenintensive Traktionsbatterie zurückzuführen. Für die Gestaltung einer nachhaltigen Elektromobilität ist eine möglichst hochwertige Verwertung der obsoleten Batteriesysteme aus Elektro-Altfahrzeugen daher unumgänglich. Aktuelle Zulassungszahlen weisen

einen starken Anstieg an batterieelektrischen Fahrzeugen auf. Auch steigt die Produktion von Elektro-Fahrzeugen in Deutschland stark an. Während die Wende hin zur Elektromobilität in vollem Gange erscheint, besteht hinsichtlich der Verwertung von Altbatterien in den kommenden Jahren großer Entwicklungsbedarf. Aus Sicht einer effizienten Kreislaufwirtschaft ist es wenig sinnvoll, Batteriespeicher mit einer Restkapazität von 70–80 % direkt zu recyceln. Es sind unterschiedliche Konzepte der Weiterverwendung der Batteriesysteme oder einzelner Komponenten denkbar. Eine Umwidmung für stationäre Speichersysteme, insb. für große Industriespeicher, die im Zuge des weiteren Ausbaus der erneuerbaren Stromerzeugung immer wichtiger werden, erscheint die naheliegendste Option für die Weiterverwendung von Batteriesystemen nach dem Einsatz im Automobil zu sein. Derartige Konzepte werden mit der kontinuierlichen Verbesserung der Batterietechnologie immer bedeu-

tender. So erscheint es möglich, dass in Zukunft das Batteriesystem weit länger nutzbar ist als das Fahrzeug, in dem es ursprünglich verbaut war. Allerdings zeigen die wenigen Informationen, die zum Alterungsprozess von Traktionsbatterien vorhanden sind, dass es in den unterschiedlichen Fahrzeugsegmenten und den damit verbundenen Batteriekapazitäten zu recht unterschiedlichen Alterungserscheinungen kommt, was in erster Linie auf die größere Anzahl an Ladezyklen bei kleiner dimensionierter Batterie, aber auch auf kostengünstigere und einfachere Kühl- und Batteriemangement-Systeme in Kleinwagen zurückzuführen ist. So kann zwar davon ausgegangen werden, dass das Batteriesystem bei hochpreisigen Fahrzeugen im Premiumsegment die Lebensdauer des Fahrzeuges übersteht. Dies scheint aber bei Kleinwagen eher weniger der Fall zu sein. So ergeben sich, wie durch die einfachen Simulationsmodelle gezeigt, durchaus auch sinnvolle Konzepte der Aufbereitung von Altbatterien als Ersatzteile für ältere Fahrzeuge, deren Batterie ausgefallen ist. Ob sich derartige Konzepte durchsetzen werden, bleibt abzuwarten und hängt auch stark mit dem Design und der Reparierbarkeit der Batterien zusammen. Aus Sicht der Nachhaltigkeit wäre es allerdings kontraproduktiv, wenn die Nutzungsdauer theoretisch noch gut funktionierender Elektrofahrzeuge durch die Lebensdauer der Batterie beschränkt wäre. Die höchste Stufe der Abfallhierarchie (Abb. 2) bezieht sich auf die Abfallvermeidung, da so am effizientesten Ressourcen gespart werden. In diesem Zusammenhang erscheint es fraglich, ob der Trend hin zu immer größeren Speicherkapazitäten der Traktionsbatterien ökologisch sinnvoll ist, oder ob vor allem bei Kleinwagen, die hauptsächlich zum Pendeln im urbanen Verkehr verwendet werden, nicht auch kleiner dimensionierte Batteriesysteme absolut ausreichend sind. Hinsichtlich des Recyclings ist von einer starken Kapazitätssteigerung kombinierter mechanischer Zerkleinerungs- und Trennverfahren und anschließender hydrometallurgischer Aufbereitung auszugehen, da diese Verfahren höhere Recyclingeffizienzen aufweisen. Für Produktionsausschüsse und frühe Rückläufer sind auch direkte Rückgewinnungsverfahren der Aktivmaterialien aus den Elektroden denkbar. Die Demontage nimmt eine zentrale Rolle in der Verwertung von obsoleten Traktionsbatterien ein. Hier erscheint eine höhere Automatisierung zur Senkung der Verwertungskosten unumgänglich für die Wirtschaftlichkeit des Recyclings, aber auch der Wiederverwendung auf Komponentenebene. Idealerweise werden zeitnah hochautomatisierte, robotergestützte Demontageanlagen für die Verwertung der hohen zukünftigen Rücklaufmengen an obsoleten Traktionsbatterien entwickelt und kommerzialisiert.

Der vorliegende Beitrag ist im Zuge der Begleitforschung des Projektes „Industrielle Demontage von Batteriemodulen und E-Motoren zur Sicherung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe für die E-Mobilität (DeMoBat)“ Teil 4: Förderkennzeichen L7520104 entstanden. Die Autoren danken dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg für die Förderung. Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

Abkürzungen

BEV	battery electric vehicle
BMS	battery management system
CRL	commercial readiness level
GWP	global warming potential
ICEV	internal combustion engine vehicle
LFP	Lithium-Eisenphosphat
NCA	Nickel-Cobalt-Aluminium
NMC	Nickel-Mangan-Cobalt
OEM	original equipment manufacturer
PHEV	plug-in hybrid electric vehicle
SOH	state-of-health
THG	Treibhausgase
TRL	technology readiness level

Literatur

- [1] *Klimaschutz in Zahlen: Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik Ausgabe 2020*, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Berlin **2020**.
- [2] G. Majeau-Bettez, T. R. Hawkins, A. H. Strömman, *Environ. Sci. Technol.* **2011**, *45* (10), 4548–4554. DOI: <https://doi.org/10.1021/es103607c>
- [3] P. Girardi, A. Gargiulo, P. C. Brambilla, *Int. J. Life Cycle Assess.* **2015**, *20* (8), 1127–1142. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0903-x>
- [4] T. R. Hawkins, B. Singh, G. Majeau-Bettez, A. H. Strömman, *J. Ind. Ecol.* **2013**, *17* (1), 53–64. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>
- [5] I. Dolganova, A. Rödl, V. Bach, M. Kaltschmitt, M. Finkbeiner, *Resources* **2020**, *9* (3), 32. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources9030032>
- [6] J. van Mierlo, M. Messagie, S. Rangaraju, *Transp. Res. Procedia* **2017**, *25*, 3435–3445. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.244>
- [7] H. Helms, C. Kämpker, K. Biemann, U. Lambrecht, J. Jöhrens, K. Meyer, *Klimabilanz von Elektroautos: Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial*, 2nd ed., Agora Verkehrswende, Berlin **2019**.
- [8] *CO₂-Bilanz von E-Fahrzeugen*, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf **2020**. www.vdi.de/news/detail/co2-bilanz-von-e-fahrzeugen
- [9] Directive 2008/98/EC of The European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on Waste and Repealing Certain Directives, *Off. J. EU* **2008**, *L312*, 3.

- [10] Y. Zheng, M. Ouyang, L. Lu, J. Li, *J. Power Sources* **2015**, 278, 287–295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.12.105>
- [11] A. Podias, A. Pfrang, F. Di Persio, A. Kriston, S. Bobba, F. Mathieux, M. Messagie, L. Boon-Brett, *World Electr. Veh. J.* **2018**, 9 (2), 24. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj9020024>
- [12] J. Neubauer, A. Pesaran, *J. Power Sources* **2011**, 196 (23), 10351–10358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.06.053>
- [13] J. Kirchherr, D. Reike, M. Hekkert, *Resour., Conserv. Recycl.* **2017**, 127, 221–232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- [14] R. Steinhilper, *Remanufacturing: The Ultimate Form of Recycling*, Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart **1998**.
- [15] T. Elwert, F. Römer, K. Schneider, Q. Hua, M. Buchert, in *Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles* (Eds: G. Pistoia, B. Liaw), Green Energy and Technology, Springer, Cham, Switzerland **2018**.
- [16] L. C. Casals, B. A. Garca, *J. Green Eng.* **2016**, 6 (1), 77–98. DOI: <https://doi.org/10.13052/jge1904-4720.614>
- [17] S. Glöser-Chahoud, F. Schultmann, *Mater. Sci. Forum* **2019**, 959, 11–21. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.959.11>
- [18] *Elektromobilität in Deutschland: Marktentwicklung bis 2030 und Handlungsempfehlungen*, Deloitte, Stuttgart **2020**.
- [19] Einsatzmöglichkeiten unter realen Rahmenbedingungen: Arbeitsgruppe 2 Alternative Antriebe und Kraftstoffe für nachhaltige Mobilität, Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Berlin **2020**.
- [20] Y. Wu, L. Yang, X. Tian, Y. Li, T. Zuo, *Resour., Conserv. Recycl.* **2020**, 155, 104651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104651>
- [21] F. Wang, Y. Deng, C. Yuan, *J. Cleaner Prod.* **2020**, 264, 121339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121339>
- [22] K. Richa, C. W. Babbitt, N. G. Nenadic, G. Gaustad, *Int. J. Life Cycle Assess.* **2017**, 22 (1), 66–81. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0942-3>
- [23] S. J. Harris, D. J. Harris, C. Li, *J. Power Sources* **2017**, 342, 589–597. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.12.083>
- [24] *Automobilproduktion: Zahlen zur Automobilproduktion im In- und Ausland*, Verband der Automobilindustrie, Berlin **2021**. www.vda.de/de/services/zahlen-und-daten/jahreszahlen/automobilproduktion.html
- [25] C. Hanisch, J.-H. Schunemann, J. Diekmann, B. Westphal, T. Loellhoeffel, P. F. Prziwara, W. Haselrieder, A. Kwade, *ECS Trans.* **2015**, 64 (22), 131–145. DOI: <https://doi.org/10.1149/06422.0131ecst>
- [26] Velázquez-Martínez, Valio, Santasalo-Aarnio, Reuter, Serna-Guerrero, *Batteries* **2019**, 5 (4), 68. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries5040068>
- [27] G. Harper, R. Sommerville, E. Kendrick, L. Driscoll, P. Slater, R. Stolkin, A. Walton, P. Christensen, O. Heidrich, S. Lambert, A. Abbott, K. Ryder, L. Gaines, P. Anderson, *Nature* **2019**, 575 (7781), 75–86. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>
- [28] R. Sommerville, P. Zhu, M. A. Rajaeifar, O. Heidrich, V. Goodship, E. Kendrick, *Resour., Conserv. Recycl.* **2021**, 165, 105219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105219>
- [29] F. Larouche, F. Tedjar, K. Amouzegar, G. Houllachi, P. Bouchard, G. P. Demopoulos, K. Zaghbi, *Materials* **2020**, 13 (3), 801. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13030801>
- [30] M. Mohr, J. F. Peters, M. Baumann, M. Weil, *J. Ind. Ecol.* **2020**, 24 (6), 1310–1322. DOI: <https://doi.org/10.1111/jiec.13021>
- [31] *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council Concerning Batteries and Waste Batteries, Repealing Directive 2006/66/EC and Amending Regulation (EU) No 2019/1020, 2020/353*, European Commission, Brussels **2020**.
- [32] A. Sattar, D. Greenwood, M. Dowson, P. Unadkat, *Automotive Lithium Ion Battery Recycling in the UK*, The University of Warwick, Coventry **2020**. https://warwick.ac.uk/fac/sci/wmg/business/transportelec/22350m_wmg_battery_recycling_report_v7.pdf
- [33] S. Blankemeyer, D. Wiens, T. Wiese, A. Raatz, S. Kara, *Procedia CIRP* **2021**, 98, 559–564. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.151>
- [34] E. A. Olivetti, G. Ceder, G. G. Gaustad, X. Fu, *Joule* **2017**, 1 (2), 229–243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.08.019>
- [35] S. Bräuer, A. Stieger, in *Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien* (Eds: J. Becker, D. Beverungen, M. Winter, S. Menne), Springer, Wiesbaden **2019**.
- [36] C. R. Standridge, M. M. Hasan, *J. Ind. Eng. Manage.* **2015**, 8 (3), 823–839. DOI: <https://doi.org/10.3926/jiem.1418>
- [37] *Mercedes-Benz Batteriegarantie*, Mercedes-Benz Schweiz AG, Schlieren **2021**. www.mercedes-benz-merbag-schlieren-personenwagen.ch/content/dam/switzerland/reference/PW/SERVICES-ZUBEHOER/CONTENT/battery-certificat/batteriegarantie-c-210x297-de.pdf.asset.yB1kmKSFGEHW5pMs6xN_oiAL2sRhDDdkyVEIo4KSYn4.pdf
- [38] *Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien* (Eds: J. Becker, D. Beverungen, M. Winter, S. Menne), Springer, Wiesbaden **2019**.
- [39] *EV Battery Degradation Comparison Tool*, Geotab Inc., Oakville, ON **2021**. www.geotab.com/fleet-management-solutions/ev-battery-degradation-tool/