

Whitepaper

Batterie-Logistik

In Kooperation mit:



UNIVERSITÄT
LEIPZIG

Mercedes-Benz Energy



INNOVATIONSLABOR
für Batterie-Logistik
in der E-Mobilität



Autoren

Max Plotnikov, Pia Schreynemackers, Charlotte Joachimsthaler, Jan-Philipp Jarmer, Gerd Kuhlmann (Fraunhofer IML), Florian Karlstedt (Rhenus Automotive), Leonard Kropkowski (Fraunhofer HHI), Christian Kürpick (Remondis Industrie Service), Sebastian Müller (Mercedes-Benz Energy), Dr. Christoph Schrade (Universität Leipzig)

Herausgeber

Prof. Dr. Dr. h. c. Michael ten Hompel
Prof. Dr. Michael Henke
Prof. Dr.-Ing. Uwe Clausen

Bildlizenz - Titelbild und Innenteil links

© Adobe Stock, xiaoliangge
Adobe Stock, lassedesignen

DOI

10.24406/publica-1247

© Fraunhofer IML, Dortmund April 2023

Inhalt

1. Einleitung	4
2. Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie	8
2.1. Aufbau und Funktion einer Lithium-Ionen-Zelle	8
2.2. Aufbau Modul und Batterie	10
2.3. Trends	10
3. Rechtliche Rahmenbedingungen	12
3.1. Transport	12
3.2. Lagerung	14
4. Lebenszyklus einer Lithium-Ionen-Batterie aus logistischer Sicht	16
4.1. Beschaffungslogistik für Rohstoffe	16
4.2. Produktionslogistik	19
4.2.1. Zellfertigung	20
4.2.2. Modulmontage	22
4.2.3. Batteriemontage	23
4.3. Batterie-Logistik Pre-Sales	23
4.3.1. Ladungsträger	23
4.3.2. Transportlogistik	24
4.3.3. Lagerung	26
4.4. Nutzung und Informationslogistik	28
4.4.1. Batteriemanagementsystem	28
4.4.2. Laden der Lithium-Ionen-Batterien im Pkw	29
4.4.3. Gefahrenquellen in der Nutzung	30
4.5. Batterie-Logistik After-Sales	30
4.5.1. Entsorgung von Lithium-Ionen-Batterien auf dem Verkehrsträger Straße	31
4.5.2. Nachnutzungs- und Verwertungsmöglichkeiten	33
5. Herausforderung in der Batterie-Logistik	36
6. Ausblick und weitere Forschungsschwerpunkte	39
7. Literatur	40

1. Einleitung

Eine der größten Aufgaben dieses Jahrhunderts ist, unsere Wirtschaftsabläufe klimaneutral, umweltschonend und zirkulär zu gestalten. Dies verändert unsere Art, zu produzieren und zu handeln. In diesem Zusammenhang hat sich der Ansatz der Circular Economy etabliert. Im deutschen Sprachgebrauch wird der Begriff Circular Economy oft synonym mit Kreislaufwirtschaft, die in der Regel aber nur die Abfallentsorgung und das Recycling abdeckt, verwendet. Der Ansatz der Circular Economy geht darüber hinaus und verfolgt eine ganzheitliche, zirkuläre Wirtschaftsweise, die den Nutzen und Wert aller Produkte, Komponenten und Materialien stets auf einem möglichst hohen Niveau hält. Eine Circular Economy bietet viele Chancen, ist zugleich komplex und stellt die Akteure auf ihrer Suche nach den besten Lösungen vor große Herausforderungen. Logistiksysteme spielen eine wichtige Schlüsselrolle dabei, Kreisläufe effizient zu schließen und damit zirkuläre und nachhaltige Lieferketten zu ermöglichen. Weitere Hintergründe und Handlungsempfehlungen können im Whitepaper „Circular Economy Logistics“ nachgelesen werden. [1]

Im Rahmen des Innovationslabor für Batterie-Logistik in der E-Mobilität (InnoLogBat) forscht das Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut HHI, der Universität Leipzig, Remondis Industrie Service, Rhenus Automotive sowie Mercedes-Benz Energy an einer nachhaltigen und zirkulären Wirtschaft von Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge.

Infolge der Ziele der EU bis 2050 sowie der Bundesregierung bis 2045 klimaneutral zu werden [2], wird von einem stark wachsenden Bedarf an Fahrzeugen mit batterieelektrischen Antrieben, insbesondere bei Pkw, ausgegangen (Abbildung 1 und Abbildung 2).

Im Jahr 2018 gab es weltweit mehr als 5,5 Millionen batterieelektrische Pkw, davon etwa 83.200 in Deutschland. Allein bis 2022 hat sich diese Anzahl weltweit mehr als verdreifacht (durchschnittlich fast 4 Millionen batterieelektrische Pkw pro Jahr) und in Deutschland fast verzwölffacht (durchschnittlich

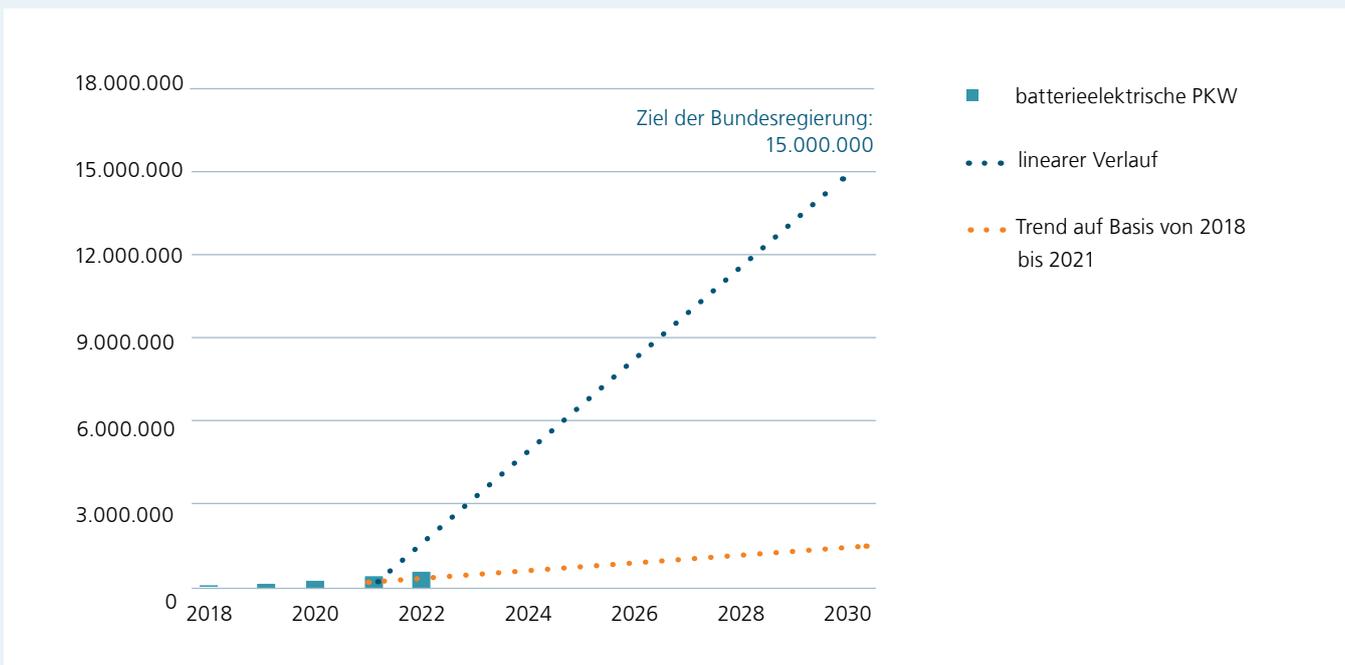


Abbildung 1: Bestand batterieelektrischer Pkw in Deutschland bis 2030 [4]

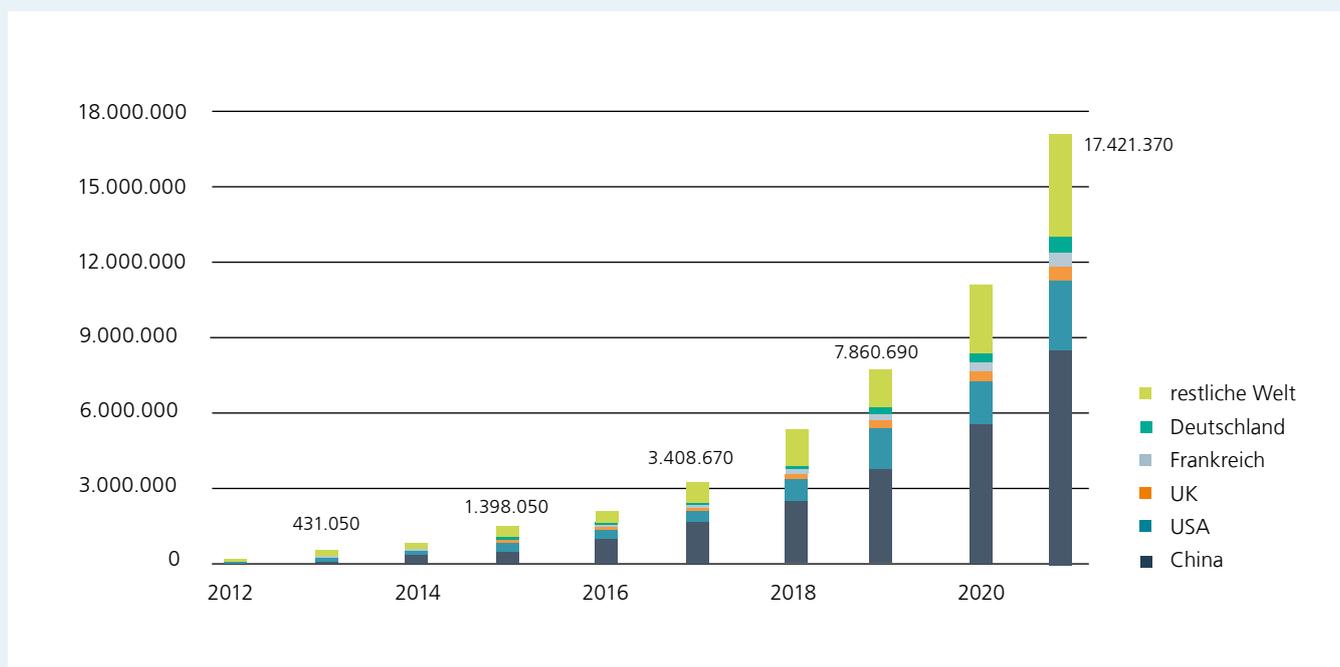
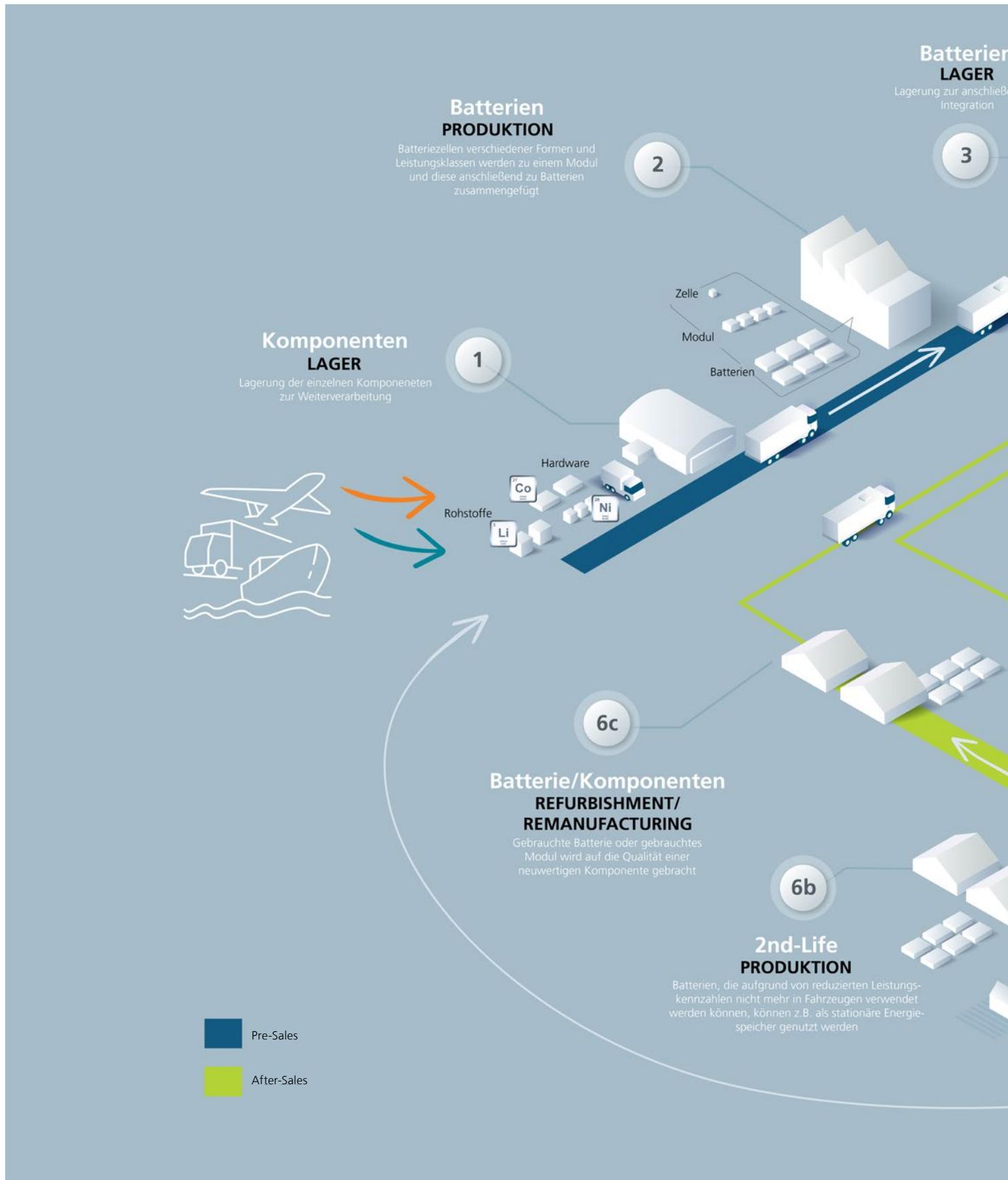


Abbildung 2: Bestand der batterieelektrischen Pkw (BEV & PHEV) weltweit 2012 bis 2021 [3]

fast 20.000 batterieelektrische Pkw pro Monat). Im Dezember 2022 gab es bereits rund 1,05 Millionen rein batterieelektrische Pkw in Deutschland. Noch ohne Berücksichtigung der Abgänge müssen jedoch bis Ende 2030 im Durchschnitt rund 145.000 Fahrzeuge pro Monat zugelassen werden (Netto-Zuwachs), um das Ziel von mindestens 15 Millionen vollelektrischer Pkw zu erreichen [3, 4].

Um diese hohe Nachfrage zukünftig decken zu können und gleichzeitig den Batterielebenszyklus bzw. die jeweiligen Komponenten der Batterien möglichst lange im Kreislauf zu halten, bedarf es innovativer logistischer Konzepte, indem alle sicherheitstechnischen Maßnahmen sowie regulatorische Vorschriften bei der Logistik dieses Gefahrguts berücksichtigt werden. Hierfür müssen neben der Serienfertigung von Lithium-Ionen-Batterien (Pre-Sales) auch Fragestellungen beantwortet werden, die sich nach dem Verkauf des Fahrzeugs und während bzw. nach der Nutzung ergeben (After-Sales). Nach dem sogenannten First-Life - der Nutzung in einem Fahrzeug - der Batterien werden im Rahmen von InnoLogBat Konzepte entwickelt, die dem Grundgedanken einer Circular Economy entsprechen. Hierzu zählen unter anderem Remanufacturing, Second-Life-Anwendungen oder Recyclingprozesse für Lithium-Ionen-Batterien. Ausschuss- und Altbatterien und sonstige nicht mehr als Energiespeicher nutzbare Batterien werden unter dem Begriff End-of-Life-Batterien zusammengefasst. Sofern die Information über die Position im Lebenszyklus für den logistischen Ablauf relevant ist, wird nochmals zwischen End-of-First-Life-Batterien und End-of-Second-Life-Batterien unterschieden.

Ziel dieses Whitepapers ist, den Batterielebenszyklus für Fahrzeugbatterien (Abbildung 3) aus logistischer Perspektive zu beleuchten und darauf aufbauend Herausforderungen in der Batterie-Logistik abzuleiten, sodass neue Handlungsfelder und Forschungsschwerpunkte motiviert werden können.



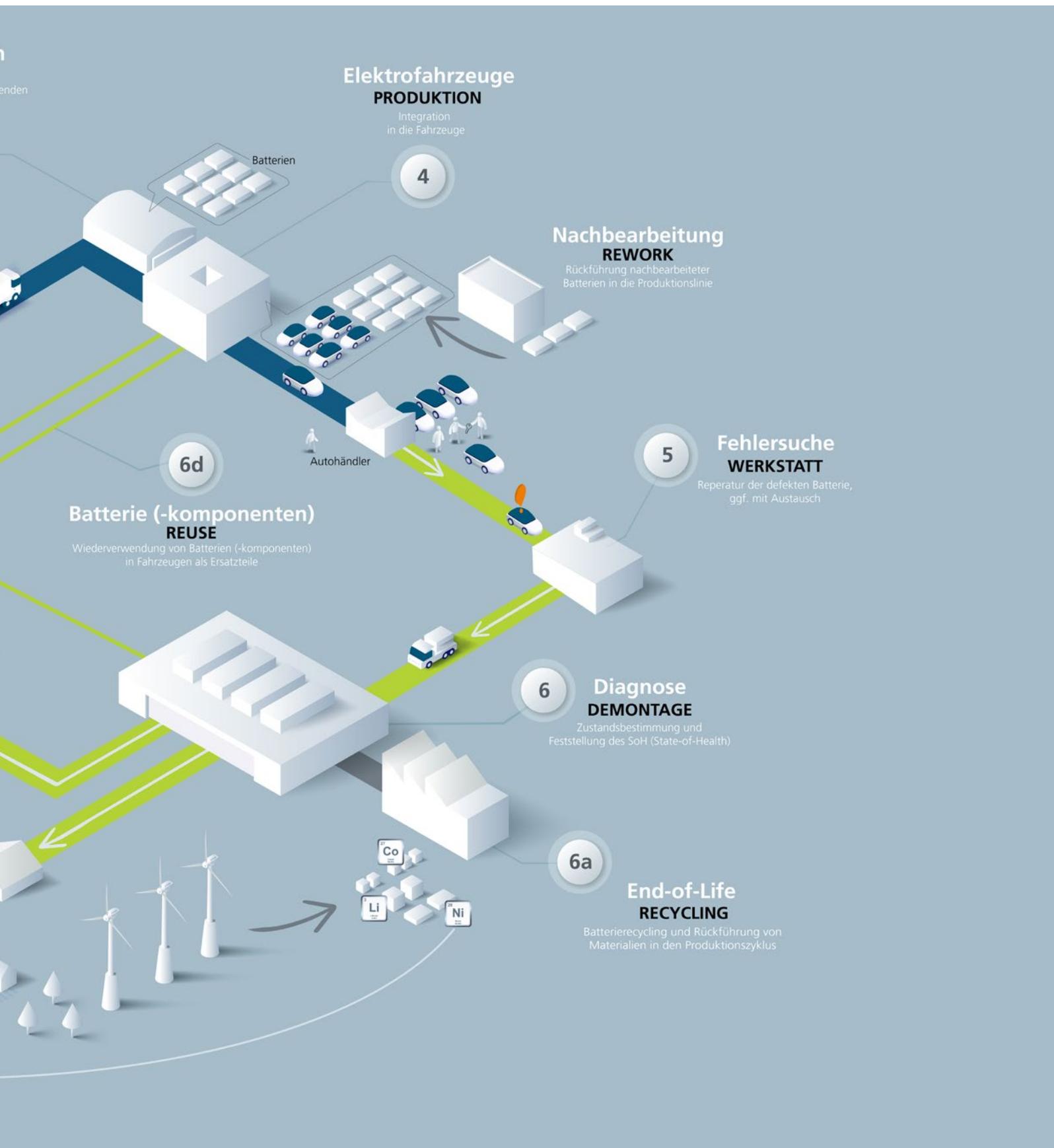


Abbildung 3: Lebenszyklus von Batterien

2. Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie

Im Projekt InnoLogBat werden vordergründig Lithium-Ionen-Batterien betrachtet, die in der Automobilindustrie eingesetzt werden. In der Regel bestehen Lithium-Ionen-Batterien aus den Einheiten Zelle und Modul in größer werdender Reihenfolge. Eine Batterie besteht aus mehreren Modulen, die wiederum mehrere Zellen beinhalten. Je nach geforderten Leistungsdaten werden Zellen, Module und Batterien unterschiedlich gefertigt, verschachtelt, verschaltet und dimensioniert, wodurch eine Vielzahl unterschiedlicher Produkt- und Prozessvarianten entsteht. Um herzuzeigen, um welche Batterien es sich dabei handelt, wird im Folgenden der Aufbau von Zellen und Modulen bis hin zur Batterie (Abbildung 4) erläutert.

2.1 Aufbau und Funktion einer Lithium-Ionen-Zelle

Eine Zelle einer Lithium-Ionen-Batterie besteht aus zwei Elektroden und einem mikroporösen Separator, der die Elektroden voneinander trennt. Dazwischen befindet sich der Elektrolyt, der ionenleitfähig ist. Dieser Aufbau findet sich in jeder Zelle, unabhängig vom Zelltyp, wieder. [6]

Im Entladungsvorgang besteht die Zelle aus einer negativen Elektrode, der Anode, und einer positiven Elektrode, der Kathode. Die Elektroden bestehen jeweils aus einem Stromableiter und einem darauf liegenden Aktivmaterial. Bei der Anode dient eine Kupferfolie als Stromableiter und vorwiegend Graphit als Aktivmaterial, in das positiv geladene Lithium-Ionen eingelagert sind. In der Kathode kommt ein Aluminium-Kollektor als Stromableiter und ein Lithium-Metalloxid als Aktivmaterial zum Einsatz. In Abbildung 5 wird die Batteriezelle im Entladevorgang dargestellt. [5]

Während des Entladevorgangs wandern positiv geladene Lithium-Ionen von der Anode durch die Elektrolytlösung und den Separator zur Kathode und werden dort eingelagert. Bei diesem Oxidationsprozess werden Elektronen frei, die über den Kupferkollektor und den Verbraucher zur positiven Kathode wandern. Dort werden sie durch den dort stattfindenden Reduktionsprozess aufgenommen. [7]

Der Elektrolyt steht in einer Wechselwirkung mit den Elektroden. Ein geeigneter Elektrolyt bildet an der Anode eine elektronen-isolierende Schicht, genannt „Solid Electrolyte Interphase“ (SEI).

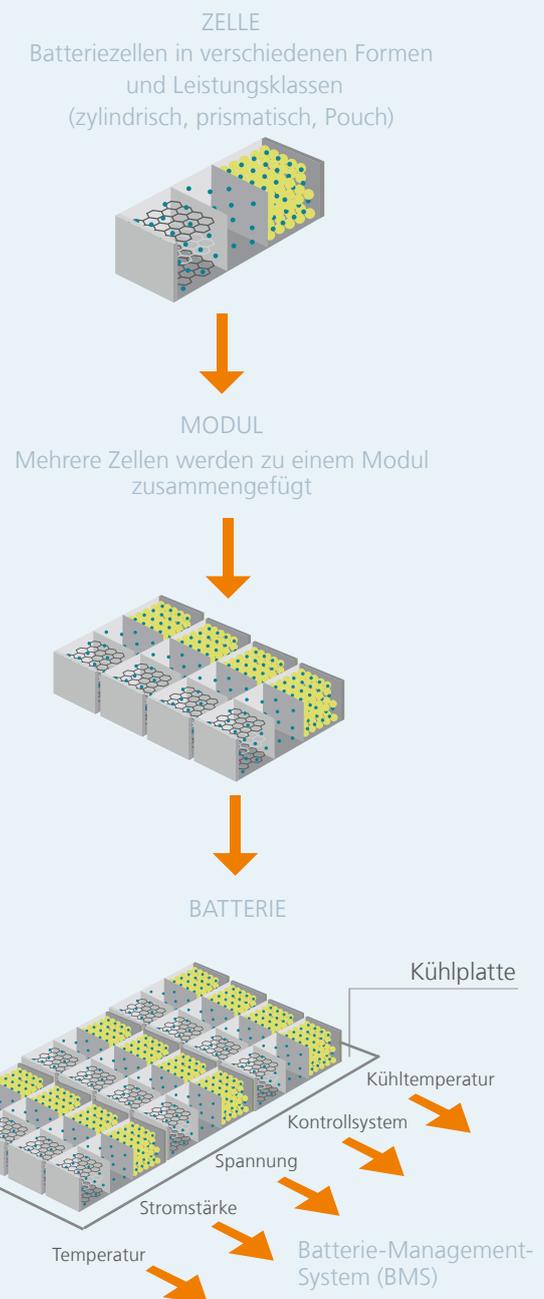


Abbildung 4: Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie [5]

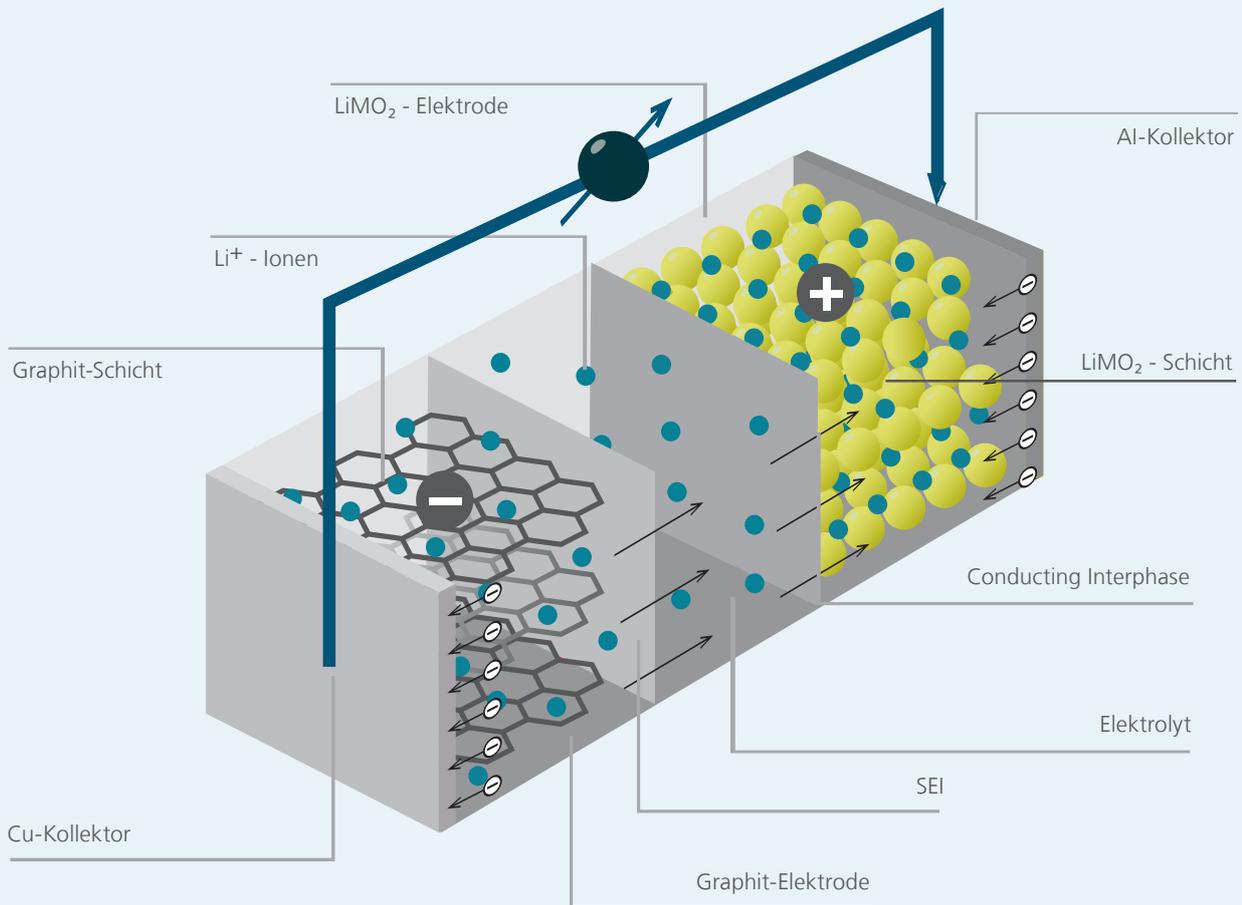


Abbildung 5: Aufbau einer Batteriezelle

Diese dient dem Schutz der Anode vor der korrosiven Elektrolytlösung. Gleichzeitig bleibt die SEI durchlässig für Lithium-Ionen. An der Kathode bildet sich eine vergleichbare Schicht, die als „Conducting Interphase“ bezeichnet wird. Bei jedem Ladezyklus wachsen beide Schichten, wodurch die Zelle an Zellspannung und Ladungsmenge verliert. [7]

Durch den Einsatz verschiedener geeigneter Chemikalien als Elektrolytlösung und Separator ergeben sich verschiedene Zelltypen auf chemischer Ebene. Der Elektrolyt muss zum Beispiel eine möglichst hohe Leitfähigkeit besitzen, kompatibel mit den Elektroden und inaktiven Materialien (wie Stromableiter oder Separator) sein sowie bei der vorhandenen Spannung und im Temperaturbereich von -40 °C bis $+80\text{ °C}$ stabil sein. Der Elektrolyt kann in fester oder flüssiger Form oder als Polymer vorliegen. Aktuell werden hauptsächlich flüssige Elektrolyten oder Polymere verwendet. Als Elektrolytlösungen werden Carbonate, Ester und Ether verwendet [8]. Der Separator verhindert durch das Trennen der beiden Elektroden einen Kurzschluss. Er kann aus Polymer-Membranen, einer Keramik, Vliesstoffen oder Glasfasern bestehen. Diese Materialien verbindet die Eigenschaft, einen Stromfluss bei zu hohen Temperaturen zu unterbinden und verhindern so ein Abbrennen der Zelle. [5, 8] Es wird deutlich, wie durch den Einsatz unterschiedlicher Chemikalien für die Zellbestandteile verschiedenste Zellen entstehen können.

Ebenso können auf geometrischer Ebene Unterschiede in Zellen festgemacht werden. Es gibt verschiedene Arten, die Zellkomponenten zueinander anzuordnen (Abbildung 6). Im Wesentlichen kommen in der Automobilindustrie drei Arten von Zellen zum Einsatz. Diese sind Rundzellen, Prismatische Zellen und Pouch- bzw. Flachzellen. Bei Rundzellen werden die einzelnen Komponenten schichtenweise von innen nach außen gewickelt. Innen sitzt die Anode, gefolgt vom Separator und der Kathode. So entsteht eine stabile Zelle mit guter Energiedichte. Allerdings gestaltet sich die Kühlung der Batterie und die Bauraumausnutzung schwierig. In prismatischen Zellen erfolgt die Anordnung ebenfalls schichtenweise, hierbei jedoch von unten nach oben in der Reihenfolge Anode, Separator, Kathode. So wird eine bessere Bauraumausnutzung und Kühlung im Vergleich zur Rundzelle erreicht. Die Fertigung ist jedoch komplizierter und die Stabilität geringer. Der Aufbau einer Pouchzelle ist ähnlich zur prismatischen, allerdings ist das Gehäuse dieser Zelle weicher und besteht beispielsweise aus einer Aluminiumverbundfolie, weswegen die Außenwand im Vergleich zu einem starren metallischen Gehäuse einer Rundzelle oder einer prismatischen Zelle flexibler ist. Der Vorteil besteht darin, dass die Zelle leichter ist. Nachteilig ist die dadurch entstehende Instabilität, wegen der die gesamte Batterie am Ende einer dickeren Hülle bedarf. [6]

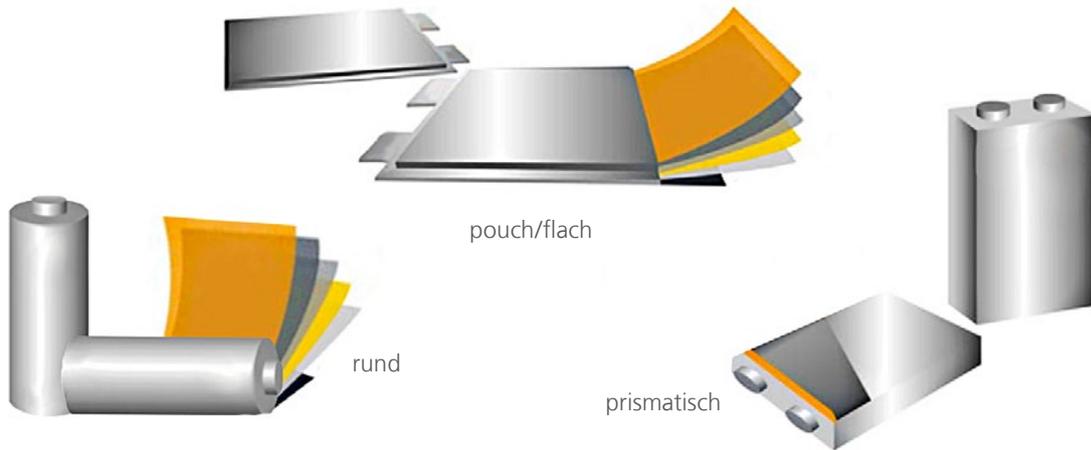


Abbildung 6: Aufbau von Rundzellen, prismatischen Zellen und Pouch-Zellen [6]

2.2 Aufbau Modul und Batterie

Mit einer einzelnen Zelle wird in der Regel eine Spannung von 2,2 V bis 4,2 V erreicht. Die in der Fahrzeuganwendung von Lithium-Ionen-Batterien benötigten Spannungen liegen, je nach Batterie- und Fahrzeugtyp, in einem deutlich höheren Bereich von ca. 400 V bis 800 V. Daher werden die Zellen in Reihe geschaltet und in ihrer Gesamtheit als Modul bezeichnet. Ebenfalls wird in der Anwendung eine höhere Ladungsmenge als die einer einzelnen Zelle benötigt. Dafür werden Zellen parallelgeschaltet. Neben den Batteriemodulen besitzt eine Batterie zusätzlich mechanische und elektronische Komponenten, um die Zellen aufeinander abstimmen zu können. Als wichtigste mechanische Komponenten lassen sich das Gehäuse mit Isolierung, ein Befestigungssystem und eine Kühlung ausmachen. Die wichtigste elektronische Komponente stellt das Batteriemanagementsystem (BMS) dar, das in Kapitel 4.4.1 näher erläutert wird. [5, 7, 8]

Werden die einzelnen Zellen eines Moduls bzw. einer Batterie nicht gut aufeinander abgestimmt, so drohen temperaturbedingte Gefahren, auf die in Kapitel 4.4.3 eingegangen wird.

2.3 Trends

Die Leistung der Lithium-Ionen-Batterien ist von verschiedenen Faktoren, wie der Zellgeometrie, dem Modul- und Systemdesign, der Zellchemie und der Integration der Batterie in das Fahrzeugsystem als Ganzem abhängig [9, 10].

In der Automobilindustrie kommen alle der in 2.1 genannten Arten der Zellgeometrie zum Einsatz. Beispielsweise benutzt Tesla vorwiegend Rundzellen und der VW E-Golf Prismatische Zellen [11, 12].

Im Rahmen des Projekts InnoLogBat wird zunächst die in 2.1 und 2.2 beschriebene und bereits breit implementierte Bauweise von Zellen über Module zu Batterien aus der logistischen

Perspektive betrachtet, während an alternativen Bauweisen, wie Cell-to-Pack und Cell-to-Chassis, bislang noch geforscht wird [13]. Bei Cell-to-Pack entfällt der Zwischenschritt über ein Modul, wodurch Kosten reduziert und die volumentechnische Dichte von Batterien erhöht werden. Es wird eine Steigerung der verfügbaren Energie um 10 % bis 15 % angestrebt und die Energiedichte wird um 15 % bis 20 % erhöht, während die Anzahl der Teile, aus denen eine Batterie besteht, um 40 % reduziert werden kann [13]. Als Weiterentwicklung der Cell-to-Pack-Bauweise gilt die Cell-to-Chassis-Technologie. Sie integriert die Batteriezelle in die Fahrzeugkarosserie. Dadurch werden keine Module und Batteriegehäuse benötigt. Die Batteriezellen werden selbst zu strukturtragenden Teilen und es können mehr Zellen in den gleichen Bauraum integriert werden [14]. Somit können bis zu 40 % des Volumens im Vergleich zu herkömmlichen Fertigungsmethoden eingespart werden. Aktuell werden diese Cell-to-Pack- und Cell-to-Chassis-Bauweisen noch nicht eingesetzt, da sie in puncto Sicherheit, mechanischer Widerstandsfähigkeit und Wartung nachteilig sind [13].

Die in Kapitel 2.1 erklärte Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Zelle verdeutlicht, wie essenziell die Materialauswahl für Anode und Kathode für die Maximierung der Batterieeffizienz ist. Daher streben Batteriehersteller an, Materialien mit besten elektrochemischen Eigenschaften zu entwickeln. Die Materialien, die bei der Elektrode zum Einsatz kommen, stellen den limitierenden Parameter für die Leistung einer Zelle dar. Tesla und Panasonic haben beispielsweise Batteriezellen mit Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxiden (NCA) entwickelt [15]. Bei diesen NCA-Zellen ist die hohe Energiedichte von Vorteil. Nachteilig sind jedoch ihre lediglich durchschnittliche Temperaturbeständigkeit und die hohe Sensibilität gegenüber Luftfeuchtigkeit, weshalb sie von anderen Fahrzeugherstellern nicht bevorzugt werden. Eine Alternative stellt durch ihre kostengünstige Herstellung und den höchsten Temperaturschwellenwert zum thermischen Durchgehen (siehe Kapitel 4.4.3) die Lithium-Eisen-Phosphat-Zelle (LFP) dar. Sie ist vor allem

auf dem asiatischen Markt vertreten [16]. Von den meisten Autoherstellern wird sie jedoch aufgrund der schlechten Temperaturbeständigkeit, der niedrigen Energiedichte und einer geringeren optimalen Betriebsspannung nicht präferiert. Eine weitere Option stellt die Lithium-Mangan-Oxid-Zelle (LMO) dar. Sie war bei früheren Generationen von Elektrofahrzeugen aufgrund ihrer geringen Kosten sowie hohen Temperaturbeständigkeit und Leistungskapazität populär [15, 17]. In Europa dominiert aktuell die Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NMC) Batterie wegen ihrer hohen Energiedichte, hohen verfügbaren Leistung, langen Lebenszyklusdauer und guten Temperaturbeständigkeit. Weniger werden Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) und NCA-Batterien eingesetzt. [14]

Im Laufe der Zeit waren die verschiedenen Kombinationen der Zellchemie unterschiedlich stark in der Produktion vertreten. Man spricht in diesem Kontext von der Entwicklung verschiedener Batteriegenerationen (Abbildung 7) [19]. LFP und NCA stellen die erste Generation des Kathodenmaterials dar. Aufgrund der oben beschriebenen Vorteile wurde in den darauffolgenden Generationen auf NMC-Batterien gesetzt [16]. Anschließend konnte ein nuancierter Wechsel von NMC 111 zum leistungsfähigeren NMC 811 beobachtet werden, was an der verhältnismäßigen Reduzierung des Kobaltgehalts und der daraus resultierenden Kostensenkung liegt [9, 16]. (Die Zahlen in den Bezeichnungen repräsentieren dabei das Verhältnis der drei jeweiligen Chemikalien in den Batterien.) Außerdem wird bei der Anode zusätzlich zu Graphit auch Silizium eingesetzt, was eine höhere spezifische Kapazität bewirkt [10, 16]. Diese Kombination stellt die heute genutzten Batterien der dritten Generation dar [18]. Aktueller

Forschungsgegenstand des Projekts NextGenBat und weiterer Forschungsprojekte für zukünftige Batteriegenerationen sind Festkörperbatterien, die der vierten Generation angehörig sind [20, 21]. Festkörperbatterien nutzen feste Elektrolyte [22]. Der Elektrolyt fungiert dann gleichzeitig zusätzlich als Separator, wodurch Elektrolyt und Separator eine Einheit bilden [23]. Vorteilhaft an dieser Technologie sind eine höhere Lebenszeit, eine längere Reichweite, eine höhere Laderate sowie eine höhere Energiedichte im Gegensatz zu herkömmlichen Lithium-Ionen-Batterien [22]. Durch die nicht brennbare Natur von Festkörperelektrolyten ist die Batterie stabiler als solche mit flüssigen Elektrolyten und dementsprechend weniger leicht entflammbar. Dadurch sind weniger Sicherheitsvorkehrungen innerhalb der Batterie nötig, was wiederum eine höhere Energiedichte ermöglicht [15, 23].

Zusätzlich wird bei Lithium-Ionen-Batterien im Zuge verschiedener Leistungs- und Energiedichten von Hochenergie- bzw. Hochleistungszellen gesprochen [10]. Eine Lithium-Ionen-Batterie mit hoher Energiedichte und Speicherkapazität gewährleistet eine entsprechend große Reichweite von Elektrofahrzeugen. Bei Hybridfahrzeugen kann die Energiedichte geringer dimensioniert werden, da der Energiebedarf primär über den Verbrennungsmotor gedeckt wird. In diesem Fall ist die Leistungsdichte ein bestimmendes Maß, da diese zusammen mit dem Elektromotor über Beschleunigung und Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeuges entscheidet. [19]

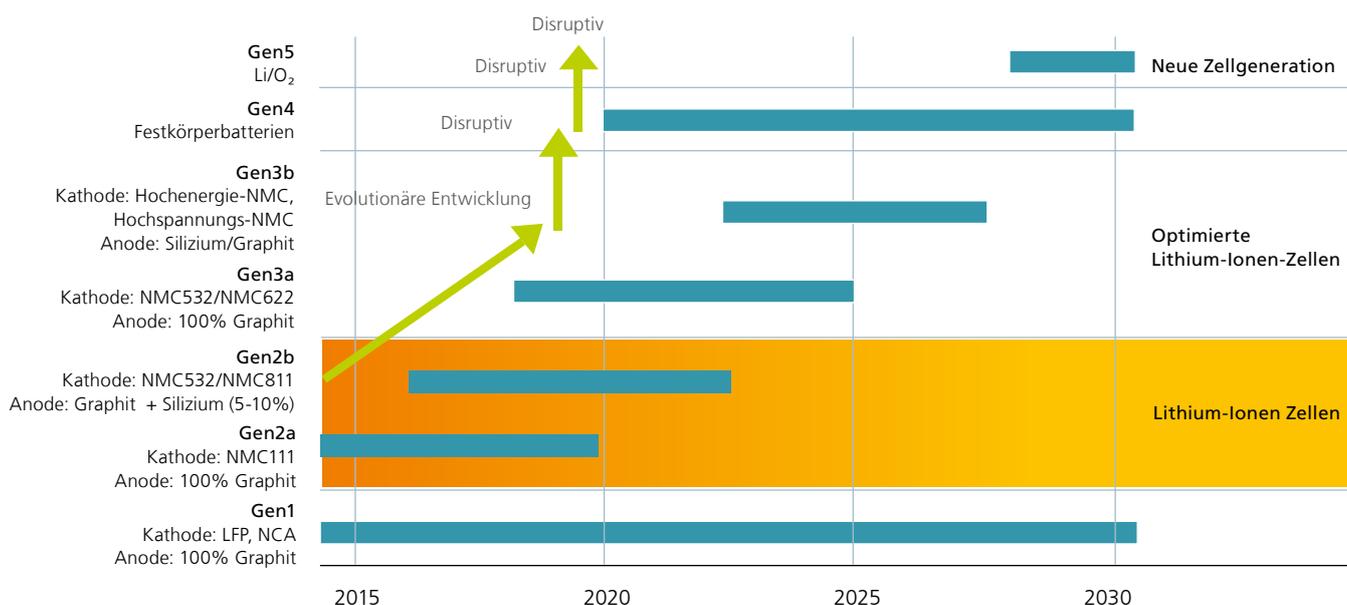


Abbildung 7: Batteriegenerationen [18]

3. Rechtliche Rahmenbedingungen

Bevor im Folgenden die rechtlichen Rahmenbedingungen zum Transport und zur Lagerung von Lithium-Ionen-Batterien in Deutschland dargestellt werden, sind zunächst die Begriffe Gefahrgut und Gefahrstoff voneinander abzugrenzen (Abbildung 8).

Als Gefahrstoff werden Stoffe bezeichnet, von denen physikalische, Gesundheits-, Umwelt- und/oder weitere Gefahren ausgehen. Darüber hinaus zählen explosionsfähige Stoffe und solche, denen ein Grenzwert für den Arbeitsplatz zugewiesen wurde, als Gefahrstoff. Auch Stoffe und Gemische, die selbst kein Gefahrstoff sind, aber bei der Verwendung oder Herstellung welche freisetzen, werden als Gefahrstoff definiert. [24]

Als Gefahrgut gelten dagegen „Stoffe und Gegenstände, von denen [...] im Zusammenhang mit der Beförderung Gefahren [...] für die Allgemeinheit, für wichtige Gemeingüter, für Leben und Gesundheit von Menschen sowie für Tiere und Sachen ausgehen können“ [25].

Ein Gefahrstoff muss also nicht zwangsläufig auch ein Gefahrgut sein. Von den einzelnen Stoffen können unterschiedliche Gefahren einerseits während der Lagerung bzw. Verwendung und andererseits während der Beförderung ausgehen, weshalb jeweils eigene Rechtsvorschriften für Gefahrgut und Gefahrstoffe existieren, um die entsprechenden Gefahren durch spezielle Sicherheitsvorkehrungen zu minimieren.

Derzeit werden Lithium-Ionen-Batterien nur als Gefahrgut und nicht als Gefahrstoff gekennzeichnet. Deswegen gibt es für die

Bereitstellung und Lagerung noch keine allgemeingültigen Vorschriften, Normen oder Schutzziele, an die es sich zu halten gilt.

3.1 Transport

Der außerbetriebliche Transport von Batterien auf der Straße, Schiene, See und in der Luft ist an Transportgesetze gebunden. Für die Beförderung unterliegen die Batterien für batterieelektrische Pkw als Gefahrgut der Klasse 9 Transportvorschriften. Für die Beförderung gefährlicher Güter im internationalen Raum auf unterschiedlichen Verkehrsträgern gibt es konkretisierende Regeln und Vorschriften, die in nationale Gesetze überführt werden. Hierzu gehört beispielsweise das Europäische Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR), die Ordnung über die internationale Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter (RID), die Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter auf Binnenwasserstraßen (ADN), der International Maritime Dangerous Goods Code (IMDG-Code) und die Vorschriften über gefährliche Güter in der Luftfahrt (IATA-DGR).

Alle Akteure, die an der Beförderung gefährlicher Güter beteiligt sind, müssen ihre Verantwortlichkeiten in der Transportkette kennen und damit verbundene Pflichten erfüllen. Beteiligte sind unter anderem der Auftraggeber des Absenders, der Absender, der Verpacker, der Verloader, der Beförderer, der Entlader sowie der Empfänger (Abbildung 9). Sie müssen vor der Übernahme von Pflichten nach den Vorschriften des Kapitels 1.3 ADR zertifiziert sein.



Abbildung 8: Übergang zwischen Gefahrgut und Gefahrstoff i. A. a. [26]



Abbildung 9: Akteure, die an der Beförderung gefährlicher Güter beteiligt sind

Im ADR werden Lithium-Ionen-Batterien und Produkte, die Lithium-Ionen-Batterien enthalten, eingestuft:

- UN 3480 Lithium-Ionen-Batterien
- UN 3481 Lithium-Ionen-Batterien in oder mit Ausrüstungen verpackt
- UN 3171 batteriebetriebenes Fahrzeug oder Gerät
- UN 3166 Hybridfahrzeug

Pro Eintrag muss die passende Sondervorschrift (SV) sowie die passende Verpackungsanweisung angewendet werden. Zudem muss eine Prüfumfassung für Lithiumbatterietypen auf Grundlage von UN 38.3 vorliegen [27]. Ein solcher UN-Test beinhaltet in diesem Zusammenhang Prüfungen hinsichtlich Niederdruckbedingungen, extremen Temperaturbedingungen, Erschütterung, Stößen, externem Kurzschluss, Schlag und Quetschung, Überladung und erzwungener Entladung. Hersteller und Vertreiber müssen das Dokument zur Verfügung stellen. Die Prüfumfassung kann von allen Beteiligten in der Transportkette angefordert werden, um zu prüfen, ob ein Batterietyp erfolgreich getestet wurde. Die Pflicht gilt jedoch nicht für Prototypen, Produktionsserien bis 100 Stück, beschädigte oder für die Entsorgung bestimmte Batterien. Die Prüfumfassung muss den logistischen Akteuren sowie den Kontrollbehörden allerdings nur auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden [28]. Für die logistische Praxis ist die Prüfumfassung aber grundsätzlich notwendig, um eine ordnungsgemäße Klassifizierung durchzuführen. Eine nicht durchgeführte Überprüfung der ordnungsgemäßen Klassifizierung

einschließlich der Prüfumfassung stellt einen Verstoß gegen die Pflichten der logistischen Akteure dar und wird in Deutschland gemäß RSEB mit einem Bußgeld geahndet [29]. Da es sich zudem gemäß GGKontrollV § 3 Abs. 7 um einen Verstoß der Gefahrenkategorie I handelt, kann im Straßenverkehr die Weiterfahrt untersagt werden [30].

Die aktuellen Regelungen im Transportrecht folgen der Systematik des Gefährdungspotenzials, anhand dessen Batterien unterschieden werden. Es wird zwischen den Batteriezuständen End-of-Life, defekt / beschädigt, kritisch defekt / beschädigt und nicht beförderungssicher unterschieden (Abbildung 10). Diese Zustände gelten sowohl für die Phase Pre-Sales als auch für die Phase After-Sales und werden in letzterer Phase in Kapitel 4.5.1 ausführlicher beschrieben. Mit dem Inkrafttreten der Neuregelungen in den Anlagen der ADR muss seit 2021 eine Einschätzung des Zustandes der Batterie auf Grundlage definierter Sicherheitskriterien des Herstellers oder eines technischen Sachverständigen erfolgen (SV 376). [28]

Grundsätzlich gilt: Je höher die Energie respektive die Menge des Lithiums ist, desto höher sind die Auflagen für den Transport, wie zum Beispiel der Einsatz spezieller UN-zugelassener Gefahrgutverpackungen. Eine transportsichere und mit einem erfolgreichen UN 38.3-Test geprüfte Batterie ist daher potenziell weniger gefährlich als eine beschädigte Batterie, die unter den Auflagen der SV 376 transportiert werden muss.

3.2 Lagerung

Hinsichtlich der Gesetzeslage richten sich die Rahmenbedingungen an die Lagerung von Batterien an das allgemeine Arbeitsschutzgesetz sowie die Betriebssicherheitsverordnung [31].

Weitere Empfehlungen und Hinweise zum allgemeinen sicheren Umgang mit Lithium-Ionen-Batterien bietet der Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. in seinem „Merkblatt Nr.2 – Sicherer Umgang mit Lithiumbatterien“ [32].

Grundsätzlich ist für die Lagerung von Batterien eine Freigabe der Versicherung sowie eine Genehmigung von den lokalen Behörden einzuholen. Die Deutsche gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) bietet darüber hinaus eine Empfehlung zum betrieblichen Brandschutz bei der Lagerung und Verwendung von Lithium-Ionen-Batterien [33]. Hierbei werden Maßnahmen zur Vermeidung von Bränden in jeglichen Lebenszyklusprozessen der Batterie kurz beschrieben und daraufhin allgemeine Empfehlung zum Personen- und Brandschutz gegeben. Wie wichtig der richtige Umgang mit den-Batterien ist, wird anhand von verschiedenen Use-Cases verdeutlicht, denn die Batterien können sowohl bei mechanischen Beschädigungen als auch bei Überladung oder Überhitzung in Brand geraten.

Bevor die Batteriezellen bzw. -module oder fertiggestellten Batterien für weitere intralogistische Prozesse genutzt werden,

sind die Produkte laut der DGUV nach dem Auspacken von geschultem Personal fachkundig zu begutachten und die Herstellervorgaben in der Gefährdungsbeurteilung einzuhalten. Volkswagen definieren für Lagerbereiche von fertigen und gleichzeitig unbeschädigten Batterien für die automobilen Anwendung in Zusammenarbeit mit der DGUV verschiedene Handlungsempfehlungen, um Risikoauftrittswahrscheinlichkeiten an der Batterie bzw. dem Lager weitestgehend zu minimieren. So sollten die Batterien vor mechanischen Gefährdungen geschützt, außerhalb von innerbetrieblichen Transportwegen sicher und ebenerdig gelagert werden. Darüber hinaus sollte der Lagerbereich angemessen be- und entlüftet werden sowie „in der näheren Umgebung ein geeigneter ABC-Löschers vorhanden sein.“ [34]

Des Weiteren ist im Verbund mit dem Bundesverband technischer Brandschutz e.V. (bvfa) ein Merkblatt zu Sicherheitshinweisen zum Löschen von Lithium-Ionen-Batterien entstanden [35].

Handlungsempfehlungen für die sichere Bereitstellung sowie Lagerung von Lithium-Ionen-Batterien veröffentlicht außerdem der Verband der Schadensversicherer (VdS) in einem Merkblatt. Hierbei werden die Batterien nach Lithiumanteil, Gewicht und der Nennleistung unterteilt und folglich als Batterien für die automobilen Anwendung entsprechend mit dem Transportaufkleber UN 3480 gekennzeichnet. [36]

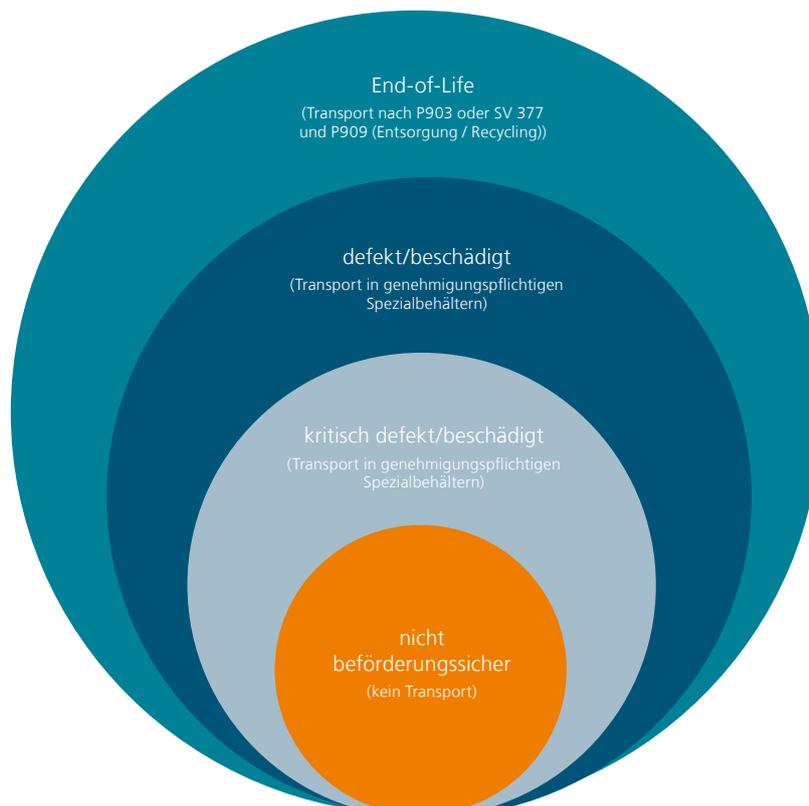


Abbildung 10:
Transportentscheidungen für Batterien



4. Lebenszyklus einer Lithium-Ionen-Batterie aus logistischer Sicht

Dieses Kapitel soll eine Übersicht des Lebenszyklus einer Lithium-Ionen-Batterie aus logistischer Perspektive geben. Abbildung 3 zeigt den Materialfluss einer Lithium-Ionen-Batterie von den Rohstoff- und Komponentenlieferanten zum Unternehmen, innerhalb des Unternehmens und von dort zu den Kunden (Pre-Sales) sowie vom Kunden zu möglichen Nachnutzungs- und Verwertungsmöglichkeiten (After-Sales). Der vorliegende Prozess ist als Netzwerk aus mehreren Lieferanten und Kunden zu verstehen.

Die Beschaffungslogistik (Kapitel 4.1) umfasst den Einkauf erforderlicher Rohstoffe und Komponenten. Nach der Beschaffungslogistik beginnt die mehrstufige Produktion. Die Produktionslogistik (Kapitel 4.2) erstreckt sich von der Materialaufbereitung und Komponentenfertigung bis zur Montage der Batterie und deckt sowohl innerbetriebliche als auch außerbetriebliche Lager- und Transportprozesse ab. Der Einbau in das Fahrzeug und der Vertrieb sind Bestandteile der Distributionslogistik. Bereits vor der Nutzungsphase können auf allen Ebenen des Materialflusses Abfälle, wie Produktionsrückstände, Verpackungen oder Ausschussteile, anfallen.

Nach der Nutzung (Kapitel 4.4), nach etwa acht bis zehn Jahren, haben Batterien in der Regel das End-of-First-Life erreicht und können nicht mehr für die automobilen Anwendung genutzt werden [37]. Automobilhersteller sind verpflichtet, diese Batterien wieder zurückzunehmen. Abhängig vom Zustand der Batterie werden die nächsten Schritte im Logistikprozess entschieden. Um die Batterien, verbaute Komponenten sowie verwendete Materialien möglichst lange im Kreislauf zu halten, sind unterschiedliche Nachnutzungs- und Verwertungsmöglichkeiten (Kapitel 4.5) zu prüfen.

4.1 Beschaffungslogistik für Rohstoffe

Rohstoffarme europäische Länder müssen die zur Herstellung erforderlichen Rohstoffe, vor allem aber die Aktivmaterialien der Zellen, zum Großteil importieren (Kapitel 2.1). Dies führt nicht nur zu einer Beschaffungslogistik, die weltweite Transporte erfordert, sondern auch zu einer Abhängigkeit von geopolitisch

instabilen Ländern, die mit einer geringen Liefersicherheit und Preisschwankungen in der Beschaffung verbunden ist. Prinzipien der Circular Economy können dabei helfen, eine Unabhängigkeit europäischer Hersteller zu stärken, indem die Verfügbarkeit erforderlicher Rohstoffe durch Wieder- bzw. Weiterverwendung, hochwertiges Recycling und die Rückführung in die (europäische) Wertschöpfungskette sichergestellt wird (Kapitel 4.5).

Für den Erfolg der Elektromobilität sind wirtschaftliche Kennzahlen, wie etwaige Preisentwicklungen von Elektrofahrzeugen und in Lithium-Ionen-Batterien eingesetzten Rohstoffen von hoher Relevanz. Laut einer Studie der RWTH Aachen in Zusammenarbeit mit dem VDMA [38] ist die Batterie „mit bis zu 50 % der Gesamtkosten die teuerste Komponente eines Elektrofahrzeuges.“ Über 70 % der Gesamtkosten einer Batteriezelle werden durch die Materialkosten verursacht [38]. Der Preis der Batterien hängt maßgeblich von der entsprechenden Zelltechnologie, dem Produktionsstandort und den Rohstoffpreisen ab [39]. Aufgrund von möglichen Lieferengpässen und der damit einhergehenden schwankenden Verfügbarkeit entsprechender Rohstoffe entsteht somit ein volatiler Preisverlauf. Neben den Elementen Lithium, Nickel, Mangan und Kobalt, enthält eine NMC-Batterie weitere Materialien, wie Aluminium, Graphit und Kupfer. Besonderes Augenmerk liegt dabei laut der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) [40] auf den Primär-Rohstoffen Graphit, Kobalt, Lithium und Nickel. Abbildung 11 illustriert exemplarisch die Preisschwankungen einzelner Rohstoffe, die für die Anfertigung von Kathoden notwendig sind. Eine besonders hohe Volatilität ist bei Lithium und Kobalt festzustellen.

Die Europäische Kommission veröffentlicht in diesem Zusammenhang seit 2011 alle drei Jahre eine Liste mit kritischen Rohstoffen, um „die Abhängigkeit Europas von Drittländern zu verringern, die primären und die sekundären Versorgungsquellen zu diversifizieren sowie die Ressourceneffizienz zu steigern und die Kreislaufwirtschaft zu stärken.“ [42] Ein Rohstoff gilt laut der Definition der Europäischen Kommission dann als kritisch, wenn die begrenzte Verfügbarkeit des Materials die rasant ansteigende Nachfrage der Industrie weltweit nicht decken kann. Als Gründe sind hierbei einerseits viele Technologien, andererseits

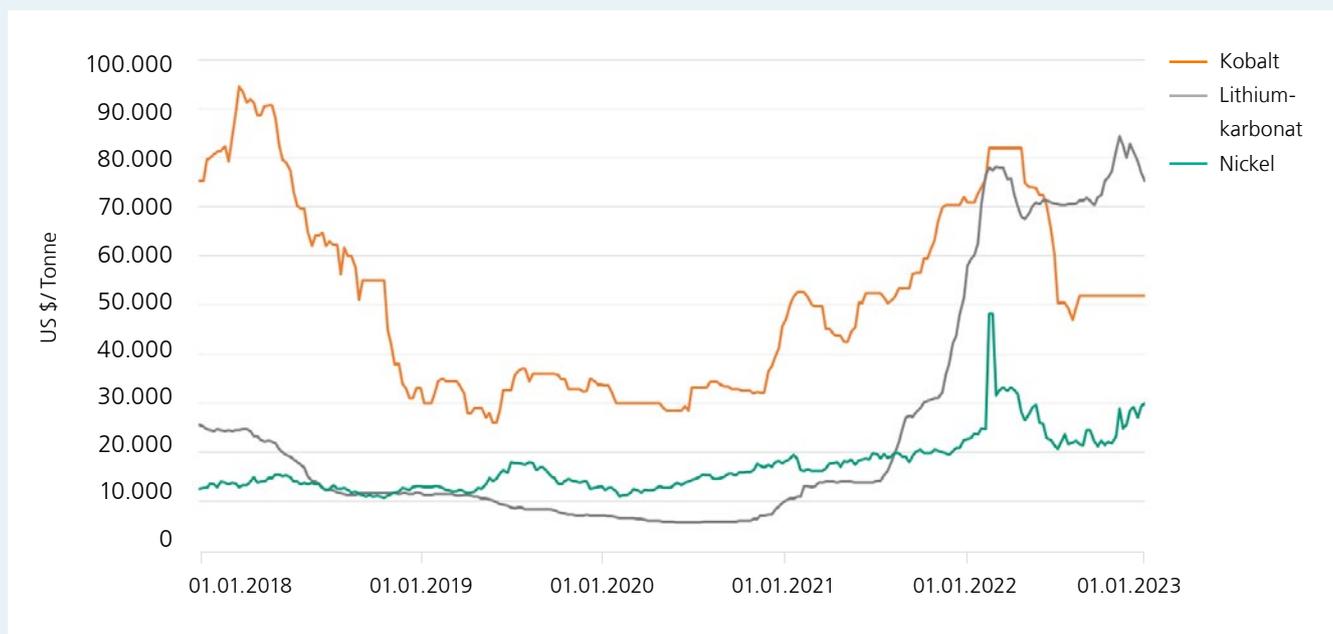


Abbildung 11: Preisentwicklung der wichtigsten Kathodenrohstoffe [41]

und vordergründig politische und geografische Umstände und Konflikte zu nennen [43]. Nickel wird in der entsprechenden Liste erst seit 2023 eingestuft, wohingegen im amerikanischen Kontext Nickel bereits seit 2021 als kritischer Rohstoff gilt [44, 45]. In der betreffenden Liste der DERA findet sich Nickel wieder und wird vor diesem Hintergrund näher betrachtet. Verdeutlicht wird die europäische Abhängigkeit von exemplarischen Rohstoffen durch Drittländer anhand von Abbildung 12.

Laut dem U.S. Geological Survey stammen 2021 ca. 82 % des Graphitabbaus allein aus China [46]. Aus wirtschaftlichen Gründen wird für die Produktion von Lithium-Ionen-Batterien bislang vorwiegend natürlicher Graphit verwendet. Der Einsatz von synthetischem Graphit könnte gegenüber natürlichem Graphit eine qualitativ hochwertigere und umweltschonendere Alternative darstellen, ist vor dem Hintergrund laufender Forschung allerdings noch nicht für die breite Implementierung ausgereift [47].

Die globale Jahresproduktion an Kobalt liegt im Jahr 2021 bei geschätzten 170.000 t. Über 120.000 t davon werden in der Demokratische Republik Kongo abgebaut, weswegen eine hohe Importabhängigkeit von dem politisch instabilen Entwicklungsland in Afrika besteht. [48] Ohne die Demokratische Republik Kongo könnte der weltweite Bedarf an Kobalt nicht gedeckt werden [49]. Insbesondere die Kobaltgewinnung in der Demokratische Republik Kongo gilt unter menschenrechtlichen Gesichtspunkten als umstritten [50]. Um diese Missstände im Hinblick auf Menschenrechte sowie Nachhaltigkeit bei der Rohstoffgewinnung weitestgehend zu vermeiden, wurden Gegenmaßnahmen von Wirtschaft und einzelnen Staaten abgeleitet. Zum einen formierte sich die Global Battery Alliance (GBA), die

mit über 100 internationalen Mitgliedern, darunter die DAX-Konzerne SAP und BASF, eine Plattform mit der Vision für 2030 zur „Förderung einer kreislauforientierten, verantwortungsvollen und gerechten Wertschöpfungskette für Batterien“ gegründet haben und die Einführung des Battery Pass planen [51, 52]. Zum anderen verabschiedete das Kabinett der Bundesregierung im Jahr 2021 das Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz (kurz: Lieferkettengesetz) zur Einhaltung von Menschenrechten sowie Umweltschutz entlang der Lieferkette [53].

Bei der Raffination von Kobalt übernimmt China weltweit eine Vormachtstellung. Etwa 72 % der globalen Raffination von Kobalt findet in China statt, gefolgt von Finnland mit 9 % und Kanada sowie Norwegen mit je 4 % im Jahr 2019 [44].

Auch der Rohstoff Lithium gilt als kritisch [45]. Aktuell wird weltweit von Lithiumreserven von rund 23 Millionen Tonnen ausgegangen [54]. Mehr als die Hälfte an Lithiumreserven sind davon in den südamerikanischen Ländern Chile und Argentinien vorzufinden. Der Abbau der 100.000 t im Jahr 2021 findet mit etwa 52 % großteils in Australien statt. Es existieren unterschiedliche Methoden, um Lithium abzubauen. In Australien stammt dieser Rohstoff aus dem Erzbergbau, wohingegen Lithium in Chile und Argentinien aus Salaren gewonnen wird. Die Lithium-Gewinnung geht in Südamerika mit einem vergleichsweise hohen Wasserverbrauch einher. [44] Laut der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) [57] ist eine der größten Herausforderungen der Skalierung der Batterien die begrenzte Verfügbarkeit von Lithium. Für das Jahr 2030 wird ein weltweiter Jahresbedarf von 316.300 bis 558.800 t Lithium prognostiziert, während lediglich 226.000 bis 250.000 t verfügbar wären [57].

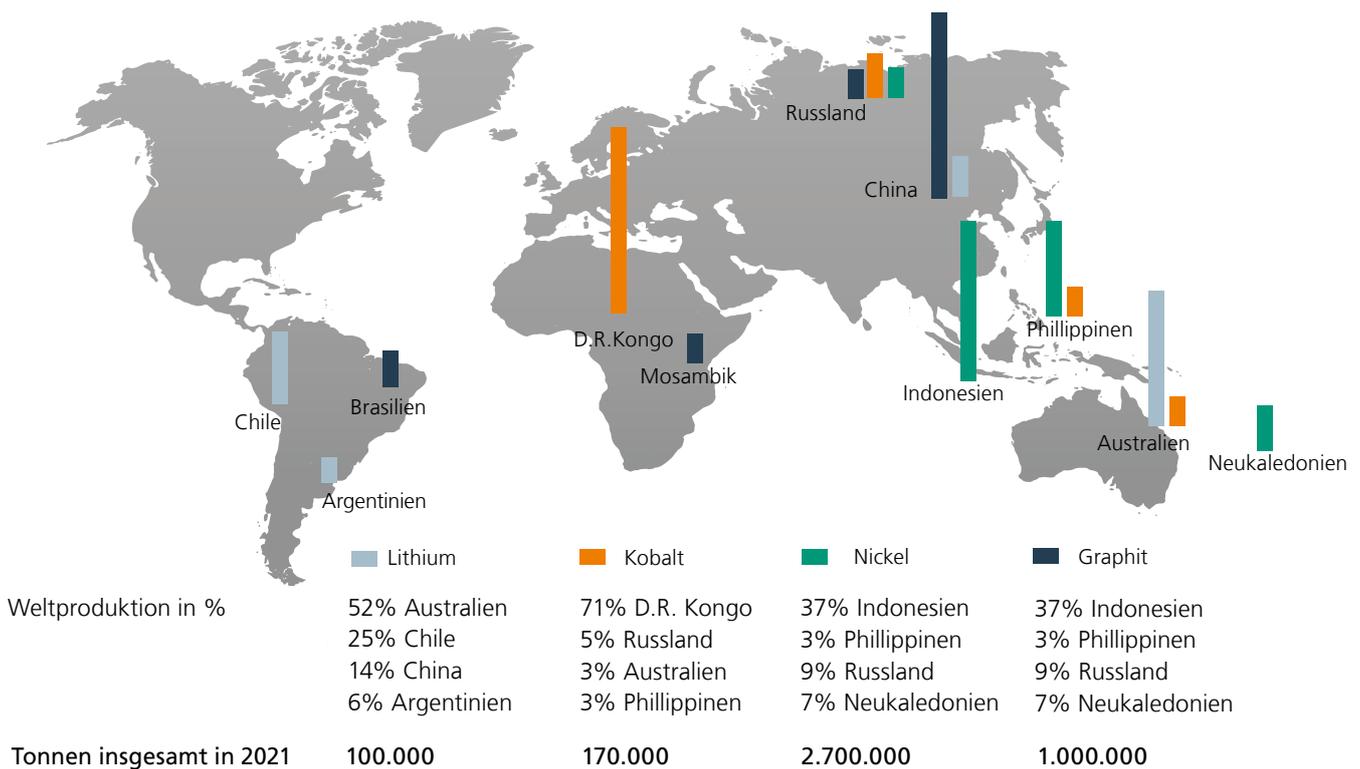


Abbildung 12: Rohstoffe für batterieelektrische Pkw und wichtige Abbauländer 2021 i.A.a. [46]

Dies würde einen Fehlstand von 90.000 bis 300.000 t Lithium bedeuten.

Ähnlich wie bei der Raffination von Kobalt sichert sich China 2019 auch bei der Lithium-Raffination einen Anteil von über 50 % im Vergleich zu der weltweiten Menge. Chile und Argentinien kommen zusammen auf einen globalen Anteil von 40 % [44].

Komplettiert wird die Reihe durch Nickel. Abhängig von dem Batterietypen sind bis zu 48 % Nickel in der Zellchemie einer Lithium-Ionen-Batterie enthalten [55]. Dieser Anteil unterstreicht die Bedeutsamkeit dieses Rohstoffes. Mit einem Gesamtanteil von über 50 % sind Indonesien zusammen mit den Philippinen die wichtigsten Bergbauländer für die Nickelproduktion [56]. Obwohl eine Vielzahl von Nickel aus Südostasien stammt, wird Nickel für die Kathodenfertigung zu 75 % aus Russland bezogen, sodass seit dem Ukraine-Krieg ein flächendeckender Engpass an Nickel besteht [55]. In der Raffination von Nickel war Russland im Jahr 2019 mit einem Anteil von 26 % weltweit führend [44].

Die abgebauten Rohstoffe für die Batterieproduktion werden zur Weiterverarbeitung zu Elektroden überwiegend per Seefracht im Hauptlauf transportiert.

Das Verkehrsmittel, um natürlichen Graphit nach Europa zu befördern, kann variieren. Üblicherweise wird für den Transport aus China Güterschiffahrt gegenüber Schienen- oder

Straßenverkehr angesichts der vergleichsweise geringeren Logistikkosten ebenfalls bevorzugt [57].

Das Land mit dem höchsten Kobaltvorkommen, Demokratische Republik Kongo, ist ein afrikanischer Binnenstaat. Dementsprechend verfügt er über keinen eigenen Frachtschiffhafen, von dem aus der Seetransport zu dem größten Kobaltabnehmer China durchgeführt werden kann. Hierfür muss das Kobaltermittel nach Homogenisierung, Beprobung und Analyse auf einen Lkw, z. B. in Big Packs, verladen und in einen Staat mit Frachtschiffhafen transportiert werden [58]. Beispielsweise bezieht die Volkswagen AG das gewonnene Kobaltermittel aus der Demokratischen Republik Kongo mittels Lkw, das dann zum ostafrikanischen Staat Tansania befördert und von dort aus nach China zur Kobaltraffinerie verschifft wird [59, 60]. Für die Zukunft plant die Volkswagen AG den Zwischentransport nach China zu umgehen, indem das Kobaltermittel direkt über einen Seefrachttransport nach Europa zu transferiert werden soll [59].

Lithium wird gegenwärtig aus der Atacamawüste mittels Lkw abtransportiert und im weiteren Verlauf des Materialflusses erfolgt der Umschlag auf Schiffscontainer, um so den Transport dieses Rohstoffes nach China, Japan und Südkorea vorzubereiten [61, 62]. Ähnlich sieht der Lithiumtransport von Australien zu den drei Ländern aus Asien aus [59]. Lithium wird jedoch nicht in seiner ursprünglichen Gesteinsform verschifft, sondern in hafennahen Fabriken zu Lithium-Hydroxid und Lithium-Karbonat weiterverarbeitet und in Säcke oder Big Packs auf Paletten

verfüllt. Auf der einen Seite bietet die Weiterverarbeitung den Vorteil des besseren Transports, auf der anderen Seite kann für Nickel hierdurch ein höherer Preis auf dem Batteriemarkt erzielt werden [63].

Das in Europa überwiegend aus Russland bezogene Nickel wurde vor dem Ukraine-Krieg nach Rotterdam in die Niederlande verschifft [64]. Alternativen könnten nun beispielsweise der verstärkte Einsatz von weniger nickellastiger Zellchemie, beispielsweise LFP, oder aber auch der Bezug des Nickels aus anderen Exportländern sein. Derzeit planen Automobilhersteller beispielsweise das Nickel aus Indonesien, statt aus Russland zu beschaffen [65]. Für den Fall, dass Indonesien den Zuschlag erhält, wird Nickel aus Kostengründen ebenfalls zwingend per Seefracht nach Europa transportiert werden müssen.

4.2 Produktionslogistik

Abbildung 13 zeigt eine schematische Übersicht der zentralen Prozessschritte der Batterieherstellung und der Materialien sowie Komponenten, die hierfür erforderlich sind. Materialaufbereitung und Komponentenfertigung sind in diesem Zuge dezentral

organisiert, sodass ein komplexes Transportnetzwerk zu Produktionsstandorten der Zellen, Module und Batterien resultiert. Die Produktionsprozesse selbst können aufgrund der hohen Vielfalt der Batterietechnologien, nutzbarer Prozesstechnologien zur Herstellung sowie stets steigenden Anforderungen der Batterieperformance variieren.

Neben der Importabhängigkeit von Rohstoffen und Subkomponenten ist Europa auch zur Bündelung der Zellen zu Modulen und fertigen Batterien auf Importe aus Asien angewiesen. Mit einem weiten Vorsprung liegen um die 80 % der weltweiten Produktionskapazität für Batteriezellen in China. Mit jeweils unter 10 % sind weitere Produktionskapazitäten in den USA, Europa, beispielsweise Ungarn, Polen und Norwegen, sowie Japan, Korea und dem Rest der Welt zu verorten. [19, 66, 67] Bei der Modul- und Batteriemontage verläuft sich der Vorsprung der Produktionskapazität von Asien gegenüber Europa.

Ab 2025 bis 2030 wird die Produktion in den USA, in Europa und weiteren Ländern ausgebaut, wenn auch durch Werke chinesischer, koreanischer und japanischer Unternehmen, wie z. B. CATL oder BYD. Technische Innovationen, stabile sowie

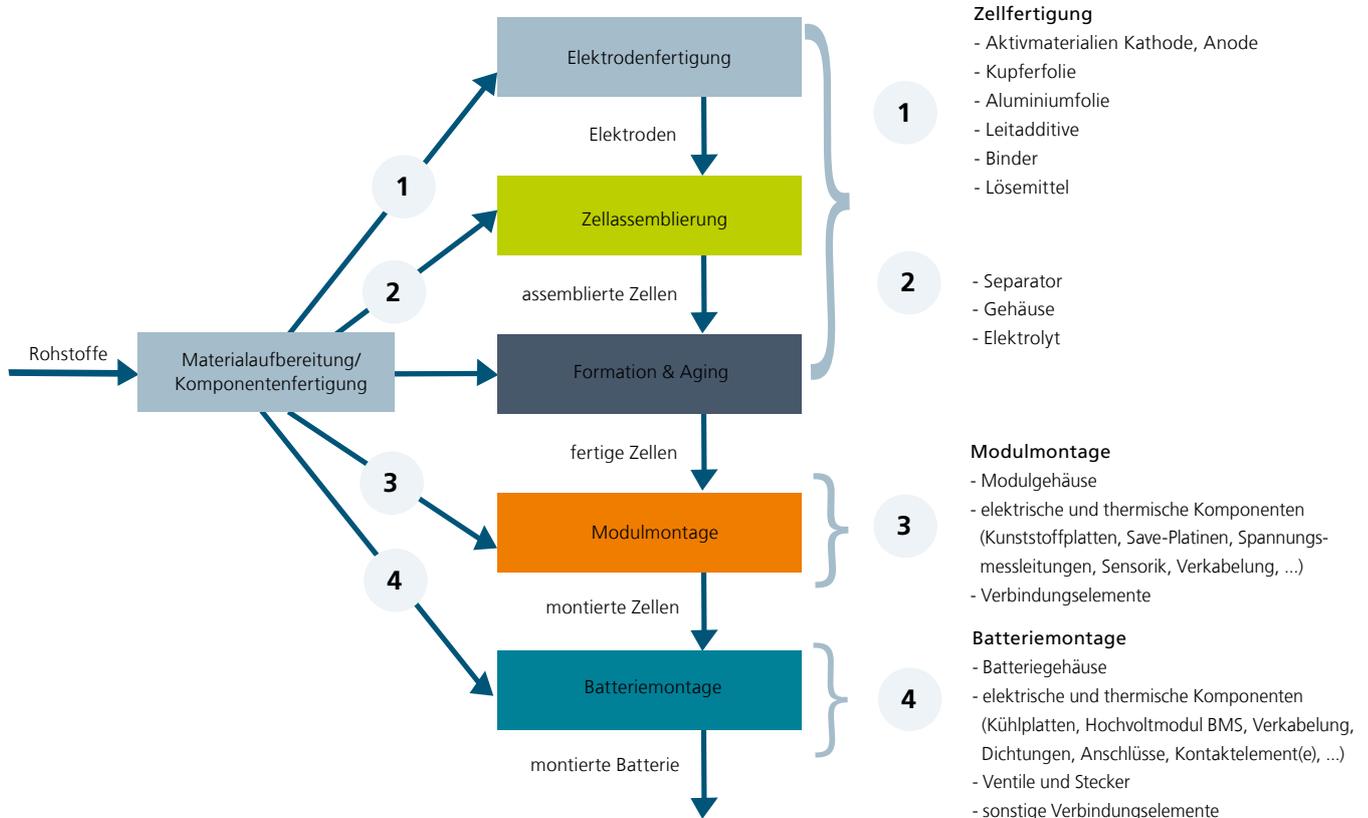


Abbildung 13: Übersicht der Prozessschritte und Materialfluss der Batterieherstellung



© Adobe Stock, imagewell10

förderliche politische Rahmenbedingungen und die Bedeutung der Batteriezelle für ein Elektrofahrzeug in Verbindung mit der Automobilhersteller-Dichte machen vor allem Europa immer attraktiver für die Produktion. So visiert Europa eine mit China vergleichbare Produktionskapazität für Zellen, wodurch der Anteil der Produktionsstandorte in China an der globalen Produktionskapazität auf unter 50 bis 60 % sinken dürfte. Um die steigende Nachfrage nach Batteriezellen zu befriedigen, könnten im Jahr 2030 900 GWh Batteriekapazität allein im Automobilssektor erforderlich werden. Bis 2030 könnte Europa ca. 25 % der global nachgefragten Batteriezellen produzieren. [67]

Zu den Unternehmen mit der größten Produktionskapazität im Jahr 2030 gehören CATL (140 GWh), Freyr (98 GWh), Northvolt (94 GWh), LG Chem (93 GWh), Tesla (93 GWh), ACC (92 GWh) und Volkswagen Group (90 GWh). Fast 60 % der europäischen Produktion im Jahr 2030 würde von europäischen Unternehmen stammen, während chinesische Unternehmen rund 20 % der Produktion ausmachen würden [68]. Zukünftige Batterieprojekte internationaler Unternehmen, aber auch deutscher Automobilhersteller konzentrieren sich innerhalb Europas in diesem Zuge insbesondere in Deutschland. Dabei ist der Standort Deutschland für einige Zellhersteller aufgrund verschiedener Faktoren interessant, unter anderem gehören hierzu der Energiemix, die Nähe zu den Herstellern der Automobilbranche und der Zugang zu qualifizierten Fachkräften [19]. Mit rund 500 GWh ist Deutschland schon heute das Land mit der größten Produktionskapazität Europas. Während derzeit vor allem nicht-europäische Automobilhersteller Produktionsstandorte in der EU ansiedeln, planen vor dem Inflationsbekämpfungsgesetz der amerikanischen Regierung „Inflation Reduction Act“ sowohl nicht-europäische Hersteller, wie Tesla (etwa 200 GWh) und CATL (rund 100 GWh), als auch europäische Hersteller, z. B. Northvolt (etwa 60 GWh) oder VW (bis zu 24 GWh) ihre

Produktionskapazität in Deutschland zwischen 2025 und 2030 auszuweiten. [67] Deutschland zählt neben Spanien, Großbritannien und Italien zu den Ländern mit einem großen Anteil an Projekten, die von einer Depriorisierung und Nichtumsetzung mit hohem und mittlerem Risiko gefährdet sind. Im Zuge der aus dem Gesetz entstehenden Attraktivität der Expansion in den USA und steigenden Energiekosten in Deutschland werden insbesondere die Vorhaben von Tesla und dem von VW unterstützten Unternehmen Northvolt hinterfragt [68].

4.2.1 Zellfertigung

Die Zellfertigung lässt sich in drei standardmäßige Phasen gliedern – die Elektrodenfertigung (1), die Zellaussammlung (2) und das Formatieren und Aging (3). Bei der Elektrodenfertigung durchlaufen die Ableiterfolien ein Rolle-zu-Rolle-System, über das sie mit einer Paste, bestehend aus Aktivmaterial, Lösungs- und Polymermittel (i. d. R. N-Methyl-2-pyrrolidon (NMP)) und Leitadditiven beschichtet und anschließend getrocknet werden. Die Elektrodenfolien werden dann über eine Abfolge von Rollen und rotierende Walzenpaare verdichtet, geglättet, entlastet und gereinigt und anschließend zugeschnitten. Für die Assemblage werden die Elementarzellen, bestehend aus Anode, Separator, Kathode unter Einsatz von Greiftechnik und Robotik entweder zyklisch gestapelt oder gewickelt. Die Zellen werden kontaktiert, in das Gehäuse eingebracht und mit dem Elektrolyten befüllt. [67]

Da es sich sowohl bei dem Lösemittel NMP als auch bei dem Elektrolyten, zumeist ein organisches Lösungsmittel mit einem Leitsalz, z. B. Hexafluorophosphat, um Gefahrstoffe handelt, bestehen bei der innerbetrieblichen Lagerung besondere Anforderungen. Umgesetzt werden diese beispielsweise für die Fraunhofer-Forschungsfertigung Batteriezelle (FFB) durch

eine sichere unterirdische Tankanlage für die Lagerung des NMP und einen separaten Gefahrstofflagerraum unter besonderen Schutzmaßnahmen für die Pufferung des Elektrolyten [30]. Ist die Zelle befüllt, so erfolgt je nach Zellgeometrie ein Pre-Aging, um mögliche Deformationen durch Gasbildungen zu detektieren, oder direkt die Formation.

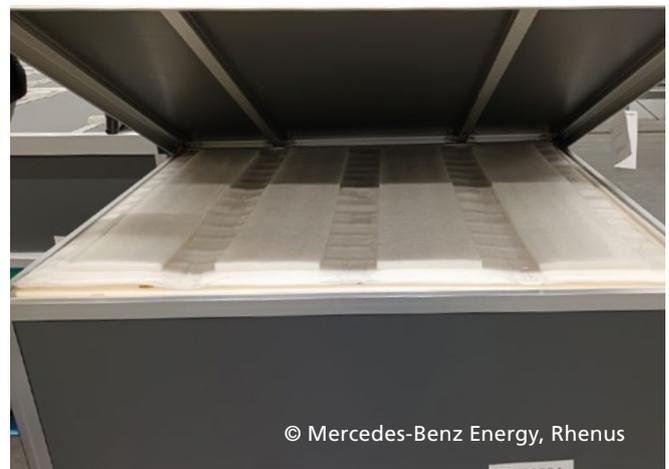
Zur Formation werden die Zellen in Spezialwarenlagerern in Formationsregale geführt und dort an Stromquellen angeschlossen und unter Veränderung definierter Formationsparameter über einen Zeitraum von bis zu 24 h mehrfach auf- und entladen. Für das Aging werden die Zellen bis zu drei Wochen in einem Hochregallager mit Warenlagerern gelagert und ihre Leerlaufspannung zyklisch getestet. Bei zulässiger Qualität wird die Zelle mit einem Bar- oder Data-Matrix-Code versehen und für die Modulmontage eingelagert oder weiterbefördert. [6]

Aufgrund fehlender Produktionskapazitäten bei den Zellen wird ein Großteil der benötigten Mengen aus Übersee, mehrheitlich China importiert. Bedingt durch ihre Größe und Abmaße lassen sich für Zellen im Vergleich zu den Modulen und Batterien sehr hohe Verpackungsdichten erzielen. Aufgrund der Sensibilität der einzelnen Zellen ist jedoch eine entsprechende Vereinzelnung der Zellen in der Verpackung erforderlich (Abbildung 14). Aufgrund der Mengen und Transportaufwendungen und Gefahrstoffanforderungen kommen hierfür mehrheitlich UN-zertifizierte Einwegverpackungen, einschließlich VCI-Schutz (Volatile Corrosion Inhibitor), die im klassischen Überseeverkehr eingesetzt werden, zum Einsatz. Je nach Anforderung der Reedereien und Hersteller werden beim Überseeverkehr klimatisierte, aber auch nicht klimatisierte Container eingesetzt. Bei der Zwischenlagerung der Container in den Übersee- und Binnenhäfen sind spezifische Anforderungen an den Brandschutz, wie Löschwasservorrichtungen der Flächen, zu beachten. Ähnliches gilt für den Bahnverkehr. Grundsätzlich ist der Transport von Zellen via Schiff und Bahn möglich, jedoch muss die Gefahrstoffverordnung für die Zwischenlagerung am Hafen oder auf dem Gleis berücksichtigt werden, wodurch der Transport gehemmt werden kann.

Sofern keine direkte Bündelung der Zellen bzw. Vorfertigung der Module im selben Werk erfolgt, sind die Batteriezellen aufgrund der international verteilten Produktionsstandorte in der Regel zu puffern, bevor diese für die Modulmontage bereitgestellt werden. Die Lagerung der Batteriezellen erfolgt typischerweise in einem Automatischen Kleinteillager (AKL), das besonders für die Pufferung von Kleinteilen mit begrenzter Menge an unterschiedlichen Artikeln bei gleichzeitig großer Artikelzahl geeignet ist [69]. Anwendung finden die AKL beispielsweise bei dem koreanischen Batteriezellhersteller LG Energy Solution (LGES) an dem polnischen Standort Breslau für die Auslieferung an verschiedene Automobilhersteller quer über Europa [70] sowie bei dem größten Batteriehersteller Contemporary Amperex Technology Co. Limited (CATL), von dort aus die Zellen von Automobilherstellern wie



© Mercedes-Benz Energy, Rhenus



© Mercedes-Benz Energy, Rhenus



© Mercedes-Benz Energy, Rhenus

Abbildung 14: Vereinzelnung von Batteriezellen in Transportboxen

Mercedes-Benz, Tesla und BMW abgenommen werden [71, 72]. Hierbei ist ein besonderes Augenmerk auf die zur Herstellung verwendeten Materialien und potenzielle Gefahrstoffe der Zelle zu richten, um potenzielle Schäden in einem Lager zu unterbinden (Kapitel 3.2 und 4.3.3). Die Gestaltung des Brandschutzkonzeptes in der Halle ist stark von den jeweiligen

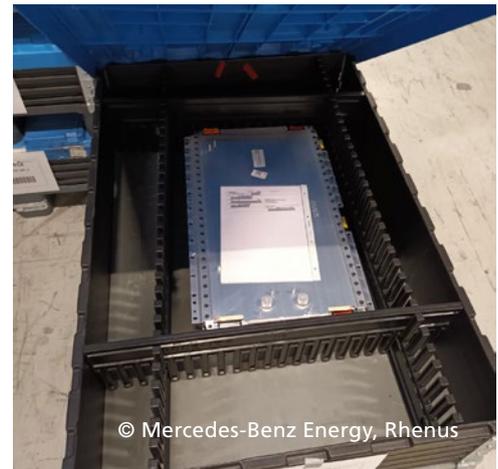


Abbildung 15: Vereinzelung von Batteriemodulen in Transportboxen

Genehmigungsbehörden, den Erfahrungen und Kenntnissen der örtlichen Feuerwehr, aber auch der involvierten Versicherung abhängig. Insbesondere die Zugänglichkeit und Vereinzelung im Havariefall sowie die Verringerung von Schäden des Bestandes durch Löschaktivitäten an nicht betroffenen Modulen ist sicherzustellen.

4.2.2 Modulmontage

Erreichen die Zellen den Wareneingang, werden diese ausgepackt und je nach Lieferqualität des Zulieferers geprüft, bevor diese dem Transportband der Montagestraße zugeführt werden. Hier werden die Zellen auf unterschiedliche Art und Weise gebündelt. Beispielsweise werden sie in definierter Stapelgeometrie verklebt und verpresst, in einzelnen Rahmen, die Schubladensystemen ähneln, verspannt oder über Zellhalter fixiert. Die Zellen werden in das Gehäuse eingebracht, woraufhin die Kontaktierung und anschließend die Montage restlicher Komponenten erfolgt. Ist das Modul geprüft, werden die Schlussplatte, die Schutzkappen und das Label angebracht und der Weitertransport zur Batteriemontage vorbereitet. [73]

Bei den Modulen ist bereits ein größerer Anteil der Fertigungskapazitäten lokalisiert, so dass diese nicht nur durch beschriebene Einwegkonzept für den Transport von Zellen, sondern auch durch Mehrwegkonzepte für die lokale Modulmontage befördert werden können.

In der Regel werden die Module per Lkw oder Zug transportiert, wobei eine wachsende Anzahl an Automobilherstellern, beispielsweise VW oder Audi, vollständig auf den Schienenverkehr umsteigen. So werden gefertigte Batteriezellen beispielsweise per Zug von Polen nach Braunschweig oder aus Ungarn nach Brüssel transportiert. Die Montagehallen selbst verfügen jedoch nicht grundsätzlich über einen eigenen Gleisanschluss. In einem solchen Fall ist zwischen der Entladestation und der Montagehalle ein Umschlag der Module auf den Straßenverkehr erforderlich. Die Beförderung der „letzten Meile“ erfolgt dann durch den Lkw [74, 75].

In diesem Zusammenhang werden Einwegkonzepte vor allem dann verwendet, wenn die Module grenzüberschreitend transportiert und in ein Land importiert werden. Hierbei handelt

es sich, analog zu Verpackungen für Zellen, meist um UN-zertifizierte Kartonagen mit VCI-Korrosionsschutz mit entsprechender Vereinzelung der Module (Abbildung 15). Je nach regionaler Anforderung kann brandhemmendes Füllmaterial zu weiterer Sicherung der Module ergänzt werden.

Bei lokal gefertigten Modulen lassen sich verschiedenste Mehrwegkonzepte beobachten. Zumeist handelt es sich um eine Außenverpackung aus Stahl mit Kunststoffaufnahmen oder -einlagen. Vorteilhaft an diesem Konzept ist einerseits die geringere Masse entflammbarer Materialien im Havariefall, andererseits die isolierende und beschädigungsfreie Aufnahme und Sicherung der Module im Gestell.

Auch wenn die Mehrwegkonzepte die Nutzung einer Blocklagerung aufgrund der Flächennutzung sehr interessant machen, empfiehlt sich aufgrund der Zugänglichkeit und Überwachungsmöglichkeit im Havariefall die Lagerung im Regal mit entsprechendem Brandschutzkonzept. Im Hinblick auf die Gewährleistung der Sicherheit der Mitarbeiter im Havariefall ist die Integration von automatisierten oder teilautomatisierten Systemen in den Lagerprozess geeignet, während auch das Be- und Entladen jeweils entweder personengeführt oder durch eine (teil-)automatisierte Anlage umgesetzt werden kann. Dabei begünstigt der Einsatz von standardisierten Ladungsträgern vollautomatisierte Lösungen. Im Zuge dessen eignen sich beispielsweise Spezialbehälter, die explizit für den Modul- bzw. Zell- oder Batterietransport konstruiert wurden und über diverse Sensorik zur Überwachung von Temperatur, Stößen und Vibration des Packguts verfügen. [74, 75] Temperaturüberwachung oder eine direkte Kommunikation mit in der Batterie integrierten Sensoren ermöglichen dabei die frühzeitige Evakuierung. Hierfür wiederum können automatische Hochregalkonzepte oder autonome Flurförderfahrzeuge die betroffenen Batterien in für den Havariefall vorgesehenen Flächen oder Bereiche transportieren.

4.2.3 Batteriemontage

Der Aufbau und die Verschaltungen der Batterien variieren stark zwischen Anwendungsfällen und Anbietern. Die Batteriemodule werden mit Kühlplatten in die Gehäusewanne eingebracht und befestigt und weitere Komponenten, wie das Kühlsystem, das Hochvoltmodul sowie das Batteriemanagementsystem montiert und gefügt. Der Gehäusedeckel wird angebracht und die Batterie verschlossen. Bei erfolgreicher End-of-Line Prüfung wird die Batterie mit einem Label sowie Warnhinweisen versehen und freigegeben, schließlich verpackt und zur Integration in das Fahrzeug weitertransportiert. [73]

4.3 Batterie-Logistik Pre-Sales

Mit Vollendung der Herstellung der Batterie beginnt die Batterie-Logistik, einschließlich Transport- und Lagerungsprozessen in



Abbildung 16: Modullagerung im Hochregallager

der Phase des Pre-Sales. Als Rahmenbedingungen sind diese Prozesse an zahlreiche Vorschriften und Regeln gebunden. In diesem Zusammenhang sind bei der Wahl eines geeigneten Ladungsträgers sowie Transport- und Lagersystems vor allem der Zustand der Batterie sowie eine entsprechende Ausstattung und Zertifizierung der Transport- bzw. Lagerlösung entscheidend.

4.3.1 Ladungsträger

Für die Batterie-Logistik besteht ein breiter Markt an außer- und innerbetrieblichen Lager- und Transportlösungen. ADR-/RID-/IATA-zertifizierte Boxen und Container zum Transport und zur Lagerung können beispielsweise Stahlboxen oder -racks, Kunststoffboxen, auslaufsichere Stahl- und Kunststofffässer oder Verpackungen aus Holz oder Papier oder Kartonage sein (Abbildung 18). Bei der Wahl der Verpackung ist der Zustand der Batterien und Zellen und resultierende Anforderungen gemäß der Sondervorschriften (SV) und Verpackungsanweisungen (P) zu berücksichtigen, während auch die Prüfanforderungen der Verpackungsgruppe I und II entscheidend sind

(Kapitel 3). Für die Beförderung von höchstens 100 Zellen oder Batterien oder Vorproduktionsprototypen gilt beispielsweise die Verpackungsanweisung P910 in Kombination mit der SV 310. Eine Metallverpackung muss in diesem Zuge z. B. mit einem nicht elektrisch leitfähigen Werkstoff, wie Kunststoff, ausgekleidet sein. Zellen und Batterien mit stoßfestem Gehäuse müssen außerdem über eine widerstandsfähige Außenverpackung aus einem geeigneten Werkstoff mit Festigkeit und Fassungsraum versehen werden. Fällt die P910 nicht in den Geltungsbereich, noch ist einer der in Kapitel 3 genannten Batteriezustände festzustellen, so sind die Zellen bzw. Batterien in Berücksichtigung der P903 zu verpacken. Hierbei muss die Verpackung die Zellen bzw. Batterien vor Beschädigungen durch Bewegung oder das Einsetzen dieser schützen. Beträgt die Bruttomasse des Packguts mindestens 12 kg und/oder wird dieses bereits in verbauter Form befördert, so gelten auch die aus P903 resultierenden Anforderungen an die Außenverpackung mit einer Schutzumschließung. Die Besonderheit bei Batterien, die in verbauter Form befördert werden, ist, dass eine Inbetriebsetzung während des Transports verhindert werden muss. Zur Beförderung von (kritischen) beschädigten / defekten Zellen und Batterien gelten andere Vorschriften (Kapitel 4.5.1). [28]

In der Intralogistik können die Batterien beispielsweise mit Hilfe eines Rollwagens auf Paletten befördert werden, wodurch sie flexibel handhabbar sind. Spezialdisplays lassen sich im Vergleich dazu in der Lagerung und dem innerbetrieblichen Transport für ein mehrfach hohes Blocklagerungssystem stapeln, wodurch eine effiziente Lagerplatzausnutzung ermöglicht wird. Da diese in der Regel jedoch keinen Wetterschutz bieten und keine Überwachungsfunktion der Batterie besitzen, werden die Batterien im außerbetrieblichen Bereich in geschlossenen Spezialbehältern mit entsprechender Sensorik befördert. Spezialbehälter können in diesem Zuge auch so konstruiert werden, dass diese sowohl Batterien als auch

Module aufnehmen können, wodurch sie für mehrere logistische Etappen standardisiert, geeignet sind.

Für das Verpackungs- bzw. Füllmaterial wird üblicherweise auf sogenannte PyroBubbles oder Cushioning-Kissen (Abbildung 17), die beispielsweise mit PyroBubbles oder ähnlichem inertem Material befüllt sein können, zurückgegriffen. Bei ersteren handelt es sich um schmelzbare Hohlglaskugeln, die eine Temperaturbeständigkeit bis 1050 °C aufzeigen und bei höheren Temperaturen eine geschlossene und wärmeisolierende Schicht bilden und somit als Brandhemmer agieren. Eine ebenso marktgängige Alternative, die vor allem als Verpackungsmaterial für den End-of-Life Transport der Batterien eingesetzt wird, ist beispielsweise Vermiculit. Dies ist ein starkes nicht entflammbares, bis zu 1.000 °C temperaturbeständiges Absorptionsmaterial für flüssige, auslaufende Gefahrgüter mit Aufsaugfähigkeit um das Fünffache des Eigengewichts. Vermiculit ist gleichzeitig elektrisch nichtleitend, mineralisch und wiederverwendbar. Während Cushioning-Kissen, je nach Füllmaterial, gefolgt von PyroBubbles und Vermiculit die meist genutzten und zugleich kostenintensivsten Varianten darstellen, sind günstigere, jedoch noch nicht ausgereifte Optionen z. B. feuergetrockneter Quarzsand, das Öl- und Feuerschutzmittel Sorbix oder ein absorbierendes Bentonit (Hydroaluminosilikat). [76]

4.3.2 Transportlogistik

Bei der innerbetrieblichen Beförderung kann zwischen einem personengebundenen und teil- bzw. automatisierten Transport unterschieden werden.

Der personengebundene Transport durch einen Gabelstapler mit entsprechender Schutzvorrichtung, die den Bediener von der (unsicheren) Batterie als Ladung abschirmt, ist im Vergleich zu anderen Transportsystemen marktgängig und flexibel (Abbildung 19). Im Vergleich hierzu kann mit dem Einsatz eines



© Mercedes-Benz Energy



© Mercedes-Benz Energy

Abbildung 17: Cushioning-Kissen



Abbildungen 18: ADR-IRID-IIATA-zertifizierte Behälter und Displays zum Transport und zur Lagerung

teil- oder vollautomatisierten Transportsystems personeller Aufwand, wie auch Aufwände der Qualifizierung zur Handhabung einer Batterie, eingespart werden. Außerdem findet eine schonende Handhabung der Batterien durch Maschinen statt, wodurch Gefahropotenziale (für den Menschen) und deren

Wahrscheinlichkeit geringer ausfallen. So kann ein fahrerloses Transportsystem (FTS), wie zum Beispiel ein autonomer Stapler, dafür genutzt werden, havarierte und somit unsichere Batterien aus der Werkshalle in einen Spezialbehälter abzutransportieren, ohne dass hierfür ein Mensch in das Umfeld der Batterie treten



Abbildung 19: Beispiele für den innerbetrieblichen Transport von Lithium-Ionen-Batterien

muss. Konkrete Lösungen, wie z. B. eine vollautomatisierte Übergabeeinrichtung von Spezialdisplays mit Batterien aus dem Wareneingang an ein fahrerloses Transportfahrzeug oder ein Beförderungssystem, das das Stapeln von mehreren Batterieträgern (Stahlpaletten) in ein Spezialdisplay mit Hilfe einer automatischen Greif- und Handhabungsvorrichtung (mittels Kontaktpunkten) ermöglicht, befinden sich noch in Untersuchung und sind in diesem Zuge bislang nicht in der Breite implementiert. Ein weiterer Entscheidungsfaktor ist die Höhe der Investitionskosten, denn je höher die Automatisierung des Transportsystems ausfällt, desto höher ist auch die dafür notwendige Investition.

Regulatorische und infrastrukturelle Anforderungen sowie erforderliche Brandschutz- und Sicherheitskonzepte stellen oftmals Hürden für den außerbetrieblichen Transport über anderen Verkehrsträger als der Straße dar. Aus diesem Grund hat sich die außerbetriebliche Beförderung über die Straße etabliert.



Abbildung 20: Beispiel zur Verladung von Lithium-Ionen-Batterien in den Lkw

So ist der Transport über die Schiene zwar emissionsarm, im Falle des Batterietransports aktuell jedoch stark gehemmt. Im Vergleich zum Straßentransport ist der Schienentransport unflexibler, wenn davon auszugehen ist, dass nicht jeder Produktionsstandort kurz- und mittelfristig einen eigenen Bahnanschluss besitzt, von dem eine direkte Beförderung zur Montagehalle möglich ist. In einem solchen Fall müssen die Batterien von der Schiene auf einen Lkw verladen werden, um das Werk zu erreichen. Um Handhabungsaufwände gering zu halten, bietet sich hierfür an, die Batterien in Spezialbehältern bereits für den Schienenverkehr in Container zu verladen, die auch für den Lkw Transport kompatibel sind. Der Straßentransport bietet im Vergleich zum Schienenverkehr eine flexible Abholung und Anlieferung (Abbildung 20). Als Teil des Genehmigungsverfahrens durch die einzelnen Behörden, in Deutschland der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) werden Lkw in offen, gedeckt und bedeckt unterschieden. Werden (kritische) Batterien durch Lkw transportiert, so ermöglicht eine Seitenbeladung den einfachsten Zugriff und gewährleistet Sicherheit für den Bediener beim Be- und Entladen, da dieser nicht durch den Laderaum gehen bzw. fahren muss.

4.3.3 Lagerung

In Kapitel 3.3.1 wurden die derzeitigen rechtlichen Rahmenbedingungen um das Thema Lagerung von Lithium-Ionen-Batterien im Hinblick auf regulatorische Vorschriften in Deutschland sowie in der EU skizziert. Obwohl es gegenwärtig keine öffentlich-rechtlichen Vorschriften zur Lagerung von Lithium-Ionen-Batterien gibt, warnen Experten davor, dies als „Freifahrtschein zum Nichtstun“ zu verstehen, da Lithium-Ionen-Batterien gefährlich werden können, denn die Inhaltsstoffe können bei nicht korrekter Handhabung gegebenenfalls erhebliche ökologische sowie ökonomische Schäden nach sich ziehen [77].

Neben sicherheitstechnischen Aspekten gilt es die Batterie vor einer Tiefentladung zu schützen. Unter dem Begriff Tiefentladung wird der Zustand verstanden, in dem eine Batteriezelle bis zu einem bestimmten Punkt entladen wird, soweit dass die Spannung unter die Entladeschlussspannung absinkt, d.h. die Batterie gar keinen Strom mehr abgeben also entladen werden kann, und dadurch Schädigungen auftreten, die die Batterie zerstören. Es bilden sich an der Anode Kupferbrücken, die beim erneuten Aufladen zu einem Kurzschluss und zu sehr hohen Temperaturen führen, die wiederum einen Brand verursachen können. Die Batterie ist dann elektrisch defekt und kann nicht wieder aufgeladen werden [78]. Als eines der weltweitführenden Unternehmen mit Schwerpunkt Intralogistik empfiehlt Jungheinrich [79] neben den oben beschriebenen Grundsätzen zur Lagerung (Kapitel 3.2), die Batterie bei einer Kapazität zwischen 50 und 70 % als Präventionsmaßnahme gegen eine Tiefentladung zu lagern.

Mendes, Starre und Kraus [80] formulieren in diesem Zusammenhang sieben Themenbereiche, die zu berücksichtigen sind, damit eine Immobilie als geeignetes Batterielager in Frage kommt:

- Bedarfsplanung
- Standortanalyse
- Digitalisierung
- Sicherheit
- Lagerplanung
- Erweiterbarkeit
- Drittverwendungsfähigkeit

In der Bedarfsplanung muss die Anzahl der zu lagernden Batterien an der entsprechenden Stelle innerhalb der Supply Chain im Voraus geplant werden. Die Standortanalyse beinhaltet die Untersuchung des notwendigen Abstandes des potenziellen Standortes zu Naturschutzgebieten. Fragen, wie die Fähigkeit zur digitalen Transformation der gegenwärtigen Immobilie für

Frühwarnsysteme und dem daraus abgeleiteten weiteren Vorgehen im Hinblick auf Umrüstung oder Neubau der Immobilie, werden im Themenbereich Digitalisierung behandelt. Unter Sicherheit wird die Entfernung zur nächstgelegenen Feuerwehr und deren Qualifikation analysiert. Die Lagerplanung beinhaltet die Berechnung der maximalen Brandlast. Inwieweit das Lager skalierbar ist, um größere Batteriebestände zukünftig lagern zu können, wird im Themenbereich Erweiterbarkeit behandelt. In dem letzten Themenbereich, der Drittverwendungsfähigkeit, steht die Fähigkeit zur Lagerung für andere Gefahrstoffe im Vordergrund. Dies sollte bei einem Wiederverkauf der Immobilie berücksichtigt werden, um vor einen Wertverlust geschützt zu sein. [80]

Als Bestandteil der Sicherheits- und Brandschutzkonzepte haben sich zum einen reaktive Maßnahmen, wie die Sprinkleranlage im Regal oder an der Decke mit dem Ziel brennende Batterien zu kühlen und die Gefahr eines Brandüberschlags zu reduzieren, etabliert [81]. Dazu gehört in der Regel eine Löschwasserrückhaltung aufgrund möglicher Kontamination durch das Löschwasser für das Grundwasser [82]. Ebenfalls finden Abtrennungen von Lagerabschnitten, um die Wahrscheinlichkeit einer Kettenreaktion im Falle eines thermischen Durchgehens zu verhindern, Anwendung [77, 83]. Zum anderen wird an der Implementierung von aktiven Maßnahmen im Rahmen von Sicherheits- und Brandschutzkonzepten bei der Lagerung gearbeitet und geforscht. Dazu zählen die Branddetektion in Kombination mit weiterer smarter Lagereinrichtung, automatische Evakuierungskonzepte sowie die Zustandsüberwachung und Kommunikation mit Batteriesensorik als Frühwarnsystem [84–86].

In der Praxis wird das Stückgut Batterie derzeit sowohl in der Bodenblocklagerung (Abbildung 21) als auch in der Regallagerung gelagert. So setzt die Daimler-Tochter Accumotive im sächsischen Kamenz auf die Bodenblocklagerung. [87]



Abbildung 21: Bodenblocklagerung von Batterien

Eine Lösung der zuvor definierten Themenbereiche für die statische Regallagerung der Batterien präsentiert die BMZ GmbH. Das 7.000 m² große Hochregallager im Logistikzentrum, umfasst etwa 12.000 Palettenstellplätze. Für die Genehmigung des Lagers hat die BMZ GmbH ein Sicherheitskonzept vorgelegt, das einen „Löschwassertank mit 754 m³ Wasservorrat, ein Brandmelde- und Sprinklersystem, das den Brandherd lokalisiert, intelligent meldet und effektiv löscht, ein Löschwasserrückhaltesystem, mit dem kontaminiertes Löschwasser im Brandfall automatisch zurückgehalten wird und nicht ins Grundwasser gelangen kann“, enthält. Dieses Sicherheitskonzept hielt die Auflagen von verschiedenen Versicherungen und der Umweltbehörde ein, sodass der Versicherungsschutz durch den VdS bestätigt wurde. [88]

4.4 Nutzung und Informationslogistik

Während der Nutzung durch den Endkunden bestehen verschiedene Schnittstellen für die Instandhaltung und Kommunikation zur Batterie. Am einfachsten gestaltet sich die Kommunikation mit einer in ein Fahrzeug eingebauten Batterie, da ein Batteriemanagementsystem (BMS) zur Kontrolle zur Verfügung steht. Das BMS als Kommunikationsschnittstelle befähigt den Benutzer, die Batterie zu beobachten und ihren Zustand einzuschätzen. Diese Kommunikation funktioniert aber in der Regel nur in Richtung zum Nutzer und nicht zurück.

4.4.1 Batteriemanagementsystem

Fahrzeugg Batterien besitzen ein Batteriemanagementsystem (BMS), das neben Zellüberwachungseinheiten und Sensorik zur Bestimmung der Zellspannungen und Temperaturen den Strom überwacht und das Zu- und Abschalten der Batterie ermöglicht [9]. Zusätzlich kommt das BMS zum Einsatz, um das Thermomanagement der Batterie (zum Kühlen oder Heizen) zu steuern. Eine weitere wichtige Aufgabe des BMS besteht darin, die Überwachung und Verwaltung der Batterie zu gewährleisten. Dies ist nötig, um den effektiven und zuverlässigen Betrieb des Systems zu ermöglichen [89]. Neben seiner Funktion als Überwachungs- und Steuerungseinheit für die Batterie übernimmt das elektronische BMS auch die Aufgabe der Daten-Kommunikation zur Fahrzeugseite. Insgesamt lassen sich vier funktionale Ebenen einer Batterie ausmachen: [9]

1. Mechanische Integration
2. Elektrisches Management
3. Thermisches Management
4. Kommunikation zur Fahrzeugseite.

Unter der mechanischen Integration versteht man die Integration der einzelnen Komponenten zu einer Batterie, wie sie in Kapitel 2 beschrieben wird. So kann die Batterie allen mechanischen Anforderungen entlang des gesamten First Life standhalten und zugleich Funktionalität und Sicherheit gewährleisten. [9]

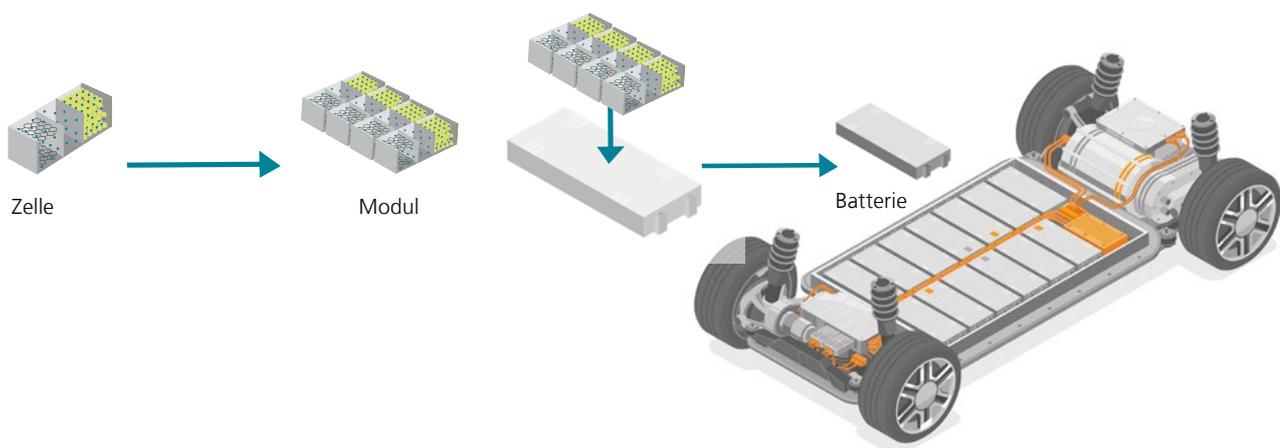


Abbildung 22: Integration der Batterie in das Fahrzeug

Das elektrische Management ist für die Bereitstellung der geforderten elektrischen Leistung für den Antrieb des Fahrzeugs zuständig. Darüber hinaus umfasst es den Ladevorgang beim externen Laden bzw. den Vorgang der Rekuperation während des Fahrbetriebs. Auf das Laden wird im folgenden Kapitel 4.4.2 noch näher eingegangen. Sicherheitskritische Zustände, wie z. B. Isolationsfehler, Kurzschluss, Überhitzung, Überladung und Tiefentladung werden vom elektrischen Management angezeigt. Solche Gefahrenquellen in der Nutzung werden detaillierter im Kapitel 4.4.3 behandelt. Die Auslösung einer angemessenen Reaktion auf solche sicherheitskritischen Zustände gehört ebenso zu der zweiten funktionalen Ebene einer Batterie. [9]

Da Lithium-Ionen-Zellen in ihrem Leistungsverhalten und in ihrer Lebensdauer stark von der Umgebungstemperatur abhängig sind, bildet das thermische Management die dritte funktionale Ebene einer Batterie. Diese Abhängigkeit ist in der elektrochemischen Basis der Zellen begründet. Insbesondere bei niedrigen Temperaturen wird die Entladeleistung der Lithium-Ionen-Batterie deutlich herabgesetzt, was sich in einem erhöhten Innenwiderstand der Zelle sowie in einer verminderten Entladekapazität zeigt. Auch die Höhe der Ladeströme muss bei niedrigen Temperaturen begrenzt werden, um das Abscheiden von metallischem Lithium an der Elektrodenoberfläche zu vermeiden. Dieses sogenannte „Lithium Plating“ wirkt sich schädigend auf Zellkapazität und Leistungsverhalten aus. Daher ist eine zuverlässige Kontrolle von Temperatur und Ladeströmen von entscheidender Bedeutung. Die optimale Betriebstemperatur für Lithium-Ionen-Batterien liegt zwischen 20 °C und 40 °C. Unter 0 °C kann der Leistungsverlust bis zu 30 % betragen und das Lithium Plating begünstigen [9, 89].

Die Kommunikation zur Fahrzeugseite komplettiert die vier funktionalen Ebenen der Batterie. Die Batterie ist als eine der wichtigsten Systemkomponenten eines Elektrofahrzeugs direkt in die elektrische Fahrzeugumgebung integriert. Hierbei ist ein kontinuierlicher Informationsaustausch zwischen Batterie und Fahrzeug notwendig, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Das betrifft vor allem aktuelle Daten wie Ladezustand, elektrische Leistungsfähigkeit, Stromaufnahmefähigkeit und Innenwiderstand. Ebenfalls wichtig sind sicherheitsrelevante Signale, um bei eventuellen Störungen einen sicheren Zustand des Gesamtsystems zu garantieren. [9, 89]

4.4.2 Laden der Lithium-Ionen-Batterien im Pkw

Der Umgang mit der Lithium-Ionen-Batterie durch den Endverbraucher entscheidet maßgeblich über die weiteren Lebensabschnitte der Lithium-Ionen-Batterie. Das Laden hat hierbei einen entscheidenden Einfluss. Man bezeichnet den Vorgang einer Entladung sowie einer Wiederaufladung als einen „Zyklus“ [90]. Ein Zyklus kann vollständig oder unvollständig erfolgen. Die maximale Anzahl der Zyklen, die eine Batterie

durchlaufen kann, bezeichnet die Lebensdauer einer Batterie. Es können von 100 bis zu mehreren 1.000 Zyklen durchlaufen werden, bis das Lebensende einer Batterie erreicht ist. Dies ist abhängig von Art, Handhabung und Anwendung (Abbildung 23). [5]

Kenngößen, die Auskunft über den Batteriezustand liefern, sind der State of Charge (SoC), State of Health (SoH), State of Power (SoP), State of Safety (SoS) und State of Energy (SoE). Die wichtigste Kenngröße für die Lade-, Entlade- und Ausgleichssteuerung ist der SoC, der die prozentuale Kapazität der Batterie im Vergleich zum vollgeladenen Zustand beschreibt [17, 90]. Mit fortschreitender Anzahl absolvierter Ladezyklen nimmt sowohl die Kapazität als auch die Leistung der Batterie ab. Die wichtigste Kenngröße zur Beschreibung der verbliebenen Leistung und des Gesundheitszustandes ist der SoH. Er bezeichnet den Zustand einer Batterie im Vergleich zu ihrem Idealzustand direkt nach Herstellung, gemessen in Prozent. Es gibt aktuell keinen Konsens darüber, wie der SoH berechnet werden sollte, jedoch stellt die Selbstentladungsrate (SDR) eine gute Möglichkeit dar. Ab einem SoH von ca. 80 % hat die Batterie üblicherweise das Ende des ersten Lebens erreicht [90, 91]. Das Alter einer Zelle lässt sich vor Allem an einem gestiegenen Innenwiderstand ausmachen. Dieser steigt vorrangig durch drei Prozesse, die im Laufe des Batteriealters stattfinden können. Erstens kann es zur Korrosion der Stromableiter an den Elektroden kommen. Zweitens kann der Elektrolyt mit der Zeit zersetzt werden, was insbesondere bei höheren Temperaturen zu beobachten ist. Dadurch bildet sich an der Anode eine für Lithium-Ionen schwer durchgängige Schicht. Drittens kann es an der Anode zum in 4.4.1 bereits beschriebenen Lithium Plating kommen.

Das simultane Laden vieler Zellen kann dazu führen, dass sich Kapazitätsdiskrepanzen erhöhen, wodurch die Gesamtkapazität der Batterie abnimmt - ein weiterer Alterungsprozess, den es zu vermeiden gilt. Dafür wurden Ladungsausgleichssysteme erfunden, die entweder aktiv oder passiv in den Ladezustand der einzelnen Zellen eingreifen. Dadurch kann das Risiko einer Überladung einzelner Zellen vermieden werden. Die einzelnen Zellen weisen eine fertigungsbedingte Streuung auf und können unterschiedlich viel Restladung enthalten. Dadurch können stärker geladene Zellen während des Ladevorgangs die Maximalspannung früher erreichen als andere. An diesen bestimmten Zellen kommt es zur Überspannung - und die o.g. Alterungsprozesse werden begünstigt - oder es kommt zu einem verfrühten Abbruch des Ladevorgangs. Das Resultat ist ein Kapazitätsverlust, bedingt durch das nicht vollständige Laden aller Zellen. Das Verhalten der gesamten Batterie richtet sich allerdings nach der schwächsten Zelle. So wird insbesondere die Länge des Lade- bzw. Entladevorgangs durch die schwächste Zelle in Serienschaltung bestimmt. Aus diesem Grund lädt bzw. entlädt ein BMS die Batterie nur teilweise, zum Beispiel von 30 % auf 80 % anstatt von 0 % auf 100 %. Um stattdessen alle Zellen möglichst gleichmäßig

aufladen zu können, wurde eine Methode entwickelt, den „überschüssigen“ Strom abzuleiten. Dieser Ladungsausgleich vermeidet ein Überladen der Zellen, indem die überschüssige Energie an Widerständen in Wärme umgewandelt wird [90]. Die anfallende Wärme setzt dabei der Höhe des Stroms eine Obergrenze. Umgekehrt wird beim Entladen die zur Verfügung stehende Energie nicht restlos genutzt, um ein zu tiefes Entladen der schwächeren Zellen zu vermeiden. In den stärkeren Zellen bleibt somit eine Restenergie erhalten. Die beschriebene passive Ausgleichsmethode kann bei der Entladung keine Verbesserung erzielen. Über die Zeit wird sich die Kapazitätsdiskrepanz der Zellen weiter vergrößern und somit die maximale Kapazitätsausnutzung weiter verringern. Eine Alternative zum üblichen passiven Verfahren stellen aktive Verfahren dar. Hierbei werden Ladungen zwischen Zellen während des Ladens, des Entladens und sogar des Ruhezustands aktiv übertragen. So werden größere Ausgleichsströme möglich. [9, 90]

Im besten Fall hält sich ein Verbraucher an alle Empfehlungen zum Laden einer Lithium-Ionen-Batterie, um eine möglichst lange Lebensdauer zu garantieren. Werden nicht alle Vorgaben eingehalten oder kommt es sogar zu Unfällen während der Handhabung der Lithium-Ionen-Batterie durch den Endkunden, so droht ein sogenanntes thermisches Durchgehen der Batterie. Dieses oder weitere Gefahrenquellen in der Nutzung werden im folgenden Kapitel behandelt.

4.4.3 Gefahrenquellen in der Nutzung

Im Falle eines Defektes oder Gewährleistungsfalles wird die schadhafte Batterie gegen eine Neu-Batterie ausgetauscht und entsorgt. Bedingt durch die sicherheitstechnische Architektur der Batterien (Pyrofuses und Sicherungen) führt ein Fehler oder Unfall zu einer Nicht-Nutzbarkeit der Batterie [92].

Eine der größten Gefahren im Umgang mit

Lithium-Ionen-Batterien sind Brände, die aufgrund verschiedener Faktoren auftreten können. Diese Ursachen können in elektrische, physische, thermische und Herstellungsdefekte sowie Batteriealterung unterteilt werden [92]. Ein Beispiel für eine elektrische Ursache ist ein defekter Separator, der durch eine starke mechanische Einwirkung, wie sie bei einem Unfall auftritt, beschädigt werden kann. Dies führt zu einem Kurzschluss in der Zelle, der zu einer starken Erhitzung und schließlich zu einem Brand führen kann. Weitere mögliche Ursachen sind die Überladung der Batterie oder die Verwendung bei zu hoher Temperatur [17, 92]. In diesen Fällen zersetzt sich die Kathode, wobei Sauerstoff frei wird, und metallisches Lithium lagert sich an der Anode an, was ebenfalls Wärme freisetzt. Bei dieser hohen Temperatur zersetzt sich der Elektrolyt, wobei brennbare Gase frei werden, die mit dem Sauerstoff reagieren und zu einer weiteren Temperaturerhöhung führen können, was letztendlich in einem thermischen Durchgehen resultieren kann [90, 92]. Dieser Vorgang stellt aufgrund der Schwierigkeit, Lithium-Brände zu löschen, eine Gefahr dar. Alle genannten Szenarien sind allerdings bei Nutzung im Arbeitsbereich unwahrscheinlich. Um den Schutz der Batterie sicherzustellen, verfügt jede Batterie über ein Batteriemanagementsystem (Kapitel 4.4.2). Außerdem verhindert der Separator im Falle des Zersetzens des Elektrolyten aufgrund von zu hoher Temperatur in der Regel einen Kurzschluss zwischen Anode und Kathode [92]. Stand der Technik für die Evakuierung von brennenden batterieelektrischen Fahrzeugen im Havariefall sind mit Wasser gefüllte Container zur Kühlung der Batterie, die jedoch nur begrenzt verfügbar sind. [9]

4.5 Batterie-Logistik After-Sales

Wie eingangs erläutert wird der Bedarf an Batterien und in der Folge die Batterieproduktion in den kommenden Jahren stark ansteigen. Daher steht aktuell der Ramp-up der Serienfertigung (Pre-Sales) im Vordergrund, der die Optimierung

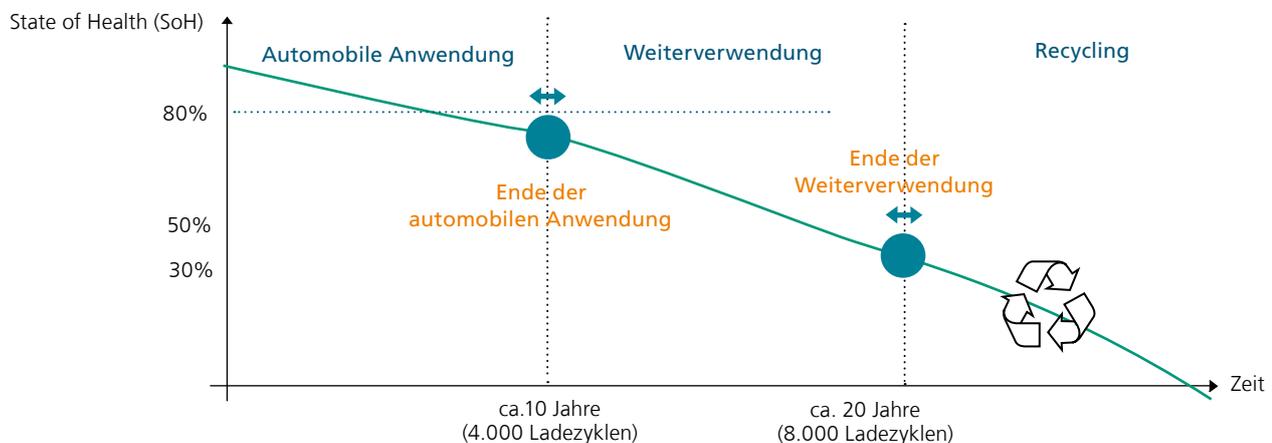


Abbildung 23: Batterie -Lebensdauer-Modell [37]



© Remondis

Abbildung 24: Beispiel Spezialbehälter für kritische Lithium-Ionen-Batterien

der Fertigungsprozesse sowie der dazugehörigen logistischen Prozesse beinhaltet. Parallel ist mit einem steigenden Aufkommen an fehlerhaften und End-of-Life Batterien im After-Sales-Markt zu rechnen, die über verschiedene Nachnutzungs- bzw. Verwertungspfade geführt werden können. Diese sowie damit verbundene logistische Anforderungen werden im weiteren Verlauf beschrieben. Es wird aktuell davon ausgegangen, dass 2040 in Europa etwa 1.500.000 t Lithium-Ionen-Altzellen und Batteriekomponenten anfallen [93]. Für diese Batteriemengen sollen Konzepte für regionale Wertschöpfungsketten mit entsprechender dezentraler Verteilung der Behandlung realisiert werden, um zum einen den Ansatz der Circular Economy für Batterien zu verbessern, Rohstoffsicherheit und -verfügbarkeit zu garantieren und zum anderen Transportwege zu minimieren.

4.5.1 Entsorgung von Lithium-Ionen-Batterien auf dem Verkehrsträger Straße

Um die Kreislaufschließung im After-Sales-Markt zu realisieren, bedarf es einer Logistik, um die Batterien von den Anfallstellen zu entsprechenden Nachnutzungs- und Verwertungsmöglichkeiten zu transportieren. Für Transportunternehmen, die die Verwertung bzw. Beseitigung von Lithium-Ionen-Batterien übernehmen, ist eine Klassifizierung vorgeschrieben [28]. Auch in dieser Lebenszyklusphase unterliegen die Batterien dem Gefahrgutrecht und im Falle eines Straßentransports der ADR.

Dabei werden folgende Batteriezustände unterschieden:

- End-of-Life-Batterien: Batterien, die aufgrund ihres Alters bzw. reduzierter Leistungskennzahlen ausgetauscht werden, aber nicht defekt / beschädigt bzw. kritisch defekt / beschädigt sind.
- Defekte / beschädigte Batterien: Batterien sind als defekt oder beschädigt anzusehen, wenn sie aus Sicherheitsgründen als defekt identifiziert worden sind, ein beschädigtes oder ein erheblich verformtes Gehäuse aufweisen, undicht sind oder die Druckentlastungseinrichtung angesprochen hat, Anlauffarben an Metallteilen oder geschmolzene oder verformte Kunststoffteile sichtbar sind, das BMS defekte Zellen identifiziert, Elektrolytflüssigkeit ausgelaufen ist sowie Batterien, die vor dem Transport nicht mehr diagnostiziert werden können und von denen man deswegen annehmen muss, dass sie defekt / beschädigt sind.
- Kritisch defekte / beschädigte Batterien: Zellen und Batterien, bei denen festgestellt wurde, dass sie beschädigt oder defekt sind und unter normalen Beförderungsbedingungen zu einer schnellen Zerlegung, gefährlichen Reaktion, Flammenbildung, gefährlicher Wärmeentwicklung oder einem gefährlichen Ausstoß giftiger, ätzender oder entzündbarer Gase oder Dämpfe neigen.
- Nicht beförderungssichere Batterien: Batterien, die als

nicht beförderungssicher identifiziert wurden, dürfen nicht transportiert werden.

- Für End-of-Life Batterien, die im Fahrzeug verbaut sind oder ausgebaut vorliegen, gilt für die direkte Beförderung zur Entsorgung oder zum Recycling die Sondervorschrift SV 377 in Verbindung mit Verpackungsanweisung P909.

Defekte / beschädigte Lithium-Ionen-Zellen und -Batterien dürfen nicht nach den Vorgaben für die SV 377 befördert werden, sondern benötigen eine Gefährdungsbeurteilung und werden dann nach den Vorgaben der SV 376 in Verbindung mit der P908 bzw. LP904 behandelt.

Während eine Gefährdung beim Transport einer defekten / beschädigten Batterie unter normalen Beförderungsbedingungen ausgeschlossen werden kann, wird für den Transport einer kritisch defekten / beschädigten Batterie eine spezielle Genehmigung der national zuständigen Behörde oder eine sogenannte Verfahrensfestlegung benötigt. Für die Beförderung kritisch defekter / beschädigter Batterien erlässt beispielsweise die BAM in Deutschland weitere Vorgaben und es sind Prüfnachweise für entsprechende Batterien zu erbringen. Für die Verpackung kommen in der Regel die Vorgaben der P911 bzw. LP906 zur Anwendung. Darunter fallen z. B. Spezialbehälter für kritische Batterien, die diesen höheren Anforderungen des Brandschutzes und der Sicherheit gerecht werden. So bieten feuerverzinkte

Stahlbehälter auch bei Temperaturen von 1.000 °C eine Standzeit von drei Tagen und eine feuerfeste Isolierung, die die Außentemperatur unter 100 °C hält und verhindert, dass ein Brand der Batterie auf das Umfeld übergreift (Abbildung 24). [94] Altbatterien und dazugehörige Abfallfraktionen unterliegen insbesondere bei länderübergreifenden Transporten der Notifizierungspflicht. Der OECD-Rat regelt mit dem Basler Übereinkommen das grenzüberschreitende Verbringen von Abfällen. Beispielsweise muss die detaillierte Transportroute bei grenzüberschreitenden Transporten vorher bei den jeweiligen Ländern angefragt werden, durch die die Batterien transportiert werden sollen. Dabei werden länderspezifische Vorschriften oder sogar Ausfuhrrestriktionen berücksichtigt. Bei der Planung der Transportrouten sind nicht nur bei grenzüberschreitenden Transporten auch sogenannten Tunnelbeschränkungs-codes zu berücksichtigen, die als Bestandteil der ADR regeln, welche Gefahrgüter welche Tunnel passieren dürfen. Bei der Routenplanung ist außerdem auch die Fahrzeit und damit verbundene, vorgeschriebene Ruhezeiten der Fahrer zu berücksichtigen. Da gemäß behördlicher Festlegung die Beförderung für (kritisch) defekte / beschädigte Batterien innerhalb von 24 h erfolgen muss, ist eine Zwischenpufferung auf der Transportstrecke ausgeschlossen. In diesem Zusammenhang ist eine mögliche Veränderung der Wegführungen durch zusätzliche Lager als Zwischenziele mitzudenken. Die Flexibilität des Transports, beispielsweise im Zuge von Stauzeiten auf der geplanten Route, ist als Resultat dieser Regeln erheblich eingeschränkt.

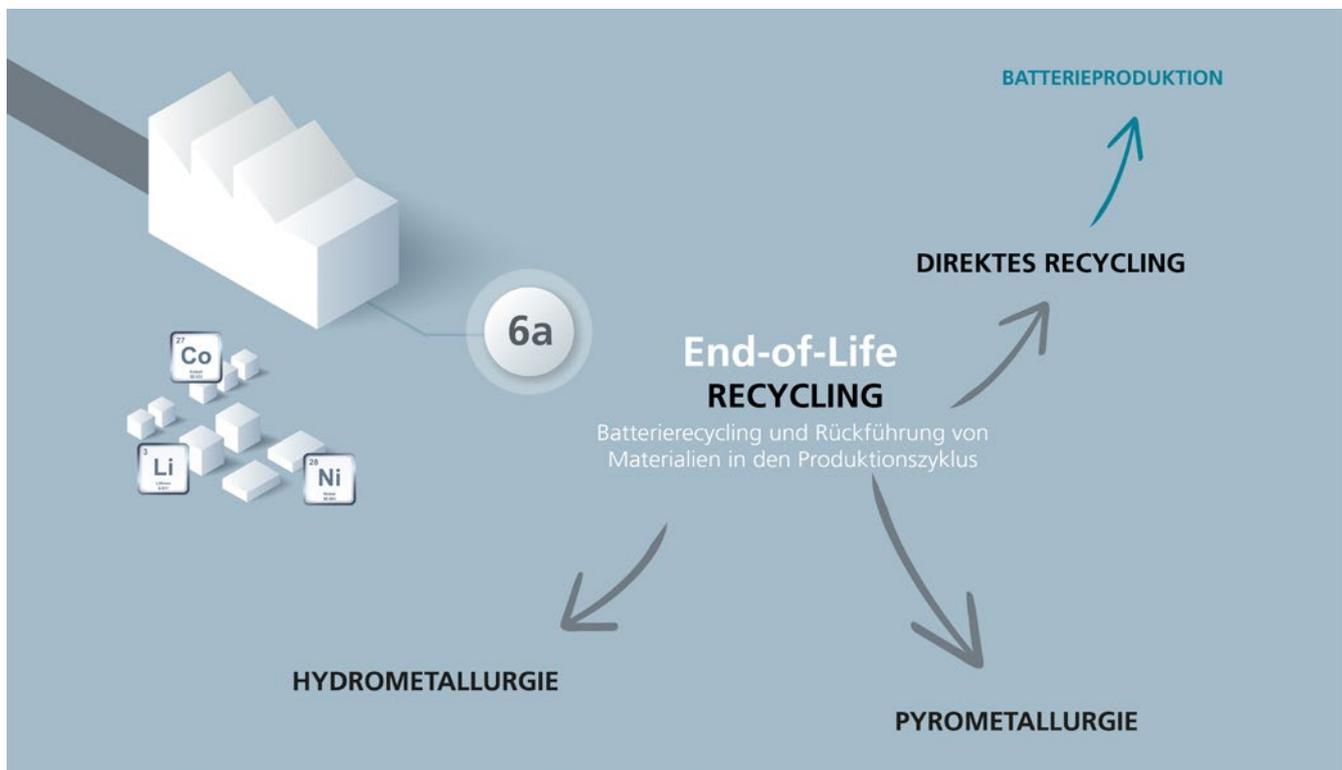


Abbildung 25: Recyclingverfahren für Batterien



Abbildung 26: Stationärer Energiespeicher

4.5.2 Nachnutzungs- und Verwertungsmöglichkeiten

Die von der EU-Kommission vorgeschlagenen Zielvorgaben im Rahmen der EU-Batterie-Regulierung, die derzeit noch im europäischen Trilogverfahren abgestimmt wird, werden zu umfangreichen Veränderungen in Produktion, Logistik und Recycling von Batterien führen. Kapazitäten müssen ausgebaut und neue Technologien sowie Prozesse erforscht und industrialisiert werden, denn ab 2030 sollen beispielsweise Quoten für den Rezyklatgehalt zur Herstellung großer Traktions- und Industriebatterien gelten. Das bedeutet, dass bei der Neuproduktion von Lithium-Ionen-Batterien ein bestimmter Mindestanteil an recyceltem Kobalt, Lithium und Nickel eingesetzt werden muss [95].

Für eine Circular Economy müssen jedoch auch Werterhaltungsstrategien und Technologien berücksichtigt und industrialisiert werden. Daher wird es einen steigenden Bedarf an Kapazitäten für die Behandlung dieser Batterien geben, wobei die Vielfalt im Mengenstrom „Batterien“ in Bezug auf die Bauart, die Zellchemie, die Einsatzhistorie und die Logistikanforderungen, berücksichtigt werden müssen. In Anlehnung an die R-Strategien, die als Ausgangspunkt für eine Transformation hin zu einer Circular Economy angesehen werden, können folgende Nachnutzungs- und Verwertungspfade im Kontext „Batterien“ differenziert werden, die den Verbrauch von natürlichen Ressourcen reduzieren und die Kreislaufführung von Materialien unterstützen sollen [96].

- Nachbearbeitung (Rework) von Produktionsfehlern bei Batterien innerhalb der Produktionsstätte für die spätere Rückführung in die Produktionslinie.
- Reparatur (Repair) von gebrauchten Batterien, die defekt oder leistungsschwach sind, z. B. durch den Austausch einer Komponente mit entsprechender Garantie und anschließender Weiternutzung in den ursprünglichen Fahrzeugen.
- Wiederverwendung (Reuse) von Batterien in Fahrzeugen oder wenn Batterien aufgrund von Leistungseinbußen nicht mehr für Fahrzeuge verwendet werden können, können sie für den erweiterten Einsatz in Anwendungen eingesetzt werden (Weiterverwendung), die einen geringeren Leistungsbedarf haben, wie z. B. stationäre Energiespeicher. Einige der Komponenten können als Ersatzteil aus der Batterie entfernt und für die Überholung, Wiederaufarbeitung oder Reparatur anderer Batterien verwendet werden.
- Überholung (Refurbishment) von Batterien im Rahmen von terminierten und standardisierten Eingriffen. In Abgrenzung zur Reparatur erfolgt die Überholung, z. B. ein Modulaustausch oder eine Reinigung, präventiv nach einem definierten Vorgehen, um den Lebenszyklus in der Fahrzeuganwendung aber in einem anderen Fahrzeug zu verlängern.
- Wiederaufarbeitung (Remanufacturing) der Batterie oder Module im gleichen oder anderen

Batteriekonzept. Dabei wird eine gebrauchte Batterie oder ein gebrauchtes Modul auf die Qualität einer neuwertigen Komponente gebracht. Das Verfahren stellt den Wert der Batterie oder des Moduls mit entsprechender Herstellergarantie nahezu vollständig wieder her.

- Recycling von Batterien zur Rückgewinnung von (wertvollen) Rohstoffen, die zum einen für den Wiedereinsatz in Batterien oder anderen Anwendungen vorbereitet werden. Zum anderen steht die sichere Behandlung von gefährlichen Inhaltsstoffen, die ggf. nicht mehr weiter eingesetzt werden können, im Mittelpunkt.

Im Hinblick auf die aktuellen Nachnutzungs- und Verwertungsmöglichkeiten von Batterien liegt der industrielle Fokus auf der Demontage von Batterien zur Modulgewinnung für eine Weiterverwendung z. B. in stationären Energiespeichern (Second-Life-Anwendung) oder dem Recycling von Batterien und einzelnen Komponenten. Forschungsprojekte fokussieren ebenfalls die Verbesserung der Materialrückgewinnung und das Materialrecycling durch (teil-)automatisierte Demontageansätze [97–99]. Eine Überholung, Aufarbeitung oder Reparatur von Batterien, Modulen oder Zellen findet derzeit nicht im industriellen Maßstab statt.

Das aktuell dominierende Recycling-Vorgehen bringt den Nachteil mit sich, dass in der Regel zunächst die gesamte Batterie tiefentladen und somit anschließend recycelt werden muss, unabhängig davon, ob nur fehlerhafte Komponenten ausgetauscht werden müssten oder einzelnen Komponenten als Ersatzteile oder für die Wieder- bzw. Weiterverwendung genutzt werden könnten. Der im Projekt InnoLogBat aufgenommene Prozess verfolgt die möglichst zerstörungsfreie Öffnung der Batterien nach einer ersten Diagnose und Zustandsanalyse in einer Demontagestation. Anschließend werden das Gesamtsystem und einzelne Komponenten umfassender analysiert. Der Prozess muss sowohl auf die große Varietät der verschiedenen Batteriedesigns als auch auf die Vielfalt und Unterschiedlichkeit der Behandlungsmöglichkeiten abgestimmt sein. Hinzu kommt das inhärente Gefahrenpotenzial im Umgang mit den Batterien für die Arbeitssicherheit der Mitarbeiter. Anhand der erhaltenen Ergebnisse wird das weitere Behandlungsverfahren definiert. Je nach ermitteltem Zustand können die nachfolgenden Schritte sein:

1. Durchführung von Reparaturen in verschiedenem Umfang
2. weitere Demontage und Vorbereitung für Wieder- bzw. Weiterverwendung
3. Tiefentladung und Vorbehandlung für das Recycling

Da die Batterien eine große Varietät besitzen und die Stückzahlen noch gering sind, erfolgen die genannten Schritte aktuell primär manuell. Eine Demontagestraße ist speziell auf einen Kunden bzw. Batterietyp zugeschnitten, während ein Chargen- bzw. Kundenwechsel bedeuten kann, dass die

Demontagestraße nicht genutzt bzw. angepasst werden muss. Es werden demnach hohe Anforderungen an die Flexibilität und Agilität der Prozesse gestellt, die in Kombination mit dem schnellen Wechsel der Batterie-Generationen Herausforderungen der Standardisierung und Automatisierung bedeuten. Aktuell wird in der Teilautomatisierung das Potenzial zugesprochen, die wachsenden Mengen und höheren Marktanteile einzelner Batterietypen wirtschaftlich skalierbar bearbeiten zu können.

Durch die Demontage der Batterien werden die unterschiedlichsten verbauten Materialien vorsortiert und aufkonzentriert. Neben den Batteriemodulen können unter anderem Aluminium-, Kupfer- und Kunststofffraktionen sowie Elektronikschrott und sonstiger Kernschrott vorab getrennt werden.

Sofern die Batterie für eine Wieder- bzw. Weiterverwendung eingestuft worden ist, werden die Module aus der Batterie entfernt, gesichert, verpackt und zwischengelagert. Eine Tiefentladung darf nicht stattgefunden haben. Die Module werden, z. B. in entsprechend gekennzeichneten Kartons verpackt und auf Holzpaletten gemäß der in Kapitel 4.3.2 und 4.3.3 beschriebenen Prozesse transportiert und gelagert. Für die weitere Verwendung, z. B. in stationären Energiespeichern, werden die Module in Containern neu verkabelt und mit der notwendigen Leistungselektronik versehen (Abbildung 26).

Ist die Batterie für ein Recycling befundet worden, können die Module nach der Demontage und der Tiefentladung einem direkten Recycling oder einem metallurgischen Verfahren (Pyrometallurgie oder Hydrometallurgie) zugeführt werden (Abbildung 25). Da es während mechanischer Vorbehandlungen zu explosiven Reaktionen kommen kann, wird eine thermische Vorbehandlung vorgeschaltet oder eine inerte Umgebung genutzt. Rückgewonnene Materialien können Kupfer, Aluminium, Edelstahl sowie Schwarzsasse sein. Das pyrometallurgische Verfahren behandelt die Batteriemodule in Schmelzöfen. Es verbleiben Metalllegierungen und Schlacke. Die Schlacke enthält Lithium und Aluminium. Das hydrometallurgische Verfahren ist entweder für die Behandlung der Schwarzsasse nach mechanischer Aufbereitung der Batteriemodule oder der Schlacken aus einem pyrometallurgischen Verfahren geeignet. Mit Hilfe von Säuren oder Laugen werden die Metalle gelöst. [100–104].

Für eine möglichst hohe Rohstoffrückgewinnung sollten die Module nach dem Demontieren hydrometallurgischen Prozessen zugeführt werden. Kritische Batterien, die aus sicherheitstechnischen Gründen nicht vorbehandelt werden können, empfiehlt es sich pyrometallurgisch, mit entsprechend geringerer Rückgewinnung an Rohstoffen, zu verwerten. Die Prozesse der strukturierten Demontage mit anschließender Überholung, Aufarbeitung oder Reparatur im Spannungsfeld von Weiterverwendung in stationären Energiespeichern und Recycling von Batterien bedürfen weiterer technologischer und prozessualer Forschung.



5. Herausforderungen in der Batterie-Logistik

In den zuvor beschriebenen Phasen werden verschiedene Akteure bei der Produktion, Logistik, Nutzung und Entsorgung mit Herausforderungen im Umgang mit Batterien konfrontiert. In diesem Kapitel werden die Herausforderungen mit logistischem Bezug herausgearbeitet und erläutert.

Eine übergeordnete Herausforderung ist, die Perspektiven und Interessen der verschiedenen Akteure in Einklang zu bringen. Wohingegen Batteriehersteller oder Automobilhersteller darauf bedacht sind, funktionsfähige und sichere Produkte effizient am Markt zu platzieren und ein eher geringes Risiko in der Handhabung und Lagerung von Batterien sehen, kann die Haltung aus der Perspektive der Logistik etwas konservativer

ausfallen. Daher ist ein gemeinsames Risikobewusstsein und Verständnis Grundlage für eine gelingende Zusammenarbeit..

Auch die unterschiedlichen Lebenszyklusphasen von Batterien implizieren Herausforderungen. Batterien aus dem Bereich Pre-Sales (bis zum Kunden) bringen ganz andere Risiken und Fehlerursachen mit als Batterien aus dem Bereich After-Sales. Da die Batterietechnologie sich kontinuierlich weiterentwickelt, ist es schwierig einen einheitlichen Batteriestandard zu definieren bzw. ein allgemeingültiges Gefahrenpotenzial abzuschätzen, um die Prüfverfahren, insbesondere für den Transport, von kritisch defekten / beschädigten Batterien, zu reduzieren. Hinzu kommt, dass es an Verbindlichkeit und Klarheit fehlt,

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4
Detektion	Rauchmelder an der Decke	Rauch-/Gas- und Temperaturfühler je Abschnitt	Rauch-/Gas- und Temperaturfühler je Regalabschnitt	Direkte Temperatur Überwachung der Batterie
Lagerung	Blocklagerung	Block oder Regal mit Brandabschnitten	Regallager mit Hitzeabschirmung der Abschnitte	Automatische Regallagerung
Löschwasser Rückhaltung	nein	ja	ja	ja
Besprinklerung	Decke	je Abschnitt	Einzelplatz-Besprinkelung	Einzelplatz-Besprinkelung
Havariekonzept	Transport nach Draußen	Havarie Behälter	Havarie Behälter und Automatische Evakuierung	Havarie Behälter und Automatische Evakuierung
Rauchgas	Kein Abzug	Rauchgasabzug in Decke	Gasabzug in Decke und Boden	Gasabzug in Decke und Boden
Sonstiges	Temperatur Überwachung nur auf Außenbehälter	Temperatur Überwachung nur auf Außenbehälter	Temperatur Überwachung nur auf Außenbehälter	Auslesen der Batteriesensorik

Tabelle 1: Beispiel für heterogene Entscheidungen zu den Sicherheits- und Brandschutzkonzepten

welche Punkte bei der Lagerung von Batterien und Batteriekomponenten unbedingt zu berücksichtigen sind. Es gelten unterschiedliche Anforderungen auf der Ebene der Landkreise, Bundesländer aber auch länderübergreifend. Es existiert keine übergreifende Standardisierung der Anforderungen. Größte Herausforderung bei der Lagerung von Batterien ist grundsätzlich, eine Freigabe der Versicherung sowie eine Genehmigung von den lokalen Behörden zu bekommen. Denn es existieren keine Erfahrungswerte bzw. nachvollziehbare Leitfäden, die die Behörden und die Feuerwehr bei der Genehmigung von Brandschutzkonzepten unterstützen. Das Resultat sind sehr heterogene Entscheidungen zu den Sicherheits- und Brandschutzkonzepten für die Lagerung von Batterien.

Diese hohe Unsicherheit und Schwankungen im Rahmen von Befähigungsprozessen für Logistikimmobilien zur Lagerung von Batterien bezogen auf die Anforderungen sorgt für einen Rückstau bei Investitionen und führt zu fehlenden Kapazitäten für die Lagerung von Batterien, insbesondere für die Zwischenlagerung von gebrauchten und kritischen, defekten / beschädigten oder sonstigen End-of-Life-Batterien.

Als Bestandteil von Sicherheits- und Brandschutzkonzepten sollten in Zukunft aktive Maßnahmen stärker implementiert werden, während die Notwendigkeit reaktiver Maßnahmen abnehmen sollte. Die Herausforderung besteht darin, ein herstellerübergreifendes Konzept mit Sensorik, Überwachung und Frühwarnung zu etablieren, das bestenfalls nicht nur mit der Batterie kommuniziert, sondern auch mit einzelnen Modulen.

Die Herausforderungen für den Transport im Pre-Sales sind, dass zum einen aufgrund von Brandrisiken Batterietransporte, u.a. im Seeschiffverkehr, ungern durchgeführt werden. Reeder lehnen den Transport von Batterien ab und Transportkapazitäten sind rar. Es fehlen einheitliche und flächendeckende Notfallkonzepte zur sicheren Evakuierung im Havariefall. Die Bergung von Batterietransporten wird als deutlich herausfordernder als die Bergung von einzelnen Fahrzeugen beschrieben. Zusätzlich bedarf es eines einheitlichen Klassifizierungskatalogs zur Bewertung der Transportsicherheit von Batterien. Präventiv- und Frühwarnkonzepte für Transporteure, durch Temperaturüberwachung und Zustandsüberwachung wie bei der Lagerung, sind noch zu entwickeln. Zum anderen erschwert die Infrastruktur einen multimodalen Transport von Batterien. Auf der Schiene darf keine Zwischenpufferung von Batterien erfolgen. Der Umschlag muss direkt an dafür ertüchtigten Orten mit Löschwasserrückhaltesystemen und Versiegelung erfolgen. Der Transport mit Binnenschiffen ist aufgrund fehlender Sicherheits- und Brandschutzkonzepte an Häfen derzeit auch nur stark eingeschränkt möglich.

Weitere Herausforderungen beginnen ab dem Zeitpunkt, in dem der Pkw mit Batterie an den Kunden ausgeliefert wird. Zwar bestehen während der Nutzung der Batterie in einem

Pkw in der Regel Kommunikationsschnittstellen mit dem Automobilhersteller, um Rahmenparameter zur Überwachung der Batterie zu übermitteln. Jedoch kann oder wird nicht immer auf diese Lebenszyklusdaten zurückgegriffen, um Reparaturentscheidungen zu treffen und so den Pkw wertstabil zu halten oder Havarieszenarien zu antizipieren bzw. beherrschbar zu machen. Von außen betrachtet ist die Batterie eine Blackbox, die großes technisches und wirtschaftliches Risiko birgt, obwohl die Batterie den größten Wertanteil am Pkw ausmacht.

Die Frage, ob ein verunfallter Pkw sicher transportiert und anschließend repariert werden kann, lässt sich aktuell nur schwer beantworten. Sobald der Airbag ausgelöst wird, wird gleichzeitig die Pyrofuse ausgelöst. Die Batterie wird versiegelt und es ist im verbauten Zustand kein Zugriff mehr auf die Batterie und somit keine Analyse über den Sicherheitszustand möglich. Es fehlt ein transparentes aktorsübergreifendes Trackingsystem (Batteriepass). Neben den Chancen und Möglichkeiten eines Trackingsystems müssen auch Herausforderungen im Themenfeld Datenschutz adressiert werden, um den Wissensvorsprung und Wettbewerbsvorteil von Batterieherstellern und Automobilherstellern bestmöglich zu wahren.

Sofern die Batterie aus einem Fahrzeug für den After-Sales-Markt ausgebaut wurde, ist der Zustand für Außenstehende zunächst unbekannt. Verschiedene Niederlassungen können zwar den Zustand durch qualifiziertes Personal und entsprechende Diagnosegeräte auslesen. Trotzdem fehlt eine übergreifende Standardisierung der Anforderungen an die Definition des Zustandes von kritischen, defekten / beschädigten oder End-of-Life-Batterien in Bezug auf die Transportsicherheit. Zwar ergeben sich grundlegende Anforderungen für den Transport von Batterien aus der ADR, diese befähigen jedoch nicht zu einer schnellen objektiven und reproduzierbaren Beurteilung von unkritischen defekten Batterien als transportsicher.

Für die sich anschließende Behandlung der Batterien stellen die Variantenvielfalt sowie die vielfältigen Ausprägungen von Zuständen und Prozessmöglichkeiten eine große Herausforderung dar. Darunter leidet die Effizienz der Abläufe, da derzeit vorrangig manuelle Prozesse möglich sind. Zum aktuellen Zeitpunkt gibt es nur zwei Elemente der Wertschöpfungsstufen der Batterien im seriellen Zustand, die Fertigung und das Recycling. Aufbereitungsprozesse, die zu einer wesentlichen Verlängerung der Nutzungsdauer der Batterien und damit zu einer Verbesserung des ökologischen und wirtschaftlichen Fußabdruckes beitragen, sind derzeit nur in vereinzelt Initiativen aber noch nicht im seriellen Maßstab vorhanden. Aktuell werden diese Aktivitäten von einzelnen Automobilherstellern mit einer geringen Varianz an Batterietypen durchgeführt. Aufgrund zentraler Standorte dieser Anlagen werden signifikant hohe Transportaufwendungen zur Zuführung der Batterien aus dem Markt verursacht.

Erste Pilotanlagen für die Demontage von Batterien werden vorwiegend manuell betrieben und sind daher für eine wirtschaftliche, industrielle Skalierung ungeeignet. Für die Reparatur und die Wiederaufbereitung von Batterien bestehen derzeit nur vereinzelt Initiativen und Pilotanlagen von Automobilherstellern. Es bedarf weiterer Konzepte zur zerstörungsfreien Demontage, um die Möglichkeit der Reparatur und Wiederaufbereitung zu erhalten. Jeder Automobilhersteller nutzt aber verschiedene Architekturen. Sowohl verklebte als auch verschraubte Batterien werden in den Fahrzeugen verbaut. Zum einen sind diese Informationen nicht kontinuierlich verfügbar und zugleich bestehen hohe Anforderungen an die Dokumentation bei der Reparatur [105]. Unter anderem leitet sich diese Anforderung aus dem Produkthaftungsgesetz ab, da es sich bei einer Batterie um ein kritisches Bauteil handelt. Hier müssen alle Teile und Prozessschritte dokumentiert werden, um für einen Schadensfall entsprechende Nachweise vorbringen zu können. So muss z. B. das neue Verschrauben einer Batterie protokolliert werden, wenn neue Dichtungen oder Pyrofuses verbaut werden. Darüber hinaus müssen Prüfungen

durchgeführt und dokumentiert werden. Darunter fallen z. B. Dichtigkeitstests des Kühlsystems oder die Prüfung der Spannungsfestigkeit.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind hohe Investitionskosten sowie enormer Schulungsaufwand für Mitarbeiter notwendig. Die herstellerübergreifende Industrialisierung zur Demontage von Batterien von unabhängigen Unternehmen steht im Spannungsfeld mit Aktivitäten von Automobilherstellern, die ihre strategischen Vorteile in Bezug auf Produkt- und Prozesswissen, Händlernetzwerke und Kundenbeziehungen, Reputation sowie Fähigkeit zum integrierten Nacharbeiten, Wiederverwenden, Reparieren, Wiederaufbereiten und Recycling nutzen, um sowohl automatisierte als auch teilautomatisierte Prozessführung zu realisieren. Hierzu zählen unter anderem eine automatisierte Robotorzelle zum Öffnen der Batterie, autonome Flurfördertechnik, digital assistierte Reparaturarbeitsplätze sowie die entsprechende informationslogistische Infrastruktur zur Entscheidungsunterstützung sowie zur Rückverfolgbarkeit der Prozesse und Kontrolle.



6. Ausblick und weitere Forschungsschwerpunkte

Der Ausbau der Elektromobilität auf europäischer, aber auch nationaler Ebene, wird zu einem Anstieg an Fahrzeugen mit verbauten Lithium-Ionen-Batterien führen. Vor diesem Hintergrund wird auch die Anzahl an End-of-Life-Batterien bzw. die Anzahl an (kritisch) defekten / beschädigten Batterien zunehmen. Für den wachsenden Elektromobilitätsmarkt müssen für alle beschriebenen Lebenszyklusphasen sichere und vor allem skalierbare Lösungen erforscht, entwickelt und industrialisiert werden. Neben dem Ausbau von Produktions- und Recycling- bzw. Behandlungskapazitäten gehört dazu ebenfalls der Ausbau der logistischen Kapazitäten mit einem einheitlichen Verständnis von Standards für den Transport und die Lagerung von Batterien. Um die Sicherheit aller Beteiligten am Logistikprozess zu garantieren, ist die Qualifikation von Mitarbeitenden in Umgang mit Lithium-Ionen-Batterien unerlässlich. Eine systematische Bewertung der identifizierten Herausforderungen in Form von Risikoanalysen und das Formulieren von Gegenmaßnahmen, werden die nächsten Arbeiten innerhalb des Forschungskonsortiums sein.

Mit einem Batteriepass möchte die EU künftig den Lebenszyklus von Batterien transparenter machen. Ein Batteriepass als Trackingsystem wird eine wertvolle Veränderung sein, um Informationen in der Nutzung durch den Kunden zu sammeln und für weitere Aktionen, z. B. den Transport und die Lagerung, nutzbar zu machen. Diese Entwicklungen befinden sich gerade noch in der Prototypenphase, sodass das Konsortium von InnoLogBat parallel daran arbeitet, weitere Monitoringpotenziale, z. B. mit Hilfe von Sensorik, im Transport und der Lagerung für mehr Effizienz und Sicherheit zu erschließen.

Die technoökonomische und ökologische Bewertung von Nachnutzungs- und Verwertungsmöglichkeiten gepaart mit Konzepten für eine regionale Wertschöpfung für den After-Sales-Markt werden weitere Schwerpunkte der Forschung sein, um eine Circular Economy von Fahrzeugbatterien weiter zu etablieren und die in den Markt gebrachten Batterien, Komponenten und Rohstoffe möglichst lange im Kreis zu halten.

Literatur

- [1] **V. Fennemann, C. Hohaus und J.-P. Kopka.** „Circular Economy Logistics: Für eine Kreislaufwirtschaft 4.0“, 2018
- [2] **Bundesregierung.** „Klimaschutzgesetz: Generationenvertrag für das Klima“, 2022
- [3] **Statista.** „Anzahl der Elektroautos weltweit nach ausgewählten Ländern von 2012 bis 2021“, 2022
- [4] **DIW Berlin.** „Ampel-Monitor Energiewende: Energie-Ziele der Ampel-Koalition – und wo wir heute stehen“, 2023
- [5] **E. Rahimzei, K. Sann und M. Vogel.** „Kompendium Li-Ionen-Batterien: im BMWi Förderprogramm IKT für Elektromobilität II: Smart Car - Smart Grid - Smart Traffic.“ Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen, Frankfurt am Main, 2015
- [6] **A. Kampker, H. H. Heimes, C. Deutskens, M. Ordnung, E. Maiser und S. Michaelis.** „Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batterie zelle“, Aachen, Frankfurt am Main, 2015
- [7] **M. Atzorn, C. Gey, F. Leplow und M. Piayda.** „Wiederverwendung und Recycling von Lithium-Ionen-Akkus“. Projektarbeit, Hochschule RheinMain University of Applied Sciences, Wiesbaden Rüsselsheim, 2018
- [8] **R. Korthauer, Hg.** „Handbuch Lithium-Ionen-Batterien.“ Berlin, Heidelberg, 2013
- [9] **R. Korthauer.** „Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications.“ Berlin, Heidelberg, 2018
- [10] **M. Sterner und I. Stadler.** „Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration.“ Berlin, Heidelberg, 2017
- [11] **Stefan Leichsenring.** „VWs geplante Einheits-Batterie zelle überrascht koreanische Zulieferer.“
- [12] **Ralph Bernecker.** „Aufbau des Tesla Model 3“, 2020
- [13] **C. Jin et al. s.** „No thermal runaway propagation optimization design of battery arrangement for cell-to-chassis technology“, eTransportation, Jg. 14, S. 100199, 2022, doi: 10.1016/j.etrans.2022.100199
- [14] **E. Gerlitz, D. Botzem, H. Weinmann, J. Ruhland und J. Fleischer.** „Cell-to-Pack-Technologie für Li-Ionen-Batterien“, eTransportation, Jg. 14, S. 100199, 2022, doi: 10.1016/j.etrans.2022.100199
- [15] **R. M. Salgado, F. Danzi, J. E. Oliveira, A. El-Azab, P. P. Camanho und M. H. Braga.** „The Latest Trends in Electric Vehicles Batteries“ (eng), Molecules (Basel, Switzerland), Jg. 26, Nr. 11, 2021, doi: 10.3390/molecules26113188
- [16] **T. Hettesheimer et al.** „Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität“, Fraunhofer, Pfinztal, 2017
- [17] **A. Elgowainy.** Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles. New York, NY: Springer New York, 2021.
- [18] **G. Hülsen, A. Haas und P. Steck.** „Brandschutz für Lithium-Ionen-Batterie Energiespeichersysteme“, 2021
- [19] **S. Michaelis et al.** „Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030“, 2. Aufl., 2020
- [20] „Die neue Batteriegeneration: Ein Forschungsprojekt im großen Stil“, 2019
- [21] **A. Olowinsky.** „NextGenBat: Grundlagenforschung für mobile Energiespeicher“, RWTH Aachen, Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Forschungszentrum Jülich, 2019
- [22] **Fraunhofer ISI.** „What will solid-state batteries be like in the future?“, 2022
- [23] **N. Palaniyandy, K. P. Abhilash und B. Nalini.** „Solid State Batteries“, Cham, 2022
- [24] **GefStoffV.** „Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen: Gefahrstoffverordnung“, 2017
- [25] **GGBefG.** „Gesetz über die Beförderung gefährlicher Güter: Gefahrgutbeförderungsgesetz“, 2019

Literatur

- [26] **W.-A. Schulze.** „Assistenzsysteme für die Planung und den Betrieb von Gefahrstofflagern“, Dortmund, 2004
- [27] **United Nations.** „Manual of Tests and Criteria, Section 38.3 Lithium Metal and Lithium Ion Batteries“, New York and Geneva: United Nations, 2019
- [28] **ADR.** „Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (Accord relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route)“
- [29] **Amtsblatt des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr der Bundesrepublik Deutschland.** „Richtlinien zur Durchführung der Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt (GGVSEB) und weiterer gefahrgutrechtlicher Verordnungen (Durchführungsrichtlinien-Gefahrgut): RSEB“, 2019
- [30] **GGKontrollIV.** „Verordnung über die Kontrollen von Gefahrguttransporten auf der Straße und in den Unternehmen: BGBl“, 2018
- [31] **VdS Schadenverhütung.** „Untersuchung von Sprinklerkonzepten zum Schutz von Lagersituationen mit Lithium-Ionen-Batterien: Forschungsbericht, Köln, 2015
- [32] **ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.** „ZVEI Merkblatt Nr.2 - Sicherer Umgang mit Lithiumbatterien: Leitfaden zur Erstellung von produktspezifischen Merkblättern“, Frankfurt, 2016
- [33] **Deutsche gesetzliche Unfallversicherung.** „Hinweise zum betrieblichen Brandschutz bei der Lagerung und Verwendung von Lithium-Ionen-Akkus“, Berlin, 2020
- [34] **Volkswagen AG und DGUV.** „Informationen zum Umgang mit Lithium-Ionen-Batterien im Service“, 2012
- [35] **bvfa – Bundesverband Technischer Brandschutz e. V.** „Die Unternehmen sind in der Pflicht!: bvfa-Merkblatt gibt Sicherheitshinweise zum Löschen von brennenden Lithium-Ionen-Akkus“, Würzburg, 2020
- [36] **VdS Schadenverhütung.** „Lithium-Batterien“, 2019
- [37] **P3 Energy and Storage GmbH und Westfälische Wilhelms-Universität Münster für Wirtschaftsinformatik.** „End-Of-Life Solutions für eCar-Batterien – Entwicklung hybrider Leistungsbündel und Informationssysteme zur Entscheidungsunterstützung (EOL-IS)“, 2017
- [38] **H. H. Heimes, A. Kampker, A. vom Hemdt, K. Kreisköther, S. Michaelis und E. Rahimzei.** „Komponentenherstellung einer Lithium-Ionen-Batterie“, RWTH Aachen; VDMA, 2019
- [39] **R. Berger.** „Analyse: Elektroauto-Boom belastet Lithium-Ionen-Batterien-Lieferketten „erheblich““, 2022
- [40] **Batterierohstoffe für die Elektromobilität.** Berlin, 2021
- [41] **Trading Economics.** „Commodity“
- [42] **Europäische Kommission.** „Kommission kündigt Maßnahmen an, um Europa sicherer und nachhaltiger mit Rohstoffen zu versorgen“, Brüssel, 2020
- [43] **D. Neitzel.** „Die Liste kritischer Rohstoffe wird länger“, 2020
- [44] **Building resilient Supply Chains, Revitalizing American Manufacturing, and Fostering, broad-based Growth,** 2021
- [45] **European Commission.** „Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023: Final Report“, 2023
- [46] **U.S. Geological Survey.** „Graphite (Natural): Mineral Commodity Summaries“, 2022
- [47] **G. Fuchslocher.** „Millionen-Förderung für Anodenmaterial-Projekt bei SGL Carbon: Synthetisches Graphit für Lithium-Ionen-Batterien“, 2021
- [48] **U.S. Geological Survey.** „Cobalt: Mineral Commodity Summaries“, 2022
- [49] **C. Sackmann.** „Bedarf für E-Autos steigt rasant: Jetzt droht bei Kobalt die nächste Rohstoffkrise“, 2021

Literatur

- [50] **WirtschaftsWoche.** „Sterben im Kongo Menschen für E-Autos?: Kobalt für Lithium-Ionen-Batterien wird im Kongo zum Teil unter fragwürdigen Bedingungen gefördert. Fördern Elektroautos indirekt gar Kinderarbeit?“, 2020
- [51] **Battery Alliance.** „About the GBA“
- [52] **Fraunhofer IPK.** „Neue Generation von nachhaltigen Batterien in Europa: Deutsches Konsortium startet Projekt 'Battery Pass' zur Unterstützung von Kreislaufbatteriedaten“, 2022
- [53] **A. Grünewald, T. Jornitz, O. Vieweg und T. Brachetti.** „Das Lieferkettengesetz: Neue Technologien für mehr Transparenz in der Supply Chain“, Fraunhofer IML, Future Challenges in Logistics and Supply Chain Management, 11. Apr. 2022
- [54] **Statista.** „Länder mit den größten Lithiumreserven im Jahr 2022“, 2023
- [55] **N. Blechner.** „Wettlauf um Batterien von morgen: Folge der Nickel-Knappheit“, 2022
- [56] **U.S. Geological Survey.** „Nickel: Mineral Commodity Summaries“, 2022
- [57] **A. Barich.** „Ukraine war intensifies shipping challenges amid looming graphite supply crunch“, 2022
- [58] **S. Al Barazi.** „Rohstoffrisikobewertung – Kobalt. – DERA Rohstoffinformationen 36“, Berlin, 2018
- [59] **A. Yilmaz und M. Kehrer.** „Wie kommt die Batterie ins Elektroauto?: Marktstudie im Hinblick auf die Lithium- und Kobalt Beschaffung und Fertigung der Grundbestandteile der Lithium-Ionen-Batterie“, 2020
- [60] **P. Schütte.** „Kobalt: Informationen zur Nachhaltigkeit“, Deutsche Rohstoffagentur, 2021
- [61] **ClearPath Foundation.** „Supply Chain for Lithium and Critical Minerals is ... critical“, 2020
- [62] **Deutschlandfunk.** „Lithium-Abbau in Südamerika: Kehrseite der Energiewende“, 2019
- [63] **Deutschlandfunk Kultur.** „Down Unders neuer Rohstoffboom: LNG- und Lithium-Gigant Australien“, 2022
- [64] **Port of Rotterdam.** „Auswirkungen des Russischen Einmarsches in der Ukraine auf den Rotterdamer Hafen“, 2022
- [65] **M. Peer.** „Nickel-Großmacht Indonesien wirbt um deutsche Elektroauto-Hersteller“, Handelsblatt, 2022
- [66] **Roland Berger und fka GmbH.** „E-Mobility Index 2019: Study“, 2019
- [67] **G. Bockey et al.** „Battery Atlas 2022: Shaping the European Lithium-Ion Battery Industry“, Aachen, 2022
- [68] **Transport & Environment.** „How not to lose it all: Two-thirds of Europe's battery gigafactories at risk without further action“, 2023
- [69] **M. ten Hompel, Hg.** „Materialflusssysteme, 4. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2018
- [70] **LG Energy Solution.** „2022 LG Energy Solution_Poland Corporation PR Film“, 2022
- [71] **S. Schaal.** „CATL baut Batteriefabrik in Ungarn – mit Mercedes als Großkunden“, elective.net, 2022
- [72] **S. Alvarez.** „Tesla battery partner CATL extends supply deal to 2025“, Teslarati, 2021
- [73] **A. Kampker, H. Heimes, S. Michaelius, S. Wessel, M. Kerer und E. Rahimzei.** „Montageprozess eines Batteriemoduls und -packs“, PEM RWTH Aachen University; VDMA Batterieproduktion, 2018
- [74] Audi stellt Anlieferung der Batteriemodule für Brüssel vom Lkw auf die Bahn um, 2022
- [75] VW stellt Batterie-Logistik auf Zugtransport um, 2020

Literatur

- [76] **Erneuerbar-Mobil.** „Demonstrationsanlage für ein kostenneutrales, ressourceneffizientes Processing ausgedienter Li-Ionen Batterien: EcoBatRec“. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben, 2016
- [77] **CEMO.** „Vorschriften und Regeln für die Lagerung von Lithium-Batterien“, 2022
- [78] **O. Schulze.** „Elektromobilität: Ein Ratgeber für Entscheider, Errichter, Betreiber und Nutzer – Facetten zu Ladeinfrastruktur, Subventionsregeln, Kosten und Handling“, Wiesbaden, 2022
- [79] **Jungheinrich.** „Lithium-Ionen-Akkus lagern: Darauf sollten Sie achten“, 2022
- [80] **M. Mendes, M. Starre und J. Kraus.** „Gefahr gut Batterien“, 2022
- [81] **VdS Schadenverhütung.** „VdS- Merkblatt 3856: Sprinklerschutz von Lithium-Batterien“, 2019
- [82] **Stadt Heilbronn -Feuerwehr-.** „Merkblatt Lithium-Batterien“, 2020
- [83] **Technische Regeln für Gefahrstoffe.** „TRGS 510 - Lagerung von Gefahrstoffen in ortsbeweglichen Behältern“, 2020
- [84] **J. Kunkelmann.** „Studie zur Brandbekämpfung von Lithium-Ionen-Batterien (Akkus) und Lithium-Metall-Batterien“, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2017
- [85] **F. Lienesch, T. Horn und U. Westerhoff.** „Lithium-Ionen-Batterien zur Verwendung im Explosionsschutz“
- [86] **J. P. Schmidt, S. Dandl, A.-C. Gentschev, K. Elian und M. Rose.** „Integrierte Zell-Sensorik in Lithium-Ionen-Akkus für Elektro- und Hybridfahrzeuge“, 2016
- [87] **H. Koch.** „Neue Elektrolyte für Batteriezellen“, 2017
- [88] **C. Adamczyk.** „Logistikzentrum Zeche Gustav setzt Benchmark als innovativstes und sicherstes Li-Ionen-/Gefahr gutlager“, BMZ GmbH, Karlstein am Main, 2020
- [89] **M. Kathiresh, G. R. Kanagachidambaresan und S. S. Williamson.** „E-Mobility“, Cham, 2022
- [90] **S. Yang, X. Liu, S. Li und C. Zhang.** „Advanced Battery Management System for Electric Vehicles“, Singapore, 2023
- [91] **J. Groenewald, T. Grandjean und J. Marco.** „Accelerated energy capacity measurement of lithium-ion cells to support future circular economy strategies for electric vehicles“, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Jg. 69, S. 98–111, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.017
- [92] **P. Sun, R. Bisschop, H. Niu und X. Huang.** „A Review of Battery Fires in Electric Vehicles“, Fire Technol, Jg. 56, Nr. 4, S. 1361–1410, 2020, doi: 10.1007/s10694-019-00944-3
- [93] **C. Neef, T. Schmaltz und A. Thielmann.** „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau“, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, 2021
- [94] **REMONDIS SE & Co. KG.** „RETRON – das Behältersystem voller Vorteile“, 2022
- [95] **European Commission.** „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: 2019/1020“, Brüssel, 2023
- [96] **J. Potting, M. Hekkert, E. Worrell und A. Hanemaaij.** „Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain“, Policy Report, 2017
- [97] **S. Flamme.** „DemoSens – Digitalisation of automated disassembly and sensor-based mechanical treatment of lithium-ion batteries for high-quality recycling“, Münster, 2021
- [98] **S. Baazouzi und L. Halt.** „Industrielle Demontage von Batteriemodulen und E-Motoren DeMoBat“, Fraunhofer IPA, 2022

Literatur

- [99] **TU Braunschweig.** „ReDesign: Entwicklung von Gestaltungsrichtlinien für die recyclinggerechte Konstruktion von Batteriesystemen im Kontext der Kreislaufwirtschaft“, 2022
- [100] **M. Zorn, S. Flamme und S. Hams.** „Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen in der Kreislaufwirtschaft“, Müll und Abfall, Nr. 5, 2022, doi: 10.37307/j.1863-9763.2022.05.09
- [101] **L. An, Hg.** „Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries: Processing Methods and Environmental Impacts“, Cham, Springer eBook Collection, 2019
- [102] **E. Emilsson und L. Dahlöf.** „Lithium-Ion Vehicle Battery Production Status 2019 on Energy Use, CO₂ Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling“, 2019
- [103] **D. Steward, A. Mayyas und M. Mann.** „Economics and Challenges of Li-Ion Battery Recycling from End-of-Life Vehicles“, Procedia Manufacturing, Jg. 33, S. 272–279, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.04.033
- [104] **Element Energy.** „Batteries on wheels: the role of battery electric cars in the EU power system and beyond“, 2019
- [105] Gesetz über die Haftung für fehlerhafte Produkte: ProdHaftG, 2017

Kontakt

Fraunhofer Institut für
Materialfluss und Logistik IML
Dr.-Ing. Arkadius Schier
Joseph-von-Fraunhofer-Str.2-4
44227 Dortmund
info@innovationslabor-batterielogistik.de