



# Kompendium: Li-Ionen-Batterien

Grundlagen, Merkmale, Gesetze und Normen

## **Kompodium: Li-Ionen-Batterien**

Grundlagen, Merkmale, Gesetze und Normen

### **Autoren:**

**Lydia Dorrman**

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.

**Dr. Kerstin Sann-Ferro**

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V./

Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE

**Patrick Heining**

VDE Renewables GmbH

**Dr. Jochen Mähliß**

VDE Renewables GmbH

### **Mit Unterstützung von:**

**Nora Dörr**

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.

**Annelie Oleniczak**

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.

**Thomas Timke**

Solarwatt

Aufgrund der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Lithium-Ionen-Batterien-Technologie sowie der diesbezüglichen Regelungen und Vorschriften kann für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Angaben keine Gewähr übernommen werden. Bitte informieren Sie sich auf der VDE Homepage über den Stand der Technik.

### **Herausgeber:**

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.

Stresemannallee 15

60596 Frankfurt am Main

[www.vde.com](http://www.vde.com)

### **Kontakt:**

Wir sind an der kontinuierlichen Verbesserung unserer Arbeiten interessiert.

Bitte wenden Sie sich im Falle von Ergänzungsvorschlägen, Kritik oder Lob gerne an uns:

[Li-Ionen-Kompodium@vde.com](mailto:Li-Ionen-Kompodium@vde.com)

### **Design:**

Kerstin Gewalt | Medien&Räume

### **Titelbild:**

[malp / stock.adobe.com](https://www.gettyimages.com/detail/stock-photo/malp/stock.adobe.com)

Oktober 2021

# Inhalt

<b>1.</b>	<b>Vorwort</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Grundlagen Li-Ionen-Batterien</b>	<b>2</b>
2.1	Primär- und Sekundärbatterien	2
2.2	Aufbau und Funktion	2
2.2.1	Allgemeines	2
2.2.2	Zelle	2
2.2.3	Batterie	5
2.2.4	System	6
<b>3.</b>	<b>Merkmale von Li-Ionen-Batterien</b>	<b>8</b>
3.1	Technische Eigenschaften	8
3.1.1	Energiedichte	8
3.1.2	Leistungsdichte	9
3.1.3	Zellspannung	10
3.2	Systemische Aspekte	11
3.2.1	Lebensdauer	11
3.2.2	Sicherheit	13
3.2.3	Systembelastung	15
3.2.4	Bauform	16
<b>4.</b>	<b>Gesetzliche Regelungen und Normen zu Li-Ionen-Batterien</b>	<b>18</b>
4.1	Gesetzliche Regelungen und bindende Vereinbarungen	18
4.2	Wichtige Normen nach Anwendungsgebiet	19
<b>5.</b>	<b>Ausblick</b>	<b>22</b>
5.1	Zukünftige Batterie-Technologien	22
5.2	CO <sub>2</sub> -Bilanz und Recycling	23
5.3	Regulatorischer Rahmen für Recycling und Nachhaltigkeit von Batterien	24
	<b>Verzeichnisse</b>	<b>25</b>
	Abkürzungen	25
	Abbildungen	26
	Tabellen	26

# 1. Vorwort

Das Prinzip der Lithium-Ionen-Batterie stammt aus den 1970er-Jahren. Woran sich kaum jemand erinnert: Die erste kommerzielle Anwendung war in einer Hi8-Videokamera, die Sony im Jahr 1991 auf den Markt brachte. Seit damals kommen Lithium-Ionen-Batterien in immer mehr Produkten zum Einsatz – sei es bei der Energieversorgung winziger Sensoren, in Mobiltelefonen, Pad- und Laptopcomputern, Power Tools oder Elektrofahrzeugen bis hin zu großen stationären Energiespeichern.

Lithium-Ionen-Batterien sind robust, haben eine hohe Zyklenfestigkeit und eine große Energiedichte. Sie werden ständig technisch verbessert, die Zellproduktion in Gigafactories immer effizienter. So sinken die Zellkosten bei gleichzeitig steigender Nachfrage und Produktionskapazität. Im Jahr 2018 gab es weltweit 36 Gigafactories mit einer Produktionskapazität von rund 226 GWh. Bis 2028 soll sich diese Zahl auf 66 Gigafactories mit einer Produktionskapazität von über 2000 GWh erhöhen. Auch Europa partizipiert: Im genannten Zeitraum soll die europäische Produktionskapazität von 5,3 % auf einen Anteil von 16,8 % an der weltweiten Produktionskapazität steigen. Aufgrund der „Economy of Scale“ und technischen Verbesserungen sind seit 2010 die Preise für Lithium-Ionen-Akkus um durchschnittlich 20 % jährlich gesunken: von 600 Euro/kWh im Jahr 2010 auf 111 Euro/kWh in 2020. Für das Jahr 2025 wird ein Preis von rund 83 Euro/kWh erwartet. Die Extrapolation auf das Jahr 2028 ergibt einen Produktionswert von über 85 Milliarden Euro.

Lithium-Ionen-Batterien sind damit die am schnellsten wachsende Batterietechnologie der Welt und vor allem die, in die das meiste Geld investiert wird. Das VDE Kompendium Lithium-Ionen-Batterien bietet Ihnen deshalb den idealen Einstieg in diese Technologie: Es gibt einen Überblick über Lithium-Ionen-Batterien – von den verwendeten Materialien der gebräuchlichsten Zelltypen bis hin zum Aufbau von Modulen und Systemen. Darüber hinaus werden die wichtigsten technischen und systemischen Eigenschaften beleuchtet, die als Entscheidungsgrundlage für die Beschaffung von Lithium-Ionen-Batterien herangezogen werden können. Abschließend stellt das Kompendium die aktuellen gesetzlichen Regelungen und wichtige Normen nach Anwendungsgebieten kurz vor.

Warum der VDE? Die Technologie-Organisation VDE hat umfangreiches Praxiswissen zu Lithium-Ionen-Batterien. In ihren Gremien und Fachgruppen arbeiten zahlreiche Experten aus Forschung und Industrie an Normen und Standards für Schutz, Sicherheit und Nachhaltigkeit von Lithium-Ionen-Batterien und deren Anwendung in Geräten und Systemen. Das so erworbene Wissen wird in neue Prüfverfahren überführt, die in den VDE Testlabs weltweit angewendet werden. Zudem berät der VDE Unternehmen bei der Auswahl geeigneter Energiespeicher, sowohl bei technischen als auch bei wirtschaftlichen Fragestellungen.

Ansgar Hinz  
VDE Vorstandsvorsitzender und Chief Executive Officer (CEO)

# 2. Grundlagen Li-Ionen-Batterien

Lithium-(Li)-Ionen-Batterien bzw. Lithium-Ionen-Akkumulatoren umgeben uns in zahlreichen Anwendungen von tragbaren Geräten über E-Bikes bzw. Elektromobilität im Allgemeinen bis hin zu stationären Speichern. Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über den grundlegenden Aufbau und die Funktion von Li-Ionen-Batterien.

## 2.1 Primär- und Sekundärbatterien

Batterien sind elektrochemische Energiespeicher und werden in Primär- und Sekundärbatterien unterschieden. Primärbatterien sind elektrochemische Stromquellen, bei denen chemische Energie irreversibel in elektrische Energie umgewandelt wird. Eine Primärbatterie ist somit nicht wiederaufladbar. Es gibt auch auf Lithium basierende Primärbatterien in der für NiMH und NiCd üblichen Größe vom Typ AA. Diese dürfen ebenfalls nicht wiederaufgeladen werden.

Sekundärbatterien, auch Akkumulatoren genannt, sind dagegen wiederaufladbare elektrochemische Energiespeicher, bei denen die ablaufende chemische Reaktion umkehrbar ist, so dass eine Mehrfachnutzung möglich ist. Elektrische Energie wird beim Laden in chemische Energie, beim Entladen wiederum von chemischer in elektrische Energie umgewandelt. Bei einem jeweils zusammenhängenden vollständigen Lade- und Entladevorgang wird von einem Zyklus gesprochen. Mit der Anzahl der Zyklen ist die Lebensdauer einer Batterie verknüpft. Je nach Art, Anwendung und Handhabung variiert die Lebensdauer wiederaufladbarer Batterien.

Die Li-Ionen-Batterien sind meist Sekundärbatterien, oder auch Akkumulatoren (Akkus) genannt. Sie sind aufgrund ihrer zahlreichen Vorteile gegenüber anderen Akkumulatoren eine wichtige Speichertechnologie sowohl im mobilen als auch im stationären Einsatz. Die folgenden Kapitel befassen sich deshalb ausschließlich mit diesem Batterietyp.

## 2.2 Aufbau und Funktion

### 2.2.1 Allgemeines

Batterie ist der Oberbegriff für zusammengeschaltete Zellen, der zugehörigen Peripherie wie beispielsweise Kabelsatz und Elektronik sowie dem umgebenden Batteriegehäuse. Zellen sind galvanische Einheiten, die aus zwei Elektroden, Elektrolyten, Separator und Zellgehäuse bestehen. Im Folgenden wird auf die Details einer Lithium-Ionen-Batterie eingegangen.

### 2.2.2 Zelle

Jede Li-Ionen-Zelle (→ Abbildung 1) besteht aus zwei unterschiedlichen Elektroden, einer negativen Elektrode (auch Anode genannt) und einer positiven Elektrode (auch Kathode genannt). Die Elektroden setzen sich jeweils aus einem Stromableiter (auch Kollektor genannt) und einem darauf aufgebrachtten Aktivmaterial zusammen. Zwischen den Elektroden befinden sich zum einen der ionenleitende Elektrolyt, der den notwendigen Ladungsaustausch ermöglicht, und der Separator, der die elektrische Trennung der Elektroden gewährleistet.



Eigentlich sind die Begriffe Anode und Kathode über den Oxidations- bzw. Reduktionsprozess definiert. An welcher Elektrode oxidiert bzw. reduziert wird, hängt jedoch davon ab, ob die Batterie/Zelle geladen oder entladen wird. Es hat sich bei der Betrachtung von Batterien jedoch etabliert, immer den Entladevorgang als Definition für die Begrifflichkeiten Anode und Kathode zu verwenden. Somit ist die Anode der negative Pol der Batterie und die Kathode der positive.

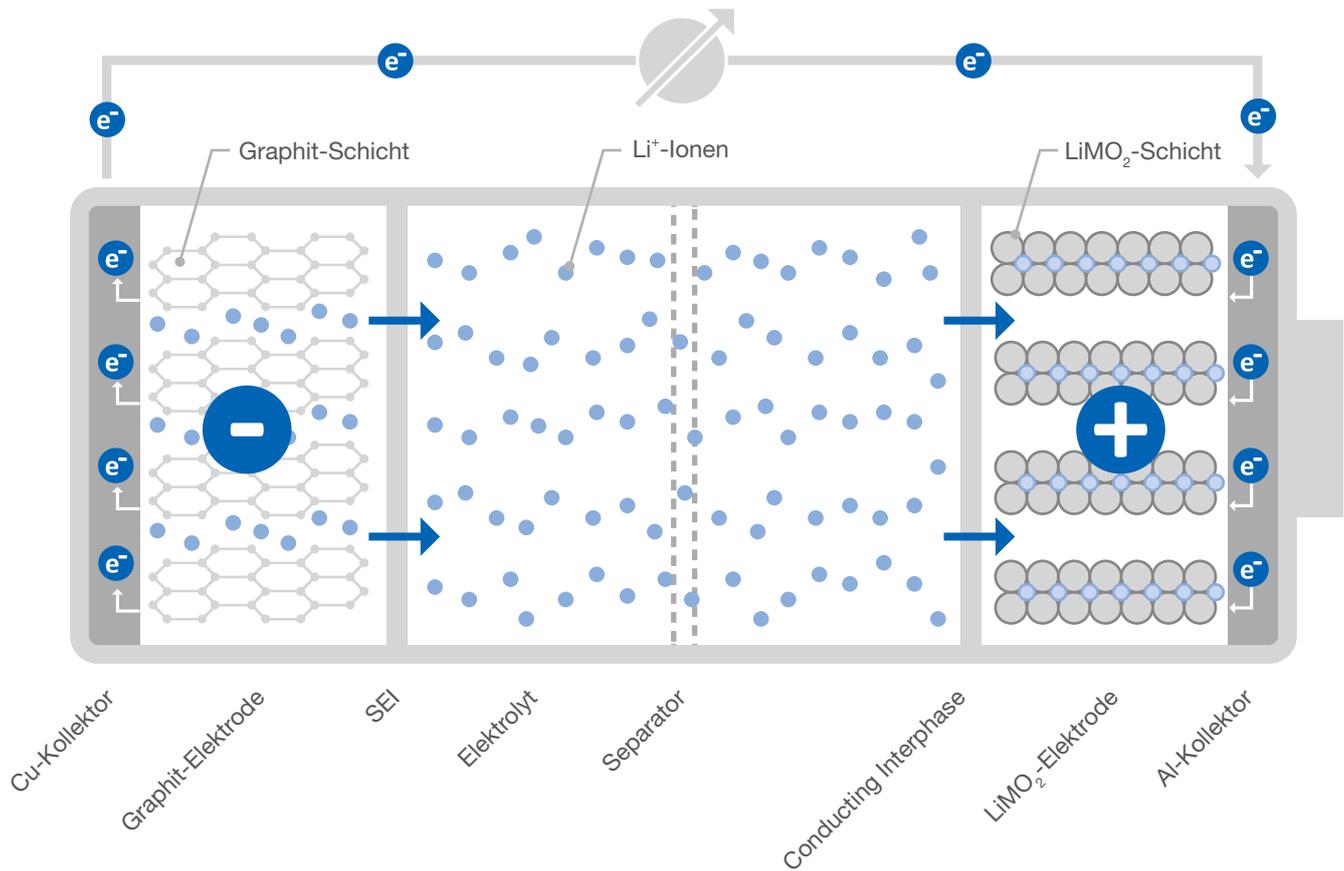


Abbildung 1: Beispielhafter Aufbau und Funktion einer Lithium-Ionen-Zelle beim Entladevorgang

Die negative Elektrode der Li-Ionen-Zelle besteht aus einer Kupferfolie und einer Schicht aus Kohlenstoff oder Silizium-Verbindungen. Als Kohlenstoffverbindung wird in der Regel natürlicher oder künstlicher Graphit verwendet, da er ein niedriges Elektrodenpotential besitzt und eine geringe Volumenausdehnung beim Lade- und Entladevorgang aufweist. Während des Ladevorgangs werden Lithium-Ionen reduziert und in die Graphitschichten eingelagert. Für besonders hohe Leistungs- und Sicherheitsanforderungen bietet Lithium-Titanat eine interessante Alternative. Weiterhin werden Siliziumschichten wegen einer höheren erreichbaren Energiedichte erforscht.



Jeder Elektrode kann ein Potential zugeordnet werden (elektrochemische Spannungsreihe). Zur Vergleichbarkeit des Elektrodenpotentials verschiedener Elektrodenmaterialien für Li-Ionen-Batterien wird es in der Regel gegenüber einer Elektrode aus reinem Lithium angegeben. Letzteres wird dabei als Ausgangswert auf den Wert null festgelegt. Nähere Angaben hierzu finden sich in → Kapitel 3.1.3

Die positive Elektrode besteht aus Mischoxiden, die auf einem Aluminiumkollektor aufgebracht sind. Übergangsmetalloxide mit Cobalt, Mangan und Nickel oder Aluminiumoxid sind dabei die gängigsten Verbindungen. Die aufgetragene Metalloxidschicht dient bei der Entladung der Zelle zur Einlagerung der Lithium-Ionen. Immer häufiger werden höhere Gehalte an Mangan, Nickel und Aluminium statt Cobalt verwendet. Ein weiteres Material, das Anwendung findet, ist Lithium-Eisen-Phosphat (LFP). Näheres zu diesem und weiteren Aktivmaterialien für die positive Elektrode findet sich in → Kapitel 3.1.3.

Speziell bei metallischem Lithium als Anodenmaterial besteht beim Wiederaufladen eine große Gefahr zur Bildung von Lithium-Dendriten<sup>1</sup>, die den Separator durchstoßen können. Wachsen die Dendriten bis zur Kathode, kann es zu einem internen Kurzschluss der Zelle kommen, was ein sicherheitskritisches Ereignis darstellt. Durch dieses kinetische Phänomen, bei dem sich Lithium nicht wieder planar abscheidet, sondern nadelförmig in Regionen mit weniger ausgeprägter Solid Electrolyte Interphase-Deckschicht (SEI) auf der Anode anhäuft, kommt es darüber hinaus zu einem Verlust der elektrochemisch nutzbaren Menge an Lithium und somit zu einem Kapazitätsverlust.

Bei Lithium-Ionen-Batterien kann Lithiumplating auftreten. Dabei lagern sich Lithium-Ionen beim Ladevorgang als metallisches Lithium auf der Oberfläche der Anode ab und werden nicht in die Elektrodenstruktur eingelagert. Dies tritt verstärkt beim schnellen Laden (hohe Ladeströme) und Laden bei tiefen Temperaturen auf. Kapazitätsverluste sowie sicherheitskritische Ereignisse können die Folge davon sein. Hier besteht auch einer der größten Unterschiede zwischen Lithium-Metall-Batterien und anderen Lithium-Ionen-Batterien: Bei Li-Metall-Batterien ist Lithiumplating ein Vorgang, der zur Funktion der Zelle beiträgt, während es bei anderen Lithium-Batterien ein unerwünschter Vorgang ist.

Statt metallischem Lithium werden, wie bereits erwähnt, in der Regel Schichtmaterialien verwendet, die Lithium reversibel aufnehmen können. Während des Entladens (→ Abbildung 1) wandern Lithium-Ionen von der Anode durch den Elektrolyten und Separator hin zur Kathode, wo sie reversibel eingelagert werden. Durch den ablaufenden Oxidationsprozess an der Anode werden Elektronen freigesetzt. Diese fließen von der negativ geladenen Anode über eine äußere elektrische Verbindung zur positiven Kathode, womit an dieser ein Reduktionsprozess stattfindet und Elektronen aufgenommen werden. Durch den äußeren Stromfluss können elektrische Verbraucher betrieben werden. Beim Laden vollzieht sich genau der umgekehrte Prozess.

Der Elektrolyt fungiert beim Lade- und Entladevorgang als Vermittler zwischen den Reaktionen an den Elektroden und garantiert den Li-Ionen-Transport. Dabei muss er eine hohe Ionenleitfähigkeit aufweisen und im Spannungsbereich von 0 bis 4,5 V sowie im Temperaturbereich, in dem die Batterie betrieben werden soll, stabil sein.<sup>2</sup> Im Bereich von Lithium-Ionen-Batterien sind drei Formen von Elektrolyten anzutreffen:

- **Flüssig:** Flüssigelektrolyte sind die am häufigsten eingesetzten Elektrolyte in kommerziellen Lithium-Ionen-Zellen. Der Elektrolyt ist größtenteils organischen Ursprungs und besteht aus einem Li-Ionen enthaltenden Leitsalz, das in ein nichtwässriges Lösungsmittel gegeben wird. Der Wassergehalt muss möglichst gering sein (< 30 ppm [„Parts per million“]), um schädigende Nebenreaktionen gering zu halten.
- **Polymer:** Polymerelektrolyte weisen überwiegend eine geringe Leitfähigkeit im Vergleich zu Flüssigelektrolyten auf. Eingesetzt werden sie z. B. bei Batterien, die Lithium-Metall-Anoden enthalten. Je nach Art des Polymerelektrolyten kann unter bestimmten Bedingungen auf einen Separator verzichtet werden. Am häufigsten kommen Gel-Polymer-elektrolyte zum Einsatz, denen spezielle Additive zur Absenkung der Betriebstemperatur zugesetzt werden.
- **Fest:** Als Festelektrolyte werden ionenleitende, meist keramische Verbindungen genutzt. Die theoretisch möglichen Energiedichten von Batterien mit Festelektrolyten sind höher als die flüssiger Elektrolyte. Weiterhin kann eine erhöhte Sicherheit auf Materialebene aufgrund nicht entflammbarer Komponenten erreicht werden. Bei normalen Temperaturen ist die Ionenleitfähigkeit nicht hoch genug und aufgrund des hohen Grenzflächenwiderstandes zwischen Elektrolyt und Elektrode ist die Leistungsdichte<sup>3</sup> für eine kommerzielle Anwendung zu gering. Darüber hinaus muss für Lithium-Ionen-Batterien mit Festelektrolyten ein neuer Herstellungsprozess etabliert werden, denn dieser ist derzeit auf das Einfüllen flüssiger Elektrolyte ausgelegt.

In geeigneten flüssigen und polymerisiertem Elektrolyten bildet sich eine Deckschicht auf kohlenstoffbasierten Anoden aus, die sogenannte Solid Electrolyte Interphase (SEI). Diese schützt die Anode vor der korrodierenden Elektrolytlösung und ist gleichzeitig für Lithium-Ionen durchlässig. Diese Schicht ist essenziell für den Einsatz von Lithium bzw. Lithium-Ionen-Einlagerungsverbindungen in Primär- und Sekundärzellen. An der positiven Elektrode wird in diesem Zusammenhang auch von einer Conductive Interphase gesprochen. Durch Lade- und Entladevorgänge wächst die Schicht und dadurch auch der Widerstand in der Zelle, was zu einer Verringerung der Zellspannung unter Last führt. Mit diesem Vorgang geht ein Verlust von Elektrolyt einher.

1 Spitze Baum- bzw. drahtartige Gebilde, die an den Elektroden entstehen können

2 Hartnig, C.; Schmidt, M. (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien – Kapitel 6: Elektrolyte und Leitsalze, Springer Vieweg, Heidelberg, S. 61–62

3 Spezifische Leistungsdichte (W/kg) bzw. volumetrische Leistungsdichte (W/l)



Die zur Verfügung stehende elektrische Ladung von Batterien wird in Amperestunden (Ah) angegeben: Eine Amperestunde ist die Ladungsmenge, die innerhalb einer Stunde durch einen Leiter fließt, wenn der elektrische Strom konstant 1 A beträgt.

Der Separator trennt die beiden Elektroden voneinander, um einen aus direktem Kontakt resultierenden Kurzschluss zu verhindern. Dementsprechend hohe Anforderungen stellen sich an diese Komponente. In den meisten Zellen verhindert der Separator bei einer Fehlfunktion, dass sich Ionen weiter von der Anode zur Kathode bewegen. Einige Materialien weisen eine zusätzliche Sicherheitsfunktion auf, indem ab einer bestimmten Temperatur auf Grund von Porenverschluss (Schmelzung) die Durchlässigkeit für den Ionenfluss verloren geht. Dadurch wird ein Überhitzen mit anschließendem Brand der Zelle verhindert. Als Materialien werden zum Beispiel Polymer-Membrane eingesetzt. Diese haben jedoch den Nachteil, dass sie eine niedrigere Schmelztemperatur (z. B. 165 °C) im Vergleich zu keramischen Separatoren aufweisen. Zudem werden häufig Vliesstoffe und Glasfaser-Separatoren auf Grund der einfachen Verarbeitung verwendet<sup>4</sup>.

Die einzelnen Komponenten werden zum Bau einer Zelle in der Regel gestapelt oder gewickelt. Auf die Bauformen wird in → Kapitel 3.2.4 eingegangen.

### 2.2.3 Batterie

Als Batterie wird im Allgemeinen eine Zelle oder der Zusammenschluss von Zellen bezeichnet, die mit den für die Nutzung notwendigen Einrichtungen wie Anschlüssen, Kennzeichnungen und Schutzeinrichtungen ausgestattet sind. Die Spannungslage einer einzelnen Zelle hängt von der Materialkombination der Aktivmaterialien ab. Bei heutigen Systemen werden Spannungen von 2,2 V bis maximal 4,2 V pro Zelle erreicht. Da die Spannung (V) einer einzelnen Zelle bei den meisten Akkutypen und Anwendungen nicht für den praktischen Einsatz reicht, werden mehrere Zellen in Serie zu einer Batterie zusammengeschaltet. Dabei unterscheidet man bei Lithium-Ionen-Batterien den Blockaufbau (Zellblock) und den modularen Aufbau (Modul).

Bei einem Zellblock handelt es sich um eine Gruppe von Zellen, die in Parallelschaltung miteinander verbunden sind und die bereits mit Schutzeinrichtungen und einer Überwachungsschaltung verbunden sein können. Bei einem Modul ist eine Gruppe von Zellen in Reihen- bzw. Serienschaltung und/oder Parallelschaltung miteinander verbunden. Beim modularen Aufbau werden dadurch mehrere Zellblockuntereinheiten aufgebaut, was den Vorteil hat, dass eine leichtere Austauschbarkeit kleinerer Zellblöcke möglich ist. Vor allem bei größeren Batterien wird daher meist der modulare Aufbau gewählt.

Die Gesamtspannung bei einer Reihenschaltung ergibt sich aus der Anzahl der Zellen multipliziert mit der Zellen-spannung: Ein Pack aus sechs Li-Ionen-Zellen mit nominell 3,6 V besitzt entsprechend eine Nennspannung von 21,6 V.

Eine Parallelschaltung dagegen bewirkt eine Erhöhung der Ladungsmenge (Ah) der Batterie bei gleichbleibender Spannung und gleichzeitiger Erhöhung des maximalen Lade- und Entladestroms. Entsprechend der geforderten Kapazität in einer Anwendung wird eine bestimmte Anzahl an Zellen oder Modulen parallel geschaltet. Durch die Kombination aus Parallel- und Reihenschaltung ergibt sich der Energieinhalt der Batterie in Wh ( $Ah \cdot V = Wh$ ).

Zellblock und Modul können nicht direkt in einem Gerät verwendet werden, da sie noch nicht mit dem endgültigen Gehäuse, der Anschlussanordnung und der elektronischen Regeleinrichtung ausgestattet sind. Dies alles kommt bei der Assemblierung von Modulen oder Zellen zu einem Batteriesystem hinzu, das dann für eine Anwendung geprüft und eingesetzt werden kann.

<sup>4</sup> Für nähere Informationen siehe Korthauer, R. (2018): Lithium-Ion-Batteries: Basics and Applications

## 2.2.4 System

Das Batteriesystem (→ Abbildung 2) besteht neben verschalteten Zellen, Modulen bzw. Batteriepacks aus einer Anzahl von mechanischen und elektronischen Komponenten, die eng aufeinander abgestimmt sein müssen. Zu den wichtigsten mechanischen Komponenten gehören vor allem das Gehäuse mit Isolierung und gegebenenfalls eine Kühlung sowie Befestigungssystemen.

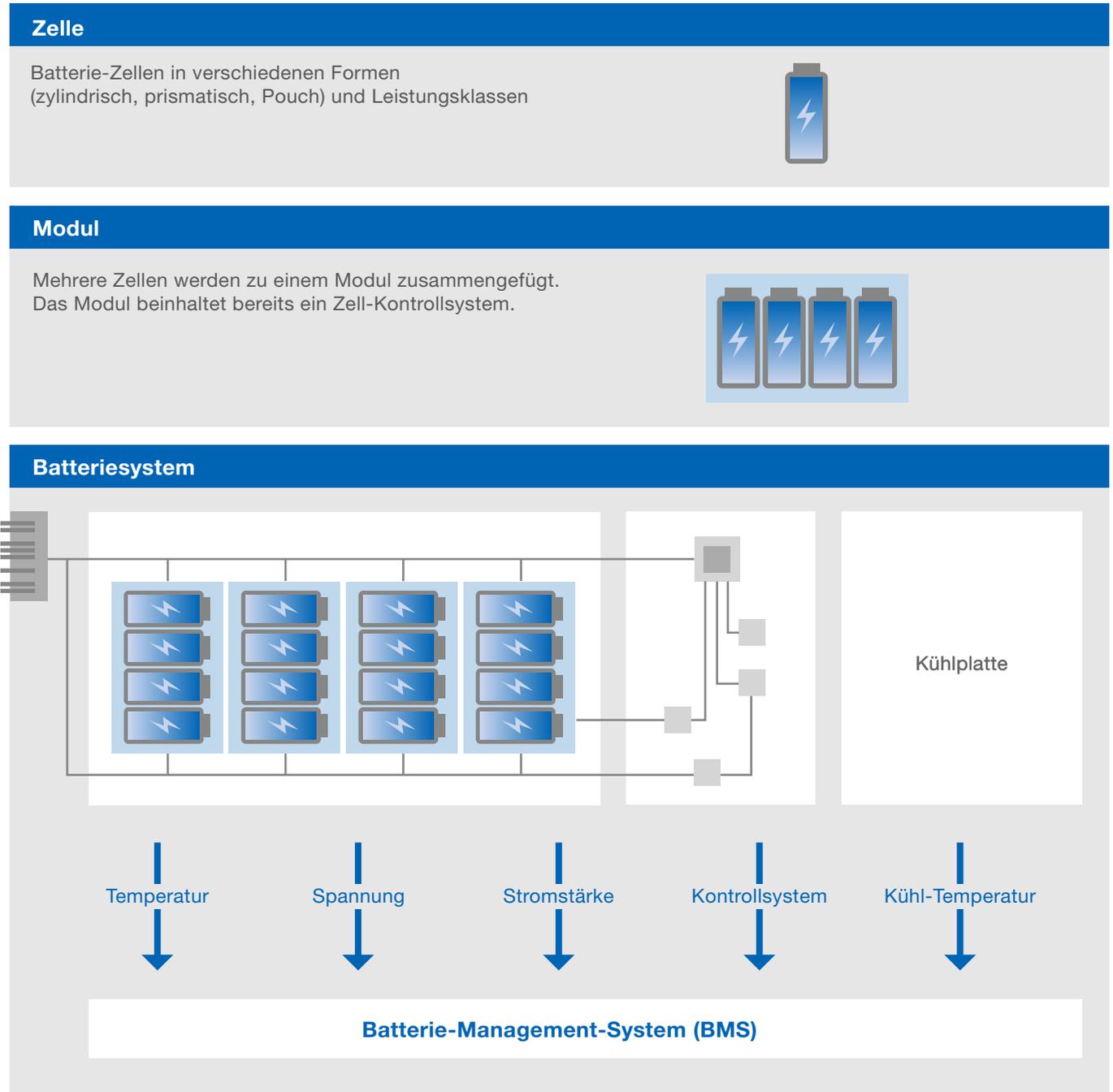


Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines Batteriesystems

Die wichtigste elektronische Komponente ist das Batteriemanagementsystem (BMS), das beim Be- und Entladen neben Überwachung des berechneten State of Charge (SOC)<sup>5</sup> auf Zell- und Systemebene zusätzlich die Funktion als Schnittstelle zwischen Gerät und Batterie übernimmt. Unter Verwendung von Sensorik können Strom, Spannungen, Temperaturen der Einzelzellen und des Gesamtsystems gemessen und teilweise auch geregelt werden. Damit trägt das BMS als ein zentraler Bestandteil zur Sicherheit bei. Darüber hinaus ermöglicht es die Fehlerprotokollierung und das Zu- und Abschalten des Systems.<sup>6</sup>

Das BMS optimiert zudem durch die sogenannte Balancing-Funktion die nutzbare Kapazität bzw. Energie und die Leistung des Systems.<sup>7</sup> Hintergrund ist hierbei, dass fertigungs- und nutzungsbedingt die Kapazitäten und die Innenwiderstände einzelner Zellen minimal schwanken können. Bei mehreren verschalteten Zellen führen diese Unterschiede dazu, dass Zellen unterschiedlich be- und entladen werden. Dies kann ohne geeignete Steuerung zu Tiefenentladungen oder Überladungen von in Reihe geschalteten Zellen führen und entsprechend großen Einfluss auf die Lebensdauer und die Sicherheit des Systems haben. Durch das Zellen-Balancing werden diese Prozesse verhindert, die nutzbare Kapazität maximiert und gleichzeitig die Lebensdauer erhöht.

Das Gehäuse mit dazugehörigem Kühlsystem schirmt die zum Teil empfindlichen aktiven und passiven Komponenten des Batteriesystems vor schädlichen Umwelteinflüssen (Wasser, Staub etc.) ab. Daher ist es für den sicheren, zuverlässigen und langfristigen Betrieb entscheidend. Beispielsweise kann das Gehäuse bei Automotive-Batterien, die meist im Bodenbereich des Fahrzeugs untergebracht sind, unter Umständen extremen Einflüssen wie Steinschlag, Spritzwasser etc. ausgesetzt sein. Eine hohe mechanische Stabilität und Korrosionsbeständigkeit sind daher wichtig.

5 SOC: State of Charge zu dt. Ladezustand

6 Köhler U. (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien – Kapitel 8: Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen, Springer Vieweg, Heidelberg

7 Weitere Informationen zum Thema Zell-Balancing: Rothacher T., Schwarzburger H., Timke T. (2018), Stromspeicher für Gewerbe und Industrie

# 3. Merkmale von Li-Ionen-Batterien

Die Eignung einer Li-Ionen-Batterie für mobile oder stationäre Anwendungen hängt von vielen verschiedenen Aspekten ab. Je nach Anforderungen und Einsatzzweck sind unterschiedliche Kriterien zur Wahl eines geeigneten Systems heranzuziehen. Einige Kriterien werden im folgenden Kapitel exemplarisch vorgestellt.

## 3.1 Technische Eigenschaften

### 3.1.1 Energiedichte

Die Energiedichte ist ein Maß für den Energieinhalt einer Zelle bzw. einer Batterie pro Volumen oder Masse. Sie hat damit direkten Einfluss auf die erzielbare Reichweite eines rein elektrisch betriebenen Fahrzeugs mit Traktionsbatterie bei gleicher Masse bzw. gleichem Volumen und wird beschrieben als spezifische [Wh/kg] oder volumetrische Energiedichte [Wh/l]. Erstere errechnet sich über das Produkt aus spezifischer Ladungsdichte [Ah/kg] und nominaler Zellspannung [V] und definiert den gespeicherten Energiegehalt pro Masse. Die volumetrische Energiedichte definiert dagegen den Energiegehalt pro Volumen und ergibt sich aus dem Produkt der volumetrischen Ladungsdichte [Ah/l] und der nominalen Zellspannung. Die spezifische Energiedichte wird auf Datenblättern zum Teil auch als gravimetrische Energiedichte bezeichnet. Eine Zelle mit hoher Energiedichte setzt eine Kombination zweier Elektrodenmaterialien mit hoher Ladungsdichte und Potentialdifferenz voraus. In → Abbildung 3 sind mögliche Energiedichten unterschiedlicher Batterietypen nach Elektrodenmaterialien aufgeteilt visualisiert.

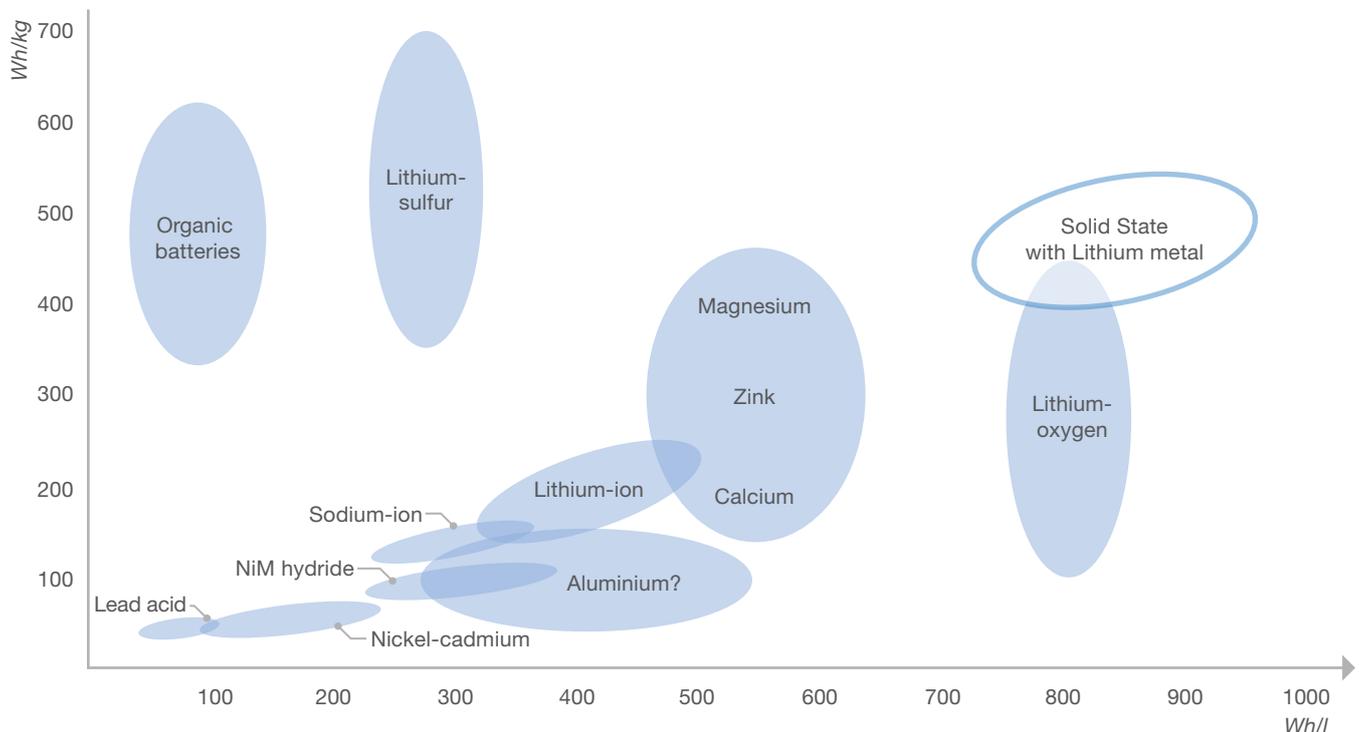


Abbildung 3: Vergleich der volumetrischen und spezifischen Energiedichten gegenwärtiger kommerzieller Batterien und zukünftiger möglicher Chemikalien<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Vergleiche: [https://battery2030.eu/digitalAssets/860/c\\_860904-L\\_1-k\\_roadmap-27-march.pdf](https://battery2030.eu/digitalAssets/860/c_860904-L_1-k_roadmap-27-march.pdf), Abrufdatum 02.12.2020

Wie dargestellt decken speziell Li-Ionen-Batterien ein weites Spektrum an spezifischen Energien bzw. Energiedichten ab. So können auf Zellebene (je nach Zellchemie) ca. 90–250 Wh/kg bzw. 160–650 Wh/l erreicht werden. Für zukünftige wiederaufladbare Lithium-Batterien werden Energiedichten über 400 Wh/kg auf Basis von Li-Schwefel erwartet oder bis zu 800 Wh/l auf Basis von Li-Luft. Zusätzlich wird aktuell an vielen Batterietypen geforscht, welche theoretisch die sehr hohen Energiedichten der Li-Ionen-Zellchemien noch übersteigen können, siehe hierzu → Kapitel 5.

Da die Energiedichte als technisches Kriterium maßgeblich das Eigengewicht und das Gehäusevolumen der Batterie beeinflusst, ist sie gerade bei mobilen Anwendungen wie beispielsweise bei einem rein batterieelektrisch betriebenen Fahrzeug (BEV) ein entscheidender Faktor für die Reichweite. Je größer die Energiedichte, umso leichter bzw. kleiner wird die Batterie bei gleichbleibendem Energieinhalt. Bei stationären Anwendungen sind gegebenenfalls andere Faktoren prioritär zu beachten.

### 3.1.2 Leistungsdichte

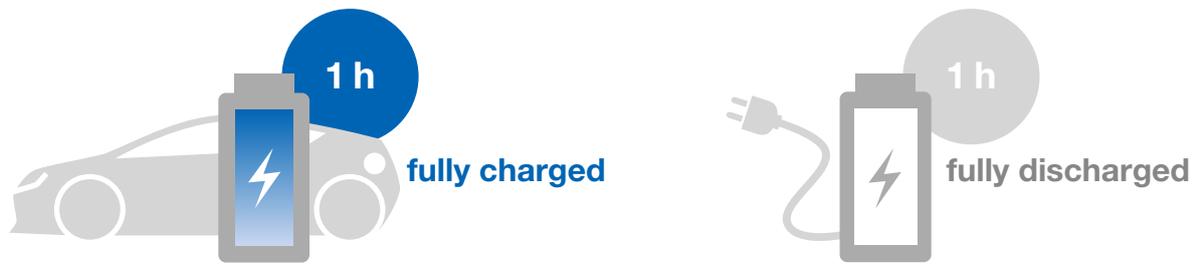
Li-Ionen-Batterien können in energieoptimierte Batterien mit hohen Energiedichten, geringen Leistungsdichten und durchschnittlichen Entladeströmen sowie leistungsoptimierte Batterien mit geringeren Energiedichten, hohen Leistungsdichten und kurzzeitig sehr hohen Entladeströmen unterschieden werden. Erstere sind besonders für BEV wichtig, da die Reichweite des Fahrzeugs von der Kapazität abhängt. Dagegen werden bei hybrid-elektrischen Fahrzeugen (HEV) höchste Anforderungen an die Leistungsdichte und damit auch an die Hochstromfähigkeit beim Be- und Entladen gestellt. Beim Entladevorgang bzw. beim Anfahren und Beschleunigen, wobei zusätzlich auftretende Leistungsspitzen über das elektrische Antriebssystem abgedeckt werden sollen, gilt dies im besonderen Maße. Die in der Batterie gespeicherte Energie muss in diesem Fall sehr schnell abgegeben werden. Beim Ladevorgang dagegen ist die elektrische Energie, die beim Bremsvorgang durch den elektrischen Motor aus kinetischer Energie umgewandelt und zurückgewonnen wird (Rekuperation), innerhalb weniger Sekunden in der Batterie zu speichern. Je schneller die Vorgänge stattfinden, desto höher ist der Lade-/Entladestrom.



Die spezifische Leistungsdichte wird durch das molekulare Gewicht (bzw. Dichte) des Wirtsmaterials und die Anzahl der Li-Ionen bestimmt, die reversibel in dessen Struktur aufgenommen werden können. Die spezifische Leistungsdichte wird in Watt pro Kilogramm (W/kg) angegeben und die volumetrische Leistungsdichte in Watt pro Liter (W/l).

Für eine hohe spezifische Leistungsdichte (W/kg) bzw. volumetrische Leistungsdichte (W/l) und einen schnellen Lade- und Entladevorgang der Zellen bzw. des Systems (z. B. bei Schnell-Ladung bzw. Beschleunigung) ist die Hochstromfähigkeit daher entscheidend. Mit der C-Rate kann die Größe des Lade- und Entladestroms unabhängig von der Kapazität verschiedener Zellen angegeben werden. Diese ist für das Laden der Batterie meist geringer als beim Entladen. Die Bezeichnung C steht für die jeweiligen Ströme, die als Bruchteil bzw. Vielfaches der seitens des Herstellers angegebenen Nennkapazität aufgeführt werden. Der Kehrwert der C-Rate gibt demnach die Anzahl an Stunden zum Laden bzw. Entladen an.<sup>9</sup> Je höher die C-Rate, desto höher ist der Strom und desto schneller ist die Batterie vollständig geladen.

<sup>9</sup> Teilt man 60 (Minuten einer Stunde) durch die angegebene C-Rate, so erhält man die theoretisch benötigten Minuten zum vollständigen Laden oder Entladen.



### Beispiel: Li-Ionen-Zelle mit einer Nennkapazität von 2 Ah

C-Rate	Zeit (theor.)	Strom
1 C	1 Stunde	2 A
0,5 C	2 Stunden	1 A
2 C	30 Minuten	4 A
30 C	2 Minuten	60 A

Tabelle 1: C-Raten einer Li-Ionen-Zelle mit 2 Ah im Zusammenhang mit Zeit und Strom

Mit hohen Strömen ist auch eine hohe Wärmeentwicklung verbunden. Daher sind für einen zuverlässigen Betrieb die Auswahl einer geeigneten Zellchemie und eine ausreichende Kühlleistung erforderlich. Ist letztere nicht gegeben, haben u. a. die entstehenden Temperaturen und die damit einhergehenden Zellreaktionen einen negativen Einfluss auf die Zyklenfestigkeit bzw. Lebensdauer der Batterie.<sup>10</sup>

### 3.1.3 Zellspannung

Im Zusammenhang mit der Zellspannung wird auch von der Ruhespannung gesprochen. Darunter versteht man die Zellspannung, wenn keine Ströme fließen bzw. kein Lade- oder Entladeprozess stattfindet. Fließen Ströme, so weicht die tatsächliche Zellspannung von diesem Wert ab.

Zur Bestimmung der theoretischen Ruhespannung werden die Elektrodenpotentiale der jeweilig genutzten Aktivmaterialien herangezogen. Damit verschiedene Elektrodenmaterialien für Li-Ionen-Batterien mit ihren Potentialen verglichen werden können, werden sie gegenüber einer Standardelektrode aus metallischem Lithium gemessen, dessen Potential auf den Wert Null festgelegt ist und somit als Ausgangspunkt dient. Beispiele von Elektrodenpotentialen verschiedener Verbindungen sind in → Abbildung 4 dargestellt.

Werden zwei dieser Materialien, z. B.  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  und Graphit, in einer Li-Ionen-Zelle kombiniert, so ergibt sich die resultierende Zellspannung als Differenz dieser Elektrodenpotentiale (im Beispiel also ca. 3,7 V). Um eine möglichst hohe Ruhespannung zu erreichen, sollte der Unterschied zwischen den Potentialen der eingesetzten Materialien möglichst groß sein.

Bei Zellen mit kohlenstoffbasierter Anode (z. B. Graphit) und Metalloxid-Kathode (z. B. NMC) liegt die Ladeschlussspannung bei ca. 4,2 V. Die zugehörige Entladeschlussspannung liegt meist bei 2,7–3,0 V. Bei einer Überladung oder einer Tiefenentladung kann es zu irreversiblen Schädigungen und zu Kapazitätsverlusten kommen. Für die Vermeidung dieser sicherheitskritischen Ereignisse ist das BMS zuständig (→ Kapitel 2.2.4).

<sup>10</sup> Linden, Kirby W. Beard; Thomas B. Reddy. (2019): Handbook of Batteries, 5. Auflage

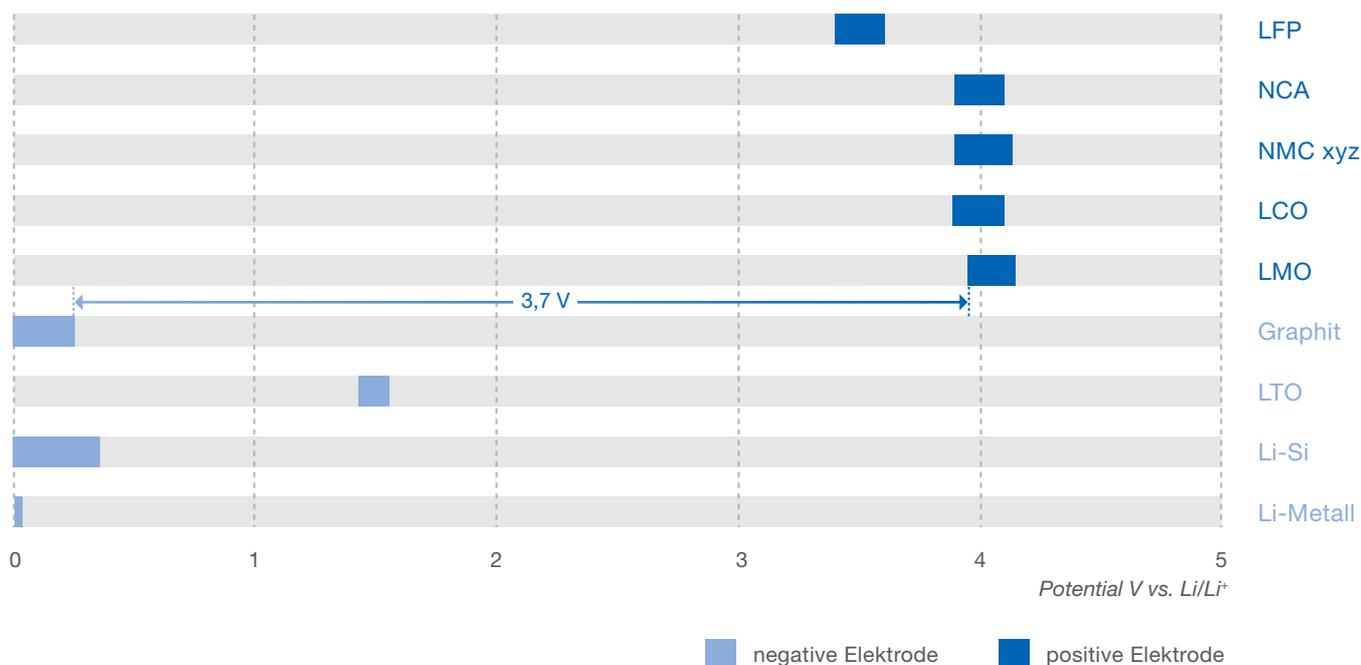


Abbildung 4: Übersicht der Elektrodenpotentiale verschiedener Aktivmaterialien

## 3.2 Systemische Aspekte

### 3.2.1 Lebensdauer

Die Lebensdauer einer Li-Ionen-Batterie ist definiert als Zeitspanne zwischen dem Auslieferungszeitpunkt (Beginn of Life, BoL), charakterisiert durch in der Regel definierte Eigenschaften im Lastenheft, und dem Zeitpunkt (End of Life, EoL), zu dem diese Eigenschaften einen zuvor definierten Wert durch Alterung unterschreiten. Das EoL für Batterien in Elektrofahrzeugen ist meist beim Unterschreiten der Speicherfähigkeit auf weniger als 80 % der Nennkapazität erreicht. Der definierte Wert für das EoL hängt stark von der Anwendung ab.

Als Maß für die Lebensdauer wird unterschieden zwischen

- Zykluslebensdauer bzw. Zyklusfestigkeit und
- kalendarischer Lebensdauer.

In der Praxis beeinflusst die Kombination aus beiden Lebensdauer-Vorgaben die Gesamtlebensdauer einer Batterie. Die kalendarische Lebensdauer bezieht sich auf die Batterie, wenn keine Zyklierung stattfindet, d. h. wenn das System in der jeweiligen Anwendung nicht genutzt wird oder sich im Lagerzustand befindet. Sie wird in der Anzahl der zu erwartenden Einsatzjahre angegeben. Im nicht genutzten Zustand finden in der Zelle Wechselwirkungen zwischen Elektrolyt und Aktivmaterialien sowie Zersetzungsvorgänge statt, die Einfluss auf die Lebensdauer haben. Extreme äußere Temperaturbedingungen, Ladezustände, die Zusammensetzung des Elektrolyten und die Qualität des Herstellungsprozesses sind weitere Faktoren, welche die Alterung beschleunigen können.<sup>11</sup>

<sup>11</sup> Korthauer, R. (2018): Lithium-Ion-Batteries: Basics and Applications

Unter der Alterung ist dabei eine Verschlechterung der elektrochemischen Eigenschaften (beispielsweise geringere Kapazität, höherer Innenwiderstand etc.) zu verstehen. Größtenteils wird diese durch den Energiedurchsatz bzw. Zyklisierung bedingt. Hohe Leistungsanforderungen bei der Be- und Entladung der Batterie haben eine hohe interne Wärmeproduktion zur Folge. Dadurch können die genutzten Elektrodenmaterialien irreversibel geschädigt und die Alterung der Zelle bzw. des Systems direkt beeinflusst und beschleunigt werden. Die Kapazität nimmt mit der Zeit ab, es kommt zu einem Anstieg des Innenwiderstands und einer entsprechenden Leistungsabnahme. Nebenreaktionen, die beim Laden im Elektrolyten stattfinden, wie beispielsweise Ausdehnvorgänge der Aktivmaterialien oder auch die dabei erfolgte mechanische Arbeit der Aktivmassen, wirken sich ebenfalls auf die Alterung aus. Durch den allgemeinen Einsatz verschiedener in Kontakt stehender Materialien ist eine Vielzahl von Reaktionen möglich. Des Weiteren beeinflussen auch hier externe Temperaturbedingungen die mögliche Lebensdauer. Je höher die Temperatur, umso schneller laufen diese Prozesse ab und umso geringer ist die zu erwartende Lebensdauer. Je nach Anwendung und Bedingungen ist deshalb eine aktive Kühlung notwendig.

Die Zyklenlebensdauer beinhaltet die Anzahl der möglichen Zyklen einer Zelle oder eines Systems durch Nutzung bzw. Zyklisierung bis zum EoL. Bei einem jeweils zusammenhängenden Lade- und Entladevorgang wird von einem Zyklus gesprochen. Dabei wird zwischen Voll- und Teilzyklen unterschieden. Von einem Vollzyklus ist die Rede, wenn die Entladung bis auf einen Ladezustand von 0 % mit anschließender Aufladung bis 100 % erfolgt. Dagegen wird bei einer unvollständigen Entladung von einem Teilzyklus gesprochen. Wichtige Parameter für die Zyklenlebensdauer sind zum einen die Entladetiefe (Depth of Discharge, DOD) und zum anderen der Ladezustand (State of Charge, SOC). DOD gibt die Entladetiefe und SOC den Ladezustand bezogen auf die Gesamtkapazität der Batterie an. Beide Parameter werden in Prozent ausgedrückt. Um die Batterie-Lebensdauer zu erhöhen, kann die nutzbare Kapazität beschränkt und die Batterie demnach mit Teilzyklen betrieben werden.

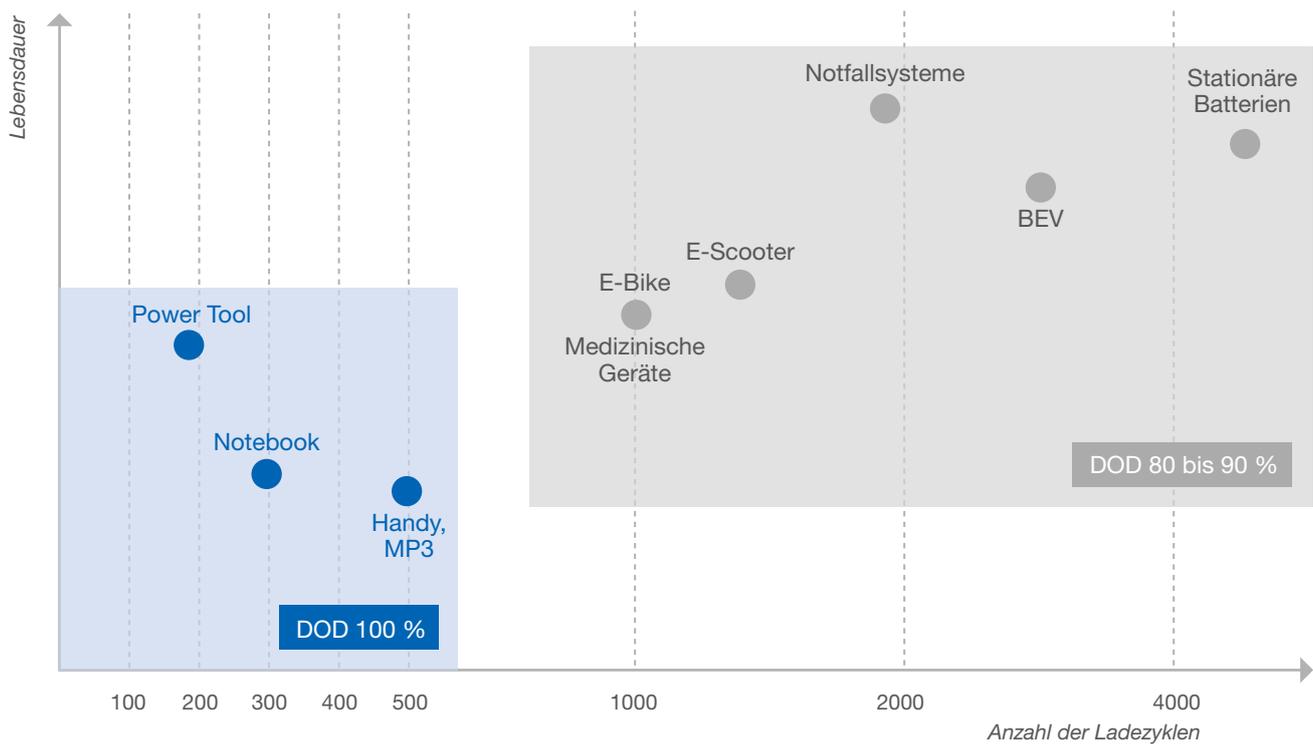


Abbildung 5: Lebensdauer bei unterschiedlichen Anwendungen ohne und mit Beschränkung des DOD

Abhängig von der geplanten Nutzungsdauer des Geräts wird die nutzbare Batteriekapazität durch den Hersteller definiert (→ Abbildung 5). Dementsprechend ergeben sich für manche Anwendungen Lebensdauern von wenigen Jahren bzw. bis zu 500 Zyklen. Ein Kriterium dafür ist, unter welchen Bedingungen diese Geräte genutzt werden. Durch eine Beschränkung des SOC auf ca. 80–90 % der Gesamtkapazität kann die Lebensdauer deutlich erhöht werden, da Elektrodenmaterialien weniger stark belastet werden. Die zyklische Alterung ist also abhängig von der Anzahl der Be- und Entladevorgänge (Zyklisierung), aber auch von SOC und DOD. Weitere Einflussfaktoren auf die zyklische Lebensdauer sind auch die Temperatur, die angewandte Stromstärke und die Geschwindigkeit der Be- und Entladung.<sup>12</sup>

### 3.2.2 Sicherheit

In Lithium-Ionen-Batterien werden zum einen Materialien mit hohen Energiegehalten und zum anderen entflammbare Elektrolyte kombiniert. Wirken extreme äußere Einflüsse wie beispielsweise Kurzschlüsse, hohe Temperaturen oder eine mechanische Deformation ein, können entsprechende sicherheitskritische Situationen ausgelöst werden. Diese gilt es in der Konstruktionsphase im Rahmen einer Risikobewertung ausreichend zu berücksichtigen. Es gibt einige interne und externe Sicherheitsfunktionen, die in eine Lithium-Batterie integriert werden können, um Risiken zu minimieren.

Ein wesentlicher Aspekt ist die Reaktion bei Überladung von Zellen. Diese kann zu einer unkontrollierbaren Erhitzung und schlimmstenfalls zu einem sogenannten „thermal runaway“<sup>13</sup> führen. Ein thermal runaway, der in einer einzelnen Zelle beginnt, kann sich als langsame Kettenreaktion durch die starke Wärmefreisetzung und/oder entzündeten gasförmigen Elektrolyt auf weitere Zellen ausbreiten, wodurch es zu Brand und Explosion der Zellen kommen kann. Auch Tiefentladungen sollten aufgrund von Lithiumplating vermieden werden. Um beschriebene Reaktionen und weitere Aspekte in Zellen zu prüfen, müssen diese vor Inverkehrbringen elektrischen und mechanischen Sicherheitsprüfungen unterzogen werden. Unter anderem wird auch das Verhalten bei schnellem Laden und Entladen mit hohen Strömen geprüft. Des Weiteren sind Prüfungen unter extremen Umgebungsbedingungen durchzuführen. Detailliertere Angaben zu Normen mit den entsprechenden Sicherheitsprüfungen sind in → Kapitel 4 zu finden.



Sicherheit wird im Zusammenhang mit elektrischen Anlagen und Geräten immer wieder mit einem Fokus auf die funktionale Sicherheit beschrieben und wurde in Normen folgendermaßen definiert:

- **Sicherheit:** Freiheit von unververtretbarem Risiko
- **Risiko:** Kombination aus der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Schwere des Schadens
- **Schaden:** Physische Verletzung oder Schädigung der Gesundheit von Menschen oder Schädigung von Gütern oder der Umwelt.
- **Aus der Praxis:** Eine sicherere Zelle oder Batterie hat im Vergleich zu anderen Zellen oder Batterien eine geringere Wahrscheinlichkeit von Fehlern, die Schäden verursachen (z. B. Erhitzung, Freisetzung von Gas), bzw. verursacht bei entsprechenden Fehlern geringere Schäden. Bei Zellen ist die Eintrittswahrscheinlichkeit von Fehlern hauptsächlich von der Herstellungsqualität (z. B. Materialreinheiten, Homogenität der Elektroden) abhängig. Bei Batterien wird sie maßgeblich von der Konstruktion beeinflusst.

Weitere Informationen:

- DIN EN 61508-4, Abs. 3.1.11, 3.1.6 und 3.1.1
- ISO/IEC Guide 51:1999, Definition 3.1, 3.2 und 3.3
- International Electrotechnical Vocabulary, IEC ref 903-01-19, 903-01-07 und 903-01-07

<sup>12</sup> Korthauer, R. (2018): Lithium-Ion-Batteries: Basics and Applications

<sup>13</sup> Ein Zustand, bei dem sich eine Batterie beim Laden oder Entladen erhitzt und sich selbst durch interne Wärmeentwicklung zerstört, die durch einen hohen Überladungs- oder Überentladungsstrom oder andere missbräuchliche Bedingungen verursacht wird. Linden, Kirby W. Beard; Thomas B. Reddy. (2019): Handbook of Batteries, 5. Auflage

Wie bereits erwähnt können zur Risikominimierung auf allen Ebenen eines Batteriesystems Maßnahmen ergriffen werden. Dazu im Folgenden ausgewählte Beispiele:

Maßnahme	Erläuterung
<b>Elektrolyt-Additive</b>	Beifügung von flammhemmenden Additiven bei entflammabaren organischen Elektrolytlösungen
<b>Shutdown-Separatoren</b>	Mikroporen des Separators werden unter Wärmeeinwirkung verschlossen, um einen weiteren Ionentransport zu verhindern und den Stromfluss zu unterbrechen
<b>Redox-Shuttle</b>	Elektrochemisch aktive Stoffe, die dem Elektrolyten beigemischt werden. Bei erhöhter Ladespannung oxidieren diese an der positiv geladenen Elektrode und wandern dann zur negativen Elektrode, wo sie durch eine Reduktionsreaktion ihren ursprünglichen Zustand annehmen. Die überschüssige Ladung wird somit in einem kontrollierten Prozess abgeführt.
<b>Shutdown-Additive</b>	Die dem Elektrolyt beigefügten Additive setzen bei einem Überladen der Zelle entweder Gase frei, wodurch in der Folge ein drucksensibler Schalter den Stromfluss unterbricht, oder sie behindern den Ionenfluss im Elektrolyten. <sup>14</sup>
<b>Schmelzsicherung</b>	Bei zu hohen Strömen und damit zusammenhängender hoher Temperaturentwicklung schmilzt die in den Stromkreislauf integrierte Sicherung

Tabelle 2: Beispielhafte Maßnahmen zur Risikominimierung

Alle möglichen Maßnahmen zur Risikominimierung haben immer einen weiteren Einfluss auf die Batterie, wie die Erhöhung der Kosten, geringere Energiedichten auf Modulebene oder ähnliches.

Auf Systemebene ist neben der verbauten Mechanik vor allem das BMS die wesentliche Komponente, um einen sicheren und zuverlässigen Betrieb der Batterie zu gewährleisten (→ Kapitel 2.2.4). Sollte eine solche irreversible Schädigung nicht durch das BMS verhindert werden, bspw. wenn die Batterie ihr Betriebsfenster verlässt, darf die Batterie nicht erneut geladen werden. Ansonsten können die Schäden auch innerhalb des Betriebsfensters weiter wachsen und zu einem sicherheitskritischen Ereignis führen. In → Tabelle 3 sind weitere Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit auf Zell- und Systemebene zusammengefasst.

<sup>14</sup> Korthauer, R. (2018): Lithium-Ion-Batteries: Basics and Applications

Maßnahme	Erläuterung
<b>Crashsicherheit</b>	Crashsichere Unterbringung der Batterie in einem korrosionssicheren Gehäuse mit feuerhemmenden Materialien
	Ventile zur Abblasung der Reaktionsgase im Fehlerfall
	Kontrollierte Entladereaktion der Batterie bei Zerstörung des Separators
<b>Betriebssicherheit</b>	Mikrocontrollergesteuerte Zellüberwachung, selbständiges Abschalten der Batterie, bevor sicherheitskritische Grenzwerte überschritten werden
	Thermomanagement (z. B. Kaltstartverhalten)
	Überladeschutz, Zellbalancing (Ausgleich der Spannungen)
<b>Servicesicherheit</b>	Unverwechselbare Kennzeichnung sämtlicher Hochvolt-Kabel
	Berührschutz durch Isolierschutz und Spezialstecker, die einen Kontakt mit stromführenden Teilen verhindern
	Aufteilen der Batterie in mehrere Module, die über einen Sicherheitsschalter verbunden sind

Tabelle 3: Übersicht weiterer Maßnahmen zur Batteriesicherheit<sup>15</sup>

### 3.2.3 Systembelastung

Li-Ionen-Batterien sind je nach Anwendung verschiedenen Belastungen ausgesetzt, die mit Gefahren einhergehen und bereits zum Großteil in den vorherigen vorgestellten Kriterien angesprochen wurden. Die folgende Tabelle hält die wichtigsten Aspekte in aggregierter Form und einige Empfehlungen fest:

Art der Belastung	Erläuterung
<b>Mechanisch</b>	Spannungen und Ausdehnvorgänge bei Einlagerung der Li-Ionen in die Elektrodenmaterialien können zur Rissbildung, Auseinanderbrechen und Volumenänderung der Elektrode führen.
	Mechanische Deformationen durch Kollision können zu Kurzschlüssen führen.
<b>Elektrisch</b>	Je höher die Lade- und Entladeströme sind, desto stärker wird die Zellchemie beansprucht und Wärme erzeugt, welche speziell in Kombination mit hohen Ladezuständen die Lebensdauer der Batterie durch verringerte Kapazität und erhöhtem Innenwiderstand negativ beeinflusst.
<b>Thermisch</b>	Die Temperatur während des Einsatzes hat großen Einfluss auf die Lebensdauer respektive Kapazitätsverlust und entnehmbare Kapazität.
	Außentemperaturen von 10–25 °C und Betriebstemperaturen von 20–40 °C sind für den Normalbetrieb ideal.
	Temperaturen außerhalb der Idealtemperatur können Einfluss auf die Lebensdauer haben.
	Durch interne Wärmeproduktion beschleunigen sich mögliche (Neben-) Reaktionen der verwendeten Materialien, die u. a. zu einem erhöhten Innenwiderstand führen und damit die Lebensdauer und ggf. auch die Sicherheit beeinflussen.
	Bei sinkenden Temperaturen nimmt die verfügbare Kapazität ab.

Tabelle 4: Arten der Batteriebelastung

<sup>15</sup> Wallentowitz, H.; Freialdenhoven A. (2011): Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges-Technologien, Märkte und Implikationen, 2. überarbeitete Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, S. 112

### 3.2.4 Bauform

Für Lithium-Ionen-Zellen konzentrieren sich Hersteller auf drei Bauformen mit entsprechenden Vor- und Nachteilen. Die zylindrische Zelle ist eine weit verbreitete Ausführungsform von Batteriezellen. Eine in der Industrie übliche Größe ist die 18650-Zelle, die 18 mm im Durchmesser und 65 mm in der Höhe misst. Sie ist einfach zu produzieren und mechanisch vergleichsweise stabil. Aufgrund ihrer Form hat sie jedoch eine schlechte Wärmeabfuhr und benötigt viel Volumen für den Aufbau großer Packs. Die Zellchemie ist bei dieser Batterie in ein stabiles Rundgehäuse integriert (→ Abbildung 6). Die Zelle besitzt entlang der zylindrischen Achse einen Hohlraum, damit die Batterie bei Belastung (Erwärmung) nach innen „atmen“ kann und sich nicht nach außen ausdehnt. Eine weitere typische Größe von Rundzellen ist z. B. die 27100er Zelle.

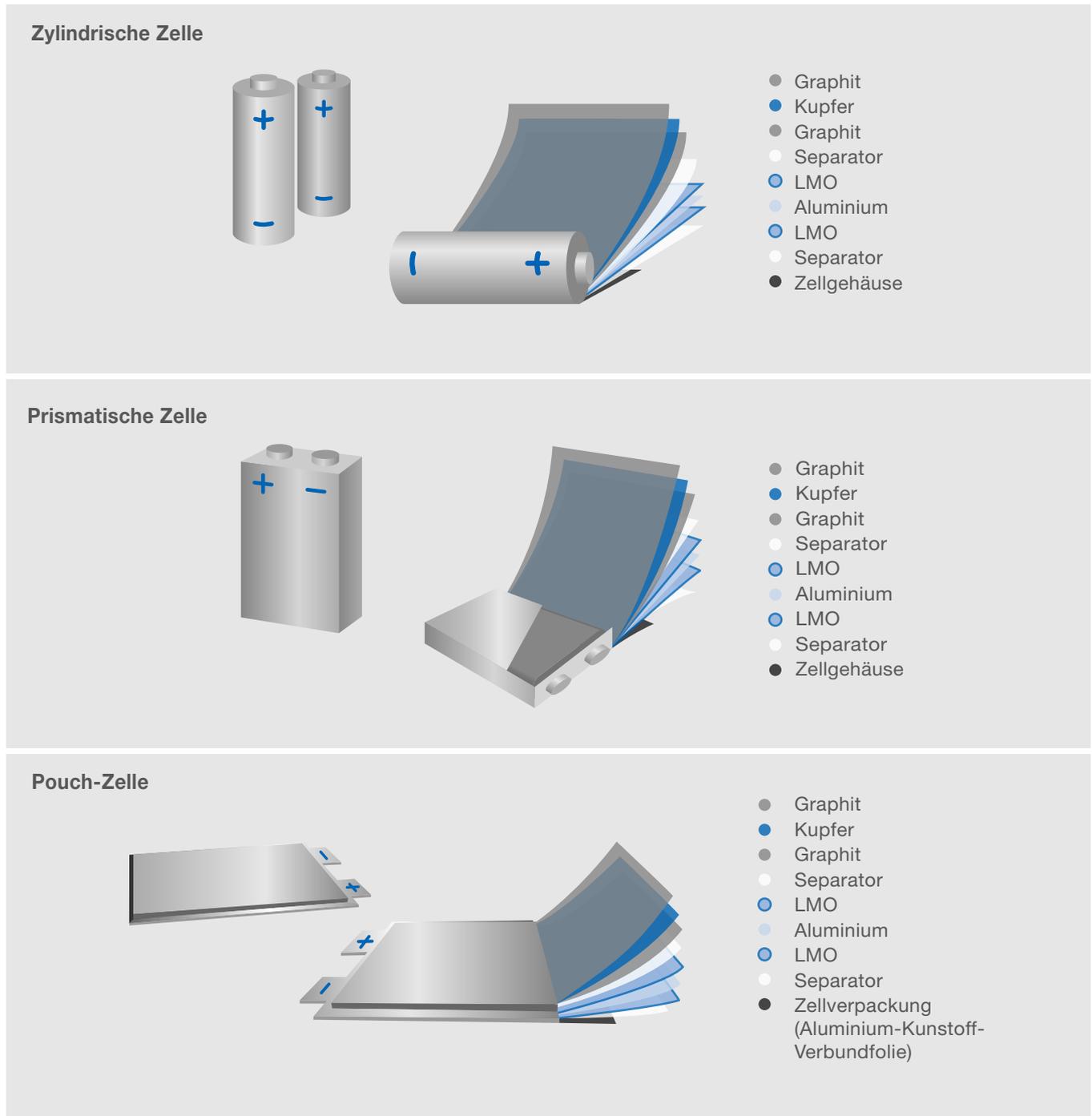


Abbildung 6: Aufbau einer zylindrischen, einer prismatischen und einer Pouch-Zelle am Beispiel von LMO

Der Aufbau einer prismatischen Zelle ist dem der zylindrischen Zelle ähnlich. Die Komponenten werden in der Abfolge Anode – Separator – Kathode – Separator zu einem Flachwickel gefaltet, um sie in ein prismatisches festes Gehäuse zu verpacken. Durch die rechteckige und flache Form können im Vergleich zur Zylinder-Bauform eine bessere Volumenausnutzung und eine bessere Wärmeabfuhr ermöglicht werden. Nachteilig sind dagegen die aufwendigere Zellfertigung und Assemblierung.

Die Pouch-Zelle (Coffeebag-Zelle, Laminatzelle) ist eine andere Ausführung der prismatischen Zelle. Anstelle des festen Gehäuses werden in der Regel kunststoffbeschichtete Aluminiumfolien verwendet. Bei der Fertigung wird meist die Abfolge Anode – Separator – Kathode aufgestapelt. Diese Stapel werden entweder aus bereits zugeschnittenen Komponenten gefertigt oder von der Rolle aus laminiert und gestanzt. Klare Vorteile dieser Zellform sind ihre sehr guten Kühleigenschaften, eine gute Skalierbarkeit und eine sehr gute Wärmeableitung. Zudem können hohe Energiedichten bei vergleichsweise günstiger Fertigung realisiert werden. Berücksichtigt werden müssen die geringe mechanische Stabilität der Zelle und ein mögliches Aufblasen durch erhöhten Innendruck bei unkontrollierter Gasentwicklung<sup>16</sup>.



### **Achtung!**

Es gibt sowohl nicht wiederaufladbare (primäre) als auch wiederaufladbare Batterien (Akkumulatoren oder auch Sekundärbatterien) in den gleichen Baugrößen und -formen.

Bitte beachten Sie vor dem Laden einer Batterie die Sicherheitshinweise sowohl auf der Batterie als auch auf der Ladeeinrichtung. Im Zweifel laden Sie die Batterie auf keinen Fall auf!

<sup>16</sup> battprod.vdma.org/documents/7411591/15357859/Produktion+LiB-Zelle/f53063de-1469-ed58-9b34-b8d7fc9f7f3f, Abrufdatum 02.12.2020

# 4. Gesetzliche Regelungen und Normen zu Li-Ionen-Batterien

Für den Umgang mit Lithium-Ionen-Batterien existieren in vielen Bereichen gesetzliche Vorgaben und Normen, die in ihrer Gesamtheit schwer überschaubar scheinen. Das folgende Kapitel soll daher Personen und Institutionen, die neu im Umgang mit Lithium-Ionen-Batterien sind, einen ersten kurzen Überblick geben.

## 4.1 Gesetzliche Regelungen und bindende Vereinbarungen

Wichtige gesetzliche Regelungen für Batterien sind im Batterie-Gesetz (BattG) in seiner jeweils gültigen Fassung zu finden. Das BattG ist die nationale Umsetzung der europäischen Batterie-Richtlinie (Battery Directive). Das Batterie-Gesetz regelt das Inverkehrbringen, die Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Batterien. Es gilt für alle Arten von Batterien, unabhängig von Form, Größe, Masse, stofflicher Zusammensetzung oder Verwendung (mit Ausnahme von militärischen Anwendungen). Die Vorgaben gelten, auch wenn diese in Geräten verbaut sind. Bei neuen Überarbeitungen der Vorgaben werden immer stärker auch Umweltaspekte berücksichtigt.

Weiterhin gibt es bezüglich des Transports die Vorschriften des ADR (**A**ccord européen relatif au transport international des marchandises **D**angereuses par **R**oute), welches das europäische Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße ist. Die Bestimmungen unterscheiden sich je nach Transportweg. Im Detail wird auf die Verkehrswege Luft, Schiene, Wasser und Straße eingegangen. Es sind Vorschriften für den Straßenverkehr hinsichtlich Verpackung, Kennzeichnung und Ladungssicherung von Gefahrgut enthalten. Die ADR wird regelmäßig aktualisiert, somit ist mit einer Übergangsfrist von einem Jahr immer die gültige Fassung zu beachten. Die Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt (GGVSEB) macht die ADR auch für nationale Transporte gültig und ergänzt diese durch nationale Regelungen.

Mit wenigen Ausnahmen müssen Lithiumbatterien die Anforderungen von Abschnitt 38.3 des UN-Handbuchs für Tests und Kriterien (UN 38.3 Transporttest) erfüllen, um die Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien während des Transports sicherzustellen. Dieser Test soll daher die Bedingungen simulieren, denen Lithiumbatterien während eines Transports ausgesetzt sein können, wie beispielsweise Quetschung, Fall, Druck- und Temperaturschwankungen oder auch ein Aufprall. Die Prüfanforderungen unterscheiden sich für Lithium-Batterien abhängig vom Gewicht, dem Energieinhalt und anderen Faktoren. Für die Beförderung von Lithium-Batterien mit einer Produktionsmenge > 100 Stück ist das Bestehen dieses Tests notwendig. Bei kleineren Mengen kann gemäß ADR Sondervorschrift 310 transportiert werden.

Batterien fallen zudem als Produkte unter das Produktsicherheitsgesetz (ProdSG), das somit ergänzend zu beachten ist. Es regelt das Bereitstellen von sicheren Produkten auf dem Markt und kann zum Teil durch Beachtung der existierenden Normen erfüllt werden.

Diese gesetzlichen Regelungen und bindenden Vereinbarungen werden ergänzt durch verschiedene Normen, die vor allem Sicherheitsaspekte und deren Prüfungen beinhalten und im folgenden Abschnitt genauer betrachtet werden. Die Anwendung von Normen ist allerdings nicht gesetzlich verpflichtend.

## 4.2 Wichtige Normen nach Anwendungsgebiet

Die Normen für Lithium-Ionen-Batterien sind nach Anwendung aufgeteilt, da je nach Nutzung unterschiedliche Anforderungen zu berücksichtigen und Prüfungen durchzuführen sind. Nachfolgend werden einige (nicht alle) wichtige Normen und Anwendungsregeln zu Lithium-Ionen-Batterien aufgelistet. Die jeweils aktuell gültige Fassung ist für Details zu berücksichtigen.

### Tragbare Batterien

**DIN EN 62133-2  
(VDE 0510-82)**      **Sekundärzellen und -batterien mit alkalischen oder anderen nicht säurehaltigen Elektrolyten – Sicherheitsanforderungen für tragbare gasdichte Sekundärzellen und daraus hergestellte Batterien für die Verwendung in tragbaren Geräten Teil 2: Lithium-Systeme**

In dieser Norm sind Anforderungen und Prüfungen für den sicheren Betrieb tragbarer gasdichter Lithium-Sekundärzellen und -batterien festgelegt. Prüfungen der Zellen und Batterien bei bestimmungsgemäßem Gebrauch und bei vernünftigerweise vorhersehbarer Fehlanwendung stehen im Vordergrund.

### Stationäre Batterien

**DIN EN 62619  
(VDE 0510-39)**      **Sekundärzellen und -batterien mit alkalischen oder anderen nicht säurehaltigen Elektrolyten – Sicherheitsanforderungen für Lithium-Sekundärzellen und -Batterien für die Verwendung in industriellen Anwendungen**

Diese Norm legt die Anforderungen und Prüfungen für den sicheren Betrieb von Lithium-Sekundärzellen und -batterien (Akkumulatoren) in industriellen inklusive stationären Anwendungen fest. Stationäre Anwendungen sind z. B. unterbrechungsfreie Stromversorgungen, elektrische Energiespeichersysteme oder auch Notstromsysteme. Als mobile Anwendungen sind z. B. Gabelstapler, Golfwagen, automatisch geführte Fahrzeuge oder andere mobile Anwendungen mit Ausnahme von Straßenfahrzeugen erwähnt. Diese Norm gilt für verschiedene industrielle Anwendungen und legt gemeinsame Mindestanforderungen fest. Sie wird durch anwendungsspezifische Normen ergänzt. Es werden neben allgemeinen Sicherheitsbetrachtungen auch Typprüfungen beschrieben.

**DIN EN 62620  
(VDE 0510-35)**      **Akkumulatoren und Batterien mit alkalischen oder anderen nichtsäurehaltigen Elektrolyten – Lithium-Akkumulatoren und -batterien für industrielle Anwendungen**

Mit dieser Norm wird die Prüfung des Leistungsverhaltens von Lithium-Ionen-Akkumulatoren und Batterien festgelegt. Der Zweck dieser Norm ist die Beschreibung einer allgemeinen grundlegenden Prüfmethodik, die als eine Funktion der allgemeinen primären Prüfung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren und Batterien fungiert, welche in verschiedenen Batterieanlagen zum Einsatz kommen können.

**DIN EN 63056  
(VDE 0510-56)**      **Sekundärzellen und -batterien mit alkalischen oder anderen nichtsäurehaltigen Elektrolyten – Sicherheitsanforderungen für Lithium-Sekundärzellen und -batterien für die Verwendung in elektrischen Energiespeichersystemen**

Diese Norm legt Anforderungen und Prüfungen für die Produktsicherheit von Lithium-Sekundärzellen und -batterien fest, die in elektrischen Energiespeichersystemen mit einer Höchstspannung von 1.500 V Gleichspannung (Nennwert) verwendet werden. Diese Norm gilt auch für unterbrechungsfreie Stromversorgungen. Ausgenommen sind tragbare Systeme mit weniger als 500 Wh.

→

Diese VDE-Anwendungsregel legt Sicherheitsanforderungen an Batteriespeichersysteme (BESS) mit Lithium-Batterien im Sinne des Produktsicherheitsgesetzes fest. Betrachtet werden vor allem komplette Energiespeichersysteme. Sie legt Anforderungen fest, welche die Sicherheit des Speichers während seines kompletten Lebenszyklus sicherstellen – Lagerung, Transport, Installation, Betrieb, Instandhaltung, Demontage und Recycling. Dazu enthält diese Anwendungsregel Verfahren für den Nachweis – durch Sichtprüfungen, Dokumentenprüfung sowie praktische Typ- und Stückprüfungen. Der Anwendungsbereich der AR 2510-50 ist beschränkt auf BESS, die für Laien (z. B. privat und kleingewerblich) zugänglich sind und von diesen bedient und betrieben werden können. Für Batteriespeichersysteme in elektrischen Betriebsstätten und medizinischen Bereichen gelten die Anforderungen nicht vollumfänglich und weitere Normen sind anzuwenden.

## Elektrostraßenfahrzeuge

DIN EN IEC 62660-1  
(VDE 0510-33)

### Lithium-Ionen-Sekundärzellen für den Antrieb von Elektrostraßenfahrzeugen Teil 1: Prüfung des Leistungsverhaltens

Dieser Teil von IEC 62660 legt die Verfahren zur Prüfung des Leistungsverhaltens und der Lebensdauer von Lithium-Ionen-Sekundärzellen fest, die als Antrieb von Elektrofahrzeugen, einschließlich Batteriefahrzeugen (*en. battery electric vehicles*, BEV) und Hybridfahrzeugen (*en. hybrid electric vehicles*, HEV), verwendet werden. Ziel dieser Norm ist die Festlegung der Prüfverfahren zur Ermittlung der wesentlichen Merkmale von Lithium-Ionen-Zellen für den Antrieb von Fahrzeugen in Bezug auf deren Kapazität, Leistungsdichte, Energiedichte, Lagerfähigkeit und zyklische Lebensdauer.

DIN EN IEC 62660-2  
(VDE 0510-34)

### Lithium-Ionen-Sekundärzellen für den Antrieb von Elektrostraßenfahrzeugen Teil 2: Zuverlässigkeits- und Missbrauchsprüfung

Der Teil 2 der DIN EN 62660 legt die Verfahren zur Prüfung der Zuverlässigkeit und des Verhaltens bei Missbrauch von Lithium-Ionen-Sekundärzellen und -zellblöcken fest, die für den Antrieb von Elektrofahrzeugen, einschließlich Batteriefahrzeugen (BEV) und Hybridfahrzeugen (HEV), verwendet werden. Ziel dieses Dokuments ist die Festlegung von genormten Prüfverfahren und Prüfbedingungen für grundlegende Eigenschaften von Lithium-Ionen-Zellen, die für den Antrieb von Batterie- und Hybridfahrzeugen vorgesehen sind. Diese Prüfungen sind zur Ermittlung wesentlicher Daten zur Zuverlässigkeit und zum Verhalten bei missbräuchlicher Verwendung von Lithium-Ionen-Zellen für verschiedene Auslegungen von Batteriesystemen und Batteriesätzen unerlässlich. Dieses Dokument stellt eine Normklassifikation der Beschreibung von Prüfergebnissen bereit, die bei der Auslegung von Batteriesystemen oder Batteriepacks anzuwenden ist.

DIN EN 62660-3  
(VDE 0510-49)

### Lithium-Ionen-Sekundärzellen für den Antrieb von Elektrostraßenfahrzeugen Teil 3: Sicherheitsanforderungen

Dieser Teil der DIN EN 62660 legt Prüfverfahren und Annahmekriterien für das sichere Betriebsverhalten von Lithium-Ionen-Sekundärzellen und -zellblöcken fest, die für den Antrieb von Elektrofahrzeugen (EV), einschließlich batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) und Hybridfahrzeugen (HEV), verwendet werden. Diese internationale Norm dient der Bestimmung der Basissicherheit von in einem Batteriesatz und -system verwendeten Zellen; sowohl bei bestimmungsgemäßem Gebrauch als auch bei vorhersehbarer Fehlanwendung oder im Störfall während des Normalbetriebs des Elektrostraßenfahrzeugs. Die Sicherheitsanforderungen der Zellen in dieser Norm beruhen auf der Voraussetzung, dass die Zellen in einem Batteriesatz und -system innerhalb der vom Zellhersteller festgelegten Grenzwerte für Spannung, Stromstärke und Temperatur (Zellenbetriebsbereich) ordnungsgemäß verwendet werden. Die Bewertung der Sicherheit von Zellen während Beförderung und Lagerung ist nicht Gegenstand dieser Norm.

→

ISO 12405-4	<b>Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge – Prüfspezifikation für Lithium-Ionen Batteriepakete und -systeme</b> <b>Teil 4: Leistungsprüfungen</b>
	<p>Dieses Dokument legt Prüfverfahren für die grundlegenden Eigenschaften von Leistung, Zuverlässigkeit und elektrischer Funktionalität für Batteriepacks und -systeme für Hochleistungs- oder Hochenergieanwendungen fest. Typische Anwendungen für Hochleistungs-Batteriepacks und -systeme sind Hybrid-Elektrofahrzeuge (HEV) und eine Art von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCV). Typische Anwendungen für hochenergetische Batteriepacks und -systeme sind Batterie-Elektrofahrzeuge (BEV), Plug-in-Hybrid-Elektrofahrzeuge (PHEV) und einige Arten von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCV). Prüfungen auf Zellebene sind in der DIN EN 62660-Serie angegeben.</p>
ISO 6469-1	<b>Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge – Sicherheitspezifikation</b> <b>Teil 1: Wiederaufladbare Energiespeichersysteme (RESS)</b>
	<p>In diesem Dokument werden die Sicherheitsanforderungen für wiederaufladbare Energiespeichersysteme (RESS) von elektrisch angetriebenen Straßenfahrzeugen zum Schutz von Personen festgelegt. Sie liefert keine umfassenden Sicherheitsinformationen für das Fertigungs-, Wartungs- und Reparaturpersonal. Die Anforderungen an Motorräder und Mopeds sind in ISO 13063 und ISO 18243 festgelegt.</p>
<b>Leichtelektrofahrzeuge (LEV)</b>	
DIN EN 50604-1 (VDE 0510-12)	<b>Lithium-Sekundärbatterien für Anwendungen in leichten Elektrofahrzeugen</b> <b>Teil 1: Allgemeine Sicherheitsanforderungen und Prüfverfahren</b>
	<p>Diese Norm legt Prüfverfahren und Anforderungen für die Sicherheit von Lithium-Sekundärbatterien für die Anwendung in Elektro-Leichtfahrzeugen inklusive EPACs (Pedelecs) fest. Ziel ist die Erhöhung der Sicherheit von Batteriepacks, welche Lithium-Batterie-Technologien enthalten, zur Anwendung in Elektro-Leichtfahrzeugen. Diese Norm ist nicht zur Bewertung der Sicherheit bei der Lagerung eines Batteriepacks/-systems, Fahrzeugherstellung, Reparatur und Wartungsarbeiten vorgesehen und gilt darüber hinaus nicht für:</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Lithiumzellen (Prüfung auf Zellebene ist in der Normenreihe IEC 62660 festgelegt);</li> <li>■ andere Batterien als Lithium-Ionen-Batterien;</li> <li>■ Primärbatterien (einschließlich Lithium-Batterien)</li> </ul>

Tabelle 5: Normen für Lithium-Ionen-Batterien, aufgeteilt nach Anwendungen

Weitere aktuelle Themen, bei denen zukünftig normative Dokumente erwartet werden können, betreffen u. a. Batteriesysteme mit modularem Aufbau, den Second-Use-Einsatz von Traktionsbatterien oder auch standardisierte Angaben von Kennwerten stationärer Speicher. Zudem rücken ökologische Fragestellungen auch aufgrund politischer Forderungen immer weiter in den Vordergrund.

# 5. Ausblick

Der Klimaschutzplan der Bundesregierung sieht vor, bis 2050 die jährlichen Treibhausgasemissionen, um bis zu 95 Prozent gegenüber dem Jahr 1990 zu senken. Neben Industrie, Gebäuden und Landwirtschaft stellen die Umstrukturierung der deutschen Energieversorgung sowie abgasfreie Mobilität wichtige Felder dar. Mit dem Ausbau der erneuerbaren Energie sollen fossile Brennstoffe für Energieversorgung und Verkehr einer umweltfreundlichen Energieversorgung schrittweise weichen. Ein wesentlicher Schlüsselfaktor für den Transformationsprozess der genannten Ziele ist die Batterietechnik. Der Batteriespeicher findet sich unter anderem sowohl in stationären Anwendungen zur Speicherung von elektrischer Energie aus regenerativen Stromerzeugern als auch zur Energieversorgung in Fahrzeugen wieder. Als Maßnahmen zur Zielerreichung sind der Aufbau der elektrochemischen Kompetenz sowie die Weiterentwicklung der aktuellen Batteriesysteme und deren Leistungsfähigkeit unabdingbar.

## 5.1 Zukünftige Batterie-Technologien

In der Forschung geht es um Aspekte wie

- eine höhere Energiedichte,
- kürzere Ladedauer,
- verbessertes Temperaturverhalten,
- geringere Kosten,
- erhöhte Sicherheit,
- höhere Umweltverträglichkeit und eine
- längere Lebensdauer.

Forscher weltweit stehen vor der Herausforderung, möglichst viele der Aspekte in einer leistungsfähigeren Technologie zu vereinen. Das größte Potenzial in der Optimierung der Akkus liegt in den Materialien. Experimentiert wird mit neuen Materialien oder alternativen Kombinationen bereits existierender Materialien. Ziel der Forschung sind leistungsfähigere Zusammensetzungen im Vergleich zu bisher gebräuchlichen Lithium-Ionen-Batterien zu finden. Im folgenden Abschnitt wird jeweils kurz exemplarisch auf einige Batteriechemien eingegangen, welche intensiv untersucht werden. Bisher gibt es noch einige Herausforderungen, die eine erfolgreiche Kommerzialisierung verhindern.

### Festkörperbatterie

Bei einer Festkörperbatterie wird anstelle eines flüssigen Elektrolyts ein Elektrolyt aus festem Material verwendet. Feste Elektrolyte werden intensiv erforscht, da sie viel höhere spezifische Energiedichten um 500 Wh/kg erreichen können. Die sogenannten Solid State Batterien verlangsamen durch ihre feste Struktur das Wachstum von Dendriten, daher gelten sie als die wahrscheinlichste Lösung zur industriellen Umsetzung von sekundären Li-Metall-Batterien. Im Labormaßstab sind bereits erste Erfolge mit festen Elektrolyten erzielt worden, ein häufiges Problem bei der Industrialisierung stellt bisher die Zyklenfestigkeit dar.

### Metall-Schwefel-Batterien

Ein Beispiel für alternative Zellmaterialien sind Metall-Schwefel-Batterien, der prominenteste Vertreter dieses Batterietyps ist die Lithium-Schwefel-Batterie. Der Rohstoff Schwefel ist preiswert und als Abfallprodukt bei der Abtrennung von Schwefelwasserstoff aus Erdgas und Erdöl in großen Mengen vorhanden. Die Kombination aus Lithium und Schwefel bietet eine hohe spezifische Energiedichte von theoretisch bis zu 860 Wh/kg. Bei gleicher Kapazität sind die Rohstoffkosten einer Metall-Schwefel-Batterie geringer als bei einem vergleichbaren Lithium-Ionen-System.

## Metall-Luft- und Metall-Sauerstoff-Batterien

Neben Metall-Schwefel-Batterien wird auch an Metall-Luft- und Metall-Sauerstoff-Batterien geforscht. Bei diesen Systemen wird die elektrische Energie mittels chemischer Reaktion von Metallen mit Sauerstoff freigesetzt. Eine Besonderheit stellt dabei der Sauerstoff dar, denn dieser soll im Idealfall über die Elektrode aus der Umgebungsluft gewonnen und nicht wie bei anderen Systemen in der Batterie vorgehalten werden. In der Theorie erzielen Metall-Luft- und Metall-Sauerstoff-Batterien eine höhere volumetrische Energiedichte (ca. 850–900 Wh/l) als andere. Diese können auch auf Lithium-Basis umgesetzt werden.

## Natrium-Ionen-Batterien

Natrium-Ionen-Batterien stellen eine Alternative zu Lithium-Ionen-Batterien dar. Denn Natrium ist reichlich vorhanden wie zum Beispiel in den Ozeanen und auch in der Erdkruste. Des Weiteren kann das Material kostengünstiger gewonnen werden als Lithium. Auch die bereits etablierten Fertigungsmethoden können für die Produktion von Natrium-Ionen-Batterien verwendet werden. Allerdings weisen Natrium-Ionen-Batterien sowohl eine geringere spezifische als auch volumetrische Energiedichte als Lithium-Ionen-Batterien auf.

## 5.2 CO<sub>2</sub>-Bilanz und Recycling

Das Bundeswirtschaftsministerium legt in seinen Thesen zur industriellen Batteriezellfertigung in Deutschland und Europa den zusätzlichen Fokus auf die „nachhaltigen und umweltverträglichen Produktions- und Entsorgungsbedingungen, z. B. geringer CO<sub>2</sub>- Ausstoß bei der Produktion [...] in der gesamten Wertschöpfungskette der Batterieherstellung [...]“<sup>17</sup>. Aufgrund der Klimaschutzziele der Bundesregierung und angesichts der wachsenden Bedeutung des Themas Klimaschutz bemühen sich viele Unternehmen um eine Reduzierung ihrer Emissionen. Zu den wichtigsten Möglichkeiten, wie sie ihren Teil zur Erreichung der Klimaziele beitragen können, zählen der konsequente Einsatz erneuerbarer Energien, gesteigerte Energieeffizienz sowie neue Produktionsverfahren.<sup>18</sup>

Eine Studie des World Economic Forum (WEF) schätzt das Potenzial der Emissionsreduktion bei einem batterieelektrischen gegenüber einem konventionellen Fahrzeug auf 50 %, wenn es gelingt, einen nachhaltigen Batterie-Kreislauf („Circular battery value chain“) zu etablieren.<sup>19</sup>

„Wird bei der Produktion auf einen hohen Anteil an erneuerbarer Energie gesetzt, wie beispielsweise durch eigen-erzeugten Strom aus Solaranlagen oder dem Bezug von Ökostrom, senkt dies die CO<sub>2</sub>-Bilanz. Weitere Ansatzpunkte sind die Lieferketten, Subunternehmen und die Rohstoffgewinnung. Aber auch der Ansatz einer Circular Economy für Batterien, die Grundlage hierfür bildet u. a. die Erfassung von Daten, welche verifiziert und nachvollziehbar mit der Batterie verknüpft werden. Bei der Gewinnung der Rohstoffe können die CO<sub>2</sub>-Emissionen beispielsweise durch eine gesteigerte Recyclingproduktivität reduziert werden. Mit steigender Anzahl von Elektroautos steigt zugleich die Nachfrage für die Entsorgung von Traktionsbatterien. Noch hat die Politik Zeit für die Erarbeitung regulatorischer Rahmenbedingungen. Lithium-Ionen-Batterien zeichnen sich durch eine lange Lebensdauer (abhängig vom Nutzungsverhalten) aus, daher werden noch einige Jahre vergehen, bis die erste größere Welle der Akkus recycelt wird. Das End of Life des sogenannten „First Life“ (1. Lebenszyklus) wird als erreicht angesehen, wenn je nach Anwendung die verfügbare Kapazität auf 70–80 % der Nennkapazität gefallen ist. Dies bedeutet jedoch noch nicht, den Akku sofort recyceln zu müssen. Es bietet sich die Möglichkeit einer Zweitanwendung, dem sogenannten „Second Life“, an. Hierfür wird die Batterie nach der Erstanwendung hinsichtlich ihres „State of Health“ (Gesundheitszustand) untersucht. Entspricht der Gesundheitszustand der Batterie den Anforderungen für das Second Life kann diese in einer Anwendung zum Einsatz kommen, die eine geringere Kapazität erfordert, beispielsweise als stationärer Energiespeicher. Erst zum Ende des Second Life wird die Batterie dem Recyclingprozess zugeführt. Deutsche Autohersteller wie auch das Bundeswirtschaftsministerium streben eine 90-prozentige Rückgewinnungs-Quote an. Anfangs sollen Pilotanlagen errichtet und diese langfristig in industriefähige Anlagen überführt werden. Durch das Recycling können wertvolle Rohstoffressourcen wie Cobalt, Kupfer und Nickel zurückgewonnen und in den Wertstoffprozess zurückgeführt werden.“<sup>20</sup>

17 [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/thesen-zur-industriellen-batteriezellfertigung-in-deutschland-und-europa.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/thesen-zur-industriellen-batteriezellfertigung-in-deutschland-und-europa.pdf?__blob=publicationFile&v=5), Abrufdatum 11.10.2020

18 Logistik, Energie und Mobilität 2030. Metastudie im BMWi Förderprogramm IKT für Elektromobilität. Geschäftsstelle der Begleitforschung IKT für Elektromobilität, Dezember 2020

19 <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/10/20201020-NPM-Bericht-AG6-RoadmapNachhaltigeMobilitaet-V2-wrz.pdf>

20 Logistik, Energie und Mobilität 2030. Metastudie im BMWi Förderprogramm IKT für Elektromobilität. Geschäftsstelle der Begleitforschung IKT für Elektromobilität, Dezember 2020

### 5.3 Regulatorischer Rahmen für Recycling und Nachhaltigkeit von Batterien

Zu regulatorischen Rahmenbedingungen für Batterien wurde seitens der Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) eine Schwerpunkt-Roadmap zur Nachhaltigen Mobilität – Standards und Normen veröffentlicht, auf die wir uns nachfolgend beziehen.<sup>21</sup>

Regulatorischer Rahmen für Batterien	
<b>Chemikalienverordnung 2006/1907/EC (REACH)</b>	Die Chemikalienverordnung 2006/1907/EC (REACH) regelt seit 2007 die Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung von Chemikalien innerhalb der EU. Davon betroffen sind zahlreiche Rohstoffe, die in der Batterie verbaut oder im Produktionsprozess eingesetzt werden.
<b>EU-Verordnung 493/2012</b>	Die EU-Verordnung 493/2012 regelt die Berechnung von Recyclingeffizienzen von Recyclingverfahren für Altbatterien und Altakkumulatoren.
<b>Richtlinie (EU) 2018/849</b>	Die Richtlinie (EU) 2018/849 regelt die Änderungen der Richtlinien 2006/66/EC (Batterien und Akkumulatoren), 2000/53/EG (Altfahrzeuge), 2012/19/EU (Elektro- und Elektronik-Altgeräte).

Tabelle 6: Regulatorischer Rahmen für Recycling und Nachhaltigkeit von Batterien

Laufende und bereits geplante Standards und Normen	
<b>Umweltaspekte</b>	
<b>DIN EN IEC 63218 (VDE 0510-218)</b>	Sekundärzellen und Sekundärbatterien mit alkalischen oder anderen nicht säurehaltigen Elektrolyten – Lithium-, Nickel-Kadmium- und Nickel-Metallhydrid-Sekundärzellen und -batterien für tragbare Anwendungen – Leitfaden zu Umweltaspekten
<b>Kennzeichnung</b>	
<b>DIN EN IEC 62902 (VDE 0510-902)</b>	Sekundärbatterien – Symbole für die Kennzeichnung zur Identifikation ihrer Chemie
<b>Wiederverwendung</b>	
<b>IEC 63330 (in Erarbeitung)</b>	Requirements for reuse of secondary batteries
<b>IEC 63338 ED1 (in Erarbeitung)</b>	General guidance for reuse of secondary cells and batteries
<b>IEC 62933-4-4 (in Erarbeitung)</b>	Electrical energy storage (EES) systems Part 4-4: Environmental requirements for BESS using reused batteries in various installations and aspects of life cycles
<b>VDE-Vornorm (in Erarbeitung)</b>	Stationärer Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien aus dem Fahrzeugbereich

Tabelle 7: Laufende und bereits geplante Standards und Normen

21 <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/10/20201020-NPM-Bericht-AG6-RoadmapNachhaltigeMobilitaet-V2-wrz.pdf>

# Verzeichnisse

## Abkürzungen

<b>ADR</b>	Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route, <i>dt. Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße</i>
<b>Ah</b>	Amperestunde
<b>BattG</b>	Batterie-Gesetz
<b>BEV</b>	Battery Electric Vehicle <i>dt. batterieelektrisch betriebenes Fahrzeug</i>
<b>BMS</b>	Battery Management System
<b>BMWi</b>	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
<b>BoL</b>	Beginning of Life <i>dt. Lebensdaueranfang</i>
<b>C-Rate</b>	Lade- oder Entladerate, Stromstärke auf die nominelle Batteriekapazität bezogen
<b>DoD</b>	Depth of Discharge <i>dt. Entladetiefe</i>
<b>EoL</b>	End of Life <i>dt. Lebensdauerende</i>
<b>GGVSEB</b>	Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt
<b>HEV</b>	Hybrid Electric Vehicle <i>dt. hybridelektrisch betriebenes Fahrzeug</i>
<b>Li</b>	Lithium
<b>LCO</b>	Lithium-Cobalt-Oxid
<b>LFP</b>	Lithium-Eisen-Phosphat
<b>LMO</b>	Lithium-Mangan-Oxid
<b>NCA</b>	Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid
<b>NMC</b>	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid
<b>PHEV</b>	Plug-In-Hybrid Electric Vehicle
<b>SOC</b>	State of Charge <i>dt. Ladezustand</i>
<b>SEI</b>	Solid Electrolyte Interphase

## Abbildungen

Abbildung 1:	Beispielhafter Aufbau und Funktion einer Lithium-Ionen-Zelle beim Entladevorgang	3
Abbildung 2:	Schematischer Aufbau eines Batteriesystems	6
Abbildung 3:	Vergleich der volumetrischen und spezifischen Energiedichten gegenwärtiger kommerzieller Batterien und zukünftiger möglicher Chemikalien	8
Abbildung 4:	Übersicht der Elektrodenpotentiale verschiedener Aktivmaterialien	11
Abbildung 5:	Lebensdauer bei unterschiedlichen Anwendungen ohne und mit Beschränkung des DOD	12
Abbildung 6:	Aufbau einer zylindrischen, einer prismatischen und einer Pouch-Zelle am Beispiel von LMO	16

## Tabellen

Tabelle 1:	C-Raten einer Li-Ionen-Zelle mit 2000 mAh im Zusammenhang mit Zeit und Strom	10
Tabelle 2:	Beispielhafte Maßnahmen zur Risikominimierung	14
Tabelle 3:	Übersicht weiterer Maßnahmen zur Batteriesicherheit	15
Tabelle 4:	Arten der Batteriebelastung	15
Tabelle 5:	Normen für Lithium-Ionen-Batterien, aufgeteilt nach Anwendungen	21
Tabelle 6:	Regulatorischer Rahmen für Recycling und Nachhaltigkeit von Batterien	24
Tabelle 7:	Laufende und bereits geplante Standards und Normen	24

VDE Verband der Elektrotechnik  
Elektronik Informationstechnik e. V.

Stresemannallee 15  
60596 Frankfurt am Main  
Tel. +49 69 6308-0  
[service@vde.com](mailto:service@vde.com)  
[www.vde.com](http://www.vde.com)

**VDE**