

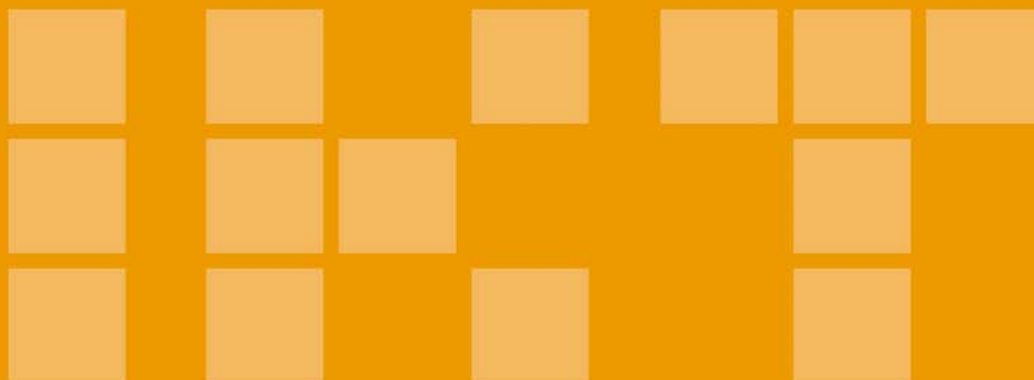


Kompendium: Li-Ionen-Batterien

**im BMWi Förderprogramm IKT für Elektromobilität II:
Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic**

Grundlagen, Bewertungskriterien,
Gesetze und Normen

Stand: Juli 2015



Autoren:

Ehsan Rahimzei (VDE)
Kerstin Sann (VDE/DKE*)
Dr. Moritz Vogel (VDE)

Mit fachlicher Unterstützung von:

Dr. Kai-Christian Möller (Fraunhofer ICT)
Dr. Thomas Becks (VDE)
Dr. Stefan Heusinger (VDE/DKE*)
Dirk Braun (Bridging IT GmbH)

Kontakt:

Wir sind an der kontinuierlichen Verbesserung unserer Arbeiten interessiert.
Bitte wenden Sie sich im Falle von Ergänzungsvorschlägen, Kritik oder Lob an
Herrn Ehsan Rahimzei (VDE): ehsan.rahimzei@vde.com

VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e. V.
Stresemannallee 15
60596 Frankfurt am Main

*Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE

06.04.2020

An die Leser des
Kompendiums Li-Ionen-Batterien

Wichtige Hinweise zum Kompendium Li-Ionen-Batterien:

Das Kompendium richtet sich an interessierte Laien und mögliche Anwender im Themenbereich Li-Ionen-Batterien, das den Stand von 2014/15 wiedergibt. Eine Überarbeitung durch den VDE ist geplant. Die Nutzung des Kompendiums als Quelle in Fachartikeln, Studien oder als alleinige Entscheidungsvorlage ohne vollständige Berücksichtigung der aktuellen Quellenlage sehen wir daher als kritisch an. Durch die Komplexität des Themas wurde das Kompendium bewusst als Einstieg für Laien und Anwender, nicht aber als vollständige Abhandlung zu Li-Ionen-Batterien verfasst.

Aufgrund der stetigen Weiterentwicklung der Lithium-Ionen-Batterien sowie der diesbezüglichen Regelungen und Vorschriften kann für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Angaben keine Gewähr übernommen werden.

Speziell zu dem Punkt der Kathodenmaterialien ist klarzustellen: im Kompendium Li-Ionen-Batterien des VDE von Juli 2015 werden beide Technologien, NMC und LFP als sicher bezeichnet. Die in Tabelle 4 (auf Seite 25) unter „Sicherheit“ dargestellte Einschätzung beruht auf den angegebenen Quellen und bezieht sich nur auf die Kathodenmaterialien selber und nicht auf ein gesamtes Batteriesystem, das das Kathodenmaterial enthält. Aus diesen, wie auch aus den in Kapitel 5.3 angegebenen Normen und Anwendungsregeln, speziell der IEC 62619 und der VDE-AR-E 2510-50, geht eindeutig hervor, dass für Sicherheit und Zyklenfestigkeit einer Batterie deutlich mehr als die reinen Kathodeneigenschaften relevant sind. Das Verhalten kompletter Zellen oder sogar Batterien ist u.a. durch Reaktionen mit den anderen Zellkomponenten und herstellungsbedingte Abweichungen damit nicht notwendigerweise gleichzusetzen.

Häufig gestellte Fragen werden in einem FAQ auf unserer Webseite beantwortet:
<https://www.vde.com/topics-de/energy/faq-batterien>

Anmerkungen oder Hinweise zum aktuellen Kompendium können Sie gerne an kerstin.sann@vde.com senden.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abkürzungsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis	VI
1 Vorwort.....	1
2 Grundlagen von Li-Ionen-Batterien.....	2
2.1 Primär- und Sekundärzellen	2
2.2 Aufbau und Funktion	2
2.2.1 Zelle	2
2.2.2 Modul	6
2.2.3 System	6
3 Bewertung von Li-Ionen-Batterien.....	9
3.1 Technische Kriterien	9
3.1.1 Energiedichte.....	9
3.1.2 Hochstromfähigkeit	10
3.1.3 Zellspannung.....	12
3.2 System-Kriterien	13
3.2.1 Lebensdauer	13
3.2.2 Sicherheit.....	16
3.2.3 Systembelastung.....	18
3.2.4 Bauform / Packaging.....	18
3.3 Ökologische und ökonomische Kriterien.....	20
3.3.1 Umweltaspekte.....	20
3.3.2 Wartungsaufwand	22
3.3.3 Wirtschaftlichkeit	23
3.4 Lithium-Materialsysteme im Vergleich.....	24
3.5 Bewertungsbeispiele nach Anwendung	27

4	Gesetzliche Regelungen und Normen zu Li-Ionen-Batterien.....	28
4.1	Kennzeichnung.....	28
4.1.1	Hinweispflichten	32
4.1.1.1	Vertreiber	32
4.1.1.2	Hersteller	33
4.2	Transport	33
4.2.1	Transport von gebrauchten Batterien	34
4.2.2	Transport von defekten Batterien	34
4.2.3	Übersicht wichtiger Informationen zum Transport.....	36
4.3	Verpackung von Batterien	43
4.3.1	Beschädigte Batterien	44
4.4	Sachgerechter Umgang.....	45
4.4.1	Tragbare Geräte.....	45
4.4.2	Stationäre Speicher	46
4.4.3	Elektrofahrzeuge	46
4.5	Prüfung.....	47
4.6	Lagerung	48
4.7	Rücknahme / Entsorgung / Recycling.....	49
5	Quellenverzeichnis	A
5.1	Literatur	A
5.2	Gesetze und Vorschriften	D
5.3	Normen	E
6	Stichwortverzeichnis	G

Abkürzungsverzeichnis

ADR	Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route, zu dt. Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße
Ah	Amperestunde
BattG	Batterie-Gesetz
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BEV	Battery Electric Vehicle, zu dt. batterieelektrisch betriebenes Fahrzeug
BMS	Battery Management System
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BoL	Beginn of Life, zu dt. Lebensdaueranfang
Cd	Cadmium
CID	Current Interrupt Device
C-Rate	zu dt. Lade- oder Entladerate, Stromstärke auf die nominelle Batteriekapazität bezogen
DoD	Depth of Discharge, zu dt. Entladetiefe
EoL	End of Life, zu dt. Lebensdauerende
EPTA	European Power Tool Association
G	Graphit
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft
GRS	Gemeinsames Rücknahmesystem
HEV	Hybrid Electric Vehicle, zu dt. hybridelektrisch betriebenes Fahrzeug
Hg	Quecksilber
HK	Herstellungskosten
IATA	International Air Transport Association, zu dt. Internationale Luftverkehrs-Vereinigung
IVG	Industrieverband Garten e. V.
IMDG	International Maritime Code for Dangerous Goods, zu dt. Gefahrgutkennzeichnung für gefährliche Güter im Seeschiffsverkehr
Li	Lithium

LCO	Lithium-Cobalt-Oxid
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat
LMO	Lithium-Mangan-Oxid
mAh	Milliamperestunden
M5BAT	Modularer multi-Megawatt multi-Technologie Mittelspannungsbatteriespeicher
NCA	Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid
Pb	Blei
PHEV	Plug-In-Hybrid Electric Vehicle
PTC	Positive Temperature Coefficient
RID	Règlement concernant le transport international ferroviaire de marchandises Dangereuses, zu dt. Ordnung über die internationale Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter
RoHS	Restriction of Hazardous Substances
SOC	State of Charge, zu dt. Ladezustand
SOH	State of Health, zu dt. Gesundheitszustand
SEI	Solid Electrolyte Interphase
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau und Funktion einer Lithium-Ionen-Zelle beim Entladevorgang.....	3
Abbildung 2: Aufbau eines Batteriesystems.....	7
Abbildung 3: Vergleich der volumetrischen und gravimetrischen Energiedichten etablierter (grau) als auch künftiger (orange) Materialsysteme mit Referenzzellen verschiedener Bauformen (18650 = Rundzelle mit 18 mm Durchmesser und 65 mm Höhe)	10
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Batterie-Kapazitätsabnahme bei verschiedenen Strömen	11
Abbildung 5: Übersicht der Elektrodenpotentiale verschiedener Aktivmaterialien (orange = negative Elektrode, dunkelgrau = positive Elektrode).....	12
Abbildung 6: Lebensdauer bei unterschiedlichen Anwendungen ohne und mit Beschränkung des SOC	14
Abbildung 7: Schematische Darstellung der Zyklenlebensdauer bei Beschränkung von SOC und DOD bis zur Restkapazität von 70 %	15
Abbildung 8: Aufbau einer zylindrischen (oben), einer prismatischen (Mitte) und einer Pouch-Zelle (unten)	19
Abbildung 9: Verwertbarkeit der Bestandteile einer Li-Ionen-Batterie (LFP) mit jeweiligem prozentualem Gewichtsanteil.....	22
Abbildung 10: Beispielhafte Angaben auf einer Li-Ionen-Batterie	30
Abbildung 11: Bild der Angaben auf einem Lithium-Akkumulator eines namhaften Smartphone-Herstellers	31
Abbildung 12: Bild eines Lithium-Akkumulators mit Angabe eines Codes.....	31
Abbildung 13: Abfertigungskennzeichen	32

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	C-Raten einer Li-Ionen-Zelle mit 2000 mAh im Zusammenhang mit Zeit und Strom	11
Tabelle 2:	Übersicht weiterer Maßnahmen zur Batteriesicherheit	17
Tabelle 3:	Wichtige Arten der Batteriebelastung	18
Tabelle 4:	Weltweite Marktsituation Li-Ionen-Batterie-Recycling	21
Tabelle 4:	Vergleich der Eigenschaften verschiedener Zellchemien von Li-Ionen-Batterien	25
Tabelle 5:	Qualitative Bewertung unterschiedlicher Li-Ionen-Batterie Anwendungen	27
Tabelle 6:	Übersicht wichtiger Informationen zum Transport.....	42

1 Vorwort

Seit Beginn ihrer Markteinführung Anfang der 90er Jahre haben die Lithium-Ionen-Batterien einen Siegeszug durch viele Anwendungen angetreten. Fanden die ersten Lithium-Ionen-Batterien noch ausschließlich im Consumermarkt (Mobiltelefone, Laptops) Anwendung, so erschließen die weiterentwickelten Lithium-Ionen-Batterien stetig neue Anwendungsgebiete. Netbooks, Tablet Computer oder Smart Watches wären ohne diese „Energiepakete“ kaum zu realisieren gewesen. Parallel zur Steigerung der Energiedichten haben sich die Leistungsdaten verbessert. Lithium-Ionen-Batterien lassen sich inzwischen für Elektrowerkzeuge (Power Tools) bis hin zu Elektrorasenmähern einsetzen. Die Verfügbarkeit und das Marktangebot sorgen zudem dafür, dass Lithium-Ionen-Batterien sogar für stationäre Speicher im Privat- und Industriebereich genutzt werden. Auch das Potential der Lithium-Ionen-Batterien zur CO₂-Einsparung in automobilen Anwendungen, wie z. B. in Hybrid- oder reinen Elektrofahrzeugen, wird gerade in den letzten Jahren immer mehr ausgeschöpft. Damit spielen Lithium-Ionen-Batterien eine wichtige Rolle mit Blick auf das Ziel der Bundesregierung, Deutschland zum Leitmarkt für Elektromobilität zu machen und bis 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen zu bringen.



Vor diesem Hintergrund ist im Rahmen der Begleitforschung des Forschungsprogramms IKT für Elektromobilität II des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) das vorliegende Kompendium entstanden. In dem Programm, das moderne Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) als kritischen Erfolgsfaktor der Elektromobilität in den Mittelpunkt seiner Forschungsarbeiten stellt, wurden insgesamt 18 Modellprojekte gefördert, die auf der Basis von IKT neue Konzepte und Technologien für das Zusammenspiel von intelligenter Fahrzeugtechnik im Elektroauto (Smart Car) mit Energieversorgungs- (Smart Grid) und Verkehrssteuerungssystemen (Smart Traffic) entwickeln. Dabei unterstützen der VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. und das Deutsche Dialog Institut im Auftrag des BMWi die Modellprojekte bei der Identifizierung und Überwindung von Innovationshürden, bei der projektübergreifenden Zusammenarbeit und beim Ergebnistransfer.

Angesichts der zunehmenden Bedeutung und Verbreitung von Lithium-Ionen-Batterien soll das vorliegende Kompendium interessierten Laien und möglichen Anwendern als Einführung in den Themenbereich dienen. Es bietet 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, systemischen sowie ökologischen und ökonomischen Kriterien beleuchtet, die als Entscheidungsgrundlagen zur Beschaffung von Lithium-Ionen-Batterien herangezogen werden können. Und schließlich werden die zurzeit aktuellen gesetzlichen Regelungen und Normen vorgestellt: von der Kennzeichnung, Lagerung, Verpackung und dem Transport bis zu den unterschiedlichen damit verknüpften Test- und Prüfverfahren.

Aufgrund der stetigen Weiterentwicklung der Lithium-Ionen-Batterien sowie der diesbezüglichen Regelungen und Vorschriften kann für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Angaben keine Gewähr übernommen werden.

Kai-C. Möller

Dr. Kai-Christian Möller
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT
Fraunhofer-Allianz Batterien

2 Grundlagen von Li-Ionen-Batterien

Lithium (Li)-Ionen-Batterien werden bereits in vielen Anwendungsbereichen erfolgreich zur effektiven Speicherung elektrischer Energie genutzt. Auch im Bereich Elektromobilität nehmen sie eine herausragende Stellung ein. Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über den grundlegenden Aufbau und die Funktion von Li-Ionen-Zellen und -Systemen.

2.1 Primär- und Sekundärzellen

Batterien sind elektrochemische Energiespeicher und werden in Primär- und Sekundärzellen unterschieden. **Primärzellen** sind elektrochemische Stromquellen, bei denen chemische in elektrische Energie umgewandelt wird und die ablaufende Redoxreaktion irreversibel bleibt. Irreversibel bedeutet dabei, dass die Zelle nach Entnahme der Energie nicht mehr nutzbar ist und eine Entsorgung über ein Rücknahmesystem erfolgen muss.

Sekundärzellen, auch **Akkumulatoren** genannt, sind dagegen wiederaufladbare elektrochemische Energiespeicher, bei denen die ablaufende chemische Reaktion umkehrbar ist, sodass 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 wird in den meisten Fällen die **Lebensdauer** einer Zelle angegeben. Je nach Art, Anwendung und Handhabung erreichen wiederaufladbare Batterien eine Zyklenlebensdauer von 100 bis mehrere 1.000 Zyklen.

Die **Li-Ionen-Batterie**¹ gehört zur Gruppe der Sekundärzellen. Sie stellt nach Meinung vieler Experten aufgrund ihrer zahlreichen Vorteile gegenüber anderen Sekundärzellarten die zukunftsweisende Speichertechnologie im mobilen als auch stationären Einsatz dar. Die folgenden Kapitel befassen sich deshalb ausschließlich mit diesem Batterietyp.

2.2 Aufbau und Funktion

2.2.1 Zelle

Jede Li-Ionen-Zelle (siehe Abbildung 1) besteht zunächst aus zwei unterschiedlichen Elektroden, einer negativen Elektrode auch **Anode** genannt und einer positiven Elektrode auch **Kathode** genannt². Die Elektroden setzen sich jeweils aus einem Stromableiter und einem darauf aufgebrachtten **Aktivmaterial** zusammen. Zwischen den Elektroden befinden sich zum einen der ionenleitende **Elektrolyt**, der als Vermittler der Vorgänge in der Zelle wirkt, und der **Separator**, der die elektronische Trennung der Elektroden gewährleistet.

¹ Als Synonym wird in den folgenden Ausführungen der Begriff Li-Ionen-Akkumulator genutzt.

² 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 eingebürgert immer den Entladevorgang als Definition für die Begrifflichkeiten Anode und Kathode zu verwenden.

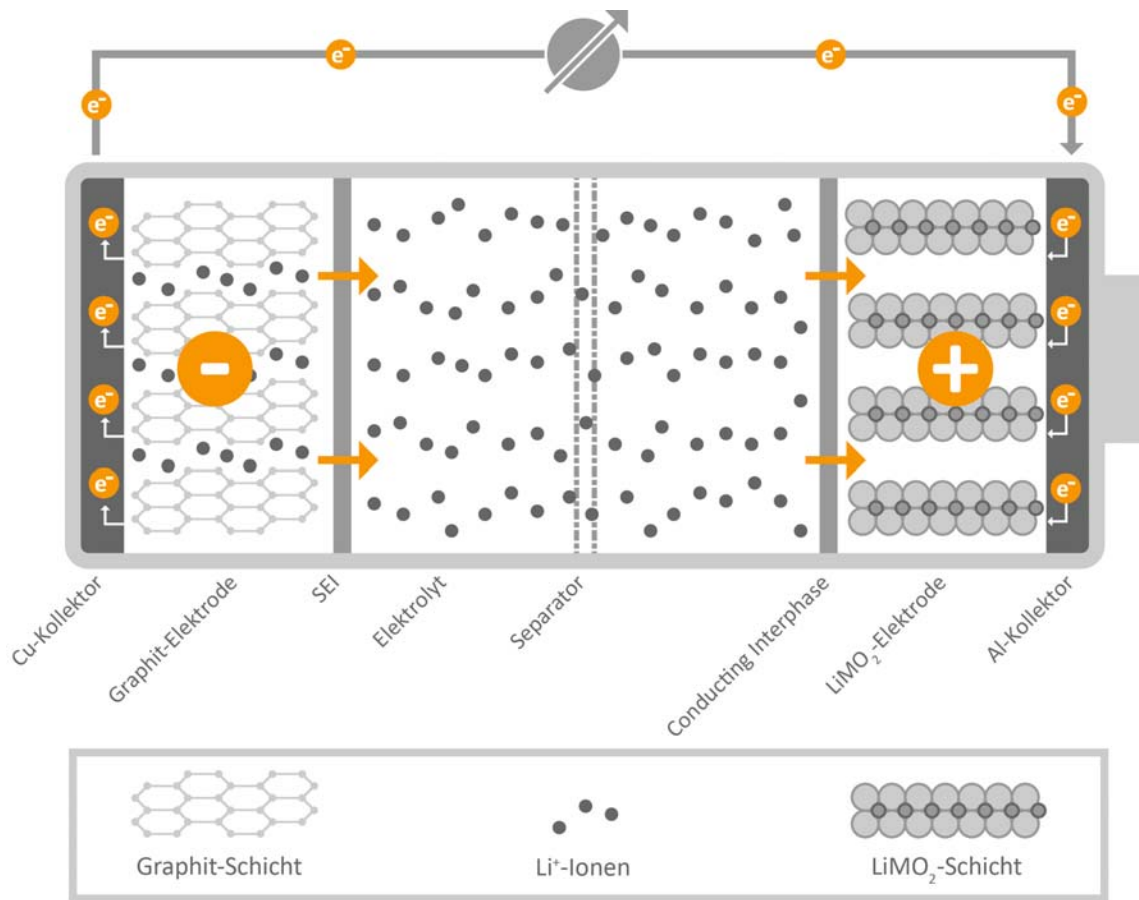


Abbildung 1: Aufbau und Funktion einer Lithium-Ionen-Zelle beim Entladevorgang³

Die **negative Elektrode** der Zelle besteht aus einer Kupferfolie und einer Schicht aus Graphit oder Lithium-legiertem Material. In ihr werden während des Ladens die für die Leistungsbereitstellung benötigten positiv geladenen Lithium-Ionen eingelagert. Graphitanoden sind aktuell die gängigste Wahl, da sie ein niedriges Elektrodenpotential⁴ und eine geringe Volumenausdehnung bei der Einlagerung von Li^+ -Ionen aufweisen. Für besonders hohe Leistungs- und Sicherheitsanforderungen bietet Lithium-Titanat eine interessante Alternative. Nachteilig sind hier jedoch u. a. geringe Energiedichten und hohe Kosten.⁵

Die **positive Elektrode** besteht aus Mischoxiden, die auf einem Aluminiumkollektor aufgebracht sind. Übergangsmetalloxide mit Cobalt, Mangan oder Nickel sind dabei die gängigsten Verbindungen. Die auf-

³ Eigene Darstellung in Anlehnung an Goodenough, J.; Abruna, H. D.; Buchanan, M.V. (2007): *Basic Research Needs for Electrical Energy Storage*, Office of Basic Energy Sciences, U.S. Department of Energy, Washington D.C., S. 11

⁴ 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 metallischem Lithium gemessen, da dessen Potential konstant ist. Letzteres wird dabei als Ausgangswert auf den Wert null festgelegt. Nähere Angaben hierzu samt schematischer Darstellung finden sich in Kapitel 3.1.3.

⁵ Wurm, C. et al. (2013): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien – Kapitel 5: Anodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien*, Springer Vieweg, Heidelberg, S. 46–47, S. 55–56

gebrachte Oxidschicht dient bei der Ladung der Zelle als Lithiumquelle. Aus ökologischen Gründen werden häufig Manganoxide anstatt Cobaltoxide verwendet. Eine sowohl ökologische als auch sicherheitstechnisch gute Alternative ist Lithium-Eisen-Phosphat (LFP). Näheres zu diesem und weiteren Aktivmaterialien für die positive Elektrode findet sich in Kapitel 3.4.

Derzeit ist **Lithium** das ideale Aktivmaterial im breiten Einsatz von Primärbatterien. Lithium

- ist das leichteste Element in Feststoffform (Atommasse $M = 6,941 \text{ g/mol}$; Dichte $0,53 \text{ g/cm}^3$) und
- besitzt das größte negative Standardpotential⁶ (E^0) in der elektrochemischen Spannungsreihe ($\text{Li}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Li}$; $E^0 = -3,04 \text{ V}$ vs. Standard-Wasserstoffelektrode).

Daraus ergibt sich eine im Vergleich mit anderen Feststoffelementen sehr hohe spezifische Ladungsdichte (3.860 Ah/kg)⁷. In Kombination mit unterschiedlichen Elektrodenmaterialien sind entsprechend sehr hohe Spannungen erzielbar.

Bei Primärzellen wird reines Lithium-Metall für die negative Elektrode verwendet. Vorteile im Vergleich zu herkömmlichen Primärzellen wie Alkali-Mangan-Zellen sind eine höhere Zellspannung (V), je nach verwendeter Kathode eine höhere Energiedichte, eine geringe Selbstentladung, lange Lagerfähigkeit und weite Temperaturbereiche bei Betrieb.

Bei Sekundärzellen kann metallisches Lithium nicht verwendet werden, denn beim Wiederaufladen der Batterie besteht die Gefahr, dass sich **Lithium-Dendrite**⁸ bilden, die zu einer Durchbohrung des Separators und einem gleichzeitigen Kurzschluss der Zelle führen können. Durch die Entstehung von Dendriten kann es zudem zu einem Verlust der elektrochemisch nutzbaren Menge an Lithium kommen, da sich metallisches Lithium von der Elektrode ablösen kann. Die Folge wäre ein Kapazitätsverlust.

Stattdessen werden Wirtsmaterialien verwendet, die Lithium-Ionen aufnehmen können. Während dem **Entladen** (siehe Abbildung 1) wandern Lithium-Ionen von der Anode durch Elektrolyt und Separator hin zur Kathode, wo sie eingelagert werden. Durch den ablaufenden Oxidationsprozess werden gleichzeitig 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. Lithium-Ionen wandern von der Kathode zur Anode, wo sie reversibel eingelagert werden.⁹

⁶ Jedes Verhalten einer Redoxreaktion kann durch zwei Paare beschrieben werden. Die Differenz des Standard-elektrodenpotentials zur Standard-Wasserstoffelektrode, die zu dem Redoxpaar gehört, nennt man Standardpotential. In der elektrochemischen Spannungsreihe sind die Standardpotentiale unterschiedlicher Elemente hinterlegt.

⁷ Spezifische Ladungsdichte = Faraday-Konstante (96485 As/mol) / Atommasse Li ($6,941 \text{ g/mol}$)

⁸ Spitze baum- bzw. drahtartige Gebilde, die an den Elektroden entstehen können.

⁹ Leuthner, S. (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien – Kapitel 2: Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien, Springer Vieweg, Heidelberg, S. 14–15

Der **Elektrolyt** fungiert bei diesen Vorgängen als Vermittler zwischen den Reaktionen an den Elektroden und garantiert den Li-Ionen-Transport. Dabei muss er sich u. a. aktuell in einem Spannungsbereich von 0 bis 4,5 V stabil verhalten sowie eine hohe Leitfähigkeit über einen weiten Temperaturbereich (von -40 °C bis +80 °C) gewährleisten.¹⁰ Im Bereich von Lithium-Ionen-Batterien sind drei Formen von Elektrolyten anzutreffen:

- **Flüssig:** Der Elektrolyt ist meist organischen Ursprungs und besteht aus einem Li-Ionen-enthaltenden Leitsalz, das in ein nichtwässriges Lösungsmittel gegeben wird. Er darf nur möglichst wenig Feuchtigkeit aufweisen, da die Anoden mit Wasser hochreaktiv sind. Ein erhöhter Wassergehalt im Elektrolyt führt in Verbindung mit den verwendeten Salzen zur Bildung von Flusssäure und kann die Elektroden schädigen.
- **Polymer:** Da das Austreten der Polymere nicht möglich ist, ist die Verwendung von starren Behältern überflüssig und somit eine leichtere Bauweise möglich. Darüber hinaus besteht dadurch eine erhöhte Sicherheit gegenüber flüssigem Elektrolyt. Nachteilig ist jedoch die geringere Leitfähigkeit.
- **Fest:** Aufgrund der ungünstigen Relation von Vor- und Nachteilen und Kosten-Nutzen-Aspekten finden feste Elektrolyttypen in der Praxis fast keine Anwendung. Nachteilig sind vor allem die geringe Leitfähigkeit und das Einbringen in die Batterie.¹¹

In geeigneten Elektrolyten bildet sich eine für Elektronen isolierende Deckschicht auf der Anode aus, die sogenannte **Solid Electrolyte Interphase (SEI)**, die die Anode vor der korrodierenden Elektrolytlösung schützt und gleichzeitig für Lithium-Ionen durchlässig ist. Diese Schicht ist essentiell für den Einsatz von Lithium bzw. Lithium-Ionen-Einlagerungsverbindungen in Primär- und Sekundärzellen. An der positiven Elektrode wird in diesem Zusammenhang eher von einer **Conductive Interphase** gesprochen. Die Leistungsfähigkeit und Alterung einer Zelle ist abhängig von der Stabilität der SEI. Durch Lade- und Entladeprozesse wächst die Schicht und dadurch auch der Widerstand in der Zelle. Damit sind ein Verlust von Lithium-Ionen bzw. Kathodenmaterial und Elektrolyt und eine entsprechende Verringerung der Zellspannung und **Ladungsmenge**¹² (Ah) verbunden. Um dies zu vermeiden, wird in der Regel ein Überschuss an Elektrolyt und Kathodenmaterial in der Zelle genutzt.¹³

¹⁰ Hartnig, C.; Schmidt, M. (2013): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien – Kapitel 6: Elektrolyte und Leitsalze*, Springer Vieweg, Heidelberg, S. 61–62

¹¹ http://wiki.zimt.uni-siegen.de/fertigungsautomatisierung/index.php/Lithium-Ionen-Batterien_für_Elektroautos_von_morgen_-_Zellenkonzepte_und_ihre_Herausforderungen_an_die_Fertigungstechnologien (Zugriff: 25.08.2014) / Hartnig, C.; Schmidt, M. (2013): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien – Kapitel 6: Elektrolyte und Leitsalze*, Springer Vieweg, Heidelberg, S. 74

¹² Zur Verfügung stehende elektrische Ladung von Batterien, welche in Amperestunden (Ah) angegeben wird. Eine Amperestunde ist die Ladungsmenge, die innerhalb einer Stunde durch einen Leiter fließt, wenn der elektrische Strom konstant 1 A beträgt.

¹³ Wallentowitz, H.; Freialdenhoven A. (2011): *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges – Technologien, Märkte und Implikationen*, 2. überarbeitete Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, S. 109

Der **Separator** trennt die beiden Elektroden voneinander, um einen aus direktem Kontakt resultierenden Kurzschluss zu verhindern. Dementsprechend hohe Anforderungen stellen sich an diese Komponente.¹⁴

In den meisten Zellen verhindert der Separator bei einer Fehlfunktion (ab einer bestimmten Temperatur), dass sich Ionen weiter von der Anode zu Kathode bewegen. Die Durchlässigkeit für den Ionenfluss geht damit verloren. Die mechanische Stabilität jedoch bleibt. Dadurch wird ein Überhitzen mit anschließendem Brand der Zelle verhindert. Als Materialien werden teilweise Polymer-Membranen eingesetzt. Diese haben jedoch den Nachteil, dass sie durch ihre geringe Schmelztemperatur (ca. 165 °C) im Vergleich zu keramischen Separatoren eine geringe Sicherheit aufweisen. Letztere besitzen durch ihre Hitzebeständigkeit vorteilhaftere Eigenschaften als Separator. Zudem werden häufig Vliesstoffe und Glasfaser-Separatoren verwendet.¹⁵

2.2.2 Modul

Die Spannungslage einer 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. Über die letzten Jahre ist hier eine stetige Weiterentwicklung der maximalen Spannungen zu verzeichnen. Da die **Spannung (V)** einer einzelnen Zelle bei den meisten Akkutypen und Anwendungen wie beispielsweise in elektromobilen Anwendungen nicht für den praktischen Einsatz reicht, werden mehrere Zellen zu einem **Modul** (auch „Pack“ genannt) in Reihe geschaltet. Dies hat jedoch auch zur Folge, dass bei Ausfall einer Zelle der komplette Stromkreislauf im Modul unterbrochen wird.

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

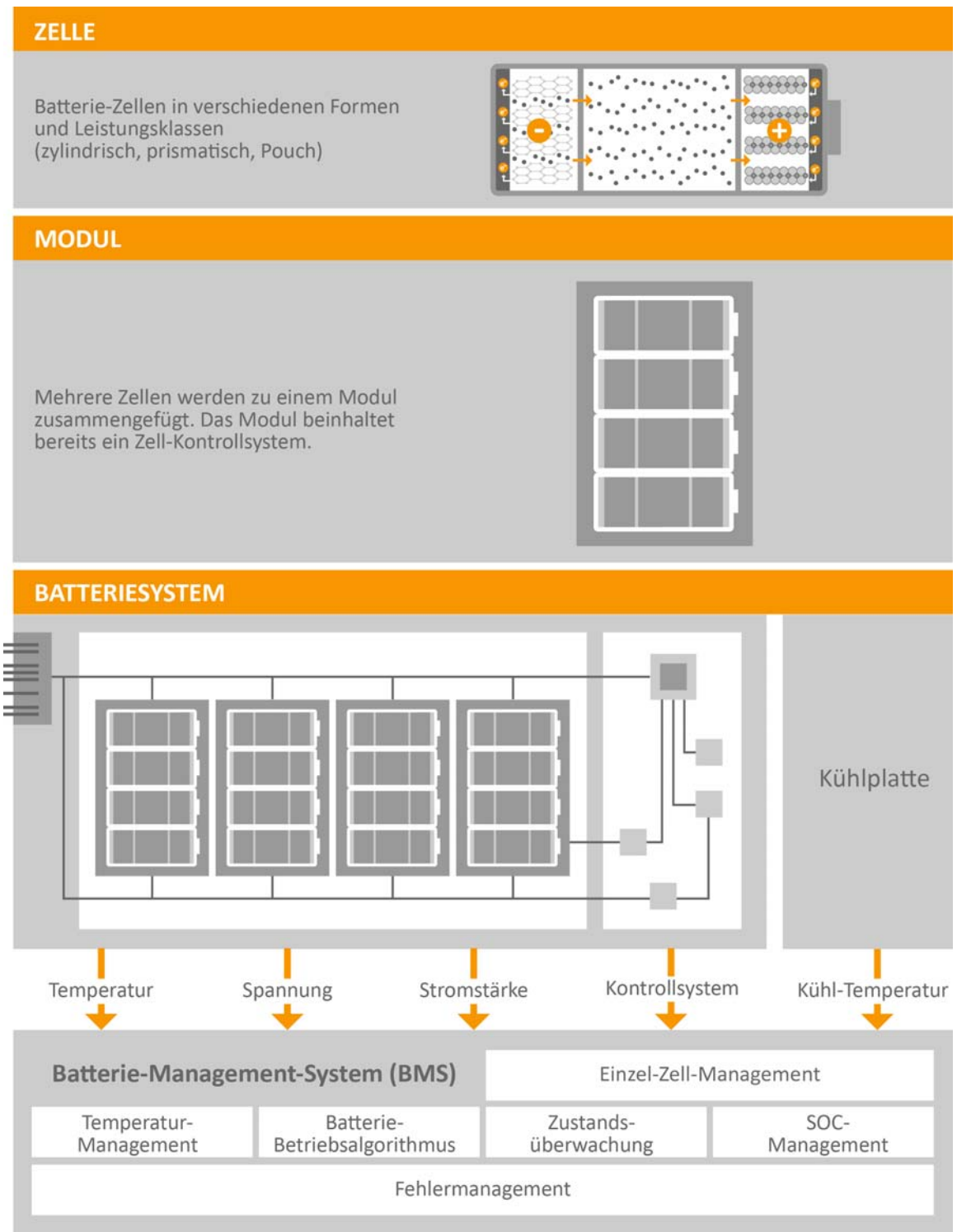
Eine **Parallelschaltung** dagegen bewirkt eine Erhöhung der Ladungsmenge (Ah) des Akkupacks bei gleich bleibender Spannung und gleichzeitiger Erhöhung des maximalen Entladestroms bzw. der Hochstromfähigkeit. Entsprechend der geforderten Anwendungskapazität wird eine bestimmte Anzahl an Zellen oder Modulen parallel geschaltet.

2.2.3 System

Das **Batteriesystem** (siehe Abbildung 2) besteht neben verschalteten elektrochemischen-Zellen bzw. Modulen 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.

¹⁴ Näheres hierzu in Weber, C.J.; Roth, M. (2013): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien – Kapitel 7: Separatoren*, Springer Vieweg, Heidelberg / Arora, P.; Zhang, Z. (2004): *Battery Separators*, Chem. Rev (Chemical Reviews) 104 (10), S. 4419–4462

¹⁵ Für nähere Informationen siehe Weber, C. J.; Roth, M. (2013): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien – Kapitel 7: Separatoren*, Springer Vieweg, Heidelberg, S. 86–91

Abbildung 2: Aufbau eines Batteriesystems¹⁶

¹⁶ Eigene Darstellung in Anlehnung an Schlick, T.; Hertel, G. et al. (2011): *Zukunftsfeld Elektromobilität – Chancen und Herausforderungen für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau*, Studie, VDMA und Roland Berger Strategy Consultants, Frankfurt/München

Die wichtigste elektronische Komponente ist das **Batteriemanagementsystem (BMS)**, das beim Be- und Entladen neben der Steuerung und Überwachung des **State of Charge (SOC)**¹⁷ auf Zell- und Systemebene zusätzlich die Funktion als Schnittstelle zwischen Elektrofahrzeug- und Akkumulator-Kommunikation übernimmt. Unter Verwendung von Sensorik werden Strom, Spannungen, Temperaturen der Einzelzellen und des Gesamtsystems gemessen und geregelt. Damit trägt das BMS als ein zentraler Bestandteil zur Sicherheit bei. Darüber hinaus ermöglicht es die Fehlerprotokollierung und das Zu- und Abschalten des Systems.¹⁸

Das BMS optimiert zudem durch die so genannte **Balancing-Funktion** die nutzbare **Kapazität** des Systems. Hintergrund ist hierbei, dass fertigungs- und nutzungsbedingt die Kapazitäten und die Innenwiderstände einzelner Zellen schwanken. Bei mehreren verschalteten Zellen führen diese Unterschiede dazu, dass Zellen unterschiedlich be- und entladen werden. Dies kann vereinzelt zu **Tiefenentladungen** oder **Überladungen** von Zellen führen und entsprechend großen Einfluss auf die Lebensdauer und die generelle Funktion des Systems haben. Durch das Zellen-Balancing werden diese Prozesse verhindert, die nutzbare Kapazität maximiert und gleichzeitig die Lebensdauer erhöht.¹⁹ Im Zusammenhang mit der noch nutzbaren Kapazität wird auch vom so genannten **State of Health (SOH)** gesprochen, welcher die Restkapazität beschreibt.

Eine weitere wichtige Funktion des BMS ist zudem die Steuerung des **Thermomanagements**, da die Leistungsfähigkeit und die Alterung der Zellen stark von der Temperatur abhängig sind. Erhöhte Temperaturen führen bspw. zu einer schnelleren Degradation der Materialien und einer schnelleren Alterung der Batterie. Tiefe Temperaturen können zu einer Behinderung des Stromflusses führen, da die Leitfähigkeit im Elektrolyt dadurch geringer wird. Das System wird daher bei hohen Temperaturen unter Verwendung des Kühlsystems ggf. gekühlt oder bei kälteren Witterungsbedingungen auch geheizt, um den Normalbetrieb und eine optimale Leistungsabgabe und Lebensdauer zu gewährleisten. Beide Funktionen können je nach Anwendung erhebliche Auswirkungen auf den Gesamtstromverbrauch und damit auch auf die rein elektrische Reichweite eines EV haben.²⁰ Das Kühlsystem wird hier entweder mit Luft, Wasser oder anderen Kühlflüssigkeiten betrieben.

Das **Gehäuse** mit dazugehörigem Kühlsystem schirmt die zum Teil empfindlichen aktiven und passiven Komponenten des Akkumulatorsystems vor schädlichen Umwelteinflüssen (Wasser, Staub etc.) ab. Daher ist es für den sicheren, zuverlässigen, und langfristigen Betrieb entscheidend. Gerade bei Automotive-Batterien, die meist im Bodenbereich des Fahrzeugs untergebracht sind, kann das Gehäuse unter Umständen extremen Einflüssen wie Steinschlag, Spritzwasser etc. ausgesetzt sein. Eine hohe mechanische Stabilität und Korrosionsbeständigkeit ist daher wichtig. Bei der Auslegung des Akkusystems ist neben dem Gehäuse auch zusätzlich auf interne und externe Befestigungssysteme zu achten, die den teils hohen mechanischen und thermischen Belastungen gerecht werden müssen.

¹⁷ SOC: State of Charge zu dt. Ladezustand

¹⁸ Köhler U. (2013): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien – Kapitel 8: Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen*, Springer Vieweg, Heidelberg, S. 95

¹⁹ Wen, S. (2009): *Cell balancing buys extra run time and battery life*, Analog Applications Journal 10, S. 14–18

²⁰ Dorn R. et al. (2013): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien – Kapitel 14: Batteriemanagementsystem*, Springer Vieweg, Heidelberg, S. 179

3 Bewertung von Li-Ionen-Batterien

Die Eignung einer Li-Ionen-Batterie für mobile oder stationäre Anwendungen hängt von technischen, systemischen, ökonomischen sowie ökologischen Aspekten ab. Je nach Anforderungen und Einsatzzweck sind unterschiedliche Kriterien zur Wahl eines geeigneten Systems heranzuziehen. Diese Kriterien werden im folgenden Kapitel vorgestellt und in anschließenden Beispielbewertungen unterschiedlichster Anwendungen als mögliche Entscheidungshilfe zur Batterie-Beschaffung herangezogen.

3.1 Technische Kriterien

3.1.1 Energiedichte

Die **Energiedichte** ist ein Maß für das Energiespeichervermögen einer Zelle bzw. eines gesamten Akkusystems und hat damit direkten Einfluss auf die erzielbare Reichweite eines rein elektrisch betriebenen Fahrzeugs mit Traktions-Akkumulator. Sie wird beschrieben als **spezifische Energie (Wh/kg, auch „gravimetrische Energiedichte“)** oder **Energiedichte (Wh/l, auch „volumetrische Energiedichte“)**. Erstere errechnet sich über das Produkt aus **spezifischer Ladungsdichte**²¹ (Ah/kg) und Zellspannung (V) und definiert den gespeicherten Energiegehalt pro Masse des Akkus. Die volumetrische Energiedichte definiert dagegen den Energiegehalt pro Volumen des Akkus und ergibt sich aus dem Produkt der **Ladungsdichte (Ah/l, auch volumetrische Ladungsdichte)** und der Zellspannung. Eine Zelle mit hoher Energiedichte setzt eine Kombination zweier Elektrodenmaterialien mit hoher Ladungsdichte und hoher Potentialdifferenz voraus. In Abbildung 3 sind mögliche Energiedichten unterschiedlicher Batterietypen visualisiert, um deutlich zu machen, welche Eignung Lithium als Elektrodenmaterial verglichen mit anderen Materialsystemen besitzt.

Wie zu sehen ist, decken speziell Li-Ionen-Batterien (inklusive LFP und Li-Titanat) ein weites Spektrum im Bereich der Energiedichten ab. So können aktuell (je nach Zellchemie) ca. 90–250 Wh/kg bzw. 160–670 Wh/l erreicht werden. Für zukünftige Li-Ionen-Batterien werden Energiedichten von bis zu 310 Wh/kg bzw. 860 Wh/l erwartet. Zusätzlich wird aktuell an Batterietypen geforscht, welche theoretisch die sehr hohen Energiedichten der Li-Ionen-Zellchemien übersteigen können.

Da die Energiedichte als technisches Kriterium maßgeblich das Eigengewicht und das Gehäusevolumen des Akkusystems beeinflusst, ist sie gerade bei mobilen Anwendungen wie bspw. bei einem rein batterieelektrisch betriebenen Fahrzeug (BEV) ein entscheidender Faktor für die Reichweite. Je größer die Energiedichte, umso leichter bzw. kleiner wird der Akku bei gleichbleibender Kapazität. Bei stationären Anwendungen sind diese Faktoren nicht prioritär zu beachten. Hier können auch, je nach Anforderungen, andere Batteriesysteme wie Blei-Säure-Batterien mit niedrigeren Energiedichten in Betracht gezogen werden.

²¹ Die spezifische Ladungsdichte wird durch das molekulare Gewicht (bzw. Dichte) des Wirtsmaterials und die Anzahl der Li-Ionen bestimmt, die reversibel in dessen Struktur aufgenommen werden können. Siehe auch Fußnote 6

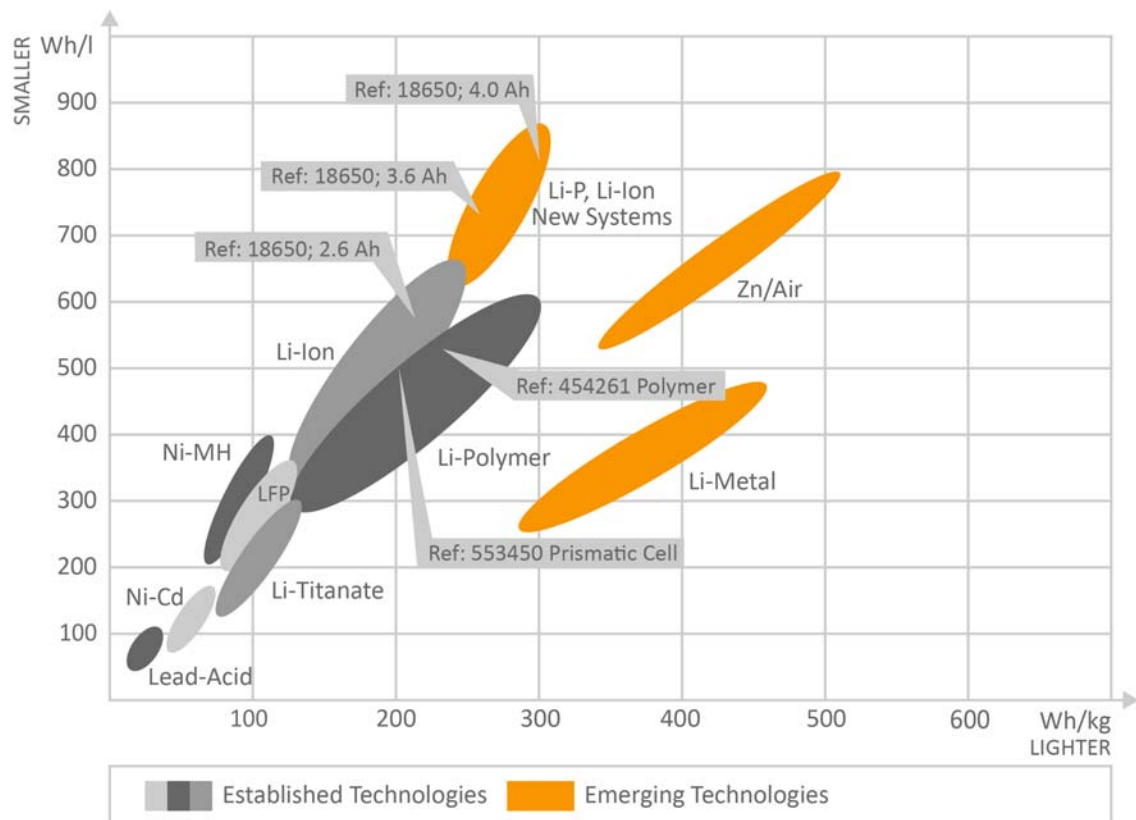


Abbildung 3: Vergleich der volumetrischen und gravimetrischen Energiedichten etablierter (grau) als auch künftiger (orange) Materialsysteme mit Referenzzellen verschiedener Bauformen (18650 = Rundzelle mit 18 mm Durchmesser und 65 mm Höhe)²²

3.1.2 Hochstromfähigkeit

Li-Ionen-Batterien können in **energieoptimierte Batterien** mit hohen Kapazitäten, geringen Leistungsdichten und durchschnittlichen Entladeströmen sowie **leistungsoptimierte Batterien** mit geringeren Energiedichten, hohen Leistungsdichten und kurzzeitig sehr hohen Entladeströmen unterschieden werden.²³ 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 zudem 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.

²² <http://www.iccnexergy.com/battery-systems/battery-energy-density-comparison/> (Zugriff: 26.08.2014)

²³ Beermann, M.; Jungmeier, G.; Wenzel, J.; Spitzer, J.; Canella, L.; Engel, A.; Schmuck, M.; Koller, S. (2010): *Quo Vadis Elektroauto? – Grundlagen einer Road Map für die Einführung von Elektro-Fahrzeugen in Österreich*, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), Institut für Energieforschung, Graz, S. 27

Für eine hohe **gravimetrische Leistungsdichte** (W/kg) bzw. **volumetrische Leistungsdichte** (W/l) und einen schnellen Lade- und Entladevorgang der Zellen bzw. des Systems (z. B. bei Schnellladung bzw. Beschleunigung) ist die **Hochstromfähigkeit** daher entscheidend. Mit der **C-Rate** kann die Größe des Lade- und Entladestromes unabhängig von der Kapazität verschiedener Zellen angegeben werden. Diese ist für das Laden der Batterie deutlich geringer als beim Entladen. Die Bezeichnung C steht für die jeweiligen Ströme, die als Bruchteil bzw. Vielfache der seitens des Herstellers angegebenen Nennkapazität angegeben werden.²⁴

Beispiel: Li-Ionen-Zelle mit einer Nennkapazität von 2000 mAh

C-Rate	Zeit für 2000 mA (theor.)	Strom pro Stunde
1C	1 Stunde	2000 mA
0,5C	2 Stunden	1000 mA
2C	30 Minuten	4000 mA
30C	2 Minuten	60000 mA

Tabelle 1: C-Raten einer Li-Ionen-Zelle mit 2000 mAh 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 damit einhergehende Zell-Reaktionen einen negativen Einfluss auf die Zyklenfestigkeit bzw. Lebensdauer der Batterie (siehe Abbildung 4).

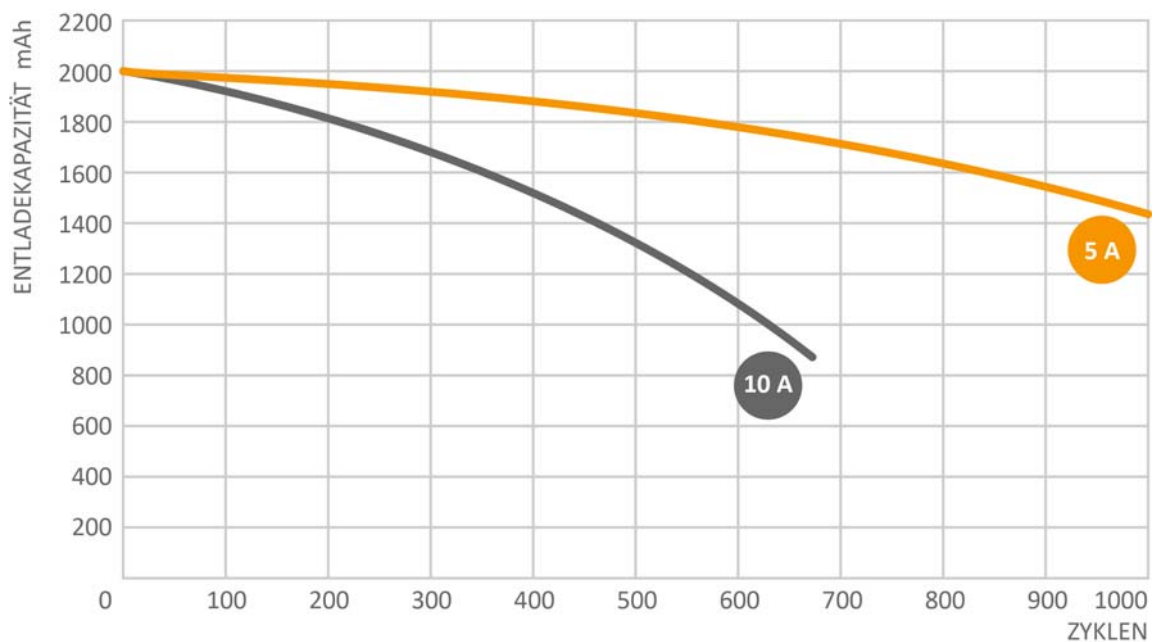


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Batterie-Kapazitätsabnahme bei verschiedenen Strömen

²⁴ Linden, D.; Reddy, T. B. (2002): *Handbook of Batteries*, 3. Auflage, McGraw-Hill, New York

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 jeweiligen 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 5 dargestellt.

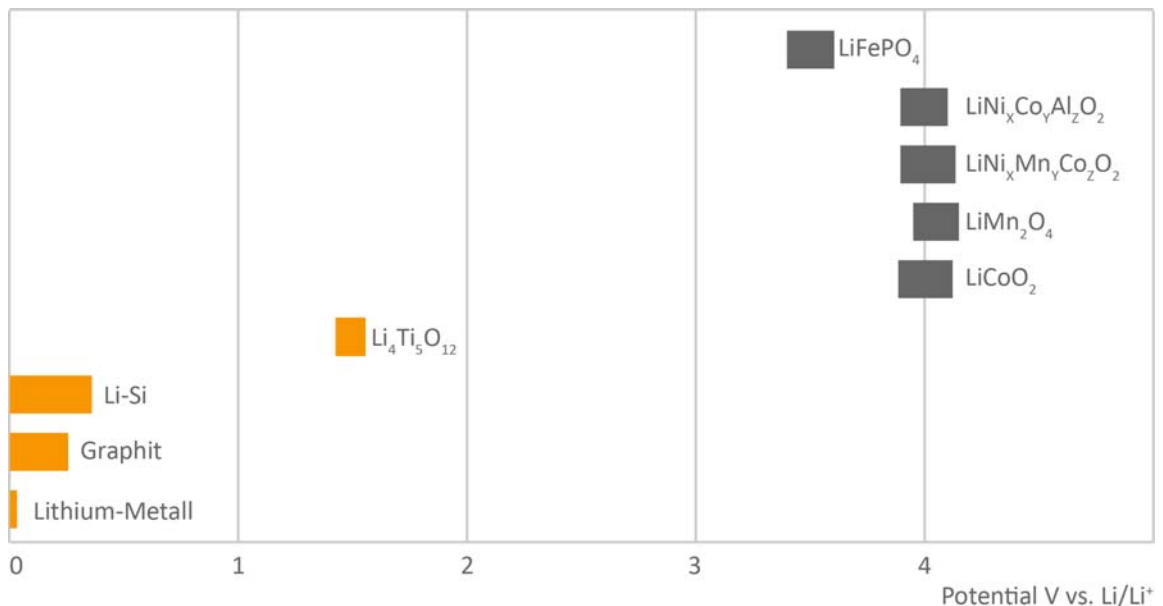


Abbildung 5: Übersicht der Elektrodenpotentiale verschiedener Aktivmaterialien (orange = negative Elektrode, dunkelgrau = positive Elektrode)

Werden zwei dieser Materialien, z. B. LiMn₂O₄ 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.

Die typische **Ladeschlussspannung** einer Li-Ionen-Zelle liegt bei 4,2 V. Eine typische **Entladeschlussspannung** beträgt 2,5 V. Bei einer Überladung oder einer Tiefenentladung kann es zu irreversiblen Schädigungen und zu Kapazitätsverlusten kommen. Für die Verhinderung dieser sicherheitskritischen Ereignisse ist das BMS zuständig (siehe Kapitel 2.2.3).

3.2 System-Kriterien

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 Lebensdauerende tritt beispielsweise nach Teil 4 der DIN 43539 „Akkumulatoren; Prüfungen; Ortsfeste Zellen und Batterien“ bei Unterschreiten der Speicherfähigkeit auf weniger als 80 % der Nennkapazität ein. Der definierte Wert für das EoL hängt dabei stark von der Anwendung ab. Besonders für Automotive-Anwendungen ist die Lebensdauer ein wichtiges Kriterium.

Als Maß für die Lebensdauer wird unterschieden zwischen

- Zykluslebensdauer bzw. Zyklenfestigkeit
- 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 **Zyklisierung** stattfindet, d.h. wenn das System in der jeweiligen Anwendung nicht genutzt wird oder sich im Lagerzustand befindet. Für die Batterie wird sie in der Anzahl der zu erwartenden Jahre im Einsatz angegeben. Im nicht genutzten Zustand finden in der Zelle Wechselwirkungen zwischen Elektrolyt und Aktivmaterialien sowie Korrosionsvorgänge statt, die Einfluss auf die Lebensdauer haben. Extreme äußere Temperaturbedingungen, die Zusammensetzung des Elektrolyten und die Qualität des Herstellungsprozesses sind weitere Faktoren, welche die Alterung beschleunigen können.²⁵

Unter der **Alterung** ist dabei eine Verschlechterung der elektrochemischen Eigenschaften (bspw. geringere Kapazität, Energiedichte etc.) zu verstehen. Größtenteils wird diese jedoch durch den Energiedurchsatz bzw. Zyklierung bedingt. Hohe Leistungsanforderungen bei der Be- und Entladung der Batterie und die damit verbundenen hohen Stromstärken 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 bspw. Dehnvorgänge 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 ist, 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 **Zykluslebensdauer** beinhaltet die Anzahl der möglichen **Zyklen** einer Zelle oder eines Systems durch Nutzung bzw. Zyklierung bis zum EoL. Bei einem jeweils zusammenhängenden Lade- und Entladevorgang wird von einem Zyklus gesprochen. Dabei wird zwischen Voll- und Teilzyklen unterschieden. Von ei-

²⁵ Leuthner, S. (2013): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien – Kapitel 2: Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien*, Springer Vieweg, Heidelberg, S. 17–19

nem **Vollzyklus** ist die Rede, wenn die Entladung bis auf eine Restkapazität von 0 % mit anschließender Aufladung bis 100 % erfolgt. Dagegen wird bei einer unvollständigen Entladung von einem **Teilzyklus** gesprochen.²⁶ Wichtige Parameter für die Zyklenlebensdauer sind zum einen die **Entladetiefe (Depth of Discharge, DOD)** und zum anderen der **Ladezustand (State of Charge, SOC)**. Die DOD gibt die Entladetiefe und der SOC den Ladezustand bezogen auf die Gesamtkapazität der Batterie an. Beide Parameter werden in Prozent ausgedrückt. Wenn eine Batterie häufig nur teilentladen wird, können durch den so genannten **Memory- oder Lazy-Battery-Effekt**²⁷ Veränderungen entstehen, die zu einer Verkürzung der Lebensdauer führen. Li-Ionen-Zellen haben jedoch den Vorteil, bis auf spezielle Materialkombinationen, keinen oder nur einen sehr geringen Memory-Effekt vorzuweisen.²⁸

Um die Akku-Lebensdauer zu erhöhen, kann die nutzbare Kapazität beschränkt und die Batterie demnach mit Teilzyklen betrieben werden (siehe Abbildung 6).

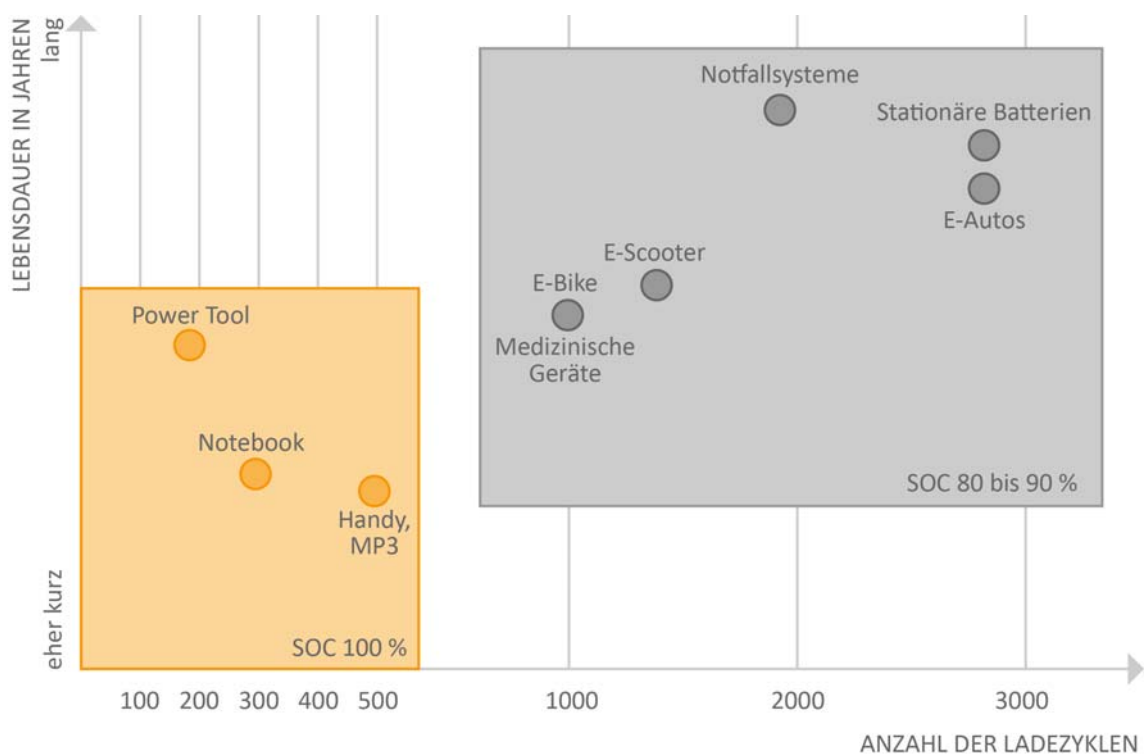


Abbildung 6: Lebensdauer bei unterschiedlichen Anwendungen ohne und mit Beschränkung des SOC

Bei Consumer-Produkten wie bspw. Laptops oder Handys wird die volle Batteriekapazität genutzt. Dementsprechend ergeben sich für diese Anwendungen Lebensdauern von wenigen Jahren bzw. bis zu 500

²⁶ Schulz, C.(2008): *Optimierung der Leistungsaufnahme eines solarbetriebenen Ad-Hoc-Netzwerk-Knotens*, Diplomica Verlag GmbH, Hamburg, S. 14

²⁷ Wenn sich bei häufiger Teilentladung ein Kapazitätsverlust einstellt, wird vom **Memory- bzw. Lazy-Battery-Effekt** gesprochen. Die Batterie liefert mit der Zeit nur noch die Energie, die ihr bei den bisherigen Entladevorgängen entnommen wurde, d. h. die Batterie „merkt“ sich einen Zustand.

²⁸ <http://www.nature.com/nmat/journal/v12/n6/full/nmat3623.html> (Zugriff: 29.08.2014)

Zyklen. Kriterium dafür ist natürlich, unter welchen Bedingungen diese Devices genutzt werden. Im Gegensatz dazu kann durch eine Beschränkung des SOC auf ca. 80–90 % der Gesamtkapazität die Lebensdauer drastisch erhöht werden. Dadurch sind Lebensdauern von 10 Jahren bzw. 3.000 Zyklen und mehr zu erreichen. Dies sind typische Werte für die gesamte Gebrauchsdauer eines Fahrzeugs.²⁹ Die folgende Abbildung 7 verdeutlicht die drastische Erhöhung der Lebensdauer über die Anzahl an möglichen Zyklen mit einer schematischen Darstellung. In letzterer wird die erreichte Zyklenanzahl einer Batterie-Zelle bei Beschränkung des SOC und DOD bis zum Erreichen einer Restkapazität von 70 % abgebildet.

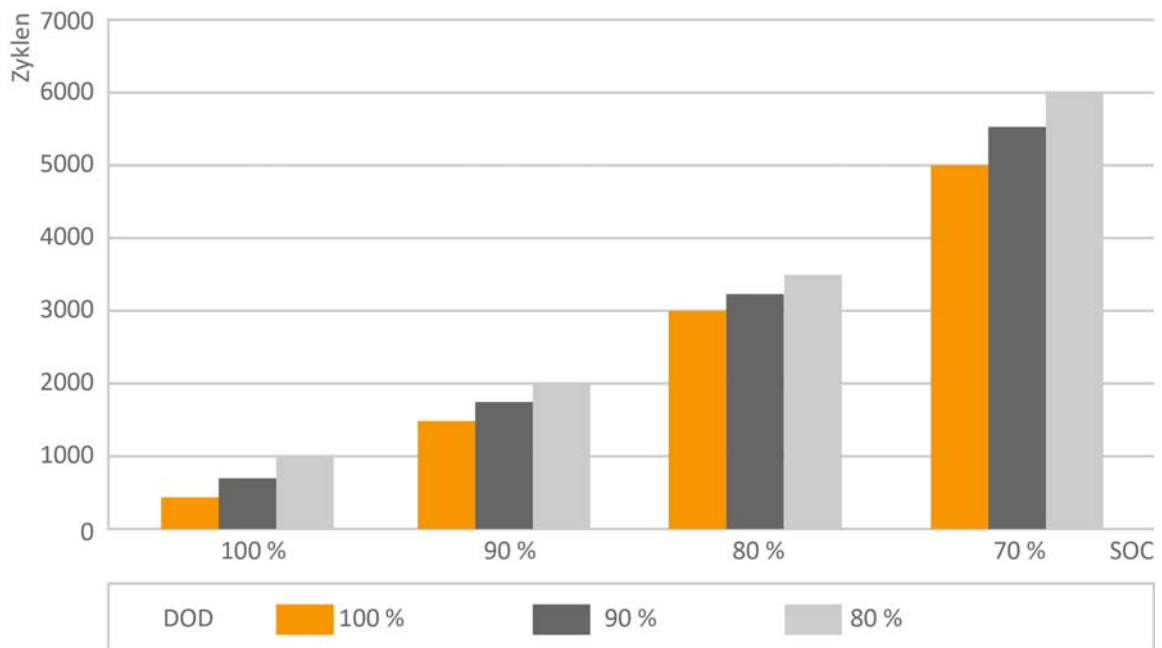


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Zyklenlebensdauer bei Beschränkung von SOC und DOD bis zur Restkapazität von 70 %³⁰

Bei voller Nutzung der Beispiel Batterie-Zelle fällt die Kapazität nach 500 Vollzyklen auf 70 % der ursprünglichen Kapazität. Bei gleichzeitiger Beschränkung des DOD auf 80 % werden bereits 1000 Zyklen möglich. Wenn bei der gleichen Zelle der SOC auf 90 % limitiert wird, fällt die Kapazität erst nach 1500 Zyklen auf 70 % der Ausgangskapazität. So können mit der gleichen Zelle bis zu 6.000 Zyklen (bei 70 % SOC und 80 % DOD) und mehr erreicht werden. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass es sich um keine Vollzyklen, sondern um Teilzyklen handelt.

²⁹ Karden, E.; Ploumen, S.; Fricke, B.; Miller, T.; Snyder, K. (2007): *Energy storage devices for future hybrid electric vehicles*, Journal of Power Sources 168, S. 2

³⁰ Eigene Darstellung mit Daten aus Seminar-Unterlagen der batteryuniversity.eu GmbH

3.2.2 Sicherheit

In Li-Ionen-Batterien werden zum einen Materialien mit hohen Energiegehalten und zum anderen hoch-entzündliche Elektrolyte kombiniert. Wirken extreme äußere Einflüsse wie bspw. Kurzschlüsse, hohe Temperaturen oder eine mechanische Deformation durch Kollision ein, können entsprechende sicherheitskritische Situationen ausgelöst werden. Diese gilt es in der Konstruktionsphase ausreichend zu berücksichtigen. Die **Sicherheit** von Li-Ionen-Batterien ist daher ein zentrales Bewertungskriterium zur Wahl eines geeigneten Batteriesystems.

Ein wesentlicher Aspekt ist hierbei die Reaktion bei **Überladung** von Zellen. Diese kann zu einer unkontrollierbaren Erhitzung und schlimmstenfalls zu einem sogenannten „**thermal runaway**“³¹ mit Brand und Explosion der Zellen führen. Auch Tiefentladungen sollten aufgrund auftretender Korrosion vermieden werden. Entsprechend müssen mit den Zellen vor Inverkehrbringen elektrische Sicherheitstests durchgeführt werden, die auch u. a. das Verhalten bei schnellem Laden und Entladen mit hohen Strömen analysieren. Des Weiteren sind mechanische Tests sowie Versuche unter extremen Umgebungsbedingungen durchzuführen. Näheres zu den verschiedenen Testverfahren wird in Kapitel 4.5. beschrieben.

Um die Sicherheit zu erhöhen, können vor allem auf **Zellebene** verschiedene Maßnahmen ergriffen werden. Hierzu folgend einige Beispiele:

- Alternative Elektrodenmaterialien → Bspw. Lithiumeisenphosphat (LiFePO_4)
- Elektrolyt-Additive → Beifügung von flammhemmenden Additiven bei entflammbaren organischen Elektrolytlösungen
- Shutdown-Separatoren → Mikroporen des Separators werden unter Wärmeeinwirkung verschlossen, um einen weiteren Ionentransport zu verhindern und den Stromfluss zu unterbrechen
- Redox-Shuttle → 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.
- Shutdown-Additive → 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.
- Sicherheitsventile → Bei steigendem Zelldruck öffnen sie sich, um entstandene Gase entweichen zu lassen.
- PTC (Positive Temperature Coefficient Device) → Der PTC Schalter ist im Stromkreislauf integriert und erhöht seinen Widerstand beim Erreichen bestimmter Temperaturen und stoppt somit einen „thermal runaway“.
- CID (Current Interrupt Device) → Das CID trennt die Verbindung zwischen Elektrode und Kontaktierung, sobald ein vorgegebener Druck durch Gasbildung überschritten wird.

³¹ Bezeichnet die Überhitzung der Zelle bzw. des Systems aufgrund eines sich selbst verstärkenden, Wärme produzierenden Prozesses. Ein Durchgehen bewirkt in der Regel die Zerstörung der Zelle.

- Schmelzsicherung → Bei zu hohen Strömen und damit zusammenhängender hoher Temperaturentwicklung schmilzt die in den Stromkreislauf integrierte Sicherung.³²

Auf **Systemebene** ist neben der verbauten Mechanik vor allem das BMS die wesentliche Komponente, um einen sicheren und zuverlässigen Betrieb der Batterie zu gewährleisten (siehe dazu Kapitel 2.2.3). In Tabelle 2 sind weitere Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit auf Zell- und Systemebene zusammengefasst.

Crashsicherheit

- Crashsichere Unterbringung der Batterie in einem korrosionssicheren Gehäuse mit feuerhemmenden Schaum
 - Ventile zur Abblasung der Reaktionsgase im Fehlerfall
 - Kontrollierte Entladereaktion der Batterie bei Zerstörung des Separators
-

Betriebssicherheit (BMS)

- Mikrocontrollergesteuerte Zellüberwachung, selbständiges Abschalten der Batterie, bevor sicherheitskritische Grenzwerte überschritten werden
 - Thermomanagement (Kaltstartverhalten)
 - Überladeschutz, Zellausgleich
-

Servicesicherheit

- Unverwechselbare Kennzeichnung sämtlicher HV-Label
 - 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 2: Übersicht weiterer Maßnahmen zur Batteriesicherheit³³

³² Balakrishnan, P.G.; Ramesh, R.; Kumar, T.P. (2006): *Safety mechanisms in lithium-ion batteries*, Journal of Power Sources 155, S. 401

³³ Wallentowitz, H.; Freialdenhoven A. (2011): *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges-Technologien, Märkte und Implikationen*, 2. überarbeitete Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, S.112

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
Mechanisch	Spannungen und Dehnvorgänge 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.
Elektrisch	Hohe Ströme bei Laden und Entladen beanspruchen die Zellchemie, erzeugen eine hohe interne Wärmeproduktion und haben eine Kapazitätsabnahme zur Folge.
Thermisch	Die Temperatur während des Einsatzes und des „Nichtbetriebs“ hat großen Einfluss auf die Lebensdauer und 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 und Sicherheit 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 Sicherheit beeinflussen. Eine hohe thermische Belastung kann das Schmelzen des Separators und einen Kurzschluss mit verheerenden Folgen nach sich ziehen. Bei fallender Temperatur nimmt die Kapazität ab.
Betriebsart und Umgang	Dauerladung , Überladung und Tiefenentladung beeinflussen Lebensdauer und Sicherheit. Die Nutzung von Teilzyklen in Kombination mit einer Beschränkung der verfügbaren Kapazität führt zu einer drastischen Verlängerung der Lebensdauer. Die Nutzung von Vollzyklen kann Tiefenentladungen oder Überladungen mit sich bringen und die Lebensdauer verringern oder gar die Batterie zerstören.

Tabelle 3: Wichtige Arten der Batteriebelastung

3.2.4 Bauform / Packaging

Für Lithium-Ionen-Zellen konzentrieren sich Hersteller auf drei Bauformen mit entsprechenden Vor- und Nachteilen.

Die **zylindrische Zelle** ist die am weitesten verbreitete Ausführungsform von Akkuzellen. Ein Standard ist die 18650-Zelle, die 18 mm im Durchmesser und 65 mm in der Höhe misst. Sie ist einfach zu produzieren, mechanisch sehr stabil und erreicht im Vergleich zu anderen Formen die größten Energiedichten. Auf-

grund ihrer Form hat sie jedoch eine schlechte Wärmeabfuhr und kein gutes Packaging. Die Zellchemie ist bei dieser Batterie in ein stabiles Rundgehäuse integriert (siehe Abbildung 8). Die Zelle ist innen hohl, damit die Batterie bei Belastung (Erwärmung) nach innen „atmen“ kann und sich nicht nach außen ausdehnt.

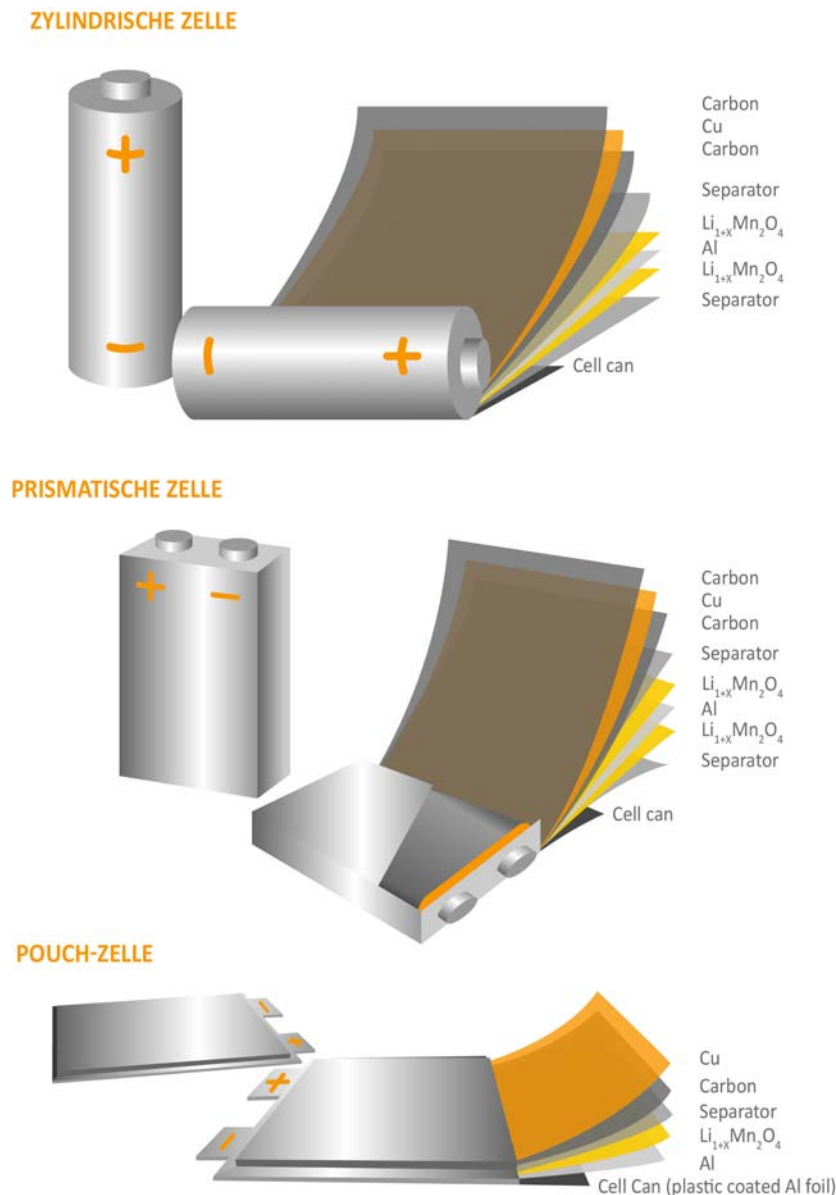


Abbildung 8: Aufbau einer zylindrischen (oben), einer prismatischen (Mitte) und einer Pouch-Zelle (unten)³⁴

³⁴ Tarascon, J. M.; Armand, M. (2001): *Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries*, Nature Vol. 414, S. 361 / https://wiki.zimt.uni-siegen.de/fertigungsautomatisierung/index.php/L%C3%B6sungsans%C3%A4tze_f%C3%BCr_die_Handhabung_und_Montage_von_Batterien_f%C3%BCr_Elektrofahrzeuge_von_morgen (Zugriff: 12.06.2015)

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

Die **Pouch-Zelle (Coffeebag-Zelle)** ist eine andere Ausführung der prismatischen Zelle. Anstelle des festen Gehäuses wird ein flexibles verwendet, welches in der Regel aus beidseitig kunststoffbeschichteter Aluminiumfolie besteht. Bei der Fertigung wird in der Regel 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, formbedingt ein sehr gutes Packaging mit niedrigem Gewicht und eine sehr gute Wärmeableitung. Zudem können hohe Energiedichten bei vergleichsweise günstiger Fertigung realisiert werden. Nachteilig sind dagegen die geringe mechanische Stabilität, die Dichtheit und ein mögliches Aufblasen der Zelle durch einen erhöhten Innendruck bei unkontrollierter Gasentwicklung.³⁵

3.3 Ökologische und ökonomische Kriterien

3.3.1 Umweltaspekte

Schwermetalle wie Quecksilber, Cadmium oder Blei können schädigende Wirkungen auf die Umwelt und den Menschen haben. Auch auf indirektem Wege können sie in den menschlichen Körper gelangen und zu erheblichen Beeinträchtigungen führen. Batterien mit bestimmten prozentualen Gewichtsanteilen an Quecksilber oder Cadmium sind daher verboten. Blei darf in Batterien verwendet werden, muss jedoch wie die beiden anderen genannten Schwermetalle ab einem bestimmten prozentualen Gewichtsanteil mit seinem chemischen Symbol auf der Batterie gekennzeichnet werden.³⁶ Zudem enthält die EU-Richtlinie 2011/65/EU weitere Beschränkungen bei der Verwendung von Blei. Dies betrifft ebenso den Gebrauch im Automobil (siehe Direktive 2000/53/EC), wobei es hier seit 2010 eine Ausnahmeregelung gibt, deren Verlängerung aktuell diskutiert wird.³⁷

Li-Ionen-Batterien enthalten nach RoHS (Restriction of Hazardous Substances, siehe EU-Richtlinie 2011/65/EU) im Gegensatz zu anderen Batteriesystemen keine gefährlichen Stoffe und haben deshalb einen Umweltvorteil. Die verwendeten zum Teil besonders teuren Materialien in Li-Ionen-Zellen wie bspw. Cobalt und Nickel können mit Hilfe physikalischer und chemischer Verfahren zum Großteil wiederverwertet werden. Die Verwertung erfolgt aktuell jedoch noch in geringem Maße (siehe Tabelle 4). Zum Ver-

³⁵ Birke, P.; Schiemann, M. (2013): *Akkumulatoren – Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft elektrochemischer Energiespeicher*, Herbert Utz Verlag, München, S.224–225 / Wöhrle, T. (2013): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien – Kapitel 9: Lithium-Ionen-Zelle* Springer Vieweg, Heidelberg, S.114–115

³⁶ Umweltbundesamt (2012): *Batterien und Akkus – Ihre Fragen, unsere Antworten zu Batterien, Akkus und Umwelt*, 2. Auflage, Dessau, S. 9–12

³⁷ Siehe auch Dokument 32010D0115: 2010/115/: Commission Decision of 23 February 2010 amending Annex II to Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council on end-of-life vehicles (notified under document C(2010) 972)

gleich: Im Jahr 2013 wurden alleine in Deutschland 6402 t an Li-Ionen-Batterien in Verkehr gebracht. Dies entspricht fast den kompletten Recycling-Kapazitäten der Firma Umicore pro Jahr.³⁸

Unternehmen	Sitz	Kapazität	Bemerkungen
Accurec Recycling GmbH	Mühlheim (Deutschland)	2500 t/a	Geringer Energieverbrauch, quasi emissionsfrei, Rückgewinnung von Eisen, Kupfer, Mangan und Cobalt
Batrec Industrie AG	Wimmis (Schweiz)	5000 t/a	Rückgewinnung von Eisen, Kupfer, Mangan, Zink und Cobalt
Umicore AG & Co. KG	Hoboken (Belgien)	7000 t/a	Keine Vorbehandlung von Kleingerätebatterien oder Zellen nötig, kein Ausstoß gefährlicher Abfälle, Rückgewinnung von Eisen, Nickel, Kupfer und Cobalt
TOXCO	Trail (Kanada)	3500 t/a	Weltgrößter Lithiumbatterie-Recycler (Primärbatterien), Rückgewinnung von Cobalt
ERLOS GmbH	Zwickau (Deutschland)	k. A.	Öffnung der Batterie und Weitergabe an Nickelhütte, Gewinnung von Kupfer, Nickel, Cobalt und Stahl

Tabelle 4: Weltweite Marktsituation Li-Ionen-Batterie-Recycling³⁹

Bei exemplarischer Betrachtung einer Batterie mit Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) Zellchemie können alle verwendeten Metalle zu 100 % recycelt werden (siehe Abbildung 10). Elektrodenmaterialien und der in der Regel verwendete Polymerseparator sind zu mehr als 90 % wiederverwertbar. Das **Recycling** der restlichen Materialien wie bspw. dem Elektrolyt ist kaum oder nicht möglich. Deutlich wird, dass Lithium im Vergleich zu anderen verwendeten Metallen einen sehr geringen Anteil an der Gesamtmasse der Batterie ausmacht. Zusätzlich besitzt es verglichen mit Cobalt oder Nickel einen geringen Preis. Daraus lässt sich schließen, dass das Recycling von Lithium heute noch nicht wirtschaftlich ist. Durch den stetig steigenden Bedarf, speziell für mobile Anwendungen in der Elektromobilität und stationäre Anwendungen im Rahmen der Energiewende, kann sich dies aber schnell ändern.⁴⁰

³⁸ http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/6_abb_geraete-batterien-batteriesys_2014-10-24.pdf (Zugriff: 22.06.2015) / weitere Informationen in Kapitel 4.7

³⁹ Treffer, F. (2013): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien – Kapitel 28: Lithium-Ionen-Batterie-Recycling*, Springer Vieweg, Heidelberg, S.347

⁴⁰ <http://sf.france-science.org/2011/03/25/the-lithium-used-in-electric-cars-is-not-a-renewable-resource-part-2-2/> (Zugriff: 01.09.2014)

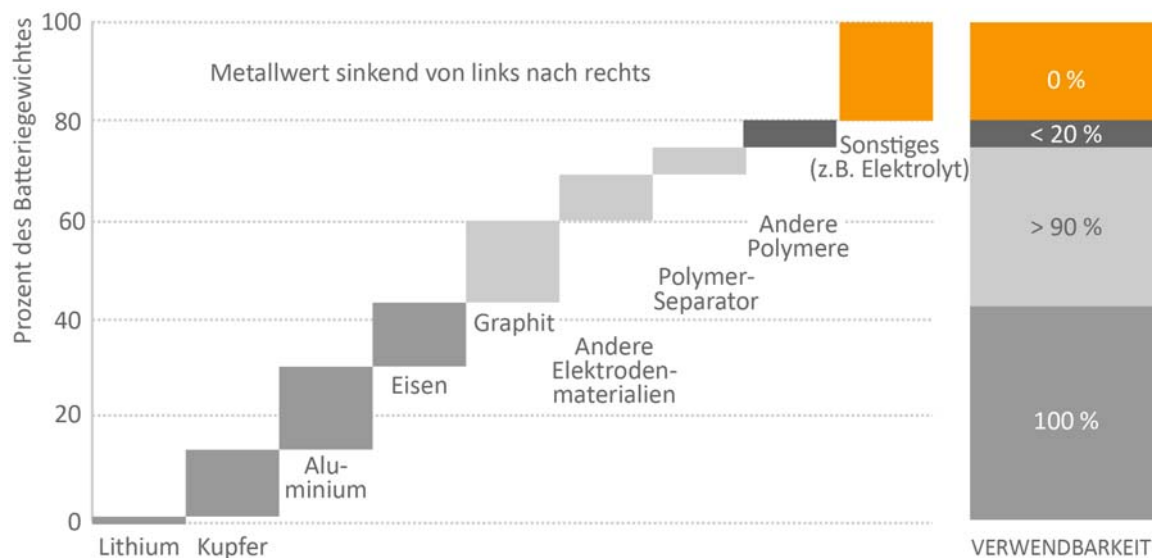


Abbildung 9: Verwertbarkeit der Bestandteile einer Li-Ionen-Batterie (LFP) mit jeweiligem prozentuellem Gewichtsanteil⁴¹

Durch die Knappheit einiger verwendeter Ressourcen und den gleichzeitig steigenden Bedarf wird zukünftig das Recycling in rohstoffarmen Ländern wie Deutschland einen großen Stellenwert gewinnen. Dies betrifft besonders die verwendeten Materialien für Elektroden wie bspw. Cobalt, Mangan oder Nickel. Das wirtschaftliche Potenzial für Recyclingkonzepte ist dabei immens. Rechnet man mit 10 Mio. Batterien allein aus EV mit Gewichten von 10 kg bis 100 kg, bedeutet dies einen Kapazitätsbedarf für Recyclinganlagen allein für Europa von mehreren 100 Tausend t pro Jahr.⁴²

Neben dem noch komplexen Recycling haben künftig sogenannte „**Second-Life Konzepte**“ von am EoL stehenden Li-Ionen-Batterien ein großes ökologisches als auch ökonomisches Potential. Derartige Batterien haben in der Regel noch ausreichende Kapazitäten für Zweitanwendungen mit geringeren Anforderungen und können dadurch je nach Anwendung eine Lebensdauer von 20 Jahre und mehr erreichen. Durch die Zweitvermarktung der Batterien kann die Ökobilanz verbessert und es können zudem zusätzliche Einnahmen generiert werden.

3.3.2 Wartungsaufwand

Beim mechanischen Aufbau eines Akkusystems wird zwischen **Blockaufbau** und **modularem Aufbau** unterschieden. Beim Blockaufbau werden einzelne Zellen zu einem einzigen Block mit dazugehöriger Sensorik, Elektronik und sonstigen Komponenten verbaut und in ein Batteriegehäuse eingebracht.

⁴¹ Kleine-Möllhoff, P.; Benad, H. et al. (2012): *Die Batterie als Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität der Zukunft*, Hochschule Reutlingen, Renak, S.50 / Electrification Coalition (2009): *Electrification Roadmap – Revolutionizing Transportation and achieving Energy Security*, S. 84–86

⁴² Treffer, F. (2013): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien – Kapitel 28: Lithium-Ionen-Batterie-Recycling*, Springer Vieweg, Heidelberg, S. 346

Beim modularen Aufbau wird eine bestimmte Anzahl von Zellen zu einem Modul als Untereinheit für ein Batteriesystem verschaltet. Unter Verwendung dieser Module können dann größere Systeme aufgebaut werden und nach jeweiliger Anwendung in einem gemeinsamen Gehäuse untergebracht werden. Die Vorteile des modularen Aufbaus bestehen in der leichteren Montage der Komponenten sowie in der vereinfachten Wartung und Austauschbarkeit von einzelnen Modulen. Li-Ionen-Zellen sind praktisch wartungsfrei. Ein ausgeklügeltes BMS trägt hierzu maßgeblich bei. Im Gegensatz dazu muss bspw. bei nassen Blei-Säure-Zellen regelmäßig Wasser nachgefüllt werden.

Ein Beispiel für eine modulare Anwendung ist die Entwicklung eines modularen Multi-Use Batteriesystems für die Anwendung in mobilen Maschinen, Fahrzeugen und stationären Anwendungen. Dabei soll mit einem standardisierten Batteriemodul ein universeller Einsatz in verschiedenen Anwendungsfeldern ermöglicht werden. Zudem kann ein Wechselsystem entwickelt werden. So können leere Module einfach ausgetauscht und dadurch lange Leerlauf- und Standzeiten verhindert werden.⁴³

Das Projekt M5BAT (Modularer multi-Megawatt multi-Technologie Mittelspannungsbatteriespeicher) ist ein weiteres Beispiel für ein modulares Batteriesystem und seinen Vorteilen. M5BAT richtet den Fokus u. a. auf die Integration erneuerbarer Energien und die Erprobung einer dezentralen Bereitstellung von Regelleistung für einen stabilen Netzbetrieb und wird im Rahmen der Förderinitiative „Energiespeicher“ des BMWi gefördert. Das Besondere dieses Batteriesystems ist der modulare Aufbau des Speichers, bei dem unterschiedliche Batterietechnologien optimal miteinander verknüpft werden. Li-Ionen-Batterien werden bspw. als kurzfristige Leistungsspeicher, Hochtemperatur-Batterien⁴⁴ für die Energiebereitstellung über mehrere Stunden und Bleibatterien bei kurzen und mittleren Entladezeiten eingesetzt.

3.3.3 Wirtschaftlichkeit

Li-Ionen-Batterien und ihre Kosten haben großen Einfluss auf die **Wirtschaftlichkeit** im Einsatz mobiler als auch stationärer Anwendungen. Das derzeitige Kostenniveau mit geeigneten Daten zu bestimmen ist jedoch sehr schwierig. Dies liegt auch daran, dass es für Unternehmen strategisch relevant ist, diese Daten nicht öffentlich zugänglich zu machen. Trotzdem lassen sich Aussagen über verschiedene Kostenniveaus in aggregierter Form treffen.

Die **Kosten** setzen sich maßgeblich aus den Herstellkosten (HK) der Li-Ionen-Zellen und den notwendigen Batteriesystemkomponenten zusammen. Durch die noch aktuell überwiegende Kleinserienproduktion von Batteriesystemen, die zum Teil noch manuell stattfindet, sind die HK von Systemen und besonders von Zellen relativ hoch. Die Anschaffungskosten eines Batteriesystems, je nach Zelltyp, liegen aktuell in einer Kostenspanne von 400 bis 1.300 € pro kWh. Diese große Spanne ist durch die Unterscheidung in Systeme mit optimiertem Energieinhalt (bspw. für BEV) und in Systeme mit optimierter Batterieleistung (bspw. für HEV) bedingt.

⁴³ <https://www.vdma.org/documents/266699/1098594/Projekt%20Modulares%20Multi-Use%20Batteriesystem/d5426b11-a460-46d9-af1b-8afd35614f5b> (Zugriff: 29.08.2014)

⁴⁴ Hierunter sind sekundäre Batterietypen zusammengefasst, die bei hohen Temperaturen von 250-300°C betrieben werden. Die Natrium-Nickel-Chlorid-Zelle, auch ZEBRA-Batterie genannt, ist ein bekanntes Beispiel für eine Hochtemperatur-Batterie.

Um hohe Kapazitäten zu erreichen, werden bei **Hochenergiezellen** viel Aktivmaterial und dafür platzsparende Ableiter verwendet. Daraus resultiert jedoch ein höherer Innenwiderstand. Bei **Hochleistungszellen** dagegen werden dünne Aktivmasseschichten kombiniert mit einem dickeren metallischen Ableitern genutzt, um den Innenwiderstand gering zu halten und eine hohe Leistungsdichte zu erzielen. Die Folge ist hier aber eine geringere Kapazität.

Während bei Hochenergiezellen die Nutzung eines größeren Anteils von Aktivmaterialien entscheidend für die Herstellkosten und das Gewicht der Zellen ist, sind bei Hochleistungszellen die nicht aktiven Komponenten wie Stromkollektoren bspw. aus Kupfer maßgeblich für die Kosten verantwortlich. Kostentreiber der Hochenergiezellen sind die eingesetzten Aktivmaterialien der positiven Elektrode, allen voran Materialien wie Li-Mischoxide mit Cobalt-Anteilen.

Betrachtet man die Systemebene, so nehmen die Kosten für die Anschaffung eines Systems mit der Verwendung von kleineren Zellen sowie geringerer Gesamtkapazität zu. Dies ist u. a. durch kostenintensive Batteriesystemkomponenten wie dem BMS oder dem Gehäuse zu begründen. Diese machen, bezogen auf die kWh, bei kleinen Anwendungen einen höheren Anteil an den Kosten des Systems aus. Dadurch liegen die Kosten für eine kWh bei Batterien für BEV eher im unteren Bereich, die Kosten für Batteriesysteme im Einsatz von HEV dagegen im oberen Bereich der genannten Kostenspanne.⁴⁵

3.4 Lithium-Materialsysteme im Vergleich

Der Begriff Lithium-Ionen-Batterie wird im Allgemeinen als Oberbegriff für eine Vielzahl von unterschiedlichen **Materialkombinationen** benutzt. In der Regel bezieht sich der genaue Name auf die chemische Zusammensetzung des verwendeten Materials auf der positiven Elektrode. Jede der unterschiedlichen **Zellchemien** weist verschiedene Stärken und Schwächen auf und ist dadurch für eine bestimmte Anwendung besser oder schlechter geeignet. Dabei sind nicht nur elektrochemische Angaben für den Einsatz wichtig, sondern auch die jeweiligen Kosten, die zu erreichende Lebensdauer als auch Sicherheit- und Umweltaspekte.

Im Folgenden sind Li-Ionen-Elektrodenmaterialien und deren Eigenschaften aufgeführt, die heute bereits verfügbar sind und in unterschiedlichen Anwendungen genutzt werden:

⁴⁵ Hettesheimer, T.; Hummen, T. et al. (2013): *Energiespeicher Monitoring für die Elektromobilität (EMOTOR)-Bericht zur Produktion und Ökobilanzierung*, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, S.22–23

	LCO	LMO	NMC	NCA	LFP
Umwelt	--	++	-	-	++
Sicherheit	-	+	o	--	++
Nennspannung/ V	3,7		3,6 / 3,7	3,6	3,2 / 3,3
Volumetrische Energiedichte Wh/l	320–500	290–340	490–580	480–670	160–260
Gravimetrische Energiedichte Wh/kg	110–180	100–120	180–210	180–250	80–120
Entladestrom C	1–2	3–20	1–10	1–10	10–50
Lebensdauer (Zyklen)	300–1000	1000–1500	500–1000	500–1000	2000–5000
Anschaffungskosten €/kWh Zelle (18650) 04/2014	170	230	200	210	450
Relative Kosten €/kWh /Zyklus	0,17–0,60	0,15–0,23	0,20–0,40	0,20–0,40	0,09–0,25
Anwendungsbereiche	High Energy Home appliance	High Power Power Tools Garden tools Medical application Military Electromobility	High Energy + Power Power Tools Garden Tools Home appliance Medical application Electromobility Energy Storage	High Energy + Power Power Tools Garden Tools Home appliance Electromobility Energy Storage	High Power Power Tools Garden Tools Home appliance Electromobility Military Emergency-Lighting Energy Storage

Bewertungsschema:

++ = sehr gut; + = gut; o = befriedigend; - = ausreichend; -- = mangelhaft

Tabelle 4: Vergleich der Eigenschaften verschiedener Zellchemien von Li-Ionen-Batterien⁴⁶

Bezüglich der erreichbaren Energiedichten sind die Oxide **Lithium-Cobalt-Oxid (LCO)**, **Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid (NMC)** und **Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid (NCA)** klar im Vorteil. NCA erreicht hierbei die höchsten Energiedichten. Bei Betrachtung der relativen Kosten pro Zyklus bewegen sich alle genannten Zellchemien auf einem ähnlichen Level. LCO hat aufgrund seiner im Vergleich geringeren Zyklenfestigkeit wenig Potenzial, in mobilen und stationären Anwendungen mit größeren Speicherkapazitäten eingesetzt zu werden.

⁴⁶ Eigene Darstellung mit Daten aus Unterlagen der batteryuniversity.eu GmbH / http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion (Zugriff: 20.08.2014) / <http://www.ansmann-energy.com/unternehmen/ansmann-wiki/vergleich-zellchemien.html> (Zugriff: 20.08.2014) / Ketterer, B.; Karl, U.; Möst, D.; Ulrich, S. (2009): *Lithium-Ionen-Batterien-Stand der Technik und Anwendungspotenzial in Hybrid-, Plug-In-Hybrid- und Elektrofahrzeugen*, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, S. 10–11 / Hehn, G. (2014): *Elektronik reader's choice August 2014 – Autarke Stromspeicher*, elektroniknet.de, S. 40

Im Unglücksfall kann es bei den Oxiden zur Entwicklung von Sauerstoff mit Brandfolgen kommen. Besonders kritisch ist in diesem Zusammenhang NCA zu sehen. **Lithium-Mangan-Oxid (LMO)** weist im Gegensatz zu LCO, NMC und NCA kleinere Kapazitäten auf, jedoch ist dieses Materialsystem stabiler. In der Regel ergibt sich dadurch im Vergleich eine erhöhte Sicherheit.

Im Gegensatz zu den Oxiden zeigt **Lithium-Eisen-Phosphat (LFP)** bis 300 °C keinerlei thermische Effekte. LFP ist u. a. dadurch sicherheitstechnisch außer Konkurrenz. Die vergleichsweise hohe Zyklenfestigkeit ist ebenso ein großer Vorteil gegenüber den übrigen Zellchemien. Aus ökologischer Sicht ist LFP ebenso wie LMO ungiftig und unbedenklich. Zudem wird es – anders als Elektrodenmaterialien mit Nickel und Cobalt – bereits erfolgreich als potenziell günstiges Aktivmaterial genutzt. Gleichzeitig besitzt es die Möglichkeit, sehr schnell Energie aufzunehmen und abzugeben. Nachteilig ist jedoch die im Vergleich niedrige Nennspannung und somit auch geringe Energiedichte.

3.5 Bewertungsbeispiele nach Anwendung

Bewertungsbeispiele nach Anwendung								
Bewertungs-kriterien		Anwendungen						
		Mobil					Stationär	
		BEV (PKW)	PHEV ⁴⁷ (PKW)	HEV (PKW)	BEV (Bus)	E-Zweirad	Zwischen-speicher ⁴⁸	Insel-lösung ⁴⁹
Technisch	Gravimetrische Energiedichte Wh/kg	+	O	-	+	+	-	-
	Volumetrische Energiedichte Wh/l	+	+	O	O	+	-	O
	Hochstrom-fähigkeit C	O	O	+	O	O	+	-
	Zellspannung V	+	+	+	+	+	O	O
System	Lebensdauer Zyklen/Jahre	+	+	+	+	+	+	+
	Sicherheit	+	+	+	+	+	+	+
	Temperaturbereich	+	+	O	+	O	+	-
	Mechanische Belastbarkeit	+	+	+	+	+	-	-
	Kosten €/kWh	+	O	-	+	+	+	+

Bewertungsschema:

+ = sehr wichtig; o = wichtig; - = weniger wichtig

Tabelle 5: Qualitative Bewertung unterschiedlicher Li-Ionen-Batterie Anwendungen

⁴⁷ PHEV: Ein HEV nutzt einen elektrischen und konventionellen Antriebsstrang. Wird eine größere Batterie verwendet, die über das Stromnetz aufgeladen werden kann, spricht man von einem Plug-In-Hybrid Electric Vehicle (PHEV).

⁴⁸ Bspw. zur Netzstabilisierung bzw. dem Lastspitzenausgleich im Stromnetz

⁴⁹ Bspw. Heimspeicher in Kombination mit PV-Anlage

4 Gesetzliche Regelungen und Normen zu Li-Ionen-Batterien

Für den Umgang mit Lithium-Ionen-Batterien existieren in vielen Bereichen gesetzliche Vorgaben und / oder Normen, die in ihrer Gesamtheit schwer überschaubar scheinen. Das folgende Kapitel soll daher Personen und Institutionen, die einen regelmäßigen Umgang mit Lithium-Ionen-Batterien pflegen, einen fundierten Überblick geben. Dadurch sollen die korrekte Behandlung bei Transport oder Lagerung erklärt, Fragestellungen rund um Kennzeichnung oder Entsorgung behandelt und somit die tägliche Arbeit mit Li-Ionen-Batterien vereinfacht werden. Um die Darstellung möglichst einfach und transparent zu gestalten, werden in diesem Kapitel die wichtigen Informationen zu gesetzlichen Regelungen und Normen von Batterien in Abschnitten dem Lebenszyklus einer Batterie folgend behandelt. Zu Beginn wird deshalb auf die Kennzeichnung einer Batterie eingegangen. Im Anschluss werden die Hinweispflichten von Vertreibern und Herstellern bei Inverkehrbringen von Batterien thematisiert, wobei insbesondere der sichere Transport von Bedeutung ist. In diesem Abschnitt werden sowohl neue und gebrauchte Batterien als auch die zu beachtenden Besonderheiten bei beschädigten Batterien betrachtet. Beim Transport ist zudem die Verpackung der Batterien von besonderer Wichtigkeit. Darauf folgend werden einige Hinweise zum sachgerechten Umgang und erfolgten Prüfungen zur Erhöhung der Sicherheit der Batterien gegeben. Zuletzt werden die richtige Lagerung und Regelungen der Rücknahme und Entsorgung beleuchtet.

Wichtige gesetzliche Regelungen für Batterien sind im Batterie-Gesetz zu finden. Das Batterie-Gesetz regelt das Inverkehrbringen, die Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren. Es gilt für alle Arten von Batterien, unabhängig von Form, Größe, Masse, stofflicher Zusammensetzung oder Verwendung (mit Ausnahme von militärischen Anwendungen), auch wenn diese in Geräten verbaut sind. Hierbei wird zwischen „Fahrzeugg Batterien“ (die für den Anlasser, die Beleuchtung oder für die Zündung von Fahrzeugen bestimmt sind) und den „Industriebatterien“ (die ausschließlich für industrielle, gewerbliche oder landwirtschaftliche Zwecke, für Elektrofahrzeuge jeder Art oder zum Antrieb von Hybridfahrzeugen bestimmt sind; Gerätebatterien) unterschieden.

Das BattG beinhaltet auch verbindliche Ziele für die Rücknahmemenge handelsüblicher Altbatterien (35 % war die Quote bis 2012, in 2016 sind es 45 %). Weiterhin gibt es verschiedene Transportvorschriften des ADR (*accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route*, deutsch: Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße), je nach Transportweg. Diese gesetzlichen Regelungen werden ergänzt durch verschiedene Normen, die vor allem den sicheren Umgang und Anschluss, aber auch die Verwendung einheitlicher Bauteile regeln.

4.1 Kennzeichnung

- Die Kennzeichnung von Batterien ist gesetzlich geregelt in §17 des BattG.
- Die Ausführung der Kennzeichnung für Lithium-Sekundärbatterien in tragbaren Geräten ist in der Norm DIN EN 61960 „Akkumulatoren und Batterien mit alkalischen oder anderen nichtsäurehaltigen Elektrolyten – Lithium-Akkumulatoren und -batterien für tragbare Geräte“ festgelegt.

- Lithium-Primärbatterien und -zellen sollten der Kennzeichnung DIN EN 60086-4 „Primärbatterien – Teil 4: Sicherheit von Lithium-Batterien“ entsprechen.
- Zudem sind Angaben und ein Beispiel zur Batteriekennzeichnung in DIN EN 62281 „Sicherheit von Primär- und Sekundär-Lithium-Batterien beim Transport“ enthalten.

Das Batterie-Gesetz (§17) verpflichtet jeden Hersteller vor dem erstmaligen Inverkehrbringen der Batterie dazu, diese mit verschiedenen Hinweisen zu versehen und dabei bestimmte Auflagen zu beachten:

- Die Symbole und Zeichen müssen dauerhaft lesbar und gut sichtbar sein.
- Das Symbol „durchgestrichene Mülltonne“ muss eine bestimmte Fläche der Batterie einnehmen, je nach Batteriegeometrie.
- Es besteht Kennzeichnungspflicht bei Bestandteilen von Quecksilber (Hg), Cadmium (Cd) und Blei (Pb).
- Sowohl Fahrzeug- als auch Gerätebatterien müssen mit einer sichtbaren, lesbaren und unauslöschlichen Kapazitätsangabe versehen werden (bei Bestimmung und Gestaltung der Kapazitätsangabe sind die Vorgaben der Rechtsverordnung nach §20 Nr. 4 des BattG zu beachten).

Die Norm DIN EN 61960 erweitert die Angabepflicht um folgende Angaben:

- Wiederaufladbares Lithium- oder Lithium-Ionen-Sekundärsystem,
- Batterie- oder Zellbezeichnung nach festgelegtem Code (s. Folgendes),
- Polarität,
- Datum der Herstellung (darf codiert sein),
- Name oder Kennzeichen des Herstellers bzw. Lieferanten,
- Bemessungskapazität und Nennspannung.

In der Norm DIN EN 61960 ist zudem geregelt, wie der Code aufgebaut ist, mit dem die Lithium-Batterien bezeichnet werden sollten. Enthalten sind darin Angaben zu den Aspekten:

- Anzahl der in Reihe und der parallel geschalteten Zellen ($N_1 + N_5$),
- Elektrodensystemen ($A_1 + A_2$),
- Form der Zellen (A_3),
- Dicke / Durchmesser der Zellen ($N_2 + N_3$),
- Gesamthöhe (N_4).

Der Code sollte auf Batterien folgendermaßen aussehen: $N_1A_1A_2A_3N_2/N_3/N_4-N_5$

(Zellen: $A_1A_2A_3N_2/N_3/N_4$)

Die Codes sind bisher je Hersteller sehr unterschiedlich aus Zahlen und Buchstaben aufgebaut.

- Ein I (teilweise auch U), L oder G im Code bezeichnet das negative Elektrodensystem (I oder U = Li-Ionen; L = Li-Metall, G = Graphit).
- Demgegenüber werden folgende Buchstaben in der Regel zur Bezeichnung des positiven Elektrodensystems genutzt: C = Cobalt, N = Nickel, M = Mangan, V = Vanadium, T = Titan.
- Ein R oder P bezieht sich in der Regel auf die Form der Zelle: R = rund bzw. zylindrisch, P = prismatisch. Bei Panasonic beispielsweise bezeichnet ein R jedoch die Wiederaufladbarkeit und bei Sanyo ein P eine bestimmte Ladeschlussspannung.

Die Zahlen im Code beziehen sich wie erwähnt auf Anzahl der in Reihe oder parallel geschalteten Zellen und auch Dicke und Durchmesser der Zellen. Je nach Hersteller variiert die Bedeutung von Buchstaben und Zahlen. Auch die Abfolge ist teilweise sehr unterschiedlich. Im Folgenden sind Beispiele aufgeführt:



1 Name / Kennzeichen des Herstellers

2 Nennspannung

3 Bemessungskapazität in mAh oder Ah (für Batterien, die nach Mai 2012 erstmals in Verkehr gebracht wurden) → Nennkapazität nach DIN EN 61960:2013-12 ermitteln

4 Symbol: durchgestrichene Mülltonne

Abbildung 10: Beispielhafte Angaben auf einer Li-Ionen-Batterie

Unbedingt sollten Hinweise zur Entsorgung und empfohlener Lademethode auf der Batterie angegeben oder mitgeliefert werden.



Abbildung 11: Bild der Angaben auf einem Lithium-Akkumulator eines namhaften Smartphone-Herstellers

Häufig sind nur die nötigsten Angaben zu Spannung, Kapazität sowie das Symbol der „durchgestrichenen Mülltonne“ enthalten, wie hier auf einem Smartphone-Akku eines namhaften Herstellers. Für weitere Informationen wird auf das beigelegte Manual (Bedienungsanleitung) verwiesen.



N	Nickel
C	Cobalt
R	zylindrisch (rund)
18	Durchmesser (mm)
65	Höhe (mm); zur vollständigen Zellenbezeichnung der 18650 Zelle gehört noch eine 0
P	vermutl. Ladeschlussspannung 4,2 V
D	Nicht bekannt

Abbildung 12: Bild eines Lithium-Akkumulators mit Angabe eines Codes.

Beim Transport muss jedes Versandstück, das Batterien enthält (sofern es nicht durch spezielle Vorschriften befreit ist), mit den Angaben gekennzeichnet werden, dass

- es Lithium-Batterien enthält.
- es sorgfältig zu behandeln ist.
- es bei Beschädigung auszusondern, zu prüfen und ggf. neu zu verpacken ist.

Zudem sollte eine Telefonnummer für Nachfragen angegeben sein. Für die Kennzeichnung gibt es entsprechende Beispiele wie in DIN EN 62281. Darüber hinaus gibt es ein Abfertigungskennzeichen, das folgendermaßen verwendet werden sollte:



Abbildung 13: Abfertigungskennzeichen

4.1.1 Hinweispflichten

Die Hinweispflichten sind durch das Batterie-Gesetz (§ 18) gesetzlich geregelt.

4.1.1.1 Vertreiber

Kunden müssen durch die Vertreiber von Batterien mittels Schrift- und Bildtafeln auf folgende Punkte aufmerksam gemacht werden:

- Auf die Möglichkeit, Batterien nach dem Gebrauch unentgeltlich an der Verkaufsstelle zurückzugeben
- Auf die gesetzliche Verpflichtung der Endnutzer zur Rückgabe von Altbatterien
- Auf die Bedeutung des Symbols „durchgestrichene Mülltonne“ und ggf. der Zeichen Hg, Cd bzw. Pb.

Im Versandhandel müssen diese Hinweise schriftlich beigelegt werden oder in entsprechenden Darstellungsmedien mitgeteilt werden.

4.1.1.2 Hersteller

Hersteller sind nach § 18 Absatz 2 des BattG zudem verpflichtet, über die in Batterien enthaltenen Stoffe und deren Auswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit zu informieren. Dabei soll auch die getrennte Sammlung und Verwertung von Altbatterien und die damit verbundenen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt erläutert werden.

Zusätzlich sind Hersteller von Gerätebatterien verpflichtet, sich – je nach Marktanteil – in angemessenem Verhältnis an den Kosten von Informationskampagnen zur Batterierücknahme zu beteiligen, auch wenn sie nicht dem Gemeinsamen Rücknahmesystem (GRS) angehören. Falls am GRS unbeteiligte Hersteller zur Finanzierung herangezogen werden, müssen die Kampagnen wettbewerbsneutral gestaltet sein.

4.2 Transport

Die Regularien für den Transport von Lithium-Ionen-Batterien basieren auf den UN-Vorgaben für den Gefahrguttransport. Die entsprechenden Prüfbedingungen sind in den „UN Manual of Tests & Criteria“ enthalten. Diese Regularien können sich ändern, so dass auf Aktualität geachtet werden sollte. Transportprüfungen sind zudem in der Norm DIN EN 62281 geregelt.

Die Beförderung von Batterien richtet sich grundsätzlich nach den von den Herstellern vorgegebenen Klassifizierungen, Bedingungen, Maßnahmen und detaillierten Vorschriften. Insbesondere sind für die Beförderung auf der Straße Sondervorschriften und das aktuelle Gefahrgutrecht (ADR) in seiner jeweiligen gültigen Fassung zu beachten. Das gilt auch für zu entsorgende Batterien und Batterien zum Recycling. Die Vorschriften und Herstellerhinweise sind strikt einzuhalten. Verstöße können rechtliche Konsequenzen wie Ordnungsgelder zur Folge haben.

Neben den Regelungen des ADR sollte die Norm DIN EN 62281 zur „Sicherheit von Primär- und Sekundär-Lithium-Batterien beim Transport“ beachtet werden. Diese internationale Norm regelt neben der Sicherheit von Lithiumzellen und -batterien beim Transport auch die Sicherheit der Verpackung. Dabei sind Prüfverfahren und Anforderungen für Lithium-Primär- und Sekundärzellen / -batterien festgelegt, um die Sicherheit beim Transport zu gewährleisten, nicht jedoch für die Wiederverwertung und Entsorgung.

Kürzlich ist ein Leitfaden der EPTA (European Power Tool Association) unter Mitarbeit des ZVEI (Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V.), des Fachverbands Elektrowerkzeuge sowie des IVG (Industrieverband Garten e. V.) erschienen, der die wichtigsten Hinweise zum Transport von Batterien (auch in Geräten verbauten) beinhaltet. Dieser Leitfaden bezieht sich zwar explizit auf den Transport von Elektrowerkzeugen und elektrischen Gartengeräten, spiegelt aber recht allgemein die Bedingungen zum Transport von Batterien wider.

Grundsätzlich dürfen nur Batterien transportiert werden, die nach den Anforderungen des UN-Transporttests UN 38.3 geprüft wurden und bestanden haben. Eine Unterscheidung wird gemacht zwischen Batteriesätzen, die aus Lithiummetall- / Lithiumlegierungszellen bestehen, und solchen, die aus Lithium-Ionen- und Lithiumpolymer-Zellen bestehen. Dabei wird wiederum zwischen großen und kleinen Batteriesätzen unterschieden. Bei der ersten Gruppe der Lithiummetall und Lithiumlegierungen wird die-

se Unterscheidung für den Gehalt aller Anoden in Gramm getroffen. Dagegen ist das Unterscheidungskriterium bei den Lithium-Ionen- und Lithiumpolymer-Zellen die Nennenergie in Wh.

Bei der Einstufung von Lithium-Ionen-Batterien zum Transport wird bei unbenutzten (neuen) Batterien zwischen Batterien mit einem Energiegehalt < 100 Wh und solchen mit einem Energiegehalt > 100 Wh differenziert. Weiterhin gelten bei dem Rücktransport von benutzten Batterien zusätzliche Vorschriften, wobei in diesem Fall zusätzlich zwischen gebrauchten und defekten Batterien unterschieden werden muss.

Zu beachten ist auch, dass es für verschiedene Transportwege unterschiedliche bzw. erweiterte Vorgaben gibt. Hier unterscheidet man:

- Straße: ADR
- Schiene: RID (Ordnung für die internationale Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter)
- Seefracht: IMDG (Gefahrgutkennzeichnung für gefährliche Güter im Schiffsverkehr)
- Luftfracht: IATA (Internationale Luftverkehrs-Vereinigung).

Eine Zusammenfassung der wichtigsten Regelungen nach Batterieart ist tabellarisch in Tabelle 6 zusammengestellt.

4.2.1 Transport von gebrauchten Batterien

Gebrauchte Batterien, die keine Defekte aufweisen und zum Zwecke des Recyclings befördert werden, unterliegen der Sondervorschrift (SV) 636 des ADR.

Dabei ist folgendes zu beachten:

- Zellen in Ausrüstung dürfen sich während der Beförderung nicht unter 2 V bzw. unter $\frac{2}{3}$ der Spannung der nicht entladenen Zelle entladen können.
- Gebrauchte lithiumhaltige Zellen/Batterien bis max. 500 g unterliegen nicht den Vorschriften des ADR, wenn folgende Punkte eingehalten werden:
 - Verpackungsanweisung P903b (und/oder P903a) ist eingehalten.
 - Die Gesamtmenge von 333 kg pro Beförderungseinheit an Lithiumzellen/-batterien wird nicht überschritten.
 - Die Versandstücke werden mit der Kennzeichnung „GEBRAUCHTE LITHIUM-BATTERIEN“ versehen.

4.2.2 Transport von defekten Batterien

Die Beförderung von defekten und beschädigten lithiumhaltigen Batterien, die nicht nach der Sondervorschrift 636 des ADR gesammelt oder befördert werden dürfen, müssen nach der SV 661 behandelt werden. SV 661 findet auch Anwendung bei der Beförderung von beschädigten Vorproduktionstypen oder beschädigten Zellen / Batterien aus Kleinserien.

Zu beschädigten Batterien zählen insbesondere folgende:

- Batterien, bei denen der Hersteller Defekte festgestellt hat, welche die Sicherheit beeinträchtigen
- Batterien mit beschädigten oder in erheblichem Maße verformten Gehäusen
- Auslaufende Batterien
- Batterien mit Gasaustritt
- Batterien mit Mängeln, die vor der Beförderung zum Ort der Analyse nicht diagnostiziert werden können.

Die Beförderung der defekten Batterien ist nur einer Vertragspartei des ADR unter zusätzlichen Bedingungen der zuständigen Behörde erlaubt. Dabei dürfen nur die von einer Behörde zugelassenen Verpackungsmethoden angewendet werden.

Zudem muss die Sondervorschrift SV 376 (vorab umgesetzt in der multilateralen Vereinbarung M 259; gültig bis 31. Dezember 2014 in den Hoheitsgebieten der ADR Vertragsparteien) nach Abschnitt 1.5.1 ADR und abweichend von der Sondervorschrift 661 und in Verbindung mit der SV 376 für Gefahrguttransport beachtet werden. Dabei dürfen die Batterien, die der Definition von beschädigten Batterien entsprechen, unter folgenden Bedingungen transportiert werden:

- Versandstücke müssen mit „Beschädigte/Defekte Lithium-Ionen-Batterien“ bzw. „Beschädigte/Defekte Lithium-Metall-Batterien“ gekennzeichnet sein.
- Die Verpackung muss P 908 oder LP 904 entsprechen.
- Auf dem Beförderungspapier ist der Vermerk anzubringen: „Beförderung vereinbart gemäß den Bedingungen des Abschnittes 1.5.1 des ADR (M259)“.
- Jede nach diesen genannten Vorschriften durchgeführte Beförderung muss der zuständigen Behörde des Ausgangslandes gemeldet werden, mit präziser Angabe der beförderten Güter sowie Gründe für die Anwendung der Vereinbarung M 259.

Mit der Festlegung der BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) vom 02. Juli 2013 kann das gemeinsame Rücknahmesystem GRS die Rücknahme und den Transport von gebrauchten und auch von beschädigten Lithium-Batterien in ganz Deutschland sicherstellen. Dazu werden aktuell im Zuge des auch aus gefahrgutrechtlichen Gründen erforderlichen Umbaus des Rücknahmesystems die Sammlungs- und Transportdienstleistungen für den Zeitraum von 2015 bis 2019 ausgeschrieben. Neben der Einführung neuer Behältersysteme erfolgt nun auch eine kleinteiligere Neuordnung der Ausschreibungsgebiete. Diese soll insbesondere auch regional tätigen Spezialisten ermöglichen, zukünftig Logistikleistungen im GRS zu erbringen.⁵⁰

⁵⁰ <http://www.grs-batterien.de/grs-batterien/aktuelles/singleansicht/article/grs-batterien-schreibt-ruecknahmelogistik-fuer-altbatterien-bundesweit-aus.html> (Zugriff: 15.06.2015)

4.2.3 Übersicht wichtiger Informationen zum Transport

Batterien ≤ 100 Wh (freigestellte Lithium-Ionen-Batterien) Zellen bis 20 Wh

Transportweg Straße / Schiene / See	Vorschriften	ADR / RID / IMDG SV 188 Hinweise: Gefahrgut der Klasse 9
	Gewicht	30 kg (brutto) pro Versandstück Für Batterien in Ausrüstung frei
	Stückzahl	frei
	Verpackung	▪ Batterien gegen Kurzschluss sichern ▪ Starke Außenverpackung nach allgemeinen Anforderungen ▪ Innenverpackung muss Batterie komplett umschließen ▪ Fallprüfung notwendig Bei Batterien im Gerät muss die Sicherung so sein, dass keine versehentliche Betätigung möglich ist
	Kennzeichnung / Dokumente	Kennzeichnung des Packstücks mit (zusätzlich auf Begleitdokument): ▪ Lieferung enthält Lithium-Ionen-Batterien bzw. Lieferung enthält Lithium-Metall-Batterien ▪ Packstück sorgsam behandeln ▪ Bei Beschädigung besteht Entzündungsgefahr ▪ Wird das Packstück beschädigt, muss es isoliert, überprüft und bei Bedarf neu verpackt werden. ▪ Telefonnummer für weitere Informationen Keine Kennzeichnung notwendig bei Packstücken, die max. 4 Zellen bzw. 2 Batterien in Ausrüstung oder ausschließlich in Ausrüstung eingebaute Knopfzellen enthalten Abfertigungskennzeichen (Symbol 3) Besondere Hinweise im Frachtbrief: „Excepted Lithium Batteries as per Special Provision 188“
Transportweg Luft	Vorschriften	IATA DGR 965-970 Prüfungen nach UN 38.3 müssen für Batterietyp erfüllt sein Gefahrgutschulung der versendenden Person notwendig
	Gewicht	2,5 kg mit Ausrüstung verpackt oder in Ausrüstung: 5 kg Batteriegewicht (netto) pro Versandstück
	Stückzahl	2 Batterien pro Versandstück Mit Ausrüstung verpackt: Menge der zum Betrieb der Ausrüstung notwendige + 2 Ersatzbatterien In Ausrüstung keine Stückbegrenzung

Verpackung	Packing Instruction (PI) 965 (Teil2) Lithium-Ionen-Batterien (UN3480) PI 966 (Teil2) Lithium-Ionen-Batterien mit Ausrüstung verpackt (UN3481) PI 967 (Teil2) Lithium-Ionen-Batterien in Ausrüstungen (UN3481) ▪ Batterien gegen Kurzschluss sichern ▪ Innenverpackung muss Batterie komplett umschließen ▪ Starke Außenverpackung aus Material mit ausreichender Festigkeit und geeigneter Konstruktion ▪ Bei Batterien in Ausrüstung muss die Sicherung so sein, dass kein versehentlicher Betrieb möglich ist Ausrüstung muss innerhalb der Außenverpackung gegen Bewegung gesichert sein
Kennzeichnung/ Dokumente	Alle Angaben wie Straße/Schiene/See Zusätzliche Angaben: Handling Label mind. 12 cm x 10 cm (Sprache Englisch; Originalfarbe einhalten) Brutto-Gewicht (kg)? Vorsicht bei Umverpackung! → Handling-Label muss außen erkennbar sein oder neu aufgebracht werden Mitführen eines Handling-Dokumentes

Batterien > 100 Wh

Transportweg Straße / Schiene / Seefracht	Vorschriften	SV 230
	Gewicht	Frei
	Stückzahl	Frei
	Verpackung	ADR P903 - Verpackung muss Batterien vor Beschädigung (durch Bewegung) schützen - Batterien sind gegen Kurzschluss zu sichern - Sicherung gegen unbeabsichtigte Bewegung - UN geprüfte Verpackung der Verpackungsgruppe II - Starke Außenverpackung bei Batterien in Ausrüstung die gegen Bewegung sichern - Einhaltung eines Qualitätssicherungsprogrammes
	Kennzeichnung / Dokumente	Gefahrgutzeichen Klasse 9 Aufschrift „LITHIUM-ION BATTERIES“ (UN 3480) bzw. „LITHIUM-ION BATTERIES PACKED WITH EQUIPMENT“ or „LITHIUM-ION BATTERIES CONTAINED IN EQUIPMENT“ - Packstück sorgsam behandeln - Bei Beschädigung besteht Entzündungsgefahr - Wird das Packstück beschädigt, muss es isoliert, überprüft und bei Bedarf neu verpackt werden. - Telefonnummer für weitere Informationen
Transportweg Luft	Vorschriften	- IATA 965-970 - Gefahrgutschulung der versendenden Person notwendig - Sonderbestimmungen - A164 Elektrobatterien u batteriebetriebene Geräte - A181 Kombination aus Lithium-Batterien in Ausrüstung und mit Ausrüstung verpackt
	Gewicht	- Pax A/C: 5 kg netto Batteriegewicht pro - Versandstück - CAO:35 kg pro Versandstück
	Stückzahl	Keine
	Verpackung	- IATA Verpackungsanweisungen 965-970 - Innenverpackungen müssen die Batterien komplett umschließen - Batterien sind gegen Kurzschluss zu sichern - Sicherung gegen unbeabsichtigte Bewegung - UN geprüfte Verpackung der Verpackungsgruppe II - Starke Außenverpackung bei Batterien in einem Gerät eingesetzt - Kontakt mit leitfähigem Werkstoff innerhalb der Verpackung unterbinden - Bei Batterien im Gerät muss die Sicherung so sein, dass keine versehentliche Betätigung möglich ist - UN-geprüfte Verpackung notwendig (nicht notwendig bei Batterien eingesetzt in Geräte)

**Kennzeichnung /
Dokumente**

- UN Nummer
- Gefahrenkennzeichen Klasse 9
- Dokument: Versenderklärung für gefährliche Güter
- Bei Umverpackungen weitere Anforderungen
- Batteriegewicht (netto)
- Bei Überschreitung der Gewichts- oder Mengengrenzwerte muss zusätzlich das Abfertigungskennzeichen angebracht werden und die Dokumentation muss die Einzelheiten der Sendung beschreiben; es ist keine UN-Spezifikationsverpackung notwendig
- In Ausrüstung oder mit Ausrüstung verpackt ist die Angabe auf dem Versandstück als Beispiel „UN3481 Lithium ion batteries packed with equipment“
- USA: Bei Lithium-Metall-Batterie nationale Gefahrgutvorschriften der USA beachten

Prototypen (ohne UN Test 38.3)

Transportweg Straße / Schiene / Seefracht	Vorschriften	ADR SV 310
	Gewicht	keine
	Stückzahl	Max. 100 Lithium-Zellen oder -Batterien pro Jahr
	Verpackung	- UN geprüfte Außenverpackung der Verpackungsgruppe I (Fass oder Kiste aus Metall, Kunststoff oder Sperrholz) - jede Batterie einzeln in Innenverpackung innerhalb der Außenverpackung - Nicht brennbares und nicht leitendes Verpackungs- und Polstermaterial
	Kennzeichnung / Dokumente	- Angabe der Batterie „UN 3480 LITHIUM-ION BATTERIES“ (Beispiel) - Symbol Gefahrgutklasse 9 - Übliche Kennzeichnung und Beförderungspapier
Transportweg Luft	Vorschriften	- IATA A88 (Genehmigung der zuständigen Behörde des Abgangslandes notwendig)
	Gewicht	35 kg brutto pro Versandstück
	Stückzahl	keine
	Verpackung	- Sonderbestimmung A88 - UN geprüfte Außenverpackung der Verpackungsgruppe I (Fass oder Kiste aus Metall, Kunststoff oder Sperrholz) - Schutz vor Kurzschluss - jede Batterie einzeln in Innenverpackung innerhalb der Außenverpackung - Nicht brennbares und nicht leitendes Verpackungs- und Polstermaterial
	Kennzeichnung / Dokumente	- Kopie der Genehmigung mit Mengenangaben beilegen - Versand von Batterien mit mehr als 35 kg mit Genehmigung möglich: Sonderbestimmung A99 - Möglicherweise: Kennzeichen Frachtflugzeug

Gebrauchte Batterien

Transportweg Straße / Schiene / Seefracht	Vorschriften	SV 636 Multilaterale Vereinbarung M272 Batterien dürfen nicht beschädigt bzw. defekt sein
	Gewicht	333 kg Lithiumbatterien pro Beförderungseinheit
	Stückzahl	keine
	Verpackung	P909 ▪ Verpackungen nach Verpackungsgruppe II ▪ Sicherung gegen Kurzschluss und Wärmeentwicklung (Abkleben der Pole, Innenverpackung) ▪ Sicherung gegen Verrutschen, Bewegung (nicht brennbares/nicht leitfähiges Polstermaterial) ▪ Metallverpackungen mit nicht leitfähigem Auskleidematerial in angemessener Stärke (Kunststoff) versehen ▪ Lithium-Ionen-Batterien ≤ 100 Wh oder max. 500 g ▪ Verpackung in widerstandsfähiger Außenverpackung mit einer Bruttomasse von höchstens 30 kg möglich ▪ Qualitätssicherungssystem, dass Gesamtmenge pro Beförderungseinheit nicht überschritten wird ▪ Batterien in Ausrüstung ▪ Verpackung in widerstandsfähiger Außenverpackung mit geeignetem Fassungsraum ▪ Große Ausrüstungen dürfen unverpackt oder auf Paletten zur Beförderung aufgegeben werden, wenn sie gleichwertig geschützt werden
	Kennzeichnung / Dokumente	Aufschrift „LITHIUMBATTERIEN ZUR ENTSORGUNG“ oder „LITHIUMBATTERIEN ZUM RECYCLING“
Transportweg Luft	Vorschriften	IATA A183
	Gewicht	
	Stückzahl	
	Verpackung	„Abfallbatterien und Batterien, die zur Wiederverwertung oder Entsorgung versendet werden, sind zur Beförderung im Luftverkehr verboten. Es sei denn, es wird durch die zuständige nationale Behörde des Abgangsstaates und des Staates des Luftfahrtunternehmens genehmigt.“
	Kennzeichnung / Dokumente	

Defekte Batterien

Transportweg Straße / Schiene / Seefracht	Vorschriften	- SV 661 - M259 - Allgemeinverfügung der BAM (bis 31.12.2014) zur Beförderung von beschädigten oder defekten Lithium-Metall-Zellen oder -Batterien der UN Nummer 3090 (in Ausrüstung UN Nummer 3091) - Sowie Lithium-Ionen-Zellen oder -Batterien der UN Nummer 3480 (in Ausrüstung UN Nummer 3481)
	Gewicht	keine
	Stückzahl	keine
	Verpackung	ADR P908 - Jede Batterie einzeln in flüssigkeitsdichte Innenverpackung - Bewegung durch Füllstoff unterbinden - UN-geprüfte Außenverpackung der Verpackungsgruppe II - Evtl. Entlüftungseinrichtung bei verschlossenen Verpackungen - Jede Innenverpackung mit ausreichender Menge nicht brennbarem und nicht leitendem Wärmedämmstoff umgeben - Aufsaugmaterial hinzufügen - Maßnahmen zur Minimierung der Auswirkungen von Erschütterungen oder Vibrationen treffen - Schutz gegen Kurzschluss
	Kennzeichnung/ Dokumente	Kennzeichnung: „BESCHÄDIGTE / DEFEKTE LITHIUM-IONEN-BATTERIEN“ (Beispiel) - Gefahrensymbol Klasse 9 - Im Transportdokument vermerken: „Beförderung vereinbart gemäß den Bedingungen des Abschnittes 1.5.1 des ADR (M259)“ - Transportgenehmigung der zuständigen Behörde als Begleitdokument - Information über Beförderung an BAM melden, mit Angabe der Gründe für die Nutzung der M259 und Beschreibung der beförderten Güter - Bei Nutzung der Allgemeinverfügung den Wortlaut dieser den Beförderungsdokumenten hinzufügen
Transportweg Luft	Vorschriften	IATA A154
	Gewicht	
	Stückzahl	
	Verpackung	Lithium-Batterien, die vom Hersteller als defekt eingestuft werden oder beschädigt sind bzw. die Möglichkeit einer Hitzentwicklung besteht, sind zur Beförderung per Luftfracht verboten.
	Kennzeichnung/ Dokumente	

Tabelle 6: Übersicht wichtiger Informationen zum Transport

		
Kennzeichen der Gefahrgutklasse 9	Abfertigungskennzeichen	CAO: Kennzeichnung nur Frachtflugzeug

Batterien in Ausrüstung:

- **UN 3090** Lithium-Metall-Batterien
- **UN 3091** Lithium-Metall-Batterien in Ausrüstung
- **UN 3480** Lithium-Ionen-Batterien
- **UN 3481** Lithium-Ionen-Batterien in Ausrüstung
- **UN 3171** Batteriebetriebenes Fahrzeug oder batteriebetriebenes System

Transportwege und zugehörige Regelungen:

- Straße: ADR
- Schiene: RID (Ordnung für die internationale Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter)
- Seefracht: IMDG (Gefahrgutkennzeichnung für gefährliche Güter im Schiffsverkehr)
- Luftfracht: IATA (Internationale Luftverkehrs-Vereinigung)

4.3 Verpackung von Batterien

Gesetzlich geregelt sind die Verpackungen in Vorschriften des ADR.

Zweck der Verpackung sollte sein (DIN EN 62281), mechanische Beschädigungen beim Transport, beim Handhaben und beim Stapeln zu verhindern, insbesondere mit Blick auf ein Stauchen der Batterien, aber auch unbeabsichtigte Kurzschlüsse und die Korrosion der Anschlüsse (Eindringen von Feuchtigkeit). Daher wird beim Transport von Lithiumzellen bzw. -batterien aus Sicherheitsgründen empfohlen, die Originalverpackung zu verwenden.

Sollte es beim Transport zu einer Beschädigung kommen (Stauchung, Loch in der Verpackung, aufgerissene Verpackung), sodass der Inhalt sichtbar wird, dürfen diese Versandstücke nicht weiter transportiert werden. Nach Aussonderung muss der Versender der Ware befragt werden. Dieser muss die Ware gegebenenfalls überprüfen und neu verpacken.

4.3.1 Beschädigte Batterien

Für beschädigte oder defekte Lithium-Ionen (-Metall)-Zellen/Batterien, auch in Ausrüstung enthaltene, dürfen die unten genannten Verpackungen verwendet werden. Die Buchstaben/Zahlencodes stellen die Klassifizierungscodes der Verpackungen dar. Dabei steht die erste Kennzahl für die Verpackungsart, der Buchstabe für den Werkstoff der Verpackung und die ggf. vorhandene 2. Ziffer für einen nicht abnehmbaren (1) oder abnehmbaren (2) Deckel; Beispiele: 1A2 – Fass aus Stahl mit abnehmbarem Deckel; 4N – Kiste aus Metall; 3H2 – Kanister aus Kunststoff mit nichtabnehmbarem Deckel; (Übersicht: <http://www.gefahrgut-heute.de/docs/verpackungen.html>). Zu unterscheiden sind:

- Fässer (1A2, 1B2, 1N2, 1H2, 1D, 1G)
- Kisten (4A, 4B, 4N, 4C1, 4C2, 4D, 4F, 4G, 4H1, 4H2)
- Kanister (3A2, 3B2, 3H2)
- Großverpackungen aus Stahl (50A), Aluminium (50B), aus einem anderen Stahl oder Aluminium (50N), aus starrem Kunststoff (50H) oder aus Sperrholz (50D) sind zugelassen, wenn die allgemeinen Vorschriften erfüllt sind.

Die Verpackungen müssen den Anforderungen der Verpackungsgruppe II entsprechen. Von Gefahrgütern, die der Verpackungsgruppe II zugeordnet werden, gehen demnach mittlere Gefahren aus während Gefahrgüter mit hohen Gefahren der Verpackungsgruppe I und Gefahrgüter mit geringer Gefahr der Verpackungsgruppe III zugeordnet werden. Ob eine Verpackung als Gefahrgutverpackung zugelassen wird und welcher Gruppe sie zugeordnet wird, entscheidet das Bundesamt für Materialforschung und -prüfung (BAM) nach speziellen Prüfverfahren. Somit sind bei den drei Verpackungsgruppen jeweils nur bestimmte Verpackungen mit unterschiedlichen Sicherheitsanforderungen zum Transport des Gefahrguts erlaubt. Für Lithium-Ionen-Batterien bedeutet dies:

- Die Zelle/Batterie/Ausrüstung mit Batterie muss jeweils einzeln in eine dichte Innenverpackung (Austritt von Elektrolyt verhindern) verpackt und in eine dichte Außenverpackung eingesetzt werden.
- Die Innenverpackung muss mit Wärmedämmstoff umschlossen sein (Schutz bei Wärmeentwicklung).
- Eventuell ist bei dicht verschlossenen Verpackungen eine Entlüftungseinrichtung nötig.
- Auswirkungen von Vibrationen und Stößen müssen gering gehalten und Bewegung der Batterien im Verpackungsmaterial verhindert werden. (Es darf kein brennbares und kein leitfähiges Polstermaterial verwendet werden).
- Die Nichtbrennbarkeit des Verpackungsmaterials muss in Übereinstimmung mit einer Norm geprüft werden (z. B. nach DIN 16995).
- Bei auslaufenden Zellen/Batterien muss die Innen- oder die Außenverpackung mit saugfähigem Material ausgestattet werden.
- Zellen/Batterien mit einer Nettomasse > 30 kg dürfen nur einzeln in einer Außenverpackung verpackt sein.
- Zusätzlich müssen die Batterien gegen Kurzschluss gesichert sein.

4.4 Sachgerechter Umgang

4.4.1 Tragbare Geräte

Für den sachgerechten Umgang mit Batterien sind unbedingt Herstellerempfehlungen und produktspezifische Merkblätter zu befolgen. In DIN EN 62133, Anhang C sind einige Empfehlungen an Endverbraucher von tragbaren gasdichten Akkumulatoren enthalten.

Insbesondere folgende Punkte sollten beachtet werden:

- Akkumulatoren oder Batterien dürfen nicht zerlegt, geöffnet oder zerkleinert werden.
- Zellen/Batterien dürfen weder Hitze noch Feuer ausgesetzt werden, und die Lagerung in direktem Sonnenlicht sollte vermieden werden.
- Zellen/Batterien dürfen nicht kurzgeschlossen werden (Vorsicht auch bei Lagerung, bei der gegenseitiger Kurzschluss möglich ist).
- Zellen/Batterien sollten keinen mechanischen Stößen ausgesetzt werden.
- Die Flüssigkeit undichter Zellen darf nicht mit der Haut in Berührung kommen und keinesfalls in die Augen gelangen.
- Es sollten nur Ladegeräte verwendet werden, die für den Gebrauch in Verbindung mit einem Gerät vorgesehen sind.
- Zellen/Batterien sollten nicht über längere Zeit geladen werden, wenn sie nicht benötigt werden.
- Zellen unterschiedlicher Herstellung, Kapazität, Baugröße und Bauart dürfen innerhalb eines Gerätes nicht gemischt eingesetzt werden.
- Zellen/Batterien sind ordnungsgemäß zu entsorgen.

Die Norm DIN EN 62485-4 informiert über die Sicherheit und den Gesundheitsschutz von Personen beim Umgang mit tragbaren Geräten, in denen wiederaufladbare Batterien zur Gleichstromversorgung enthalten sind. Diese Norm gilt unter Beachtung der Anforderungen der „Niederspannungsrichtlinie (2014/35/EU)“. Dabei ist festgelegt, welche Informationen beispielsweise in einer Gebrauchsanleitung zu dem Gerät stehen sollten, aber auch, welcher Schutz gegen Fehlbehandlung vorgesehen ist und auch, wie die Batteriefächer gestaltet sein sollten.

Die Belastung, der ein Lithium-Ionen-Akkumulator bei normalem Gebrauch in einem tragbaren Gerät ausgesetzt ist, wird vorher geprüft. Diese Sicherheitskriterien sind in der Norm DIN EN 62133 geregelt und betreffen

- Dauerladen mit niedrigem Strom,
- Schwingungen,
- Beanspruchungen von Spritzgussgehäusen bei hohen Temperaturen,
- Zyklische Temperaturwechsel.

Zusätzlich werden auch vorhersehbare Fehlbeanspruchungen wie ein falscher Einbau einer Zelle, ein äußerer Kurzschluss, thermische und mechanische (Fall, Quetschung etc.) Fehlbehandlung, Unterdruck (Flugzeug), Überladen oder auch Tiefentladung berücksichtigt und Vorgaben zur Prüfung gemacht.

4.4.2 Stationäre Speicher

Die Anforderungen an stationäre Speicher sind in der Norm DIN 61427-1 „Wiederaufladbare Zellen und Batterien für die Speicherung erneuerbarer Energien – Allgemeine Anforderungen und Prüfverfahren – Teil 1: Photovoltaische netzunabhängige Anwendung“ definiert. Hierin sind vor allem Hinweise bezüglich der Standortbedingungen angegeben. Diese umfassen auch Hinweise zum physischen Schutz gegen widrige Standortbedingungen wie:

- Extreme und ungleichmäßige Temperaturen,
- direkte Sonneneinstrahlung (UV-Strahlung),
- Staub und Sand in der Luft,
- explosive Umgebungsluft,
- Überflutung, Kondenswasser, Meerwassersprühnebel,
- Erdbeben,
- Stöße und Schwingungen (Transport).

Derzeit sind zwei VDE-Anwendungsregeln zu stationären Speichern in der DKE in Arbeit. Eine der VDE-Anwendungsregeln (VDE-AR-E 2510-50) legt dabei die allgemeinen Sicherheitsanforderungen für stationäre Energiespeichersysteme fest, die Lithium-Batterien enthalten. Die zweite VDE-Anwendungsregel (VDE-AR-E 2510-2) definiert Sicherheitsanforderungen für die Planung, die Errichtung, den Betrieb, die Demontage und die Entsorgung ortsfester elektrischer Energiespeichersysteme mit Anschluss an das Niederspannungsnetz.

4.4.3 Elektrofahrzeuge

Teile 1, 2 und 3 der Normenreihe DIN EN 62660 sowie die Teile 1, 2 und 3 der Normenreihe ISO 12405 wurden veröffentlicht, um die Qualität und Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien in Kraftfahrzeugen sicherzustellen. In diesen Normen ist die Prüfung des Leistungsverhaltens, der Zuverlässigkeit und des Fehlgebrauchs von Lithium-Ionen-Batterie-Zellen, -Sätzen und -Systemen für den Einsatz in Elektrofahrzeugen festgelegt.

Die meisten Normen gibt es derzeit zur Ladeinfrastruktur und damit auch zum Ladevorgang von Batterien im Bereich Elektromobilität. Zu erwähnen ist die Norm DIN EN 61851-1, welche die Einrichtungen zum Laden von Elektro-Straßenfahrzeugen regelt. Dabei wird auch Augenmerk auf die elektrische Sicherheit des Bedienpersonals und Dritter gelegt. Aber auch Normen wie DIN VDE 0100-722 zum Errichten von Niederspannungsanlagen oder IEC 61000-6-3, die sich mit der Elektromagnetischen Verträglichkeit beschäftigt, müssen berücksichtigt werden. Bezüglich der Ladeinfrastruktur ist auf den „Technischen Leitfaden Ladeinfrastruktur“ der NPE (letzter Stand: August 2013) zu verweisen, der einen sehr guten Überblick über Ladetechnologien sowie Anforderungen an Aufstellort und Energieversorgung gibt. Darüber hinaus

sind in dem Leitfaden Empfehlungen für Immobilienbesitzer und -verwalter, aber auch Städteplaner, Architekten, Elektroinstallateure und Bauherren enthalten.

Zudem bietet der Leitfaden eine Übersicht zu den aktuellen vielfältigen Normungsaktivitäten mit einer übersichtlichen Zusammenstellung in Tabellenform von Normen, Spezifikationen und Normungsgremien zur Elektromobilität in der Deutschen Normungs-Roadmap Elektromobilität, die Ende 2014 in der Version 3 mit aktuellen Informationen erschienen ist.⁵¹

4.5 Prüfung

Die Teile 1, 2 und 3 der Normenreihe DIN EN 62660 beschreiben Testverfahren und Sicherheitsanforderungen für Lithium-Ionen-Batterien, die für den Einsatz in Elektrofahrzeugen gedacht sind. Dabei regelt Teil 1 die Prüfung des Leistungsverhaltens, während der Teil 2 Zuverlässigkeits- und Missbrauchsprüfungen beschreibt. Zudem regelt die dreiteilige Normenreihe ISO 12405 Testverfahren für Traktionsbatterien, je nachdem ob es um „High-Power“- „High-Energy“-Anwendungen oder um Sicherheitsanforderungen geht.

Die entsprechenden Prüfungen zur Transportfähigkeit von Lithium-Ionen-Batterien sind in der UN 38.3 gesetzlich geregelt für die Transportwege Land, Wasser und Luft. Vor dem Transport von Lithium-Metall und Lithium-Ionen-Zellen sind Tests nach der Norm UN 38.3 durchzuführen, die internationalen Gesetzesrang hat. Dieser Transporttest für wiederaufladbare Batterien verlangt folgende Einzelprüfungen:

1. Höhensimulation („altitude simulation“)
2. Thermischer Test (Temperaturwechsel)
3. Vibrationstest
4. Stoßtest („shock“)
5. Externer Kurzschluss
6. Aufprall/ Schlagwirkung („Impact“)
7. Überladung („Overcharge“)
8. Erzwungene Entladung.

Diese Einzeltests sind in Abhängigkeit der Art der Lithium(-Ionen)-Batterien bzw. -Zellen durchzuführen. Die Anzahl der zu prüfenden Batterien hängt hauptsächlich vom Gewicht der Lithium-enthaltenden Batterien ab: Wiederaufladbare lithiumhaltige Batterien mit einem Gewicht < 12 kg sind mit 8 Prüflingen zu testen, geltend für Test 1–5 und Test 7. Bei Batterien > 12 kg ist die notwendige Prüflingszahl um 50 % reduziert.

Auch in der Norm IEC 62619 „Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes“ werden Prüfverfahren und generelle Sicherheitsüberlegungen für Sekundärbatterien beschrieben.

⁵¹ Version 2 der Roadmap ist unter <http://www.dke.de/de/std/e-mobility/Seiten/E-Mobility.aspx> zu finden.

Es muss beachtet werden, dass für Antriebsbatteriesysteme in elektrischen Straßenfahrzeugen andere Normen gelten können, beispielsweise IEC 62660-1 „Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles – Part 1: Performance testing“. Bereits bei Konstruktion der Zellen/Batterien sollten Sicherheitsanforderungen berücksichtigt werden, welche die Möglichkeit einer abnormalen Erwärmung verhindern oder die Möglichkeit zum Entweichen von Überdruck vorsehen. Die Beachtung von Sicherheitsanforderungen schließen auch einen Kurzschluss unter Transportbedingungen aus.

Bei der Prüfung wird zwischen kleinen und großen Batteriesätzen unterschieden, wobei die Grenze bei einem Gesamt-Lithiumgehalt aller Anoden im vollgeladenen Zustand von 500 g gezogen wird, bzw. bei Lithium-Ionen-Batterien bei einer Nennenergie von 6200 Wh. Unterhalb der Grenze liegen kleine Batteriesätze, darüber liegen große Batteriesätze vor. Die Batterien werden stichprobenartig bei jeder Batterieart ausgewählt und hinsichtlich folgender Kriterien einer Prüfung unterzogen:

- Verrutschen
- Verformung
- Kurzschluss
- Übermäßige Erwärmung
- Austreten von Batterieflüssigkeit
- Entweichen von Gas
- Brand
- Bersten
- Explosion.

Dazu werden folgende Zustände ausgelöst:

- Druckabfall
- Temperaturwechsel
- Schwingung
- Schock
- Äußerer Kurzschluss
- Aufprallen/Quetschen.

Weitere Zustände, die durch unsachgemäßen Gebrauch entstehen, sowie die Verpackungsprüfung sind ebenfalls Bestandteil der Prüfung.

4.6 Lagerung

Da Speicherkapazitäten von Lithium-Batterien im Vergleich zu anderen kommerziellen Batterien größer sind, gehen von diesen Batterien bestimmte Risiken aus. Allerdings kann man bei den heutigen Fertigungsstandards davon ausgehen, dass bei ordnungsgemäßigem Umgang und sachgerechter Handhabung Lithium-Batterien als sicher anzusehen sind. Gerade bei der Lagerung sollte man jedoch bestimmte Re-

geln einhalten, um Gefahren zu minimieren. Der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) hat deshalb in einem Merkblatt (VdS3103:2012:06(01)) einige wichtige Punkte zusammengefasst, wobei Batteriesysteme mit niedriger, mittlerer und hoher Leistung zu unterscheiden sind. Mit Blick auf die Lagerung ist zu erwähnen, dass

- beschädigte Batterien umgehend entsorgt werden sollten;
- Batterien mit mittlerer und hoher Leistung möglichst separat gelagert und möglicherweise sogar brandschutztechnisch abgetrennt sein sollten.

Allgemeine Empfehlungen zur Lagerung von Lithium-Batterien nach DIN EN 62281 sind:

- Trocken, kühl und bei guter Belüftung lagern,
- festgelegte Stapelhöhe (Hersteller) der Batteriekartons nicht überschreiten,
- nicht in direkter Sonne oder dem Regen ausgesetzt lagern,
- in Originalverpackung lagern.

4.7 Rücknahme / Entsorgung / Recycling

Die Verantwortung für Rücknahme und Entsorgung von Altbatterien und Alttakkumulatoren liegt grundsätzlich in den Händen der Hersteller, Importeure und Vertreiber. Diese Rücknahmepflichten sind im BattG in § 5–8 geregelt.

Am 1. Dezember 2009 startete das BattG-Melderegister des Umweltbundesamtes. Hersteller und Importeure von Batterien und Akkumulatoren müssen sich im BattG-Melderegister eintragen und dabei Angaben zur Wahrnehmung ihrer Produktverantwortung hinterlegen. Die Anzeige der Marktteilnahme im BattG-Melderegister erfolgt elektronisch, ist kostenlos und über die Internetseite des Umweltbundesamtes (<http://www.umweltbundesamt.de/abfallwirtschaft/battg/index.htm>) zu erreichen. Das Register ist dort unter dem Menüpunkt „Einsicht in das Melderegister“ öffentlich und kostenlos einsehbar.

Nach BattG § 2 Nr. 15 Satz 2 gelten Vertreiber und Zwischenhändler, die vorsätzlich oder fahrlässig Batterien von Herstellern anbieten, die sich nicht beim Umweltbundesamt angezeigt haben, selbst als Hersteller und müssen damit die Entsorgungs- und sonstige Pflichten der Hersteller wahrnehmen. (Quelle: <http://www.it-recht-kanzlei.de/Thema/batteriegesetz-batterien.html?page=2&name=Pflichten-der-Vertreiber-H%C3%A4ndler#top>)

Führende Batteriehersteller und der Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V. haben 1998 die Stiftung „Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien“ (GRS Batterien) gegründet. Das Non-Profit-Unternehmen ist das vom Umweltbundesamt festgestellte Gemeinsame Rücknahmesystem für Gerätebatterien gemäß § 6 BattG. Bereits 2013 wurde mit einer Sammelquote von 45,2 % die erst ab 2016 gesetzlich vorgeschriebene Quote von 45 % erfüllt. Es gibt weitere Batterierücknahmesysteme in Deutschland, wie beispielsweise CCR REBAT der CCR AG oder Öcorecell der IFA-Ingenieurgesellschaft mbH. Diese Systeme haben einen Marktanteil von etwa 15 %.

Nach §5 des BattG sind Hersteller verpflichtet, die von den Vertreibern zurückgenommenen Altbatterien unentgeltlich zurückzunehmen und nach den rechtlichen Vorgaben zu verwerten. Dabei können die Hersteller ihre Rücknahmepflichten durch ein gemeinsames, flächendeckendes Rücknahmesystem wie GRS sicherstellen. Auch herstellereigene Rücknahmesysteme sind unter bestimmten Voraussetzungen möglich, sofern sie behördlich genehmigt sind. Für Fahrzeug-Batterien ist die Pfandpflicht in § 10 zu beachten. Das gemeinsame Rücknahmesystem muss zur Erfolgskontrolle und Überprüfung der vorgegebenen Sammelziele jährlich eine Dokumentation beim Umweltbundesamt vorlegen.

Zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien gibt es einige Forschungs- (z. B. LithoRec, EcoBatRec) und Entwicklungsaktivitäten und mittlerweile auch Erfahrungen bei der industriellen Umsetzung. Teilweise werden diese auch vom Bundesumweltministerium gefördert. Dabei liegt der Fokus derzeit nicht ausschließlich auf der Wiedergewinnung von Lithium, sondern eher auf der Wiedergewinnung der Wertmetalle Cobalt und Nickel aus kleinen Batterien. Aufgrund des höheren Anteils an Aktivmaterialien in Antriebsbatterien ist eine gezielte Demontage und Aufarbeitung der Materialien auch hier sowohl ökonomisch als auch ökologisch sinnvoll und trägt zudem zur Ressourceneffizienz und -schonung bei. EU-weite Direktiven schreiben bestimmte Recyclingraten vor. So müssen nach der Altfahrzeugdirektive im Jahr 2015 85 Gewichts-% wiederverwendet oder recycelt werden.⁵² Das Recycling von EV-Batterien ist jedoch aufgrund vieler Teilschritte und unterschiedlicher Batteriechemien eine komplexe Herausforderung.

⁵² Korthauer, R. (2011): *Handbuch Elektromobilität – Kapitel Lithiumrecycling aus Batteriematerialien*, 2. Auflage, EW Medien und Kongresse GmbH, S. 103

5 Quellenverzeichnis

5.1 Literatur

Arora, P.; Zhang, Z. (2004): *Battery Separators*, Chem. Rev. (Chemical Reviews) 104 (10) S. 4419–4462

Balakrishnan, P.G.; Ramesh, R.; Kumar, T.P. (2006): *Safety mechanisms in lithium-ion batteries*, Journal of Power Sources 155, S. 401-414

Beermann, M.; Jungmeier, G.; Wenzel, J.; Spitzer, J.; Canella, L.; Engel, A.; Schmuck, M.; Koller, S. (2010): *Quo Vadis Elektroauto? – Grundlagen einer Road Map für die Einführung von Elektro-Fahrzeugen in Österreich*, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), Institut für Energieforschung, Graz

Birke, P. ; Schiemann, M. (2013): *Akkumulatoren – Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft elektrochemischer Energiespeicher*, Herbert Utz Verlag, München

Dorn, R. et al. (2013): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien – Kapitel 14: Batteriemanagementsystem*, Springer Vieweg, Heidelberg

Electrification Coalition (2009): *Electrification Roadmap – Revolutionizing Transportation and achieving Energy Security*, S. 84–86

Goodenough, J.; Abruna, H.D.; Buchanan, M.V. (2007): *Basic Research Needs for Electrical Energy Storage*, Office of Basic Energy Sciences, U.S. Department of Energy, Washington D.C.

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

Hehn, G. (2014): *Elektronik reader's choice August 2014 – Autarke Stromspeicher*, elektroniknet.de

Hettesheimer, T.; Hummen, T. et al. (2013): *Energiespeicher Monitoring für die Elektromobilität (EMO-TOR)-Bericht zur Produktion und Ökobilanzierung*, Fraunhofer ISI, Karlsruhe

http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
(Zugriff: 15.06.2015)

<http://sf.france-science.org/2011/03/25/the-lithium-used-in-electric-cars-is-not-a-renewable-resource-part-2-2/>
(Zugriff: 01.09.2014)

http://wiki.zimt.uni-siegen.de/fertigungsautomatisierung/index.php/Lithium-Ionen-Batterien_für_Elektroautos_von_morgen_-_Zellenkonzepte_und_ihre_Herausforderungen_an_die_Fertigungstechnologien
(Zugriff: 25.08.2014)

<http://www.ansmann-energy.com/unternehmen/ansmann-wiki/vergleich-zellchemien.html>
(Zugriff: 20.08.2014)

<http://www.grs-batterien.de/grs-batterien/aktuelles/singleansicht/article/grs-batterien-schreibt-ruecknahmelogistik-fuer-altbatterien-bundesweit-aus.html>
(Zugriff: 22.06.2015)

<http://www.iccnexergy.com/battery-systems/battery-energy-density-comparison/>
(Zugriff: 26.08.2014)

<http://www.nature.com/nmat/journal/v12/n6/full/nmat3623.html>
(Zugriff: 29.08.2014)

http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/6_abb_geraete-batterien-batteriesys_2014-10-24.pdf
(Zugriff: 22.06.2015)

<https://www.vdma.org/documents/266699/1098594/Projekt%20Modulares%20Multi-Use%20Batteriesystem/d5426b11-a460-46d9-af1b-8afd35614f5b>
(Zugriff: 29.08.2014)

Karden, E.; Ploumen, S.; Fricke, B.; Miller, T.; Snyder, K. (2007): *Energy storage devices for future hybrid electric vehicles*, Journal of Power Sources 168 (1), S. 2–11

Ketterer, B.; Karl, U.; Möst, D.; Ulrich, S. (2009): *Lithium-Ionen-Batterien-Stand der Technik und Anwendungspotenzial in Hybrid-, Plug-In-Hybrid- und Elektrofahrzeugen*, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Kleine-Möllhoff, P.; Benad, H. et al. (2012): *Die Batterie als Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität der Zukunft*, Hochschule Reutlingen, Renak

Korthauer, R. (2011): *Handbuch Elektromobilität – Kapitel Lithiumrecycling aus Batteriematerialien*, 2. Auflage, EW Medien und Kongresse GmbH

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

Leuthner, S. (2013): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien – Kapitel 2: Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien*, Springer Vieweg, Heidelberg

Linden, D.; Reddy, T. B. (2002): *Handbook of Batteries*, 3. Auflage, McGraw-Hill, New York

Schlick, T.; Hertel, G. et al. (2011): *Zukunftsfeld Elektromobilität: Chancen und Herausforderungen für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau*, Studie, VDMA und Roland Berger Strategy Consultants, Frankfurt/München

Schulz, C. (2008): *Optimierung der Leistungsaufnahme eines solarbetriebenen Ad-Hoc-Netzwerk-Knotens*, Diplomica Verlag GmbH, Hamburg

Seminar-Unterlagen von <http://www.batteryuniversity.eu>

Tarascon, J.-M.; Armand, M. (2001): *Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries*, Nature, Vol. 414

Treffer, F. (2013): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien – Kapitel 28: Lithium-Ionen-Batterie-Recycling*, Springer Vieweg, Heidelberg

Umweltbundesamt (2012): *Batterien und Akkus – Ihre Fragen, unsere Antworten zu Batterien, Akkus und Umwelt*, Dessau

Wallentowitz, H.; Freialdenhoven A. (2011): *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges – Technologien, Märkte und Implikationen*, 2. überarbeitete Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden

Weber, C.J.; Roth, M. (2013): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien – Kapitel 7: Separatoren*, Springer Vieweg, Heidelberg

Wen, S. (2009): *Cell balancing buys extra run time and battery life*, Analog Applications Journal 10, S.14–18

Wöhrle, T. (2013): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien – Kapitel 9: Lithium-Ionen-Zelle*, Springer Vieweg, Heidelberg

Wurm, C. et al. (2013): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien – Kapitel 5: Anodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien*, Springer Vieweg, Heidelberg

5.2 Gesetze und Vorschriften

BattG	§ 2 Begriffsbestimmungen Nr. 15 Satz 2 § 5 Rücknahmepflichten der Hersteller Nr. 15 Satz 2 § 6 Gemeinsames Rücknahmesystem für Geräte-Alt Batterien § 7 Herstellereigene Rücknahmesysteme für Geräte-Alt Batterien § 8 Rücknahme von Fahrzeug- und Industrie-Alt Batterien § 17 Kennzeichnung § 18 Hinweispflichten Absatz 2 § 20 Ermächtigung zum Erlass von Rechtsverordnungen Nr.4
ADN / IATA-Gefahrgutvorschriften	„IATA Guidance Document: Transport of Lithium Metal and Lithium Ion Batteries.“ IATA. 2013. Web. http://www.iata.org/whatwedo/cargo/dgr/Documents/Lithium-Battery-Guidance-2013-V1.1.pdf
ADR	Anlagen A und B des Europäischen Übereinkommens vom 30.09.1957 über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR): Fassung vom 1. Januar 2009 http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Artikel/UI/Gefahrgut/gefahrgut-recht-vorschriften-strasse.html?nn=36032
IMDG	International Maritime Dangerous Goods (IMDG) Code, imo.org http://www.imo.org/Publications/Documents/Supplements%20and%20CDs/English/QH210E_web.pdf
RID	Ordnung für die internationale Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter *(RID) Fassung vom 1. Januar 2007 http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Gefahrgut/rid2007-neufassung.pdf?__blob=publicationFile
EU-Richtlinien	Die Richtlinie 2011/65/EU enthält Beschränkungen zur Verwendung von Blei u. a. im Automobil und zeigt gefährliche Stoffe in Batteriesystemen nach RoHS auf.

5.3 Normen

DIN VDE 0100-722	„Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 7-722: Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art – Stromversorgung von Elektrofahrzeugen“
ISO 12405-1	„Electrically propelled road vehicles – Test specification for Li-Ion traction battery systems – Part 1: High power applications“
ISO 12405-2	„Electrically propelled road vehicles – Test specification for Li-Ion traction battery systems – Part 2: High energy applications“
ISO 12405-3	„Electrically propelled road vehicles – Test specification for Li-Ion traction battery systems – Part 2: Safety performance requirements“
DIN 16995	„Folien für Verpackungszwecke – Kunststoff-Folien – Eigenschaften, Prüfverfahren“
DIN 43539	„Akkumulatoren; Prüfungen; Ortsfeste Zellen und Batterien“
DIN EN 60086-4	„Primärbatterien – Teil 4: Sicherheit von Lithium-Batterien“
DIN EN 61000-6-3	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), Störaussendung für Wohnbereich
DIN EN 61427-1	„Wiederaufladbare Zellen und Batterien für die Speicherung erneuerbarer Energien-Allgemeine Anforderungen und Prüfverfahren – Teil1: Photovoltaische netz-unabhängige Anwendung“
DIN EN 61960	„Akkumulatoren und Batterien mit alkalischen oder anderen nichtsäurehaltigen Elektrolyten – Lithium-Akkumulatoren und -batterien für tragbare Geräte“
DIN EN 61851-1	„Electric vehicle conductive charging system – General requirements“
IEC 61982-4	„Secondary batteries (except lithium) for the propulsion of electric road vehicles - Safety requirements of nickel-metal hydride cells and modules“
IEC 61982-5	„Secondary batteries for the propulsion of electric road vehicles – Part 5: Reliability and abuse testing for lithium-ion cells“
DIN EN 62133	„Akkumulatoren und Batterien mit alkalischen oder anderen nicht säurehaltigen Elektrolyten – Sicherheitsanforderungen für tragbare gasdichte Akkumulatoren und daraus hergestellte Batterien für die Verwendung in tragbaren Geräten“
DIN EN 62281	„Sicherheit von Primär- und Sekundär-Lithium-Batterien beim Transport“
DIN EN 62485-4	„Sicherheitsanforderungen an Batterien und Batterieanlagen – Teil 4: Batterien für tragbare Geräte“

DIN EN 62619	„Akkumulatoren und Batterien mit alkalischen oder anderen nicht säurehaltigen Elektrolyten – Sicherheitsanforderungen für Lithium-Akkumulatoren und -Batterien für die Verwendung in industriellen Anwendungen“
DIN EN 62660-1	„Lithium-Ionen-Sekundärzellen für den Antrieb von Elektrostraßenfahrzeugen – Teil 1: Prüfung des Leistungsverhaltens“
DIN EN 62660-2	„Lithium-Ionen-Sekundärzellen für den Antrieb von Elektrostraßenfahrzeugen – Teil 2: Zuverlässigkeits- und Missbrauchsprüfung“
DIN EN 62660-3	„Lithium-Ionen-Sekundärzellen für den Antrieb von Elektrostraßenfahrzeugen – Teil 3: Sicherheitsanforderungen von Zellen und Modulen“
VDE-AR-E 2510-50	„Stationäre Energiespeichersysteme mit Lithium Batterien – Sicherheitsanforderungen“
VDE-AR-E 2510-2	„Stationäre elektrische Energiespeichersysteme vorgesehen zum Anschluss an das Niederspannungsnetz“

6 Stichwortverzeichnis

Aktivmaterial	2	Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid (NCA)	25
Alterung	13	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid (NMC)	25
Balancing-Funktion	8	Materialkombinationen	24
Batterie	2	Memory- oder Lazy-Battery-Effekt	14
Batteriemanagementsystem (BMS)	8	Modul	6
Batteriesystem	6	Modularer Aufbau	22
Beginn of Life (BoL)	13	Negative Elektrode	3
Belastungen	18	Parallelschaltung	6
Blockaufbau	22	Positive Elektrode	3
Coffeebag-Zelle	20	Pouch-Zelle	20
Conductive Interphase	5	Primärzelle	2
C-Rate	11	Prismatischen Zelle	20
Dauerladung	18	Recycling	21
Dendrite	4	Reihenschaltung	6
Elektrolyt	2	RoHS (Restriction of Hazardous Substances) ..	IV
End of Life (EoL)	13	Ruhespannung	12
Energiedichte	9	Second-Life Konzepte	22
Energieoptimierte Batterien	10	Sekundärzelle	2
Entladen	4	Separator	6
Entladeschlussspannung	12	Sicherheit	16
Entladevorgang	10	Solid Electrolyte Interphase	5
Gehäuse	8	Spannung	6
Gravimetrische Energiedichte	9	Spezifische Energie	9
Gravimetrische Leistungsdichte	11	Spezifische Ladung	9
Hochenergiezellen	24	State of Charge (SOC)	14
Hochleistungszellen	24	State of Health	8
Hochstromfähigkeit	11	Systemebene	17
Idealtemperatur	18	Teilzyklus	14
Kalendarische Lebensdauer	13	Thermal Runaway	16
Kapazität	8	Thermomanagement	8
Kosten	23	Tiefenentladung	8
Laden	4	Überladung	8
Ladeschlussspannung	12	Vollzyklus	14
Ladevorgang	10	Volumetrische Energiedichte	9
Ladungsdichte	9	Volumetrische Ladungsdichte	9
Ladungsmenge	5	Volumetrische Leistungsdichte	11
Lebensdauer	2	Wirtschaftlichkeit	23
Leistungsoptimierte Batterien	10	Zellchemien	24
Lithium	4	Zellebene	16
Lithium-Cobalt-Oxid (LCO)	25	Zyklisierung	13
Lithium-Eisen-Phosphat (LFP)	26	Zykluslebensdauer	13
Lithium-Mangan-Oxid (LMO)	26	Zylindrische Zelle	18

