



EUROPA-FACHBUCHREIHE
für Kraftfahrzeugtechnik

Fachwissen E-Bike

Technik der Leicht-Elektrofahrzeuge

2. Auflage

Verlag Europa-Lehrmittel · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsselberger Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 24015

Autoren „Fachwissen E-Bike“

Dipl.-Ing. Michael Gressmann	Borken (He)
Ing. (grad.) Eberhard Müller	Stuttgart
Dipl.-Ing. Ludwig Retzbach	Riederich

Lektorat

Ing. (grad.) Eberhard Müller	Stuttgart
------------------------------	-----------

Verlagslektorat

Dipl.-Ing. Alexander Barth	Haan
----------------------------	------

Bildbearbeitung

Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel, 73760 Ostfildern

Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar

Das vorliegende Buch richtet sich selbstverständlich an Mechanikerinnen und Mechaniker – allerdings haben die Autoren aus Gründen der besseren Lesbarkeit die männliche Form gewählt.

2. Auflage 2016

Druck 5 4 3 2 1

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Behebung von Druckfehlern untereinander unverändert sind.

ISBN 978-3-8085-2402-2

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2016 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Umschlag: Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar

Umschlagfoto: © bangLds-fotolia.com

Satz und Layout: Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar

Druck: M. P. Media-Print Informationstechnologie, 33100 Paderborn

Das vorliegende Buch befasst sich mit Aufbau, Wirkungsweise und Betriebsverhalten von Elektrofahrrädern. Stoffauswahl und Umfang wurden vorwiegend nach dem Gesichtspunkt festgelegt, Auszubildenden für Betrieb und Berufsschule die erforderlichen Fachkenntnisse zu vermitteln.

Der Ausbildungsberuf „**Zweiradmechatroniker – Fachrichtung Fahrradtechnik**“ ist innerhalb des Berufsfeldes Fahrzeugtechnik ein Beruf mit hohen fachspezifischen Anforderungen. Die technische Komplexität des Produktes Elektrofahrrad und die Innovation, die dieses Elektro-Leichtfahrzeug als Verkehrs- und Transportmittel sowie als „Hightech“-Sportgerät erfährt, erfordert mittlerweile ein eigenständiges Fachbuch – als Ergänzung zum Standardwerk „Fachkunde Fahrradtechnik“.

Das Buch enthält zusätzlich ein Kapitel über allgemeine Grundlagen der Elektrotechnik – soweit sie für Elektro-Leichtfahrzeuge relevant sind. Die Ausführungen sollen helfen die Funktion der elektrischen Komponenten in Antrieb, Steuerung und Akku besser zu verstehen. Wer auf diesem Gebiet versiert ist, kann das Kapitel überspringen.

Die hier behandelten elektrischen Bauteile wie Batterie, Antrieb und Steuerung werden nach dem Stand der Technik auch in den meisten anderen Light Electric Vehicles (LEV) eingesetzt. Unter LEV werden international alle ein- oder mehrspurigen Leichtfahrzeuge bis 250 kg Gewicht erfasst, die über einen Elektroantrieb verfügen. Hierzu gehören Pedelecs, E-Bikes, Kabinen-Bikes, E-Roller, E-Cross-Maschinen, Elektro-Rollstühle, Segways, Roboter, Arbeitsmaschinen und Sportgeräte. Wer mit diesen Geräten zu tun hat, findet mit diesem Buch einen wichtigen Ratgeber. Das Werk ist aber ebenso für den Fahrradmonteur, der auf dem Gebiet Elektrofahrräder Nachholbedarf hat, sowie für den Fahrradhändler ein fachlicher Begleiter in Theorie und Praxis.

Mit der vorliegenden **2. Auflage** wurde die vorausgegangene Ausgabe komplett überarbeitet und erweitert, sowie dem aktuell technischen und gesetzlichen Stand angepasst.

Das Autorenteam und der Verlag wünschen viel Freude am Lernen und Arbeiten mit dem neuen „Fachwissen E-Bike“.

Die Erarbeitung von geeigneten Lehrmitteln für die junge E-Bike-Branche steht noch am Anfang. Änderungs- und Ergänzungswünsche, sowie konstruktive Kritik, nehmen wir per E-Mail gerne entgegen.

Sie erreichen uns unter lektorat@europa-lehrmittel.de.

1	Geschichte der Elektrofahrräder	7
2	Elektrofahrräder heute	13
2.1	Elektroroller und Leicht-Elektro-Fahrzeuge (LEV)	17
3	Typeneinteilung und Vorschriften	21
4	Die Mechanik des Fahrrades	25
4.1	Übersetzungen und geometrische Verhältnisse	25
4.2	Laufwiderstände	27
4.3	Leistungsbedarf	31
4.4	Wirkungsgrade	34
5	Antriebsanordnungen	41
5.1	Nabenmotoren	42
5.2	Mittelmotor und Tretlagerantrieb	46
5.3	Sonstige Antriebe	50
6	Grundlagen Elektrotechnik	53
6.1	Widerstände, Ohmsches Gesetz	53
6.2	Induktive Widerstände, Transformatoren	54
6.3	Kondensatoren, Schwingkreise	60
6.4	Dioden und Transistoren	64
6.5	Steuer- und Regelkreise	67
6.6	Elektrische Maschinen	68
6.6.1	Gleichstrommotoren	70
6.6.2	E-Bike-Motoren	74
6.6.3	Drehstrommotoren	82
6.6.4	Reluktanzmotoren	84
7	Steuerungselemente und Steuerungssysteme	87
7.1	Spannungswandler	87
7.2	Elektronische Kommutatoren	91
7.3	Sensoren	98
7.4	Steuerungselektronik (Controller)	104
7.5	Anzeige und Bedieneinrichtungen	112
7.6	Diagnoseeinrichtungen	117

8	Akkumulatoren (Akkus)	121
8.1	Grundlagen	122
8.1.1	Der Ionenstrom	122
8.1.2	Der Lösungsdruck – die treibende Kraft	125
8.2	Bauarten elektrochemischer Zellen	127
8.3	Elektrische Grundbegriffe in der Batterietechnik	130
8.3.1	Zellenspannung und Innenwiderstand	130
8.3.2	Kapazität und Stromrate	132
8.3.3	Energie, Leistung und Wirkungsgrad	132
8.3.4	Temperaturverhalten und Selbstentladung	134
8.3.5	Zyklenzahl, Alterung und Lagerung	135
8.3.6	Ladeverfahren	136
8.3.7	Verbinden von Zellen und Batterien	137
8.4	Bleiakkus	138
8.5	Alkalische Akkus (NiCd/NiMH)	141
8.6	Lithium-Ionen-Akkus	144
8.7	Ausblicke	153
9	Bauarten von E-Rädern	155
9.1	Fahrradtypen	156
9.2	Umbau zum einsatzgerechten Elektrofahrrad	163
10	Produktsicherheit und Einheitsstandards	175
11	Controller-Area-Network (CAN)	181
	Anhang	191
A1	Fahrrad-Luftwiderstände und Körperhaltung	191
A2	Fahrrad-Gesamtleistung (Tabellen)	192
A3	Energiebedarf und Reichweite	193
A4	Fachbegriffe	194
	Literaturverzeichnis	200
	Bildquellenverzeichnis und Danksagung	201
	Sachwortverzeichnis	202

8.1.2 Der Lösungsdruck – die treibende Kraft

Nach der Beschreibung der Ausgleichsvorgänge innerhalb einer elektrochemischen Zelle bleibt zu klären, warum es zu unterschiedlichen Ladungskonzentrationen an den verschiedenen Polen kommt.

Verantwortlich ist der sogenannte Lösungsdruck von Metallen (auch Lösungstension genannt). In Säuren, Laugen oder Salzlösungen getaucht, streben die Metallatome nach Konzentrationsausgleich. Sie verlassen als positiv geladene Metallionen das Metallgitter, wo sie in hoher Konzentration vorliegen und gehen in Lösung, wobei die negativ geladenen Elektronen im Metall verbleiben. Um das nun negativ geladene Metallgitter bildet sich eine positive Ionenwolke, die allmählich zu einem Ladungsgleichgewicht führt und die Migration (Wanderung) weiterer plusgeladener Metallionen unterbindet.

Mit der Ausbildung einer Doppelschicht aus positiv und negativ geladenen Teilchen kommt es zu einem Ladungsgleichgewicht, welches für jedes Metall ein charakteristi-

ches Niveau aufweist. Seine Höhe resultiert aus dem Widerstreit der Bestrebungen, unter Elektronenabgabe in Lösung zu gehen (Oxidationsneigung) und der Gitter(rück-)bindungsenergie.

Um das Jahr 1800 hatte *Alessandro Volta* herausgefunden, dass die Spannung, die ein elektrochemisches Element abgibt, von der Materialpaarung abhängt. Die negative Elektrode wird dabei jeweils von dem unedleren Metall gebildet. Je unedler, d. h. reaktionswilliger oder lösungsbereiter das Metall, desto größer ist die sich ausbildende Spannung gegenüber einer bestimmten edleren Elektrode, die den positiven Gegenpol bildet. So hatte Volta bereits experimentell eine Art „Ranking“ von Metallen erstellt. Später stellte sich heraus, dass sich diese Aufreihung nicht nur durch weitere Metalle, sondern auch durch Metallverbindungen und Gase erweitern lässt. Letztere müssen dann eine Edelmetallelektrode umspülen, um Elektronen austauschen zu können.

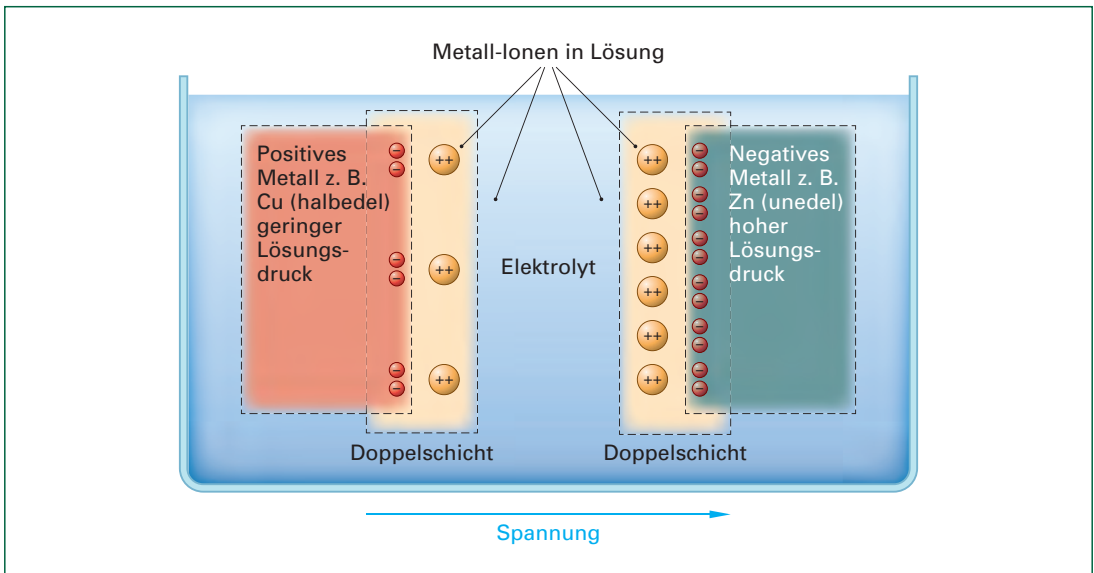


Bild 1: Ladungstrennung

Leider sind die einzelnen Reaktionspotentiale nicht direkt messbar, sondern nur deren Differenz. Um definierte Aussagen über einzelne Elektroden machen zu können, wurde ein **Standardpotenzial** festgelegt. Es entspricht dem einer Wasserstoffelektrode (von Wasserstoffgas umspülte Platinelektrode) und wurde als **Standard-Hydrogen-Elektrode (SHE)** willkürlich mit 0 V definiert. Die Gesamtspannung U eines elektrochemischen Elements ergibt sich, indem man den Wert der Elektrode mit dem negativeren Potential (gegen die SHE) von dem der positiveren Elektrode (gegen die SHE) abzieht.

Am Beispiel einer Kupfer (Cu)/Zink (Zn)-Paarung ergibt sich folgende Zellenspannung:

$$U_{(Cu/Zn)} = \text{Kupferpotential gegen SHE} - \text{Zinkpotential gegen SHE}$$

$$U_{(Cu/Zn)} = + 0,52 \text{ V} - (- 0,76 \text{ V}) = 1,28 \text{ V}.$$

Eine Zelle aus Lithium ($- 3,04 \text{ V}_{SHE}$) und Fluor ($+ 2,87 \text{ V}_{SHE}$) würde theoretisch (!) die höchstmögliche Zellenspannung von 5,92 V ergeben. Aber nicht alle möglichen Stoffpaarungen, die sich aus der elektrochemischen Spannungsreihe ergeben, führen auch zu praktisch verwertbaren Stromquellen.

Umgekehrt nutzt die Akkutechnik auch Aktivmaterialien, die nicht in dieser Liste vermerkt sind. Dazu zählen Metalloxide oder Sulfate.

Letztere kommen vorzugsweise als Kathodenmaterialien zum Einsatz.

Info

Als Oxidation oder Reduktion bezeichnet man Vorgänge, wenn Metalle in höhere oder niedrigere Oxidationszustände überführt werden.

Stoff	Standard-potential/V
Fluor (F ₂)	2,87
Gold (Au)	1,69
Chlor (Cl)	1,36
Platin (Pt)	1,20
Quecksilber (Hg)	0,85
Silber (Ag)	0,80
Kupfer (Cu)	0,52
SHE Wasserstoff (H ₂)	0,00
Blei (Pb)	- 0,13
Nickel (Ni)	- 0,23
Cadmium (Cd)	- 0,40
Eisen (Fe)	- 0,41
Zink (Zn)	- 0,76
Mangan (Mn)	- 1,18
Aluminium (Al)	- 1,66
Titan (Ti)	- 1,77
Magnesium (Mg)	- 2,38
Natrium (Na)	- 2,71
Kalium (K)	- 2,92
Lithium (Li)	- 3,04

Bild 1: Elektrochemische Spannungsreihe

8.2 Bauarten elektrochemischer Zellen

Vor dem Design einer elektrochemischen Zelle sollte der spätere Einsatzzweck der Batterie geklärt worden sein.

- Geht es darum, ein Gerät möglichst langdauernd zu betreiben, wie es bei einem tragbaren Computer gewünscht ist?
- Oder kommt es darauf an, die gespeicherte Energie in möglichst kurzer Zeit verlustarm mobilisieren zu können, wie man dies von einer Kfz-Starterbatterie verlangt?
- Elektrofahrräder nehmen hier eine Mittelstellung ein. Zu entscheiden ist hier zwischen einer möglichen großen Fahrstrecke in der Ebene einerseits und einer möglichst hohen Belastbarkeit am Berg andererseits.

Je nach Einsatzschwerpunkt wird man ein unterschiedliches Zellendesign wählen müssen. In erster Linie geht es dabei um die Zellengeometrie und das Verhältnis und die Anordnung der chemisch aktiven Masse zu den chemisch inaktiven Stromableitern.

Im oberen Teil von **Bild 1** weisen die Aktivmassen eine große Schichtdicke und damit ein entsprechendes Wirkvolumen auf. Es kann darin viel Energie gespeichert werden. Die Elektronen haben aber Mühe, an die Ableiter zu gelangen, weil die in der Praxis eingesetzten Aktivmassen oftmals schlechte

Stromleiter sind. In der unteren Darstellung sind deshalb mehr und dickere Ableiter vorhanden, was aber bei gleich bleibendem Batterievolumen nur durch Einsparung von Aktivmasse erreichbar ist.

Es haben sich im Laufe der Batteriegeschichte unterschiedliche Bauformen herausgebildet, die später im Interesse einer einfachen Austauschbarkeit vielfach genormt wurden. Als klassisches Beispiel mag die *Leclanché-Zelle* (umgangssprachlich gern als „Taschenlampenbatterie“ bezeichnet) mit ihrem konzentrischen Elektrodenaufbau dienen:

Ein Zinkbecher bildet das Zellengehäuse, der zugleich Anode und Minusableiter ist. Er umschließt den eingedickten Elektrolyten aus Salmiaksalzlösung (Ammoniumchlorid NH_4Cl). Der Separator besteht im einfachsten Fall aus einem Textilsäckchen, welches das Kathodenmaterial aus Braunstein (Mangandioxid MnO_2 in Pulverform) aufnimmt. Der zentrale Kohlestab, oftmals fälschlicherweise als Kathode¹ bezeichnet, dient als Plusableiter.

¹ Die Begriffe Anode und Kathode sind über den Oxidations- bzw. Reduktionsprozess definiert. An welcher Elektrode oxidiert bzw. reduziert wird, hängt davon ab, ob die Zelle geladen oder entladen wird. Es hat sich bei der Betrachtung von Batterien jedoch eingebürgert, immer den Entladevorgang als Definition für die Begriffe Anode und Kathode zu verwenden.

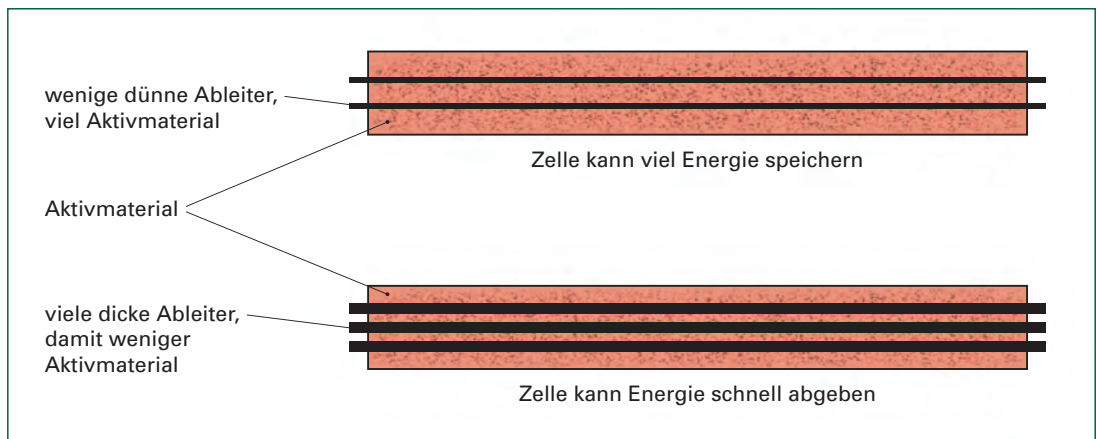


Bild 1: Zell-Design

Zu den Besonderheiten dieses Elements mit der batteriegeschichtlich längsten Nutzungsdauer gehört die „selbstverzehende“ Anode. Von Nachteil war, dass in den Batteriefächern von Geräten vergessene Zellen auslaufen konnten, wenn sie meist durch Selbstentladung zu tief entladen wurden. Heute werden Zink/Braunstein-Batterien durch einen korrosionsfesten Stahlmantel geschützt.

Problematisch bei Zellen ist ihre relativ geringe Belastbarkeit, hervorgerufen durch die schlechte Leitfähigkeit der Braunsteinkathode. Daher wurde bei deren Weiterentwicklung zur sogenannten Alkali-Mangan-Zelle die Elektrodenanordnung auf den Kopf gestellt. Die vergleichsweise gut leitfähige Anode, aus gelgebundenem Zinkpulver mit einem Metallnagel als Stromableiter hergestellt, liegt nun innen und ist umgeben von einer rohrförmigen Braunsteinelektrode von vergleichbarem Volumen (das Volumen bestimmt das Energiespeichervermögen). Das Ergebnis der veränderten Geometrie mit dem großen Querschnitt und der geringen Tiefe ist die deutlich verbesserte Leitfähigkeit.

Häufig zu finden ist die Gitterplattenbauweise der Elektroden. Die Gitter wirken dabei als Stromableiter und Aufnehmer für die aktive Masse. Typisch ist diese Bauweise für Bleiakkus, wie sie beispielsweise als Starterbatterien zum Einsatz kommen. Die Trägerplatten sind, jeweils von Separatoren auf Abstand gehalten, mehrfach geschichtet, sodass sie beidseitig wirken. Diese Akkus haben meist eine prismatische Form.

Eine erweiterte Form der Plattenanordnung stellt die Folienbauweise dar: Dünne Metallfolien, die beidseitig mit der aktiven Masse beschichtet sind. Bei zylindrischen Zellen sind die Elektroden meist spiralförmig um einen Kern aufgewickelt. Die Stromableitung kann am Wickelanfang bzw. am Wickelende erfolgen. Um eine widerstandsarme Stromableitung zu erzielen, sind die Ableiter an der Breitseite mehrfach mit Kontaktfahnen versehen. Die Plusableiter sind kopfseitig, die Minusableiter fußseitig angebracht.

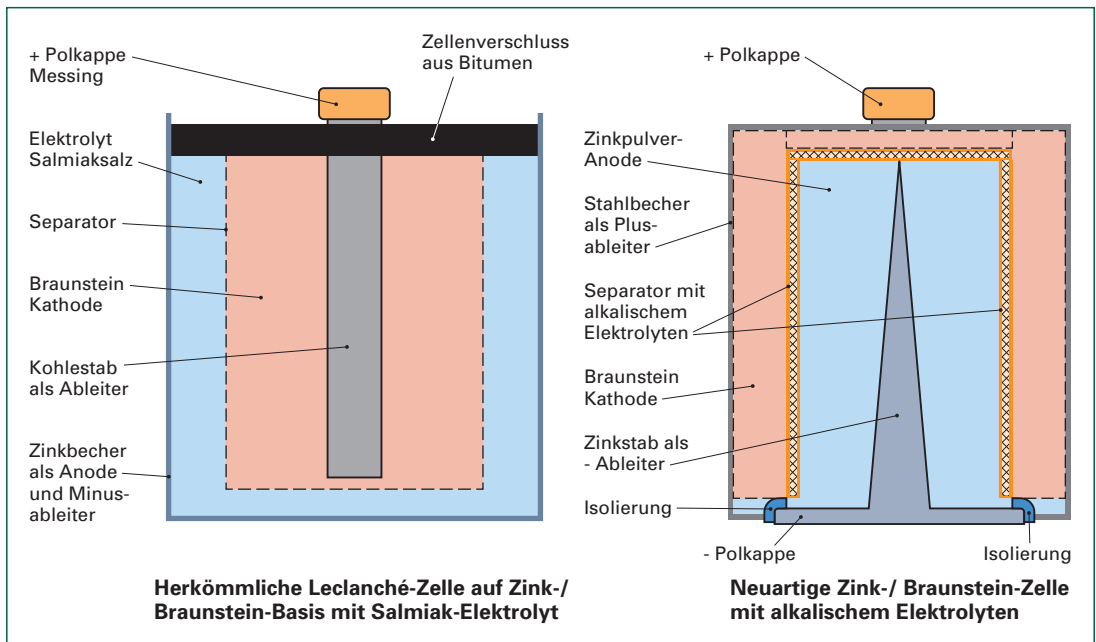


Bild 1: Zell-Braunstein-Zelle

Die Anoden- und Kathodenfolien mit der dazwischen liegenden Separatorfolie bilden eine Art Sandwich, das entweder aufgerollt, gefaltet oder (in einer aufwendigen Variante) geschichtet und dabei seitlich verbunden ist. Die Methoden unterscheiden sich in der Raumausnützung, aber auch im Herstellungsaufwand.

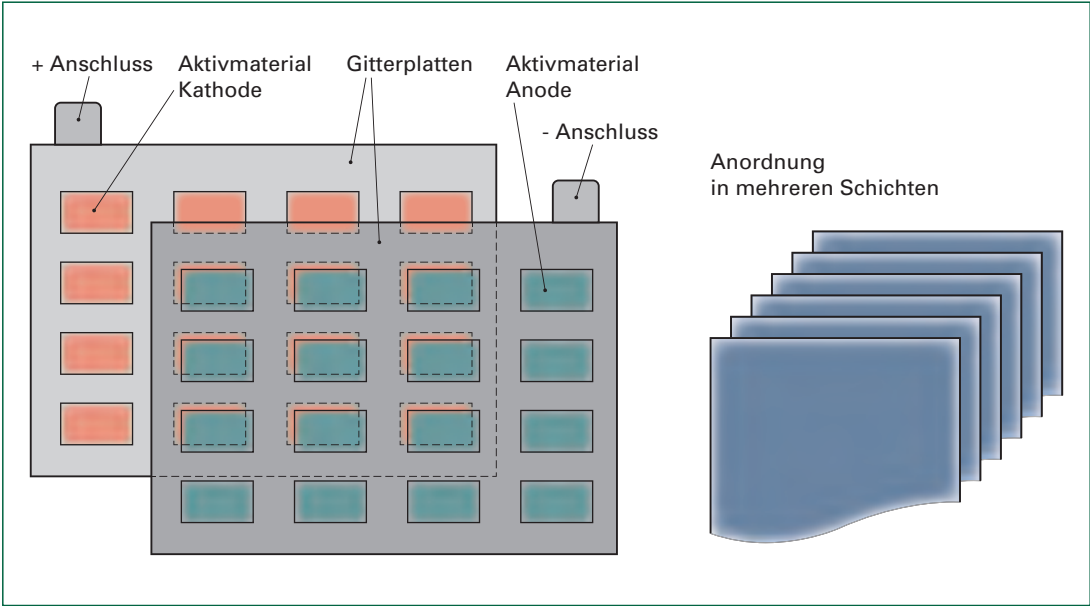


Bild 1: Platten-Elektroden

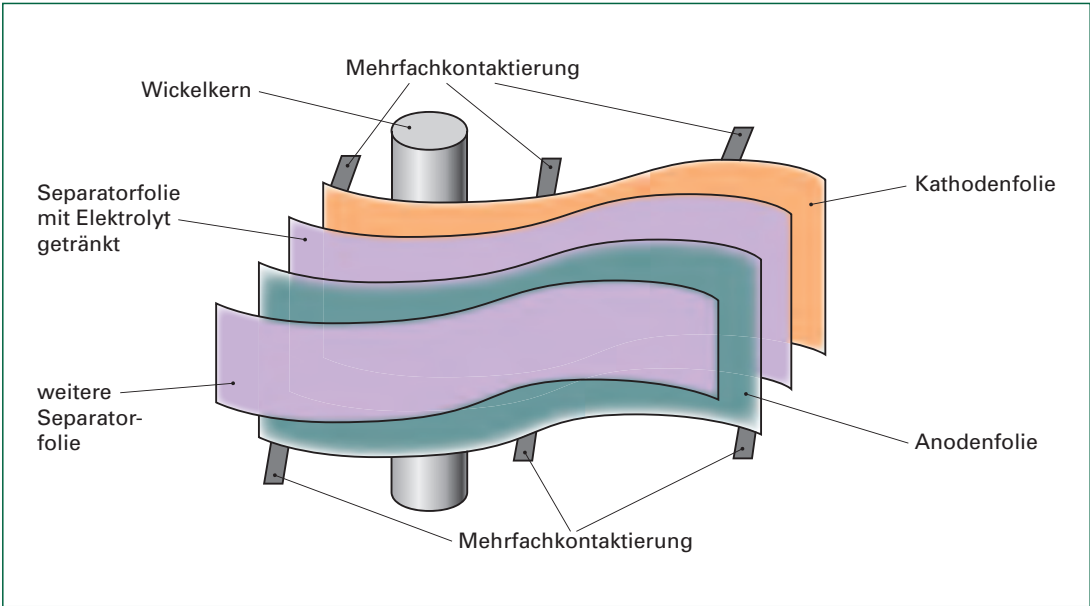


Bild 2: Folien-Elektroden

8.3 Elektrische Grundbegriffe in der Batterietechnik

In diesem Kapitel sollen die in der Batterietechnik relevanten Begriffe erläutert und die physikalischen Größen vorgestellt werden.

8.3.1 Zellenspannung und Innenwiderstand

An einer unbelasteten Zelle, an der kein Verbraucher oder Ladegerät angeschlossen ist, liegt eine bestimmte Spannung an. Ihr Betrag entspricht weitgehend der aus der Spannungsreihe errechneten Potenzialdifferenz. Da die Zelle in diesem Zustand nicht belastet ist, spricht man von der Ruhespannung U_0 oder auch Leerlaufspannung. In der Fachliteratur findet sich zunehmend auch die aus dem Englischen abgeleitete Abkürzung **OCV** (**O**pen **C**ircuit **V**oltage). Der Ladezustand und die Temperatur der Zelle können Einfluss auf die Ruhespannung nehmen. Diese Einflüsse sind je nach Akkutyp unterschiedlich.

Als Orientierungswert für den Gebrauch der Batterie eignet sich die Ruhespannung aufgrund der aufgezeigten Abhängigkeiten nur bedingt. Daher wurde für jeden Batterietyp eine charakteristische Nennspannung U_N festgelegt. Sie wird unter Nennbedingungen über die Gesamtentladung einer Zelle als Mittelwert ermittelt.

Beispiel:

Beim Lithium-Ionen-Akku entlädt man eine vollständig auf 4,2 V aufgeladene Zelle mit 0,5 C (siehe unten) bis auf 3,0 V. Die so ermittelte Nennspannung beträgt 3,7 V.

Die Entladung einer Zelle muss beendet werden, wenn die Entladeschlussspannung U_S erreicht ist. Unterhalb dieser Spannungsschwelle – man spricht dann auch von Tiefentladung – droht das System bleibenden Schaden zu nehmen.

Info

Nicht alle Systeme reagieren hier in gleicher Weise. Nickel-Cadmium-Zellen erweisen sich in diesem Punkt als relativ unempfindlich. Lithiumakkus benötigen sogar eine elektronische Überwachungsschaltungen, welche die Entladung vor Erreichen kritischer Werte beendet (siehe auch: Batteriemanagement).

Ein elektrochemisches Element ist keine ideale Spannungsquelle. Wird ein Verbraucher angeschlossen, so sinkt die Spannung an den Anschlüssen auf die Klemmenspannung U . Zur Veranschaulichung kann man sich eine ideale Spannungsquelle vorstellen, die unabhängig von der Strombelastung immer die gleiche Spannung liefert (**Bild 1**).

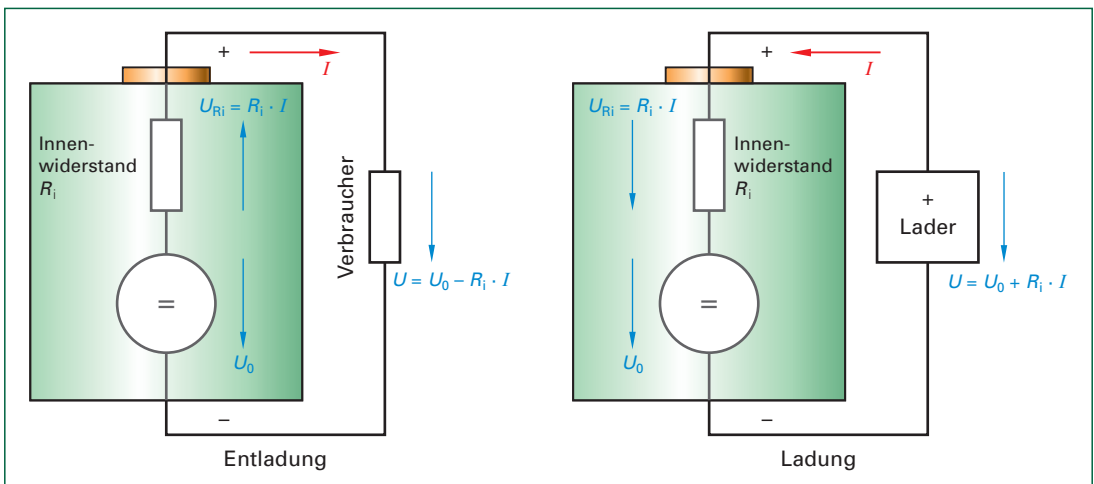


Bild 1: Innenwiderstand

Aus gleichem Grund steigt beim Laden der Batterie die Klemmenspannung über den Betrag der Ruhespannung an. Bei der Ladespannung U_L addieren sich Ruhespannung und Spannungsabfall an R_i . Dieser Spannungsanstieg in der Zelle ist der Grund dafür, weshalb der Ladestrom bei Akkus ein bestimmtes Limit nicht überschreiten darf. So führt eine zu hohe Ladespannung beim Bleiakku zu einer forcierten elektrischen Zersetzung des Wasseranteils im Elektrolyten. Die Zelle „gast“.

R_i ist temperaturabhängig und fällt mit steigender Temperatur. Andererseits wächst er mit der Alterung der Zelle, da die aktiven Materialien degenerieren (sich zurückbilden) und sich an deren Rändern auch Deckschichten ausbilden können, welche den Ionenzutritt erschweren. Ein hoher Innenwiderstand lässt nicht nur die Klemmenspannung einer Zelle absinken, er verursacht auch innere Erwärmung. Man spricht in diesem Zusammenhang von der *Jouleschen Wärme*. Der Wert von R_i stellt daher den entscheidenden Indikator für die Hochstromtauglichkeit eines Zellentyps dar.

Die messtechnische Ermittlung des Gleichstrominnenwiderstands kann durch zwei kurz

aufeinanderfolgende kombinierte Strom-/Spannungsmessungen erfolgen. Was den zeitlichen Abstand der Messungen betrifft, so gilt einerseits ein „so kurz wie möglich“, um den Lade- und Temperaturzustand der Batterie im Messzeitraum nicht zu verändern. Andererseits sollten nach dem Stromsprung, auf den eine Spannungsänderung als Antwort erfolgt, die dynamischen Vorgänge in der Zelle abgeklungen sein. Üblicherweise ist dies innerhalb einer Sekunde der Fall. Die Konzentrationsbeeinflussung erfolgt jedoch mit hoher Zeitkonstante. Man kann ihren Gleichgewichtszustand nicht abwarten, ohne gegen die eingangs formulierte Regel zu verstoßen. Daher misst man gewöhnlich im Abstand von 3 bis 5 Sekunden, zuerst mit kleinem Strom, anschließend mit einem Mehrfachen davon.

Der kleine „Schönheitsfehler“, dass der Quotient bei korrekter Zuordnung der Indizes (tiefgestellte Ziffern) einen negativen Wert annimmt, lässt sich beseitigen, indem man den Entladestrom mit negativem Vorzeichen ansetzt oder nur mit den Zahlenbeträgen rechnet.

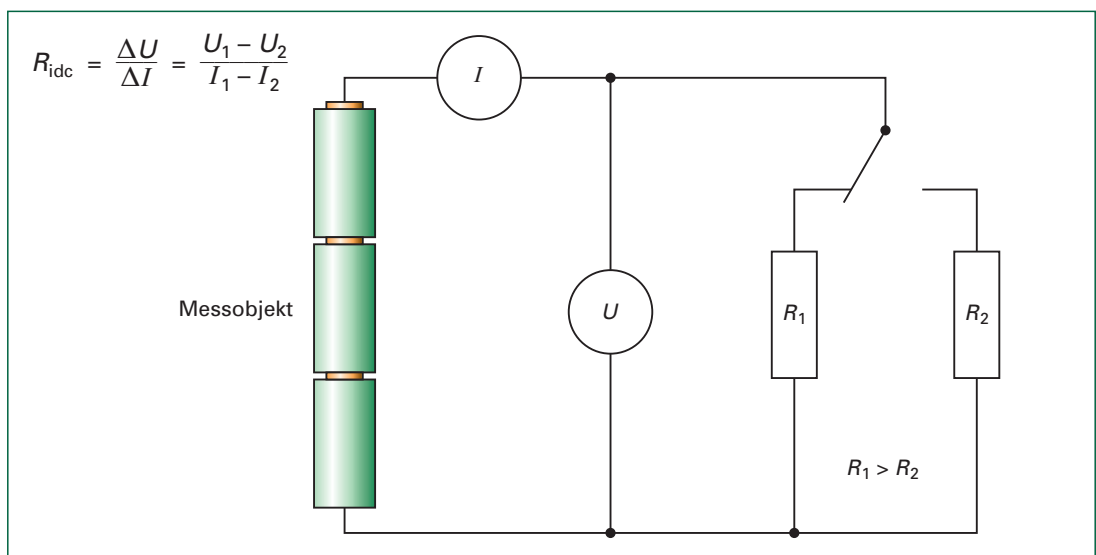


Bild 1: Ermittlung des Innenwiderstandes

8.3.2 Kapazität und Stromrate

In Zusammenhang mit dem Speichervermögen eines Akkus wird der Begriff Kapazität (C) verwendet. Man versteht darunter die Ladungsmenge, die ein Akku speichern kann.

Die Einheit der Akkukapazität ist die Ampere-stunde (Ah). Dies entspricht einem 1 Stunde (h) lang fließenden Strom von 1 A. Oftmals wird bei kleineren Akkus die Teileinheit Milli-ampere-stunde (mAh) (= 1/1000 Ah) bevorzugt.

Da die Bedingungen wie Temperatur und Stromhöhe, unter denen die Energieentnahme erfolgt, nicht ohne Einfluss auf die Ladungsmenge bleibt, definiert man eine Nennkapazität C_N . Sie wird unter Nennbedingungen bei einer Raumtemperatur von 20 °C und für den jeweiligen Akkutyp charakteristischen Stromstärke ermittelt. Findet die Entladung unter veränderten, meist weniger idealen Bedingungen statt, so ist oftmals nur noch ein Teil der Nennkapazität verfügbar. Man bezeichnet diese als die entnehmbare Kapazität, und man sollte dazu vermerken, unter welchen Bedingungen sie zustandekam.

Beispiel:

Beim Bleiakku kann die tatsächlich nutzbare Kapazität einer Starterbatterie in der kalten Jahreszeit auf einen Bruchteil des Nennwertes absinken.

Anmerkung: Die Parameter wie Tieftemperatur- und Hochstromverhalten hängen stark vom Akkutyp und auch vom Zellen-design ab. Im Allgemeinen verrät das Datenblatt, bei welcher Stromlast welche Kapazität noch verfügbar ist.

Die Stromlast eines Akkus bleibt nicht ohne Einfluss auf die Klemmenspannung und seine entnehmbare Kapazität. Von der Akkugröße hängt es ab, inwieweit ein bestimmter Strom als „Last“ empfunden wird. Es ist sinnvoll, diese in Relation zur Nennkapazität zu setzen. Das ist zulässig, weil bei elektrochemischen Stromquellen Energiespeicher

und Energiewandler eine stoffliche Einheit bilden. Bei zunehmender Kapazität sinkt somit – gleiche Art und Bauform unterstellt – auch der Innenwiderstand, was einer gestiegenen Belastbarkeit gleichkommt.

Die Stromlast wird als Stromrate C definiert. Dies ist der Strom in Ampere, welcher zahlenmäßig der Nennkapazität in Ah entspricht.

Beispiel:

Wird ein Akku mit einer Kapazität von 8 Ah mit 8 A belastet, so spricht man von einer 1 C-Last; bei 16 A wären es 2 C. Entsprechendes gilt für die Ladung.

Damit gelten entsprechende Empfehlungen nicht nur für einzelne Akkugrößen, sondern für die gesamte Baureihe.

Beispiel:

Ladung mit 0,3 C oder Entladung mit max. 5 C.

In der Fachliteratur finden sich auch abweichende Bezeichnungen. So ist oftmals von der CA-Rate oder (gleichbedeutend) von I_t die Rede.

8.3.3 Energie, Leistung und Wirkungsgrad

Die in einer Zelle gespeicherte Energie W wird in Wattstunden Wh gemessen und ergibt sich aus dem Produkt von mittlerer Zellenspannung U_M und Kapazität C . Es ist heute üblich, den Energiegehalt einer Batterie aus dem Produkt aus Nennspannung (U_N) und Nennkapazität zu ermitteln.

$$W = U_N \cdot C_N$$

Die Kapazität C , auch umgangssprachlich als Speicherkapazität bezeichnet, ist die in einer Akkuzelle gespeicherte Menge an elektrischen Ladungen. Sie wird in Ampere-stunden (Ah) bzw. Milliampere-stunden (mAh) angegeben.

Bild 1 zeigt eine Akkuzelle mit allen Kennwerten: Kapazität 8000 mAh, Energie 59,2 Wh, Anordnung der Elemente in der Batterie 2s1p, Nennspannung 7,4 V, dauernde Belastbarkeit 25 C, kurze Belastbarkeit 40 C.

Bezieht man die gespeicherte Energie auf die Batteriemasse, so lässt sich die spezifische Energie w des Speichers ermitteln. Sie wird in Wattstunden pro Kilogramm (Wh/kg) angegeben. Die spezifische Energie des 0,4 kg schweren Akkus aus Bild 1 beträgt

$$w = \frac{59,2 \text{ Wh}}{0,4 \text{ kg}} = 148 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$$

Wird das Speichervermögen in Bezug auf das Batterievolumen angegeben, bestimmt sich volumetrische Energiedichte in Wattstunden pro Liter (Wh/l).

Das Leistungsvermögen einer Batterie kennzeichnet die Fähigkeit, möglichst viel Energie in kurzer Zeit abgeben zu können. Dabei sind primär die Qualitäten des Energiewandlers innerhalb der Zelle gefragt. Von elementarer Bedeutung für die Leistung einer Batterie (Hochstromzelle) ist ein niedriger Innenwiderstand, damit der interne Spannungsabfall und die Wärmeentwicklung in Grenzen bleiben.

Der Modellbau-Akku aus Bild 1, der bei der Kapazität von 8 Ah und bei der Belastbarkeit

von 25 C eine Stromstärke 200 A liefern kann, „brilliert“ mit einer spezifischen Leistung von (theoretisch) 3700 W/kg.

Rechnung:

$$8000 \text{ mA} \cdot 25 \text{ C} \rightarrow 200 \text{ A}$$

$$P = U \cdot I = 200 \text{ A} \cdot 7,4 \text{ V} = 1480 \text{ W}$$

$$p = \frac{P}{m} = \frac{1480 \text{ W}}{0,4 \text{ kg}} = 3700 \text{ W/kg}$$

Der Speicherwirkungsgrad η (eta) eines Akkus gibt an, wie viel Prozent der ursprünglichen Ladung bei der Entladung tatsächlich wieder abrufbar sind. Interessiert das Verhältnis der Ladungsmengen, spricht man vom Amperestundenwirkungsgrad η_{Ah} oder dem Coulombschen Wirkungsgrad.

$$\eta_{\text{Ah}} = \frac{\text{entnehmbare Ladung}}{\text{zugeführte Ladung}}$$

Die Differenz zwischen der entnehmbaren und der zugeführten Ladungsmenge wurde innerhalb des Akkus nicht gespeichert oder intern schon verbraucht. Dies ist auf chemische Nebenreaktionen innerhalb der Zelle zurückzuführen. Im Allgemeinen wachsen die Ladungsverluste mit der Alterung der Batterie. Zudem sind sie vom Ladezustand abhängig. So ist beispielsweise bei alkali-



Bild 1: Modellbau-Hochstrombatterie mit allen Kennwerten

schen Akkus im mittleren Ladezustand (40 bis 60 % geladen) ein besonders guter Ladewirkungsgrad zu beobachten, der dann in Richtung Vollladung drastisch abnimmt. Andererseits hat bei diesem Akkutyp die Ladegeschwindigkeit positiven Einfluss, weil bei schnellerem Laden weniger Ladungsmenge durch Selbstentladung verloren geht.

In der Praxis wird der Begriff Ladefaktor LF verwendet. Er stellt den Kehrwert des Amperestundenwirkungsgrades dar und ist damit > 1.

$$LF = \frac{1}{\eta_{Ah}} = \frac{\text{zugeführte Ladung}}{\text{entnehmbare Ladung}}$$

Wenn dann noch berücksichtigt wird, dass die Spannung beim Laden höher ist als beim Entladen (Grund: Spannungsabfall am ohmschen Innenwiderstand), so beeinträchtigt dies die Speicherbilanz noch weiter.

Der Energiewirkungsgrad η_{Wh} oder Wattstundenwirkungsgrad gibt die Gesamtenergiebilanz an. Es ist das Verhältnis aus entnommener Energie und zugeführter Energie:

$$\eta_{Wh} = \frac{\text{entnehmbare Energie}}{\text{zugeführte Energie}}$$

Tabelle 1: Typische Wirkungsgrade der Akkusysteme

	η_{Wh}	η_{Ah}	LF
Pb	0,8 ... 0,85	0,9	> 1,1
NiCd	0,6 ... 0,7	0,7 ... 0,8	> 1,2
NiMH	0,65 ... 0,75	0,7 ... 0,8	> 1,2
Lilon	0,95 ... 0,97	0,99	≈ 1

8.3.4 Temperaturverhalten und Selbstentladung

Elektrochemische Stromquellen zeigen ein aktives und ein passives Temperaturverhalten. So rufen die chemischen Reaktionen zellenintern unterschiedlich gerichtete Temperaturveränderungen hervor.

In diesem Zusammenhang ist an die durch Stromfluss und Innenwiderstand bedingte Joulesche Verlustwärme zu denken, die bei jedem stromdurchflossenen Leiter anfällt. Ihr Beitrag ist immer temperatursteigernd, der Stromhöhe proportional und kann dieser ein Limit setzen. Oftmals werden deshalb in Batteriepacks Temperatursensoren eingebaut. Daneben kommt es zu weiteren Temperaturreaktionen, die temperatursteigernd oder abkühlend wirken. So kühlt sich ein NiCd-Akku anfangs beim Laden von innen heraus ab, um sich dann, wenn er sich der Vollladung nähert, wieder zu erwärmen. Bei Lithium-Ionen-Akkus sind diese Wärmeeffekte vernachlässigbar.

Akkus reagieren auf Temperaturänderungen, weil sich chemische Abläufe bei höherer Temperatur bekanntlich beschleunigen. Dies gilt zuerst für die Elektrodenreaktionen, den chemischen Abläufen an der Grenzfläche zwischen Elektronen- und Ionenleiter.

Auch der Elektrolyt verbessert mit zunehmender Temperatur seine Leitfähigkeit, was einen verringerten Innenwiderstand bewirkt. So gesehen wäre es von Vorteil, Akkus bei möglichst hohen Temperaturen zu betreiben. Dagegen spricht, dass sich als Folge alle chemischen Nebenreaktionen beschleunigen, wie etwa die Selbstentladung. Damit steigen die Speicherverluste, was faktisch zu einem Kapazitätsschwund führt.

Bei Temperaturen weit oberhalb des zulässigen Bereichs können Nebenreaktionen allein so viel Wärme generieren, dass die Zellentemperatur ohne äußeres Zutun weiter steigt.

Die Zelle gerät dann thermisch außer Kontrolle; man spricht vom „*Thermal Runaway*“ (**Bild 1**). Passieren kann dies, wenn beispielsweise der Separator zwischen den Elektroden wegschmilzt. So zählt es zu den wichtigsten Aufgaben der Batterieentwickler, diese Möglichkeit weitestgehend auszuschließen.

Ob ein Akku bei einem äußeren Kurzschluss in Brand geraten kann, hängt unter anderem von seiner Energiedichte (s. S. 133) bzw. der spezifischen Energie im Verhältnis zu der eigenen Wärmekapazität ab. Erlaubt es die gespeicherte Energie einer Batterie, sich selbst im Kurzschlussfall bis über eine kritische Temperaturgrenze hinaus aufzuheizen, so kann sie thermisch „durchgehen“. Dies ist nach heutigem Stand der Technik nur bei einigen Varianten von Lithium-Ionen-Akkus möglich, und auch nur in weitgehend vollgeladenem Zustand. Dies begründet die Forderung, solche Akkus nur in teilgeladenem Zustand zu versenden und zu lagern.

Der Temperatureffekt erklärt, warum Akkus bei Kälte nur beschränkt „arbeitswillig“ sind. Allerdings tritt bei Entladung mit nennenswerten Strömen ein Selbstheilungseffekt auf: Der nun erhöhte Innenwiderstand erzeugt eine stärkere Erwärmung, die den Akku allmählich aus der „Kältestarre“ führt.

Kritisch kann es bei der Ladung werden, denn der bei Kälte erhöhte Innenwiderstand (siehe 8.3.1) lässt für die Zellenchemie schädliche Überspannungen entstehen. Deshalb wird in den meisten Fällen vor einer Schnellladung bei extremen Temperaturen gewarnt. Generell ist festzuhalten, dass Batterien bei Temperaturen von 15 bis 40 °C hinsichtlich Effizienz und Lebensdauer optimal arbeiten.

8.3.5 Zyklenzahl, Alterung und Lagerung

Als Zyklus bezeichnet man bei Akkus die Abfolge von Ladung und Entladung. Dabei ist zwischen Vollzyklen und Teilzyklen zu unterscheiden, je nachdem, ob 100 % der Kapazität oder nur Teile davon umgesetzt werden.

Der Ladezustand („Füllgrad“) eines Akkus wird heute durch die Abkürzung **SOC (State Of Charge)** als Prozentzahl ausgedrückt. Die Art der Zyklen hat Einfluss auf die Lebenserwartung eines Akkus. Am „gesündesten“ sind Teilzyklen, die um einen mittleren Ladezustand kreisen (30 bis 70 % SOC). Der Grund: Die vom Ionenstrom verursachten Volumenänderungen bleiben an den aktiven Elektroden gering. Eine Ausnahme stellt der Bleiakku dar, der vollgeladen gelagert werden sollte. Die nutzungsbedingte Alterung von Zellen hängt ebenfalls von Stromhöhe und Temperatur ab.

Daneben ist die nutzungsunabhängige kalendarische Alterung eines Akkus zu erwähnen, die von Nebenreaktionen herrührt.

Beispiel:

Ein kühl gelagerter Akku bleibt stets länger nutzbar. Dies sollte aber nicht dazu führen, Akkus im Kühlschrank überwintern zu lassen, denn zwischen 10 und 20 °C sind die Unterschiede geringfügig. Die Lebensdauer eines Akkus gilt definitionsgemäß dann als abgelaufen, wenn er nur noch über 80 % seiner Nennkapazität verfügt, was nicht unbedingt das Nutzungsende eines Energiespeichers bedeutet.



Bild 1: Reste eines Lithium-Polymer-Akkus nach einem „Thermal Runaway“

8.3.6 Ladeverfahren

Das Ladeverfahren beeinflusst Lebensdauer, Leistung, Ladezeit und somit auch die Einsatzhäufigkeit eines Akkus. Hier gerät der Nutzer in einen Zielkonflikt: Auf der einen Seite sind es die langsamen, längere Zeit beanspruchenden Ladeverfahren, die eine hohe Lebensdauer/Zyklenzahl fördern, andererseits erhöht ladetechnisches „Fast Food“ die Nutzungsdichte eines Akkus und erspart u. U. einen Batteriewechsel. Anders gesagt: Ein Akku, der sich in einer knappen Stunde wieder aufladen lässt, kann mehrmals am Tag genutzt werden.

Geeignet ist ein Ladeverfahren, wenn es

- möglichst rasch, aber schonend einen hohen Ladezustand erreicht,

- dabei eine Überladung sicher verhindert, sowie
- keine kritischen, lebensdauer- oder leistungsmindernden Effekte auslöst.

Werden nicht nur einzelne Zellen, sondern Batterien (das sind meist Reihenschaltungen von Zellen, siehe Seite 137) geladen, so sollte das gewählte Ladeverfahren eine Angleichung der Ladezustände der einzelnen Zellen herbeiführen (siehe Batteriemanagement). Unverzichtbar ist das sichere Erkennen des Vollladezustandes eines Akkus. Die Kriterien dafür sind bei den verschiedenen Arten von Akkus unterschiedlich.

Ein Ladegerät hat die Aufgabe, für einen hinsichtlich Ladestrom, Ladespannung und Ladezeit jeweils typgerechten Ladeablauf zu sorgen.

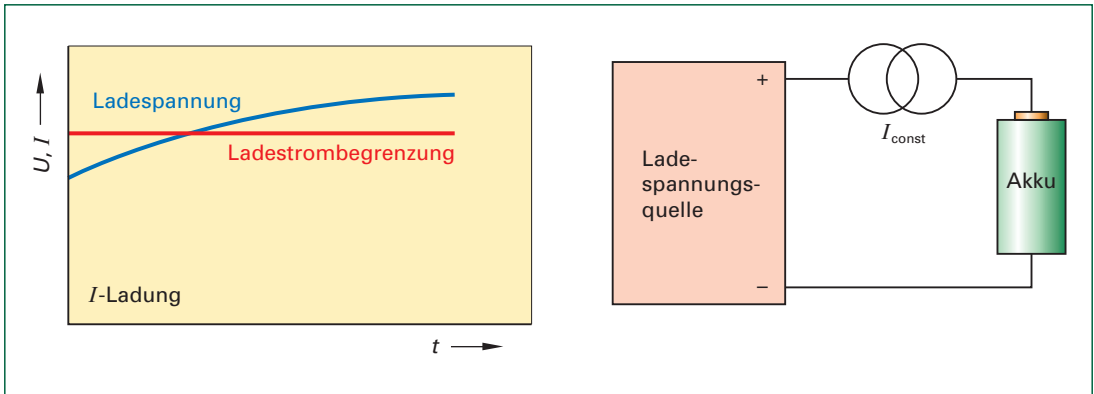


Bild 1: I-Ladung

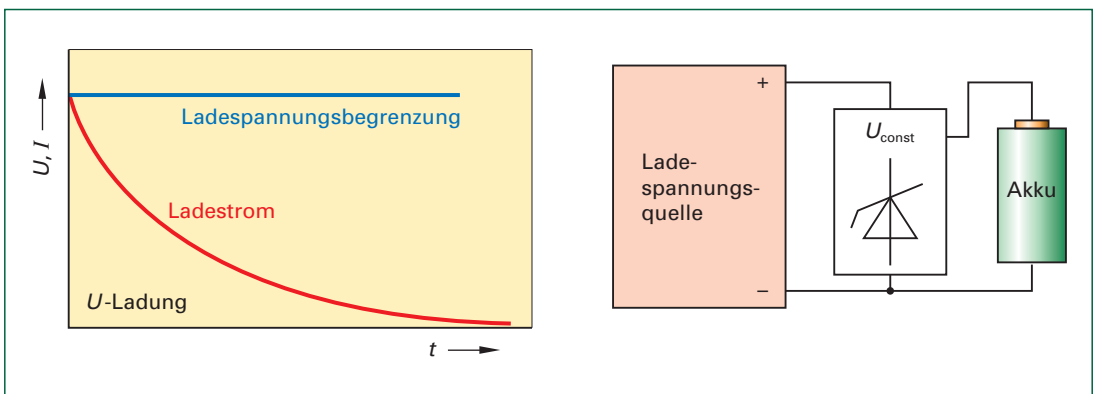


Bild 2: U-Ladung

Dabei genügt es schon, eine der Einflussgrößen des Ladegerätes zu steuern. Bei der *I*-Ladung (Stromkennlinie, **Bild 1, S. 136**) wird von der Ladeelektronik der Strom auf einen Höchstwert begrenzt, wobei dieser die Ladegeschwindigkeit beeinflusst. Bei der *U*-Ladung (Spannungskennlinie, **Bild 2, S. 136**) ist die Ladespannung limitiert. International sind hierfür das Begriffspaar **CC**-charge (**C**onstant **C**urrent) und **CV**-charge (**C**onstant **V**oltage) üblich.

Oftmals werden Ladekennlinien kombiniert. Bei der für Blei- und Lithium-Ionen-Akkus empfohlenen *IU*-Ladung (**Bild 1, S. 136**) wird anfangs der Strom durch das Ladegerät begrenzt. Dabei steigt die Ladespannung bis zum eingestellten Höchstwert. Zu diesem Zeitpunkt tritt die Spannungsbegrenzung in Kraft. Ab hier sinkt der Strom bis zu einem

Minimalwert, an dem die Ladung beendet wird.

8.3.7 Verbinden von Zellen zu Batterien

Die Zellenspannung ist durch die elektrochemische Spannungsreihe (siehe S. 126) begrenzt. Höhere Spannungen erzielt man durch Reihenschaltung (Hintereinander- oder Serienschaltung) einzelner Zellen (**Bild 2, links**). Dabei addieren sich die Spannungen der einzelnen Elemente. Man kennzeichnet dann eine Anordnung aus beispielsweise 2 seriengeschalteten Elementen als 2s-Batterie. Es sollten nur gleichartige Zellen in gleichem Ladezustand zu einer Batterie verbunden werden.

Bei einer Parallelschaltung von Akkuzellen addiert sich das Speichervermögen (Kapazität) der einzelnen Zellen (**Bild 2, rechts**).

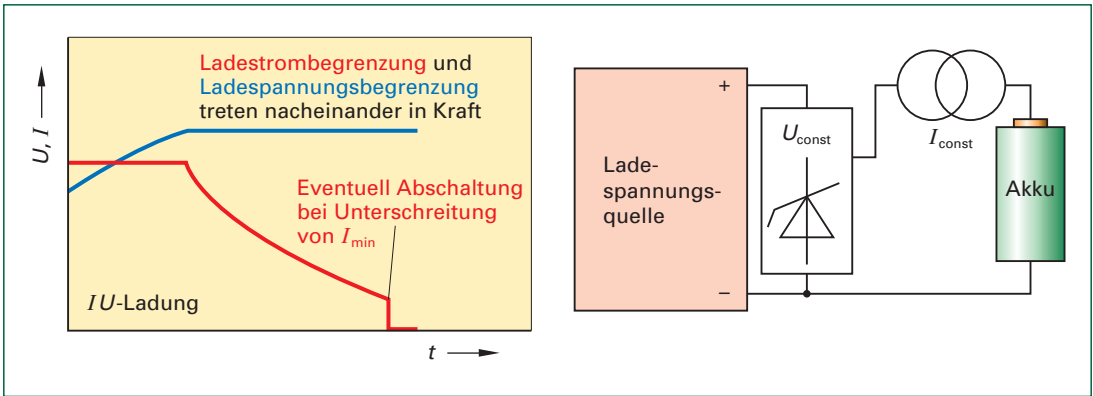


Bild 1: IU-Ladung

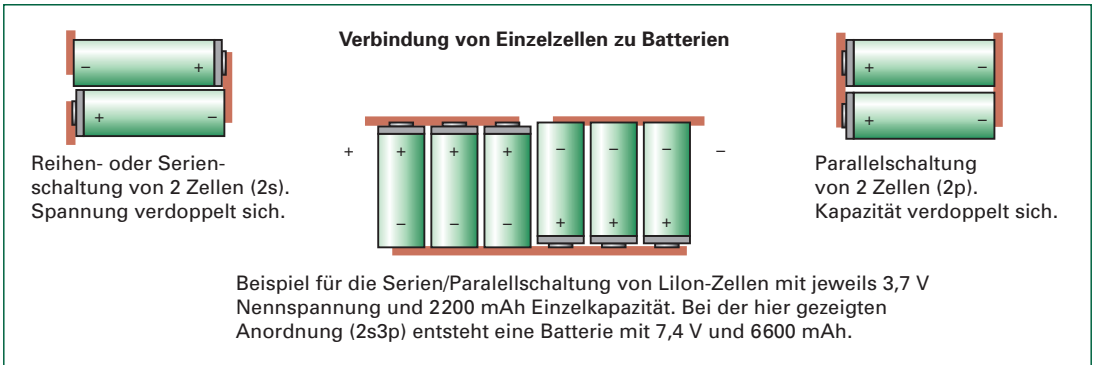


Bild 2: Batterievarianten

Beispiel:

Eine Anordnung aus 3 parallelgeschalteten Elementen bezeichnet man als 3p-Batterie. Kritisch ist die Parallelschaltung von alkalischen Zellen, weil dort kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Ladezustand und Zellenspannung besteht. Sie müssen daher getrennt voneinander geladen werden.

Oftmals werden beide Möglichkeiten kombiniert (**Bild 2 mitte, S. 137**). Sind höhere Kapazität und eine größere Spannung gefordert, werden parallelgeschaltete Zellenpacks (mehr Kapazität) zusätzlich in Reihe geschaltet (mehr Spannung). Bei E-Bike-Batterien ist das die Regel. So kann eine Batterie beispielsweise aus 3 Parallelzellen bestehen, wovon 10 dieser 3-er Packs in Reihe liegen. Die Kurzbezeichnung einer solchen Batterie lautet somit 10s3p.

Der erste Bleiakku wurde 1864 von *Joseph Sinsteden* gebaut und fünf Jahre später von *Gaston Planté* zur heutigen Form weiterentwickelt. Trotz seines Alters von mehr als 150 Jahren stellt der Bleiakku immer noch die meistverwendete wiederaufladbare elektrochemische Stromquelle dar. Dies hat gute Gründe:

- ausgereifte Technik
- günstige Kosten
- leicht recycelbar

Dieser Akkutyp enthält als Elektrodenmaterial (abgesehen von Legierungszusätzen) nur Blei, sodass die Wiederaufarbeitung vergleichsweise wirtschaftlich erfolgen kann. Ein schon vor vielen Jahren eingeführtes Pfandsystem trägt in Deutschland dazu bei, dass sich dieser Wertstoffkreislauf überwiegend schließt. Die niedrigen Batteriekosten sichern dem Bleiakku, neben dem Massenmarkt der Kfz-Starterbatterien, auch bei Großanwendungen – so etwa bei der unterbrechungsfreien Versorgung von Telekommunikationsknoten und Funkstationen – noch andauernde Nachfrage. Dabei handelt es sich um stationäre Anlagen, bei denen das Gewicht eine untergeordnete Rolle spielt. Den Vorzügen stehen auch einige Nachteile wie geringe Energiedichte (bis 40 Wh/kg) sowie eine geringe Widerstandsfähigkeit gegen Tiefentladung gegenüber.

8.4 Bleiakkus

Ogleich in der heutigen Antriebstechnik von Elektrofahrrädern vorwiegend Lithium-Ionen-Akkus zum Einsatz kommen, lohnt ein Blick auf andere gängige Akkuarten, weil sich immer wieder feststellen lässt, dass Behandlungsfehler auf die Verwechslung von unterschiedlichen Akkutypen zurückgehen. Denn so wie es *den* Akku nicht gibt, existiert auch keine allgemeingültige Empfehlung für Behandlung, Ladung und Pflege von Akkus. Vielmehr stellt jeder Akkutyp spezifische Anforderungen und es lohnt sich, die Hintergründe zu kennen.



Bild 1: Pedelec-Akku aus 28 Zellen (7s4p)

Funktionsprinzip des Bleiakkus

Grundsätzlich basiert die Bleizelle auf Bleidioxid (PbO_2) als positiver Aktivmasse (Kathode) und metallischem Blei (Pb) als negativer Aktivmasse (Anode). Trägermaterialien sind zu Gittern geformte Bleiplatten. Als Elektrolyt dient eine Mischung von Schwefelsäure (H_2SO_4) und Wasser (H_2O). Beide Komponenten nehmen an den chemischen Prozessen beim Laden und Entladen teil und verändern damit ladezustandsabhängig ihr Mischungsverhältnis.

Die Hauptreaktionen lassen sich wie folgt darstellen:

Pluselektrode:



Minuselektrode:



Gesamtreaktion:



Der Ladevorgang verbraucht also Wasser und es bildet sich dissoziierte Schwefelsäure ($4\text{H}^+ + 2\text{SO}_4^{2-}$). Das ist der Grund, warum sich bei offenen Bleiakkus der Ladezustand an der Säuredichte mit einer Senkwaage ablesen lässt.

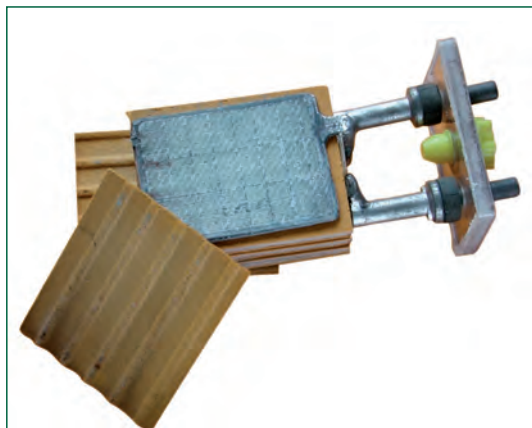
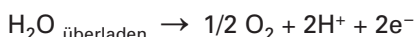


Bild 1: Geöffnete Pb-Zelle. Gut erkennbar die Gitterstruktur der Blei-Trägerplatten. Dazwischen das Separatormaterial.

Beim Entladen verläuft der Vorgang unter Energieabgabe umgekehrt ab, indem sich beide Aktivmaterialien wieder in Bleisulfat zurückverwandeln.

Geschlossene Bleiakkus tragen nur gasdurchlässige Verschlussstopfen. Sie verfügen über eine nicht ganz unproblematische Überladeschutzreaktion: Ab einer Ladespannung von 2,39 V zersetzt sich das Zellenwasser in Sauerstoff (O_2) und Wasserstoff (H_2). Die nicht mehr speicherbare Energie erzeugt brennbaren Wasserstoff:

Pluselektrode:



Minuselektrode:



Gesamtreaktion:

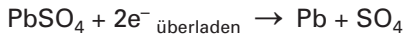
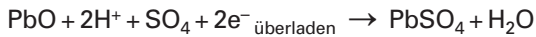


Da bei einer Überladung Knallgas freigesetzt wird, gibt es bei Großbatterieanlagen strenge Vorschriften zur Batterieraumbelüftung.

Im mobilen Bereich dominiert heute die verschlossene Zelle mit einem durch Kieselgur (SiO_2) Gel oder einem Elektrolyten aus Glasfaser-Vlies. Bei ihr ist ein lageunabhängiger Betrieb möglich. Die verschlossene Pb-Zelle ist nicht vollkommen gasdicht, sondern benötigt aus Sicherheitsgründen ein Überdruckventil.

Im Gegensatz zur geschlossenen Zelle verhindert eine verschlossene Zelle, dass Wasserstoff freigesetzt wird. Die Gasung beschränkt sich auf plusseitig produzierten Sauerstoff, der dann am Minuspol verzehrt wird. Durch Risse im Gel oder aber durch Luftblasen im Vlies kann der gasförmige Sauerstoff zum Minuspol gelangen. Er wird dort unter Wärmeabgabe zu Wasser gebunden, womit sich der Sauerstoffkreislauf intern schließt. Dabei darf der Ladestrom einen definierten Wert nicht überschreiten.

Im Einzelnen laufen an der negativen Elektrode folgende Reaktionen ab:



Die Besonderheit des Bleiakkuprinzips mit dem bei der Umsetzung chemisch aktiven Elektrolyten (sonst dient er nur als Ionenleiter) bringt es mit sich, dass sich Säuredichte und damit Ruhespannung und Innenwiderstand während der Ladung und Entladung verändern. Das mindert das Leistungsvermögen des Energiespeichers bei fortschreitender Entladung.

Gerade zum Entladeschluss führt der dann rasch anwachsende Innenwiderstand zu einem förmlichen Abstürzen der Entladekennlinie, was ursächlich mit der Sulfatbildung zusammenhängt. Der Grund: Bleisulfat ist ein schlechter Stromleiter und bremst bei zunehmender Schichtstärke den Elektronenfluss zwischen Elektrolyt und Ableiter drastisch ab. Daher eignet sich der Bleiakku weniger dazu, über längere Zeit hohe Ströme zu liefern.

8

Die Kapazität eines Bleiakkus ist für eine 20-stündige Entladung definiert (0,05 C). Doch auch dann ist die vollständige Ausnutzung der Nennkapazität kritisch. Das Reaktionsprodukt Bleisulfat (PbSO_4) hat gegenüber den Ausgangsprodukten Pb und PbO_2 einen erhöhten Platzbedarf. Dies beansprucht die Trägermaterialien. Zudem besteht bei Tiefentladung (Begriff siehe Seite 130) die Gefahr, dass Aktivmasse aus den Bleikammern hervorquillt, herausfällt und am Zellenboden eine Schlammsschicht ausbildet. Allgemein wird empfohlen, bei Bleibatterien nicht mehr als 60 % der Nennkapazität zu nutzen.

Das Entladeprodukt Bleisulfat neigt bei längerer Lagerung zur Bildung von Großkristallen, die sich bei der Wiederaufladung kaum auflösen. Diesen Vorgang bezeichnet man als Sulfatierung. Daher sollen Bleiakkus möglichst vollgeladen gelagert werden. Weniger bekannt ist, dass bei tiefer Entladung der Gefrierpunkt des Säureelektrolyten zum Problem werden kann. So klettert der Gefrierpunkt der Säuremischung von ca. -67°C bei vollem Akku auf Werte von -10°C bei Tiefentladung.

Blei-Ladetechnik

Üblicherweise wird ein Bleiakku nach der *IU*-Kennlinie geladen. Das heißt, das Ladegerät gibt die maximale Ladespannung vor, begrenzt aber gleichzeitig den Ladestrom auf einen Wert von 0,2 bis 0,5 C, in Ausnahmefällen bis 2 C. Wenn je nach Batteriezustand 60 bis 80 % der Kapazität geladen sind, hat sich die Akkuspannung der Ladespannung so weit angenähert, dass die verbleibende Spannungsdifferenz den eingestellten Strom nicht mehr aufrechterhalten kann. Ab jetzt greift in der „*U*-Phase“ die Spannungsbegrenzung des Ladegeräts. Der Strom fällt nun bis auf einen geringen, primär von der Selbstentladung getragenen Restwert ab.

In der *U*-Ladungsphase hat die gewählte Ladespannung starken Einfluss auf die Ladedauer. Üblich sind Ladespannungen von 2,23 bis 2,4 V je Zelle. Je höher die Ladespannung, desto schneller werden die Akkus voll. Spannungen $> 2,3$ V pro Zelle sind nicht mehr für Dauerladebetrieb geeignet. Bis zu diesem Wert (das sind bei einer 6-zelligen 12 V-Batterie 13,8 V) ist bei Normaltemperatur keine weitere Ladeüberwachung nötig. Die Akkus können dauerhaft am Ladegerät verbleiben, was den Akkutyp für alle Arten von Notstromversorgung qualifiziert.

8.5 Alkalische Akkus

In diese Kategorie fallen der **Nickel-Cadmium-(NiCd-)Akku** sowie der daraus weiter entwickelte **Nickel-Metallhydrid-(NiMH-)Akku**. Beide verwenden Kalilauge als Elektrolyt, den besten aller bekannten Ionenleiter. Damit eignen sich diese wiederaufladbaren Akkutypen hervorragend für Anwendungen mit hohem Strombedarf bei kurzen Ladezeiten. In ihrer Funktionsweise sind sich beide Akkutypen so ähnlich, dass sie im Folgenden gemeinsam dargestellt werden.

Alkalische Akkus wurden zu Beginn des 20. Jahrhunderts von dem Amerikaner *Thomas Alva Edison* und dem Schweden *Waldemar Jungner* nahezu zeitgleich erfunden. Beide experimentierten erfolgreich mit den Materialpaarungen Nickel/Cadmium und Nickel/Eisen.

Die Akkus wurden bei der 1913 gegründeten Deutsche Edison Akkumulatoren Companie für verschiedene Anwendungsgebiete weiterentwickelt. Die gasdichten, wiederaufladbaren Akkus galten als zuverlässig, langlebig, vergleichsweise pflegeleicht, waren aber nur begrenzt belastbar. Das änderte sich, als die Nachfrage nach leistungsfähigen Akkus für Elektrowerkzeuge (Powertools) weltweit explodierte. Hier war es vor allem die japanische Firma Sanyo, welche die Entwicklung mit großen Anstrengungen vorantrieb. Seitdem gelten NiCd-Zellen in der Anwendungssicherheit und Robustheit als Optimum (**Bild 1**).

Erstmals konnten Kleinakkus in weniger als einer Stunde schnellgeladen und dauerhaft mit mehr als der Stromrate 10 C (Erläuterung siehe Seite 132) belastet werden. Aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Nennspannung von 1,2 V hielt sich die Energiedichte dieses Akkutyps mit anfangs 35 Wh/kg in Grenzen. Durch besonders gestaltete Elektroden mit künstlich vergrößerter Oberfläche gelang eine Steigerung bis circa 50 Wh/kg. Doch mit dem Aufkommen von Mobiltelefonen und dem einsetzenden Boom tragbarer Unterhaltungselektronik genügten die bis dahin erreichten Kapazitäten nicht mehr.

Erweiterte Potentiale versprach der Nickel-Metallhydrid-Akku (NiMH-Akku, Bild 1, Seite 143) mit mehr als doppelter Energiedichte. Aufgebaut ist die Zelle wie eine NiCd-Zelle, nur ist die Cadmium-Elektrode durch ein Metallhydrid ersetzt. Die nominale Zellenspannung beträgt wie beim NiCd-Akku 1,2 V.

Gleichzeitig geriet der NiCd-Akku wegen des in der Anode enthaltenen giftigen Schwermetalls ins Visier der Umweltschützer. Heute dürfen NiCd-Zellen EU-weit nur noch zur Deckung des kommerziellen Ersatzbedarfs hergestellt und verkauft werden.

Bald zeigte sich, dass der NiMH-Akku einige Nachteile mit sich brachte. Zwar gelang es, die Energiedichte bis auf Werte über 90 Wh/kg zu steigern, die neuen Zellen hatten jedoch eine hohe Selbstentladung und waren empfindlicher gegen Über- und Tiefentladung.

Viele Nachteile konnte man beseitigen. Geblieben ist ein Problem: Aufgrund der stark temperaturabhängigen Wasserstoffdiffusion in der Anode bricht das Leistungsvermögen des NiMH-Akkus bei niedrigen Temperaturen besonders stark ein – ungeeignet somit für den Einsatz von Akkuwerkzeugen im Bauhandwerk. Beispielhaft sind die Empfehlungen der Handyhersteller aus jener Zeit, die Geräte im Winter in der Innentasche zu tragen.



Bild 1: Alkalischer NiCd-Akku

Funktionsprinzip alkalischer Akkus

Beim NiCd-Akku besteht das Aktivmaterial der positiven Elektrode aus Nickelhydroxid NiOOH, die Minuselektrode aus Cadmium Cd, der Elektrolyt ist verdünnte Kalilauge KOH. Das Nickelhydroxid geht während der Ladung bzw. Entladung nur von einer Oxidationsstufe in eine andere über, wechselt also zwischen NiOOH und Ni(OH)₂ hin und her. Diese über viele Zyklen hochreversible „Minimalreaktion“, bei der das Aktivmaterial nicht in Lösung geht, ist der Grund für die Robustheit und hohe Lebenserwartung des NiCd-Akkus.

Auf der Minuselektrode ist metallisches Cadmium (Cd) redoxaktiv, das sich bei der Entladung letztendlich in Cadmiumhydroxid (Cd(OH)₂) umwandelt. Der Elektrolyt Kalilauge nimmt (im Gegensatz zum Bleiakku) nicht an den Umsetzungsreaktionen teil. Die Hauptreaktionen sind:

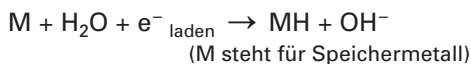
Pluselektrode ^{beide}:



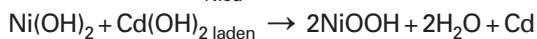
Minuselektrode ^{NiCd}:



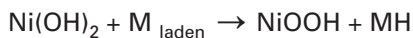
Minuselektrode ^{NiMH}:



Gesamtreaktion ^{NiCd}:



Gesamtreaktion ^{NiMH}:



NiCd-Zellen sind dank einer überdimensionierten Cadmium-Anode gut gegen Überladung (je nach Typ 0,2 bis 0,5 C) und auch vor Tiefentladung geschützt.

Als bedeutsamer Nachteil dieses pflegeleichten Akkutyps wird der sog. Memoryeffekt angeführt, der nur bei älteren NiCd-Akkus auftrat und seit den 1980er Jahren als eliminiert

gelten kann. Damit wird der Kapazitätsverlust bezeichnet, der bei häufiger Teilentladung auftritt. Der Akku scheint sich den Energiebedarf zu merken. Mit der Zeit stellt er anstelle der ursprünglichen nur die bei den bisherigen Entladevorgängen benötigte Energiemenge zur Verfügung. Der Effekt äußert sich in einem frühen Spannungsabfall und bedeutet eine Verringerung der nutzbaren Kapazität.

Der Memoryeffekt wird aufgrund ähnlicher Symptome oft mit dem Batterieträgheitseffekt (Lazy-Battery-Effekt) verwechselt. Dieser Effekt tritt auf, wenn die Batterie ständig nur geladen oder lange Zeit nicht mehr ganz entladen wurde und äußert sich in einem Anwachsen des Innenwiderstandes und damit einem Absinken der Klemmenspannung unter Last. Abhilfe schafft es, die Zellen gelegentlich vollständig bis auf eine Spannung unter 0,8 V zu entladen.

Entgegen werbetechnischen Verlautbarungen sind auch NiMH-Batterien gegen den Lazy-Battery-Effekt nicht immun. Die Beseitigung muss hier jedoch deutlich vorsichtiger erfolgen. Zellenspannungen unter 0,8 V gelten hier bereits als kritische Tiefentladungen. Sie können, wenn länger andauernd, zur Oxidation und damit zur Degradation des anodenseitigen Speichermetalls führen.

NiCd- wie auch NiMH-Zellen tragen im Zellenkopf (Pluspol) ein Sicherheitsventil, das inneren Überdruck als Folge krasser Fehlbedienung abbaut und so die Zelle vor einer Explosion schützt. Hierbei geht direkt oder indirekt der Elektrolyt verloren und die Zelle trocknet langsam aus.

Ladetechnik von NiCd- und NiMH-Akkus

Ursprünglich wurden NiCd-Akkus zeitgesteuert geladen. Der zuvor gänzlich entladenen Zelle wird eine aus Strom und Zeit berechnete Ladungsmenge einschließlich eines Ladefaktorzuschlags zugeführt.