

Ein Akkumulator ist eine Spannungsquelle, die einen Stromfluss über einen Lastwiderstand bewirkt. Die dabei freigesetzte Leistung ($VA = W$), multipliziert mit der Zeit, ist die abgegebene Energiemenge in Wh. Ist die interne Energiemenge des Akkus verbraucht, lässt sie sich durch Laden (ein Stromfluss aus einer externen Quelle zurück in den Akku) wieder rückspeichern und ein neuer Entladezyklus kann beginnen. Der vorliegende Artikel beschäftigt sich mit Historie, Wirkungsweise, Kenngrößen und Bauformen dieses wieder befüllbaren Speichers für elektrische Energie, ohne den das Zeitalter der mobilen Elektronik nicht denkbar wäre.

Geschichtlicher Rückblick

Der österreichische Archäologe Wilhelm König machte im Jahr 1936 etwa 30 km südöstlich von Bagdad Ausgrabungsfunde, von denen er annahm, es handle sich um eine frühe Form der Trockenbatterie. Die Fundstücke, ca. 15 cm hohe tönerner Krüge, enthielten – durch einen Bitumenpfropfen im Hals voneinander isoliert – eine an der Unterseite geschlossene Hülse aus Kupferblech und darin einen Eisenstab. 1938 beschrieb König seinen Fund in einem Fachartikel „Ein galvanisches Element aus der Partherzeit?“ (Forschungen und Fortschritte 14 [1938]; 8–9), worin er als Anwendung das Galvanisieren von Kunst- und Kultobjekten mit hauchdünnen Goldschichten für möglich hielt. Auch über medizinische Anwendungen wie eine Art Entkeimung des Wassers spekulierte er. Über das Für und Wider solcher Deutungen wird seitdem heftig gestritten. Auch wenn viele Fragen offen bleiben, ist es doch eine faszinierende Vorstellung, dass die Menschheit vielleicht schon vor mehr als 2000 Jahren über elektrische Spannungsquellen verfügen konnte.

In der Neuzeit wird der italienische Naturforscher Alessandro Volta (1745–1827) als Vater der Batterie angesehen (Abbildung 1). Angeregt durch die Experimente des italienischen Arztes, Anatomen und Biophysikers Luigi Galvani (1737–1798), in denen dieser Muskelkontraktionen an seziierten Froschschenkeln unter dem Einfluss statischer Elektrizität

untersuchte und den Begriff der „animalischen Elektrizität“ prägte (Abbildung 2), analysierte Volta das Phänomen genauer und kam zu dem Schluss, dass die Muskelzuckungen auf Kontaktelektrizität zwischen der Gewebeflüssigkeit und den unterschiedlichen Metallen der Versuchseinrichtung zurückzuführen seien. Nach systematischen Untersuchungen der elektrochemischen Spannungen verschiedener Metalle (A. Volta: „On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds“; Philosophical Transactions of the Royal Society, 90: 403-431, 1800) war es zur Volta'schen Säule – der ersten funktionierenden Batterie – nicht mehr weit.



Bild 1: Alessandro Volta legte die Grundlagen der modernen Elektrochemie.

Bild 2: Luigi Galvani's Froschschenkel-Experimente regten Volta zur Erforschung des Phänomens der Kontaktelektrizität an.



Die Volta'sche Säule bestand aus gestapelten Scheibentripeln (Volta-Zelle), jeweils aus einer Kupferplatte als negativer Elektrode, einer mit Salzlake getränkten ledernen Zwischenlage als Elektrolyt und einer Zinkplatte als positiver Elektrode (Abbildung 3). Damit war der Weg frei zur systematischen Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Strom und Magnetismus und elektrochemischer Phänomene. Zahllose Experimente mit vielen anderen Metallkombinationen und Elektrolyten hatten das Ziel, die Spannung und den Stromfluss zu erhöhen. An ihrem Ende stand die Volta'sche Spannungsreihe. Etwa 100 Jahre nach seiner bahnbrechenden Entwicklung (1897) wurde Volta posthum geehrt, indem man die Einheit der elektrischen Spannung mit Volt benannte.

Die Spannung einer Volta-Zelle mit Zinkplättchen (elektrochemisches Standardpotential $-0,76\text{ V}$) und Kupfer (elektrochemisches Standardpotential $0,34\text{ V}$) beträgt ca. $1,1\text{ V}$. In der dargestellten Volta'schen Säule mit 14 gestapelten Elementen wird entsprechend eine Spannung von ca. $15,4\text{ V}$ erzeugt. Der elektrochemische Mechanismus: Die Zinkatome geben zwei Elektronen ab und gehen als Zinkionen in Lösung. Die dabei freigesetzten Elektronen erzeugen in der Zinkelektrode einen Elektronenüberschuss, der sich über einen Verbraucher als Elektronenfluss zur Kupferelektrode (entgegengesetzt zur technischen Stromrichtung!) abbaut. An den Kupferplättchen wird Wasserstoff freigesetzt. Weil die elektrochemischen Vorgänge in der Volta'schen Säule nicht umkehrbar sind, lässt sie sich nicht wieder aufladen. Deshalb zählt man sie zur Klasse der Primärelemente.

Das Verdienst, die Urform des Akkumulators – also einen Stromspeicher – erfunden zu haben, gebührt dem deutschen Apotheker Johann Wilhelm Ritter (1776–1810). Er deutete die dabei ablaufenden chemischen Vorgänge als Erster richtig. Die von ihm 1803 vorgestellte Ritter'sche Ladungssäule bestand ähnlich wie Voltas Anordnung aus abwechselnd geschichteten Metallscheiben mit porösen Zwischenlagen zur Aufnahme einer elektrolytischen Flüssigkeit („kochsalznasse Pappplatten“). Ritter verwendete jedoch einheitlich Kupferplättchen. So konnte natürlich zunächst keine Spannung entstehen. Als Ritter jedoch seine Anordnung eine Zeit lang mit einer Volta'schen Säule verband und dann wieder trennte, war an ihren Klemmen eine belastbare Spannung festzustellen. Der Grund liegt in der Veränderung der chemischen Beschaffenheit der Oberflächen der Kupferscheiben durch den Ladestrom. Während der Stromabgabe bilden sich die Veränderungen zurück. Solange dieser Vorgang nicht abgeschlossen ist, gibt die Ritter'sche Säule Strom ab.

Es dauerte gut 50 weitere Jahre, bis 1854 der deutsche Arzt und Physiker Wilhelm Josef Sinstedten (1803–1891) zeigte, dass zwei Bleiplatten in verdünnter Schwefelsäure besonders gute Stromspeichereigenschaften aufwiesen. Sinstedten kann somit als Vater des Blei-Akkumulators angesehen werden, obwohl er seine Erfindung nicht wirtschaftlich verwertete. Der französische Physiker Gaston Planté (1834–1889) brachte den Blei-Akkumulator 1859 zur technischen Reife. Von den vielen Erfindern, welche die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit des Blei-Akkumulators stetig verbesserten, hat 1886 der luxemburgische Ingenieur Henri Tudor (1859–1928) gerippte Bleiplatten mit vergrößerter Oberfläche eingesetzt. Die großtechnische Herstellung des Tudor-Akkus nahm 1887 der Industrielle Adolph Müller in der von ihm gegründeten Aktiengesellschaft für Akkumulatorenherstellung (AFA) auf. Die AFA rief 1904 ihre Tochtergesellschaft VARTA (Vertrieb, Aufladung, Reparatur Transportabler Akkumulatoren) für die Fertigung kleiner und transportabler Akkumulatoren ins Leben. Seitdem wird der Blei-Akku in der heute noch üblichen Kastenform vorwiegend zum Starten von Kraftfahrzeugen eingesetzt.

Akkumulatoren hatten bis zur Entwicklung der dynamoelektrischen Maschine 1866 durch Werner von Siemens (1816–1892) noch keine praktische Bedeutung, denn zu ihrer Ladung war immer erst eine Primärbatterie nach Art einer Volta'schen Säule erforderlich. Daher rührt auch die Bezeichnung Sekundärbatterie. Mit dem Dynamogenerator stand nun ein leistungsfähiger Stromerzeuger zur Verfügung, der einen Akkumulator einfach und preiswert laden konnte. So spielte der Blei-Akku in den Anfängen der Automobiltechnik zur Speicherung der Antriebsenergie in elektromotorisch angetriebenen Fahrzeugen eine bedeutende Rolle.

Akkumulatoren – Idealvorstellung und Realität

Die wünschenswerten und die chemisch-physikalisch realisierbaren Eigenschaften eines Akkumulators werden trotz aller

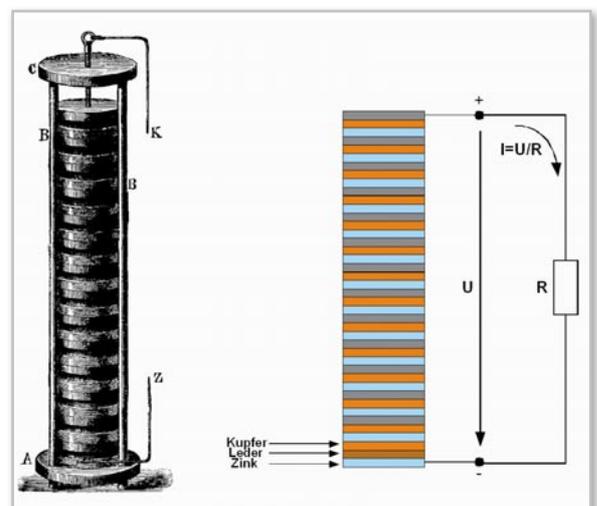


Bild 3: Die Volta'sche Säule war das erste Primärelement, dessen Spannung sich durch die Höhe des Elementarzellenstapels in weiten Grenzen einstellen ließ. Damit war der Weg zur systematischen Erforschung elektrochemischer und -physikalischer Phänomene frei.

Forschungen nicht zur Deckung zu bringen sein. So steht zum Beispiel die Forderung nach einem großen Speichervolumen im Gegensatz zur möglichst kompakten Größe eines Akkus. Aber lassen wir unserer Fantasie einmal freien Lauf. Der „ideale“ Akkumulator soll die folgenden Attribute vereinen:

- geringes Volumen und Gewicht
- hohe Speicherdichte
- weiter Arbeitstemperaturbereich
- minimale Selbstentladung für lange Lagerzeit
- Hochstromfestigkeit
- kurze Ladezeiten
- hoher Wirkungsgrad
- freie Formgebung
- in Herstellung und Betrieb und Entsorgung keine giftigen Stoffe benötigend bzw. absondernd
- lange Lebensdauer
- Sicherheit in allen Betriebszuständen
- recycelbar
- billig in der Herstellung ...

Dieser Wünschekanon hört sich nach der „eierlegenden Wollmilchsau“ oder der „Quadratur des Kreises“ an. In der Realität sind die Vielzahl der Akkumulatortypen daher auf die bestmögliche Erfüllung eines bestimmten Aufgabenkreises optimiert, sei es in Spielzeug, Leuchten, mobiler Unterhaltungselektronik, Laptops, Uhren, Funktechnik, Alarmtechnik, Notstromversorgungen, Solarstromversorgungen, Kraftfahrzeugen, Elektrowerkzeugen oder in elektronischer Kleidung (i-wear, smart clothes).

Der Blei-Akkumulator

Im Blei-Akkumulator finden wir alle Elemente wieder, die jeder Akkumulator in unterschiedlicher Ausgestaltung aufweist: positive Elektrode, Elektrolyt und negative Elektrode. Deshalb beschreiben wir sein Wirkungsprinzip etwas eingehender. Die (vereinfachten) chemischen Vorgänge an den Elektrodenplatten sind noch relativ einfach nachzuvollziehen (etwas Restwissen aus dem Chemieunterricht braucht's aber schon!). Die in den Reaktionsgleichungen verwendeten Größen sind O (Oxygen = Sauerstoff), H (Hydrogen = Wasserstoff), S (Sulfide = Schwefel) und Pb (Plumbum = Blei). Der Buchstabe e steht für ein Elektron und die hochgestellten Plus- und Minuszeichen (+, -) deuten auf einen Mangel (+) oder einen Überschuss (-) an Elektronen hin. Wir haben es dann mit positiv oder negativ geladenen Ionen zu tun.

Der Akkumulator wird meist ohne Elektrolytfüllung ausgeliefert. Dann besteht die positive Elektrode aus PbO_2 (Bleiodioxid) und die negative Elektrode aus porösem Blei (Pb, Bleischwamm). Nach dem Einfüllen der mit Wasser (H_2O) verdünnten Schwefelsäure (H_2SO_4) sind die Voraussetzungen für eine erste Entladung gegeben. Man bezeichnet den unbeladenen Akku deshalb auch als „trocken vorgeladen“.

Entladung: Werden die Elektroden des geladenen Akkumulators nun über einen Verbraucher verbunden, setzt ein Stromfluss ein (Abbildung 4).

An der positiven Elektrode wandelt sich das Bleiodioxid unter Abgabe von Sauerstoffionen (O^{2-}) und Aufnahme von Sulfationen (SO_4^{2-}) in Bleisulfat ($PbSO_4$). Die aus dem Elektrolyten

aufgenommenen Sulfationen (SO_4^{2-}) lassen freie Wasserstoffionen (H^+) zurück, die sich mit den freigesetzten Sauerstoffionen (O^{2-}) zu Wasser (H_2O) verbinden. Im Zuge der Entladung verringert sich die Konzentration der wässrigen Schwefelsäure daher beständig. Deshalb kann die Säuredichte als Maß für den Ladungszustand dienen – 1,285 kg/l (voll) bis 1,16 kg/l (leer) – und mit einem Aräometer (Senkwaage) geprüft werden.

An der negativen Elektrode verbindet sich das Blei (Pb) nach Abgabe von zwei Elektronen mit dem Sulfation zu Bleisulfat ($Pb^{2+} - 2e + SO_4^{2-} \rightarrow PbSO_4$). Es wandeln sich also sowohl das Bleiodioxid (PbO_2) der positiven Elektrode als auch das Blei (Pb) der negativen Elektrode zu Bleisulfat ($PbSO_4$). Sind beide Elektroden gleich, ist die Spannung zwischen ihnen null und die Entladung vollständig. Der Blei-Akku wird irreversibel beschädigt, wenn man bei einer Säuredichte von weniger als 1,15 kg/dm³ nicht nachlädt. Über 2,4 V Klemmspannung sollte man die Zelle nicht aufladen, weil sonst der Ladestrom die Zersetzung des Wassers im Elektrolyten in Wasserstoff und Sauerstoff bewirkt (Knallgasbildung!). Man sagt, der Akku „gast“.

Ladung: Beim entladenen Blei-Akku bestehen beide Platten aus Bleisulfat ($PbSO_4$) (Abbildung 5). Im Zuge des Ladens gibt die positive Platte Sulfationen (SO_4^{2-}) an den Elektrolyten ab und verbindet sich mit dem Sauerstoff des Elektrolytwassers unter Freisetzung von Wasserstoffionen zu Bleiodioxid. Dabei werden zwei Elektronen zur Stromleitung frei. Im Verlauf der Ladung steigt die Säurekonzentration wieder an. Die Vorgänge an den Platten bei Entladung bzw. Ladung sind in den Gleichungen in Abbildung 4 bzw. Abbildung 5 dargestellt.

Der Blei-Akkumulator mit flüssigem Elektrolyten hat heute in der Unterhaltungselektronik keine Bedeutung als mobile Energiequelle. Für einen lageunabhängigen Betrieb ist der Ersatz des flüssigen Elektrolyten „wässrige Schwefelsäure“ (H_2SO_4) durch ein Gelsubstitut (durch Zugabe von Kieselsäure erstarrte Schwefelsäure) und der gasungsfreie geschlossene Betrieb Voraussetzung. Der Blei-Gel-Akku erfüllt beide Anforderungen. Er wurde früher in portablen Tonbandgeräten

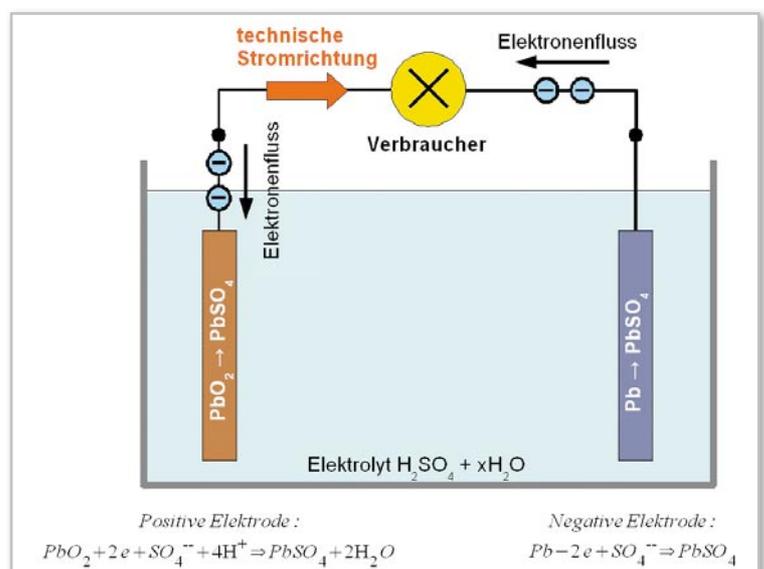


Bild 4: Dieses Bild fasst die elektrochemischen Vorgänge bei der Entladung eines Blei-Akkumulators zusammen. Mit fortschreitender Entladung sinkt die Dichte des Schwefelsäureelektrolyten.

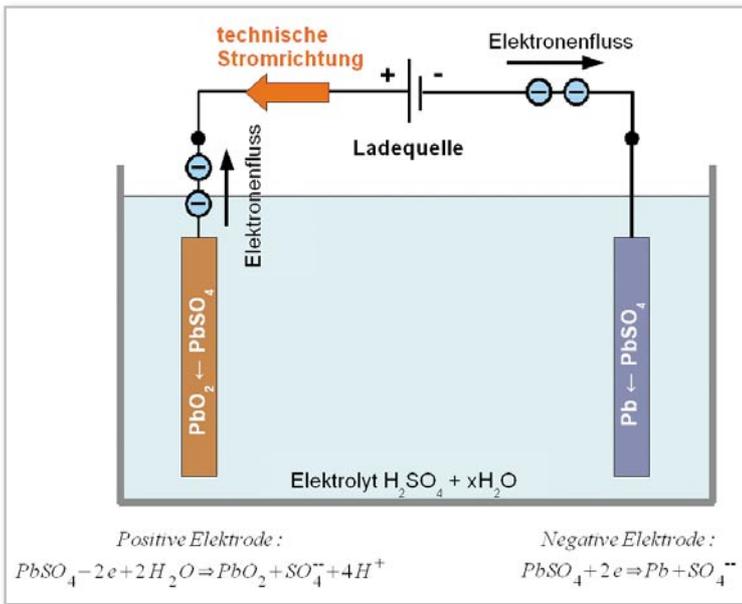


Bild 5: Bei der Ladung des Blei-Akkumulators steigt die Dichte des Schwefelsäureelektrolyten so lange an, bis er „gast“.

eingesetzt, heute noch in unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV) für den PC, in leistungsstarken Handscheinwerfern und Campingleuchten. Mit der zunehmenden Miniaturisierung der Elektronik konnte der Blei-Akku nicht mithalten und spielt heute in portablen Geräten keine Rolle mehr.

Trotz seiner geringen Energiedichte von ca. 30 Wh/kg kann der Blei-Akkumulator wegen seines geringen Innenwiderstandes kurzzeitig hohe Ströme liefern. Er wird deshalb bis heute als Starterbatterie für Verbrennungsmotoren verwendet. Der elektrische Anlassermotor zieht für wenige Sekunden Ströme von 100 bis 1000 A, ohne dass dabei die Spannung zu tief abfallen darf. Der Blei-Akku kann dies in einem weiten Temperaturbereich zu günstigen Kosten leisten.

Der Nickel-Cadmium-Akkumulator

Der Nickel-Cadmium-Akkumulator (NiCd) kann auf eine über

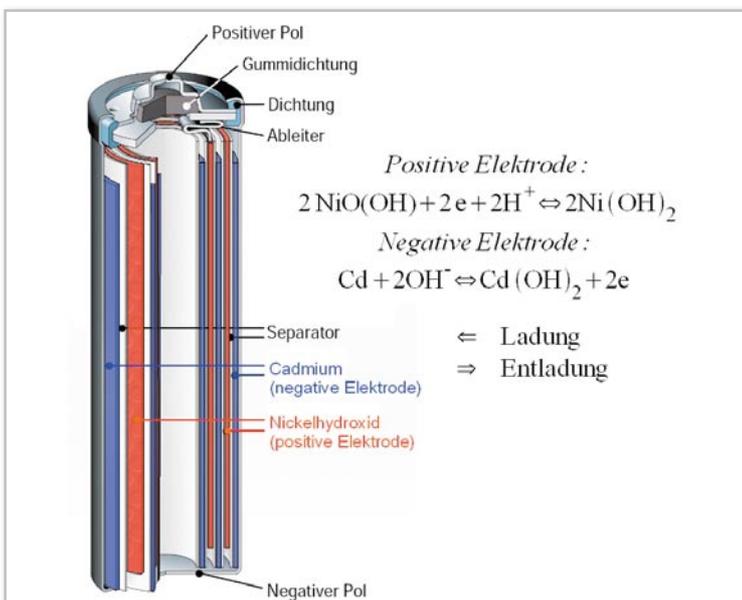


Bild 6: Schichtenaufbau eines NiCd-Akku-Wickels

100-jährige Geschichte zurückblicken. Etwa ab 1890 beschäftigten sich der amerikanische Erfinder Thomas Alva Edison (1847–1931) und der schwedische Physiker Waldemar Jungner (1869–1924) mit Akkumulatoren, deren Elektrolyt alkalisch ist und somit nicht an der Elektrodenreaktion teilnimmt, sondern nur die Aufgabe eines flüssigen Ionenleiters mit gleich bleibender Konzentration erfüllt. Als negative Elektrode setzte Edison Eisen, Jungner dagegen Cadmium ein, als positive Elektrode wählten beide Nickel. 1899 ließ sich Jungner auf seinen Nickel-Cadmium-Akkumulator ein Patent erteilen, 1901 wurde Edisons Urheberschaft am Cadmium-Eisen-Akkumulator geschützt. 1947 machte ein Verfahren von Georg Neumann (1898–1976) die Herstellung des gasdicht verschlossenen NiCd-Akkus möglich.

Wegen seiner Robustheit und im Vergleich zum Blei-Akku hohen Energiedichte dominierte das Nickel-Cadmium-System den Markt der Klein-Akkumulatoren nahezu vollständig. Die großen Stückzahlen im Umlauf und ein nicht vollständig geschlossener Recyclingkreislauf stellen heute wegen des giftigen Schwermetallbestandteils Cadmium aber ein Umweltproblem dar. Deshalb wird seit dem 26.9.2006 gemäß EU-Batterie-Richtlinie 2006/66/EG das „In-Verkehr-bringen“ von „Gerätebatterien und -akkumulatoren, die mehr als 0,002 Gewichtsprozent Cadmium enthalten, einschließlich solcher, die in Geräte eingebaut sind“ untersagt. Die Umsetzung dieser Richtlinie in die nationale Gesetzgebung muss bis zum 26. September 2008 erfolgen.

In zylindrischer Form enthält der NiCd-Akku einen Wickel aus gestapelten Schichten, bestehend aus der Minuselektrode (geladen: Cadmium Cd, entladen: Cadmiumhydroxid $Cd(OH)_2$), einer mit wässriger Kalilauge (KOH + Wasser) getränkten Separatorfolie und der Plus Elektrode (geladen: Nickeloxidhydrat $NiO(OH)$, entladen: Nickelhydroxid $Ni(OH)_2$). Die Reaktionen an den Elektroden bei Ladung und Entladung sind in Abbildung 6 angegeben. Man sieht, dass das Kalium im Elektrolyten Kalilauge nicht an den Reaktionen beteiligt ist. Diese sind hier stark vereinfacht dargestellt. In Wirklichkeit laufen besonders an der positiven Elektrode zahlreiche Zwischenreaktionen ab.

NiCd-Akkus haben eine Nenn-Klemmenspannung von 1,2 V und liegen damit ca. 20 % unter den 1,5 V herkömmlicher Primärbatterien (z. B. Alkali-Mangan). Deshalb kann man sie nicht in allen Fällen als 1:1-Ersatz verwenden.

Im Betrieb des Akkus sind einige Randbedingungen zu beachten, um seine volle Kapazität auch nach mehreren Lade-Entlade-Zyklen zu erhalten. Bei einer Dauerladung mit niedrigen Strömen oder bei Nachladung bereits bei nur teilweiser Entleerung wird die aktive Fläche der negativen Cadmium-Elektrode durch Kristallbildung auf der Oberfläche reduziert. Der Akku büßt dabei einen Teil seiner Kapazität ein. Er „merkt sich“ gewissermaßen, welche Kapazität ihm abverlangt wird, und stellt sich quasi darauf ein. Daher rührt auch die Bezeichnung „Memory-Effekt“ (Abbildung 7). Abhilfe schafft, den Akku stets so lange zu entladen, bis das betriebene Gerät seine Funktion einstellt, dann voll laden und vom Ladegerät trennen. Manche Ladegeräte haben auch eine Entladefunktion, mit der sie den Akku definiert tief genug entladen, bevor der Ladevorgang einsetzt, oder können solche Akkus in mehreren Lade-Entlade-Zyklen „refreshen“. Problematisch

Bild 7: Wird der Entladezyklus eines NiCd-Akkus nicht vollständig durchlaufen, verliert er an Kapazität (Memory-Effekt).

sind auch der Kapazitätsverlust mit abnehmender Temperatur und die recht hohe Selbstentladungsrate von 5 bis 10 % pro Woche. Bei richtiger Behandlung sind 1000 Zyklen problemlos zu erreichen, ohne dass dabei die Kapazität unverträglich nachlässt.

Der Nickel-Metallhydrid-Akkumulator

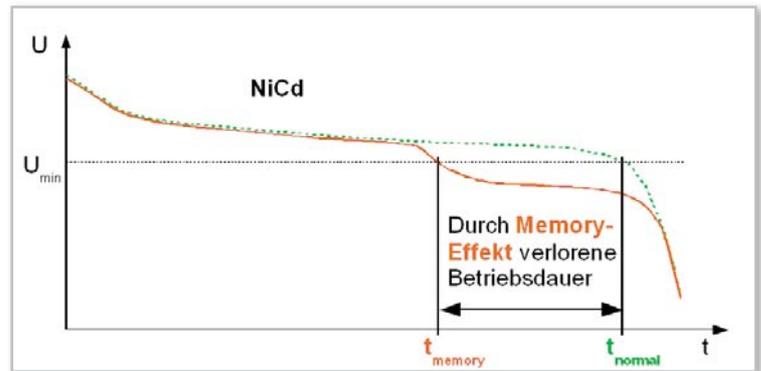
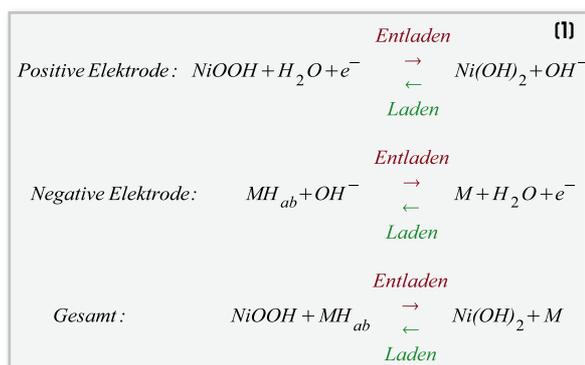
Nickel-Metallhydrid-Akkus (NiMH) haben bereits weitgehend den NiCd-Akku mit seiner giftigen negativen Cadmiumelektrode verdrängt. Wegen der Spannungsgleichheit mit NiCd-Akkus können sie diese 1:1 ersetzen, bei doppelter Kapazität und ohne deren Umweltproblematik. Der grundsätzliche Aufbau eines NiMH-Akkus ist dem des NiCd-Akkus sehr ähnlich (Abbildung 8). Lediglich für die negative Elektrode wird statt Cadmium ein Metallhydrid eingesetzt.

Metallhydride sind Verbindungen zwischen Wasserstoff und einem Metall oder einem Metallgemisch (Legierung) mit erstaunlichen Eigenschaften. Im Zusammenhang mit der Entdeckung von Nickel-Eisen- (NiFe), Magnesium-Nickel- (MgNi) und Lanthan-Nickel-Legierungen (LaNi₅) vor ca. 25 Jahren fiel deren enormes Speichervermögen für Wasserstoff auf. Geeignete Legierungen sind in der Lage, bis zum 1000fachen ihres Volumens an Wasserstoff in ihrem Kristallgitter reversibel einzulagern. Damit übersteigt der volumetrische Anteil an Wasserstoff in einem Metallhydrid sogar den Wert von verflüssigtem Wasserstoff.

Der NiMH-Akku macht Gebrauch von der elektrochemischen Umkehrbarkeit des Einlagerungsvorgangs im Material der negativen Elektrode. Die positive Elektrode besteht aus einer Nickeloxid-Verbindung und der Ladungsaustausch zwischen den Elektroden findet über einen wässrigen Elektrolyten statt. Die Reaktionen an den Elektroden und in Gesamtheit gibt Gleichung 1 wieder.

In Gleichung 1 ist M die Wasserstoff speichernde Metallverbindung und H_{ab} der absorbierte Wasserstoff. MH_{ab} ist also nicht als chemische Formel zu verstehen, sondern als Anschrift für ein Mischmetall M mit absorbiertem Wasserstoff H_{ab}.

An der Gesamtreaktion ist das Wirkungsprinzip des NiMH-Akkus zu erkennen: Der Wasserstoff bewegt sich beim Laden von der positiven zur negativen Elektrode und umgekehrt beim Entladen, ohne dass der Elektrolyt (verdünnte Kalilauge



KOH) einen Anteil an der Reaktion hätte. Er wird weder in seiner Konzentration noch in der Zusammensetzung verändert, sondern dient ausschließlich als Transportmedium für die negativen Hydroxid-Ionen (OH⁻). Das erleichtert die Herstellung gasdichter Zellen. Im unbelasteten Zustand stellt sich zwischen den Elektroden eine Leerlaufspannung von ca. 1,3 V ein.

Den Vorstellungen vom Ideal kommen der Eneloop-Akku (Hersteller Sanyo) und Folgeprodukte anderer Hersteller ein gutes Stück näher. Sie weisen eine stark verringerte Selbstentladung (Low Self Discharge: LSD-NiMH) von typ. 10 % im Jahr auf. Deshalb werden sie vorgeladen ausgeliefert und können meist sofort eingesetzt werden. Möglich wurde dies durch eine Superkristall-Legierung (Superlattice Alloy) als Material für die negative Elektrode und eine modifizierte positive Elektrode. Den Nachteil einer etwas geringeren Kapazität gleicht die flachere Entladekurve aus. Für Foto- und Filmkameras, die ja stets einsatzbereit sein sollen, sind LSD-NiMH-Akkus deshalb eine gute Wahl.

Im zweiten Teil dieses Artikels werden weitere Speicher für elektrische Energie wie Li-Ionen-, Li-(Ionen-)Polymer- und RAM-Akkus, Super-Caps, Brennstoffzellen usw. beleuchtet, die Systeme aus der Sicht der Anwendungen genauer unter die Lupe genommen und die Besonderheiten der Ladeverfahren beschrieben.

ELV

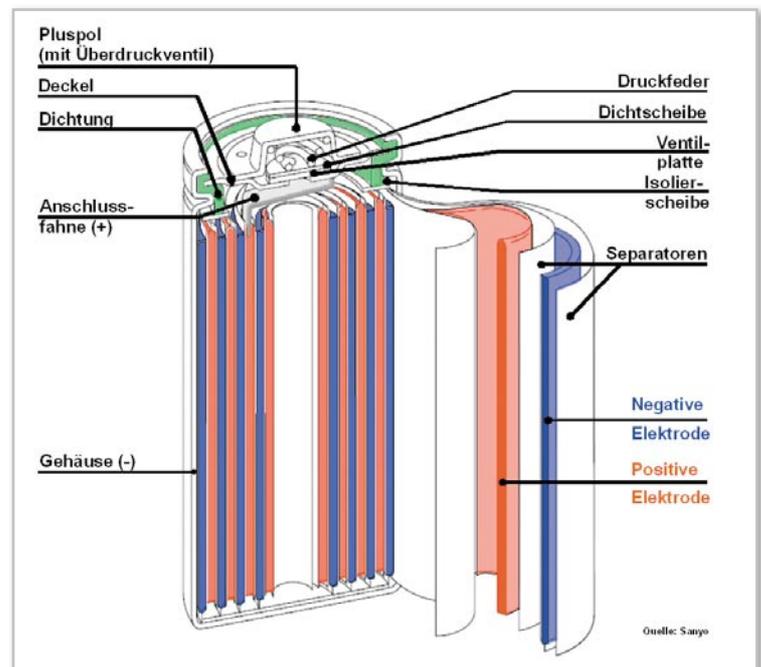


Bild 8: Schnittbild eines NiMH-Akkus