

Akku-/Lade-FAQ

Nick Müller, Daniel Romann*

Stand: 16. April 2005

Diese FAQ soll dem Leser einen kleinen Überblick in Hinsicht auf verschiedene Lade- und Akkutechnologien geben.

Bitte beachten: Nicht jedes Ladeverfahren eignet sich für jeden Akku; Fehlbehandlung oder Unachtsamkeit können fatale Folgen (Brand, Explosion) haben.

Inhalt

1. Ladeverfahren	2
1.1. Konstantstromladung	2
1.2. Impulsstromladung	2
1.3. Reflexladung	2
1.4. Konstantspannungsladung	3
2. Abschaltkriterien	4
2.1. Zeit	4
2.2. Spannung	5
2.3. Temperatur	5
2.4. $-\Delta U$	5
2.5. dU/dt	6
3. FAQ	6
3.1. NiMH/NiCd	6
3.2. Pb-Gel/Säure	7
3.3. Lagerung	7
A. Glossar	7
B. Typenvergleich	11
C. Links & Literatur	12

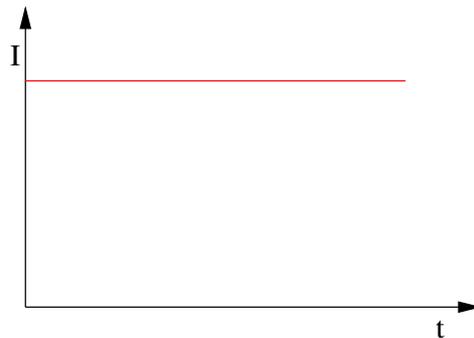
*E-Mail: daniel.romann@tu-berlin.de

1. Ladeverfahren

1.1. Konstantstromladung

Eignung für Zellentypen: NiCd, NiMH

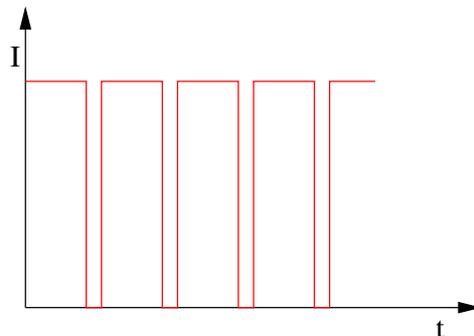
Hier wird über den gesamten Verlauf der Ladezeit ununterbrochen mit einem konstanten, definierten Ladestrom I geladen. Das Verfahren findet nur noch in älteren Ladegeräten, die entweder nach Zeit oder Temperatur abschalten bzw. manuell abgeschaltet werden müssen Anwendung. Alte und einfache Ladegeräte verwenden zur Strombegrenzung meist Glühlampen.



1.2. Impulsstromladung

Eignung für Zellentypen: NiCd, NiMH

Der Ladestrom ist wie beim zuvor genannten Ladeverfahren zeitlich konstant jedoch periodisch kurzzeitig unterbrochen, beispielsweise zur näheren Bestimmung der Ruhespannung. Weiterhin ermöglicht die Methode mit gepulsten Strömen eine etwas höhere Laderate als bei der normalen Konstantstromladung vorgesehen wäre. Das Ladeverfahren ist eine vereinfachte Methode der (patentierten) Reflex-Ladung, eignet sich jedoch sowohl für Schnell- als auch Langsamladung.

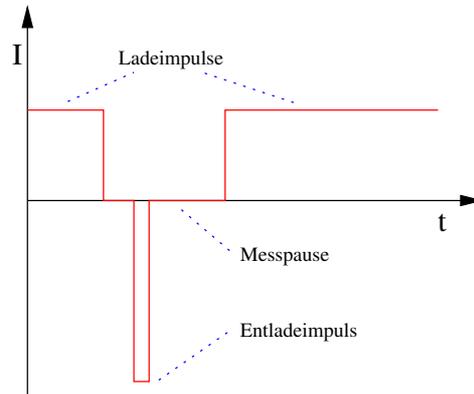


1.3. Reflexladung

Eignung für Zellentypen: NiCd, NiMH

Diese Art des bereits in den späten 60er Jahren patentierten Ladeverfahrens zeichnet sich neben der herkömmlichen Ladestromunterbrechung durch einen sehr kurzen aber hohen Entladeimpuls aus. Das Verfahren findet vor allem bei hohen Ladeströmen Anwendung. Ziel ist es, die bei Schnellladung eintretende unerwünschte Sauerstoffbildung an der positiven Elektrode weitestgehend zu unterbinden. Die

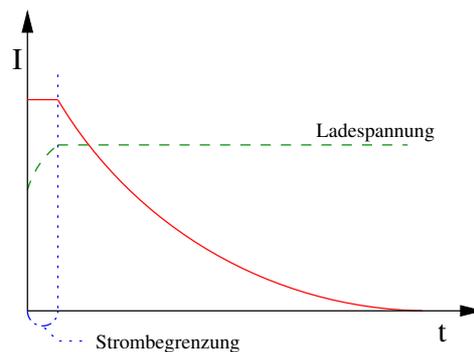
Sauerstoffbläschen bewirken einerseits einen hohen Zellendruck und der damit verbundenen Erhitzung sowie einen erhöhten Innenwiderstand, da durch die Blasen die Reaktionsoberfläche der Elektrode abnimmt. Daher eignet sich das Ladeverfahren auch für Zellen deren Nickelelektroden nicht gesintert sind (also auch für Zellen, die nicht als schnellladefähig gekennzeichnet sind). Ferner unterbindet die Lademethode (hauptsächlich zurückzuführen auf den hohen Ladestrom) die Bildung von Cadmiumkristallen auch bei nur teilentladenen NiCd-Zellen, so dass der Innenwiderstand gering bleibt und Spannungsabfälle bei der Entladung (lazy battery effect oder ugs. „Memory-Effekt“ vermieden werden. Bei geringeren Ladeströmen erscheint jedoch der Sinn von Reflexladung zweifelhaft.



1.4. Konstantspannungsladung

Eignung für Zellentypen: Pb, Li-Ion

Diese Art der Lademethode kennzeichnet nicht einen konstanten Ladestrom sondern eine zeitlich konstante Spannung. Diese Spannung ist exakt auf die Ladeschlussspannung des angeschlossenen Akkumulators einzustellen. Weiterhin ist der (meist auf dem Akku angegebene) maximale Ladestrom, die Strombegrenzung, einzustellen, um unzulässige Spitzen bei Ladebeginn zu vermeiden. Mit den zuvor getroffenen Einstellung ist eine Überladung des Akkumulators ausgeschlossen, da der Ladestrom automatisch – der Akku verhält sich wie ein zunehmender ohmscher Widerstand – mit der Zeit stetig abnimmt. Bitte beachten: Die meisten handelsüblichen Ladegeräte für Bleiakkus haben keine Einstell-



möglichkeiten für Spannung und Strombegrenzung. Es dürfen nur Akkumulatoren mit der entsprechenden Spannung angeschlossen werden. Das Laden eines 6V-Bleiakkumulator an einem 12V-Gerät oder umgekehrt ist zu unterlassen. Ferner darf die Strombegrenzung des Gerätes, die des Akkus nicht überschreiten. Dies kann u.U. bei Anschluss einer kleinen Moped-Batterie an ein Gerät für Auto-Batterien

der Fall sein. Zudem weisen vielen Geräte zur Reduzierung der Ladezeit erhöhte Ladeschlussspannungen auf. Erst dadurch wird eine Überladung ermöglicht. Während die aus der Überladung resultierende charakteristische Gasung durch Nachfüllen mit destilliertem Wasser bei offenen Bleiakкумуляtoren ausgeglichen werden kann, ist der Wasserverlust bei den wartungsfreien Blei-Gel-Verwandten i.d.R. nicht auszugleichen. Gasung tritt auch schon bei teilgeladenen Akkumulatoren auf, so dass von einer Schnellladung bei wartungsfreien, abgeschlossenen Pb-Gel-Zellen auf Dauer abzusehen ist.

Aufgrund der starken Schwankung der Ladeschlussspannungen bei NiCd/NiMH-Zellen eignet sich das Verfahren nicht für diese Typen.

Ladeschlussspannungen (Auswahl):

Blei-Säure, Blei-Gel: 2,25 – 2,30 V/Zelle (bei einem 12 V Akkumulator entsprechend 13,5 – 13,8 V)

Lithium-Ionen: starke Variation je nach Zellentyp (abhängig von Elektrodenmaterial und Elektrolyt), meist 4,1 – 4,2 V; Tadiran: 3,40 V. Bei Akkumulatoren ohne integrierte Überwachungselektronik („Watchdog“), die jedoch kaum noch anzutreffen sind, sind diese Werte strikt einzuhalten!

2. Abschaltkriterien

2.1. Zeit

Die Unterbrechung des Ladestromes nach einer definierten Zeit war zu Zeiten geringer Ladeströme eine geläufige Methode, lässt sie sich doch für einen konstanten Ladestrom einfach berechnen. Die Methode hat jedoch gravierende Nachteile: Der Akkumulator muss vollständig entladen sein und der Ladestrom sollte das übliche Richtmaß $C/10$ nicht überschreiten um Ungenauigkeiten durch leichtes, aber schadloses Überladen auszugleichen. Üblicherweise werden jedoch beide Voraussetzungen den heutigen Ansprüchen, sei es im Modellbau oder in der Unterhaltungselektronik, nicht gerecht. Die Abschaltung nach Zeit stellt somit oft nur noch eine Sicherheitsreserve nach Versagen anderer Abschaltkriterien dar. Ferner findet die Zeitabschaltung beim neuer oder lang gelagerter Akkumulatoren Anwendung.

Ladezeitberechnung Die Ladezeit für eine (oder mehrere Zellen in Serie, also hintereinander) lässt sich sehr einfach berechnen, wenn die meist auf den Zellen aufgedruckte Zellenkapazität (mAh) und der (u.U. einstellbare) Ladestrom (mA, A) bekannt sind. Um eine Überladung möglichst zu vermeiden, muss der Akkumulator vollständig entladen sein. Der Ladestrom sollte nicht deutlich höher als $C/10$ sein. Ideal wären also z.B. ein Ladestrom von 170 mA bei einem Akkumulator mit 1700 mAh Nennkapazität.

Von einem Ladefaktor 1,4 ausgehend, berechnet sich die Ladezeit t zu:

$$t = C/I \cdot 1,4$$

wobei entweder

- C die Zellenkapazität in mAh und I der Ladestrom in mA ist oder
- C die Zellenkapazität in Ah und I der Ladestrom in A ist.

Bei gemischten Angaben muss zuvor entsprechend umgerechnet werden: 1 Ah = 1000 mAh bzw. 1 A = 1000 mA.

Beispiel: Akkukapazität: $C = 2 \text{ Ah} = 2000 \text{ mAh}$, Ladestrom: $I = 200 \text{ mA}$.

$$t = \frac{2 \text{ Ah}}{0,2 \text{ A}} \cdot 1,4 = 10 \text{ h} \cdot 1,4 = 14 \text{ h.}$$

Die Ladezeit beträgt also 14 Stunden.

2.2. Spannung

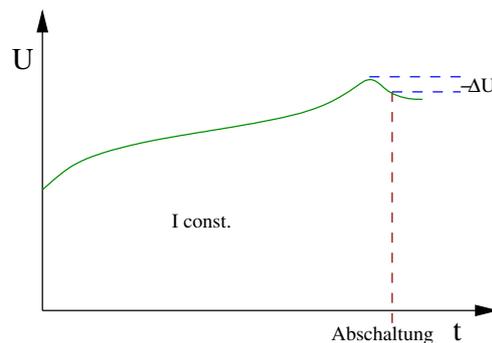
Das „Spannungskriterium“ beruht nicht auf einer definierten Ladestromabschaltung, sondern dessen stetiger Abfall auf ein Minimum. Siehe hierzu das Ladeverfahren Konstantspannungsladung. Eine von Temperatur und Alter unabhängige Ladeschlussspannung ist Voraussetzung für ein sicheres Abschalten. Daher ist die Abschaltung für NiCd/NiMH-Zellen ungeeignet.

2.3. Temperatur

Aufgrund unerwünschter Elektrolyseprozesse nimmt der Ladewirkungsgrad gegen Ende des Ladevorganges ab. Ein Großteil der Ladeleistung wird zunehmend in Wärme umgesetzt - bei vollem Akkumulator sogar vollständig. So bietet es sich an, mittels eines Fühlers ab einer bestimmten Temperatur den Ladestrom abzuschalten. Das Verfahren bürgt jedoch auch Nachteile: Entweder der Akkumulator wird überladen, da die nötige Temperatur erst zu spät erreicht wird (z.B. bei geringer Umgebungstemperatur) oder die Erwärmung tritt zu früh ein (hoher Innenwiderstand nach langer Lagerung, zu hoher Ladestrom, hohe Umgebungstemperatur) und der Ladestrom wird zu früh unterbrochen. Daher gilt die Temperaturabschaltung moderner Schnelllader maximal als Sekundärkriterium (vergleichbar mit der Zeitabschaltung). Dennoch wird diese Abschaltung aufgrund der günstigen Realisierung in vielen Werkzeugen mit Akkubetrieb verwendet, wenngleich ein merklicher Kapazitätsverlust nach wenigen 100 Zyklen in Kauf genommen wird.

2.4. -delta U

Bei annähernder Vollladung von NiCd/NiMH-Zellen sinkt bei weiterlaufendem, konstantem Ladestrom die anliegende Klemmenspannung etwas ab. Diesen charakteristischen Spannungsrückgang ($-\Delta U$) erkennt der Ladeprozessor und unterbricht den Ladestrom. Der Spannungsrückgang ist nur ausgeprägt, wenn der Ladestrom entsprechend hoch ist (ab etwa $0,3C$). Da bei NiMH-Zellen der Spannungsrückgang nicht so stark ausgeprägt ist, wie bei NiCd-Zellen ($10 - 20\text{ mV}$ bzw. $20 - 30\text{ mV}$), sollte er einstellbar sein bzw. das Ladegerät sollte zwei verschiedene Einstellungen für den jeweiligen Zellentyp bereitstellen. *Daher eignen sich ältere NiCd-Schnellladegeräte nicht unbedingt auch für NiMH-Zellen.* Umgekehrt werden NiCd-Zellen nicht ganz vollständig geladen, wenn die Spannungsdifferenz zu niedrig definiert ist (z.B. für NiMH-Zellen); sie nehmen jedoch dadurch keinen Schaden. Moderne Mikroprozessor-Ladegeräte drosseln bereits bei beginnendem Spannungsabfall den Ladestrom und laden bis zur Abschaltung mit verringertem Strom, so dass eine Steigerung der Zellenlebenserwartung gegenüber älteren Ladegeräten erzielt werden kann.

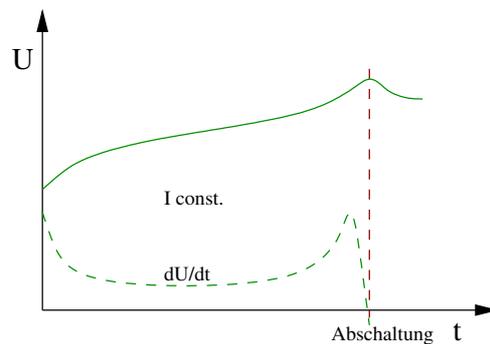


Die bei annähernder Vollladung vermehrt einsetzende Sauerstoffproduktion an der positiven Elektrode führt zunächst zu einem kurzzeitig höheren Spannungsanstieg. Aufgrund der Sauerstoffbildung steigt

der Zellendruck und damit verbunden auch die Temperatur. Dies hat zur Folge, dass der Innenwiderstand etwas herabsinkt und somit (gemäß des Ohmschen Gesetzes) auch die Klemmenspannung geringfügig abnimmt.

2.5. dU/dt

Neben der reinen Spannungskurve bilden einige Ladeprozessoren intern deren numerische Ableitung ($\frac{dU}{dt} = \dot{U}$ = Spannung U abgeleitet nach der Zeit t). Nimmt diese Ableitungskurve den Wert 0, die Spannungskurve also ihren maximalen Wert, an, kommt es zur Unterbrechung des Ladestroms – unabhängig vom angeschlossenen Zellentyp (NiCd oder NiMH) und ohne leichte Überladung, wie beim $-\Delta U$ -Verfahren. Da im Moment des Abschaltens der Akkumulator jedoch noch nicht zu 100 % geladen ist, folgt meist eine Übergangsladung mit geringem Strom (z.B. C/10) bevor der Ladestrom engültig unterbrochen oder in den Erhaltungslademodus übergegangen wird.



3. FAQ

3.1. NiMH/NiCd

Kann ich meine NiCd-Zellen am Labornetzteil (oder Batterielader fürs Auto) laden?

Nein. NiCds (und NiMH) sind nicht bei einer bestimmten Spannung voll. Allerdings können diese Zellen zur Wiederbelebungs auch mal kurzzeitig damit geladen werden, wenn der Strom nicht zu hoch ist, die Zelltemperatur überwacht und rechtzeitig abgeschaltet wird. So ein Batterielader für's Auto liefert i.d.R. zu viel Strom, also im Zweifelsfall lieber nicht machen.

Was mache ich mit einem Akku, der nach längerem liegen nur noch weniger Kapazität einladen lässt als der angegebenen Nennkapazität?

Mit hohen Strömen Reflexladen. Wenn das nicht hilft: entsorgen.

Wie heiß dürfen denn die Zellen beim Laden/Entladen werden?

Für NiCd gelten 70°C , für NiMH 50°C als Maximum. Bleiakkus sollten nicht wärmer werden. Li-Akkus auch nicht (30°C ?). Genauere Temperaturen ergeben sich aus den Datenblättern der Hersteller.

Mein NiCd-Akku wird bei hohen Entladeströmen (z.B. 10C) sehr schnell leer. Ich bekomme nur 1/4 der Nennkapazität raus.

Vorausgesetzt der Akku ist für Hochstrom geeignet (eine RC2000 liefert z.B. problemlos 40 A) und er hat bei einer Entladung mit C/1 die Nennkapazität dann liegt es wohl daran, dass er nicht schnell

genug geladen wird. Nach dem formieren soll man sie ab dann mit mindestens 2 – 3C laden. Laden mit Strömen von nur C/10 führt zu solchen Effekten.

3.2. Pb-Gel/Säure

Kann ich meinen Bleiakku auch am NiCd-Lader laden?

Jein! Nur wenn die Akkuspannung überwacht und rechtzeitig abklemmt wird. Auch sollte der Lade-strom zum Ende hin niedriger werden. Das passiert aber bei Konstantstromladung nicht. Der Akku wird nicht optimal gewartet und neigt zum gasen.

Was ist denn die richtige Spannung zum Abschalten bei Bleiakkus?

Das hängt von der Verwendung ab. Im Pufferbetrieb (z.B. Alarmanlagen, Starterbatterie im Auto) ist die Zellenspannung niedriger, im Zyklusbetrieb (Laden/Entladen im Rhythmus von Tagen) höher. Bei Pufferbetrieb gelten 2,3 – 2,4V, im Zyklusbetrieb 2,55 – 2,6V. Beim Laden im Zyklusbetrieb ist es wichtig, dass der Akku bei Erreichen der Ladeschlussspannung möglichst bald abgeklemmt wird.

Mir pressierst und ich will meine Blei-Gel-Akku schnell laden, was darf ich ihm als maximalen Lade-strom zumuten?

Nicht mehr als C/2.

Wieso verliert mein Blei-Gel-Akku so schnell an Kapazität?

Wahrscheinlich wurde er mehrere Male bis zum Ende entladen, so dass trotz seiner Konstruktion ein Verlust aktiver Masse und somit ein irreversibler Kapazitätsverlust eintrat. Blei-Gel-Akkus sind sofort nach Gebrauch zu laden und auch so zu lagern. Tiefentladungen sollten unbedingt vermieden werden. Ein Memory-Effekt existiert bei diesem Akku-Typ nicht.

3.3. Lagerung

Wie lagere ich meinen Akku am Besten?

Generell gilt, dass Akkus in kühler Umgebung (z.B. Kühlschrank) eine niedrigere Selbstentladung ha-ben. Am Besten ist es aber nach wie vor, den Akku kurz vor Gebrauch zu laden.

Soll ich den Akku voll, leer oder halbvoll lagern?

Generell sollten Akkus, insbesondere Pb-Akkus, voll gelagert werden. Eine Ausnahme bilden NiCd-Akkus, die besser leer gelagert werden. Werden die Akkus nur ein paar Tage gelagert, spielt das aber eher keine Rolle. Nach langer Lagerung brauchen die Akkus sowieso mehrere Zyklen um ihre volle Kapazität wieder zu erreichen.

A. Glossar

C Kapazität der Zelle (Einheit: [mAh], 1000mAh = 1Ah). Der Wert gibt an, wie viele Stunden ein bestimmter Strom von der Zelle geliefert werden kann. 1Ah bedeutet demzufolge, dass in einer Zeit von 1h ein Strom von 1A oder in in 0,5h auch 2A. Die Kapazitätsangabe bezieht sich oft auf einen

bestimmten Entladestrom, denn der Entladewirkungsgrad nimmt mit steigendem Strom ab. Eine 1 Ah-Zelle wird daher nicht 1/100h lang 1 A liefern, sondern weniger, abhängig von Technologie, Alter und Umgebungstemperatur.

Die Kapazitätsangabe bezieht sich bei Bleiakkumulatoren in der Regel auf einen Entladestrom von C/10 (also bei 10-stündiger Entladung) oder C/20, bei NiCd/NiMH auf ca. C/2 oder C/5. Im Zweifelsfalle ist das Datenblatt ausschlaggebend.

C/10, 4C, ... Statt absoluter Zahlenangaben von Lade- oder Entladeströmen bei Zellen spezifizierter Kapazität, wird der Strom meistens als Vielfaches (2C, 4C) oder Bruchteil ($C/10 = 1/10 \cdot C$) der Zellenkapazität C angegeben. Wenngleich die Einheit physikalisch nicht ganz exakt ist, ermöglicht diese Art der Stromangabe einen schnellen Rückschluss auf die Belastung des Akkumulators.

Formieren Werden mehrere neue Zellen zu einem Akku-Pack seriell zusammengeschaltet, gibt es aufgrund von Exemplarstreuung bei der Fertigung zwangsläufig Unterschiede beim Ladestand. Um vorzeitige Tiefentladungen/Umpolungen einzelner Zellen beim Entladen zu vermeiden, und um die Spannungskurven für das spätere Schnellladen anzugleichen, müssen alle Zellen auf ein gemeinsames Niveau gebracht werden. Dazu wird der Verbund 2 bis 3 Zyklen mit C/10 15h lang geladen und mit mäßigem Strom (C/10 - 1C) entladen. Der etwas höhere Ladefaktor bewirkt zwar eine leichte (aber schadlose) Überladung einzelner Zellen, sorgt jedoch gleichzeitig für eine rasche Angleichung. Diese Prozedur sollte auch während des normalen Gebrauchs alle 10 bis 15 Zyklen oder nach längerer Lagerung wiederholt werden. Häufigkeit oder die Notwendigkeit überhaupt bieten nach einzelnen Erfahrungen allerdings immer wieder Diskussionsstoff.

Ladefaktor Der Ladefaktor ist ein Maß für den Wirkungsgrad einer Zelle beim Laden – also die Menge an Kapazität die tatsächlich geladen werden muss, um eine bestimmte wieder „herauszubekommen“. Der Ladefaktor beträgt in der Regel 1,3 - 1,4 bei NiMH und 1,4 - 1,5 bei NiCd bei einem Ladestrom von C/10. Bei höheren Ladeströmen ($\geq C/1$) sinkt der Ladefaktor auf den Wert 1,2 - 1,3. Bei niedrigen Ladeströmen und Lademethoden bei denen der Ladefaktor eine Rolle spielt (siehe Konstantstromladen) kann ruhigen Gewissens der höhere Wert verwendet werden.

„Memory-Effekt“ Der bei NiCd-Akkus berühmt berüchtigte „Memory-Effekt“, teilweise fast schon zum herannahenden Zelltod stilisiert, wird oft in Zusammenhang mit irreparablen Kapazitätsverlust erwähnt. Dies ist grundlegend falsch, denn erstens ist der geläufige „Memory-Effekt“ reversibel und zweitens geht keine Kapazität verloren. Das Phänomen, dass der Akkumulator beim Entladen anscheinend viel zu früh „leer“ ist, wird treffender durch die englischen Bezeichnung „lazy battery effect“ oder „voltage depression“ umschrieben. Für diese Erscheinung, stark vereinfacht ausgedrückt, ist in erster Linie die Kristallisationsneigung des Cadmiums an der negativen Elektrode bei NiCd-Zellen verantwortlich. Kristalle bzw. kristallähnliche Strukturen haben eine vergleichsweise kleine Reaktionsoberfläche, so dass die chemische Reaktion beim Entladen, also die Umwandlung des reinen Metalls Cadmium zu Cadmiumhydroxid, länger dauert. Elektrotechnisch gesehen, befindet sich in der Zelle eine Art elektrischer Widerstand, der mit einmal größer wird. Je größer dieser Widerstand, desto mehr Spannung fällt an diesem ab und gemäß dem Gesetz der Reihenschaltung steht dem angeschlossenen Verbraucher nur noch eine geringere Spannung zur Verfügung. Jetzt wird klar, warum der ein oder andere Verbraucher seinen Dienst quittiert, obwohl noch Cadmium (also Restkapazität) zur Verfügung steht: Der Innenwiderstand ist zu hoch und der Akkumulator ist „lazy“ (= träge), da er nur unzurei-

chend Spannung zur Verfügung stellt („voltage depression“).
Es ergeben sich zwei entscheidene Fragen:

1. Was fördert einen hohen Innenwiderstand?

- Hierzu zählen in erster Linie Teilentladungen. Die Stelle oder Schicht, bei der kein Cadmium mehr abgebaut worden ist, sondern durch frühzeitiges Laden wieder etwas angesetzt wurde, ist physikalisch dichter. Folglich wird beim erneuten Entladen genau an dieser Stelle der Innenwiderstand höher und folglich die Spannung kleiner – als ob sich der Akkumulator diese Stelle „gemerkt“ (→ Memory) hat. Erfolgen die Entladungen wiederholt bis zur gleichen Stelle, tritt der „Memory-Effekt“ immer mehr in Erscheinung.
- Kleine Ladeströme (weniger als $C/10$) fördern die Kristallbildung. Sie geben den Cadmiumatomen genügend Zeit sich regelmäßig anzuordnen. Gefürchtet ist hierbei die Bildung von Dendriten (lange, spitze Kristalle), die u.U. den Separator (Trennschicht zwischen den beiden Elektroden) durchstoßen können und die Zelle damit nachhaltig schädigen oder zerstören. Im Unterschied zum vorhergehenden Fall, scheint der Akkumulator über die ganze Entladung träge zu sein.

2. Wie lässt sich der Innenwiderstand wieder senken oder möglichst klein halten?

- Der Akkumulator sollte gelegentlich mit geringem Strom vollständig entladen werden. NiCd-Zellen können einzeln schadlos auf eine Zellenspannung von 0 V tiefentladen werden. Einzelne Langzeiterfahrungen zeigten, dass auch Packs problemlos mit einer Glühlampe vollständig entladen werden können. NiCd-Zellen sind relativ robust in Bezug auf Umpolungen. Als sicher gilt die Methode, jede Zelle einzeln mit einem durch den Schrumpfschlauch gestochenen Widerstand kurzzuschließen. In diesem Zusammenhang sei auf die etwas unkonventionelle, aber auch umstrittene „Wildflyer-Methode“¹ verwiesen. Diese sieht eine dauerhafte Kurzschließung mittels Widerstand vor.
- Hohe oder zumindest gepulste Ladeströme sorgen für einen „fitten“ Akkumulator.
- Bei längeren Lagerzeiten sollten NiCd-Zellen im entladenen Zustand aufbewahrt werden. Niedrige Lagertemperaturen (z.B. im Kühlschrank) sind vor allem bei geladenen Zellen empfehlenswert, da sie weitestgehend die Selbstentladung unterbinden. Der Elektrolyt (Kaliumhydroxid) ist frostsicher. Vor erneuter Benutzung sei die Erwärmung auf Raumtemperatur angeraten.

Obwohl der NiMH-Akkumulator aufgrund des fehlenden Cadmiums als „Memory-Effekt“-resistent gilt, sollte auch dieser erfahrungsgemäß entladen werden. Allerdings sollten NiMH-Zellen nicht tiefentladen werden. Als sehr wirkungsvoll haben sich daher Si-Dioden, eventuell mit einem Vorwiderstand zur Strombegrenzung, zum Kurzschließen herausgestellt. Die Zellenklemmenspannung sinkt dabei (je nach Diode) nicht unter 0,7 V. Ferner sollten NiMH-Zellen zumindest im teilgeladenen Zustand geladen werden. Auch hier bietet sich ein kalter Keller oder der Kühlschrank an.

Der Innenwiderstand eines Akkus erhöht sich aufgrund der abnehmenden Ionendurchlässigkeit des Separators mit seinem Alter auch irreversibel. Beschleunigt wird dieser Prozess durch hohe Temperaturen, wie sie bei extremer Belastung durch unzulässige Entladeströme/Ladeströme oder starker Überladung entstehen. Der zum Verlust aktiver Masse verantwortliche „chemische Verschleiß“ der Elektroden sorgt mit zunehmenden Alter für eine (echte) Kapazitätsminderung. Auch hier trägt Fehlbehandlung in Form von wiederholtem Überladen dem Prozess bei.

¹<http://www.wildflyer.de/>

Pushen Beim sogenannten pushen werden die Akkus mit Hilfe eines Kondensators großer Kapazität ($> 10000 \mu\text{F}$) und einer hohen Spannung (ca. 60V) „geladen“. Der hohe Strom, z.T. mehr als 1000 A verschweißt den internen Zellenverbinder besser und sorgt so für einen geringeren Innenwiderstand. Andere Zell-chemische Vorgänge werden zwar behauptet, konnten aber nicht nachgewiesen werden. Auf eine genial einfache Anordnung zum Selber-Pushen sei hier ² verwiesen.

Selektieren Beim Selektieren werden die Zellen nach Spannungslage, Innenwiderstand und Kapazität vermessen, sortiert und entsprechend zu Akku-Packs zusammengestellt. Oft sind selektierte Zellen auch gepusht.

²<http://www.elektroflug.de/Verschiedenes/pushen.htm>

B. Typenvergleich

Bezeichnung	Nickel-Cadmium	Nickel-Metallhydrid	Blei-Säure, Blei-Gel	Lithium-Ionen
Nennspannung pro Zelle [V]	1,2	1,2	2,0	3,6 – 3,7
Ladeschlusspg. pro Zelle [V]	nicht eindeutig def.	nicht eindeutig def.	2,3 (Normalladung)	4,1 – 4,2
Entladeschlusspg. pro Zelle [V]	0,9 (Einzelzelle: 0)	0,9	1,7	2,5
maximale Laderate ¹	2C (Sinterzellen: 4C)	2C	$(C/2)^2$	$(0,5 - 1C)^2$
maximale Entladerate ¹	10C (Sinterzellen: 25C)	10 – 15C	10C	2 – 3C
Zyklusfestigkeit (Anzahl) ³	++ (1000)	+ (500)	Bleisäure: – (< 5), BleiGel: o (300)	+ (500)
Robustheit	++	+	+	-
spez. Energiedichte [Wh/kg]	40 – 65	65 – 85	30 – 40	100 – 150
Anodenmaterial (gel. Zustand)	Nickel(III)oxidhydrat (NiOOH)	Nickel(III)oxidhydrat (NiOOH)	Bleioxid (PbO ₂)	Li _{0,5} CoO ₂ (Mischoxide)
Kathodenmaterial (gel. Zustand)	Cadmium (Cd)	MH= Wasserstoff speichernde Legierungen (z.B. LaNi ₆ H ₆)	Blei (Pb)	Li _x Co _x (Lithium speicherndes Graphit)
Elektrolyt	Kaliumhydroxid (KOH)	Kaliumhydroxid (KOH)	Schwefelsäure (H ₂ SO ₄)	Lithiumhexafluorphosphat (LiPF ₆)
Bruttoreaktion (Entladen ↔ Laden)	2 NiOOH + Cd + H ₂ O ↔ Ni(OH) ₂ + Cd(OH) ₂ (stark vereinfacht!)	MH + NiOOH ↔ M + Ni(OH) ₂	PbO ₂ + 2H ₂ SO ₄ + Pb ↔ PbSO ₄ + 2 H ₂ O + PbSO ₄	LiCo + 2 Li _{0,5} CoO ₂ ↔ Co + 2 LiCoO ₂

¹ maßgeblich ist die max. Zellentemperatur, die sich aus den Datenblättern ergibt

² zeitlich inkonstanter Ladestrom, max. Anfangsladestrom = Strombegrenzung

³ grobe Richtwerte, stark beeinflusst durch Behandlung des Akkus

C. Links & Literatur

- Halaczek, Thaddäus Leonhard; Radecke, Hans Dieter: Batterien und Ladekonzepte. Feldkirchen : Franzis 1988 (ISBN 3-7723-4603-0)
- Retzbach Ludwig: Akkus und Ladegeräte. 12. Aufl. Villingen-Schwenningen : Neckar-Verlag 2000 (ISBN 3-7883-2142-3)
- Implementierungsvorschläge zum Selbstbau:
<http://www.dse-faq.elektronik-kompodium.de/dse-faq.htm#F.21>
- Ausführlicher Artikel zu verschiedenen Ladeverfahren
<http://www.basytec.de/ladung/ladung.html>
- Datenblätter:
Sanyo http://www.sanyo-energy-europe.com/content/con_cells_product.php
Panasonic <http://www.panasonic.com/industrial/battery/oem/>
Gold Peak <http://www.gpbatteries.com/>