

Ladung von elektrochemischen Akkumulatoren - Grundlagen, Kennlinien, Alterung -

Andreas Jossen

e-mail: aj@basytec.de

Internet: <http://www.basytec.de/>

Das Copyright liegt beim Autor

1. Einführung

Das Laden von elektrochemischen Akkumulatoren stellt eine wichtige, oft sogar die wichtigste Aufgabe beim Betrieb von Akkumulatoren dar. Durch ungeeignete Ladeverfahren kann die erzielbare Lebensdauer drastisch verkürzt werden. Im ungünstigsten Fall kann es zu einem Sofortausfall kommen. Andererseits kann mit "optimalen" Ladeverfahren eine hohe Zyklenlebensdauer und/oder eine kurze Ladezeit erzielt werden. Da der Ladevorgang in der Regel über das Netz erfolgt, können die Ladeparameter in weitem Maße beeinflußt werden, was zu zahlreichen, z.T. sehr unterschiedlichen Ladeverfahren geführt hat.

Innerhalb der letzten 10 Jahre haben sich neben den klassischen Ladeverfahren, Schnell- und Schnellstladeverfahren etabliert. Hauptziel dieser Verfahren ist die größere Verfügbarkeit von netzunabhängigen Geräten und Systemen, wie z.B. Elektrowerkzeuge oder Laptops. Durch die kurzen Ladezeiten kann beispielsweise auf einen Wechselakku verzichtet werden. Werden bei klassischen Ladeverfahren Ladezeiten im Bereich von mehreren Stunden erzielt, so können bei Schnellstladeverfahren Ladezeiten im Bereich von deutlich unterhalb einer Stunde erreicht werden. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 1 dargestellt.

Neben diesen Ladeverfahren zum "Aufladen" der Batterie tritt bei einigen Anwendungen der Fall ein, daß der Volladezustand erhalten werden soll. Dieses als Erhaltungsladung bezeichnete Ladeverfahren ist beispielsweise bei unterbrechungsfreien Stromversorgungen von besonderem Interesse.

Geeignete Ladeverfahren müssen so ausgelegt werden, daß keine für die Batterie kritischen Zustände erreicht werden. Das heißt einerseits, daß ein Ladeverfahren an die Batterietechnologie angepaßt werden muß und daß andererseits bei zunehmender Ladegeschwindigkeit der Ladevorgang besser überwacht werden muß.

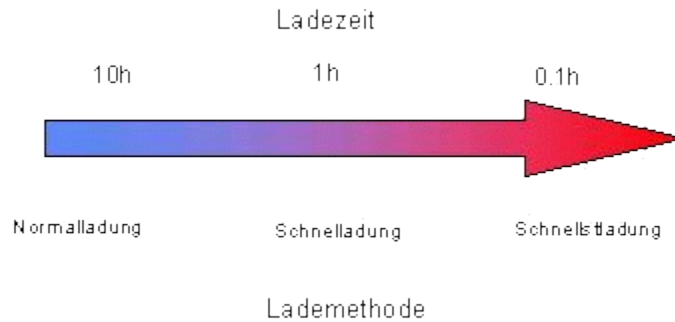


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Lademethode und Ladezeit

2. Aufgaben der Ladung

Die Aufgaben der Ladung (Aufladung) lassen sich wie folgt beschreiben:

- Vollständige Aufladung der Batterie (möglichst schnell)
- Egalisierung unterschiedlicher Zellzustände
- Minimierung von Alterungseffekten
- Aufhebung von reversiblen Effekten (z.B. Memory Effekt)

Die Egalisierung von unterschiedlichen Zellzuständen wird mit zunehmender Zellenzahl wichtiger. Eine Egalisierung kann entweder durch eine kontrollierte Überladung erfolgen oder mit Hilfe eines Ladungsausgleichssystems. Letzteres wird in Beitrag *Ladungsausgleichssysteme* detailliert beschrieben.

Bei der Erhaltungsladung sind die Aufgaben wie folgt:

- Kompensation der Selbstentladung
- Minimierung von Alterungseffekten

3. Klassische Ladeverfahren

Klassische Ladeverfahren setzen sich aus einer oder mehreren Ladekennlinien zusammen. Diese Ladekennlinien sind in der DIN 41 772 [1] wie folgt definiert:

<i>Kennlinie</i>	<i>Kurzzeichen</i>
Konstantstrom	I
Konstantspannung	U
Fallende Kennlinie	W

Ferner werden in der gleichen DIN Kurzbezeichnungen für das Umschalten und das Abschalten definiert:

	<i>Kurzzeichen</i>
Selbsttätige Ausschaltung	a
Selbsttätiger Kennliniensprung	0(Null)

Die Reihenfolge zusammengesetzter Kurzzeichen entspricht dem Ladeverlauf, z.B.

Bsp. 1.: Konstantstrom-Konstantspannungs-Kennlinie: IU

Bsp. 2: Zwei aufeinanderfolgende fallende Kennlinien mit selbsttätigem Kennliniensprung (Umschaltung) und selbsttätiger Ausschaltung: W0Wa

Bei einigen Ladeverfahren wird auch zwischen Hauptladung, Nachladung und Erhaltungsladung unterschieden. Diese lassen sich wie folgt beschreiben:

Hauptladung

Während dieser Ladephase fließt der Ladestrom zum Großteil in die Hauptreaktionen. Die Effekte der Nebenreaktionen spielen keine wesentliche Rolle.

Nachladung (nicht bei allen Ladeverfahren)

Während dieser Ladephase konkurrieren Haupt und Nebenreaktionen, d.h. daß die Ladegeschwindigkeit begrenzt werden muß. Bei einigen Ladeverfahren wird die Dauer oder Intensität der Nachladephase von der Hauptladung abhängig gemacht.

Erhaltungsladung (Float charge, Trickle charge)

Sie dient zur Kompensation der Selbstentladung einer vollgeladenen Batterie. Die Nebenreaktionen (verantwortlich für die Selbstentladung) sind dominierend. Nicht alle Ladeverfahren beinhalten eine Erhaltungsladung.

Ein Beispiel für einen Ladevorgang mit Hauptladung, Nachladung und Erhaltungsladung ist in Abbildung 2 dargestellt. In diesem Beispiel ist eine I0I0I-Ladung dargestellt.

Der Ladevorgang beginnt in diesem Beispiel mit der Hauptladung. Beim Erreichen eines Schaltkriteriums (z.B. Spannung, Temperatur oder Zeit), wird auf die Nachladung umgeschaltet. Nach Erreichen eines weiteren Schaltkriteriums (Vollladezustand der Batterie ist erreicht) wird dann auf die Erhaltungsladung umgeschaltet.

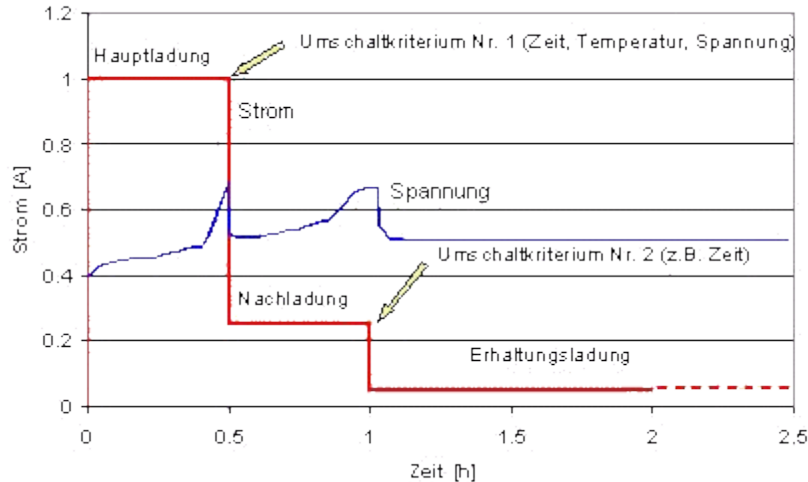


Abbildung 2: Beispiel für ein Ladeverfahren mit drei aufeinanderfolgenden Ladephasen (I0I0I).

Seit jüngerer Zeit gibt es Ladeverfahren, die nicht durch die DIN Bezeichnungen beschreibbar sind. Diese werden im Kapitel fortgeschrittene Ladeverfahren näher beschrieben.

3.1 Die I und die Ia - Ladung

Das Laden mit konstantem Strom wird insbesondere für NiCd und NiMH Batterien eingesetzt. Vorteilhaft ist, daß die eingeladene Ladungsmenge direkt aus der Ladezeit ermittelt werden kann. Mit größerem Ladestrom kann demnach die Ladezeit reduziert werden. Wird ein Ladeverfahren ohne Abschaltkriterium verwendet (I-Ladung), dann kommt es mit dem Erreichen des Volladezustandes zum Überladen der Batterie. Der gesamte Ladestrom geht dann in die Nebenreaktionen und bei verschlossenen Batterien kommt es zur Erwärmung. Bei Batterien mit flüssigem Elektrolyten kommt es zu einer Zersetzung des Elektrolyten. Letzteres kann auch bei verschlossenen Batterien passieren, wenn der Ladestrom zu groß ist. Für I-Ladeverfahren ohne Abschaltung sind daher nur Ladeströme bis zu dem 10stündigen Strom zulässig. Allerdings kann es auch bei diesen kleinen Überladeströmen zu einer Schädigung der Batterie kommen. Es wird daher empfohlen die Ladezeit auf z.B. 14 h zu begrenzen. Abbildung 3 zeigt den Strom- und Spannungsverlauf am Beispiel einer NiCd Batterie.

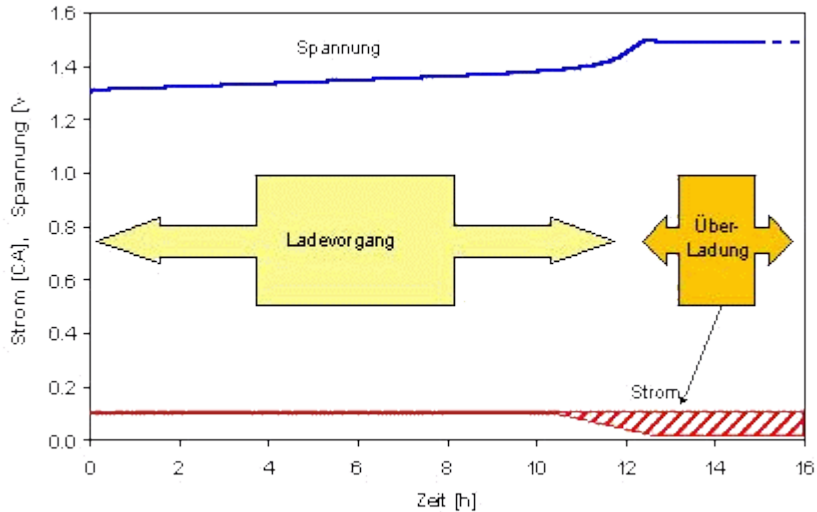


Abbildung 3: Die I-Ladung am Beispiel einer NiMH Batterie. Schraffiert dargestellt ist der Anteil des Stroms an der Überladung

Wenn kürzere Ladezeiten erreicht werden sollen, dann muß beim Erreichen des Volladezustandes abgeschaltet werden. Mögliche Kriterien werden im Kapitel Volladeerkennung/Abschaltkriterien näher behandelt. Bei geeigneten Abschaltkriterien können Ladezeiten von 10 – 20 Minuten erzielt werden. Die Ia-Ladung wird heute in vielen Produkten mit NiCd und NiMH Batterien (Rasierer, Laptop ...) verwendet.

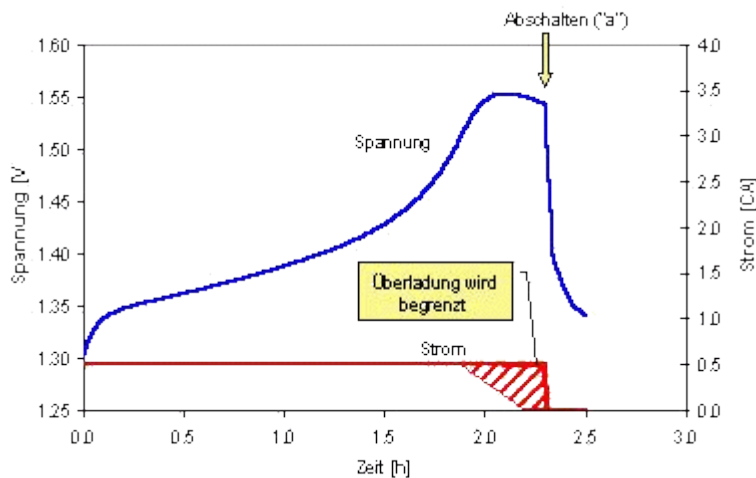


Abbildung 4: Die Ia Ladung am Beispiel einer NiCd Batterie

Die I-Ladung ist problematisch bei in Serie geschalteten Zellen, wohingegen bei parallel geschalteten Zellen es zu ungleichmäßiger Stromaufteilung kommen kann.

3.2 Die U-Ladung

Bei Ladung mit konstanter Spannung ergibt sich ein fallender Strom. Ursache hierfür ist der Anstieg der Ruhespannung und des Innenwiderstandes mit zunehmendem Ladezustand.

Problematisch kann der hohe Ladestrom zu Beginn der Ladung sein, weshalb Ladeverfahren mit ausschließlicher U-Ladung i.d.R. nicht verwendet werden. Das im Bereich von Starterbatterien eingesetzte Ladeverfahren, kommt einer U-Ladung sehr ähnlich. Vorteilhaft bei der U-Ladung ist, daß Batterien problemlos parallel geschaltet werden können (paralleles Laden), und daß die Überladung gering ist (bei richtiger Wahl der Ladespannung). Dem gegenüber stehen deutlich längere Ladezeiten bis zum Erreichen des Vollladezustandes.

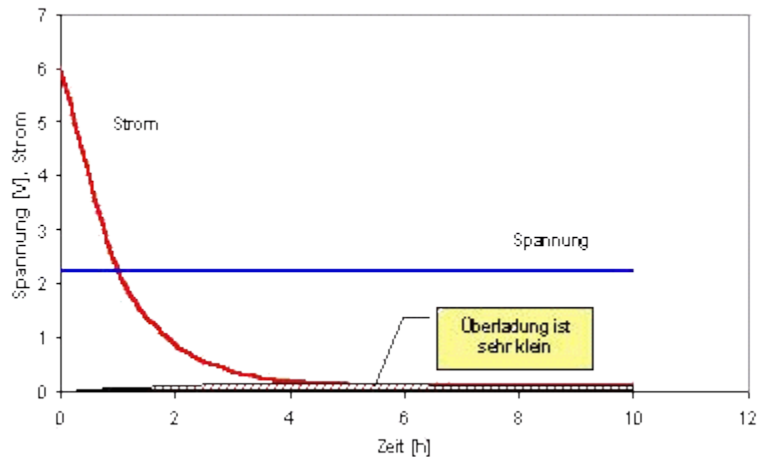


Abbildung 5: Exemplarisches Beispiel einer U – Ladung (Bleibatterie)

3.3 Die W Ladung

Das Laden mit fallender Kennlinie ergibt sich beim Einsatz von unregelmäßig geladenen Ladegeräten. Da der sich ergebende Ladestrom von der Batteriespannung abhängt, und die Batteriespannung mit zunehmendem Ladestrom ansteigt, kommt es zu einem Rückgang des Ladestroms mit zunehmendem Ladezustand. Problematisch bei dem Einsatz unregelmäßig geladener Ladegeräte ist die Abhängigkeit des Ladestroms von der Netzspannung. Angewandt wird die W-Ladung z.B. bei Antriebsbatterien von Gabelstaplern. Der wesentliche Vorteil besteht in den geringen Kosten des Ladegerätes.

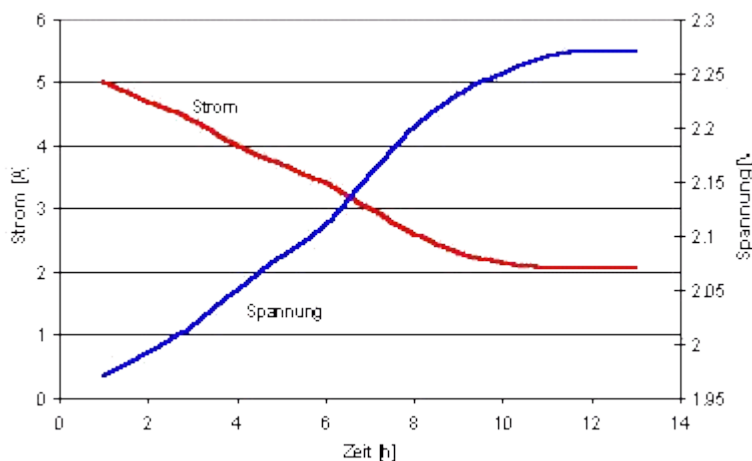


Abbildung 6: Die W-Ladung am Beispiel einer Bleibatterie

3.4 Die IU Ladung

Die IU Ladung verbindet die Vorteile der I-Ladung mit denen der U-Ladung. Während der I-Ladung kann innerhalb einer kurzen Zeit ein Großteil der Ladungsmenge eingeladen werden. Während der U-Ladephase wird mit reduzierter Geschwindigkeit vollständig aufgeladen, wobei die Überladung klein bleibt. Die Wahl der Ladespannung stellt einen Kompromiß zwischen kurzer Ladezeit und Überladung dar. Prinzipiell sollte die Ladespannung so gewählt werden, daß die entstehende Überladung nicht zur Schädigung der Batterie führt.

Die IU Ladung wird hauptsächlich bei Bleibatterien und bei Li-Ionen Batterien angewandt. Abbildung 7 zeigt den Strom- und Spannungsverlauf während einer IU-Ladung am Beispiel einer Li-Ionen Batterie.

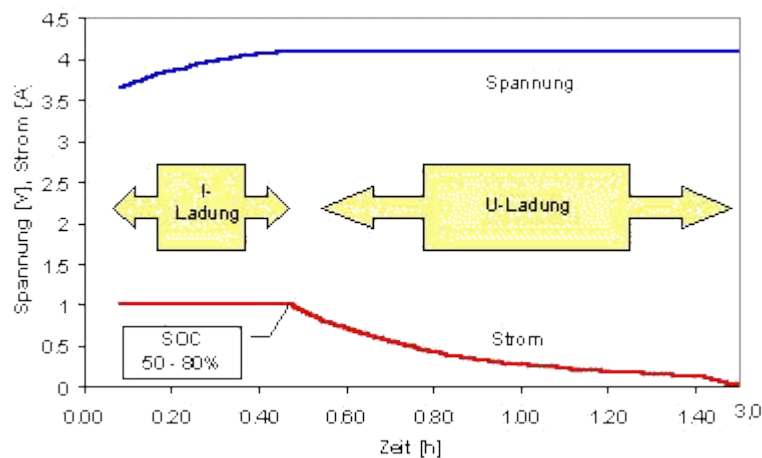


Abbildung 7: Die IU-Ladung am Beispiel einer Li-Ionen Batterie

Bei Bleibatterien wird eine Ladespannung bei 25°C zwischen 2.23V (Erhaltungsladung bei USV) und 2.5V verwendet. Der zu wählende Wert hängt von der Batterie selbst sowie der Betriebsart ab. Ferner sollte bei Temperaturschwankungen von mehr als $\pm 5^\circ\text{C}$ die Ladespannung an die Temperatur angepaßt werden (gilt bei Bleibatterien):

$$U_{Lad} = U_{Lad,25} \cdot (1 + \Delta T \cdot \alpha)$$

mit:

U_{Lad} : Ladespannung während der U-Ladephase

$U_{Lad,25}$: Ladespannung bei 25°C während der U-Ladephase (z.B. 2.35V)

ΔT : Temperaturdifferenz zu 25°C (z.B. 5K bei 30°C)

α : Temperaturkoeffizient

Der Temperaturkoeffizient liegt bei Bleibatterien im Bereich -3 bis -6 mV/K. Das heißt, daß die Ladespannung mit zunehmender Temperatur zu reduzieren ist.

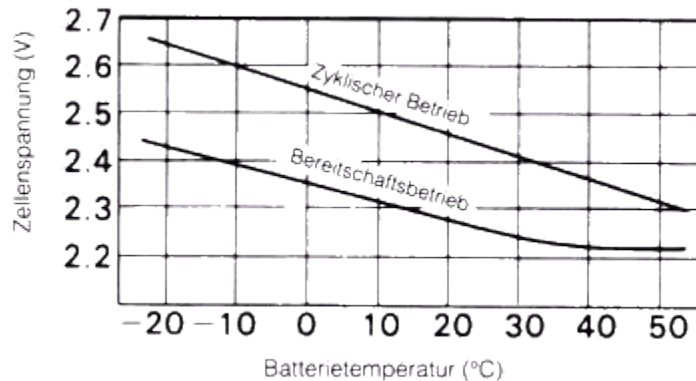


Abbildung 8: Beispiel für die Anpassung der Ladespannung an die Temperatur und die Betriebsart [2]

3.5 Die IU Ia Ladung

Mit Hilfe der IU Ladung lassen sich Ladezeiten bei Bleibatterien von etwa 10h realisieren. Um diese zu reduzieren, um eine eventuell entstandene Säureschichtung aufzuheben und um Unterschiede zwischen den Zellen zu egalisieren wird in einigen Anwendungen an die IU Ladung eine Ia Ladung angeschlossen. Es ergibt sich die IU Ia Ladung. Ein Beispiel ist in Abbildung 9 dargestellt. Bei entsprechender Wahl der Ladeparameter lassen sich Ladezeiten von weniger als 10 h erzielen. Eingesetzt wird die IU Ia Ladung hauptsächlich für Blei-Antriebsbatterien. Durch die kürzeren Ladezeiten besteht die Möglichkeit des Dreischichtbetriebes ohne der Verwendung von Wechselbatterien. Wichtig ist das rechtzeitige Abschalten, da es sonst zu einer schädlichen Überladung kommt.

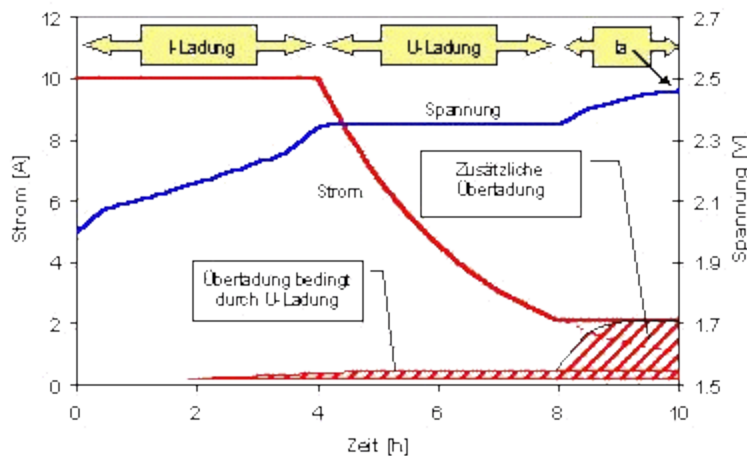


Abbildung 9: Die IU Ia Ladung am Beispiel einer Bleibatterie

4. Volladeerkennung / Abschaltkriterien

Wie die Beschreibung der verschiedenen Ladekennlinien zeigt, ist das Abschalten beim Erreichen des Volladezustandes von entscheidender Bedeutung. wird zu früh abgeschaltet, dann hat die

Batterie nicht die volle Kapazität, die Zellen können unterschiedliche Zustände aufweisen und bei Bleibatterien kommt es im Laufe der Zeit zur Sulfatation. Wird zu spät abgeschaltet, dann kommt es zur Überladung und beschleunigten Alterung der Batterie. Einige Ladeverfahren, wie z.B. da IU- Ladeverfahren benötigen keine Abschaltung, da sie "selbstregulierend" sind. Andere Ladeverfahren, wie z.B. das Ia und das UIa Ladeverfahren sind auf gut funktionierende Abschaltkriterien angewiesen, da es andernfalls zu irreversiblen Schäden an der Batterie kommt. Die Qualität eines Ladegerätes hängt also wesentlich von den eingesetzten Abschaltkriterien ab.

4.1 Bei Blei- und Li-Ionen Batterien

Bei Blei- und Li-Ionen Batterien werden typischerweise Ladeverfahren nach IU oder IUa Kennlinie verwendet. Ein Abschalten ist bei Bleibatterien nicht zwingend notwendig, wenn die Ladespannung nicht zu hoch ist (IU Ladung). Bei Li-Ionen Batterien sollte eine Abschaltung während der U-Ladephase erfolgen (Ua Ladung).

Abgeschaltet, bzw. auf Erhaltungsladung umgeschaltet wird in der Regel nach folgenden Verfahren:

- stromgesteuert (ca. $I < 1/30$ CA Li-Ion / $I < 1/100$ CA Blei)
- zeitgesteuert (abhängig von den Ladeparametern)

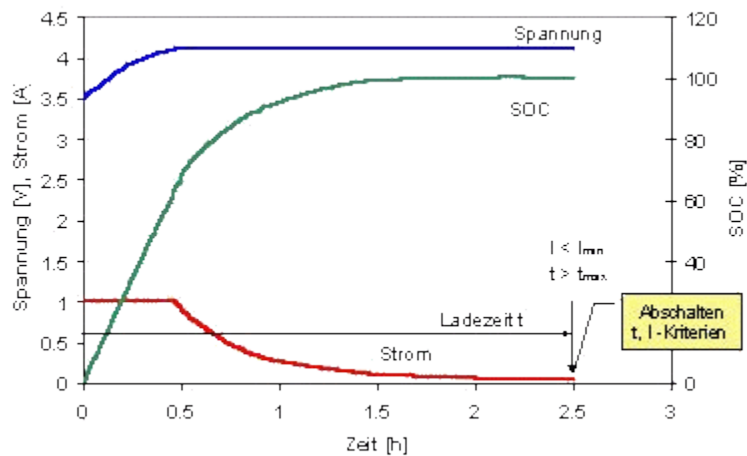


Abbildung 10: Abschaltkriterien für eine IUa Ladung

Das zeitgesteuerte Abschaltkriterium hat den Nachteil, daß es bei nicht vollständig entladener Batterie zu einer Überladung kommen kann. Das stromgesteuerte Kriterium zeigt diesen Nachteil nicht. Allerdings kann es bedingt durch einen Fehler bei der Strommessung oder bei defekter Zelle zum Fehlschlagen dieses Kriteriums kommen. Aus diesem Grund werden in Ladesystemen oft mehrere Kriterien berücksichtigt. Wird mindestens ein Kriterium erreicht, dann kommt es zur Abschaltung.

4.2 Bei Ni-Cd und NiMH Batterien

Bei NiCd und NiMH Batterien in gasdicht verschlossener Bauart wird sehr oft mit Ia-Ladeverfahren gearbeitet. Das rechtzeitige Abschalten ist eine der entscheidenden Aufgaben eines

Ladesystems. Der Spannungs- und Temperaturverlauf eines Ladevorgangs mit konstantem Strom ist in Abbildung 11 dargestellt.

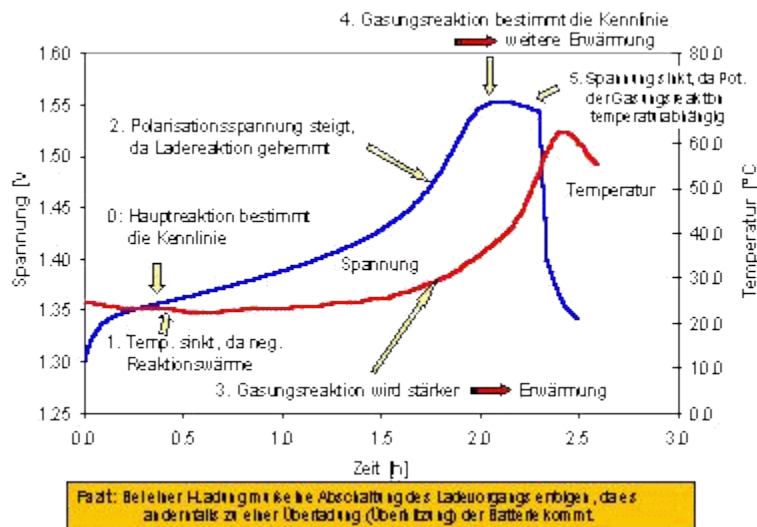
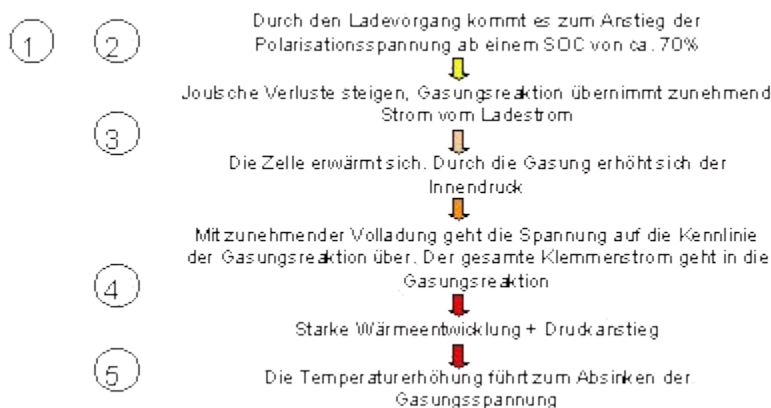


Abbildung 11: Spannungs- und Temperaturverlauf während des Ladevorgangs von NiCd / NiMH Batterien mit konstantem Strom

Die Interpretation der Kurvenverläufe ist wie folgt:



Entsprechend dieses Sachverhaltes können die Temperatur, die Spannung, der Zellinnendruck und/oder die Zeit als Abschaltkriterium verwendet werden. Da Druckmessungen aufwendig sind, wird auf Druckmessungen i.d.R. verzichtet.

4.2.1 Zeitkriterien

Zeitkriterien sind sehr einfach und kostengünstig zu realisieren. Aus diesem Grund werden sie oft bei billigeren Ladegeräten eingesetzt. Problematisch ist, daß je nach Anfangszustand es zu einer Unterladung, zur Überladung oder zur richtigen Abschaltung kommen kann (Abbildung 11). Unter anderem wird aus diesem Grund bei einigen Ladegeräten vor der Ladung die Batterie vollständig entladen. Da hierdurch Zeit verloren geht, werden bei etwas hochwertigeren Ladegeräten die Zeitkriterien nur in Verbindung mit anderen Abschaltkriterien verwendet.

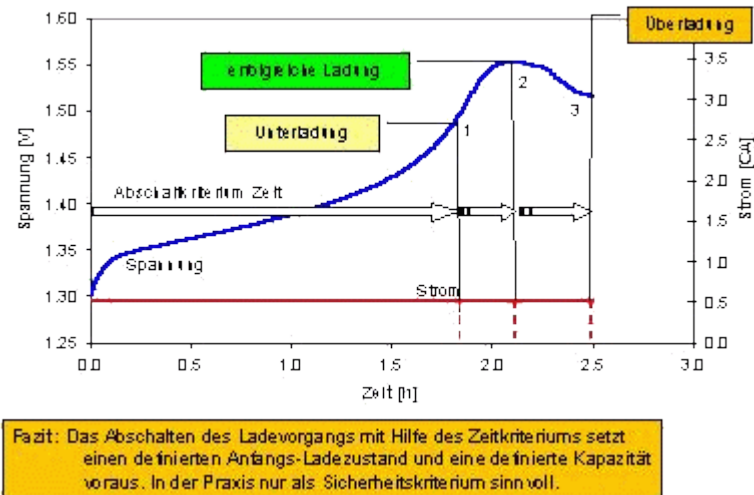


Abbildung 12: Die Problematik von Zeitkriterien zur Volladeerkennung

4.2.2 Spannungskriterien

Die Spannungskurve beim Laden mit Konstantstrom zeigt einige charakteristische Merkmale:

1. Wendepunkt: Dieser wird erreicht, wenn die Gasungsreaktion einsetzt und zunehmend den Ladestrom übernimmt. Die Batterie ist in diesem Punkt noch nicht ganz voll geladen.
2. Maximum: Im Spannungsmaximum fließt nahezu der gesamte Ladestrom in die Gasungsreaktion. Die Batterie hat den Volladezustand nahezu erreicht.
3. Spannungsrückgang: Der Volladezustand wird erreicht und es kommt zunehmend zur Überladung.

Neben der Detektion dieser drei charakteristischen Merkmale kann der Absolutwert der Spannung als Abschaltkriterium verwendet werden. In Abbildung 13 sind alle Spannungskriterien in die Ladekurve eingetragen.

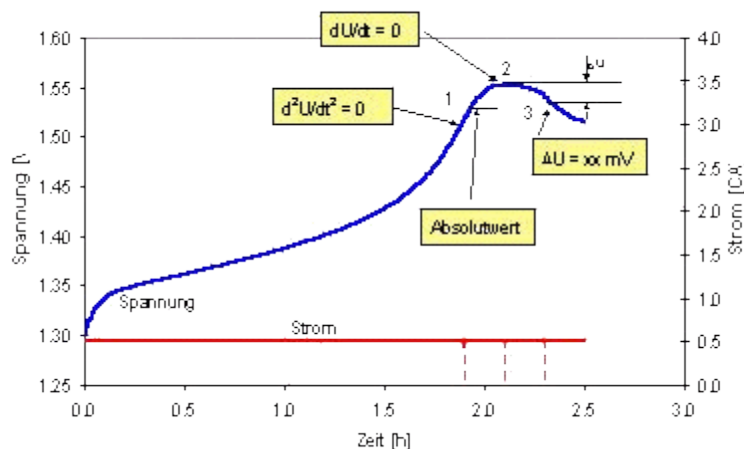


Abbildung 13: Spannungsgesteuerte Abschaltkriterien

Fazit:

- Das Abschalten nach dem Absolutwert der Spannung ist sehr kritisch, da temperatur-, alters- und typabhängig.
- Das Abschalten nach dem $-\Delta V$ Kriterium wird sehr häufig angewandt. Beim Erreichen des $-\Delta V$ Kriteriums ist es schon zu einer geringen Überladung gekommen. Problematisch ist ferner die Temperaturabhängigkeit dieses Kennlinienbereiches. So ergeben sich insbesondere bei Umgebungstemperaturen oberhalb von 30°C kleinere Spannungsmaximas. Es besteht die Gefahr, daß das $-\Delta V$ Kriterium dann nicht mehr funktioniert.
- Abschalten im Spannungsmaximum wird in einigen Literaturstellen als das optimale Verfahren bezeichnet, ist jedoch aus Sicht der notwendigen Meßtechnik aufwendiger.
- Beim Erreichen des Wendepunktes der Spannungskurve ist die Batterie noch nicht vollgeladen. Daher wird dieses Kriterium oft als Umschaltkriterium bei Schnellladeverfahren eingesetzt. Die Vollladung muß mit geringerem Strom erfolgen (Nachladephase).

Viele Ladegeräte verwenden als Abschaltkriterium das $-\Delta V$ Verfahren. Üblicherweise wird als $-\Delta V$ Wert ein Wert zwischen -1% (NiCd) und -0.25% (NiMH) des Maximalwertes verwendet.

Neuere Laderegler verwenden als $-\Delta V$ Wert -0.25% . Unter dieser Bedingung lassen sich sowohl NiCd als auch NiMH Batterien laden.

4.2.3 Temperaturkriterien

Da die Überladung von gasdicht verschlossenen NiCd und NiMH Batterien zur Erwärmung führt, bieten sich Abschaltkriterien auf der Basis von Temperaturmessungen an. Mögliche Abschaltkriterien sind in Abbildung 14 dargestellt.

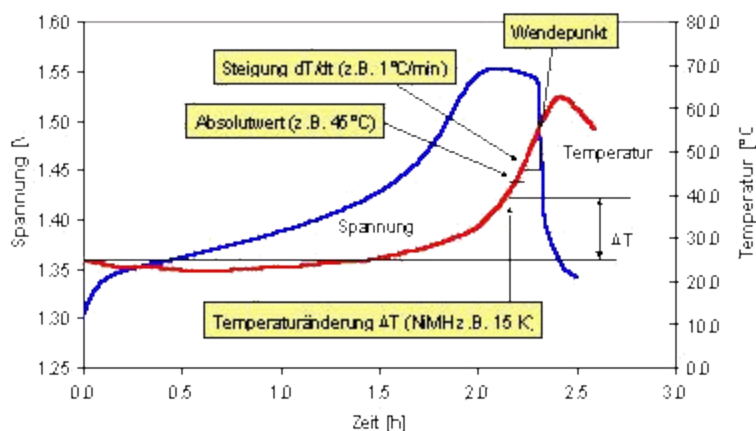


Abbildung 14: Temperaturgesteuerte Abschaltkriterien

Die temperaturbedingten Abschaltkriterien lassen sich wie folgt bewerten:

- Abschalten nach dem Absolutwert der Temperatur ist sehr kritisch und kann nur als Sicherheitskriterium dienen.
- Abschalten nach Temperaturänderung ΔT seit Start des Ladevorgangs ist möglich. Ein typischer Wert für NiMH Batterien ist 15 K.
- Die Steigung der Temperatur ist im Bereich 1 ... 6 K/min (temperaturabhängig). Dieses Kriterium trifft die Vollladung sehr gut. Ladefaktoren um 1.03 (!) werden genannt und Zyklenzahlen bis über 5000 (FRIWO) wurden schon erzielt.
- Der Wendepunkt der Temperatur liegt unter Umständen bei unerlaubt hohen Temperaturen, so daß er als Abschaltkriterium ungeeignet ist.

Temperaturgesteuerte Abschaltkriterien benötigen mindestens einen Temperatursensor, der thermisch mit der Batterie fest verbunden sein muß. Zudem kann es durch ungünstige Randbedingungen zu einem vorzeitigen Ladeabbruch kommen. Dies tritt z.B. dann ein, wenn ein kalter Akku in einem geheizten Zimmer aufgeladen wird.

4.2.4 Vergleich der Abschaltkriterien

Folgende Tabelle zeigt einen Vergleich der verschiedenen Abschaltkriterien und deren Einsatzmöglichkeiten.

	Zeit t	U abs	d^2U/dt^2	Umax	$-\Delta U$	T absolut	ΔT	dT/dt
Minimierung von Überladung	--	--	++	++	+	-	+	++
Laden mit großen Strömen	--	--	+	++	0	-	+	++
Präzise Vollladung	--	--	-	++	0	-	0	++
Umschaltkriterium für Schnellladung	--	-	++	-	-	-	+	+
Zusatzkriterium	+	+	-	-	-	+	+	+

Demnach sind insbesondere die Detektion des Spannungsmaximums und die Detektion der Temperaturanstiegsgeschwindigkeit besonders erfolgsversprechend.

Die Zeit, der Absolutwert der Spannung und der Temperatur eignen sich gut als zusätzliche Abschaltkriterien.

5. Fortgeschrittene Ladeverfahren

In jüngster Zeit werden zunehmend Ladeverfahren eingesetzt, die nicht mit Hilfe der Kennlinien der klassischen Verfahren beschrieben werden können. Viel dieser Verfahren verwenden einen Pulsförmigen Ladestrom. Einige gängige Verfahren werden im weiteren beschrieben.

5.1 IR-freies Laden

Beim Laden mit konstanter Spannung (z.B. während der U Phase einer IU Ladung) wird die Klemmenspannung als Regelgröße verwendet. Innerhalb der Batterie tritt ein Spannungsabfall am ohmschen Innenwiderstand auf. Der ohmsche Innenwiderstand setzt sich zusammen aus dem Widerstand der Stromableiter und dem des Elektrolyten. Da der am ohmschen Innenwiderstand hervorgerufene Spannungsabfall keinen Einfluß auf die elektrochemischen Reaktionen in der Batterie hat, liegt es Nahe diesen Spannungsabfall bei der Spannungsregelung zu berücksichtigen. Hierzu wird als Regelgröße die IR-freie Spannung verwendet. Zur Messung des IR Anteils wird der Ladevorgang kurz unterbrochen. Der hiermit unmittelbar einhergehende Spannungsrückgang ist der Spannungsabfall am ohmschen Innenwiderstand. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 15 veranschaulicht. Theoretisch würden Ladepausen von wenigen μ s zur Bestimmung ausreichen. Aus meßtechnischen Gründen werden i.d.R. Ladepausen im 10 ms Bereich verwendet.

Durch die Messung der Spannung im stromfreien Zustand ergeben sich weniger Störungen und es ergibt sich die Möglichkeit auf Fühlerleitungen zu verzichten.

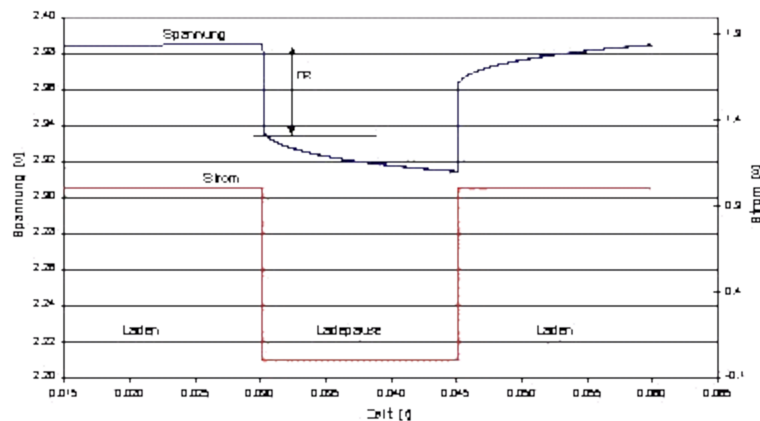


Abbildung 15: Bestimmung des IR Anteils beim IR freien Laden [4]

Wird auf die IR-freie Spannung geregelt, dann ergibt sich im Fall einer IU Ladung der in Abbildung 16 dargestellte Strom-Spannungsverlauf. Entsprechend der Darstellung wird insbesondere zu Beginn der U-Ladephase eine höhere Klemmenspannung ermöglicht. Hierdurch kann während dieser Ladephase auch mehr Ladung in die Batterie eingeladen werden.

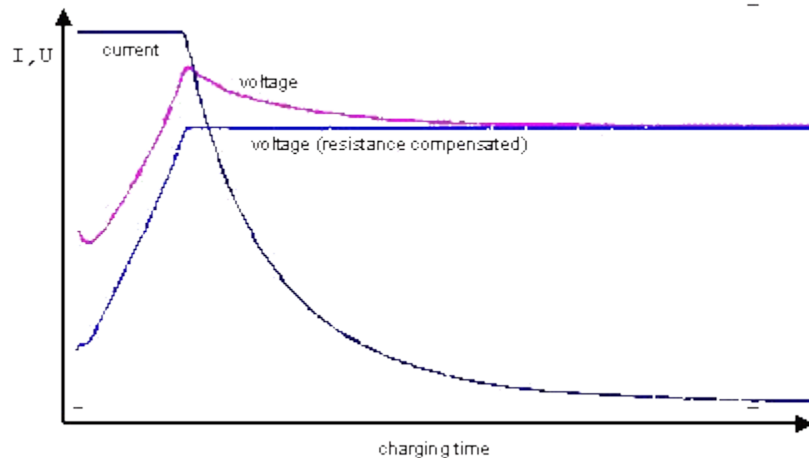


Abbildung 16: Spannungsverläufe beim IR-freien Ladeverfahren. [4]

5.2 Fortgeschrittene Ladeverfahren mit Strompulsmustern

Für die Schnell- und Schnellladung wurden innerhalb der letzten Jahre zahlreiche Methoden entwickelt und patentiert. Meistens werden diese Verfahren exklusiv von einem Hersteller angewandt. Folgende Methoden sind bekannt:

- Laden mit PWM moduliertem Strom (THEMIC)
- Kurze Entladepulse während der Ladung (REFLEX®Ladeverfahren)
- Verfahren mit optimierten Abschaltkriterien (z.B. CCS®)
- Verfahren mit vorausschauender Messung (VDX®)

6. Einfluß der Lademethode auf die Lebensdauer

Die Diskussion der verschiedenen Ladeverfahren hat gezeigt, daß das eingesetzte Ladeverfahren einen erheblichen Einfluß auf die erzielbare Lebensdauer hat. Die prinzipielle Kapazitätsentwicklung von verschlossenen Bleibatterien ist in Abbildung 17 dargestellt. Für diesen Batterietyp ist also sowohl eine zu geringe Aufladung als auch eine Überladung lebensdauerreduzierend. Bei den hier eingesetzten IU Ladeverfahren bedeutet dies, daß die Spannung während der U-Ladephase sehr sorgfältig gewählt werden sollte. Daß die richtige Wahl der Ladespannung auch von den inneren Batterieparametern abhängig ist, zeigt Abbildung 18. In dieser Untersuchung wurden Bleibatterien mit unterschiedlichen Säuredichten in Erhaltungsladung bei 2.25V betrieben. Es wird deutlich, daß es bei höheren Säuredichten zu einer beschleunigten Alterung kommt. Ursache ist jedoch nicht die Säuredichte selbst, sondern die mit höherer Säuredichte ansteigende Ruhespannung. Hierdurch ergibt sich bei höheren Säuredichten bei konstanter Ladespannung von 2.25V ein geringerer Erhaltungsladestrom und es kommt zur Mangelladung dieser Batterien.

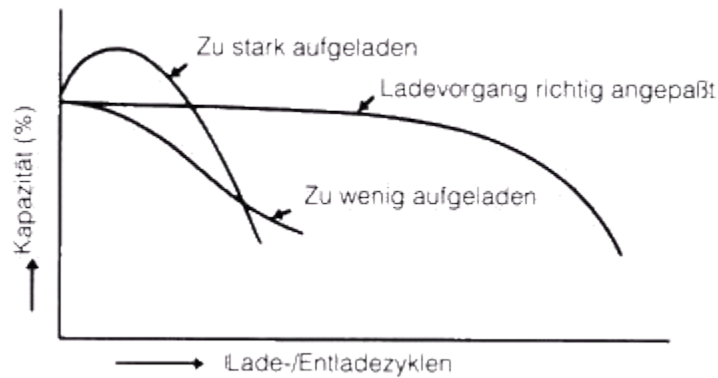


Abbildung 17: Prinzipielle Kapazitätsentwicklung einer verschlossenen Bleibatterie in Abhängigkeit der Lademethode [2]

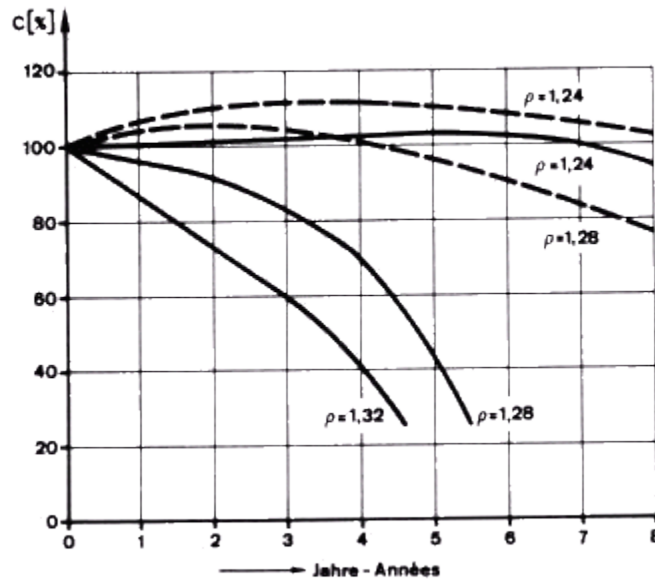


Abbildung 18: Kapazitätsentwicklung von Bleibatterien mit unterschiedlicher Säuredichte bei einer Erhaltungsladung mit 2.25V/ Zelle, durchgezogene Linie: Batterietyp 1, gestrichelte Linie: Batterietyp 2

Der Einfluß der Überladung auf die Kapazität für verschlossenen NiCd Batterien ist in Abbildung 19 [5] dargestellt. In diesem Beispiel wurden NiCd Akkumulatoren (AA Bauart) mit dem zehnstündigen Konstantstrom (I_{10}) bei einer Temperatur von 50°C überladen. Deutlich wird, daß es bereits nach wenigen Tagen zu einem deutlichen Kapazitätsverlust kommt.

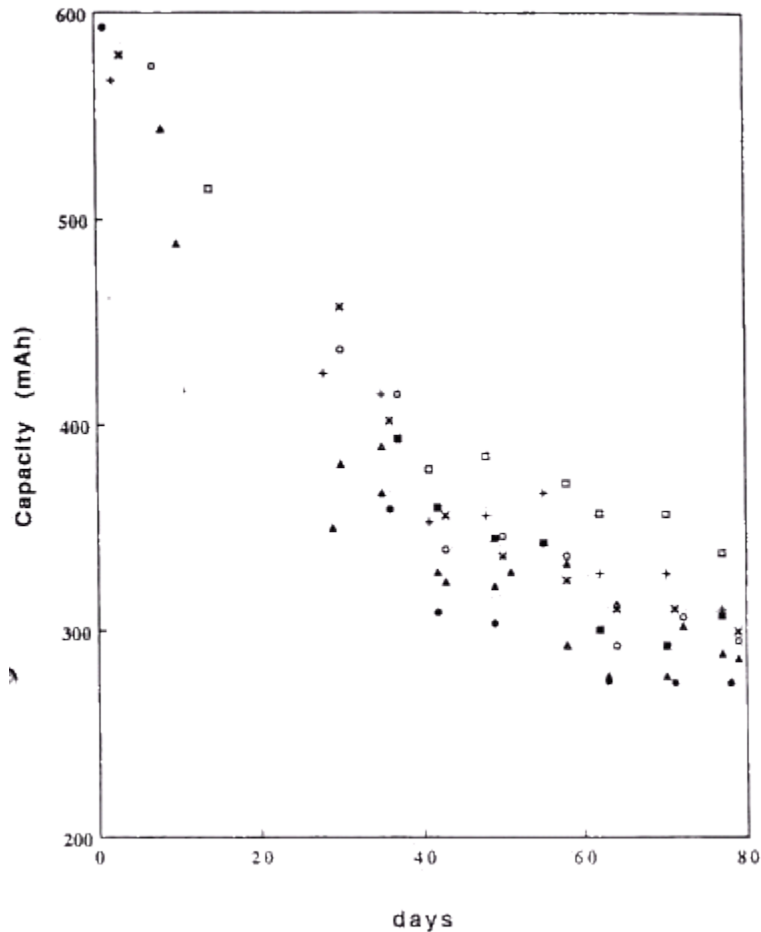


Abbildung 19: Einfluß der Überladung auf die Batteriealterung für NiCd Batterien bei 50°C und einem konstanten Überladestrom von I_{10} [5]

Wirkt sich bei Bleibatterien das mangelnde Aufladen negativ auf die Lebensdauer aus, so ist dies bei gasdichten NiCd und NiMH nicht zu beobachten. Einige Lademethoden zielen sogar darauf ab, die Batterie nicht vollständig aufzuladen, um so eine schädliche Überladung zu vermeiden. Die dadurch etwas geringere Kapazität ist in vielen Anwendungen von untergeordneter Bedeutung.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die erzielbare Lebensdauer wesentlich vom eingesetzten Ladeverfahren beeinflusst wird. Hierbei ist insbesondere das letzte Drittel des Ladevorgangs von zentraler Bedeutung. Während dieses Ladebereichs muß darauf geachtet werden, daß die zugeführte Überladung nicht zu groß wird.

7. Zusammenfassung

Die Ladung von elektrochemischen Akkumulatoren stellt eine wichtige Aufgabe dar. Falsches Laden ist in vielen Fällen für den vorzeitigen Ausfall der Batterie verantwortlich. Zur Erzielung möglichst langer Lebensdauern, muß das Ladeverfahren an den verwendeten Batterietyp und dessen innere Parameter angepaßt werden. Bei NiCd und NiMH Batterien ist besondere Aufmerksamkeit den eingesetzten Abschaltkriterium zu widmen. Dies gilt insbesondere beim

Einsatz von Schnell- und Schnellstlademethoden. Entsprechende Lösungen werden als Lade-IC's von zahlreichen Herstellern angeboten. Bei Bleibatterien ist sowohl das Überladen als auch das Mangelladen kritisch. In beiden Fällen kommt es zu einem frühzeitigen Ausfall. Bei den hier eingesetzten IU- Ladeverfahren ist daher die Ladespannung mit großer Sorgfalt zu wählen und gegebenenfalls der Temperatur anzupassen.

8. Literatur

[1] DIN 41 772: Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin

[2] Pannasonic: Technisches Handbuch für wartungsfreie Bleibatterien, 1994

[3] Gerber, T.: Dauerverhalten von stationären Bleiakumulatoren unter Konstantspannung, PTT Technische Mitteilungen 11-1994, herausgegeben von der Schweizerischen PTT.

[4] Groß, René et al.: Pulse Charging of Batteries- Controlled Deposition of Metal?, Zeitschrift für Physikalische Chemie, Bd., 208, S. 253-266 (1999)

[5] Ageing Measurement of Ni-Cd Batteries, Journal of Power Sources