

Akkus schnell und schonend laden

Ladeverfahren für Blei-Akkus in unterbrechungsfreien Stromversorgungen – Teil 1

Für ein Batteriemanagementsystem, das Blei-Akkumulatoren in USV-Anlagen laden, überwachen und diagnostizieren soll, entwickelte die Deutronic Elektronik GmbH ein Ladeverfahren, das einerseits für den Temperaturbereich von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ geeignet ist und andererseits alle gängigen Bauarten von Blei-Akkumulatoren optimal betreibt. Die entwickelten Methoden sind skalierbar (d.h. sowohl für kleine wie auch für große Akku-Sätze verwendbar), patentrechtlich geschützt und wurden im Sommer mit dem E.ON Bayern Umweltpreis 2009 ausgezeichnet. Teil 1 dieses Artikels befasst sich mit dem Status quo der Ladetechnik und dem neuen Ladealgorithmus. In Teil 2 folgt die genaue Analyse des neuen Ladeverfahrens.

Von Dr. Jonny Dambrowski



Für gewöhnlich werden in unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV) die Blei-Akkus mit so genannten IU-Kennlinien (Bild 1) geladen. Das bedeutet insbesondere, dass über die gesamte Lebensdauer des Akkus in der Applikation die so genannte Erhaltungsladespannung (EHL-Spannung) permanent am Akkumulator anliegt. Folglich wird auch permanent Energie für die Erhaltungsladung dem Versorgungsnetz entzogen. 80 % dieser Energie wird sinnlos in Überladung „vernichtet“.

Bei genauerer Betrachtung ergeben sich dadurch noch weitere Nachteile:

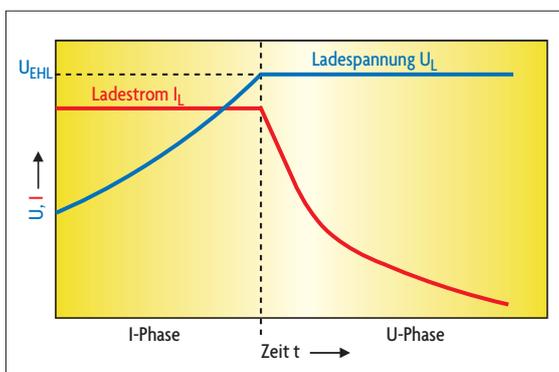
- ▶ Beschleunigte Alterung aufgrund von Wasserverlust und Korrosion der positiven Elektroden (Gitter). Dies ist besonders für verschlossene Blei-Akkus problematisch, da das Nachfüllen von Wasser nicht möglich ist.
- ▶ Beschleunigte Alterung, weil die Klemmenspannungen der einzelnen Zellen auseinanderlaufen. Im Folgenden wird dies „Serieneffekt“ genannt. Die Egalisierung der Einzelzellspannungen geht auf Kosten der Lebensdauer des gesamten Akku-Satzes, da die Alterung sich dann inhomogen über die Zellen verteilt. Besonders sind davon Blei-AGM- und Blei-Gel-Akkus betroffen.

Sättigungsgrades innerhalb eines Blockes bzw. Strangs bei der Herstellung, nicht gleichzeitig erfüllen. Dies erklärt auch den hohen Anteil von 80 % an Überladeverlusten, da die EHL-Spannung größer als die Zelle mit maximaler Säuredichte gewählt werden muss.

- ▶ Auch heute noch enthalten viele der im industriellen Sektor angebotenen USV-Anlagen kein thermisches Management für die Akkus – insbesondere keinen Schutz vor dem thermischen Durchgehen oder eine automatische Temperaturkompensation der Ladespannung. Besonders für den Einsatz im Photovoltaikbereich, in der Bahntechnik oder für Alarm- und Brandmeldeanlagen – bei denen USV-Anlagen außerhalb von klimatisierten Gebäuden betrieben werden – ist eine manuelle Einstellung der Ladespannung für Sommer-Winter-Betrieb, wie es einige Hersteller praktizieren, völlig absurd.

- ▶ Bei verschlossenen Blei-Akkus lassen sich die Forderungen, die Erhaltungsladespannung präzise zu wählen und gleichzeitig geringe Toleranzen des

- ▶ Aufgrund von ungenügender Ladung der Zellen (Mangelladung) kommt es zu einer beschleunigten Alterung und einem vorzeitigen Ausfall des Blei-Akkus durch Sulfatierung aufgrund einer:



! Bild 1. Das klassische Ladeverfahren (IU-Ladekennlinie): Einer Konstantstromphase (I-Phase) zur Schnellladung folgt eine Konstantspannungsphase (U-Phase), die den Akku auch nach Vollladung mit einer Erhaltungsladung versorgt.

1. nicht angepassten EHL-Spannung, z.B. bei hohen wie auch niedrigen Temperaturen oder gealterten verschlossenen Akkus,
2. schlechten Versorgungsqualität, d.h. häufigere Netzausfälle mit hoher Entladetiefe.

▣ Ladeverfahren sollten das Zellenalter berücksichtigen

Mit zunehmender Alterung steigt bei verschlossenen Blei-Akkus der für die Vollladung erforderliche Ladestrom exponentiell an. Entsprechend nimmt der permanente Energiebedarf unter dem IU-Laderegime exorbitant zu.

Die obigen Ausführungen verdeutlichen, dass es signifikante Unterschiede in der Ladecharakteristik zwischen geschlossenen und verschlossenen Blei-Akkus gibt. Während die Ladeparameter für geschlossene Zellen über die gesamte Lebensdauer nahezu konstant bleiben können, sollten sie sich für verschlossene Zellen mit fortschreitendem Alter der Zellen ändern. Gerade diese Dynamik und die deutlich höhere Temperaturempfindlichkeit der Ladecharakteristik von verschlossenen Blei-Akkus sind die Gründe, um selbstadaptierende Ladealgorithmen zu entwickeln.

Das neu entwickelte Ladeverfahren, das im Folgenden als adaptiver Strom-Stufen-Ladealgorithmus – kurz ACS-Verfahren von Adaptive Current Step (charging algorithm) – bezeichnet wird, bietet folgende Vorteile:

▶ Ein hoher Ladewirkungsgrad bis zu 98 % (Ladefaktor $LF = 1,02$) – Standard-Ladeverfahren für Blei-Akkus erreichen Wirkungsgrade zwischen 80 % und 90 % – konnte in Tests für verschiedene Akku-Fabrikate nachgewiesen werden. Die geringere Überladung führt zu einem geringeren Wasserverlust und erhält damit bei verschlossenen Blei-Akkus einen möglichst hohen Sättigungsgrad des Elektrolyten und sorgt letztendlich für eine signifikant höhere Lebensdauer. Besonders Blei-AGM-Akkus verfügen über eine deutlich niedrigere Überladefähigkeit im Vergleich zu Blei-Gel- oder Blei-Standard-Akkus. Aber gerade der AGM-Zellentyp ist kostengünstig und wird zunehmend in USV-Anlagen eingesetzt.

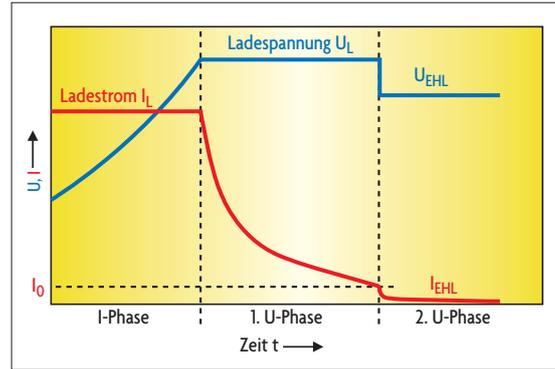
▶ Keine permanent anliegende Ladespannung. Die Akku-Zellen verbleiben größtenteils im Leerlauf – auch OCV-Zustand (open circuit voltage) genannt. Das Tastverhältnis der Nachladephasen liegt unter 0,1 %. Dadurch verlieren die Zellen weniger Wasser; die Elektroden korrodieren weniger. Diese geringere Alterung führt zu einer signifikant höheren Lebensdauer der Zellen. Innerhalb der Leerlaufphase sinkt der Ladezustand der Zellen lediglich um ca. 3 % bis 5 %, so dass auch im Leerlauf der Blei-Akku nahezu vollgeladen bleibt.

▶ Kein Serieneffekt, wie er unter Konstant-Spannungs-Ladung auftritt. Der komplette Akku-Satz altert homogen.

▶ Thermisches Management verhindert das thermische Durchgehen von Zellen. Es adaptiert die Ladeparameter selbsttätig und ermöglicht dadurch eine bessere Vollladung der Zellen sowohl bei hohen wie auch bei niedrigen Temperaturen.

▶ Die Ladekennlinie berücksichtigt Alterungseffekte – im Besonderen von verschlossenen Blei-Akkus –, die sich vor allem gegen Ladeende auswirken. Die dynamische Adaption der Ladeparameter ist daher zum Ausgleich der Alterungseffekte notwendig, dies gilt insbesondere für die Ladeerkennung. Gerade letzteres ist u.a. für den sehr hohen Ladewirkungsgrad bis zu 98 % verantwortlich.

▶ Regeneration moderat sulfatierter Blei-Akku-Zellen. Es konnte an einem konkreten Fall nachgewiesen werden, dass die aktuelle Kapazität nach nur fünf Tagen im



▮ Bild 2. Eine Weiterentwicklung des klassischen IU-Ladeverfahrens stellt die IUoU-Ladekennlinie dar. Hier wird eine zweite U-Phase mit reduzierter Spannung für die Erhaltungsladung genutzt.

EHL-Betrieb um ca. 12,5 % gestiegen ist.

Wie bereits beschrieben, steigt bei verschlossenen Blei-Akkus mit zunehmendem Alter der für die Vollladung notwendige Ladestrom. Die Ursache für dieses Phänomen ist der Sauerstoffkreislauf. Im Laufe des Lebens einer verschlossenen Blei-Akku-Zelle bilden sich immer mehr Luftkanäle zwischen den Elektroden, in denen der

an der positiven Elektrode gebildete Sauerstoff nahezu ungehindert zur negativen Elektrode diffundieren kann und dort mit H^+ -Ionen zu Wasser recombiniert. Da diese Reaktion exotherm ist, entsteht eine nicht unerheb-

liche Menge an Wärme, wodurch die Zelle zusätzlich aufgeheizt wird. Je älter ein Blei-Akku ist, desto früher setzt beim Aufladen verschlossener Blei-Akkus der Sauerstoffkreislauf ein und

desto größer ist gegen Ladeende derjenige Anteil des Ladestroms, der für den Sauerstoffkreislauf aufgewendet werden muss, um die Zelle tatsächlich noch vollständig aufladen zu können.

Grundlagen

Eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) ist eine Stromversorgung zusammen mit einem Energiespeicher, der eine gewisse Zeit bei Netzausfall die an der USV angeschlossenen Geräte mit elektrischer Energie versorgt. Wie lange ein Energieversorgungs-ausfall durch den Energiespeicher überbrückt werden kann, hängt von der für die Last benötigten Leistung bzw. von der Dimensionierung des Energiespeichers ab. In manchen Fällen lässt sich die Überbrückungszeit, die sich von einigen Sekunden bis zu Stunden erstrecken kann, zudem auch fest vom Hersteller bzw. Anlagenbetreiber einstellen. Die am häufigsten verwendeten Energiespeicher in USV-Anlagen sind Blei-Akkus verschiedener Ausführungen, wie z.B. Blei-AGM (Absorbent Glass Mat, **Bild A**), Blei-Gel (**Bild B**), Reinblei oder gewöhnliche Blei-Akkus mit flüssigem Elektrolyt. Die Hauptreaktionen für das Laden und Entladen von Blei-Akkus sind im weißen Kasten aufgeführt. Demnach wird beim Entladen an beiden Elektroden die geladene aktive Masse Blei Pb bzw. Bleidioxid PbO_2 in Bleisulfat $PbSO_4$ umgewandelt und dabei der Elektrolyt H_2SO_4 verbraucht, d.h., die Konzentration der Schwefelsäure sinkt. Beim Laden laufen die Reaktionen entsprechend umgekehrt ab. Die Beteiligung des Elektrolyten an den Elektrodenreaktionen ist eine Besonderheit von Blei-Akkus und hat wohlbekannte Konsequenzen, die insbesondere Grundlage verschiedener Alterungsmechanismen wie z.B. Säureschichtung, Sulfatierung oder Dendritenbildung sind. Da das Laden von Blei-Akkumulatoren stets mit einer gewissen Gasung – was Wasser-

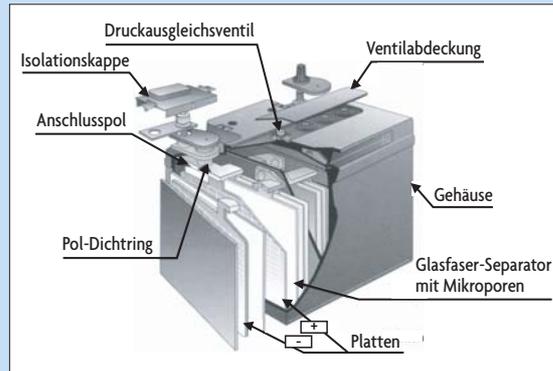


Bild A. Bei AGM-Blei-Akku wird die wässrige Schwefelsäure vom Separator (Glasvlies) zwischen den Platten aufgesaugt und so immobilisiert.

(Quelle: Exide)

lust bedeutet – verbunden ist, verfügen geschlossene Blei-Akkus über einen Verschlussstopfen zum Nachfüllen des Elektrolyten. Das bei der Ladung entstehende Gas kann also stets nach außen entweichen. Verschlussene Blei-Akkus hingegen haben statt der Verschlussstopfen Überdruckventile – daher die englische Bezeichnung „valve regulated lead acid“ battery, VRLA –, welche erst bei Überschreiten eines bestimmten Druckes das im Akku befindliche Gas entweichen lassen. Da bei diesen Akkus somit kein Wasser nachgefüllt werden muss, werden sie auch als wartungsfrei bezeichnet – auch geschlossene Blei-Akkus dürfen als wartungsfrei bezeichnet werden, wenn der Wasserverlust während der gesamten Betriebsdauer so gering ist, dass kein Nachfüllen notwendig ist. Der Elektrolyt ist wie bei geschlossenen Blei-Akku-Ty-

pen verdünnte Schwefelsäure, die jedoch zusätzlich immobilisiert, d.h. festgelegt ist. Die Art und Weise, wie die wässrige Säure festgelegt wurde, unterteilt dann den verschlossenen Blei-Akku einerseits in Gel-Typen, bei denen durch Zugabe von SiO_2 der Elektrolyt zähflüssig gemacht wird, und andererseits in AGM-Typen, bei denen durch ein hochporöses Vlies der Elektrolyt vollständig aufgesaugt wird. Ein Austreten des Elektrolyten ist damit nicht mehr möglich und der Akku kann in jeder Lage betrieben werden. Ein fundamentaler Unterschied des verschlossenen Blei-Akku gegenüber dem geschlossenen liegt in der Wasserstoff-Sauerstoff-Rekombination an der negativen Elektrode bei Überladung. Das bei der Überladung entstehende Sauerstoffgas an der positiven Elektrode kann durch die Mikroporen des Vlieses oder Risse im Gel zur negativen Elektrode sehr rasch – um den Faktor 10^6 schneller als in wässriger Säure – diffundieren und dort mit den Wasserstoffionen zu Wasser recombiniert. Die genauen Reaktionen, die auch als interner Sauerstoffkreislauf bezeichnet werden, sind ebenfalls im weißen Kasten aufgeführt.

Eine wesentliche Kenngröße von AGM- und Gel-Akku ist der Sättigungsgrad – das Verhältnis des Flüssigkeits-Volumens, also der verdünnten Schwefelsäure zwischen den Elektroden, zum Gesamt-Leervolumen einer ungefüllten Zelle, d.h. ohne Berücksichtigung des Materialvolumens. Der Sättigungsgrad wird erheblich von der Betriebsführung des Energiespeichers beeinflusst und stellt damit einen wichtigen Dreh- und Angelpunkt für die Ladetechnik und die Zustandsdiagnostik dar. Jede USV enthält ein mehr oder weniger komplexes Managementsystem (BMS, Battery Management System), welches die Ladung, die Überwachung und die Zustandsdiagnose des Akkus übernimmt.

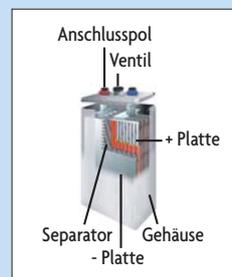
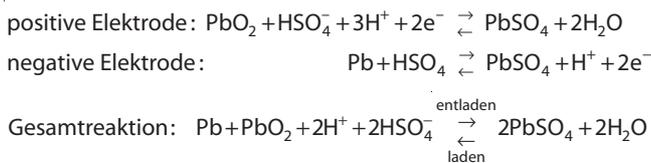


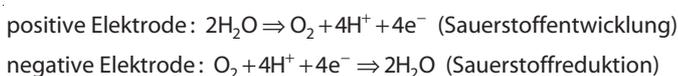
Bild B. SiO_2 immobilisiert in Blei-Gel-Akku die verdünnte Schwefelsäure, so dass die Zellen in beliebiger Lage betrieben werden können.

(Quelle: Sonnenschein)

Hauptreaktionen für das Laden und Entladen:



Interner Sauerstoffkreislauf:



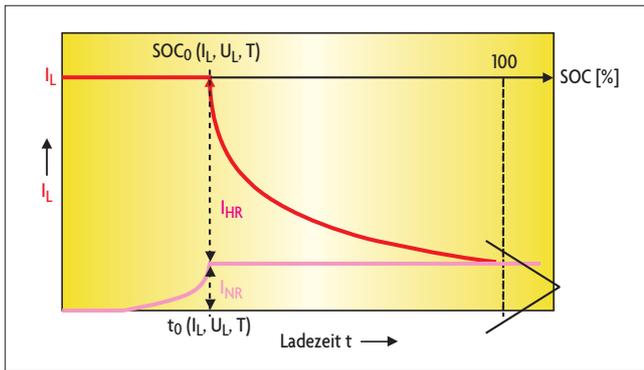


Bild 3. Die schematische Darstellung der Ladestromaufteilung unter IU-Ladung zeigt, dass bei fest gewählter Ladespannung U_L mit steigendem Ladezustand der eigentliche Ladestrom nahezu auf Null zurückgeht und der weiterhin in die Zelle fließende Strom die Nebenreaktionen antreibt.

Beim klassischen IU-Ladeverfahren steigt die EHL-Stromstärke mit zunehmenden Alter des Blei-Akkus an, bis er die Leistungsgrenze des Ladegerätes erreicht hat bzw. der Akku überhitzt und thermisch durchgeht. Bei der ebenfalls im USV-Bereich verwendeten IUoU-Ladekennlinie (**Bild 2**) kommt noch folgendes Problem hinzu:

Die Umschaltung von der Starkladephase (1. U-Phase) – bei der mit einer relativ hohen Ladespannung von ca. 2,4 bis 2,5 V/Zelle geladen wird – auf die kleinere EHL-Spannung (2. U-Phase) geschieht, wenn der Ladestrom I_L in der 1. U-Phase einen starren Grenzwert (I_0) von ca. 0,04 C unterschritten hat. Im Laufe der Betriebszeit verschlossener Blei-Akkus wird, aufgrund der Alterung, der Ladestrom I_L nicht mehr unter den Grenzwert I_0 sinken, so dass eine Umschaltung auf die kleinere EHL-Spannung auch nicht mehr erfolgt. Rudimentäre Schutzmechanismen, wie z.B. die Umschaltung via Ladefaktor (LF) oder einer Limitierung der maximalen Ladezeit, können die Auswirkungen etwas mindern. Jedoch sind diese Schutzmaßnahmen in der Praxis meist ebenso starr und noch dazu relativ großzügig ausgelegt, so dass sie eher zu einer beschleunigten Alterung der Blei-Akku-Zellen beitragen.

Jegliche Überladung trocknet das Vlies der AGM-Akkus durch den von der Überladung hervorgerufenen Wasserverlust mehr und mehr aus. Das wiederum kurbelt den Sauerstoffkreislauf an. Ist erst der kritische Sättigungsgrad von ca. 90 % unterschritten, nehmen die oben beschriebenen Prozesse drastisch zu, so dass das Ende der Lebensdauer solcher Blei-Akkus sehr schnell erreicht wird. Die Quintessenz hieraus ist, dass die Ladestrategie einen entscheidenden Einfluss auf die Gebrauchsdauer verschlossener Blei-Akkus hat.

■ Anpassungsfähiger Ladealgorithmus

Beim Aufladen eines leeren Akkumulators geht nahezu der gesamte Ladestrom I_L in die Hauptreaktion (siehe **Kasten** „Grundlagen“), d.h. $I_L \approx I_{HR}$ (**Bild 3**). Der Anteil der Ladeenergie, der in die Nebenreaktionen (I_{NR}) fließt – also bei Blei-Akkus in Verluste durch Gasung und den Sauerstoffkreislauf –, ist in dieser Situation noch vernachlässigbar. Mit zunehmendem Ladegrad jedoch wächst auch der Strom I_{NR} in die Nebenreaktionen, bis – wenn Vollladung erreicht ist – schließlich der gesamte Ladestrom in die Nebenreaktionen fließt – $I_L \approx I_{NR}$ (**Bild 4**).

Umweltpreis für Akku-Ladetechnik

Einen der sieben mit 20 000 Euro dotierten Umweltpreise, den E.ON Bayern in diesem Jahr unter der Schirmherrschaft des Bayerischen Staatsministers für Umwelt und Gesundheit, Dr. Markus Söder, verlieh, erhielt die Deutronic Elektronik GmbH aus Adlkofen für ein neues Akku-Lade- und Diagnoseverfahren. Mit insgesamt 240 000 Euro Preisgeld fördert E.ON Bayern 2009 neun „vorbildliche Projekte, die Energie sparen und die Umwelt schonen“ – der Hauptpreis und ein Sonderpreis wurden mit je 50 000 Euro prämiert. Über die Preisvergabe entscheidet



Dr. Jonny Dambrowski (rechts) hält am Abend der Preisverleihung voller Freude die Urkunde des E.ON-Bayern Umweltpreises, die er zusammen mit Eduard Wanzke, Geschäftsführer der Deutronic Elektronik GmbH, entgegennahm.

(Bild: E. Hopf)

eine fünfköpfige Jury aus Politik und Wissenschaft: Michael Ziegler, Ministerialdirigent Bayerisches Staatsministerium des Innern; Melanie Huml, Staatssekretärin Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit; Dipl.Ing. (FH) Henning Kaul, MdL a.D.; Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner, Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik; Prof. Dr. Konrad Weckerle, Professor für Europäisches Wirtschaftsrecht an der TU München. Das mit dem Umweltpreis ausgezeichnete Lade- und Diagnoseverfahren von Deutronic

kann als doppelt umweltfreundlich eingestuft werden: Es ist rohstoff- und energiesparend zugleich. Denn mit dem sich selbst an die Temperatur und an das Alter des Akkus anpassenden Ladealgorithmus werden zum einen die Akkus schonend geladen – die Zellen erreichen eine höhere Nutzungszeit und „leben“ länger; sie müssen in USV-Anlagen seltener ausgetauscht werden. Zum anderen erreicht das von Dr. Jonny Dambrowski entwickelte ACS-Ladeverfahren (Adaptive Current Step)

einen Ladefaktor von 1,02 – d.h., nur 2 % der für das Laden aufgewendeten Energie gehen in Nebenreaktionen und als Wärme verloren. Die bisher üblichen Ladeverfahren erreichen Ladefaktoren zwischen 1,1 und 1,2. Für die Erhaltungsladung des Akkus – zum Ausgleich der Selbstentladung – vergeuden normale Ladeverfahren sogar rund 80 % der permanent in den Akku fließenden Energie. Auch hier spart das ACS-Verfahren dank eines Pulsbetriebes: Die Akkus verweilen zu 99,9 % der Zeit im Leerlauf und werden in zwanzig Tagen nur für wenige Minuten nachgeladen.

Ziel eines guten Ladeverfahrens sollte es demnach sein, den Anteil des Ladestroms in die Nebenreaktionen zu minimieren, d.h. die Akku-Spannung während der gesamten Ladezeit so

niedrig wie möglich zu halten. Denn der Verluststrom I_V ist eine Funktion der Ladespannung U_L [V/Zelle] und der Temperatur T [K]; für ihn gilt näherungsweise:

$$I_V(U_L, T) = I_{0e}^{(U_L - U_0) + \beta \times \frac{T - T_0}{T \times T_0}} \quad (1)$$

mit $U_0 = 2$ V/Zelle und $T_0 = 298$ K.

In der graphischen Darstellung (Bild 4) müsste der Punkt SOC_0 folglich so weit wie möglich nach rechts, also gegen Ladeende, verschoben werden. Gängige IU-Ladeverfahren erreichen dies durch sehr kleine Ladeströme – im Bereich von 0,05 C –, die sich allerdings aufgrund des PCL-Effektes – vorzeitiger Kapazitätsverlust (PCL: premature capacity loss) – negativ auf die Lebensdauer des Blei-Akkus auswirken. Vom PCL-Effekt sind vornehmlich die heutzutage überwiegend in USV-Anlagen eingesetzten Blei-Akkus mit Blei-Kalzium-Gitterelektroden betroffen. Details darüber, zu Auswirkungen und Gegenmaßnahmen sind in [1] zu finden. Wird die Ladespannung im Bereich der EHL-Spannung gewählt, so wird der Absolutwert der Nebenreaktionen zwar gesenkt, jedoch liegt in diesem Falle die EHL-Spannung permanent am Energiespeicher an. Dies führt schließlich zu einer dauerhaften Überladung. Dennoch besteht auch hier die Gefahr der Mangelladung trotz der Überladung (siehe Abschnitt: „Reduktion der Erhaltungsenergie“ in Teil 2 des Artikels). Um insgesamt eine Vollladung mit einer IU-Kennlinie zu erreichen, ist eine Ladespannung $> 2,4$ V/Zelle notwendig, bei der allerdings bereits ein signifikanter Verluststrom vorliegt. Signifikant bedeutet hier, dass sich der Arbeitspunkt im „steilen“ Bereich der Exponentialfunktion befindet. Der un-

präzise Kompromiss, einen Ladeparameter zu definieren, der von vielen weiteren Parametern, wie beispielsweise den Gitterlegierungszusätzen, ab-

hängt, wird im Folgenden als „thermische Grenzspannung“ bezeichnet.

Soweit die Analyse der Standard-Ladekonzepte. Bei der Konzeption einer neuen Ladestrategie geht es nun darum, die Nachteile der Standard-Ladeverfahren möglichst zu beseitigen. Es ergeben sich also neue Anforderungen:

1. Reduziere die Ladezeit, in der U_{Bat} größer als die thermische Grenzspannung $U_{TG}(T)$ ist, die bei 20 °C 2,45 V beträgt.
2. Reduziere den Serieneffekt innerhalb eines Blocks oder Strangs.
3. Reduziere den Energiebedarf im Erhaltungsladebetrieb.
4. Erkenne den Vollladezustand, insbesondere bei neuen wie bei gealterten Zellen sowie im Temperaturbereich von -20 °C bis +50 °C.

nächsten Artikel-Teil Stück für Stück näher beleuchtet wird. hs

Literatur

[1] *Dambrowski, J.: Über die Anforderungen an die Ladetechnik für Bleibatterien im Automotive-Bereich. 2007, www.deutronic.com.*

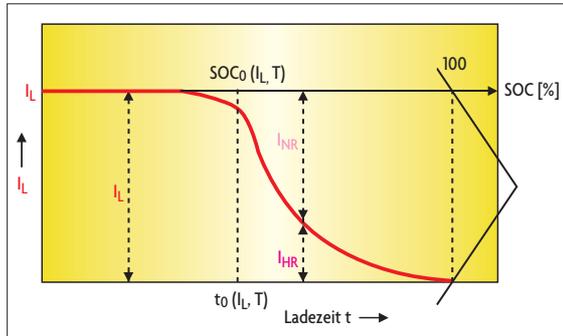


Bild 4. Auch bei Konstantstromladung wächst mit steigendem Ladezustand der Stromanteil, der die Nebenreaktionen in der Zelle antreibt – bis schließlich die gesamte Energie vom Ladegerät in den Nebenreaktionen landet.

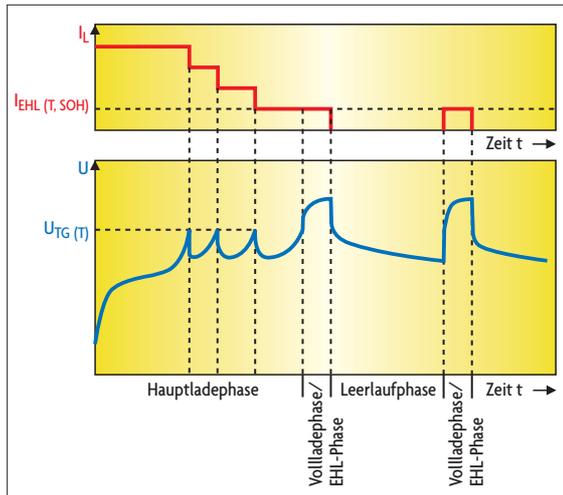


Bild 5. Der neue, mit dem Umweltpreis von E.ON Bayern ausgezeichnete adaptive Strom-Stufen-Ladealgorithmus arbeitet mit mehreren Konstantstrom-Ladephassen und kommt ohne Konstantspannungs-Ladephase aus.

Bild 5 zeigt schematisch den zeitlichen Strom- und Spannungsverlauf des neuen Ladealgorithmus, der im