

Akkus schnell und schonend laden

Ladeverfahren für Blei-Akkus in unterbrechungsfreien Stromversorgungen – Teil 2

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 °C bis $+50\text{ °C}$ geeignet ist und andererseits alle gängigen Bauarten von Blei-Akkumulatoren optimal betreibt. In Teil 1 dieses Artikels [2] wurden der Stand der Ladetechnik und die Anforderungen an einen neuen Ladealgorithmus dargestellt. Teil 2 hat nun die genaue Analyse des neuen Ladeverfahrens zum Thema.

Von Dr. Jonny Dambrowski



Die von den Nebenreaktionen hervorgerufenen Verluste werden durch das spannungsgesteuerte Strom-Stufen-Ladeverfahren (Bild 5) erheblich gesenkt. Beginnend mit dem Maximal-Ladestrom wird bei Erreichen der temperaturkompensierten Umschaltsschwelle U_{TG} der Ladestrom sukzessive verringert, bis wiederum eine von der Temperatur abhängige Stromschwelle unterschritten wird, welche dann die Hauptladephase beendet

und die Vollladephase – auch EHL-Phase genannt – einleitet. Die in Tabelle 1 zusammengefassten Messwerte zeigen, dass sich mit dem Strom-Stufen-Ladeverfahren die Ladezeit gravierend verringert, in der die Akkuspannung über der thermischen Grenzspannung liegt.

Die thermische Grenzspannung U_{TG} ist so dimensioniert, dass:

- ▶ ein thermisches Durchgehen ausgeschlossen ist,
- ▶ ein hoher Initiailladestrom verwendet werden kann,
- ▶ sie bei geschlossenen Blei-Akkus noch keine erhöhte Wasserstoffzeugung an der negativen Elektrode bewirkt.

In der Fachliteratur findet man immer wieder, dass es bei Konstantstrom-Ladungen keiner Temperaturkompensation bedarf. Dies ist aber falsch. Messungen an AGM-Akkus von Billig-anbietern haben eindeutig gezeigt, dass bei fest eingestelltem U_{TG} , einem Initiailladestrom von gerade mal $0,3\text{ C}$ für die 1. Stromstufe, die Umschaltsschwelle $U_{TG} \approx 2,4\text{ V/Zelle}$ bis $2,45\text{ V/Zelle}$ bei einem Ladestrom im Bereich von $0,07\text{ C}$ (ca. 3. Stromstufe) nicht immer erreicht wird. Deswegen ist die Variation von U_{TG} mit der Tem-

peratur fundamental, um auch solche Billig-Zellen sicher und ohne massive Vorschädigung laden zu können. Selbst bei Standard-IU-Ladeverfahren mit $U_L = 2,45\text{ V/Zelle}$, $I_L = 0,3\text{ C}$ bis $I_a = 0,04\text{ C}$ bei 25 °C – diese Werte sind deutlich unter den Maximalgrenzen des Herstellerdatenblattes – gehen diese AGM-Akkus thermisch durch. Da beim Betrieb einer USV-Anlage davon ausgegangen werden muss, dass der Temperatursensor nicht angeschlossen oder defekt sein kann, sind natürlich redundante Sicherheitsmechanismen, wie beispielsweise der Ladefaktor, zu integrieren, um damit die Stromumschaltung zu erzwingen. Besonders problematisch wird es allerdings, wenn Standard-IU-Ladeverfahren mit hohen Initiailladeströmen verwendet werden. Hier wird sehr früh die Konstant-Spannungs-Phase erreicht (Tabelle 1) und damit eine hohe Spannungslage sowie eine hohe Temperatur für den überwiegenden Teil der gesamten Akku-Ladezeit. Die Folgen sind: Ankurbelung des Sauerstoffkreislaufes, Wasserverlust, Korrosion und somit eine signifikante Vorschädigung besonders bei verschlossenen Blei-Akkus.

Beim Strom-Stufen-Verfahren wird das zuvor beschriebene Problem ver-

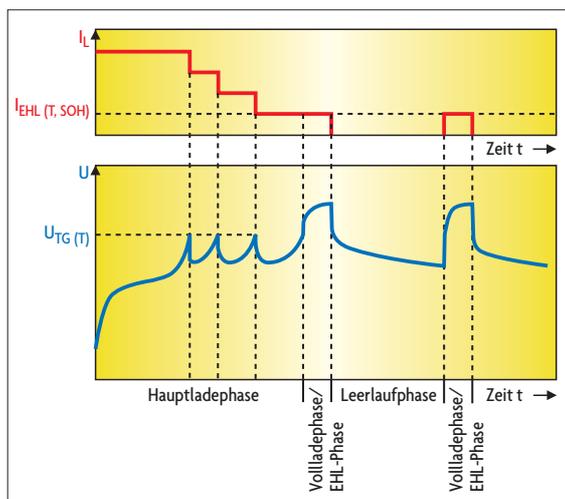


Bild 5. Der neue, mit dem Umweltpreis von E.ON Bayern ausgezeichnete adaptive Strom-Stufen-Ladetechnik arbeitet mit mehreren Konstantstrom-Ladephase und kommt ohne Konstantspannungs-Ladephase aus.

mieden, sofern eine geeignete Wahl für den Stufenabstand (Bild 5) getroffen wird. Die thermische Adaption der Grenzspannung U_{TG} sorgt gleichsam selbstregulierend für eine schonende Ladung der Zellen und also für einen guten Ladewirkungsgrad, trotz hoher Initilladeströme. Die etwas höhere Gesamtladezeit im Vergleich zum IU-Ladeverfahren ist allerdings der Preis, der für den Zugewinn an Lebensdauer des Akkus zu zahlen ist.

Allgemein lässt sich folgende Regel aufstellen: Je höher die Ladeleistung, desto komplexer werden Überwachungs- und Ladealgorithmik.

■ Reduktion des Serieneffektes

In USV-Anlagen werden häufig 24-V- und 48-V-Systeme eingesetzt, d.h. eine Serienschaltung aus 12 bzw. 24 Zellen. Nicht alle dieser Einzelzellen verhalten sich absolut identisch. Beim Laden zeigen sich demnach an den Einzelzellen unterschiedliche Klemmenspannungen. Diese Abweichungen verstärken sich sogar noch unter Konstant-Spannungs-Ladung, da – lax ausgedrückt – die Änderung eines inneren Parameters einer beliebigen Zelle aus dem Strang – wie z.B. der ohmsche Innenwiderstand oder SOC – sowohl die einzelnen Klemmenspannungen aller anderen Zellen als auch den Gesamtstrom durch alle Zellen beeinflusst. Das führt dazu, dass die Klemmenspannung der Zelle mit wachsender Ladung (SOC) steigt, während die anderen Zellen, deren Ladezustand (SOC) niedriger war, jetzt

Akku	NP7-12(AGM)				A512-6,5(Gel)		AST60S(Gel)	
	ACS		Std		ACS	Std	ACS	Std
Ladestrom I_L	1,5 C	2 A	1,5 C	2 A	2 A	2 A	1,5 C	1,5 C
Ladezeit t_{lad}	1,5 h	3,5 h	1,75 h	3,5 h	3 h	2,75 h	1,5 h	1 h
$t(U_{Akku} \geq U_{TG})$	33 %	<12 %	85 %	33 %	<10 %	36 %	28 %	63 %
T_{Akku}	30 °C	22 °C	30 °C	30 °C	40 °C	40 °C	30 °C	30 °C

Table 1. Vergleich der Ladezeiten mit $U_{Akku} \geq U_{TG}$. Für die Ladung wurden die Akkus vorher mit konstanter Leistung von 50 W (bzw. 400 W bei AST60S) bis zur Entladeschlussspannung von 1,6 V/Zelle entladen. Als Standard-Ladeverfahren wurde das temperaturkompensierte Standard-IU-Verfahren mit 2,45 V/Zelle bei 20 °C und einem Abschaltladestrom von $I_a = 0,04 C$ verwendet.

noch weniger geladen werden, da deren Klemmenspannungen gesunken sind (Bild 6).

Besonders bei verschlossenen Blei-Akkus entstehen herstellungsbedingt nicht zu vernachlässigende Toleranzen in den Elektrolytsättigungsgraden der Einzelzellen, die sich in einer Variation der Einzelinnenwiderstände und Einzelsäuredichten und damit der Einzelruhespannungen niederschlagen. Hinzu kommt, dass beim Laden einer AGM-Zelle auch Luftkanäle im Vlies entstehen, die in der Ruhephase wieder verschwinden. Auch dieser Prozess ist inhomogen über den Strang verteilt. Insgesamt sind dies alles Erklärungen für die experimentell ermittelbare Tatsache, dass die Einzelzellen verschlossener Blei-Akkus in der U-Ladephase erheblich weiter auseinanderlaufen – ca. 300 mV / 12-V-Block – als das bei geschlossenen Blei-Akkus mit ca. 5 mV / 12-V-Block der Fall ist. Eine Egalisierung der einzelnen Zellen geht immer zu Lasten der Lebensdauer der stärksten Zelle, was schließlich zu einer inhomogenen Al-

terung des Zellenverbundes führt. Bei einer Konstantstrom-Ladung fließt durch alle Zellen stets der gleiche konstante Strom. Innere Parameteränderungen einer beliebigen Zelle haben keinen Einfluss auf die Klemmenspannung aller anderen Zellen. Dadurch ist dieser Ladevorgang relativ homogen. Bild 6 stellt den zeitlichen Verlauf der Einzelklemmspannungen bei einer Konstantstromentladung mit anschließender Standard-IU-Ladung dar.

■ Reduktion der Erhaltungsladeenergie

Eine wesentliche Aufgabe des Akku-Managementsystems einer USV ist es, den Energiespeicher stets im vollgeladenen Zustand zu halten, damit bei einem Netzausfall die maximale Energie zur Notstromversorgung zur Verfügung steht. Dazu wird üblicherweise der Akkumulator einer permanenten Ladespannung, der so genannten Erhaltungsladespannung (kurz EHL-Spannung) ausgesetzt. Aufgrund der höheren Säuredichte von ca. $1,32 \text{ gcm}^{-3}$

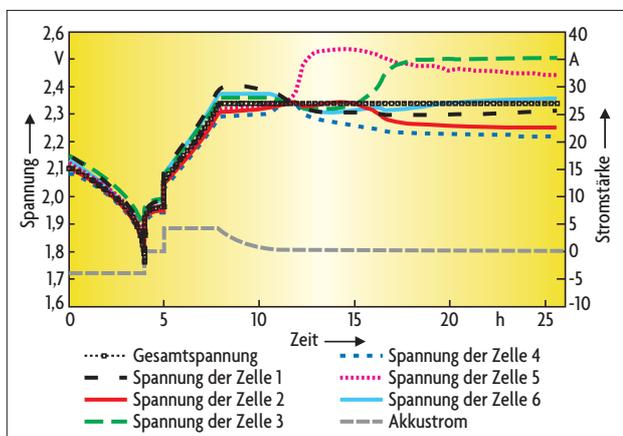


Bild 6. Während des Ladevorganges (IU-Ladeverfahren) entwickeln sich an den einzelnen Zellen eines 12-V-AGM-Blei-Akkus unterschiedliche Zellspannungen [3].

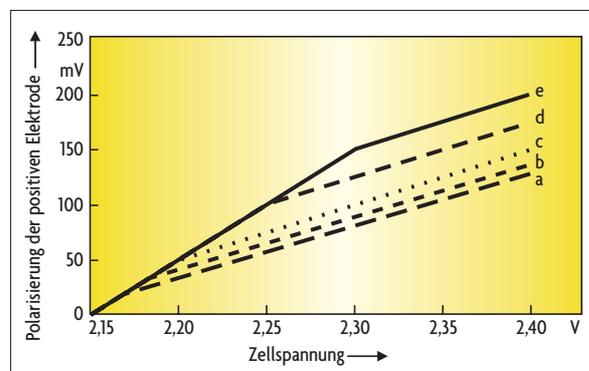


Bild 7. Die einzelnen Blei-Akku-Typen weisen eine unterschiedliche Polarisation der positiven Elektrode im EHL-Betrieb auf (bei einer Säuredichte von $1,30 \text{ gcm}^{-3}$): a) geschlossene Zelle; b) Gel, neu; c) AGM, niedriger O_2 -Wirkungsgrad; d) Gel, gealtert; e) AGM, hoher O_2 -Wirkungsgrad [4].

$t_{\text{leerlauf}} [d]$	$t_{\text{EHL}} [\text{min}]$	$q_{\text{EHL}} [\text{mAh}]$	TV [%]	$u_{\text{MW EHL}} [V]$	$Q_{\text{EHL}} [\text{Ah/a}]$	$W_{\text{EHL}} [\text{Wh/a}]$
7 – 10	10 – 20	100 – 120	≈ 0,1	≈ 15,71	5 – 6	66 – 100

I Tabelle 2. Die Energieaufnahme pro Jahr im EHL-Betrieb bei einem AGM-Akku (12 V / 7 Ah) von Yuasa mit dem ACS-Ladealgorithmus.

verschlossener Blei-Akkus gegenüber geschlossenen Blei-Akku-Zellen mit ca. $1,24 \text{ gcm}^{-3}$ bis $1,26 \text{ gcm}^{-3}$ und der sich bei Serienschaltung einstellenden Inhomogenitäten ist die EHL-Spannung im Bereich zwischen 2,25 und 2,38 V/Zelle verhältnismäßig hoch zu wählen, um auch der schwächsten Zelle eine adäquate Vollladung zu ermöglichen. Der überwiegende Anteil des EHL-Stroms geht bei verschlossenen Blei-Akkus in den Sauerstoffkreislauf mit der Folge, dass

- ▶ die positive Elektrode stärker polarisiert wird (siehe Bild 7) – über das Korrosionsminimum von ca. 40 mV bis 80 mV über dem Gleichgewichtspotential der Zelle hinaus – und damit die Korrosion zunimmt.
- ▶ die negative Elektrode depolarisiert und damit die Wasserstoffgasung reduziert wird. Bei fehlangepasster EHL-Spannung besteht die Gefahr der Mangelladung.
- ▶ die thermische Belastung des Blei-Akkus zunimmt.

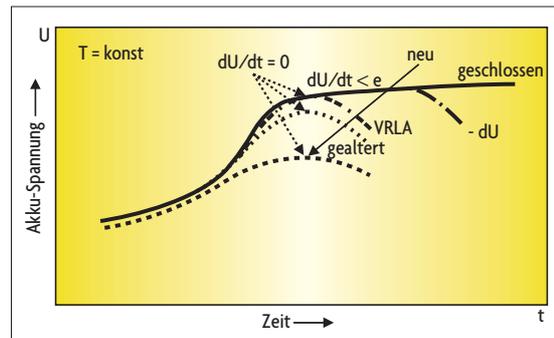
Das erklärt, warum der EHL-Strom in Blei-AGM- bzw. Blei-Gel-Akkus gut vierfach größer ist als bei vergleichbaren geschlossenen Akkus. Zusammen mit der höheren EHL-Spannung ergibt sich dadurch ein erheblicher Anstieg der EHL-Energie. Diese Energie reduziert zusätzlich die Lebensdauer des Blei-Akkus und muss zudem vom Anlagenbetreiber auch noch bezahlt werden. Bild 7 zeigt schematisch die Polarisierung der positiven Elektrode verschiedener Blei-Akkus. Für geschlossene Zellen ist die Polarisierung von negativer und positiver Elektrode in den meisten Fällen symmetrisch. Da die EHL-Spannung im

$U_{\text{EHL}} [V]$	$I_{\text{EHL}} [\text{mA}]$	$Q_{\text{EHL}} [\text{Ah/a}]$	$W_{\text{EHL}} [\text{Wh/a}]$
13,68	6,4	56	766

I Tabelle 3. Um denselben AGM-Akku (12 V / 7 Ah von Yuasa), der die Daten für Tabelle 2 lieferte, im EHL-Betrieb unter Standard-IU-Regime zu betreiben, wird pro Jahr etwa die zehnfache Energie eingesetzt.

Falle der Standard-IU-Ladung fest eingestellt ist, wird die positive Elektrode bei verschlossenen Zellen stärker polarisiert, und in Konsequenz sinkt die Spannung an der negativen Elektrode. Ist also die EHL-Spannung zu niedrig gewählt, so kann demnach die negative Elektrode nicht mehr vollgeladen werden, gleichwohl sich die positive Elektrode in der Überladung befindet.

Ein Blei-Akku altert am wenigsten, wenn er vollgeladen im Leerlauf betrieben wird. Daraus resultiert auch die Idee, wie sie bereits in Bild 5 darge-



I Bild 8. Erst gegen Ende des Ladevorganges zeigen verschlossene Blei-Akkus ein vom Alter abhängiges Verhalten.

stellt ist. Statt den Blei-Akku permanent in der Überladung zu halten, wird nach der Vollladung die Ladeelektronik abgeschaltet. Sodann befindet sich der Energiespeicher im Leerlauf-Zustand (OCV), in dem nur über eine hochohmige Messleitung der Akku-Zustand überwacht und verfolgt wird. Sinkt der Ladezustand (SOC) nach Vollladung um ca. 3 % bis 5 % oder wurden bereits 23 Tage im Leerlaufbetrieb verbracht, setzt die EHL-Phase zur Nachladung erneut ein. Dadurch wird jedenfalls mindestens einmal im Monat nachgeladen. Tabelle 2 zeigt, dass zwischen zwei Nachladungen im Durchschnitt sieben bis zehn Tage vergehen und die Nachladezeit mit 10 bis 20 min sehr kurz ist. Dadurch ergibt sich das extrem niedrige Tastverhältnis (TV) von knapp 0,1 %. Tabelle 3 enthält, zum Vergleich mit den in Tabelle 2 angegebenen Werten des ACS-Ladeverfahrens, die jährliche Energie-

aufnahme bei Standard-IU-Ladung. Mit dem adaptiven Strom-Stufen-Ladealgorithmus lässt sich die Jahresenergieaufnahme durchschnittlich um den Faktor 10 reduzieren.

Die Ladecharakteristik hängt von Alter und Temperatur der Zellen ab

Die Alterung verschlossener Blei-Akkus hat erheblichen Einfluss auf die Ladecharakteristik – besonders in der Nähe des Vollladeendpunktes. Mit zunehmendem Alter der Zelle

- ▶ steigt der zur Vollladung erforderliche EHL-Strom, aufgrund des zunehmenden, vom Sauerstoffkreislauf hervorgerufenen Anteils am Ladestrom,

- ▶ ändert sich die Form der Akku-Spannung als Spannungsantwort auf einen festen Konstantstrom.

Bild 8 zeigt schematisch das Alterungsverhalten verschlossener Blei-Akkus unter Konstantstrom-Laderegime gegen Ende des Ladevorganges. Zu Beginn der Betriebszeit

verhalten sich AGM- oder Gel-Akkus aufgrund des hohen Sättigungsgrades ähnlich wie geschlossene Blei-Akkus. Im Bild 8 ist dies durch das Plateau (durchgezogene Kurve) dargestellt.

- Mit fortschreitender Alterung
- ▶ sinkt die Polarisierbarkeit der Elektroden, d.h., die maximal erreichbare Akku-Spannung unter dem Laderegime mit konstantem Strom sinkt,
- ▶ wird aus dem Plateau mit der Steigung $dU/dt < \epsilon$ mit $\epsilon > 0$ ein immer schmäler werdendes isoliertes Maximum.

Gemäß Gleichung (1) in Teil 1 dieses Artikels [2] hängt der Verluststrom I_V auch von der Temperatur ab, also ist die Ladecharakteristik ebenso eine Funktion der Temperatur. Mit steigender Temperatur

- ▶ steigt der am Ladeende erforderliche Vollladestrom, da der Ladestrom in

dieser Phase einen größeren Anteil an Verluststrom trägt,

- ▶ sinkt bei fest gewähltem Konstantstrom die Polarisierung der Elektroden, d.h., die Spannungsantwort auf einen bestimmten eingepprägten Akku-Strom wird kleiner.

Folglich sind starre Volllade-Erkennungsmechanismen, wie sie bei Standard-Blei-Akkus eingesetzt werden, für verschlossene Blei-Akku-Zellen nicht sinnvoll. Ebenso ungeeignet sind die von der NiCd- bzw. NiMH-Ladetechnik wohlbekannten fest eingestellten Abschaltmechanismen – ΔU oder dU/dt . Des Rätsels Lösung liegt in einer geeigneten Kombination aus verschiedenen, zum Teil redundanten Volllade-Erkennungsmechanismen und in einer Wahl geeigneter Metaregeln über diese Mechanismen, welche der Dynamik der Alterung bzw. der Temperatur Rechnung tragen. Dazu wurde die Volllade- oder EHL-Stufe (Bild 5) in zwei Phasen unterteilt: Die erste Phase ist durch das Erreichen des ersten von der Temperatur abhängigen positiven Steigungskriteriums beendet. Die zweite Phase arbeitet mit

- ▶ einem zweiten temperaturabhängigen Steigungskriterium $dU/dt(T)$,
- ▶ einem $-\Delta U$ -Abschaltkriterium mit einer relativ kurzen Reaktionszeit,
- ▶ einem von der Temperatur und der Elektrodenpolarisierung abhängigen Vollladestrom I_{EHL} , der sich damit insbesondere dem Alter des Akkus anpasst,
- ▶ einer von der Temperatur abhängigen EHL-Zeit, $t_{EHL}(T)$.

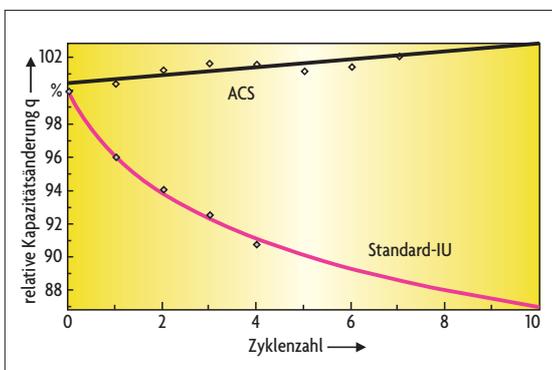


Bild 9. Der relative Kapazitätsverlauf an einem Blei-Gel-Akku (AST60S, 12 V / 60 Ah) verdeutlicht, wie schonend das ACS-Ladeverfahren im Vergleich zum Standard-IU-Ladeverfahren die Zellen behandelt: Die Kapazität bleibt konstant.

Hersteller	Produkt	Bauart	Gitter	Typ
Yuasa	NP7-12	AGM	Pb-Ca	12 V / 7 Ah
SSB	SB7.5-12L	AGM	Pb-Ca	12 V / 7,5 Ah
SSB	SBL7.2-12L	AGM	Pb-Ca	12 V / 7,2 Ah
Vision	CP12-7	AGM	Pb-Ca	12 V / 7 Ah
Sunlight	SP12-7	AGM	Pb-Ca	12 V / 7 Ah
Sunlight	SP12-7.2	AGM	Pb-Ca	12 V / 7,2 Ah
Sonnenschein	A512-6.5 S	Gel	Pb-Ca	12 V / 6,5 Ah
AST	AST60S	Gel	Pb-Ca	12 V / 60 Ah
GS	CB4L-B	Std	?	12 V / 4 Ah

Tabelle 4. Die genannten USV-Akkus wurden zur Optimierung und Validierung des adaptiven Strom-Stufen-Ladeverfahrens verwendet.

Natürlich werden Sicherheitsmechanismen wie Ladefaktor, maximale Akku-Spannung oder minimale bzw. maximale Temperatur ebenfalls berücksichtigt. Ein mit der Temperatur variierender Erhaltungsladestrom hat Einfluss auf die Anzahl der Stromstufen in der Hauptladephase. Hohe Temperaturen führen zu hohen EHL-Strömen und verringern die Anzahl der Stromstufen – bei tiefen Temperaturen entsprechend umgekehrt. Die Folge ist eine Reduktion der Ladezeit bei hohen Temperaturen (siehe Tabelle 1). Das ist insofern wichtig, da sich nur auf diese Weise ein guter Ladewirkungsgrad ergibt, was letztendlich zu einer Verlängerung der Lebensdauer des Akkus führt. Vollladung ist nämlich stets mit einem gewissen Anteil an Überladung verbunden – allein schon aufgrund der Tatsache dass die positive Elektrode bei einem Ladezustand von ca. 70 % bis 80 % und die negative Elektrode bei ca. 90 % in die Überladung gehen. Die Werte sind nicht fest,

sondern hängen von vielen Faktoren ab, auf die hier aus Platzgründen nicht näher eingegangen wird.

Experimentelle Resultate

Für die Entwicklung des neuen Ladeverfahrens wurden verschiedene USV-Akkus unterschiedlichen Alters bei verschiedenen Temperaturen untersucht und das Ver-

fahren dadurch optimiert und validiert (Tabelle 4). Der beeindruckendste Fall ist in Bild 9 dargestellt. Während die Entladekapazität mit dem Standard-IU-Verfahren – $U_{L(20^\circ C)} = 2,45 \text{ V/Zelle}$, $I_L = 1,5 \text{ C}$ bis zum Abschaltstrom $I_a = 0,04 \text{ C}$ – trotz Temperaturkompensation innerhalb der ersten fünf Zyklen um 10 %

sinkt, bleibt sie beim adaptiven Strom-Stufen-Ladealgorithmus stabil. Auch der Ladewirkungsgrad kann sich sehen lassen: Trotz des hohen Ladestroms von $1,5 \text{ C} = 90 \text{ A}$ wurden 97 % erreicht. Dies zeigt, dass Schnellladung und hoher Ladewirkungsgrad kein Widerspruch sein müssen. In Tabelle 5 sind die relative Kapazitätsänderung nach zehn Zyklen, der maximale La-

Verfahren	ACS	Std	ACS	Std
T	25 °C	30 °C	23 °C	23 °C
I_L	2 C	1,5 C	2 A	2 A
q	1,2 %	-2,9 %	0 %	-2,4 %
LF_{max}	1,05	1,12	1,05	1,05
LF_{MW}	1,03	1,06	1,04	1,04

Tabelle 5. An einem moderat gealtertem AGM-Akku zeigt sich – nach zehn Zyklen mit Standard-Ladeverfahren – eine negative relative Kapazitätsänderung q. Bei der Ladung mit dem ACS-Verfahren tritt dagegen keine oder eine positive Kapazitätsänderung q auf.

defaktor LF_{max} und der durchschnittliche Ladefaktor LF_{MW} bei verschiedenen Ladeströmen an einem moderat gealterten AGM-Blei-Akku zusammengefasst. Es ist deutlich zu erkennen, dass beim adaptiven Strom-Stufen-Ladealgorithmus die Kapazität stabil bleibt, während sie beim temperaturkompensierten Standard-IU-Ladeverfahren sinkt. Aus den Tabellenwerten lässt sich ferner erkennen, dass hohe Ladeströme den Akku beim Standard-IU-Ladeverfahren – trotz Temperaturkompensation – thermisch stärker belasten als beim neu entwickelten ACS-Ladeverfahren. Dies macht sich letztendlich auch am Ladefaktor von

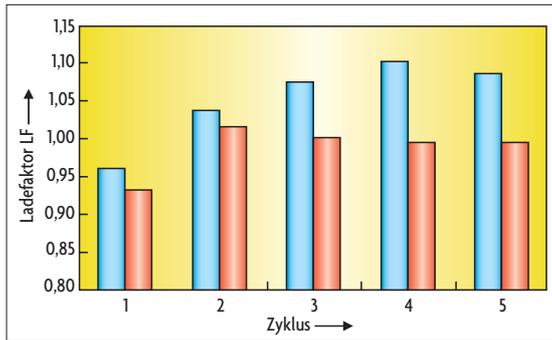


Bild 10. Der Vergleich der Ladefaktoren (LF) an einem AGM-Blei-Akku von Yuasa (12 V / 7 Ah) über fünf Lade/Entlade-Zyklen bei $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ zeigt, wie wichtig eine Temperaturkompensation ist: Das Standard-IU-Ladeverfahren (rot) kann die Zellen nicht mehr vollladen – $\text{LF} < 1$. Mit dem ACS-Ladeverfahren (blau) dagegen ist selbst bei Minusgraden ein Vollladen möglich – $\text{LF} > 1$.

durchschnittlich 1,03 beim ACS-Ladeverfahren bemerkbar. Innerhalb der zehn getesteten Zyklen wurde der minimale Ladefaktor von 1,02 dreimal erreicht.

In **Bild 10** sind die Testergebnisse beider Ladeverfahren bei $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingetragen. Im Unterschied zu den obigen Entladeprofilen dient hier eine definierte Ladungsmenge von 0,35 C – also bei einem 7-Ah-Akku sind das 2,45 Ah – als Kriterium für den Abbruch des Entladevorganges. Gemessen wurde, welche Ladung durch das jeweils verwendete Ladeverfahren – Std: mit $U_{L(-10\text{ }^{\circ}\text{C})} = 15,4\text{ V}$, $I_L = 2\text{ A}$ bis $I_a = 0,04\text{ C}$, ACS: mit Initialladestrom von 2 A – wieder eingelagert werden konnte und mit welchem Ladefaktor dies erfolgte. Ein interessantes Resultat bei diesen Tests ist, dass das Standard-IU-Ladeverfahren trotz der durch die Temperaturkompensation bedingten hohen Ladespannung eine wesentlich schlechtere Vollladeeigenschaft hat als der adaptive Strom-Stufen-Ladealgorithmus. Bereits nach zwei Zyklen ist der Ladefaktor beim Standard-IU-Ladeverfahren kleiner 1, d.h., die Entladetiefe des Akkumulators nimmt im weiteren Verlauf von Zyklus zu Zyklus zu, da die entladene Ladungsmenge gleich bleibt.

Nun wird der kritische Leser bemerken, dass durch den Ladefaktor von 1,08 bzw. 1,10 beim ACS-Ladeverfahren der Akku stark überladen wird. Dies relativiert sich aber, denn mit jedem Zyklus erhöhte sich auch die im darauffolgenden Zyklus entladene Energie – und damit die Puffer-

zeit. Folglich wurde der Vollladezustand zwar nicht sofort erreicht, aber mit jedem Zyklus der Abstand zum Vollladezustand geringer.

Das ACS-Ladeverfahren birgt noch Verbesserungspotential, das durch weitere Forschung erschlossen wird. Der größte Aufwand lag in der Parametrierung des Ladealgorithmus und im Aufstellen der Metaregeln. Auch hier

besteht noch Optimierungsspielraum. Der adaptive Strom-Stufen-Ladealgorithmus ist ein erster Schritt in die richtige Richtung. hs

Literatur

- [1] *Dambrowski, J.*: Über die Anforderungen an die Ladetechnik für Bleibatterien im Automotive-Bereich. 2007, www.deutronic.com.
- [2] *Dambrowski, J.*: Akkus schnell und schonend laden – Ladeverfahren für Blei-Akkus in unterbrechungsfreien Stromversorgungen, Teil 1. *Elektronik* 2009, H. 21, S. 20ff.
- [3] *Fricke, B.; et. al.*: Bleiakumulatoren für stationäre Stromversorgungen. *Belecker Fachtage*, 2004.
- [4] *Wagner, R.*: Failure modes of valve-regulated lead-acid batteries in different application. *Journal of Power Sources*, 1995, H. 53, S. 153ff.

Dr. Jonny Dambrowski

wurde bereits in Teil 1 des Artikels [2] vorgestellt.

jonny.dambrowski@mathematik.uni-regensburg.de