

Richtig mit Akkus umgehen

Für den Betreiber einer USV-Anlage ist es von zentraler Bedeutung, dass vom Akku-Managementsystem graduelle Qualitätsminderungen des Energiespeichers möglichst frühzeitig erkannt und angezeigt werden. Nur so erhält er eine Aussage zur Zuverlässigkeit der Stromversorgung der über die USV angeschlossenen Systeme. Die in [4] genannten Überbrückungszeiten von einigen Sekunden bis hin zu einigen Stunden machen deutlich, dass im USV-Bereich Entladvorgänge einerseits mit hoher Leistung bzw. hohem Entladestrom für kurze Zeit (Sekunden bis Minuten) und andererseits mit hoher Energie bzw. niedrigem Entladestrom für lange Zeit (einige Minuten bis Stunden) vorkommen können. Entsprechend diesen konträren Anforderungen ist das Verfahren für die Alterungsbestimmung des Akkus zu wählen.

Für die erste Betriebsart wurde bei der Deutronic Elektronik GmbH ein Verfahren, basierend auf Innenwiderstandsmessungen, entwickelt. Der ohmsche Innenwiderstand eines Akkumulators gibt Auskunft über die Hochstrom-Entladefähigkeit. Eine für diese Belange adäquate Zustandsdiagnostik muss folgende Fragen beantworten können:

- ▶ Wie setzt sich der ohmsche Widerstand eines Blei-Akkus zusammen?
- ▶ Welche Größen beeinflussen den Innenwiderstand?
- ▶ Wie lässt sich der Widerstand messen?

■ Ohmsche Komponenten des Akku-Innenwiderstandes

Der ohmsche Innenwiderstand R_i eines Blei-Akkus setzt sich im Wesentlichen

Zustandsdiagnoseverfahren für Blei-Akkus in unterbrechungsfreien Stromversorgungen

Das adaptive Strom-Stufen-Ladeverfahren der Deutronic Elektronik GmbH [4] ist einerseits für den Temperaturbereich von -20 °C bis $+50\text{ °C}$ geeignet und kann andererseits alle gängigen Bauarten von Blei-Akkumulatoren optimal betreiben. Eine korrekte Diagnose des Akku-Zustandes ist u.a. für die Apaption der Ladeparameter wichtig.

Von Dr. Jonny Dambrowski

zusammen aus dem Widerstand der Pole und Zellverbinder R_P , der Gitter R_G , der aktiven Massen R_M und des Elektrolyten R_E :

$$R_i \approx \underbrace{R_P + R_G + R_M}_{\alpha > 0} + \underbrace{R_E}_{\alpha < 0} \quad (1)$$

Da in USV-Anlagen Akkumulator und Akku-Managementsystem von der Inbetriebnahme an fest miteinander verbunden sind – d.h., dem Akku-Managementsystem ist die Widerstandshistorie bekannt –, spielen letztendlich nicht der absolute Widerstandswert des Akkus, sondern lediglich relative Widerstandsänderungen für die Diagnose eine Rolle.

Die Werte in der Tabelle verdeutlichen, dass der Löwenanteil des Innenwiderstandes vom Elektrolyten herrührt. Es wird sich aber noch zeigen, dass die anderen Widerstandsanteile nicht vernachlässigbar sind. Wie sich die Widerstandsbeiträge an einem realen Akkumulator verteilen, hängt beispielsweise von der Geometrie und der Menge der verwendeten Materialien ab. Dies variiert u.a. je nach Technik

Material	T [°C]	ρ [Ωcm]	α [$\%K^{-1}$]
H_2SO_4 ($1,3\text{ gcm}^{-3}$)	25	1,28	s. Bild 1
PbO_2	25	2×10^{-4}	+0,1
Pb	20	$2,2 \times 10^{-5}$	+0,4

▶ Zur Ermittlung des Innenwiderstandes eines Blei-Akkus müssen die spezifischen Widerstände ρ von verdünnter Schwefelsäure und den Elektrodenmaterialien bei Blei-Akkus sowie der jeweilige Temperaturkoeffizient α berücksichtigt werden.

des Akkus – Standard, AGM (Absorbent Glass Mat), Gel, PLT (Pure Lead Tin) – oder vorgesehenem Anwendungsbereich – Automotive, Elektrotaktion, USV-Anlagen.

■ Einflussgrößen auf den ohmschen Innenwiderstand

Der ohmsche Innenwiderstand eines Akkus hängt vom Alterungszustand (State of Health, SOH), aber auch vom Ladezustand (State of Charge, SOC) und der Temperatur ab. Sinn und Zweck der Zustandsdiagnose ist es gerade, die Alterung der ohmschen Komponenten eines Blei-Akkus zu erfassen

sen. Die dominanten Alterungsmechanismen von Blei-Akkus in USV-Anlagen sind Korrosion und Wasserverlust [1]. Von Korrosion sind beispielsweise die Gitter – sie tragen die aktiven Massen und dienen gleichzeitig als Stromableiter –, die Zellverbinder und die Pole betroffen. Der wichtigste Korrosionsmechanismus ist die anodische Korrosion der positiven Gitter, bei der sich im Laufe der Betriebszeit durch Bildung passivierender Schichten nicht nur der Gitterquerschnitt verringert,

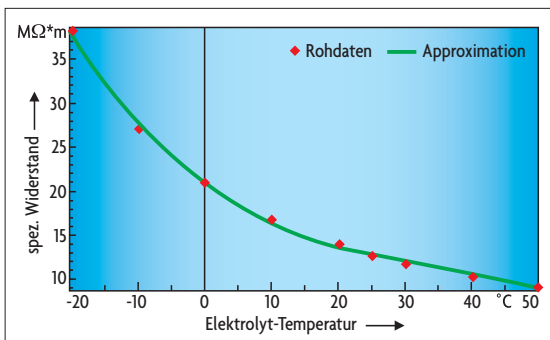


Bild 1. Der spezifische Widerstand ρ_E von verdünnter Schwefelsäure ist nichtlinear temperaturabhängig. Die Werte wurden bei einer Säuredichte von $1,30 \text{ gcm}^{-3}$ gemessen.

sondern auch der elektrische Kontakt zwischen Gitter und positiver, aktiver Masse. Das führt wiederum einerseits zu einem Anstieg des ohmschen Innenwiderstandes und andererseits zu einer Verringerung der Kapazität. Bei verschlossenen Blei-Akkus findet auch eine Korrosion der negativen Zellverbinder und Pole statt, da – im Gegensatz zu geschlossenen Blei-Akkus, die beim Laden über einen intrinsischen katodischen Korrosionsschutz verfügen – der Elektrolyt immobilisiert ist und also kein schützender Elektrolytfilm gebildet werden kann. Der sich während des Erhaltungsladungsbetriebs einstellende Wasserverlust kann bei geschlossenen Blei-Akkus nachgefüllt werden, nicht jedoch bei verschlossenen Typen. Beispielsweise liegt der Sättigungsgrad eines fabrikneuen AGM-Blei-Akkus bei ca. 95 %. Eine Reduktion des Sättigungsgrades um gerade mal 10 % – was im realen Betrieb das Ende der Lebensdauer des Energiespeichers bedeutet – würde eine Zunahme des Innenwiderstands um ca. 70 % bedeuten. In der Praxis wäre die Widerstandszunahme sogar noch deutlich größer, da der Wasserverlust nicht homogen in der Zelle verteilt ist, sondern derart, dass das Vlies ca. 40 % Wasser verliert, gleichwohl die Zelle

nur 10 % verloren hat. Bedingt durch den Wasserverlust schrumpft das Vlies, und der erforderliche Anpressdruck auf die aktiven Massen geht verloren, was insbesondere einen Kapazitätsverlust nach sich zieht. Bei Gel-Akkus ist der Wasserverlust dagegen homogen auf Massen, Gel und Separator verteilt, der Anpressdruck bleibt über die gesamte Lebensdauer erhalten, so dass sich insgesamt nur eine geringe Widerstandszunahme ergibt, nämlich nur ca. 5 %.

Natürlich gibt es noch weitere Alterungsmechanismen bei Blei-Akkus für USV-Anlagen, die sich in einer Änderung des ohmschen Innenwiderstandes niederschlagen. Sulfatierung z.B. entsteht immer dann, wenn Blei-Akkus über einen langen Zeitraum nicht vollgeladen werden. Bei verschlossenen Blei-Akkus entsteht sie beispielsweise an den Stellen der negativen Elektrode, wo aufgrund von Wasserverlust der Anpressdruck des Vlies nicht ausreicht [2]. Da mit fortschreitendem Alter oder bei hohen Temperaturen die negative Elektrode depolarisiert, besteht auch hier die Gefahr der Sulfatierung, insbesondere bei Ladeverfahren nach Standard-IU-Kennlinie. Der Sulfatierungsmechanismus ist sehr komplex. Eine grundlegende Darstellung ist in [3] zu finden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es bezüglich des Alterungsverhaltens zum Teil erhebliche Unterschiede sowohl zwischen geschlossenen und verschlossenen Blei-Akkus als auch innerhalb der verschlossenen Typen gibt. Die Abhängigkeit des ohmschen Innenwiderstandes vom Alterungszustand ist besonders bei Blei-AGM-Akkumulatoren ausgeprägt.

Abhängigkeit vom Ladezustand

Da bei Blei-Akkumulatoren der Elektrolyt an den Elektrodenreaktionen teilnimmt, steigt in Konsequenz die Ionenkonzentration mit steigendem Ladezustand (SOC). Dies führt – in vereinfachter Betrachtungsweise – zu einer Verringerung des Innenwiderstandes. Für die Zustandsanalyse ist diese Abhängigkeit insofern irrelevant, da die Akkus in einer USV-An-

lage stets in vollgeladenem Zustand gehalten werden und die Ladungsentnahme eher eine Ausnahmesituation darstellt. Daher wird die Alterung der USV-Akkus bei einem Ladezustand von ca. 100 % gemessen und verfolgt.

Abhängigkeit von der Temperatur

Wesentlich ist, dass der Elektrolytwiderstand und damit der ohmsche Innenwiderstand eines Blei-Akkus nicht-linear temperaturabhängig ist (Bild 1). Eine auf Innenwiderstandsmessungen basierende Alterungsanalyse sollte evidenterweise diese Abhängigkeit kompensieren. Denn das Ziel ist es, die Alterung der Zelle zu erfassen und nicht die Temperaturabhängigkeit des ohmschen Innenwiderstandes. Dies ist ein zentraler Punkt der für das adaptive Strom-Stufen-Ladeverfahren (ACS, Adaptive Current Step [4]) neu entwickelten Zustandsdiagnose.

Oftmals lässt sich eine temperaturabhängige physikalische Größe X , die hier als eine glatte reelle Funktion $X(T)$ betrachtet wird, in folgender Form, z.B. durch ihre Taylor-Reihe, darstellen:

$$X(T) = X(T_0) \times (1 + g(T - T_0)) \quad (2)$$

Dabei ist g wiederum eine reelle Funktion und T_0 eine fest gewählte Bezugstemperatur. Die Ableitung $dg(T)/dT$ heißt Temperaturkoeffizient im Punkte T . Etwas bekannter erscheint der Zusammenhang für den Fall, bei dem X affin linear ist, d.h. $X(T) = aT + b$ mit $a, b \in \mathfrak{R}$. Dann ist letzteres äquivalent zu $X(T) = X(T_0) \times (1 + \alpha \times (T - T_0))$ mit dem konstanten Temperaturkoeffizienten $\alpha \in \mathfrak{R}$. Der Vorteil einer mathematischen Darstellung wie in Gl. 2 ist, dass sich direkt ablesen lässt, wie Temperaturänderungen in relative Größenänderungen übergehen:

$$\frac{\Delta X}{X(T_0)} := \frac{X(T) - X(T_0)}{X(T_0)} = g(T - T_0) \quad (3)$$

Dies ist oft auch nützlich bei der Implementierung auf Mikrocontrollern. Die in der Literatur zu findenden experimentellen Daten zu den spezifischen Widerständen der verdünnten

Schwefelsäure in Abhängigkeit von der Säuredichte und der Temperatur lassen sich mit einem Polynom dritten Grades folgender Form sehr gut approximieren:

$$R_E(T) = R_E(25^\circ\text{C}) \times (1 + \alpha \times (T - 25^\circ\text{C}) + \beta \times (T - 25^\circ\text{C})^2 + \gamma \times (T - 25^\circ\text{C})^3) \quad (4)$$

In Bild 1 ist der spezifische Elektrolytwiderstand ρ_E in Abhängigkeit

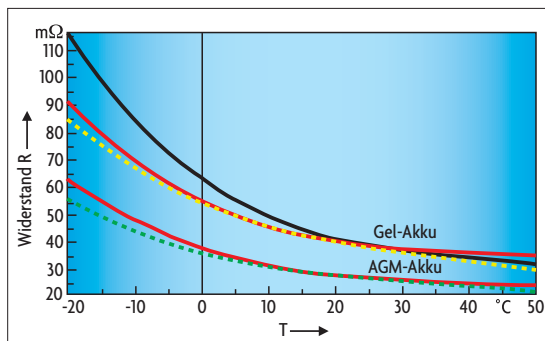


Bild 2. Entsprechend dem spezifischen Widerstand des Elektrolyten (verdünnte Schwefelsäure) zeigt auch der ohmsche Innenwiderstand eines Blei-Akkus eine starke, nichtlineare Temperaturabhängigkeit. Im Diagramm sind die Messwerte von AGM- und Gel-Akkus wie auch die Kurven der Modellrechnung eingetragen. (schwarz: berechneter Elektrolytwiderstand; rot: berechnete Innenwiderstände; gelb, grün: gemessene Innenwiderstände)

der Elektrolyttemperatur bei einer Säuredichte von $1,30 \text{ gcm}^{-3}$ dargestellt. Da im Falle von USV-Anlagen die Zustandsdiagnose bei vollgeladenem Akku stattfindet, genügt es, $\rho_E(T)$ im Temperaturbereich von -20°C bis $+50^\circ\text{C}$ bei der zum Vollladezustand korrespondierenden Säuredichte zu betrachten. Allein im Bereich von 0°C bis $+25^\circ\text{C}$ ändert sich der Elektrolytwiderstand um gut 50 % (siehe Bild 1).

Messungen an Blei-AGM- und Blei-Gel-Akkus zeigen jedoch eine tatsächliche Innenwiderstandszunahme von ca. 30 % bis 40 %. Besonders bei niedrigen Temperaturen wird der Fehler, wenn ausschließlich die Temperaturabhängigkeit des Elektrolyten zugrundegelegt wird, immer größer (Bild 2). Die oberste (schwarze) Kurve zeigt den Innenwiderstandsverlauf eines neuen Gel-Akkus, wenn ausschließlich der Temperaturkoeffizient verdünnter Schwefelsäure, gemäß Gl. 4, angenommen würde. Die gelbe Kurve darunter stellt die tatsächlich

gemessene Temperaturabhängigkeit des ohmschen Innenwiderstandes dar. Im Diagramm ist deutlich zu erkennen, dass der Fehler für $T < 10^\circ\text{C}$ exorbitant zunimmt und also die Temperaturkompensation des ohmschen Innenwiderstandes basierend auf Gl. 4 nicht geeignet ist.

Um eine Temperaturkompensation über den gesamten Temperaturbereich zu erhalten, bedarf es also einer Korrektur von Gl. 4, die auf folgender Idee basiert: Einerseits wird aus Bild 1 ein negativer Temperaturkoeffizient des Elektrolyten für alle Temperaturen zwischen -20°C und $+50^\circ\text{C}$ abgelesen, andererseits ist aus der Tabelle zu entnehmen, dass der Widerstand der Elektrodenmaterialien Blei und Bleidioxid einen entgegengesetzten, konstanten Temperaturkoeffizienten hat. Mit Gl. 1 setzt sich Gl. 4 wie folgt fort (mit $\alpha' > 0$):

$$R_i(T) = \alpha_1 R_{i,25} (1 + \alpha \times (T - 25) + \beta \times (T - 25)^2 + \gamma \times (T - 25)^3) + \alpha_2 R_{i,25} (1 + \alpha' \times (T - 25)) \quad (5)$$

Für die bisher empirisch ermittelten Koeffizienten $a_1, a_2 \in \mathfrak{R}$ gilt $a_1, a_2 > 0$ und $a_1 + a_2 = 1$. Sie lassen sich als Gewichte auffassen, d.h., sie spiegeln letztendlich den relativen Anteil von Elektrolyt bzw. Elektroden am gesamten ohmschen Innenwiderstand bei einer Temperatur T wider. Die obere rote Kurve zeigt schließlich den durch diese Modellgleichung ermittelten Temperaturkoeffizienten des Gel-Akkus. Als weiteres Beispiel ist in Bild 2 der Innenwiderstandsverlauf eines neuen AGM-Akkus aufgetragen (untere Kurven). Auch hier ist eine gute Übereinstimmung zwischen der Modellgleichung und den Messwerten erkennbar.

Nach Auflösen der Modellgleichung nach $R_{i,25}$, lässt sich der bei einer Temperatur zwischen -20°C und $+50^\circ\text{C}$ gemessene Innenwiderstand $R_i(T)$ zurückrechnen auf $T = 25^\circ\text{C}$.

Gängige Praxis bei den heutigen USV-Anlagen ist es, nach je sechs bis zwölf Stunden einen Akku-Test durchzuführen. Wenn dieser Test auf Innenwiderstandsmessungen basiert, so lassen sich erst mit den oben beschriebenen Verfahren die aus den Messungen gewonnenen, normierten Innenwiderstände vergleichen. Ohne Temperaturkompensation ergeben sich zwei mögliche Konsequenzen:

▶ Das Diagnosesystem erkennt fälschlicherweise bei tiefen Temperaturen einen fehlerhaften Akku.

▶ Das Diagnosesystem muss derart rudimentär eingestellt werden, dass ein fehlerhafter Akku viel zu spät erkannt wird – der z.B. die Mindestpufferzeit längst nicht mehr einhalten kann.

Eine adäquate Zustandsdiagnose – gerade für USV-Anlagen, die außerhalb von klimatisierten Räumen betrieben werden – erfordert demnach eine Temperaturkompensation. Erst damit lässt sich ein gradueller Anstieg des Innenwiderstandes detektieren, der z.B. im Automobil-Bereich bereits bei 30 % zum Austausch des Akkus führt.

Die Kurven in Bild 2 zeigen, dass die Genauigkeit der Modellierung an den Intervallgrenzen am schlechtesten ist. Messungen an verschiedenen Blei-Akku-Arten zeigen jedoch, dass die mittels Modellgleichung errechneten normierten Innenwiderstände weniger als 10 % abweichen. Da der ohmsche Innenwiderstand sich im Bereich von -20 °C bis $+50\text{ °C}$ um knapp 300 % ändert, ist die Genauigkeit der Modellgleichung für praktische Zwecke völlig ausreichend.

■ Zustandsdiagnose erfordert korrektes Messverfahren

Die meisten Hersteller von Industrie-USV-Anlagen bieten heutzutage eine rudimentäre Akku-Diagnose an, welche auf Innenwiderstandsmessungen basiert. Genauer: Es wird beispielsweise die Spannungsänderung während einer kurzen Entladephase gemessen und als Kriterium für den Alterungszustand verwendet. Ist der Spannungsrückgang größer als eine rudimentär festgesetzte, starre Grenze, so wird eine Warn-LED oder ein Relaiskontakt geschaltet, was schließlich

dem Anlagenbetreiber signalisieren soll, dass er die Akkus möglichst rasch austauschen sollte. Hieraus ergibt sich eine Reihe von Problemen:

▶ Es kommt sehr darauf an, ob wirklich ohmsche Innenwiderstände gemessen werden bzw. ob berücksichtigt wird, dass die Messung auch andere – z.B. kapazitive – Effekte beinhaltet. Zum Beispiel liefert die Innenwiderstandsmessung aus der DIN EN 60896-11 [5] bzw. DIN EN 60896-21 [6] definitiv keinen ohmschen Innenwiderstand – ebensowenig die so genannte Drei-Sekunden-Messung.

▶ Eine starr eingestellte Spannungsgrenze kann graduelle Veränderungen am Innenwiderstand nicht feststellen – erst recht nicht, wenn die Nennkapazität der an einer USV anschließbaren Akkus um den Faktor 7 schwanken darf, wie es einige Hersteller von USV-Anlagen spezifizieren.

▶ Die Innenwiderstände von Akkus sind nichtlinear temperaturabhängig. Eine Alterungsanalyse soll aber die Alterung erfassen und nicht die Temperaturabhängigkeit der die Alterung repräsentierenden Größen.

■ Temperatur manipuliert Messwerte

Die temperaturkompensierte Zustandsdiagnose von Akkus wird in allen Bereichen und Marktsegmenten benötigt, wo USV-Anlagen entsprechenden Temperaturschwankungen ausgesetzt sind oder vornehmlich bei hohen bzw. niedrigen Temperaturen betrieben werden. Die Hauptalterungsphänomene der in USV-Anlagen verwendeten Akkus sind insbesondere am ohmschen Innenwiderstand erkennbar. Eine auf ohmschen Innenwiderstandsmessungen basierende Zustandsdiagnose ist also sinnvoll. Speziell hierfür wurde ein Messverfahren entwickelt, welches den ohmschen Innenwiderstand eines Blei-Akkus in guter Näherung erfassen kann. Dieser Messwert muss jedoch abhängig von der Temperatur interpretiert werden. Erst das Umrechnen auf eine normierte Temperatur – z.B. 25 °C – ermöglicht den Vergleich mit früheren Messwerten und eine vernünftige Erfassung von graduellen Veränderungen.

Diese Akku-Zustandsanalyse ermöglicht es dem Betreiber einer USV-

Anlage, die Alterung seiner Energiespeicher im Laufe der Betriebszeit anhand einer entsprechenden Anzeige zu verfolgen. Ein Austausch einzelner Akkus kann dann erfolgen, wenn es wirklich notwendig ist, und nicht, wie in einigen Marktsegmenten üblich, pauschal nach zwei bis vier Jahren.

Künftige Untersuchungen haben das Ziel, die Genauigkeit des Verfahrens zu verbessern. Des Weiteren lässt sich die Alterung eines Akkus nicht nur am ohmschen Innenwiderstand oder an der Ladecharakteristik erkennen, sondern auch an anderen Akku-Kenngrößen. Derzeit wird ein modellbasiertes Verfahren entwickelt, das kapazitive Veränderungen detektieren kann. Gerade für USV-Anlagen, die weniger Leistung, dafür aber eine hohe Energie abgeben müssen, ist ein solches Verfahren von zentraler Bedeutung, da der ohmsche Innenwiderstand in dieser Betriebsart nur bedingt nutzbar ist. *hs*

Literatur

- [1] *Misra, S.: Advances in VRLA battery technology for telecommunications. Journal of Power Sources, 2007, H. 168, S. 40 – 48.*
- [2] *Ruetschi, P.: Aging mechanisms and service life of lead-acid batteries. Journal of Power Sources, 2004, H. 127, S. 33 – 44.*
- [3] *Dambrowski, J.: Über die Anforderungen an die Ladetechnik für Bleibatterien im Automotive-Bereich. 2007, www.deutronic.com.*
- [4] *Dambrowski, J.: Akkus schnell und schonend laden – Ladeverfahren für Blei-Akkus in unterbrechungsfreien Stromversorgungen. Elektronik 2009, Teil 1: H. 21, S. 20ff.; Teil 2: H. 26, S. 21ff.*
- [5] *DIN EN 60896-11, Ortsfeste Bleiakumulatoren Teil 11: Geschlossene Batterien – Allgemeine Anforderungen und Prüfverfahren, 2003.*
- [6] *DIN EN 60896-21, Ortsfeste Bleiakumulatoren Teil 21: Verschlussene Bauarten – Prüfverfahren, 2004.*

Dr. Jonny Dambrowski

arbeitet als Leiter der Forschungs- und Entwicklungsabteilung bei der Deutronic Elektronik GmbH – mit Schwerpunkt Entwicklung, Optimierung und Test von Algorithmen zur Ladung, Überwachung und Zustandsdiagnose für Blei- und Lithium-Ionen-Akkus.

jonny.dambrowski@mathematik.Uni-Regensburg.de