

## Aufgabe A12.1:

Auslegung und spezifische Energie

Bei der Endredaktion des Buches ist ein Entwurf der Aufgabe und Lösung abgedruckt worden – wir bitten um Nachsicht. Hier der vorgesehene Text für die Aufgabe und

Für die Auslegung einer Batterie ist wichtig, wie viel Aktivmasse und wieviel wässrige Schwefelsäure bereitgestellt werden muss, damit am Ende der Entladung die Elektroden noch leitfähig und wiederaufladbar sind, und auch der Elektrolyt noch ionenleitend ist, also noch Schwefelsäure enthält. Gehen Sie von einem spezifischen Gewicht von  $1,28 \text{ g/cm}^3$  bei Vollladung und  $1,15 \text{ g/cm}^3$  am Ende der Entladung aus.

1. Wie viel Aktivmasse und Schwefelsäure muss eingesetzt werden?
2. Wie verändert sich dadurch die spezifische Energie der Batterie in Bezug auf die theoretische spezifische Energie?
3. Wie verändert sich die spezifische Energie bei verschlossenen Batterien und bei Berücksichtigung der üblichen passiven Komponenten der Batterie?

Angaben:

- Spezifisches Gewicht von Blei:  $216 \text{ g/mol}$
- Spezifisches Gewicht von Bleidioxid:  $240 \text{ g/mol}$
- Molgewicht von wässrige Schwefelsäure mit  $1,28 \text{ g/cm}^3$ :  $4,876 \text{ mol/l}$
- Molgewicht von wässrige Schwefelsäure mit  $1,15 \text{ g/cm}^3$ :  $2,507 \text{ mol/l}$
- Molekulargewicht von Schwefelsäure  $\text{H}_2\text{SO}_4$ :  $108 \text{ g/mol}$

Lösung

Die Bildung von Bleisulfat während der Entladung reduziert die Leitfähigkeit der Aktivmassen und führt zu einer hohen mechanischen Belastung der Mikrostruktur und zu einer verkürzten Lebensdauer. Unter sonst gleichen Bedingungen gilt für Blei-Säure-Batterien, dass die Lebensdauer umso höher ist, je mehr Blei pro Zelle verwendet wird. Bei der vollständigen Umwandlung der positiven und negativen Aktivmasse werden pro Mol  $53,6 \text{ Ah}$  Ladungsmenge frei. Bei der Ausnutzungsgrenze von  $40 \%$  werden dann bereits mindestens  $2,5 \text{ Mol}$  benötigt, mit dem Molgewicht von Blei ( $218 \text{ g/mol}$ ) und Bleidioxid ( $240 \text{ g/mol}$ ) werden für  $53,6 \text{ Ah}$  somit insgesamt ca.  $1120 \text{ g}$  Aktivmasse ( $=468/0,4$ ) benötigt. Die Auslegungsgröße  $\text{g/Ah}$  ist eine wichtige Kenngröße. Sie beträgt bei  $40 \%$  Massennutzung somit  $1120/53,6 = 20,9 \text{ g/Ah}$ .

1. Die Elektrolytmenge, die eingesetzt werden muss, damit am Ende der Entladung die Dichte nicht unter ca.  $1,15 \text{ g/cm}^3$  sinkt, muss über das Molgewicht der wässrigen Schwefelsäure bestimmt werden. Eine Dichte von  $1,28 \text{ g/cm}^3$  entspricht  $4,876 \text{ mol/l}$  bzw.  $37,36 \%$  Gewichtsprozent entsprechend  $373,6 \text{ g}$  Schwefelsäure pro Liter, und eine Dichte von  $1,15 \text{ g/cm}^3$  entspricht  $2,507 \text{ mol/l}$  bzw.  $21,38 \%$  Gewichtsprozent entsprechend  $213,8 \text{ g}$  Schwefelsäure pro Liter. Pro Liter Schwefelsäure kann somit  $150,8 \text{ g}$  Schwefelsäure bei einer Abnahme der Dichte von  $1,28$  auf  $1,15 \text{ g/cm}^3$  zur Verfügung gestellt werden. Schwefelsäure  $\text{H}_2\text{SO}_4$  hat ein Molekulargewicht von  $108 \text{ g}$ . Damit sowohl auf der negativen als auch der positiven Elektrode  $1 \text{ mol}$  Schwefelsäure verbraucht werden kann, muss nach Entnahme von  $216 \text{ g}$  Schwefelsäure

- noch eine Dichte von  $1,15 \text{ g/cm}^3$  vorhanden sein. Die Anfangsmenge der wässrigen Schwefelsäure muss somit  $216/(373,6-213,8)$  entsprechend 1,35 Liter bzw. 1,728 kg betragen.
2. Aus der Summenformel der Hauptreaktion ergibt sich somit bei 40 % Massenausnutzung ein Gewicht von 2848 g (1120 g Blei und 1728 g wässrige Schwefelsäure) für die Entnahme von 53,6 Ah. Die theoretische spezifische Kapazität einer Blei-Säure-Batterie von 80,7 Ah/kg verringert sich auf 14,6 Ah/kg und die spezifische Energie bei Nutzung der Nennspannung zur Berechnung reduziert sich von 161,4 Wh/kg auf 33,2 Wh/kg.
  3. Die analoge Berechnung für verschlossene Batterien, bei denen eine höhere Nennelektrolytdichte verwendet wird, führt zu einer höheren spezifischen Energie, erfordert aber die Berücksichtigung des Gewichts des Vlieses bzw. der Geliermittel. Trotzdem ist die spezifische Energie von VRLA-Batterien im Normalfall höher als die von geschlossenen Batterien, auch weil oft die am Ende der Entladung noch vorhandene Schwefelsäurekonzentration geringer ist.
  4. Das Gewicht von Zusatzelektrolyten aus Sicherheits- oder Wartungsgründen, der Stromkollektoren, Polbrücken, Pole, Separatoren und des Gehäuses verringert die Werte für die spezifische Energie weiter, aber im Verhältnis zu dem erforderlichen Überschuss an Aktivmasse und wässriger Schwefelsäure nur gering. Je nach Anwendung und Lebensdauererwartung werden von Herstellern spezifische Energien im Bereich zwischen 25 und 40 Wh/kg angegeben. 40 Wh/kg bedingen eine höhere Massennutzung, eine höhere Nennelektrolytdichte und eine geringere Elektrolytdichte am Ende der Entladung.

Aufgabe A12.2:  
Ohmscher Widerstand einer Stabelektrode /PzS)

Berechnen Sie den Widerstand einer Stabelektrode für Panzerplatten mit und ohne Aktivmaterial. Übliche Panzerplattenelektroden haben einen Durchmesser von ca. 8 mm, bestehend aus einem gegossenen Bleistab in der Mitte mit ca. 1,5 mm Durchmesser umgeben von Bleidioxid.

Welche Auswirkungen hat es, wenn die Bleiseele an einer Stelle gebrochen ist, und nur noch das Aktivmaterial die elektrische Leitfähigkeit sicherstellt.

Lösung:

Die Leitfähigkeit der Bleiseele und der umgebenden Aktivmasse kann mittels des ohmschen Gesetzes leicht berechnet werden. Die spezifischen Widerstandswerte für Blei und Bleidioxid sind:

Blei:  $2,2 \cdot 10^{-7} \text{ Ohm m}$  bzw.  $2,2 \cdot 10^{-4} \text{ Ohm mm}$

Bleidioxid:  $7,4 \cdot 10^{-5} \text{ Ohm m}$  bzw.  $7,4 \cdot 10^{-2} \text{ Ohm mm}$  (siehe Tabelle 12.3)

Wegen der Längenangaben der Aufgabe in mm sind die spezifischen Widerstände entsprechend umgerechnet worden. Übliche Werte für die Länge einer Stabelektrode sind 40 cm bzw. 400 mm.

Die Widerstandswerte ergeben sich somit zu:

Bleiseele:  $R_S = \rho_S L/F = 2,2 \cdot 10^{-4} \cdot 400 / (0,75^2 \cdot 3,14) = 0,05 \text{ Ohm}$

Aktivmasse:  $R_{AM} = \rho_{AM} \times L/F = 7,4 \cdot 10^{-2} \cdot 400 / (4^2 \cdot 3,14 - 0,75^2 \cdot 3,14) = 0,61 \text{ Ohm}$

Der Elektronenstrom fließt zwar überwiegend in der Bleiseele, aber eine Vernachlässigung des Stroms in der Aktivmasse ist nicht mehr möglich. Da die in beiden Widerstandskomponenten parallel geschaltet sind, ergibt sich für den Gesamtwiderstand R:

$$R = R_S \times R_{AM} / (R_S + R_{AM}) = 0,046 \text{ Ohm}$$

Das Verhältnis der beiden Widerstände ist unabhängig von der Länge und beträgt 1:12:

Es zeigt sich, dass für die Stromableitung der Elektronenwiderstand der Aktivmasse eine wichtige Rolle spielt. Der Bruch von einem oder mehreren Seelen verändert somit den Gesamtwiderstand nur wenig, solange die Aktivmasse durch die Gewebetasche fest gehalten wird.

Bei einer 50% Umwandlung der Seelen in Aktivmasse durch Korrosionsprozesse, dies entspricht massivem Korrosionsangriff und einer weitgehenden Zerstörung der mechanischen Stabilität der Bleiseelen ergibt sich ein Verhältnis der Widerstände von 1:3 und einer Erhöhung des Gesamtwiderstands von ca. 4,5. Dies wirkt sich im Wesentlichen auf die Stromdichteverteilung und dem Innenwiderstand bei sehr hohen Stromamplituden aus.

### Aufgabe A12.3:

#### Anordnung der Polfahnen

Die Polfahnen von Elektroden sind unterschiedlich angeordnet, manchmal weit voneinander entfernt, manchmal so nahe wie möglich. Diskutieren Sie die Auswirkungen auf den Innenwiderstand bei unterschiedlichen Strömen und Ladezuständen und den Verlauf der Entladekurve, die sich jeweils ergeben.

#### Lösung:

In Abb. A12.3.1 sind die unterschiedlichen Bedingungen dargestellt. Links sind die Polfahnen vergleichsweise nahe aneinander, rechts an den äußeren Rändern. Es sind jeweils eine positive und eine negative Elektrode dargestellt.

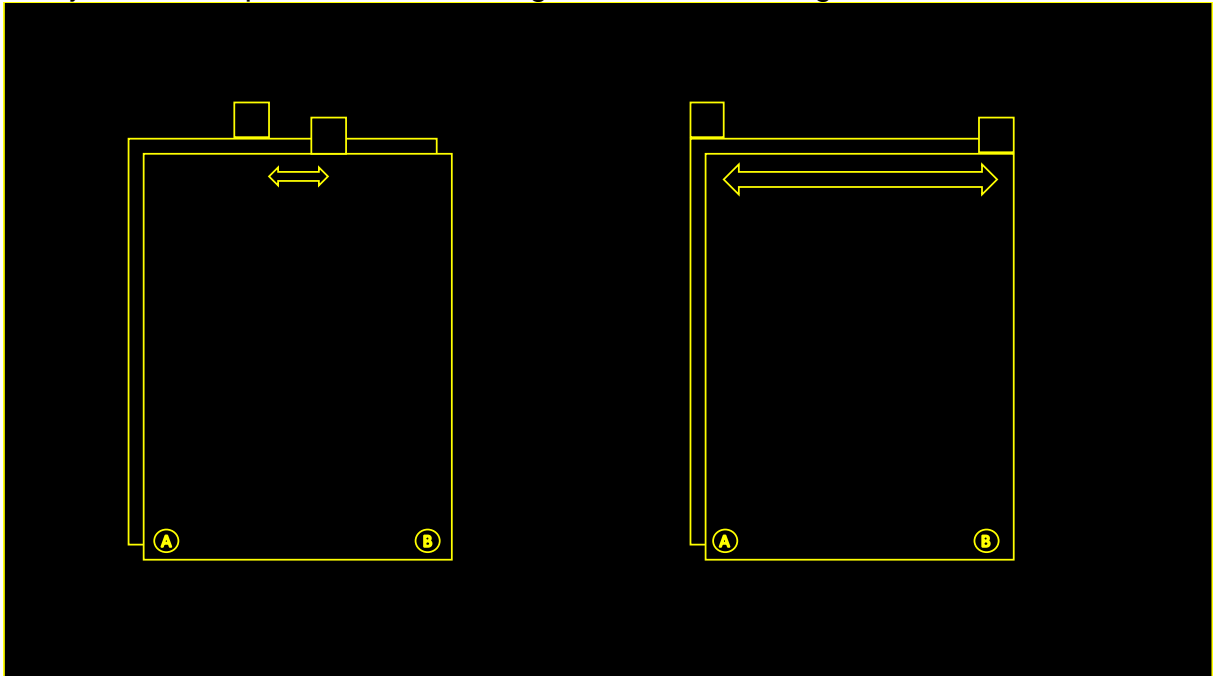


Abb. A12.2.1: Schematische Darstellung einer positiven und negativen Elektrode mit der jeweiligen Polfahne: links mit vergleichsweise engem Polfahnenabstand, rechts mit dem maximal möglichen Polfahnenabstand (bei Anordnung der Polfahne auf der gleichen Seite)

Der kürzeste Weg für Elektronen (siehe Pfeil) links hat einen, um ca. 2/3 kürzeren Gesamtlänge in den Stromkollektoren und Aktivmassen der beiden Elektroden, der längste Weg zu den Punkten A und B ist dagegen marginal länger. Dabei wird wegen des im Vergleich zu den Aktivmassen sehr hohen Widerstand des Elektrolyten angenommen, dass der Ionenstrom im Elektrolyten immer senkrecht zu den Elektrodenflächen fließt und somit immer gleich lang ist.

In Abhängigkeit der Stromdichte hat das unterschiedliche Konsequenzen:

Sehr geringer Strom:

Der dominierende Widerstand ist der Ladungsträgerdurchtrittswiderstand, die durch verschiedene Längen und spezifische Widerstände verursachten Unterschiede im

Widerstand der Aktivmassen, Stromkollektoren und im Elektrolyten spielen keine Rolle. Die Stromverteilung ist in beiden Fällen sehr homogen.

Sehr hoher Strom:

Der BV-Widerstand nimmt mit steigendem Strom ab, so dass die ohmschen Widerstände von Stromkollektoren, Aktivmassen und Elektrolyt an Bedeutung zu nehmen.

Der Elektrolytwiderstand ist durch einen geringen Abstand und große Fläche, aber vergleichsweise sehr großen spezifischen Widerstand der wässrigen Schwefelsäure gekennzeichnet, und bei homogener Elektrolytdichte überall gleich. Am Ende der Entladung unterscheidet er sich, weil die Elektrolytdichte inhomogen geworden ist.

Der Widerstand für den Elektronenstrom unterscheidet sich dagegen wegen der unterschiedlichen Länge der Strompfade erheblich. Im oberen Teil der Elektroden ist die Länge des Strompfades das Mehrfache des Strompfades im Vergleich zum oberen Bereich, so dass die Inhomogenität entsprechend groß ist und bei den Elektroden mit nah beieinander stehenden Polfahnen größer ist. Durch den kürzeren Strompfad ist zu erwarten, dass der Spannungsabfall am Anfang geringer ist, am Ende dagegen etwas höher, weil durch den höheren Ladungsumsatz im Bereich der Polfahnen dort der Ladezustand schneller abnimmt und sowohl BV-Widerstand als auch Elektrolytwiderstand schneller ansteigen und den Strom nach unten verdrängen.

Zu erwarten ist somit eine etwas steilere Entladekurve und wegen der größeren Strominhomogenität auch eine geringfügige Verminderung der bis zur Entladeschlussspannung entnehmbaren Kapazität. Abb. A12.3.2 zeigt die Unterschiede schematisch, inwieweit diese Unterschiede aber technisch relevant sind, kann nur durch detaillierte Messungen und Simulationen abgeschätzt werden.

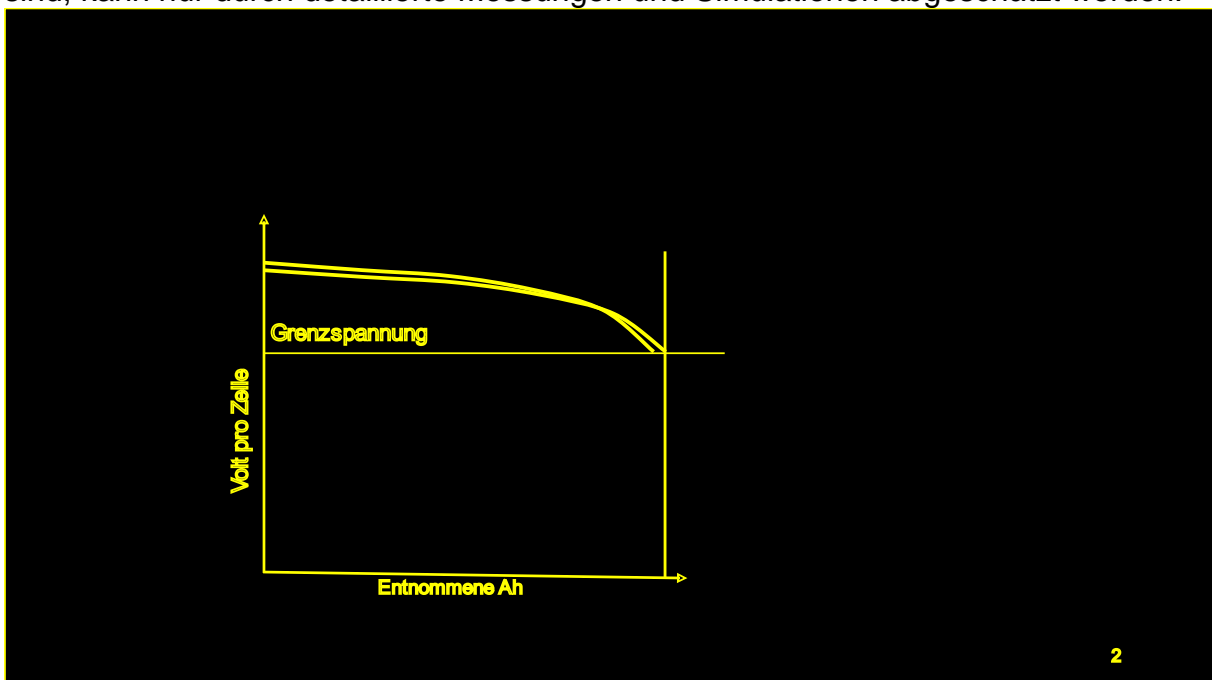


Abb.: Schematische Darstellung der Entladekurve bei hoher Stromamplitude für die beiden Anordnungen der Polfahnen.

#### Aufgabe A12.4:

#### Lüftungsberechnung bei anderen Temperaturen und Spannungen als den in Normen genutzten Werten

Verschlossene Batterien werden oft in Gehäusen untergebracht, die besonderen Anforderungen unterliegen, z.B. Spritzwasserschutz. Im Betrieb werden die Batterien warm, und wegen häufiger kurzer Entladungen werden sie oft bei höheren Spannungen als bei einem dauerhaften Ladeerhaltungsbetrieb üblich betrieben.

Berechnen Sie, um wieviel größer die Belüftungsöffnungen sein müssen, wenn von einer Betriebstemperatur von 45 °C und einer Ladespannung von 2,35 V/Zelle ausgegangen wird.

Wie kombiniert man Belüftungsanforderungen und Spritzwasserschutz?

#### Lösung

Diese Aufgabe ist insbesondere für Batterien in kleinen Brand- und Einbruchsmeldesystemen, die üblicherweise in kompakten Schaltschränken eingebaut sind, relevant. Übliche Batteriesysteme dafür sind z.B. 2,2Ah und 24 V.

Die folgenden Berechnungen zur Luftzirkulation mittels Zu- und Abluftöffnungen für Bleigelbatterien entsprechend DIN EN 50272-2 / 12.2001. Dort wird ausdrücklich eine passive Belüftung durch natürliche Luftbewegung und Luftströmung gestattet. Eine technische Lüftung mittels Ventilatoren etc. wird dagegen mit zusätzlichen technischen Sicherheitsmaßnahmen gekoppelt und wird nicht empfohlen.

Der erforderlicher Luftvolumenstrom Q errechnet sich nach folgender Gleichung:

$$Q = v * q * s * n * I_{\text{gas}} * C_N * 10^{-3} \text{ [m}^3 \text{ / h]}$$

Die Dimension von Q ergibt sich dabei nicht aus den Dimensionen der verwendeten Berechnungsgrößen.

Q = Luftvolumenstrom [m³/h]

v = 24 - Verdünnungsfaktor von Wasserstoff

q =  $0,42 * 10^{-3}$  [m³ / Ah] - freigesetzter Wasserstoff

s = 5 - allgemeiner Sicherheitsfaktor

n = Zellenzahl

$I_{\text{gas}}$  = Strom, der die Gasentwicklung verursacht [mA / Ah]

$C_N$  = Kapazität  $C_N$  der Bleibatterie [Ah] , U = 1,8 V / Zelle bei 20 °C

mit  $v * q * s = 0,05$  [m³/Ah] ergibt sich folgende Gleichung für den Luftvolumenstrom:

$$Q = 0,05 * n * I_{\text{gas}} * C_N * 10^{-3} \text{ [m}^3 \text{ / h]}$$

dabei errechnet sich  $I_{\text{gas}} = I_{\text{float/boost}} * f_g * f_s$  [mA/Ah] gemäß DIN EN 50272-2 Tabelle 1:  
bei Bleibatteriearten:

verschlossen/geschlossen

$I_{\text{float}}$ = Erhaltungsladestrom bei vollgeladener Batterie [mA/Ah]:	1,00	5,00
$I_{\text{boost}}$ = Starkladestrom bei vollgeladener Batterie [mA/Ah] :	8,00	20,0
$f_g$ = Gasemissionsfaktor:	0,20	1,00
$f_s$ = Sicherheitsfaktor:	5,00	5,00
Erhaltungsladespannung V / Zelle :	2,27	2,23
Starkladespannung V / Zelle :	2,40	2,40

Wenn nur eine Öffnung für die natürliche Konvektion möglich ist, dann ist in DIN EN 50272-2 folgende Formel zur Berechnung des Lüftungsquerschnitts in  $\text{cm}^2$  angegeben:  
 $A = 28 \cdot Q$

Diese Werte müssen für den Betrieb bei höheren Spannungen und Temperaturen korrigiert werden, weil nicht davon ausgegangen werden sollte, dass die verwendeten Sicherheitsfaktoren die abweichenden Betriebsbedingungen sicher abdecken.

Batterien mit derartig niedriger Spannung sind üblicherweise Blockbatterien á 12V in verschlossener Bauform entsprechend insgesamt 12 Zellen.

Der Luftvolumenstrom beträgt bei Anwendung der obigen Formel:

$$Q = 0,05 \cdot n \cdot I_{\text{gas}} \cdot C_N \cdot 10^{-3} [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$Q = 0,05 \cdot 12 \cdot 1 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3} [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$Q = 0,00132 \text{ m}^3/\text{h}$$

Und der Lüftungsquerschnitt:

$$A = 28 \cdot Q [\text{cm}^2]$$

$$A = 28 \cdot 0,00132$$

$$A = 0,03696 \text{ cm}^2 = 3,7 \text{ mm}^2$$

Es ist zu beachten, dass bereits in den Formeln  $Q$  und  $I_{\text{gas}}$  jeweils ein Sicherheitsfaktor von 5 enthalten ist, also insgesamt ein Faktor von 25 berücksichtigt ist. Mit diesen Faktoren sollen Fehler einzelner Zellen und ggf. unzulässig hohe Temperaturen von Zellen berücksichtigt werden. Ferner ist in der Festlegung des Gasungsstroms (1mA/Ah) der bei einer verschlossenen Batterie am Lebensdauerende maximal zu erwartende Gasungsstrom (IEC TR 62060) vorgegeben.

Die verwendete Ladeerhaltungsspannung bei 20 °C beträgt 2,35 V/Zelle und nicht wie in EN 50272-2 Tabelle 1 genannt 2,27 V/Zelle. Als Faustregel gilt, dass eine Spannungserhöhung um 0,2V/Zelle den Gasungsstrom verzehnfacht. Dies ergibt sich z.B. auch durch Anwendung der BV-Gleichung bei einem Transferkoeffizienten von 0,2. Aus der Spannungserhöhung um 0,08 V/Zelle lässt sich auf eine Erhöhung des Gasungsstroms um ca. den Faktor 2 schließen. Diese geringe Abweichung kann also durch die obigen Sicherheitsfaktoren als abgedeckt betrachtet werden.

Bei Temperaturen bis zu 45 °C muss bei sonst gleichen Bedingungen mit einer Erhöhung des Gasungsstroms um den Faktor 5 gegenüber 20 °C gerechnet werden.

Wegen der leicht gegenüber der in EN 50272-2 genannten Ladeerhaltungsspannung sowie dem noch zulässigen Betrieb bei 45 °C ist eine Vergrößerung der Lüftungsöffnung, z.B. um den Faktor 5 sinnvoll.

Üblicherweise wird bei derartig hohen Temperaturen die Ladeerhaltungsspannung abgesenkt, so dass dadurch die Größenanforderungen an die Lüftungsöffnung reduziert werden.

Die Kombination von Belüftungsanforderungen, also dem ungehinderten Luftaustausch zwischen Batteriegehäuse bzw. bei Abfuhr der entstehenden Gase

aus dem Inneren der Zellen durch einen Schlauch nach außen, und anderen Anforderungen, z.B. Spritzwasserschutz oder Brandschutz ist ein häufiges Problem. In keinem Fall darf die Batterie hermetisch von der Umgebung abgetrennt werden. Bei Spritzwasserschutz kann die Kombination durch einfache Labyrinth erfolgen, die verhindern, dass Wasser sich im Inneren des Batteriegehäuses ansammeln kann. Das Benetzen des Batteriegehäuses durch Wasserspritzer ist ja unproblematisch, solange der Deckel mit Polen und Ventilen nicht betroffen wird. Es bietet sich also an, die Entlüftungsöffnung für das Batteriegehäuse unten im Gehäuse oder auf den Seiten ganz unten vorzusehen und durch eine entsprechende Gestaltung sicherzustellen, dass kein Spritzwasser eindringen kann bzw. dieses dann nach unten ablaufen kann. Eine Belüftungsöffnung im unteren Bereich ist bei Batteriekästen mit geringer Höhe unproblematisch, weil durch die thermische Bewegung der Luftmoleküle ein ausreichender Luftaustausch mit der Umgebung erfolgt. Ein Konzentrationsgradient von Wasserstoff zwischen dem oberen und unteren Bereich des Batteriegehäuses ist nicht zu erwarten.



### Aufgabe A12.5:

#### Spannungsabfall über Korrosionsstelle bei Reihenschaltung

Bei einigen Netzersatzanlagen werden Batterien mit einer Nennspannung bis zu 800 V, entsprechend 400 in Reihe geschalteter Zellen verwendet. Im

Ladeerhaltungsbetrieb bei 2,23 V/Zelle beträgt die Ladespannung dann 984 V, der Strom liegt im Bereich von 20 mA/100 Ah Kapazität bei neuen Zellen, und der überlagerte Wechselstrom des Ladegeräts bei 1 A.

Unterstellen Sie für eine defekte Zelle mit einem internen Übergangswiderstand von 10 Ohm die Wärmeleistung an der defekten Stelle und den Spannungsabfall über der defekten Stelle. Welche Auswirkungen hat das auf die guten Zellen ohne derartige fehlerhafte Übergangswiderstände?

#### Lösung:

Über der defekten Stelle fällt je nach Batteriekapazität eine unterschiedliche Spannung ab und es gibt eine unterschiedliche Erwärmung, weil der Ladeerhaltungsstrom proportional zur Batteriekapazität ist. Im Folgenden werden drei verschiedene Batteriekapazitäten behandelt, 10 Ah, 100 Ah und 1000 Ah, entsprechend den kommerziell kleinsten und bezogen auf einen Batteriestrang größten USV-Anlagen. Ferner wird auch der Fall gealterter Batterien betrachtet, bei denen der Ladeerhaltungsstrom bei sonst gleichen Bedingungen ca. 5 – 6 mal größer ist.

	10 Ah	100 Ah	1000 A
Spannungsabfall 20 mA/100 Ah	0,02 V	0,2 V	2 V
Spannungsabfall 100 mA/100 Ah	0,1 V	1,0V	10 V
Wärmeleistung 20 mA/100 Ah	0,00004 W	0,004 W	0,4 W
Wärmeleistung 100 mA/100 Ah	0,002 W	0,2 W	20 W

Wie leicht ein Fehler mit vorgegebenem Widerstand durch eine Spannungs- oder Temperaturmessung, z.B. durch eine IR-Kamera, detektiert werden kann, hängt somit von der Batteriekapazität ab.

10 Ah: 0,02 V liegen noch innerhalb des normalen Schwankungsbereichs von Einzelzellenspannungsmessungen. Da Batterien mit 10 Ah Kapazität nur als 12V-Block verkauft werden, ist eine Detektion nicht wahrscheinlich. Ähnliches gilt für die Wärmeleistung. 1 mW kann auch mit einer IR-Kamera nur unter günstigen Bedingungen detektiert werden.

100 Ah: 0,2 V pro Zelle sind eindeutig detektierbar. Allerdings werden Batterien dieser Größe meistens als 12V-Block, manchmal auch als 6V-Block verkauft. Bei einem 12V-Block sind 0,2V im Grenzbereich dessen, was detektiert werden kann. Mit zunehmender Alterung kann aber sowohl die Spannung als auch die Wärmeleistung leicht detektiert werden.

1000 Ah: Sowohl Spannungsabweichung als auch Wärmeleistung sind auch bei neuen Batterien leicht als Fehler detektierbar.

Zu beachten ist:

- Je nach Fehlerort spielt es eine Rolle, wo die Spannung gemessen wird. Um Fehler in Verbindern oder der Kontaktierung von Verbindern mit den Polen zu detektieren ist es somit wichtig, den potentiellen Spannungsabfall über die Verbinder mitzumessen oder die Verbinder separat (es darf kein Spannungsabfall messbar sein) zu messen. Dies wird bei Wartungsarbeiten häufig berücksichtigt.
- Die Annahme eines Fehlers mit 10 Ohm unabhängig von der Batteriegröße ist problematisch. Die gleiche quantitative Menge an Korrosionsprodukten führt bei großen Batterien zu deutlich geringerer Änderung des Widerstands von Komponenten.
- Bei Entladungen der Batterie im Betrieb, selbst wenn der Entladestrom gering ist, z.B.  $I_{10}$ , ist der Fehler durch eine Spannungsmessung leicht und unmittelbar detektierbar, und die Erwärmungsleistung hoch.

Ob der Fehler Auswirkungen auf die anderen Batterien hat, hängt von der Nennspannung der Batterie ab. In dem hier unterstellten Fall von 800 V Nennspannung verringert sich die, für die guten Zellen zur Verfügung stehende Spannung selbst bei 1000 Ah Batteriekapazität nur um 2V/399 Zellen, also um also 5 mV. Dies hat keine relevanten Auswirkungen und liegt im Genauigkeitsbereich der Spannungseinstellung des Ladegeräts. Am Ende der Lebensdauer führt die geringere Spannung aber bereits zu einer um 25 mV geringeren Ladespannung, was ggf. zu einer langsamen Mangelladung führen kann.

Anders ist die Situation bei anderen Nennspannungen, z.B. 216 oder 60 V, beides Standardspannungen in bestimmten Anwendungsbereichen. Bei 60 V Nennspannungen sind die Auswirkungen bei 1000 Ah Kapazität auch bei neuen Batterien problematisch, und bei 100 Ah Batterien gegen Ende der Lebensdauer. Bei 10 Ah Batteriekapazität sind dagegen die Auswirkungen auf die restlichen Batterieblöcke in keinem Fall relevant.

## Aufgabe A 12.6

Vermeidung von Säureschichtung

Gestaltung einer Batterie, die eine geringe Säureschichtung entwickelt

Entwickeln Sie Konzepte zum Bau einer Batterie, bei der die Säureschichtung sich so gering wie möglich entwickelt.

Lösung:

Zur Entwicklung von Säureschichtung ist das Säurevolumen oberhalb der Elektroden und die Länge der Elektroden von Bedeutung, sowie die vertikale Beweglichkeit des Elektrolyten im Betrieb.

- **Elektrolytvolumen oberhalb der Elektroden**  
Oberhalb der Elektroden muss ausreichend Elektrolytvolumen vorhanden sein, um auch zwischen Wartungsintervallen und im entladenen Zustand sicherzustellen, dass die Elektroden bzw. Aktivmassen der Elektroden ständig von flüssigem Elektrolyt umgeben sind. Das Volumen kann somit nicht beliebig reduziert werden.  
Durch die Wahl breiter Elektroden kann aber oberhalb der Elektroden ein ausreichend großes Volumen bereitgestellt werden und die Höhe des Elektrolytraums reduziert werden.  
Wenn gleichzeitig, bei Blockbatterien, die Interzellverbinder ständig unterhalb des Elektrolytspiegels sein sollen, um das Explosionsrisiko bei korrodiertem Interzellverbinder zu minimieren, dann muss zusätzlich der Interzellverbinder und die Verschweißung entsprechend angepasst werden.
- **Länge der Elektroden**  
Zur Reduzierung der Höhe des Elektrolytvolumens muss bereits die Breite der Elektroden vergrößert werden, was bei gleicher Zellkapazität eine Reduzierung der Höhe bedingt. Zusätzlich macht es aber auch Sinn, die Zahl der Elektroden zu erhöhen, also statt  $n$  Zellen mit einer Länge  $L$  die Verwendung von  $2n$  Zellen mit einer Länge  $L/2$ .
- **Vertikale Beweglichkeit des Elektrolyten**  
Durch mechanische Zusatzaggregate wie Elektrolytumwälzung mit eingeperrter Luft oder Einsätzen zur Nutzung der Bewegung des Elektrolyten beim Fahren (Mammutpumpenprinzip) können die Separatoren entsprechend gestaltet oder eingebaut werden.  
Separatoren haben üblicherweise Rippen, um ausreichend Elektrolytvolumen zwischen Elektroden zu schaffen. Die Rippen können senkrecht oder waagrecht oder schräg eingebaut werden, was entsprechenden Einfluss auf den Strömungswiderstand des Elektrolyten in vertikaler Richtung hat. Ein Hersteller von Starterbatterien baut z.B. Separatoren alternativ mit einer Ausrichtung der Rippen mit  $-45$  und  $+45^\circ$  ein, um die vertikale und horizontale Beweglichkeit zu optimieren.