

Elektronische Überwachungs- und Steuergeräte zum Erhalt der aktuellen Qualität vielzelliger elektrochemischer Speichersysteme

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern

angenommene
Habilitationsschrift

VON
Dr.-Ing. Bernhard Hauck

Kaiserslautern 2003
D386

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Batterien nach dem Stand der Technik	3
2.1	Bleibatterie	3
2.2	NiCd-Batterie	4
2.3	NiMh-Batterie	4
2.4	Li-Ionen-Batterie	5
2.5	Lithium-Polymer-Batterie	6
2.6	Natrium-Schwefel-Batterie	6
2.7	Natrium-Nickelchlorid-Batterie	7
2.8	Weitere elektrochemische Speichersysteme	7
2.9	Verfügbare Batterien	8
3	Einflüsse auf Batterien	10
3.1	Einflüsse in der Fertigung	10
3.2	Einflüsse bei Transport und Lagerung	19
3.3	Einflüsse im Betrieb	20
4	Batteriemanagementsysteme	27
4.1	Definitionen	27
4.2	Aufbau und Struktur eines Batteriemanagementsystems	29
4.2.1	Elektrisches Batteriemanagement	30
4.2.2	Thermisches Batteriemanagement	34
4.2.3	Ladeausgleich	35
4.3	Bewertung der Systeme	41
5	Batteriemanagementsystem mit verteilten Datenerfassungseinheiten und Energiezuführung für den Ladeausgleich	42
5.1	Prinzip des Batteriemanagementsystems	42
5.2	Zentraleinheit (Master)	43
5.3	Datenerfassungseinheit (Slave)	44
5.4	Kommunikation	46
5.5	Ladeausgleich	52
5.6	Vergleich mit anderen Batteriemanagementsystemen	52
6	Algorithmen	53
6.1	Hohe Verfügbarkeit	54
6.1.1	Bleibatterien	54
6.1.2	NiCd- und NiMh-Batterien	62
6.1.3	Lithium-Batterien	67
6.1.4	NaS- und NaNiCl-Batterie	68
6.2	Aktueller Ladezustand	68
6.3	Aktuelle Qualität	71

7	Fehleranalyse von Batteriemanagementsystemen	75
7.1	Fehlerquellen der Anpassung und Analog-Digital-Umsetzung	75
7.1.1	Anpassung	75
7.1.2	Analog-Digital-Umsetzer	79
7.1.3	Referenzquelle	81
7.1.4	Mikrocontroller	81
7.2	Gesamtfehler der Anpassung und Analog-Digital-Umsetzung	81
7.3	Kalibrierung	83
7.4	Fehlerquellen der Sensoren	84
7.4.1	Temperatursensor	85
7.4.2	Stromsensor	85
8	Test von Batteriemanagementsystemen	87
8.1	Test des elektrischen Batteriemanagements	87
8.2	Test des thermischen Batteriemanagements	92
8.3	Test des Ladeausgleichs	92
9	Integrierte Batteriemanagementsysteme	94
9.1	Klassifizierung der integrierten Batteriemanagementsysteme	95
9.1.1	Integrierte Batteriemonitore	95
9.1.2	Integrierte Ladecontroller	95
9.1.3	Integriertes elektrisches Batteriemanagement	96
9.2	Integrierte Batteriemanagementsysteme als Datenerfassungseinheiten	96
10	Zusammenfassung	98
11	Literaturverzeichnis	99

1 Einleitung

Elektrochemische Speicherzellen werden zu Batterien zusammengeschaltet. Diese speichern elektrische Energie und können somit Lücken in der Energieversorgung überbrücken oder als ortsunabhängige Energiequellen in Geräten und Fahrzeugen mitgeführt werden. Allgemein werden Batterien dabei in Primärsysteme, die nach Gebrauch nicht mehr aufladbar sind, und in Sekundärsysteme, die wieder aufgeladen werden können, unterschieden. Letztere werden als Akkumulatoren oder Sekundär-Batterien bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit werden nur Sekundärsysteme betrachtet. Diese werden hier als Batterien bezeichnet.

In der mobilen Anwendung werden Batterien in Geräten, wie z.B. im Mobilfunk, im Camcorder, im Laptop oder im Akku-Schraubendreher eingesetzt. Mobile Anwendungen sind auch Fahrzeuganwendungen. Dabei reicht die Spanne von der 12V-Starter-Batterie, über das z. Zt. in Diskussion befindliche 42V-Bordnetz, über Batterien für Hybridfahrzeuge bis hin zur reinen Elektro-Traktion. Stationäre Anwendungen finden sich z.B. in der Telekommunikation, in Unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV), in Spitzenlast-Anlagen und in der Photovoltaik. Bild 1.1 zeigt Batterie-Einsatzgebiete und die jeweils eingesetzten Batterietypen.

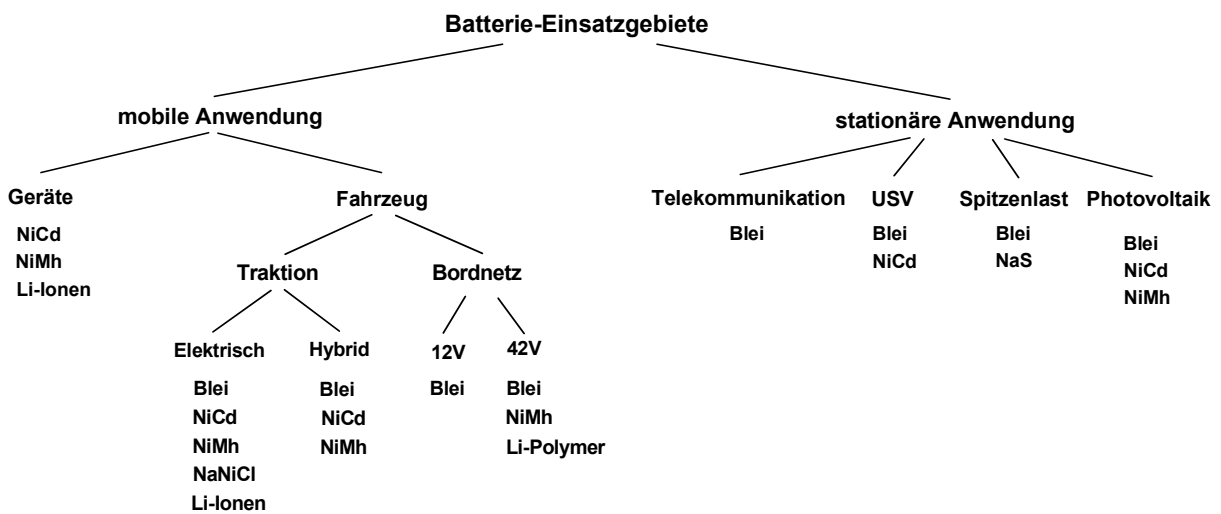


Bild 1.1 Batterie-Einsatzgebiete und Batterietypen

Nach Bild 1.1 werden eine Reihe von Batterietypen eingesetzt. Dabei ist die Bleibatterie nach wie vor die Batterie mit dem größten Anwendungsgebiet. Sie ist im Einsatz von der 12V-Starter-Batterie im Kfz, über USV-Anlagen und Batterie-Speicheranlagen zur Bewältigung von Spitzenlasten im Netzbereich bis hin zur Traktion. NiCd-Batterien werden vor allem im Bereich der Gerätebatterie, aber auch in der Traktion eingesetzt. Aufgrund der Umweltproblematik wird dieser Batterietyp zunehmend von NiMh-Batterien abgelöst. Diese bieten zusätzlich eine höhere Energiedichte als vergleichbare NiCd-Batterien. Die NiMh-Batterie wird auch als Speicher in Hybrid-Fahrzeugen und in der reinen Elektrotraktion eingesetzt. Li-Ionen-Batterien finden Anwendung z.B. in Laptops, aber auch in der Traktion. Hier allerdings nur in Prototy-

pen-Fahrzeugen. Li-Polymer-Batterien sind für den Einsatz in Geräten und im 42V-Kfz-Bordnetz geeignet. Die NaS-Batterie, eine Hochtemperatur-Batterie, wird aktuell nur als Netzpuffer zur Deckung von Spitzenlasten benutzt. Dagegen wird die NaNiCl-Batterie, ebenfalls eine Hochtemperatur-Batterie, in der Traktion eingesetzt.

In allen diesen Anwendungen werden an die Batterien die gleichen Anforderungen von Seiten des Anwenders und Nutzers gestellt. Dieser möchte eine hohe Verfügbarkeit, eine große Kapazität, eine hohe Energiedichte, einen aus seiner Sicht einfachen Ladevorgang, eine kurze Ladezeit und natürlich einen niedrigen Preis haben.

Die Problematik bei den Batterien beruht unter anderem auf der Vielzelligkeit, d.h. auf der Zusammenschaltung vieler elektrochemischer Zellen. Hier wirken sich die Unterschiede zwischen einzelnen Zellen negativ aus. Nicht nur Batterien, sondern auch andere vielzellige Systeme zeigen dieses Verhalten. So führen Toleranzen zwischen einzelnen sogenannten Super-Kondensatoren bei einer Reihenschaltung zu dem gleichen Problem. Auch bei den Brennstoffzellen, die auf im Prinzip gleichen Zellen wie Batterien beruhen, wirkt sich die Vielzelligkeit aus. Um einen effizienten Betrieb sicherzustellen, ist hier, wie bei den Batterien, der Einsatz elektronischer Überwachungs- und Steuergeräte notwendig.

Nach dem Vorstellen von Batterien nach dem Stand der Technik wird untersucht, inwieweit in der Fertigung Einfluss auf die Qualität der Batterie genommen werden kann. Dazu werden die typischen Parameter verschiedener Batterietypen diskutiert. Nicht nur die Fertigung, sondern vor allem der Betrieb beeinflusst die Batterien. Es werden die Betriebsbedingungen und ihre Einflüsse vorgestellt. Um die Anforderungen des Nutzers an eine Batterie zu befriedigen, müssen die Batterien mit elektronischen Überwachungs- und Steuergeräten, den Batteriemanagementsystemen, ausgerüstet werden. Es wird auf die Teile elektrisches Batteriemangement, thermisches Batteriemangement und Ladeausgleich eingegangen. Verschiedene Topologien werden definiert und ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes System wird als Beispiel für eine Geräteentwicklung vorgestellt. Ein weiterer Punkt sind die Algorithmen für Batteriemanagementsysteme. Hier werden auch die elektrischen und thermischen Betriebsgrenzen von Batterien besprochen. Die Genauigkeit der Messdatenerfassung wird anhand verschiedener technischer Realisierungsmöglichkeiten untersucht. Ein weiterer Punkt ist das Testen von Batteriemanagementsystemen. Zur Abrundung werden integrierte Batteriemanagementsysteme speziell für Gerätebatterien vorgestellt.

2 Batterien nach dem Stand der Technik

Batterien können elektrische Energie unmittelbar in chemische Energie umwandeln und als solche speichern. Es wird der Effekt genutzt, dass chemische Reaktionen mit der Umladung von Ionen verknüpft sind, d.h. mit dem Austausch elektrischer Ladungen. Bei den elektrochemischen Speichersystemen steht eine hohe Speicherfähigkeit im Vordergrund. Um dies zu gewährleisten müssen die Systeme bestimmte Kriterien erfüllen [Berndt 1995]:

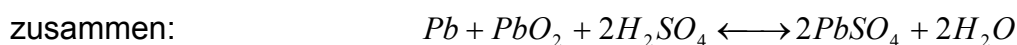
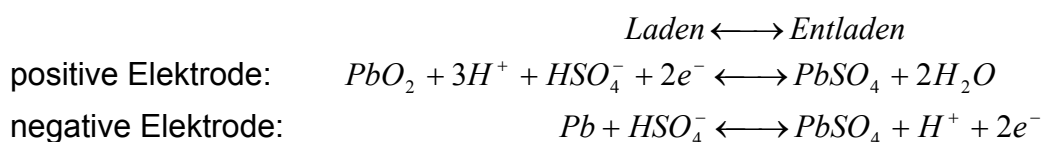
- Die chemische Bindungsenergie der Reaktionspartner, gleichbedeutend mit ihrer chemischen Affinität, muss möglichst groß sein. So lässt sich eine große freie Reaktionsenthalpie und damit eine hohe Zellenspannung erreichen.
- Die Reaktionspartner sollen ein geringes Gewicht haben. Damit wird eine große gewichtsspezifische Speicherfähigkeit erreicht.
- Der reversible Wärmeeffekt soll klein sein, damit Wärmeeffekte beim Laden und Entladen möglichst gering bleiben.

Die günstigste Kombination nach diesen Kriterien stellt Fluor als positive Elektrode und Lithium als negative Elektrode dar. Aus den thermodynamischen Daten lässt sich für dieses System eine Energiedichte von 6270 Wh/kg und eine Zellspannung von 6,07 V errechnen.

Aus der Vielzahl der theoretisch möglichen elektrochemischen Speichersysteme lassen sich allerdings nur wenige technisch realisieren. Im Folgenden werden elektrochemische Speichersysteme nach dem Stand der Technik vorgestellt.

2.1 Bleibatterie

Die Bleibatterie ist die älteste der Batterien nach dem Stand der Technik. Sie wurde bereits vor rund 150 Jahren erfunden [Sinsteden 1854]. Bei ihr besteht in geladenem Zustand die negative Elektrode aus metallischem Blei und die positive Elektrode aus Bleioxid. Als Elektrolyt wird verdünnte Schwefelsäure benutzt. Der Elektrolyt nimmt an der Reaktion teil. Die Reaktionsgleichungen lauten:

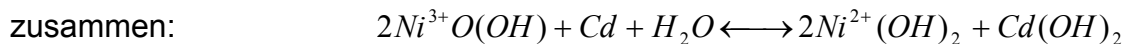
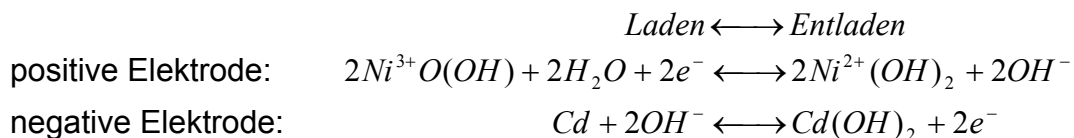


Die Ruhespannung der Bleibatterie beträgt 2V/Zelle. Sie ist von der Säuredichte abhängig. Als Näherungsformel gilt, dass die Ruhespannung gleich der Säuredich-

te/g/cm³ + 0,84 mit der Einheit Volt ist [Berndt 2001]. Die Betriebstemperatur liegt im Bereich -10 °C bis +50 °C. Die spezifische Energiedichte beträgt theoretisch 161 Wh/kg und praktisch 20 bis 40 Wh/kg. Als Nebenreaktionen treten Gitterkorrosion und Wasserzersetzung auf [Berndt 2001].

2.2 NiCd-Batterie

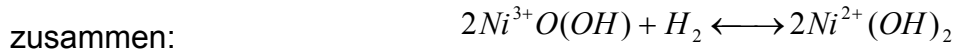
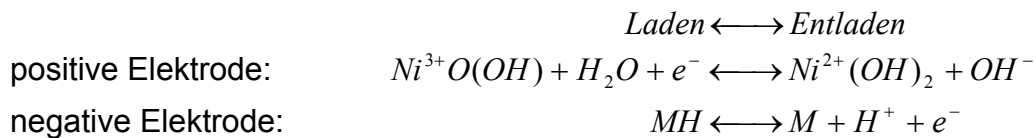
Die NiCd-Batterie ist ebenfalls ein seit vielen Jahren genutzter Batterietyp. Die positive Elektrode ist eine Nickelhydroxid-Elektrode, bei deren aktiver Masse es sich um nichtstöchiometrische Hydroxide und Oxihydroxide handelt. Das geladene aktive Material hat eine höhere Oxidationsstufe als 3 bis zu annähernd 4. Zusätzlich kommen die Ni²⁺- und Ni³⁺-Verbindungen in je zwei Modifikationen vor, die bei der normalen Lade- und Entladereaktion nur paarweise ineinander umgewandelt werden. Die negative Elektrode besteht aus Cadmium. Als Elektrolyt wird Kalilauge verwendet. Der Elektrolyt ist nicht an der Reaktion beteiligt. Als Nebenreaktion tritt Wasserzersetzung auf. In der Regel werden die folgenden vereinfachten Reaktionsgleichungen angegeben:



Die Ruhespannung beträgt rund 1,3 V. Sie variiert mit der Zusammensetzung des Nickelhydroxids. Die Betriebstemperatur liegt im Bereich -40 °C bis +50 °C. Die theoretische Energiedichte beträgt rund 240 Wh/kg. Auch sie hängt von der Zusammensetzung des Nickelhydroxids ab. Praktisch werden 20 bis 55 Wh/kg erreicht. Der Innenwiderstand einer NiCd-Batterie ist niedriger als der einer Bleibatterie unter der Voraussetzung, dass beide Batterien die gleiche Spannung und die gleiche Kapazität haben.

2.3 NiMh-Batterie

Die NiMh-Batterie benutzt für die negative Elektrode wasserstoffbindende Metalllegierungen, wie z.B. LaNi₅ oder Ti(Zr)Ni₂. Dadurch kann auf das umweltschädliche Cadmium verzichtet werden. Für die positive Elektrode wird, wie bei der NiCd-Batterie, Nickelhydroxid verwendet. Der Elektrolyt ist Kalilauge. Auch hier nimmt der Elektrolyt an der Reaktion nicht teil. Die vereinfachten Reaktionsgleichungen lauten:

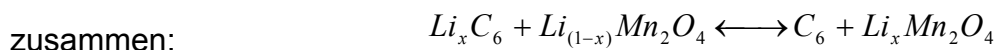
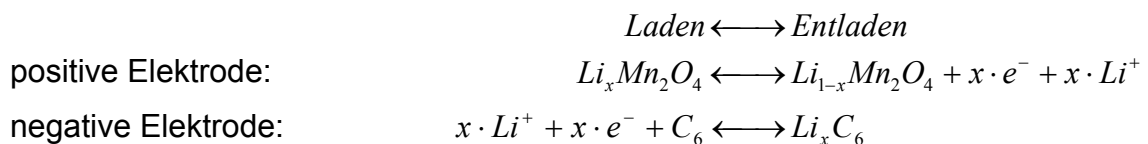


Die Ruhespannung beträgt rund 1,3 V. Sie ist, wie bei der NiCd-Batterie, von der Zusammensetzung des Nickelhydroxids abhängig. Der Betriebstemperaturbereich liegt zwischen $-10\text{ }^\circ\text{C}$ und $+50\text{ }^\circ\text{C}$. Die theoretische Energiedichte hängt von der Zusammensetzung des Nickelhydroxids ab und beträgt rund 300 Wh/kg. Praktisch werden Werte zwischen 50 und 80 Wh/kg erreicht. Die NiMh-Batterie ist von den elektrischen Kenngrößen her direkt austauschbar mit der NiCd-Batterie.

2.4 Li-Ionen-Batterie

Für die Entwicklung der Li-Ionen-Batterie war die Entdeckung entscheidend, dass Lithium mit bestimmten Kohlenstoff- oder Graphitsorten Einlagerungs- oder Intercalationsverbindungen eingeht. Intercalationsverbindungen sind z.B. Li_xMnO_2 , Li_xCoO_2 oder Li_xNiO_2 [Winter 1997].

Eine Ausführung der Li-Ionen-Batterie benutzt als positive Elektrode eine Lithium-Manganoxid-Verbindung, Li_xMnO_4 . Diese wird auch als Lithium-Mangan-Spinell bezeichnet. Die negative Elektrode besteht aus einer Lithium-Kohlenstoff-Verbindung, Li_xC . Der Elektrolyt ist ein organisches Lösungsmittel mit einem Leitzusatz, z.B. $LiPF_6$. Beim Laden und Entladen werden nur die Lithium-Ionen ein- und ausgebaut, die Struktur des Elektrodenmaterials, das praktisch nur als Wirtsgitter dient, bleibt im Wesentlichen erhalten. Aufnahme und Abgabe der Li-Ionen erfolgen nach den Beziehungen:



Die Ruhespannung der Li-Ionen-Batterie liegt bei 3,6 V. Der Betriebstemperaturbereich reicht von $-20\text{ }^\circ\text{C}$ bis $+50\text{ }^\circ\text{C}$. Die theoretische Energiedichte liegt bei 450 Wh/kg, die praktische Energiedichte im Bereich 100 bis 130 Wh/kg.

Eine positive Elektrode basierend auf der Intercalationsverbindung Li_xNiO_2 ändert nichts am prinzipiellen Verhalten der Batterie. Die negative Elektrode und der Elektrolyt bleiben wie oben beschrieben. Der Betriebstemperaturbereich reicht im Normalfall von -10 °C bis $+45\text{ °C}$. Die praktische Energiedichte liegt je nach Ausführung der Batterie zwischen 145 und 185 Wh/kg [Blanchard 2002].

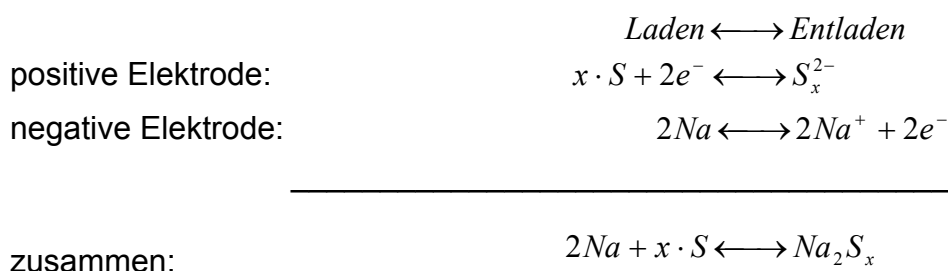
Auch der Einsatz von Li_xCoO_2 als positive Elektrode verändert das prinzipielle Verhalten der Li-Ionen-Batterie nicht.

2.5 Lithium-Polymer-Batterie

Li-Polymer-Batterien werden nach der Art des Elektrolyten, fest oder flüssig, unterschieden. Als fester Elektrolyt findet z.B. ein Polyäthylen-Oxid mit einem Leitzusatz Verwendung. Die positive Elektrode besteht dabei aus einer Lithium-Folie, die negative Elektrode aus einem Verbundmaterial, das mit Graphit angereichert ist [Marginedes 2002]. Der Betriebstemperaturbereich liegt zwischen 0 °C und 90 °C , wobei ein Betrieb zwischen 60 °C und 90 °C aufgrund der in diesem Bereich guten Leitfähigkeit des Elektrolyten günstig ist. Die praktische Energiedichte liegt bei 120 Wh/kg. Li-Polymer-Batterien mit flüssigem Elektrolyt unterscheiden sich von den oben beschriebenen Li-Ionen-Batterien dadurch, dass die positive und negative Elektrode aus einem Trägerpolymer bestehen, das mit Li-Metalloxiden und Graphit angereichert ist. Der Elektrolyt ist, wie bei den Li-Ionen-Batterien ein Lithiumsalz, gelöst in einem organischen Lösungsmittel [Heise 2001]. Der Betriebstemperaturbereich liegt zwischen -20 °C und $+40\text{ °C}$. Der Innenwiderstand steigt mit abnehmender Temperatur stark an. Die Energiedichte wird mit 78 Wh/kg angegeben [Heise 1999]. Der Vorteil gegenüber einer Li-Ionen-Batterie herkömmlicher Bauart liegt in der größeren Flexibilität des mechanischen Aufbaus.

2.6 Natrium-Schwefel-Batterie

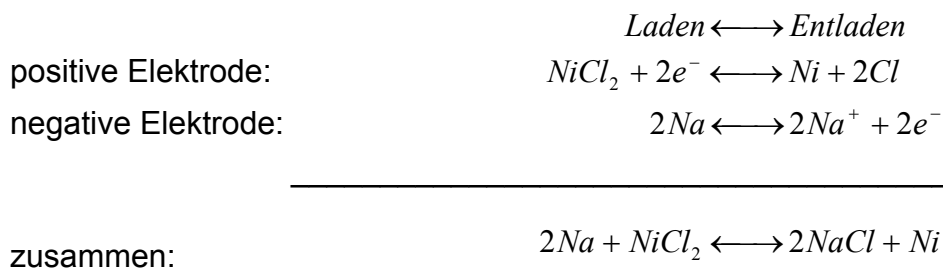
Diese Batterie ist eine Hochtemperaturbatterie. Ihre Betriebstemperatur liegt bei 300 °C bis 350 °C . Als positive Elektrode wird flüssiger Schwefel und als negative Elektrode flüssiges Natrium eingesetzt. Als Elektrolyt wird eine ionenleitende $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ -Keramik eingesetzt. Die Reaktionsgleichungen lauten:



Der Faktor x in den Reaktionsgleichungen liegt im Bereich $x = 2,7..5$. Die theoretische Energiedichte beträgt 795 Wh/kg, die praktische Energiedichte 90 bis 120 Wh/kg. Die NaS-Batterie hat keine elektrochemische Selbstentladung. Allerdings kann die zum Aufrechterhalten der Betriebstemperatur notwendige Energie als Selbstentladung betrachtet werden.

2.7 Natrium-Nickelchlorid-Batterie

Die Natrium-Nickelchlorid-Batterie ist ebenfalls eine Hochtemperaturbatterie. Ihre Betriebstemperatur liegt bei 300 °C. Die positive Elektrode besteht aus Nickelchlorid, die negative Elektrode aus flüssigem Natrium. Als Elektrolyt wird eine ionenleitende β - Al_2O_3 -Keramik eingesetzt. Da die positive Elektrode aus festem Nickelchlorid besteht, muss zusätzlich ein schmelzflüssiger Sekundär-Elektrolyt, NaAlCl_4 , eingesetzt werden. Beide Elektrolyten nehmen nicht an der Reaktion teil. Sie dienen nur zur Leitung der Natrium-Ionen. Die Reaktionsgleichungen lauten:



Die Ruhespannung beträgt 2,59 V, unabhängig vom Ladezustand. Wie bei der NaS-Batterie gibt es auch hier keine elektrochemische Selbstentladung. Allerdings kann die zum Aufrechterhalten der Betriebstemperatur notwendige Energie als Selbstentladung betrachtet werden. Die theoretische Energiedichte errechnet sich zu 719 Wh/kg. Praktisch werden 90 bis 100 Wh/kg erreicht.

2.8 Weitere elektrochemische Speichersysteme

Die Zink-Brom-Batterie weicht vom Aufbau von der klassischen Zelle ab. Bei ihr ist das aktive Material der positiven Elektrode nicht in den Elektroden gelagert, sondern geladen wie ungeladen in gelöster Form in einem separaten Tank. Der Elektrolyt besteht aus einer wässrigen Zink-Brom-Lösung und einer organischen bromkomplexierenden Komponente. Beim Laden wird an der negativen Elektrode Zink abgeschieden. Das an der positiven Elektrode entstehende Brom wird durch die organische Komponente des Elektrolyten komplexiert und in einem separaten Tank gespeichert. Beim Entladen wird der Brom-Komplex durch das Zellenpaket gepumpt und das Brom an der positiven Elektrode elektrochemisch zu Bromid entladen. Gleichzeitig wird an der negativen Elektrode das Zink abgebaut [Tomazic 1992].

Die Zink-Luft-Batterie benutzt als positive Elektrode einen porösen Körper aus Kohlenstoff. An dieser Elektrode wird Sauerstoff der Luft reduziert. Das aktive Material ist also nicht in der Elektrode enthalten. Die negative Elektrode wird nach Entladung gegen eine neue ausgetauscht. Damit werden die Probleme des Wiederaufladens von Zinkelektroden, wie z.B. Dendritenbildung, umgangen. Die verbrauchten Zink-Elektroden werden in einer Regenerationsanlage aufbereitet und damit wieder geladen [Harats 1995].

Die beiden Systeme Zink-Brom- und Zink-Luft-Batterie sind vom Markt verschwunden. Sie werden ebenso wie hier nicht näher beschriebene System, wie z.B. die Ni-Fe- oder die LiFeS-Batterie nicht in die Untersuchungen mit einbezogen. Dies gilt auch für Batterien, die bisher nur als Prototypen existieren, wie z.B. die bipolare NiMh-Batterie [Ohms 2001] oder die Lithium-Metall-Batterie für die Elektrotraktion [Stassen 2001].

2.9 Verfügbare Batterien

In Tabelle 2.1 sind die charakteristischen Werte von verfügbaren Batterien zusammengefasst. Zu beachten ist, dass die Ruhespannung der Bleibatterie von der Säuredichte und die Ruhespannung der NiCd- und NiMh-Batterie vom Oxidationsgrad der positiven Elektrode abhängt. Der Wasserstoff als negative Elektrode der NiMh-Batterie ist in speziellen Legierungen absorbiert.

Tabelle 2.1 Charakteristische Werte der verfügbaren Batterien

Batterietyp	negative Elektrode	positive Elektrode	Elektrolyt	Ruhe-spannung V	Betriebs-temperatur °C	prakt. spez. Energie Wh/kg
Blei	Pb	PbO ₂	H ₂ SO ₄	2	-10 bis +50	20-40
Nickel-Cadmium	Cd	NiOOH	KOH	1,3	-40 bis +50	20-55
Nickel-Metallhydrid	H ₂	NiOOH	KOH	1,3	-10 bis +50	50-80
Lithium-Ionen (Mangan)	LiC	LiMn ₂ O ₄	organisch + Lithium-Salz	3,6	-20 bis +50	100
Lithium-Ionen (Nickel)	LiC	LiNiO ₂	organisch + Lithium-Salz	3,6	-10 bis +45	145-185
Lithium-Polymer (fest)	Polymer + Graphit	Polymer + Lithium	Polyäthylen-Oxid	3,6	0 bis +90	120
Lithium-Polymer (flüssig)	Polymer + Lithium + Graphit	Polymer + Lithium-Metalloxid	organisch + Lithium-Salz	3,6	-20 bis +40	80
Natrium-Schwefel	Na	S	β-Al ₂ O ₃ -Keramik	2,08	+300 bis +350	90-120
Natrium-Nickel-Chlorid	Na	NiCl ₂	β-Al ₂ O ₃ -Keramik /NaAlCl ₄	2,6	+280 bis +350	90-110

Die Batterien nach Tabelle 2.1 sind am Markt erhältlich oder stehen kurz vor der Markteinführung. Für die weiteren Untersuchungen werden deshalb nur diese berücksichtigt.

3 Einflüsse auf Batterien

Im Betrieb unterliegt die Batterie einer Vielzahl von Einflussfaktoren. Das Verhalten der Batterie ist z.B. abhängig von der Batterietemperatur, dem Entladegrad oder der Stromentnahme. Weitere Probleme im Betrieb sind u.a. Alterung oder Korrosion. Aber auch bereits in der Fertigung wird in vielfältiger Weise auf die Batterie Einfluss genommen.

3.1 Einflüsse in der Fertigung

Die ideale Batterie ist so gefertigt, dass sie die in Kapitel 1 spezifizierten Forderungen erfüllt. Weiter weisen ideale Batteriezellen unabhängig von Fertigungsstreuungen immer dasselbe Verhalten auf. Es stellt sich nun die Frage, wie weit sich eine real gefertigte Batterie von einer ideal gefertigten Batterie unterscheidet.

Nach Kapitel 2 sind von den theoretisch möglichen Kombinationen für elektrochemische Zellen nur eine verhältnismäßig geringe Anzahl als Batterien verfügbar. Es werden allerdings bei einigen Batterietypen verschiedene Bauarten je nach Einsatzzweck unterschieden. Eine große Vielfalt bietet die Bleibatterie. Eine Unterscheidung erfolgt hier nach der Bauart der positiven Elektrode, da die negative Elektrode nahezu immer mit dem gleichen Aufbau als Gitterplatte ausgeführt wird [Linden 1995].

Die Planté-Platte besteht aus einem massiven aus Blei gegossenem Körper, dessen Oberfläche durch Rippung vergrößert wird. Sie wird heute noch im Bereich der ortsfesten Batterien eingesetzt. Der Vorteil der Planté-Platten liegt in der Langlebigkeit, da sich aufgrund des massiven Bleikörpers die Korrosion hier nur wenig auswirkt. Positiv ist auch der massive Ableiter, der eine hohe Belastung ermöglicht. Nachteilig ist das hohe Gewicht aufgrund des großen Bleieinsatzes.

Bei den Röhrenplatten, auch Panzerplatten genannt, erfolgt die Stromableitung durch zentrale Bleistäbe mit einem Durchmesser von ca. 3 mm. Diese Bleistäbe sind von dem aktiven Material umgeben, welches durch eine Hülle aus Gewebe oder Vlies fixiert wird. Der Vorteil der Röhrenplatte ist, dass der zentral liegende Ableiter eine gleichmäßige Stromverteilung zum aktiven Material hin bewirkt und damit eine gute Ausnutzung des aktiven Materials erreicht wird. Dies wiederum führt zu einer hohen zyklischen Lebensdauer. Von Nachteil ist die relativ große Plattendicke, welche durch die nur mit einem minimalen Durchmesser von ca. 8 mm herstellbaren Röhren bedingt ist. Dies führt zu einer geringeren Energiedichte und zu schlechteren Hochstromeigenschaften als bei Gitterplatten-Batterien. Der Einsatz ist daher auf konventionelle Traktionsbatterien und ortsfeste Anwendungen beschränkt.

Die weitaus größte Verbreitung haben die Gitterplatten, die gegossen, gestanzt oder als Streckmetall eingesetzt werden.

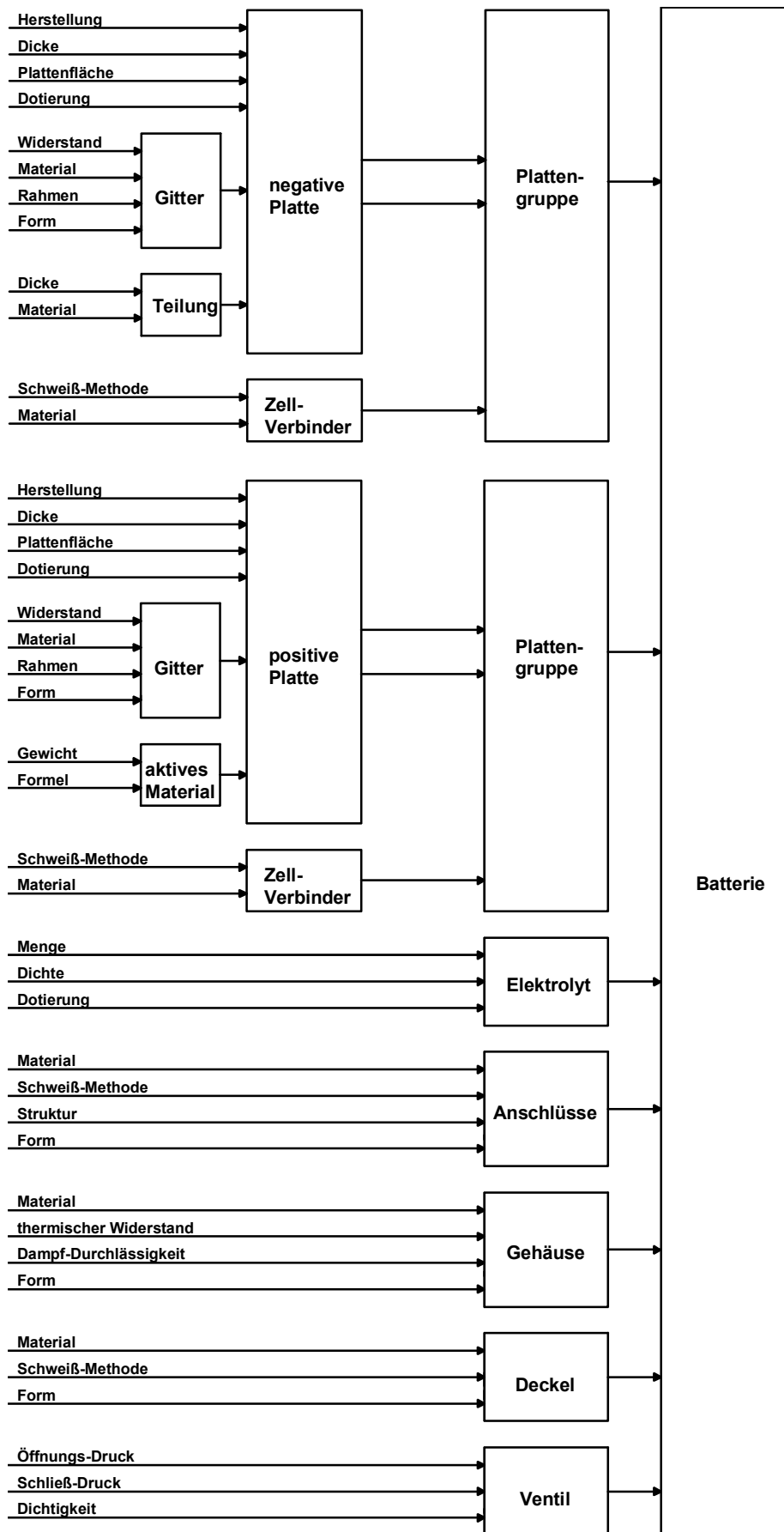


Bild 3.1 Einflüsse in der Fertigung auf eine Bleibatterie

Bei diesen Platten ist der Träger zugleich Stromableiter und mechanisches Stützgerüst des aktiven Materials. Die 12V-Kfz-Bordnetzbatterie ist der bekannteste Vertreter dieser Bauart. Diese Batterie hat aufgrund der relativ dünnen Gitterplatten eine gute Hochstromfähigkeit. Allerdings ist sie für eine zyklische Belastung mit großer Zyklentiefe, wie z.B. im Elektro- oder Hybrid-Fahrzeug, nicht geeignet. Für diese Anwendungsfälle werden spezielle Gitterplatten-Batterien eingesetzt, bei denen der Elektrolyt in Form von Gel gebunden oder in einem mikroporösen Glasfaservlies gehalten wird. Diese Bauart findet auch Anwendung in Stationärbatterien.

Die Bauart hat vor allem einen Einfluss auf das Einsatzgebiet der Batterien. Innerhalb der Bauarten treten weitere beeinflussende Faktoren auf, wie Bild 3.1 zeigt. Danach spielen Faktoren wie z.B. Zusammensetzung der verwendeten Materialien, Dicke und Form der Elektroden, Zusammensetzung des Elektrolyten oder gewollte und ungewollte Verunreinigungen eine Rolle. Schon hier lässt sich erahnen, dass bei einer solchen Vielzahl von Faktoren die ideale Batterie praktisch nicht fertigbar ist.

Als Beispiel wird die positive Elektrode betrachtet. Diese bestimmt aufgrund ihrer Ausführung nicht nur das typische Einsatzgebiet einer Bleibatterie, sondern ihre Dotierung oder Legierung hat auch einen großen Einfluss auf die Einsetzbarkeit der Batterie. Die Dotierung stellt u.a. eine gute mechanische Bearbeitbarkeit sicher. Tabelle 3.1 zeigt dazu typische Dotierungsstoffe [Berndt 2001].

Tabelle 3.1 Typische Dotierungsstoffe für das positive Gitter

Legierungsgruppe	Zusätze	Anwendungsgebiete
Standard Antimon	4-11 % Sb As, Sn, Cu (Ag)	konventionelle Antriebsbatterien
Antimonarm	0,5 - 3,5 % Sb Feinkornzusatz: Se, Te, S, Cu zusätzl. As, Sn, (Ag)	wartungsarme bzw. wartungsfreie Batterien (ortsfest, Antriebsbatterie, Kfz-Starterbatterien)
Standard Calcium	0,06 - 0,12 % Ca 0 bis 3% Sn (Al)	geschlossene und verschlossene ortsfeste Batterien, Kfz-Starterbatterien
Niedrig Calcium	0,02 - 0,05 % Ca 0,3 - 3 % Sn; Ag 0,008 - 0,012 % Al	verschlossene Batterien, Kfz-Starterbatterien (kontinuierliche Plattenfertigung)
Blei/Zinn	0,2 - 2 % Sn	verschlossene Batterien (Gitter, Kopfblei)
Feinblei	-	pos. Großoberflächenplatten, BELL System Rundzelle, AT&T
ASTAG, ASTATIN	0,009 % As, 0,065 % Te 0,08 % Ag ASTATIN: zusätzlich Sn	U-Boot-Batterien, ortsfeste Batterien
Antimon/Cadmium (MFX)	1,5 % Sb; 1,5 % Cd	verschlossene ortsfeste Batterien

In anderen Literaturstellen werden z.B. für „Antimonarm“ Werte von 0,3 - 3 % Sb und für „Standard Calcium“ Werte von 0,05 - 0,08 % Ca angegeben [Kiehne 1980]. Aus obigen Angaben und aus Tabelle 3.1 ist die Vielfalt des Faktors „Dotierung positive Platte“ zu erkennen.

Die Auswirkungen der Dotierung werden am Beispiel des Antimons näher untersucht. Antimon wird aus Gründen einer besseren Stabilität der aktiven Masse und einer besseren mechanischen Bearbeitbarkeit des Materials der positiven Elektrode zugesetzt. Allgemein gilt, dass die Dotierung mit Antimon einen ungünstigen Einfluss auf die Wasserstoffentwicklung an der negativen Elektrode hat. Bild 3.2 zeigt die Wasserstoffentwicklung an verschiedenen Stoffen [Berndt 2001]. Dazu ist das Gleichgewichtspotential der Wasserstoff-Elektrode (Nullpunkt) aufgetragen. Die Abweichung davon (-0,32 V) ist die Polarisierung. Dieser Punkt entspricht dem Gleichgewichtspotential der negativen Elektrode. Die vertikale Achse zeigt die Wasserstoffentwicklung als Strom-Äquivalent. Diese Achse ist logarithmisch geteilt, so dass die mit zunehmend negativer Polarisierung exponentiell ansteigende Wasserstoffentwicklung zu einem „geraden“ Verlauf führt. Diese Geraden werden nach Tafel auch als TAFEL-Geraden bezeichnet [Tafel 1905].

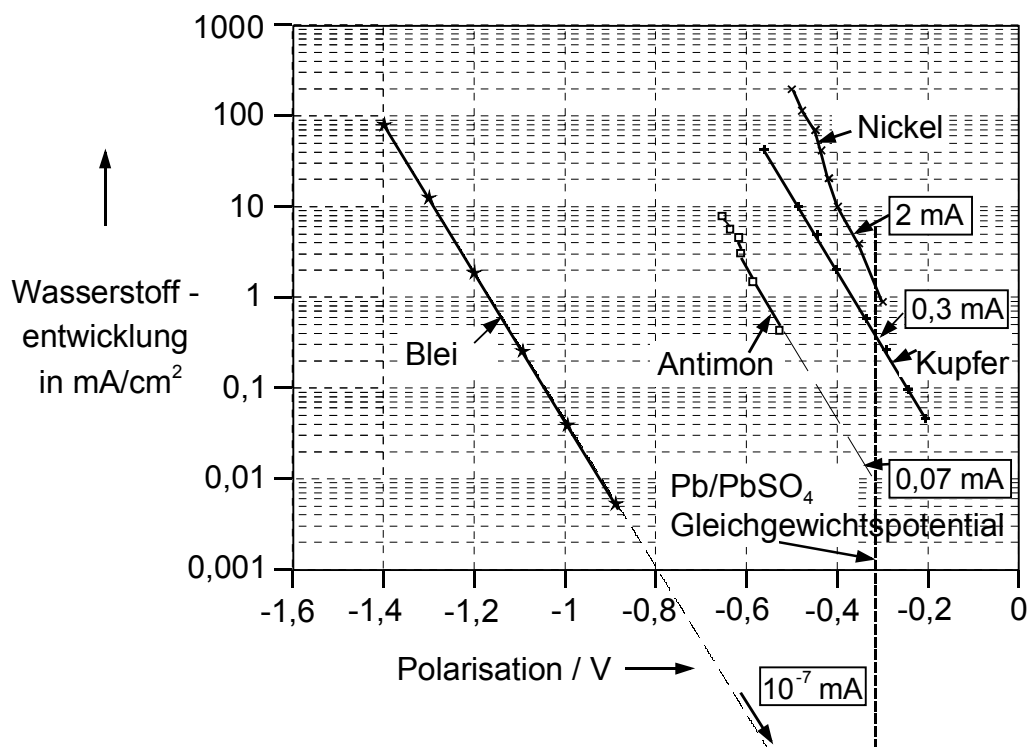


Bild 3.2 Wasserstoffentwicklung an verschiedenen Stoffen

In Bild 3.2 ist zu erkennen, dass beim Gleichgewichtspotential der negativen Elektrode die Wasserstoffentwicklung an Nickel oder Kupfer um mehrere Faktoren größer ist als am Blei selbst. Auch das Antimon führt zu einer Vergrößerung der Wasserstoffentwicklung an der negativen Elektrode. Dies bedeutet, dass ein Antimon-Zusatz einen Einfluss auf die Batterie in der Art hat, dass mit fortschreitender Betriebszeit

der Batterie, während der der ungünstige Einfluss um ein Vielfaches ansteigt, ein großer Wasserverlust und damit einhergehend auch eine entsprechende thermische Mehrbelastung auftritt. Der Einfluss steigt deswegen an, weil das Antimon aus der positiven Elektrode austritt, in den Elektrolyt übergeht und so zur negativen Elektrode gelangen kann. Dieses Verhalten wird auch mit "Antimon-Vergiftung" bezeichnet. Da allerdings, wie in Tabelle 3.1 beschrieben, der Antimongehalt in einem großen Bereich von 4 % bis 11 % schwanken kann, schwankt damit auch die unerwünschte Wasserstoffentwicklung und damit auch die Zyklenstabilität der Batterie.

Bei den antimonarmen Legierungen wird die erhöhte Wasserstoffentwicklung weitgehend vermieden, die Stabilisierung des aktiven Materials der positiven Elektrode bleibt aber trotzdem weitgehend erhalten. Der Antimongehalt schwankt hier nach Tabelle 3.1 um den Faktor 10. D.h. der Antimongehalt hat auch bei den antimonarmen Batterien einen, wenn auch mit oben verglichen, wesentlich geringeren Einfluss auf die Batterie. Allerdings stellt der geringe Antimon-Anteil nicht mehr die gute mechanische Bearbeitbarkeit des Materials sicher, weswegen dieses einen „Feinkornzusatz“, siehe Tabelle 3.1, Zeile 2, benötigt.

Eine Legierung mit Calcium (Tabelle 3.1) reduziert die Wasserstoffentwicklung und damit den Wasserverlust erheblich. Allerdings sind dann die verminderte Zyklenstabilität des aktiven Materials der positiven Elektrode und die Neigung zum Gitterwachsen von Nachteil. Unter Gitterwachsen wird die unerwünschte Dehnung von Elementen des positiven Gitters durch Scherkräfte der beim Laden entstehenden Bleidioxid-Schicht verstanden. Eine Reduzierung des Calcium-Anteils führt zu einem geringeren Gitterwachsen zum anderen aber dazu, dass die Legierung so weich wird, dass Fertigungsverfahren mit gegossenen Gittern nicht mehr angewendet werden können.

Die Problematik der Wasserstoffentwicklung nach Bild 3.2 schlägt sich auch in der an Batterie-Materialien geforderten Reinheit nieder. Tabelle 3.2 zeigt zulässige Verunreinigungen des ungebrauchten Elektrolyten [Garten 1974].

Wie Tabelle 3.2 zu entnehmen, ist Antimon mit 1 mg/l zulässig. Ebenso dürfen Kupfer mit 0,5 mg/l und Nickel mit 1 mg/l enthalten sein. Tabelle 3.2 gilt für ungebrauchte Zellsäure.

Tabelle 3.2 Höchstzulässige Verunreinigungen von verdünnter Schwefelsäure zum Füllen von Bleiakкумуляtoren

Verunreinigungen	mg/l	
Platinmetalle zusammen	0,05	
Kupfer	0,5	
Sonstige Metalle der Schwefelwasserstoffgruppe, z.B. Arsen, Antimon, Zinn, Wismut (abgesehen von Blei)	einzeln	1
	zusammen	2
Mangan, Chrom, Titan einzeln	0,2	
Eisen	30	
Sonstige Metalle der Ammoniumsulfidgruppe, z.B. Kobalt, Nickel (abgesehen von Aluminium und Zink)	einzeln	1
	zusammen	2
Fluor, Chlor, Brom, Jod zusammen	5	
Stickstoff in Form von Ammoniak	50	
Stickstoff in anderer Form, z.B. Salpetersäure	10	
Schwefeldioxid oder Schwefelwasserstoff	20	
Flüchtige organische Säuren (berechnet als Essigsäure)	20	
Oxidierbare organische Substanzen, entsprechend einem Verbrauch von KMnO_4	30	

Tabelle 3.3 zeigt die höchstzulässige Verunreinigung gebrauchter Zellsäure [Garten 1974]. In dieser Tabelle ist zu erkennen, dass, wie oben beschrieben, das Antimon aus der positiven Elektrode in den Elektrolyt übergeht und damit an der negativen Elektrode eine vermehrte Wasserstoffentwicklung verursacht. Der erhöhte Anteil an Kupfer rührt daher, dass im negativen Gitter zur besseren Stromableitung und zur Gewichtsreduzierung ein Kern aus Kupfer eingesetzt wird. Dieser wird zwar mit Blei komplett ummantelt, aber trotzdem kann Kupfer in Spuren so in den Elektrolyt gelangen. Weiter ist zu beachten, dass Antimon, Fluor, Chlor, Brom und Jod in Abhängigkeit von der Batterie-Bauart in verschiedenen Konzentrationen vorkommen dürfen.

Tabelle 3.3 Höchstzulässige Verunreinigungen gebrauchter Zellsäure in geladenem Zustand der Zellen

Verunreinigungen	mg/l
Platinmetalle zusammen	0,05
Kupfer	1,5
Sonstige Metalle der Schwefelwasserstoffgruppe, z.B. Arsen, Zinn, Wismut (abgesehen von Blei und Antimon)	einzel zusammen
	3 6
Antimon	
Gro-Zellen	3
GiS/PzS-Zellen	10
Mangan, Chrom, Titan einzel	0,2
Eisen	100
Sonstige Metalle der Ammoniumsulfidgruppe, z.B. Kobalt, Nickel (abgesehen von Aluminium und Zink)	einzel zusammen
	1 2
Fluor, Chlor, Brom, Jod	
Gro-Zellen zusammen	15
GiS/OPzS-Zellen zusammen	200
PzS-Zellen zusammen	500
Stickstoff in Form von Ammoniak	50
Stickstoff in anderer Form, z.B. Salpetersäure	10
Schwefeldioxid oder Schwefelwasserstoff	20
Flüchtige organische Säuren (berechnet als Essigsäure)	20
Oxidierbare organische Substanzen, entsprechend einem Verbrauch von $KMnO_4$	30

Aus obiger Darstellung lässt sich entnehmen, dass die Art und Dotierung der positiven Elektrode einen großen Einfluss auf die spätere Einsetzbarkeit der fertigen Batterie hat. Entsprechend wirken sich Toleranzen z.B. bei der Gitterherstellung aus. So wirken sich zu dünne Gitter negativ auf die Korrosionsfestigkeit und die Zyklenstabilität aus. Eine quantitative Aussage lässt sich hier nicht treffen, da über Gittertoleranzen in der Literatur keine konkreten Angaben vorliegen. Generell gilt, dass eine ausreichende Korrosionsreserve vorhanden sein muss, da das Trägermaterial der positiven Elektrode, Blei oder entsprechende Legierungen, beim Betrieb der Batterie einer ständigen Korrosion unterliegt. Bei der negativen Elektrode ist zu beachten, dass Leitmaterial, wie z.B. Kupfer, durch Blei vollständig abgedeckt wird. Ansonsten kommt es, wie in Bild 3.2 beschrieben, zu störender Wasserstoffentwicklung.

Verschlossene Bleibatterien sind mit einem Ventil ausgerüstet. Dieses lässt bei Überdruck Wasserstoff entweichen. Deswegen werden in der englischsprachigen Literatur diese Batterien als Valve Regulated Lead Acid Batteries (VRLA) bezeichnet. Könnte der Wasserstoff nicht abgelassen werden, würde der interne Sauerstoffkreislauf gestört [Berndt 2001a]. Hierbei sind der Öffnungs- und Schließdruck des Ventils ganz entscheidend.

Die verschiedenen Faktoren, die Streuung und Toleranzen einzelner Parameter und Einflussgrößen sind zwar im Einzelnen beschreibbar, aber ihr Zusammenspiel lässt sich nur schwer abschätzen. Ein Versuch der Abschätzung wird mit der Taguchi-Methode versucht [Taniguchi 1994]. Die Taguchi-Methode ist eine Methode zur statistischen Versuchsplanung, die die Qualität mit berücksichtigt [Taguchi 1985]. Diese Methode wird hier dazu verwendet, sowohl den Einfluss von ausgewählten Fertigungsgrößen als auch den Einfluss von Betriebsgrößen auf die Batterie zu bestimmen. Es ergibt sich allerdings aus diesen Untersuchungen keine geschlossene Aussage über das Batterieverhalten.

Die Bleibatterie ist vom Prinzip her bereits seit knapp 150 Jahren bekannt [Sinsteden 1854]. Seither ist es aber trotz intensiver Forschung nicht gelungen, alle Einflüsse der Fertigung zu beschreiben. Das bedeutet, dass die ideale Bleibatterie durch Modifikation der Fertigung nicht erreicht werden kann.

Auch bei anderen Batterie-Typen gibt es verschiedene Bauarten. So werden bei NiCd-Batterien offene und gasdichte Ausführungen unterschieden. Bei ersteren kommen Taschenplattenelektroden, gesinterte Elektroden oder Faserstrukturelektroden zum Einsatz. Taschenplattenelektroden bestehen aus vernickeltem Stahlband als Grundträger, auf das die entsprechende aktive Masse aufgebracht wird. Faserstrukturelektroden werden aus einem Nickel-Verbundwerkstoff aufgebaut. Dies ergibt eine sehr gute Anbindung der aktiven Masse. Die Faserstruktur ermöglicht eine höhere Stromentnahme und auch eine schnellere Ladung als die Taschenplatten. Weiter ist der Restladestrom nach Erreichen der Ladeschlussspannung bei der Fasertechnologie deutlich geringer als bei Taschenplatten-Zellen. Dies bedeutet einen geringeren Wasserverbrauch der Faserplatten-Zellen in der Nachladephase. Das gleiche gilt für die Erhaltungsladung. Zellen mit Taschenplatten und Zellen mit Faserstrukturplatten werden im Traktionsbereich eingesetzt [Müllejans 1999].

Bei den gasdichten Zellen wird der interne Sauerstoffkreislauf durch eine Lade- und Entladereserve unterbunden. Diese Zellen haben keinen Wasserverlust, sind aber empfindlicher gegenüber hohen Temperaturen als offene Zellen [Berndt 2001a].

NiMh-Zellen müssen gasdicht ausgeführt werden, da ansonsten der Wasserstoff, der das aktive Material der negativen Elektrode darstellt, entweichen würde. Hier ist, wie bei den gasdichten NiCd-Zellen, eine Entlade- und Ladereserve vorhanden. Weiter existieren NiMh-Zellen, die speziell als Hochenergie-Zellen, als Hochleistungs-Zellen oder als Höchstleistungs-Zellen ausgelegt sind [Köhler 1997].

Anhand der verschiedenen Bauarten ist bei den NiCd- und NiMh-Batterien zu erkennen, dass auch hier die Fertigung einen großen Einfluss auf das Wesen der Batterie hat.

Li-Ionen-Batterien arbeiten auf der Basis von Intercalations-Verbindungen. D.h. es werden Lithium-Ionen in Schichtengitter geeigneter Träger, Oxide oder Graphit, eingelagert, ohne dass es zu einer echten chemischen Bindung kommt. Bei den Li-Ionen-

Batterien verbleibt während der ersten Entladung ein Teil des Lithiums in einer Schicht aus Lithium-Verbindungen an der Graphitoberfläche. Diese Reaktion des Lithiums mit dem Elektrolyten führt zu irreversiblen Kapazitätsverlust. Hierbei spielen neben der Zusammensetzung des Elektrolyten andere Parameter, wie Grad der Graphitierung und die Teilchengröße eine entscheidende Rolle, so dass diese Batterie ebenfalls nicht als ideale Batterie gefertigt werden kann.

Auch die Hochtemperaturbatterien NaS und NaNiCl entsprechen nicht einer idealen Batterie. Zwar ist der Ah-Wirkungsgrad der NaS-Batterie Eins, da hier keine Nebenreaktionen auftreten. Aber ein wiederholtes Auskühlen und Aufheizen der Batterie kann zu einer Schädigung einzelner Zellen bis hin zu deren Ausfall führen. Weiter werden bei beiden Typen an die Fertigungsqualität des Elektrolyten hohe Anforderungen an Reinheit, Homogenität und Genauigkeit gestellt.

Insgesamt betrachtet ist es möglich einzelne Zellen durch Parametervariation auch für spezielle Zwecke zu fertigen. Unterschiede in der Fertigung allerdings treten erst mit zunehmender Zellenzahl einer Batterie zu Tage. So funktioniert eine 12V-Kfz-Bordnetzbatterie über vier bis sechs Jahre zufriedenstellend. Hier sind allerdings auch nur sechs Zellen in Reihe geschaltet. Zudem stammen die Platten jeweils aus einer Charge. Batterien aus einer Charge, die z.B. in der Traktion eingesetzt werden, können dagegen bereits bei Anlieferung in der Kapazität voneinander abweichen [Kalker 1994]. Hier betrug die Abweichung bei Anlieferung rund $\pm 10\%$. Aufgrund der Reihenschaltung der Zellen werden alle Zellen mit demselben Strom entladen und geladen. Unterschiede in der entnehmbaren Ladung einzelner Zellen oder ungleiche Anfangsladezustände führen daher nach längerem Betrieb dazu, dass Zellen mit geringerem Anfangsladezustand oder geringerer entnehmbarer Ladung nicht mehr vollständig geladen werden im Vergleich zu Zellen mit größerem Anfangsladezustand oder größerer entnehmbarer Ladung. Damit ist eine Schädigung oder Zerstörung der Batterien unvermeidbar. Auch aus dem Bereich der USV-Anlagen gibt es Beispiele für Abweichungen von Batterien nach der Fertigung [Lohner 1998]. Dort wurden 92 Bleibatterien aus einer Charge untersucht, um die Streuung der entnehmbaren Ladungen und Anfangsladezustände zu bestimmen. Es stellte sich heraus, dass fünf dieser Batterien schon bei Anlieferung nach Definition nach DIN43539 defekt waren. Diese Norm besagt, dass verschlossene Bleibatterien, die beim ersten Zyklus nicht mindestens 95 % und beim dritten Zyklus nicht mindestens 100 % der im Datenblatt angegebenen Nennladung erreichen, als defekt zu betrachten sind [DIN43539, 1985]. Von den Batterien, die die Norm erfüllten, lagen die besten Batterien rund 7 % über der Nennkapazität, die von den schlechtesten gerade erreicht wurde. Die hier beschriebenen Streuungen lassen umgekehrt auf die Toleranzen in der Fertigung schließen.

Generell muss die Fertigung so ausgelegt sein, dass die Norm DIN43539 immer erfüllt wird. Dies erklärt auch die „Überkapazität“ einiger Batterien in der oben beschriebenen Untersuchung [Kalker 1994]. Dort wurden 19 neue Batteriesätze für Elektrostraßenfahrzeuge getestet, allesamt verschlossene Bleibatterien. Die Anfangskapazitäten lagen zwischen 90% und 110% der Nennkapazität. Auch hier lässt sich aus der Größe der Unterkapazität und der Überkapazität, die einige Batterien der glei-

chen Charge aufweisen, umgekehrt wiederum auf die Toleranzbreite der Batterieherstellung schließen.

Die gleichen Probleme treten bei den Gerätebatterien auch auf. Da allerdings hier in der Regel nur wenige Zellen in Reihe geschaltet werden, wirken sich statistisch betrachtet die Ausreißer weniger aus.

Batterien können in der Fertigung zwar durch Parametervariationen für bestimmte Einsatzzwecke optimiert werden, es lässt sich aber leicht erkennen, dass die ideale Batterie nicht gefertigt werden kann. Um die Streuung der Batterien, die sich vor allem im vielzelligen Betrieb negativ auswirkt, zu kompensieren, sind Systeme zur Batterieüberwachung und Batteriebeeinflussung notwendig.

3.2 Einflüsse bei Transport und Lagerung

Eine Batterie erfährt, wie auch alle sonstigen Bauelemente, einen Einfluss durch den Transport und die Lagerung. Einen Transport, bei dem die Parameter Rüttelfestigkeit und zulässiger Temperaturbereich nicht überschritten werden, sollte eine Batterie unbeschadet überstehen, zumal im Falle der Kfz-Anwendung, als Traktions- oder Starterbatterie, oder in Geräten, diese sozusagen laufend transportiert wird. Die Lagerung dagegen hat durchaus einen Einfluss auf die Batterie.

Ein Effekt der Lagerung ist die Selbstentladung. Während einer Zeit im Stand-By, wenn also die Batterie weder geladen noch entladen wird, entlädt sich die Batterie elektrochemisch von selbst. Dies trifft nach Kapitel 2 für alle dort beschriebenen Batterien außer der NaS- und der NaNiCl-Batterie zu. Die Selbstentladungsrate beschreibt den Zusammenhang zwischen der Stand-Zeit der Batterie und der Selbstentladung. Die Selbstentladerate ist abhängig vom Batterietyp, der Zeit und der Temperatur.

Tabelle 3.4 Selbstentladerate für verschiedene Batterietypen bei einer Batterietemperatur von 20 °C

Batterietyp	Selbstentladerate
Blei-Gel	< 3 %/Monat
NiCd	bis zum 15. Tag 40 %/Monat, danach 20 %/Monat (Sinterelektrode)
NiMh	ähnlich NiCd
Lithium	< 5 %/Monat

Es ist zu beachten, dass sich die Selbstentladerate bei einer Temperaturerhöhung um $\Delta\vartheta = 10 \text{ K}$ ungefähr verdoppelt.

Die Selbstentladung der Batterien nach Tabelle 3.4 beruht auf der elektrochemischen Selbstentladung. Die NaS- und NaNiCl-Batterie haben zwar keine elektrochemische Selbstentladung, benötigen aber zum Aufrechterhalten der Betriebstemperatur Heiz-

energie. Unter der Annahme, dass diese der Batterie selbst entnommen wird, wird hier für diese Batterien die thermische Selbstentladung als Selbstentladung definiert. Die Batterie gilt dabei als entladen, wenn die Betriebstemperatur nicht mehr gehalten werden kann. Für eine NaNiCl-Batterie mit einem Energieinhalt von 17,8 kWh werden thermische Verluste von 100 W angegeben [Dustmann 2000]. Dies führt zu einer Entladung in knapp 178 h, was 7,4 Tagen entspricht. Daraus errechnet sich eine Selbstentladerate von rund 13,5 % pro Tag. Eine NaS-Batterie mit einem Energieinhalt von 32 kWh kann sich 16 Tage selbst warmhalten [Angelis 1987]. Die Selbstentladerate ist damit ähnlich hoch wie bei der NaNiCl-Batterie. Damit haben diese Batterien verglichen mit denen aus Tabelle 3.4 eine wesentlich größere Selbstentladung.

NiCd- und NiMh-Batterien sind auch im entladenen Zustand lagerfähig. Dagegen wächst in der Bleibatterie, wenn diese längere Zeit ungeladen steht, die Zwischenschicht (PbO) zwischen der aktiven Schicht (PbO₂) und dem Gitter-Kern (Pb). Dies geschieht auf Kosten der PbO₂-Schicht. Dadurch entstehen Korrosionsschäden sobald die Zwischenschicht mit der Schwefelsäure in Verbindung kommt. Das Bleioxid ist gegenüber der Säure nicht beständig und bildet spontan Bleisulfat (PbSO₄) [Berndt 2001]. Bleibatterien müssen also bei längerer Lagerung im gefüllten Zustand von Zeit zu Zeit geladen werden. Unterbleibt dies, so wird die Batterie bereits während der Lagerung geschädigt, da durch die Korrosion das Gitter allmählich in Bleioxid umgewandelt wird, was einen Verlust an Leitfähigkeit und mechanischer Festigkeit bedeutet. NaS- und NaNiCl-Batterien sind im entladenen und abgekühlten Zustand lagerfähig. Allerdings muss eine gute Fertigungsqualität dem Stress beim Einfrieren der Schmelze entgegenstehen [Kahlen 1997].

3.3 Einflüsse im Betrieb

Nach der Fertigung, dem Transport und der Lagerung haben die Betriebsbedingungen einen weiteren, entscheidenden Einfluss auf eine Batterie. Bild 3.4 zeigt die für den Betrieb relevanten Faktoren.

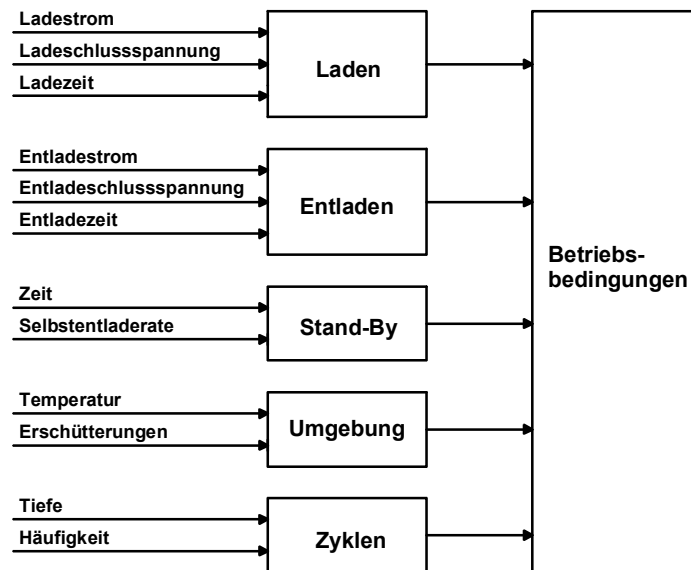


Bild 3.3 Einflussfaktoren im Betrieb auf eine Batterie

Ein wichtige Einflussgröße in Bild 3.3 ist der Entladestrom. In Abhängigkeit von der Höhe des Entladestromes reduziert sich die entnehmbare Energie aus der Batterie. Bild 3.4 zeigt die Abhängigkeit der Zellenspannung U_Z vom Entladestrom für eine Bleibatterie mit geliertem Elektrolyten (12V/18Ah) [Berndt 2001a].

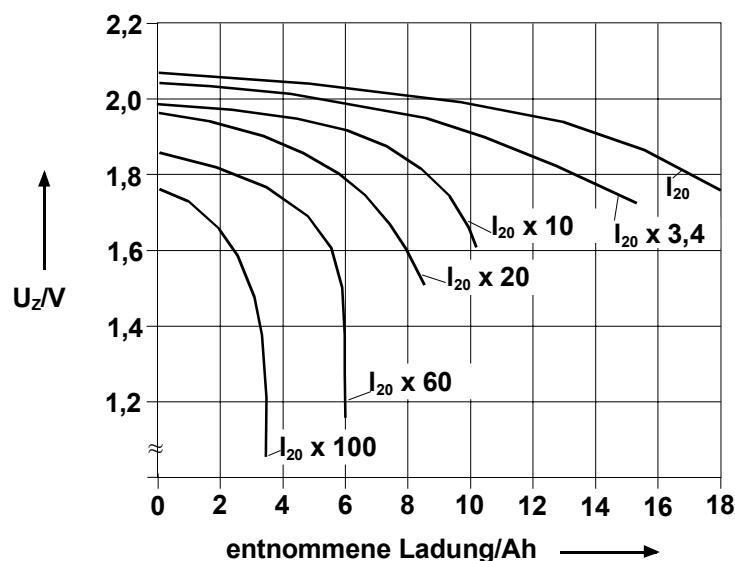


Bild 3.4 Entladekurven einer verschlossenen Bleibatterie mit geliertem Elektrolyten

Die Kurve I_{20} gilt für eine 20-stündige Entladung. Dies bedeutet hier einen Strom von 0,9 A. Bei der 2,2-minütigen Entladung fließt dagegen ein Strom von 490 A. Wie in Bild 3.4 zu erkennen ist, können bei der 2,2-minütigen Entladung nur maximal 20 % der der Gesamtladung der Batterie entnommen werden. 25 % der Energie werden in Joule-Wärme umgesetzt, die sich mit dem reversiblen Wärmeeffekt zu gut 20 % rela-

tivieren. Das Verhältnis der Wärmeeffekte in dieser Bleibatterie zeigt Bild 3.5 [Berndt 2001a].

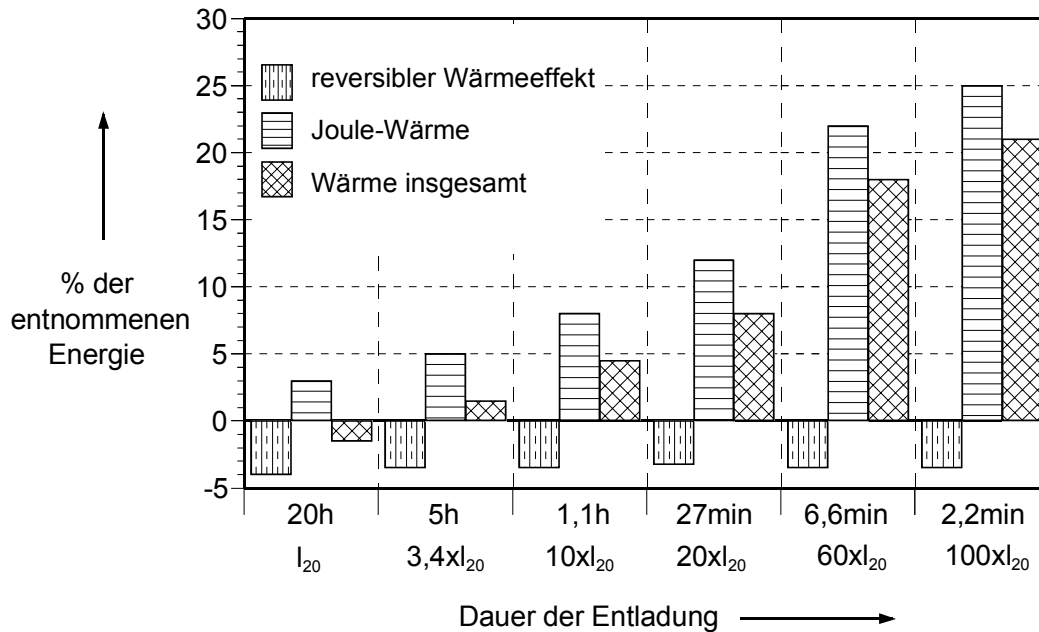


Bild 3.5 Reversibler Wärmeeffekt, Joule-Wärme und Wärme insgesamt bei einer verschlossenen Bleibatterie

Aus dem Vergleich von Bild 3.4 und Bild 3.5 ist zu erkennen, dass mit höherem Entladestrom ein immer größerer Anteil an Energie in der Batterie verbleibt. Für den Fall der 2,2-minütigen Entladung sind dies mehr als 50 %.

In der NiCd-Batterie tritt dieser Effekt ähnlich, aber nicht ganz so stark auf. Bild 3.7 zeigt die Entladekurven für eine gasdichte NiCd-Zelle (1,2V/1Ah) [Berndt 2001a].

Nach Bild 3.6 lassen sich rund 70 % der in der Batterie enthaltenen Energie für den Fall $100xI_{10}$ entnehmen. Den Anteil an Joule-Wärme zeigt Bild 3.7. Danach werden an Joule-Wärme in diesem Lastfall rund 17 % der Energie umgesetzt. Das bedeutet, dass lediglich rund 13 % nicht entnehmbar in der Zelle verbleiben.

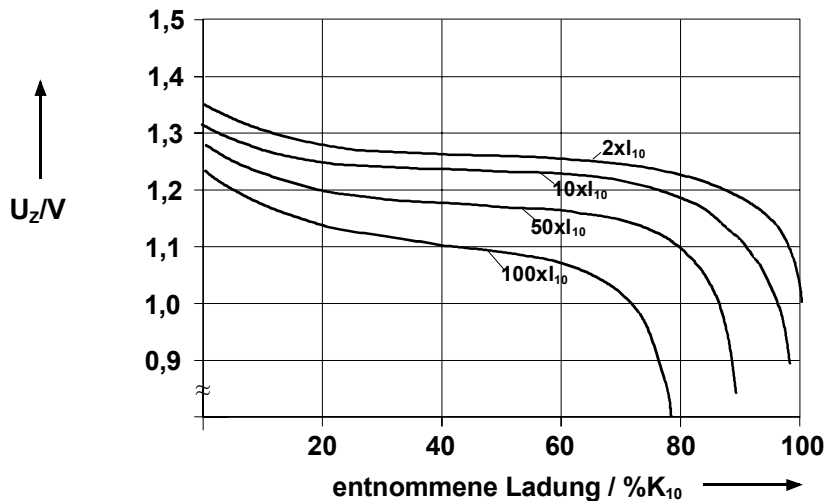


Bild 3.6 Entladekurven für eine gasdichte NiCd-Zelle

Der Vergleich unterliegt gewissen Einschränkungen, bedingt durch die unterschiedliche Baugröße der Batterien. Es zeigt sich trotzdem deutlich die bessere Hochstrombelastbarkeit der NiCd-Zelle. Dies ist ein allgemeines Kennzeichen der alkalischen Batterien und zum größten Teil darauf zurückzuführen, dass bei diesen der Elektrolyt nicht an der Elektrodenreaktion beteiligt ist, wie bereits in Kapitel 2 beschrieben wurde. Damit kann der Elektrodenabstand sehr klein sein. Dies trägt zu dem niedrigen Innenwiderstand der NiCd-Zellen bei. Bei Bleibatterien hingegen muss eine ausreichende Elektrolytmenge zwischen den Elektroden untergebracht werden, da der Elektrolyt an der Reaktion teilnimmt und sich somit mit zunehmender Entladung der Batterie der Wasseranteil im Elektrolyt erhöht. Die Unterbringung einer ausreichenden Elektrolytmenge erfordert einen Mindestabstand der Elektroden, was den Innenwiderstand erhöht.

Bild 3.7 zeigt den reversiblen Wärmeeffekt, die Joule-Wärme und die Wärme insgesamt bei der Entladung einer gasdichten NiCd-Zelle.

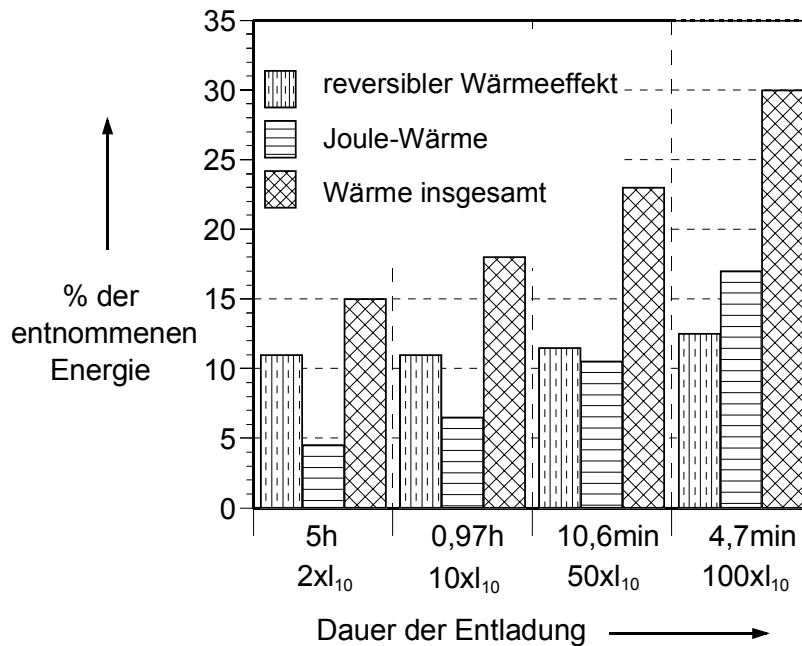


Bild 3.7 Reversibler Wärmeeffekt, Joule-Wärme und Wärme insgesamt bei einer gasdichten NiCd-Zelle

Weiter ist beim Entladen auf das Einhalten der Entladeschlussspannung zu achten. Diese ist vor allem in vielzelligen Systemen kritisch, bei denen nur die Gesamtspannung überwacht wird. Unter Umständen kann dort eine schwache Zelle tiefentladen oder gar umgepolt werden kann. Dies führt zu einer Schädigung der jeweiligen Zelle.

Ähnliche Effekte werden auch beim Laden beobachtet. Auch hier begrenzt die Joule-Wärme und die „innere Trägheit“ der Batterien den maximalen Ladestrom. Das bedeutet, dass mit einer Hochstrom-Ladung die Batterie nie ganz voll geladen werden kann. Aufgrund ihres niedrigeren Innenwiderstandes bieten die NiCd- und die NiMh-Batterie Vorteile bei der Hochstrom-Ladung gegenüber der Bleibatterie. Weiter muss die Höhe der Ladeschlussspannung beachtet werden. Eine Abweichung von $\pm 2\%$ der Ladeschlussspannung gilt für Blei- und NiCd-Batterien als zulässig [Kiehne 1980]. Für NiMh-Batterien liegen die zulässigen Abweichungen in der gleichen Größenordnung. Bei den Li-Ionen-Batterien wird zwischen den Geräte- und den Traktionsbatterien unterschieden. Für Gerätebatterien werden z.B. Toleranzen der Ladeschlussspannung von $\pm 1\%$ genannt [SAFT 2000]. Im Traktionseinsatz liegen die zulässigen Abweichungen, aufgrund des höheren Gefährdungspotentials, bei $\pm 0,5\%$.

Die Selbstentladerate wurde weiter oben bereits diskutiert. Diese ist vor allem interessant für Batterien, die einen relativ geringen Durchsatz haben und über längere Zeiträume weder geladen noch entladen werden.

Die Temperatur der Batterie hat u.a. einen entscheidenden Einfluss auf die entnehmbare Kapazität. Bild 3.8 zeigt dies anhand der Temperaturabhängigkeit der ent-

nehmbaren Kapazität q bezogen auf die Nennkapazität q_N einer NiCd-Batterie [Eveready 2000].

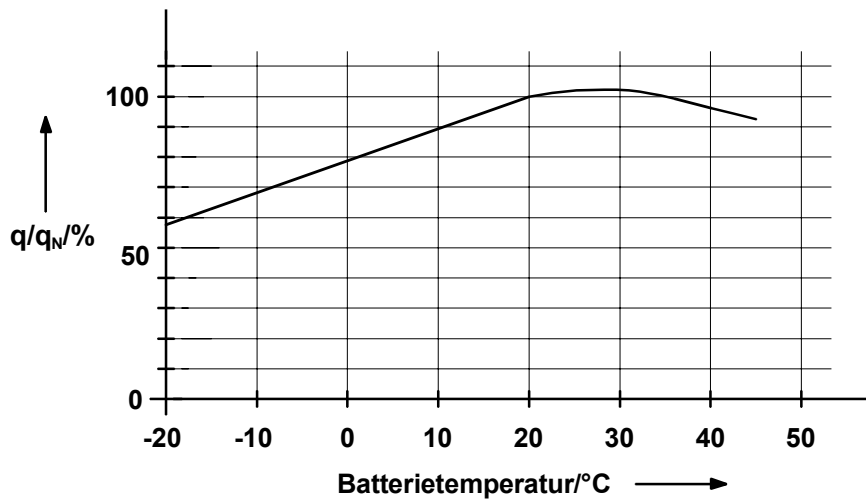


Bild 3.8 Temperaturabhängigkeit der entnehmbaren Kapazität einer NiCd-Batterie

Nach Bild 3.8 ist die entnehmbare Kapazität eine Funktion der Temperatur. Was in Bild 3.8 für eine NiCd-Batterie dargestellt ist, gilt in ähnlicher Weise auch für Bleibatterien. Bei diesen verringert sich die entnehmbare Ladung ausgehend von 30 °C bei tieferen Temperaturen um 1 %/K. Für Temperaturen unter 0 °C vergrößert sich dieser Faktor auf rund 2 %/K. Generell bedeutet dies für vielzellige Batterien, dass die einzelnen Zellen auf einer gleichen Temperatur gehalten werden müssen. Ansonsten besteht die Gefahr, dass Zellen mit zu großer Temperaturabweichung vor den übrigen Zellen tiefentladen oder umgekehrt zu viel oder zu wenig geladen werden könnten. Das Einhalten von Temperaturdifferenzen kleiner 5 K gilt dabei als hinreichend [Kalker 1994].

Weiter dürfen die Batterien bestimmte Grenztemperaturen nicht überschreiten. Auch für das Laden, Entladen und die Lagerung sind genaue Temperaturbereiche spezifiziert, wie in Tabelle 3.5 für eine NiCd-Batterie für den Einsatz im Gerätebereich gezeigt [Eveready 2000].

Tabelle 3.5 Temperaturbereiche für Laden, Entladen und Lagerung von NiCd-Batterien für den Einsatz im Gerätebereich

Betriebsart	niedrige Temperatur	hohe Temperatur
Lagerung	-40 °C	60 °C
Entladen	-20 °C	45 °C
Laden (0,15C - 0,1C)	0 °C	45 °C
Laden (0,33C)	10 °C	45 °C
Laden (1C)	15 °C	45 °C

Es ist weiter zu beachten, dass das Laden nach einer Lagerung bei negativen Temperaturen erst bei positiven Batterie-Temperaturen beginnen sollte. Weiter ist bei einer Lagerung bei hohen Temperaturen das Ansteigen der Selbstentladerate zu berücksichtigen. Beim Laden sind abhängig vom Ladestrom definierte untere Temperaturgrenzen einzuhalten.

Wie oben gezeigt wurde, ist es nicht möglich, die ideale Batterie zu fertigen. Selbst mit der Anpassung der Batterieparameter an spezielle Einsatzgebiete lässt sich dies nicht realisieren. Ebenso kann der Nutzer der Batterie Lagerungsart und -zeiten nicht beeinflussen. Nur die Faktoren im Betrieb sind vom Batterie-Nutzer messbar, erfassbar und beeinflussbar. Mit der Messung der vier Größen Spannung, Strom, Temperatur und Zeit und den daraus abgeleiteten Reaktionen kann die Betriebsqualität der Batterie erhalten und eventuell sogar verbessert werden. Dazu müssen die im Folgenden beschriebenen elektronischen Überwachungs- und Steuergeräte eingesetzt werden.

4 Batteriemanagementsysteme

In Kapitel 3 wurde ausgeführt, dass Batterien Fertigungs-, Transport-, Lagerungs- und Betriebseinflüssen unterliegen. Diese Einflüsse in Verbindung mit der Fertigungsstreuung führen vor allem mit steigender Zellenzahl zu einem nicht-deterministischen Verhalten der Batterie, falls dem im Betrieb der Batterie nicht entgegengewirkt wird. Eine den Nutzer befriedigende Funktion vielzelliger Batterien kann nur durch den Einsatz elektronischer Überwachungs- und Steuergeräte beim Betrieb der Batterie erreicht werden. Dazu werden Topologien definiert und Geräte nach dem Stand der Technik entsprechend klassifiziert.

4.1 Definitionen

Mangels einer geeigneten Nomenklatur werden für die Einteilung und Klassifizierung der elektronischen Überwachungs- und Steuergeräte eigene Definitionen eingeführt [Hauck 1997].

Teilbatterie:

Eine Teilbatterie kann eine einzelne Zelle, ein einzelnes Modul oder die Kombination einzelner Zellen oder einzelner Module sein. Ein Modul ist die Reihenschaltung mehrerer Zellen. Eine Batterie wird aus einzelnen Modulen oder einzelnen Zellen aufgebaut.

Batteriemonitor:

Batteriemonitore arbeiten beobachtend und greifen nicht aktiv ein. Es sind lediglich Warnsignale und eventuell NOTAUS-Funktionen implementiert.

Batteriemanagementsystem:

Ein Batteriemanagementsystem überwacht und steuert, greift also aktiv ein. Es wird nach Bild 4.1 in elektrisches Batteriemangement, thermisches Batteriemangement und Ladeausgleich unterteilt. Das elektrische Batteriemangement ist für die Erfassung und Verarbeitung systemrelevanter Größen zuständig. Es beinhaltet eine Signalanpassung, eine Analog-Digital-Umsetzung und einen Mikrocontroller oder Mikroprozessor. Das thermische Batteriemangement ist zuständig für das Klimatisieren der Batterie, wie Heizen, Kühlen und Belüften. Weiter fällt darunter auch die Vergleichmäßigung der Temperaturen von Teilbatterien. Der Ladeausgleich sorgt für eine möglichst gleiche Ladung der einzelnen Teilbatterien. Er wird in Abhängigkeit vom jeweiligen System während des Entladens oder Ladens oder am Ende der Ladephase eingesetzt. Das thermische Batteriemangement und der Ladeausgleich werden vom elektrischen Batteriemangement als übergeordneter Instanz gesteuert (Bild 4.1).

Batteriesystem:

Ein Batteriesystem (Bild 4.2) ist die Gesamtheit von Batterie und Batteriemanagementsystem.

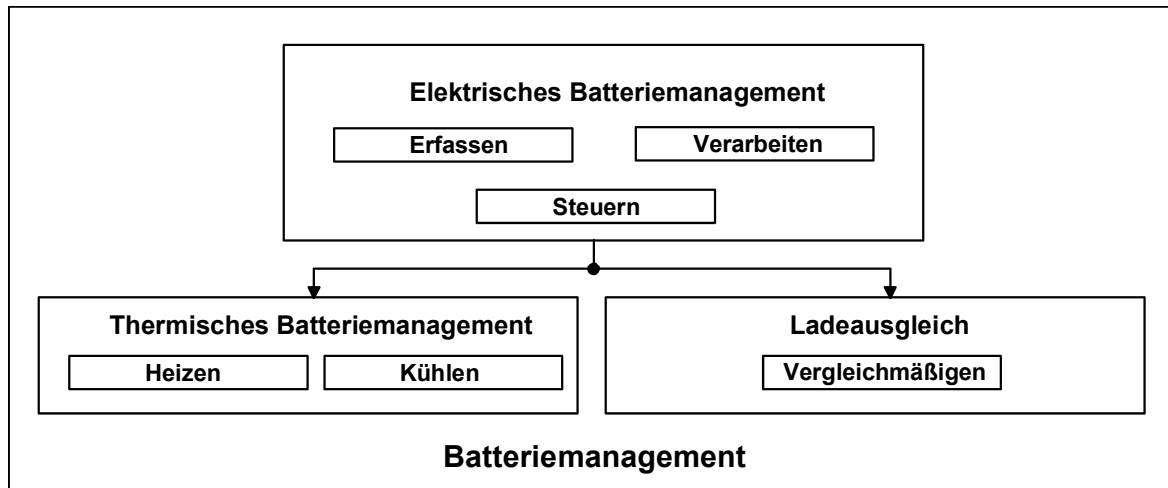


Bild 4.1 Batteriemanagementsystem

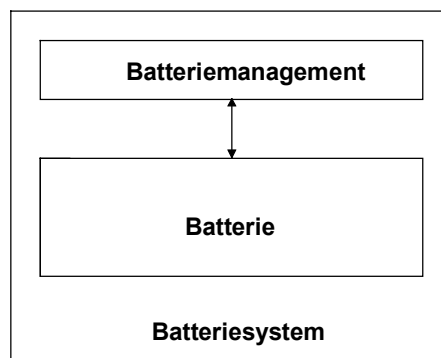


Bild 4.2 Batteriesystem

Forderungen eines Nutzers an ein Batteriesystem:

Die Forderungen eines Nutzers an ein Batteriesystem, also der Einheit aus Batterie und Batteriemangement, werden, unabhängig vom Batterietyp, der Spannung und der Kapazität, wie in Kapitel 1 beschrieben wurde, definiert:

- hohe Verfügbarkeit
- Kenntnis des aktuellen Energieinhaltes
- Kenntnis der aktuellen Qualität

Forderungen einer Batterie an das Batteriemanagement:

Die Forderungen einer Batterie an das Batteriemanagement sind, wiederum unabhängig vom Batterietyp, der Spannung und der Kapazität, das Erkennen folgender Zustände:

- Batterie zu warm/zu kalt
- Spannung unter/über kritischen Grenzwerten
- Überstrom
- Batterie leer
- batterie voll
- Isolationsfehler

Und das Durchführen folgender Aktionen:

- Schutz beim Laden
- Schutz beim Entladen
- Ladeausgleich
- Heizen/Kühlen
- NOTAUS

Zur Erfüllung dieser Forderungen müssen folgende Größen erfasst werden:

- Spannungen
- Ströme
- Temperaturen

Aus diesen drei Grundgrößen, die mit einer hinreichenden Genauigkeit gemessen werden müssen, und mit einem Bezug zur Zeit lassen sich sämtliche relevanten Kenngrößen, wie Ladezustand, umgesetzte Amperestunden, Restenergie usw. ermitteln. Die hinreichende Genauigkeit wird in Kapitel 7 näher untersucht. Weiter können aus den Grundgrößen notwendige Aktionen und Reaktionen, wie z.B. Heizen, Kühlen oder Stromreduzierung abgeleitet werden.

Eine weitere Forderung an das Batteriemanagement ist die Forderung nach Kommunikationsfähigkeit. Dies bedeutet, es muss ein Datenaustausch mit anderen Instanzen möglich sein. Im Falle des Ladegerätes kann so z.B. die Ladeschlussspannung an die aktuelle Batterietemperatur angepasst werden.

4.2 Aufbau und Struktur eines Batteriemanagementsystems

Wie oben definiert wurde, lässt sich ein Batteriemanagementsystem in das elektrische Batteriemanagement, in das thermische Batteriemanagement und den Ladeausgleich aufteilen. Dabei steuert das elektrische das thermische Management und den Ladeausgleich. Im Folgenden werden Topologien für den Aufbau der verschiedenen Teile eines

Batteriemanagementsystems definiert und bekannte Verfahren des elektrischen Batteriemangements, des thermischen Batteriemangements und des Ladeausgleichs klassifiziert [Hauck 1997a], [Hauck 2001].

4.2.1 Elektrisches Batteriemangement

Es sind prinzipiell zwei Topologien beim Aufbau des elektrischen Batteriemangements zu unterscheiden. Geräte der einen Topologie erfassen und verarbeiten Daten der Gesamtbatterie, Geräte der anderen Daten von Teilbatterien.

Die Topologie, die Daten der Gesamtbatterie erfasst und verarbeitet, ist ein Batteriemangementsystem das die Kenngrößen nur an den Batterieklemmen überwacht. Teilspannungen, Modulspannungen oder Zellspannungen, sind nicht von Interesse. Das Batteriemangement erfasst lediglich die Gesamtspannung U , den Gesamtstrom I und, im einfachsten Fall die Gesamttemperatur ϑ . Bild 4.3 zeigt das Prinzip eines solchen Batteriemangementsystems.

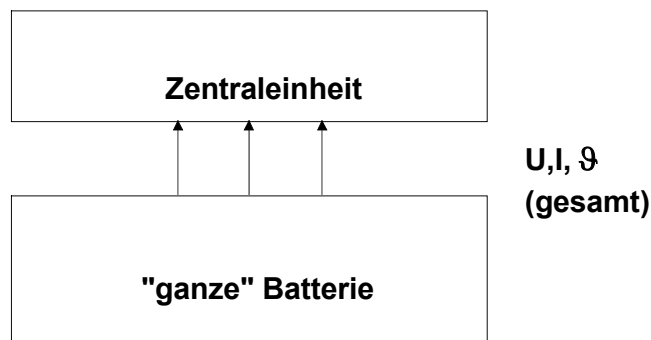


Bild 4.3 Batteriemangementsystem für eine "ganze" Batterie

Solche Systeme werden vor allem im Bereich der Batteriemonitore eingesetzt. Typische Vertreter dieser Topologie für den Einsatz bei Gerätebatterien zeigen z.B. die momentane Kapazität an, geben Warnsignale ab bei Erreichen der Entladeschlussspannung und können Ladegeräte ansteuern [Dallas 2000], [Microchip 1994]. Es ist teilweise auch hier schon die Möglichkeit einer einfachen Kommunikation mit einem übergeordneten Mikrorechnersystem implementiert. Im Bereich der USV werden Geräte dieser Topologie durchaus noch eingesetzt, in der Traktion dagegen nicht mehr.

Die Topologie "Überwachung von Teilbatterien" wird in zwei Varianten unterteilt. Es werden die direkte Verdrahtung mit zentraler Datenerfassung und Systeme mit verteilten Datenerfassungseinheiten unterschieden.

Die Verbindung der zu überwachenden Teilbatterien mit einer Zentraleinheit mittels einer direkten Verdrahtung wird in Bild 4.4 gezeigt. Danach werden die Spannung U_{Tb}

und die Temperatur ϑ_{Tb} jeder Teilbatterie im Zeitmultiplex erfasst. Der Gesamtstrom I_{ges} wird zentral gemessen. Der Nachteil dieser Variante ist der Verdrahtungsaufwand, da von jeder Teilbatterie eine Leitung zur Zentraleinheit notwendig ist. Dieser Aufwand steigt mit der Verkleinerung der Teilbatterien in Richtung Modul-Überwachung oder gar Zell-Überwachung bei einer vielzelligen Batterie stark an. Weiter ist die notwendige Trennung der Potentiale der Teilbatterien beim Messen zu beachten. Mit einem solchen System ist prinzipiell auch keine zeitgleiche Messung aller Teilbatteriespannungen möglich.

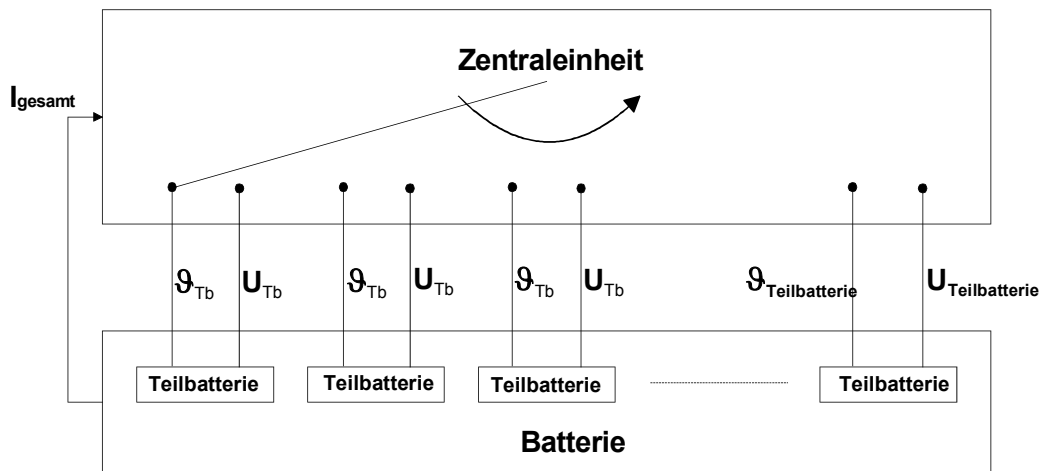


Bild 4.4 Teilbatterieüberwachung mit direkter Verdrahtung

Der Vorteil eines solchen Systems liegt bei der Überwachung weniger, räumlich konzentrierter Teilbatterien, bei denen die Verdrahtung nicht sehr aufwändig ist. Die Zentraleinheit enthält einen Mikrocontroller, der die Datenerfassung steuert und die Daten verarbeitet und speichert. Weiter finden die Signalanpassung und AD-Umsetzung in der Zentraleinheit statt. Der Mikrocontroller ist auch für die Kommunikation mit übergeordneten Instanzen verantwortlich.

Zu dieser Gruppe von Batteriemanagementsystemen gehört das System Batlog micro [Digatron 1996]. Dieses System kann Teilbatteriespannungen erfassen. Weiter wird die Batterietemperatur an einer Pilotzelle gemessen. Die Daten werden für eine weitere Verwendung gespeichert. Aus den Daten kann z.B. eine Prognose über die zu erwartende Restlebensdauer der Batterie erstellt werden.

Das System BADICHEQ [Retzlaff 1992] ist ebenfalls dieser Gruppe zuordenbar. Es ist für verschlossene Bleibatterien konzipiert. Es werden die Modulspannungen im Zeitmultiplex gemessen. Weiter können in der Standardkonfiguration bis zu drei Temperaturmessstellen erfasst werden. Es werden auch Batteriezyklen zur Dokumentation der Batterie-Historie gespeichert. Eine Anzeige der Restkapazität ist möglich. Das System hat vor allem im Bleibatteriebereich eine relativ weite Verbreitung [Simon 1994].

Ein weiteres System dieser Gruppe wurde für die Überwachung von Elektrostraßenfahrzeugen, die bei der Electricité de France (EDF) eingesetzt werden, entwickelt [Gagnol 1994]. Auch hier können Daten aufgezeichnet und für eine spätere Auswertung gespeichert werden.

Eine Weiterentwicklung des Systems BADICHEQ ist das System BADICOaCH [Retzlaff 1996]. Es werden dabei jeweils acht Module über sogenannte NLCs zusammengeschlossen. Ein NLC ist ein nicht weiter definierter "nonlinear circuit". Dieser gemeinsame Anschlusspunkt der acht Module wird mit der Zentraleinheit verbunden. Es ist also im Gegensatz zu BADICHEQ von jeweils acht Teilsystemen nur eine Leitung zur Zentraleinheit notwendig. Ansonsten arbeitet das Gerät ähnlich wie BADICHEQ.

Die zweite Variante ist die Zuordnung einer eigenen Datenerfassungseinheit zu jeder Teilbatterie. Mit dieser Datenerfassungseinheit werden die Spannung und die Temperatur der jeweiligen Teilbatterie lokal gemessen und über ein Bussystem an eine Zentraleinheit übertragen. Dabei wird eine Master-Slave-Architektur eingesetzt, wie in Bild 4.5 gezeigt.

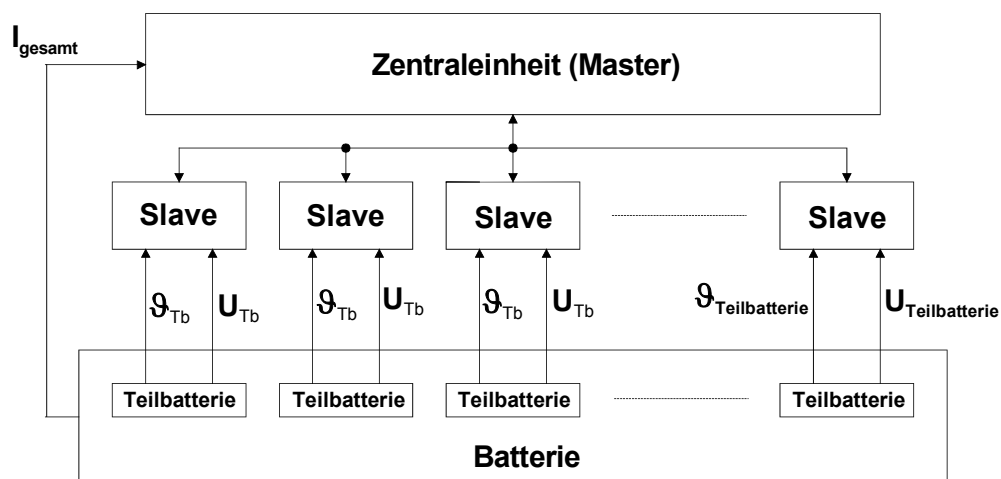


Bild 4.5 System mit verteilten Datenerfassungseinheiten

Nach Bild 4.5 ist jeder Teilbatterie eine eigene Datenerfassungseinheit zugeordnet, die aus Mikrocontroller, Signalanpassung, AD-Umsetzung und Busankopplung besteht. Die Zentraleinheit (Master) enthält ebenfalls einen Mikrocontroller, der die Kommunikation mit den verteilten Datenerfassungseinheiten (Slaves) steuert und die Kommunikation mit übergeordneten Instanzen ermöglicht. Die Kommunikation mit den Slaves erfolgt nach der Master-Slave-Architektur, bei der der Master die komplette Kommunikation und Datenerfassung veranlasst. D.h. die Zentraleinheit kann auch den Zeitpunkt der Messwertaufnahme steuern, womit ein zeitgleiches Messen ermöglicht wird. Der Vorteil dieses Systems ist die einfachere Verkabelung gegenüber der oben beschriebenen direkten Verdrahtung. Es reicht dazu im Prinzip eine Ringleitung für das Bussystem aus. Die Ankopplung der Datenerfassungseinheiten (Slaves) an das Bussystem kann entweder optisch oder induktiv erfolgen. Damit ist eine sichere Potentialtrennung der

einzelnen Teilbatterien gewährleistet. Der Nachteil dieses Systems sind die höheren Kosten als bei der direkten Verdrahtung. Diese werden vor allem durch die Datenerfassungseinheiten für die Teilbatterien bedingt.

Es existieren eine Reihe von Systemen zur Überwachung von Teilbatterien mit verteilten Datenerfassungseinheiten. Solche Systeme werden im Bereich der Nickel-Metall-Hydrid- und vor allem der Li-Ionen-Batterien verwendet. Ein System dieser Topologie basiert auf sogenannten Cell Electronic Control Systems (CECS), die den Slaves nach Bild 4.5 entsprechen [Morin 1996]. Diese werden von einer Zentraleinheit, dem Intelligent Centralized Electronic Control System (ICECS), abgefragt. Die Kommunikation erfolgt über eine Zwei-Draht-Verbindung. Die Kommunikation selbst wird so beschrieben, dass auf ein Pulsmuster auf der 2-Draht-Leitung hin die einzelnen CECS ihre Informationen in Form eines Stromes abgeben. Dieser Strom wird in dem ICECS erfasst und ausgewertet. Auf die Potentialtrennung zwischen den CECS und dem ICECS wird nicht weiter eingegangen. Bei einem anderen System wird pro Zelle ein Cell-Controller eingesetzt, dessen primäre Aufgabe die Spannungsüberwachung ist [Miyamoto 1996]. Bei dem von VARTA eingesetzten System ist für jede Teilbatterie eine komplette Datenerfassungseinheiten vorgesehen [Kruger 1996]. Ein weiteres System nutzt als Potentialtrennung die induktive Kopplung [Kahlen 1996]. Dieses System wird in Kapitel 5 als Beispiel für die Entwicklung eines elektronischen Überwachungs- und Steuergerätes beschrieben.

Es existieren weiter Mischformen der direkten Verdrahtung und des Systems mit verteilten Datenerfassungseinheiten. Ein Batteriemanagementsystem, das aus sogenannten Batteriemessmodulen (BMM) für jeweils acht Teilbatteriespannungen von 6V oder 12V aufgebaut ist, stellt eine solche Kombination aus der Überwachung von Teilbatterien mit direkter Verdrahtung und der Überwachung mit einer Master-Slave-Architektur dar [Fischer 1996]. Damit ist das System primär für Bleibatterien konzipiert. Ein BMM arbeitet im Prinzip wie ein Slave. Jede BMM kann mit bis zu acht Modulen mit direkter Verdrahtung verbunden werden. Für die Kommunikation und Potentialtrennung zwischen den BMMs und der Zentraleinheit wird ein Lichtleiter benutzt. Ein weiteres System dieser Mischform ist das System BME [Koskinen 1998]. Bei diesem System sind pro Datenerfassungseinheit jeweils 15 Kanäle für die Messung von Teilspannungen vorgesehen. Die einzelnen Einheiten können über den CAN-Bus miteinander kommunizieren. Bei einem anderen System können bis zu fünf Teileinheiten an eine Zentraleinheit angeschlossen werden [Heinemann 1999]. Bei Bedarf können mehrere Zentraleinheiten über einen CAN-Bus gekoppelt werden. Ein anderes Mischsystem überwacht pro Zentraleinheit ein NiMh-Modul [Abouda 2000]. Ein weiteres System kann pro Slave vier Teilbatteriespannungen überwachen [Seeger 2001]. Hier kommunizieren der Master und die Slaves über den CAN-Bus.

4.2.2 Thermisches Batteriemangement

In Kapitel 3 wurde die Abhängigkeit der entnehmbaren Ladung aus einer Batterie von der Batterietemperatur beschrieben. Zusammen mit den in Kapitel 2 genannten Betriebstemperaturbereichen für verschiedene Batterien folgt, dass für den Erhalt der Qualität einer Batterie und zur Erfüllung der Anforderungen des Nutzers ein thermisches Batteriemangement notwendig ist. Bei tiefen Temperaturen muss die Batterie geheizt und bei hohen Temperaturen gekühlt werden. Nach Tabelle 2.1 sind Batterien, die bei Umgebungstemperatur arbeiten, nur unter Batterietemperaturen von 50 °C einsetzbar. Eine Ausnahme davon sind die Hochtemperaturbatterien. Allgemein entstehen die erhöhten Temperaturen vor allem durch die in der Batterie nicht zu vermeidenden irreversiblen Wärmeverluste (Joule-Wärme) beim Laden und Entladen und zu einem kleineren Teil durch den reversiblen Wärmeeffekt. Niedrige Batterietemperaturen werden durch niedrige Umgebungstemperaturen verursacht.

Zu dem thermischen Management mit Heizen und Kühlen kommt noch die Aufgabe der Vergleichmäßigung der Temperatur einzelner Teilbatterien untereinander. Ein Einhalten von geringen Temperaturdifferenzen der Teilbatterien untereinander erhöht deren Qualität beträchtlich [Kalker 1994].

Für diese Aufgaben wird das thermische Batteriemangement eingesetzt, das ein Teil des Batteriemangements ist und vom elektrischen Batteriemangement gesteuert wird. Wie beim elektrischen Batteriemangement werden auch beim thermischen Batteriemangement verschiedene Topologien unterschieden.

Das Heizen kann mit Widerstandsplatten erfolgen, die z.B. direkt an der Gehäusewand eines Moduls befestigt werden. Dies ist vor allem für Systeme mit Luftkühlung geeignet. Bei Systemen mit Flüssigkeitskühlung sitzt das Heizelement direkt im Flüssigkeitskreislauf. Die Energie zum Heizen kann der Batterie selbst oder dem öffentlichen Stromnetz entnommen werden.

Die Kühlung wird in Luftkühlung und Flüssigkeitskühlung unterteilt. Bei der Luftkühlung wird die Luft direkt an den Teilbatterien vorbeigeführt. Dies erfordert eine entsprechende Luftführung und ein Gebläse. Luftkühlung wird vor allem im Bereich der Li-Ionen- und der NiMh-Batterie-Prototypen eingesetzt. Die effizientere Flüssigkeitskühlung benötigt entsprechende Wärmetauscher, Leitungen und einen Kühler. Die Flüssigkeitskühlung ist auch kompakter aufzubauen als die Luftkühlung.

Die Vergleichmäßigung der Temperaturen einzelner Teilbatterien untereinander lässt sich am einfachsten mit einem Flüssigkeitskreislauf durchführen. Dazu werden im Modul-Bereich sogenannte "Wassertaschen" eingesetzt [Kalker 1994], [Zander 1996]. Die Wassertaschen haben dieselben Abmessungen wie die Batterie-Seitenwand bei einer Dicke von rund 8 mm. Sie werden zwischen den Modulen angeordnet und von einer Wasser-Glycol-Mischung durchströmt. Es lässt sich damit eine Vergleichmäßigung der

einzelnen Batterietemperaturen erreichen. Zusätzlich dazu kann die zirkulierende Flüssigkeit z.B. im Winterbetrieb mit einer Heizpatrone erwärmt werden.

Es werden für die Kühlung auch Systeme auf der Basis von sogenanntem "phase change material" (PCM) vorgeschlagen [Rafalovich 1995], [Barnes 1997]. Diese Materialien ändern ihre spezifische Wärmekapazität beim Übergang von der festen in die flüssige Phase und umgekehrt. Dieser Effekt wird zur Kühlung ausgenutzt.

4.2.3 Ladeausgleich

In Kapitel 3 wurde beschrieben, dass ein Problem von vielzelligen Batterien die Individualisierung einzelner Teilbatterien ist, was dazu führt, dass nach einer Reihe von Zyklen unterschiedliche Ladungsmengen in den einzelnen Teilbatterien gespeichert sind. Diese Individualisierung beruht auf produktions-, alterungs- und temperaturbedingten Unterschieden von z.B. Kapazität, Selbstentladung oder Ladefaktor. Wie in Kapitel 3 gezeigt wurde, lässt sich dies durch Fertigungs- und Betriebseinflüsse prinzipiell nicht vermeiden. Deswegen benötigen die meisten Batterien zum Erhalt der Qualität der Batterie einen Ladeausgleich. Ansonsten können Ungleichheiten zwischen einzelnen Teilbatterien zum Ausfall der ganzen Batterie führen. Der Ladeausgleich kann auf verschiedene Art und Weise durchgeführt werden.

Offene Batterien mit wässrigem Elektrolyt können durch ein gezieltes Überladen ihren Ladeausgleich durchführen. Diese Methode wird im Bereich der Flurförderfahrzeuge angewandt. Die dort vor allem eingesetzten Bleibatterien werden bis zu Spannungen oberhalb der Gasungsspannung geladen. Dies führt zu mehr oder weniger großem Wasserverlust und impliziert einen erhöhten Wartungsaufwand. Abgesehen davon erfordert der Wasserstoff-Austritt eine gezielte Belüftung des Batterieraumes.

Bei den geschlossenen oder gasdichten Batterien muss ein Überladen ausgeschlossen werden. Das bedeutet, dass spezielle Schaltungen zum Ladeausgleich notwendig sind. Es werden dazu die drei Topologien Energiezuführung, Energieumsetzung und Energieumverteilung definiert [Hauck 2001].

Die Topologie Energiezuführung wird z.B. in Systemen mit direkter Verdrahtung benutzt. Dort wird die Messleitung auch als Leitung für die Energiezuführung benutzt, wie Bild 4.6 zeigt. Es wird so jeder Teilbatterie die zum Ladeausgleich benötigte Energie zugeführt. Es kann dabei allerdings immer nur eine Teilbatterie geladen werden, d.h. die Nachladung erfolgt im Zeitmultiplex. Aufgrund dieses Verfahrens kann der Ladeausgleich unter Umständen längere Zeit in Anspruch nehmen.

Eine Nachladung mit direkter Verdrahtung hat den Nachteil, dass eine aufwändige Verdrahtung notwendig ist. Weiter muss die Potentialtrennung der einzelnen Teilbatterien beachtet werden. Ein solches System mit direkter Verdrahtung und Nachlademöglichkeit über die Messleitung ist das System BADICHEQ [Retzlaff 1992].

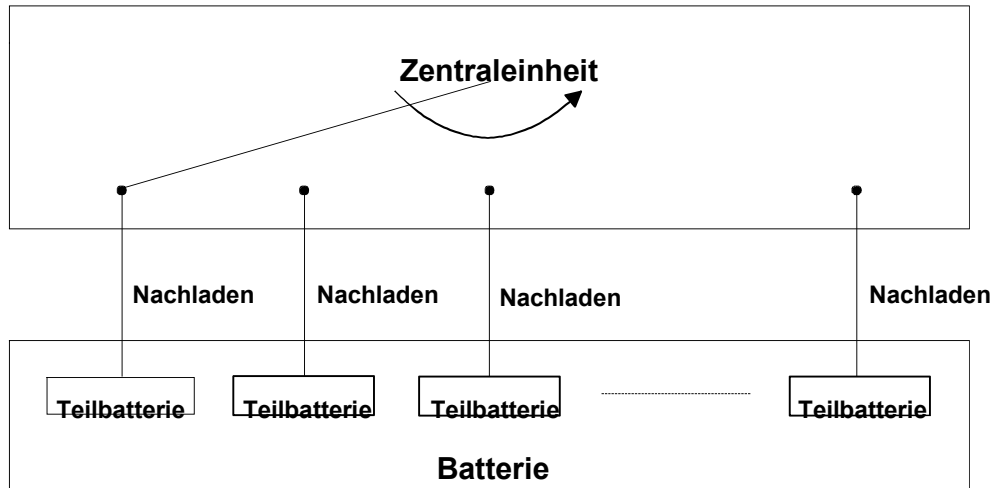


Bild 4.6 Energiezuführung mit direkter Verdrahtung

Eine Energiezuführung kann auch über ein Bussystem erfolgen, an das die einzelnen Teilbatterien induktiv angekoppelt sind. Ein solches System ermöglicht eine Übertragung von Daten und Energie im Zeitmultiplex [Kahlen 1996]. Die induktive Ankopplung besteht dabei aus einem Hochfrequenztransformator mit zwei Wicklungen. Die Datenübertragung findet mit einem Master-Slave-Protokoll über eine der beiden Wicklungen statt. Das Nachladen erfolgt mit einer festen Spannung über die zweite Wicklung solange, bis alle Teilbatterien das Ladeende gemeldet haben. Daten- und Energieübertragung werden durch eine Variation des Innenwiderstandes der Zentraleinheit unterschieden. Das Prinzip ist in Bild 4.7 zu sehen. Bild 4.8 zeigt eine Datenerfassungs- und Nachladeeinheit (Slave-Einheit) dieses Systems. Das Nachladen wird in bestimmten Abständen unterbrochen, um eine Messung durchzuführen und den Stand des Nachladens an die Zentraleinheit zu übertragen. Kapitel 5 beschreibt dieses System ausführlich.

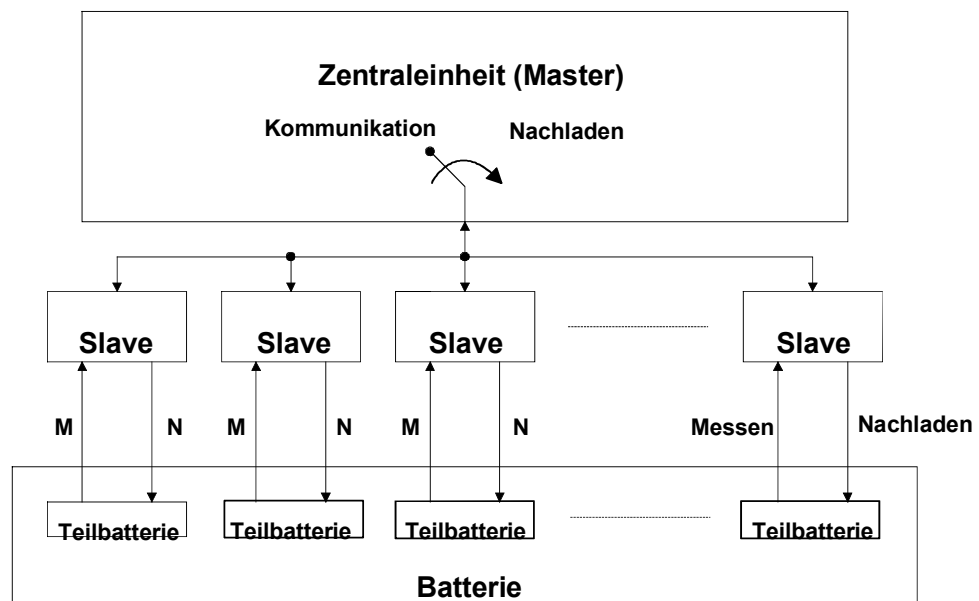


Bild 4.7 Energiezuführung im Zeitmultiplex mit der Datenübertragung

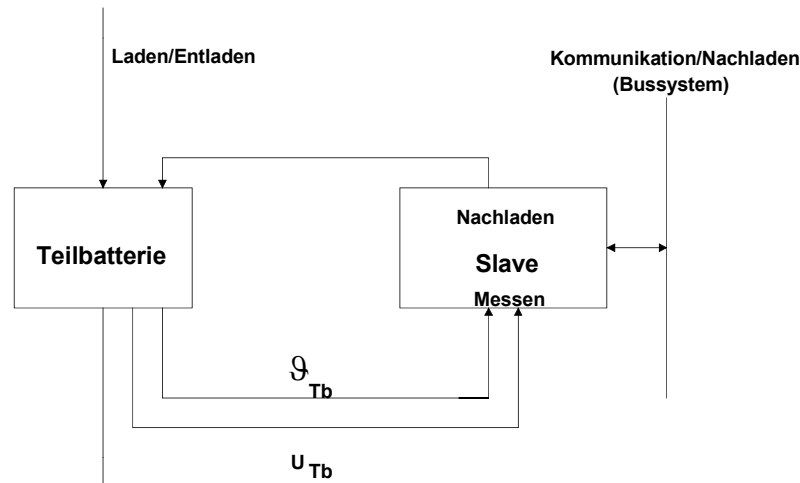


Bild 4.8 Slave-Einheit zur Energiezuführung im Zeitmultiplex mit der Datenübertragung

Bei einer anderen Ausführung des Ladeausgleichs mittels Energiezuführung wird ein spezielles Ladegerät, das Teilbatterien lädt, verwendet [Hornung 1998]. Hier ist pro Teilbatterie ein Hochfrequenz-Transformator notwendig. Es gibt keine Rückmeldung über den tatsächlichen Ladezustand der Teilbatterien. Weiter ist ein Modus Energieumverteilung vorgesehen.

Bei der Topologie Energieumsetzung wird die zugeführte elektrische Energie bei Erreichen der Ladeschlussspannung in Wärme-Energie umgesetzt. Dazu wird ein Bypass verwendet. Dieser leitet den Ladestrom an der Teilbatterie vorbei, wenn die Teilbatterie ihre entsprechende Ladeschlussspannung erreicht hat. Der Bypass setzt dann die überschüssige Energie in einer Transistor/Widerstandskombination in Wärme um. Zu beachten ist, dass der Bypass-Strom, aufgrund der Stromtragfähigkeit und der maximalen Verlustleistung im Transistor begrenzt ist. Wegen der dichten Packung der Teilbatterien können, wenn überhaupt, nur kleine Kühlkörper benutzt werden. Dies begrenzt den Bypass-Strom in der praktischen Anwendung auf etwa 2 A. Damit ist notwendig, dass das Ladegerät eine Ladeausgleichsstufe aufweist, die den Ladestrom entsprechend reduziert. Die Reduzierung des Ladestroms erfolgt, nachdem die erste Teilbatterie ihre Ladeschlussspannung erreicht hat. Dies teilt die entsprechende Datenerfassungseinheit der Zentraleinheit mit, die ihrerseits das Ladegerät auffordert, den Ladestrom auf den Ladeausgleichsstrom zu reduzieren. Damit kann die Energieumsetzung im Prinzip nur in Verwendung mit einer Datenerfassungseinheit an der Teilbatterie eingesetzt werden. Falls allerdings der Ladestrom nicht größer als der Ladeausgleichsstrom ist, können auch selbsttätig schaltende Bypässe eingesetzt werden. Bild 4.9 zeigt eine mögliche Realisierung und Bild 4.10 das Prinzip einer Bypass-Einheit.

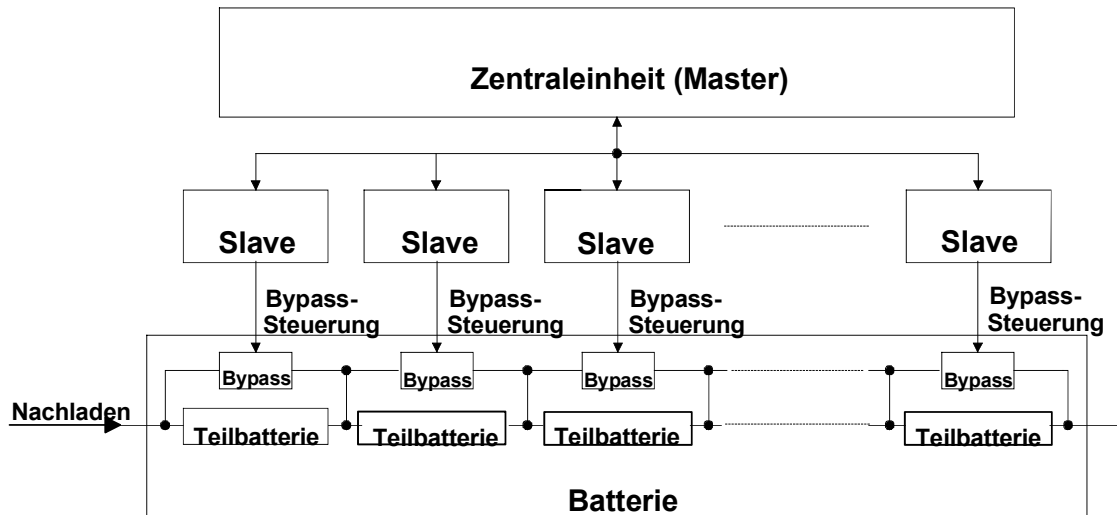


Bild 4.9 Energieumsetzung mit Bypass

Der Ladeausgleich mit einem Bypass hat prinzipiell den Nachteil, dass im Extremfall, wenn alle Teilsysteme bis auf eines vollgeladen sind, eine durchaus beachtliche Energiemenge im Bypass in Wärme umgesetzt wird.

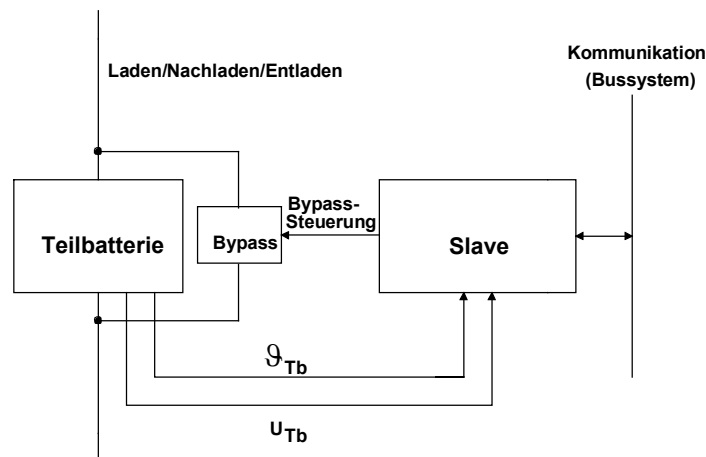


Bild 4.10 Bypass-Einheit

Die Topologie Energieumsetzung mittels Bypass wird in Verbindung mit den oben beschriebenen Systemen mit verteilten Datenerfassungseinheiten eingesetzt, da hier die notwendige Messdatenerfassung für die Bypasssteuerung schon vorhanden ist [Morin 1996], [Miyamoto 1996], [Kruger 1996]. Ein weiteres System, sind die Individual Cellvoltage Equalizers (ICE) [Lindemark 1991]. Dies sind Bypässe, die unabhängig von einer Zentraleinheit individuell arbeiten.

Mit der Topologie Energieumverteilung wird aus voller geladenen Teilbatterien Energie in nicht so voll geladene Teilbatterien gebracht. Das Prinzip dazu zeigt Bild 4.11.

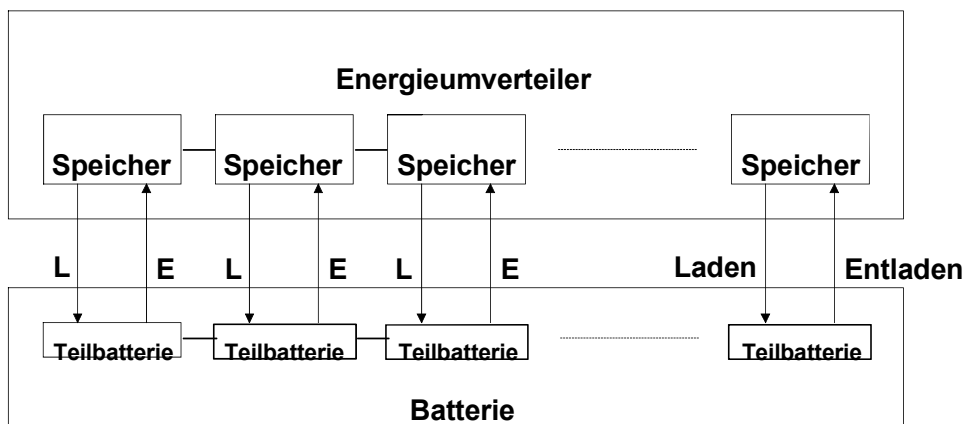


Bild 4.11 Energieumverteilung

Bei der Energieumverteilung nach Bild 4.11 wird die umzuverteilende Energie entweder induktiv oder kapazitiv zwischengespeichert. Die Übergabe der Energie an weniger voll geladene Teilbatterien erfolgt mit einem Netzwerk aus Schaltern in Verbindung mit Speicherelementen.

Das Prinzip der Energieumverteilung mit Kondensatoren als Speicher zeigt Bild 4.12. Hier ist zu beachten, dass die Hälfte der der Teilbatterie entnommenen Energie im Schalter in Wärme-Energie umgesetzt wird.

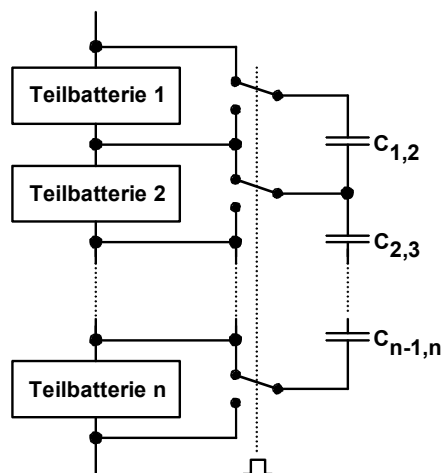


Bild 4.12 Energieumverteilung mit Kondensatoren als Speicher

Die Schalter in Bild 4.12 werden zeitgleich von einer Teilbatterie zur nächsten umgeschaltet. Damit wird die Energie aus voller geladenen Teilbatterien über die Kondensatoren zu weniger voll geladenen umverteilt. Das Prinzip entspricht einer Ladungspumpe.

Anstelle der kapazitiven Energiespeicherung kann die Energie auch induktiv gespeichert werden. Bild 4.13 zeigt dazu einen Mehrtor-Durchflusswandler [Schmidt 1998].

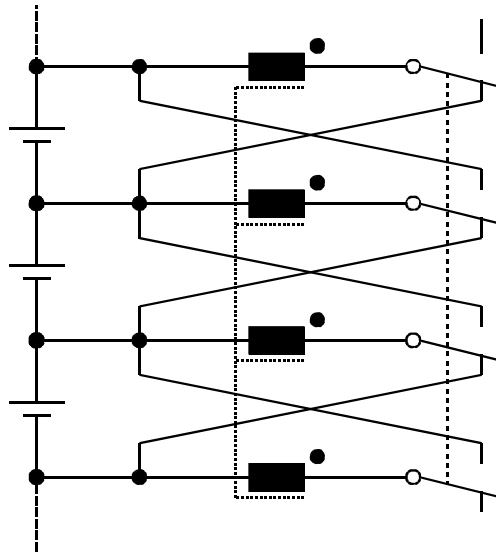


Bild 4.13 Mehrtor-Durchflusswandler

Bei dem Mehrtor-Durchflusswandler nach Bild 4.13 erfolgt die Kopplung der Teilbatterien magnetisch über Wicklungen, die auf einem gemeinsamen Kern sitzen. Diese werden über Halbleiterschalter periodisch mit wechselnder Polarität an die Teilbatterien gelegt. Aufgrund der engen Kopplung der Wicklungen wird dabei in allen die gleiche Spannung induziert. Damit fließt bei abweichenden Teilbatteriespannungen ein entsprechender Ausgleichsstrom.

Der Vorteil der Energieumverteilung ist, dass sie während des normalen Ladens und auch beim Entladen vonstatten gehen kann. Es kann also auf eine spezielle Ladeausgleichsphase beim Ladevorgang verzichtet werden. Ein Nachteil ist der technische Aufwand und die damit verbundenen Kosten. Weiter ist mit diesen Systemen eine gleichzeitige Messdatenerfassung nicht möglich.

Der oben erwähnte Mehrtor-Durchflusswandler wurde mit Erfolg bei Batterien im Photovoltaik- und im Traktionsbereich erprobt [Schmidt 1998]. Von Nachteil ist die aufwändige Verdrahtung. Ein anderes System zur Energieumverteilung benutzt sogenannte Multi-Winding-Transformer [Kutkut 1994]. Die Primärwicklung des Multi-Winding-Transformers wird von der Gesamt-Batterie gespeist. Die Sekundärwicklungen sind den einzelnen Teilbatterien zugeordnet. Damit ist auch dieses System aufwändig. Zusätzlich zum Ladeausgleich aus der Batterie kann damit auch die Haupt-Ladung erfolgen. In diesem Punkt ist dieses System mit dem oben vorgestellten System das Teilbatterien mit Energiezuführung lädt vergleichbar [Hornung 1998]. Bei einem weiteren, ebenfalls mit induktiver Energieübertragung arbeitenden System, speisen Hochsetzsteller die überschüssige Energie aus vollgeladenen Teilbatterien wieder in die Gesamt-Batterie ein, wodurch es zu einer Umverteilung der Energie kommt [Hung 1993]. Weiter werden, wie oben be-

schrieben, auch Kapazitäten als Energiezwischenspeicher benutzt [Pascual 1997], [Shinpo 1997].

4.3 Bewertung der Systeme

Die Systeme mit direkter Verdrahtung sind nur sinnvoll einsetzbar für Batterien, bei denen nur wenige Teilbatterien zu überwachen sind. Sobald die Überwachung von Modullebene auf die Zellen-Ebene übergeht, sind die System mit verteilten Datenerfassungseinheiten deutlich im Vorteil. Ähnliches gilt für den Ladeausgleich. Dort macht die Energiezuführung über die direkte Verdrahtung nur einen Sinn beim Ladeausgleich weniger Teilbatterien. Dies gilt ebenso für die Energieumverteilung. Für vielzellige Batterien wird die Energieumsetzung mittels Bypass bevorzugt. Allerdings hat der Bypass den Nachteil, dass er zusätzlich Wärme in die Batterie einbringt. Im nächsten Kapitel wird ein Batteriemanagementsystem vorgestellt, das die Vorteile der verteilten Datenerfassungseinheiten mit den Vorteilen der Topologie Energiezuführung verbindet.

5 Batteriemanagementsystem mit verteilten Datenerfassungseinheiten und Energiezuführung für den Ladeausgleich

In Kapitel 4 wurde das Prinzip eines Batteriemanagementsystems mit verteilten Datenerfassungseinheiten vorgestellt, bei dem die Energiezuführung für den Ladeausgleich und die Kommunikation im Zeitmultiplex über dasselbe Bussystem erfolgen. Dieses System ist aus Überlegungen zum Batteriemangement am Lehrstuhl Leistungselektronik und Elektronik im Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Kaiserslautern entwickelt worden. Es ist zum Patent angemeldet [Kahlen 1997a] und wurde bei verschiedenen Fachkonferenzen vorgestellt [Kahlen 1996], [Hauck 1998]. Anhand dieses Batteriemanagementsystems wird die Entwicklung eines elektronischen Überwachungs- und Steuergerätes beschrieben.

5.1 Prinzip des Batteriemanagementsystems

Das System besteht aus einer Zentraleinheit (Master), die mit den einzelnen verteilten Datenerfassungseinheiten (Slaves) über ein Bussystem verbunden ist. Dabei ist jedem Slave jeweils eine Teilbatterie zugeordnet. Dieses Bussystem ist als Zwei-Draht-Bus ausgeführt. Im Gegensatz zu anderen Systemen werden die Kommunikation und der Ladeausgleich über dasselbe Bussystem durchgeführt. Bild 5.1 zeigt das Blockschaltbild des Systems.

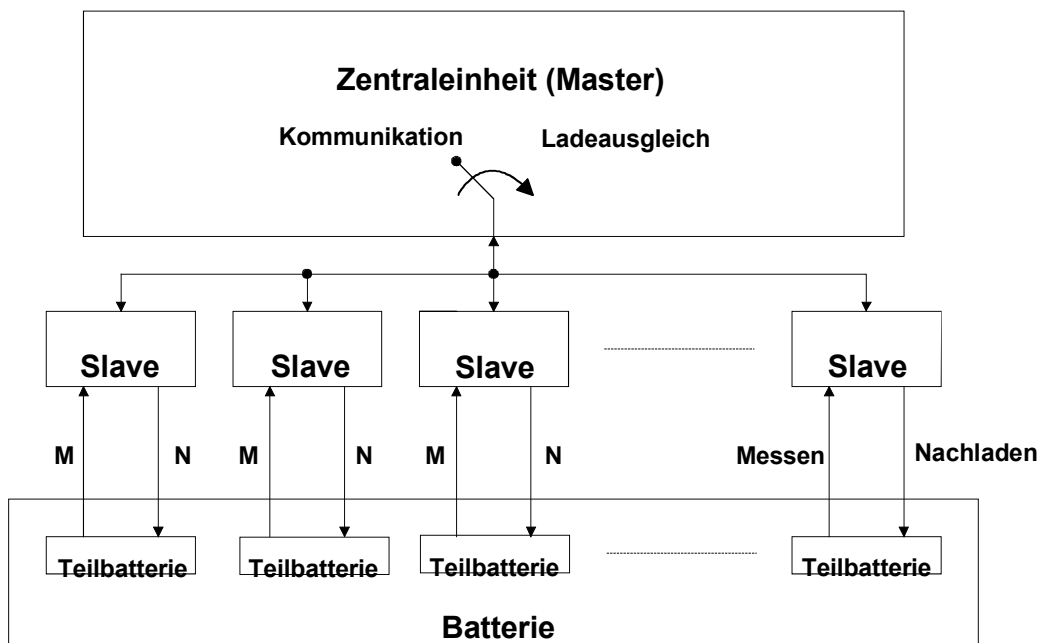


Bild 5.1 Batteriemanagementsystem mit Zwei-Draht-Bus

Nach Bild 5.1 obliegt die Entscheidung, ob der Bus für die Datenübertragung oder für die Energiezuführung benutzt wird, der Zentraleinheit. Die Datenerfassungseinheiten

sind transformatorisch an den physikalischen Bus angekoppelt. Damit ist eine Potentialtrennung gewährleistet.

Im Weiteren werden die Zentraleinheit (Master) und die Datenerfassungseinheiten (Slaves) näher beschrieben.

5.2 Zentraleinheit (Master)

Das Blockschaltbild der Zentraleinheit zeigt Bild 5.2. Danach besteht die Zentraleinheit aus einem Generator zum Erzeugen der Ladeausgleichsspannung, einem Umschalter zwischen den Betriebsarten „Kommunikation“ und „Ladeausgleich“ und einem Mikrocontroller mit Peripherie.

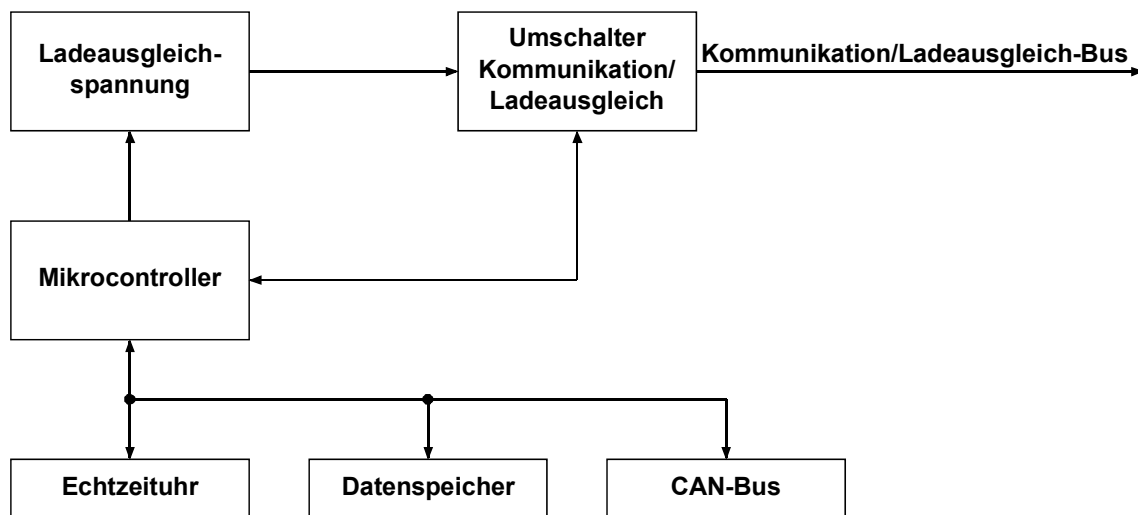


Bild 5.2 Blockschaltbild Zentraleinheit (Master)

Der Generator für die Ladeausgleichsspannung liefert eine rechteckförmige Wechselspannung. Dazu wird ein mit einem Rechteckgenerator erzeugtes Signal mit einem integrierten Leistungs-Verstärker verstärkt [SGS 1996]. Die Ladeausgleichsspannung hat eine Frequenz von 100 kHz. Der maximale Strom beträgt 2 A.

Der Steuer- und Verarbeitungsteil enthält neben einem Mikrocontroller eine Echtzeituhr, einen Datenspeicher und eine Anbindung an den CAN-Bus. Echtzeituhr und Datenspeicher dienen der Dokumentation der Messdaten. D.h. die von den Slaves empfangenen Daten werden mit Datum und Uhrzeit aus der Echtzeituhr versehen und im Datenspeicher abgelegt. Eine weitere Auswertung der Daten kann nach deren Übertragung zu einem PC offline erfolgen. Über die CAN-Schnittstelle werden die Daten direkt zu anderen Instanzen, z.B. dem Ladegerät, übertragen. Der Mikrocontroller steuert die Verarbeitung und die Aufnahme der Daten. Zur Aufnahme der Daten wird der Bus auf die Betriebsart „Kommunikation“ umgestellt. Die Umschaltung zwischen den Betriebsarten „Kommunikation“ und „Ladeausgleich“ erfolgt ebenfalls durch den Mikrocontroller. Weiter arbeitet der Mikrocontroller den Batteriemangement-Algorithmus ab. Für diese

Aufgaben ist die Leistung eines 8-Bit-Mikrocontrollers ausreichend. Es wird hier ein 8-Bit-Mikrocontroller vom Typ 80C537 eingesetzt [Siemens 1995].

Der Umschalter zwischen den Betriebsarten variiert den Innenwiderstand. In der Betriebsart „Ladeausgleich“ ist der Innenwiderstand niedrig, gemäß dem einer Spannungsquelle. In der Betriebsart „Kommunikation“ werden die beiden Fälle „Innenwiderstand niedrig“ und „Innenwiderstand hoch“ je nach Betriebsart unterschieden. Beim Senden vom Master zu den Slaves wird der Innenwiderstand niedrig belassen. Beim Senden der Slaves zum Master wird der Innenwiderstand auf einen hohen Wert umgeschaltet. Damit kann der Slave, wie unten beschrieben, den Bus für seine Kommunikationszwecke problemlos kurzschließen.

5.3 Datenerfassungseinheit (Slave)

Die Datenerfassungseinheiten sind transformatorisch an den Kommunikation-/Ladeausgleichbus angekoppelt. Für die Ankopplung wird für jeden Slave ein Hochfrequenztransformator mit zwei Sekundärwicklungen benutzt, wie in Bild 5.3 gezeigt.

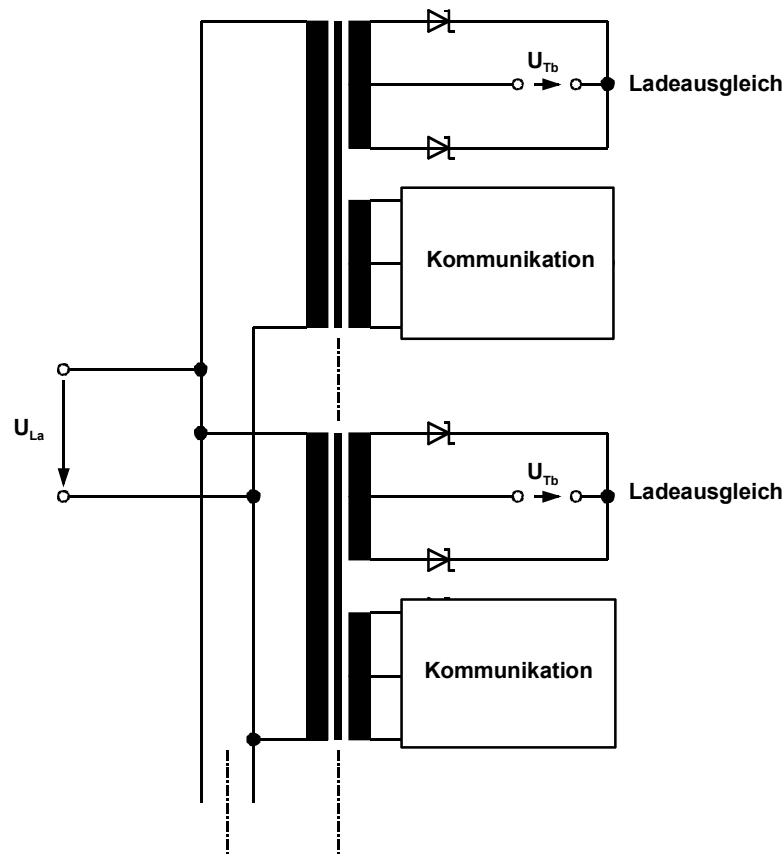


Bild 5.3 Ankopplung der Datenerfassungseinheiten

Nach Bild 5.3 sind die primären Wicklungen der einzelnen Hochfrequenztransformatoren parallel geschaltet. Sie werden mit der Ladeausgleichsspannung U_{La} gespeist. Eine der zwei Sekundärwicklungen wird jeweils für den Ladeausgleich benutzt. Dazu wird, wie in Bild 5.3 schematisch dargestellt, die Sekundärspannung mit Hilfe von Schottky-Dioden gleichgerichtet und anschließend geglättet. Nach der Glättung muss noch ein präziser Spannungsregler eingesetzt werden, um die je nach Batterieart erforderliche Genauigkeit der Ladeschlussspannung zu gewährleisten. Die zweite Sekundärwicklung wird für die Kommunikation eingesetzt. Der Ablauf der Kommunikation wird weiter unten beschrieben.

Das Blockschaltbild einer Datenerfassungseinheit zeigt Bild 5.4.

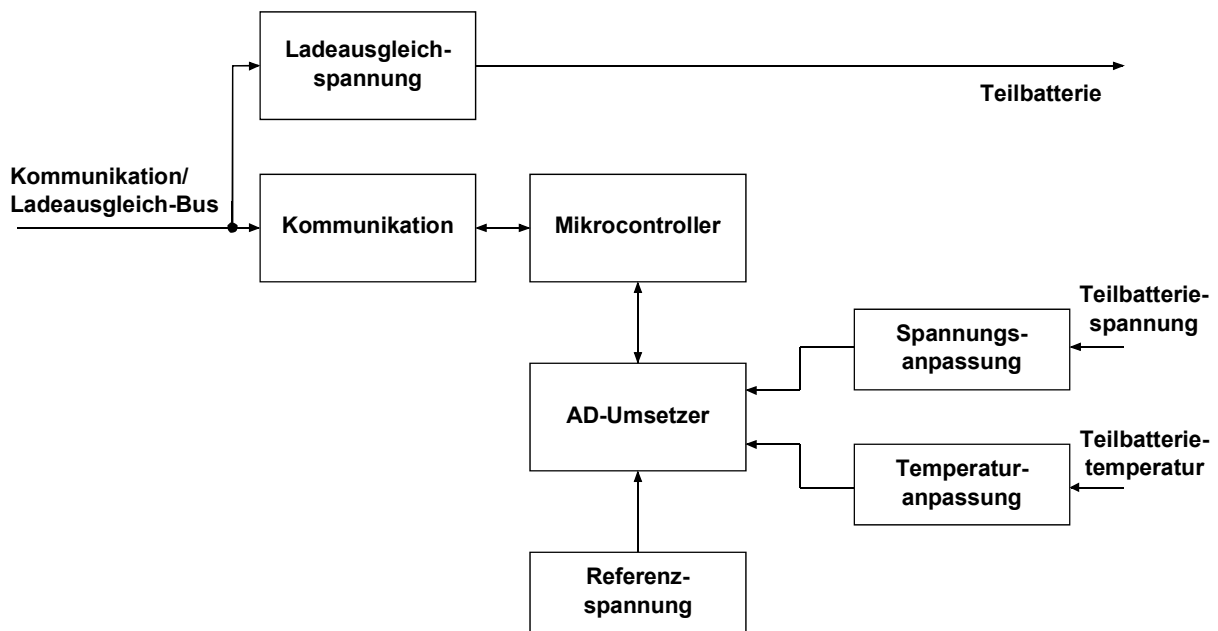


Bild 5.4 Blockschaltbild Datenerfassungseinheit

Die Teilbatteriespannung und die Teilbatterietemperatur werden mit einer Anpassschaltung an den Eingangsbereich des AD-Umsetzers angepasst. Der hier eingesetzte AD-Umsetzer arbeitet nach dem Dual-Slope-Prinzip. Er hat eine Umsetzzeit von rund 20ms [MAXIM 1998]. Während dieser Zeit muss garantiert sein, dass sich die zu messenden Teilbatteriegrößen nicht ändern. Die Teilbatteriespannung kann sich bei einer großen Änderung des Batteriestromes, z.B. im Falle der Traktion, innerhalb der Umsetzzeit ändern. Es muss also ein Sample&Hold-Glied eingesetzt werden. Die Teilbatterietemperatur ändert sich während der AD-Umsetzung nicht.

Der die Slave-Einheit steuernde Mikrocontroller ist vom Typ ATMEL AT89C2051 [Atmel 1994]. Dieser ist code-kompatibel zur weitverbreiteten 8051-Mikrocontroller-Familie.

Die Spannungsversorgung der Datenerfassungseinheit kann entweder über den Bus oder aus der zu überwachenden Teilbatterie erfolgen. Bei einer Versorgung über den Bus muss durch entsprechende Pufferkondensatoren sichergestellt sein, dass in der

Kommunikationsphase der Slave mit ausreichend Energie versorgt wird. Die Versorgung aus der zu überwachenden Teilbatterie bedingt eine entsprechende Anpassung der Teilbatteriespannung mittels eines Tiefsetz- oder Hochsetzstellers.

5.4 Kommunikation

Die Kommunikation läuft nach dem Master-Slave-Prinzip ab, d.h. der Master steuert die komplette Kommunikation. Den Ablaufplan der Kommunikation zeigt Bild 5.5. Diese startet damit, dass der Master zunächst als Start-Kennung für den Beginn der Kommunikation die Ladeausgleichsspannung für 5 ms unterbricht. Da diese Spannung an beiden Sekundärwicklungen des Hochfrequenztransformators ansteht, löst deren Unterbrechung einen Interrupt im Mikrocontroller aus und dieser wartet auf weitere Instruktionen. Bleiben diese z.B. im Falle einer Störung aus, so arbeiten alle Slaves nach einem definierten Time-Out ihr gewohntes Programm weiter ab. Ansonsten schickt der Master die Adresse des Slaves mit dem er zu kommunizieren wünscht und schaltet danach den Bus in den hochohmigen Zustand. Alle Slaves erhalten die Adresse, aber nur der adressierte Slave schickt seine Messdaten zum Master. Die übrigen erkennen, dass sie nicht adressiert sind, beenden die Interrupt-Routine und setzen die Abarbeitung ihres Programmes fort.

Das Senden der Daten vom Slave aus erfolgt derart, dass zuerst das höherwertige Byte der Teilbatteriespannung, gefolgt von dem niederwertigen Byte der Teilbatteriespannung gesendet wird. Direkt daran anschließend folgen die beiden Bytes der Teilbatterietemperatur, wobei wieder das höherwertige Byte vor dem niederwertigen übertragen wird. Der Übertragungsrahmen besteht aus jeweils einem Startbit, acht Datenbit und einem Stoppbit. Damit dauert die Übertragung des kompletten Datensatzes bei einer Baudrate von 19200 Bd rund 2,1 ms. Hat der Master die vier Datensätze empfangen, schaltet er den Bus wieder niederohmig. Damit ist die weitere Energieversorgung der Slaves sichergestellt, falls die Slaves über den Bus versorgt werden.

Im Master erfolgt eine Plausibilitätsprüfung der Daten. Mit dieser wird überprüft, ob die vom Slave gesendeten Daten plausibel sind, also innerhalb des erwarteten Wertebereichs liegen. Die Wertebereiche müssen an die jeweilige Batterieart angepasst definiert werden. Schlägt die Plausibilitätsprüfung fehl, wird der Slave erneut adressiert und die Daten abgerufen. Sind die Daten wiederum nicht plausibel, erfolgt von Seiten des Masters eine Fehlermeldung an eine übergeordnete Instanz und die Ausgabe einer Warnmeldung z.B. am Armaturenbrett. Danach setzt der Master die Abarbeitung des Batteriemangement-Algorithmus fort, bis dieser erneut die Kommunikation startet um Daten anzufordern.

Um eine zeitgleiche Messung aller Teilbatteriespannungen und –temperaturen zu ermöglichen, kann auch eine Broadcast-Nachricht implementiert werden. Diese besteht aus einer Adress-Kennung bei deren Empfang jeder Slave selbsttätig eine Messung durchführt. Die Messdaten werden dann, wie oben beschrieben, im Zeitmultiplex von den einzelnen Slaves durch den Master abgefragt.

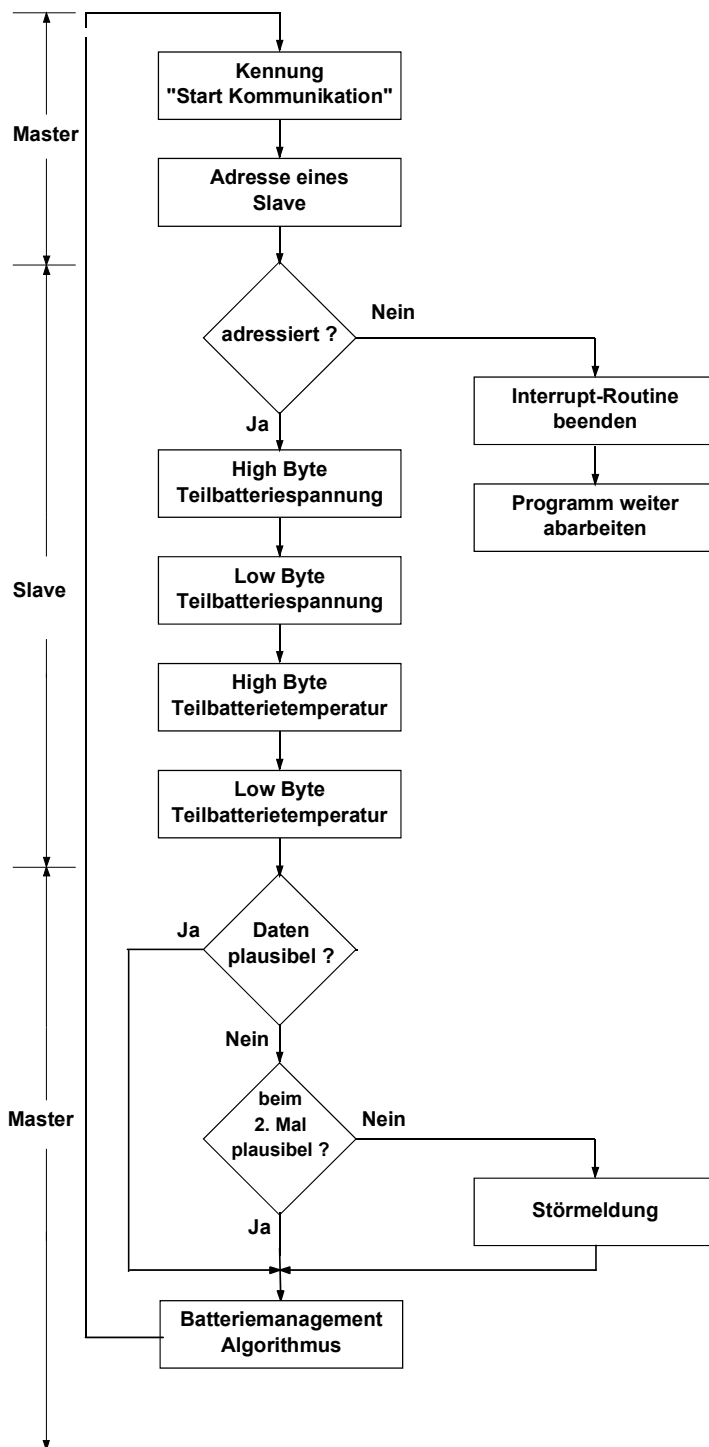


Bild 5.5 Ablaufplan Kommunikation Master-Slave

Bild 5.6 zeigt den Programmablauf für einen Slave.

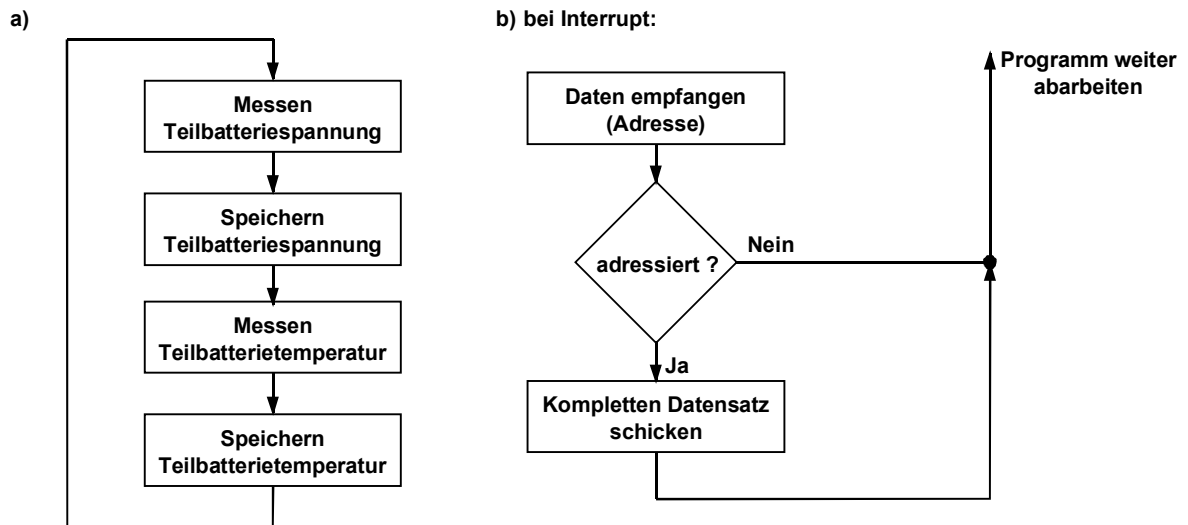


Bild 5.6 Programmablauf Slave

Nach Bild 5.6 a) ist der normale Programmablauf für einen Slave das Messen und Speichern von Teilbatteriegrößen. Lediglich bei Interrupt, gezeigt in Bild 5.6 b), wird der normale Programmablauf verlassen, um einen kompletten Datensatz an den Master zu schicken.

Bild 5.7 zeigt den Programmablauf des Masters. Der Master arbeitet den Algorithmus des Batteriemangements ab. Wenn dieser aktuelle Teilbatteriedaten benötigt, startet er die Kommunikation und fragt nacheinander alle Slaves ab. Diese schicken dann den gerade aktuellen Datensatz zum Master. Dieser empfängt die Daten und prüft und speichert sie.

Auf die Algorithmen für die verschiedenen Batteriearten wird in Kapitel 6 näher eingegangen.

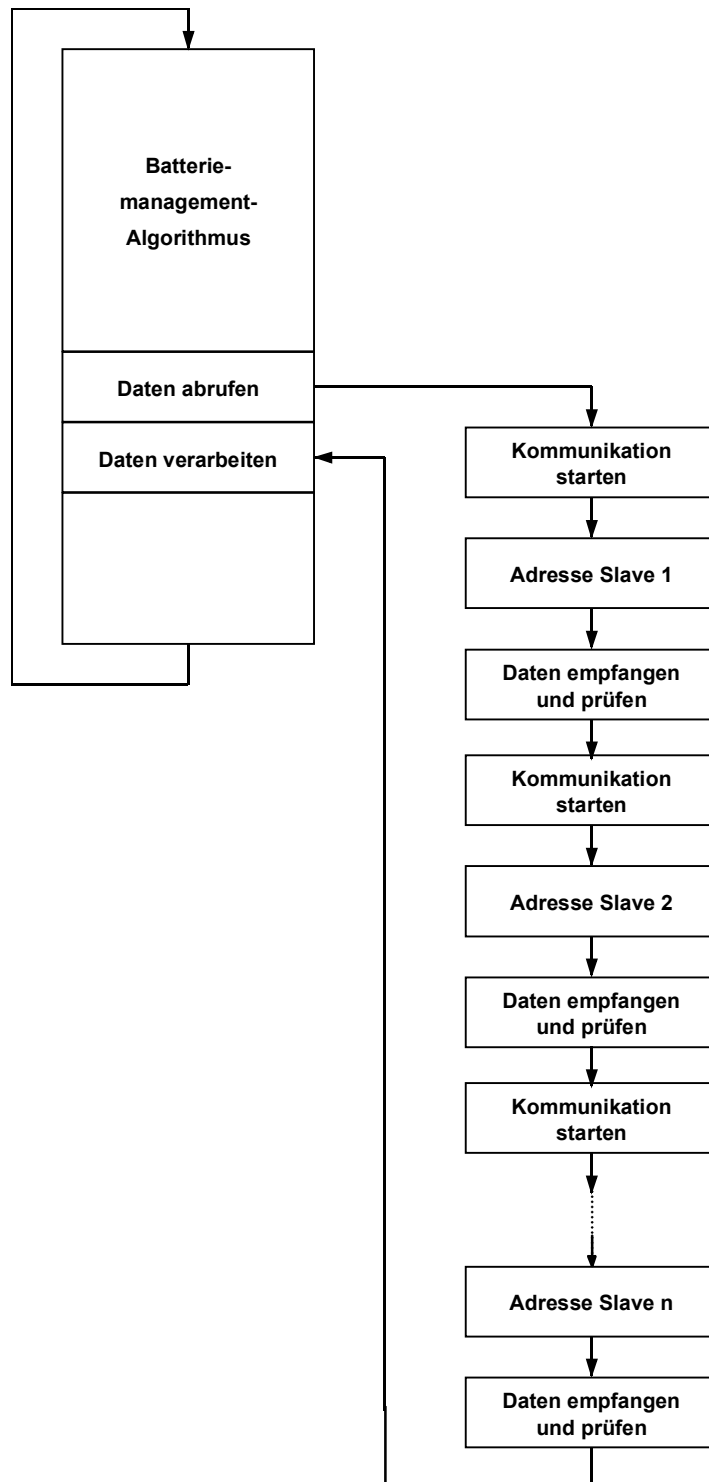


Bild 5.7 Programmablauf Master

Für die Kommunikation selbst wurde, wie oben bereits erwähnt wurde, eine Baud-Rate von 19200 Bd gewählt. Das Master-Sendesignal wird durch Austasten der Ladeausgleichsspannung erzeugt, wie in Bild 5.8 zu erkennen ist. Die gezeigten Verläufe wurden mit einem Transientenrekorder an einem Labormuster des Batteriemangement-systems gemessen.

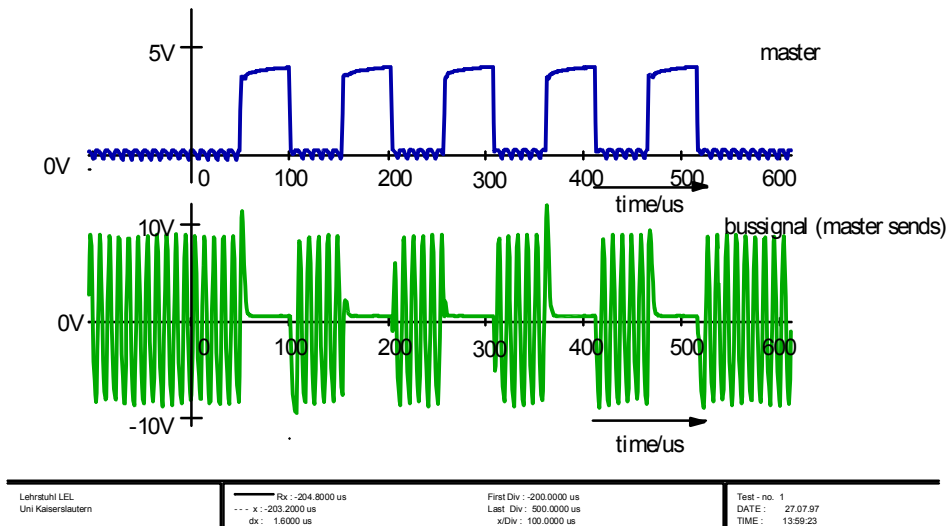


Bild 5.8 Sendesignal des Masters und das zugehörige Bussignal

Das Austasten in Bild 5.8 geschieht durch Trennen des Rechteckgenerators vom Verstärker. Dadurch wird die Busspannung zu Null. Busspannung „Null“ entspricht einer gesendeten „0“ und Busspannung „Normal“ entspricht einer gesendeten „1“.

In Bild 5.9 ist der oben beschriebene Datenrahmen (1 Startbit, 8 Datenbit, 1 Stoppbit) zu erkennen. Bild 5.9 zeigt das Sendesignal des Masters und das dazugehörige Empfangssignal am Slave.

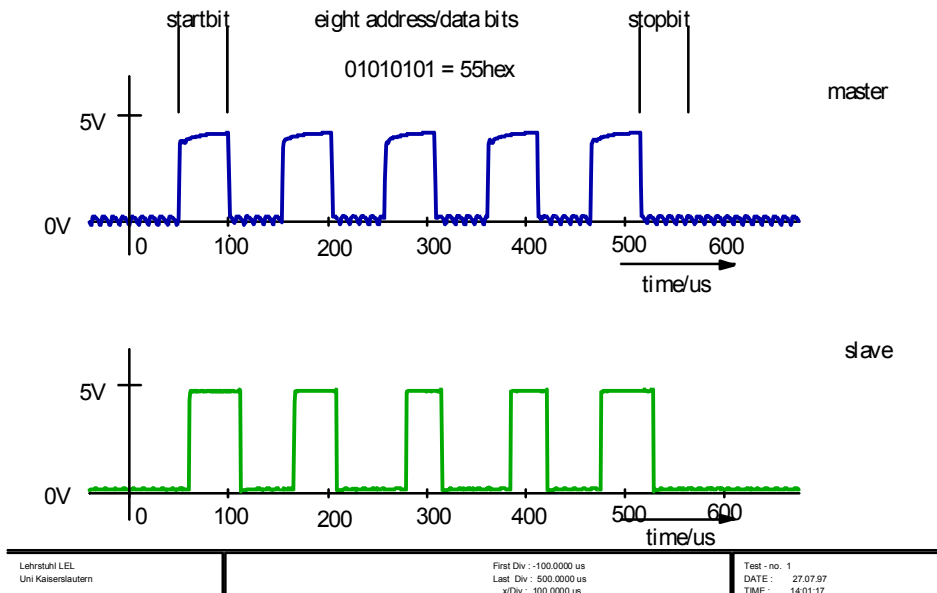


Bild 5.9 Master-Sendesignal und Slave-Empfangssignal

Wie oben beschrieben wurde, schaltet der Master nach dem Senden der Adresse den Bus in den hochohmigen Zustand. Dies geschieht, indem ein zusätzlicher Widerstand in Reihe zum Ladeausgleichsspannungsgenerator geschaltet wird. Damit kann der Sla-

ve durch Kurzschließen der Spannung auf dem Bus seine Daten an den Master übertragen. Bild 5.10 zeigt das Bussignal während des Sendens eines Slaves.

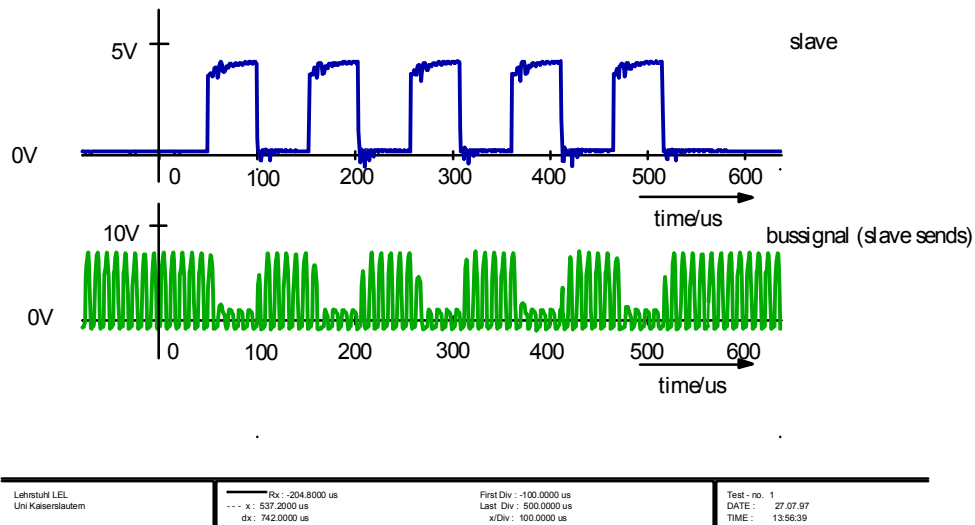


Bild 5.10 Sendesignal des Slave und das zugehörige Bussignal

In Bild 5.10 ist deutlich das Kurzschließen des Busses durch den Slave zu erkennen. Dies geschieht durch einen Transistor, der beim Senden einer „1“ durchgeschaltet wird, was zu der Pegelinvertierung in Bild 5.10 führt.

Bild 5.11 zeigt das Sendesignal eines Slave und das nach entsprechender Filterung beim Mikrocontroller des Masters eingehende Signal.

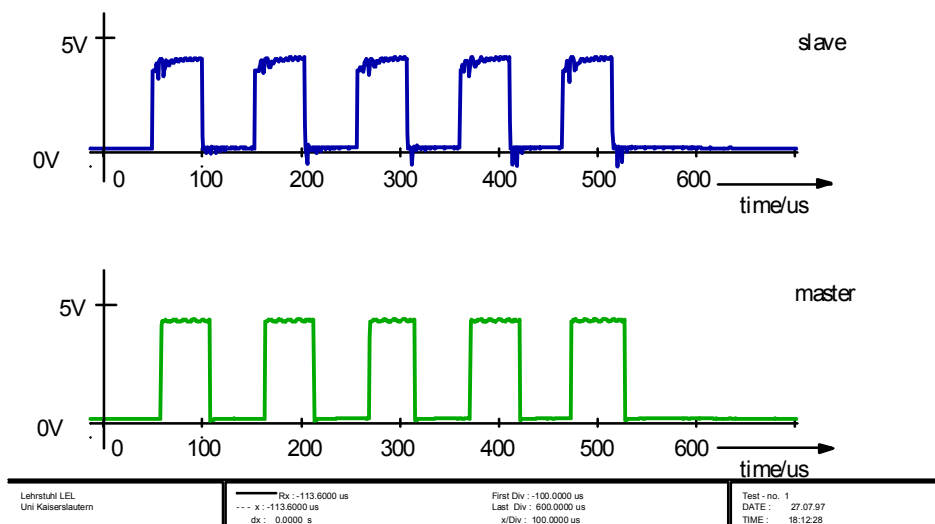


Bild 5.11 Slave-Sendesignal und Master-Empfangssignal

5.5 Ladeausgleich

Der Ladeausgleichsstrom ist beim Labormuster auf 2 A begrenzt. Unter der Annahme einer vielzelligen Batterie, bei der nur eine Zelle vollgeladen ist und die restlichen noch weit davon entfernt sind, würde der Ladeausgleich eine lange Zeit in Anspruch nehmen. Dieser hypothetische Fall ist für die Praxis nicht relevant. Unter der Voraussetzung, dass bei einer Batterie ein Ladeausgleich von Anfang an benutzt wird, sind die Abweichungen innerhalb eines Zyklus nur gering [Siedle 1998]. Dies wurde auch durch eigene Messungen verifiziert.

Vier NiCd-Zellen aus dem Gerätebereich mit jeweils eine Kapazität von 2200 mAh wurden zum Funktionsnachweis des Ladeausgleichs des hier vorgestellten Batteriemanagementsystems über den Ladeausgleich komplett geladen. Es wurde dabei auf ein „normales“ Ladegerät verzichtet. Die vier Zellen wiesen auch nach mehreren Zyklen kein voneinander abweichendes Verhalten auf.

5.6 Vergleich mit anderen Batteriemanagementsystemen

Das hier vorgestellte Batteriemanagementsystem nutzt ein Zwei-Draht-Bussystem sowohl für die Kommunikation als auch für den Ladeausgleich. Damit ist die Verdrahtung weit weniger aufwändig als bei den Systemen mit direkter Verdrahtung, bei denen ebenfalls die gleichen Leitungen für Kommunikation und Ladeausgleich genutzt werden. Der Vorteil gegenüber den Systemen mit verteilter Datenerfassung, die zum Ladeausgleich die Topologie Energieumsetzung benutzen, ist hier der Ladeausgleich mit der Topologie Energiezuführung. Damit wird auch der Aufwand für das Ladegerät reduziert, da die Topologie Energieumsetzung eine spezielle Ladeausgleichsstufe benötigt, während dies hier nicht der Fall ist. Der Ladeausgleich kann sogar während des Entladens arbeiten. Der Vorteil gegenüber der Topologie Energieumverteilung liegt in der hier möglichen Datenerfassung. Der geringe Ladeausgleichsstrom ist nicht von Nachteil. Von Nachteil ist allerdings der recht große technische und damit auch finanzielle Aufwand.

Bisher wurden nur die Topologien und technischen Grundlagen der Gerätentwicklung für Batteriemanagementsysteme betrachtet. Im nächsten Kapitel werden die Grundlagen der Algorithmen und typische Algorithmen vorgestellt.

6 Algorithmen

In Kapitel 4 und in Kapitel 5 wurden Topologien und Prinzipien von Batteriemanagementsystemen vorgestellt. Dort wurden u.a. der physikalische Aufbau und die Verdrahtung unabhängig von der Art der zu überwachenden Batterie diskutiert. Es wurde außerdem postuliert, dass aus den drei Grundgrößen Spannung, Strom und Temperatur und einem Bezug zur Zeit die Aktionen und Reaktionen für das Batteriemangement abgeleitet werden können. Diese Aktionen und Reaktionen, die durch Algorithmen beschrieben werden, sind notwendig, um die Qualität einer Batterie zu erhalten. Dazu muss der Batterie-Zustand erfasst und entsprechend dem Batterietyp darauf reagiert werden. Die Forderungen an eine Batterie wurden in Kapitel 4 allgemein aufgestellt. Dies sind:

- hohe Verfügbarkeit
- Kenntnis des aktuellen Ladezustandes
- Kenntnis der aktuellen Qualität

Diese drei Forderungen werden im Folgenden spezifiziert.

Eine hohe Verfügbarkeit ist in erster Linie gleichbedeutend mit einer langen Lebensdauer der Batterie. Um eine lange Lebensdauer einer Batterie zu erreichen, müssen irreversible Alterungserscheinungen, bedingt z.B. durch Korrosion, möglichst lange verzögert werden. Dies wird erreicht, wenn die Batterie innerhalb definierter elektrischer und thermischer Grenzen betrieben wird. Im Einzelnen heißt dies z.B. Vermeiden des Überschreitens der Ladeschlussspannung und Vermeiden des Unterschreitens der Entladeschlussspannung jeweils unter Beachtung der Temperatur und der Strombelastung. Weiter beinhaltet dies das Vermeiden von Überladen sowie das Vermeiden von zu großer Stromentnahme. Auch das Einhalten batteriespezifischer Temperaturgrenzen ist wichtig, wobei hier mit entscheidend ein gleichmäßiges Temperaturniveau der einzelnen Teilbatterien ist. Die Verfügbarkeit wird auch durch das Vermeiden von reversiblen Alterungserscheinungen, z.B. dem sogenannten Memory-Effekt, erhöht. Dieser lässt sich u.a. durch Vermeiden langen Überladens der Batterie verhindern. Weiter wird die Verfügbarkeit erhöht, wenn der Zeitaufwand für die Wartung reduziert werden kann. Dies gilt für nicht gasdichte oder nicht verschlossene Batterien, wenn der Wasserverlust durch Vermeiden von zu großer Überladung minimiert wird.

Die Kenntnis des aktuellen Ladezustandes entspricht im Prinzip einer „Tankanzeige“ für die Batterie. Das Feststellen des Ladezustandes, der mit SOC (State of Charge) bezeichnet wird, ist die schwierigste Aufgabe des Batteriemanagementsystems. Hierfür müssen spezielle Algorithmen und eventuell Batteriemodelle implementiert werden.

Die aktuelle Qualität geht über die Kenntnis des aktuellen Ladezustandes hinaus. Sie beinhaltet die momentan mögliche maximale Kapazität der Batterie. D.h. auch Alterungseffekte gehen in die aktuelle Qualität mit ein. Um die aktuelle Qualität stabil zu

halten oder zu verbessern, sind die Randbedingungen für die hohe Verfügbarkeit einzuhalten. Unter Qualität fällt auch das Prüfen der Batterie auf Isolationsfehler. Dies ist vor allem im Bereich höherer Batteriespannungen, z.B. in der Traktion, wichtig.

Aus den Ausführungen lässt sich leicht erkennen, dass die drei Forderungen nur durch batteriespezifische Algorithmen zu erfüllen sind. Deswegen werden die drei Forderungen im Folgenden batteriespezifisch diskutiert.

6.1 Hohe Verfügbarkeit

6.1.1 Bleibatterien

Der elektrische und der thermische Betriebsbereich einer Batterie sind für eine hohe Verfügbarkeit einzuhalten. Bild 6.1 zeigt den elektrischen Betriebsbereich für eine verschlossene Bleibatterie im Traktionseinsatz [Kalker 1994].

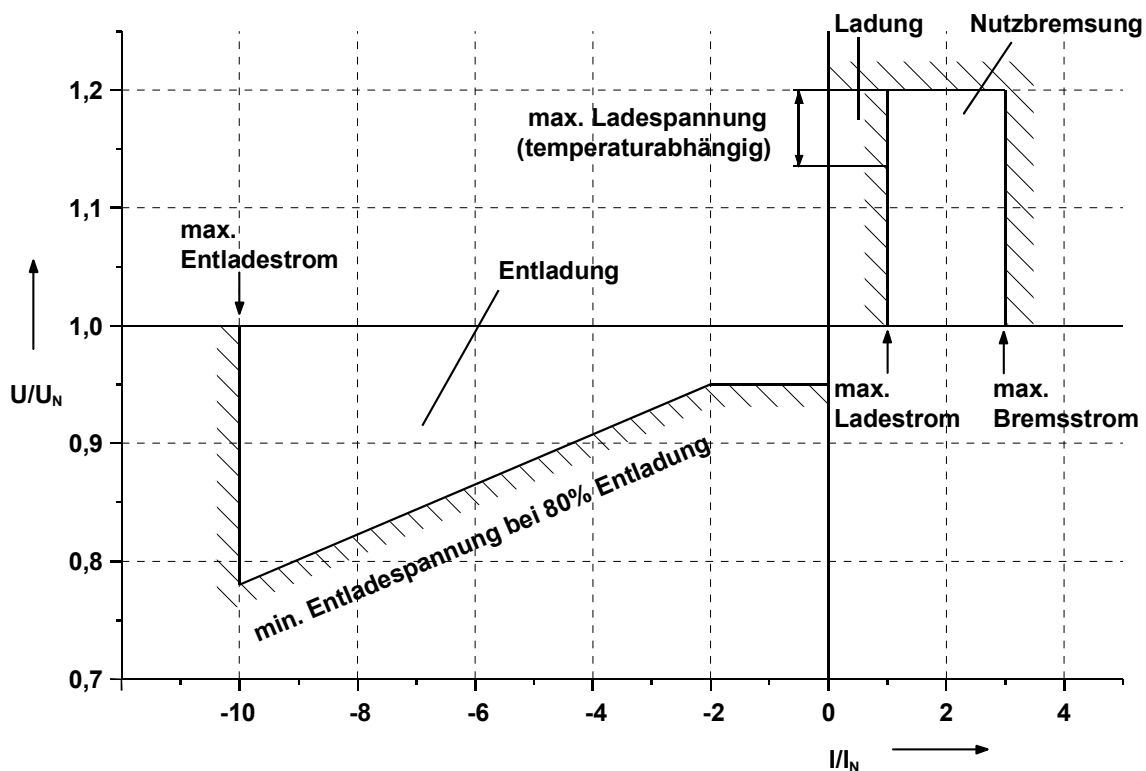


Bild 6.1 Elektrischer Betriebsbereich einer verschlossenen Bleibatterie

Wie in Bild 6.1 zu erkennen ist, wird der Betriebsbereich sowohl für das Entladen wie auch für das Laden begrenzt. Beim Entladen hängt die minimale Entladespannung von der Vorgeschichte ab. Für große Entladeströme, ab $I/I_N = -2$, reduziert sich die Entladeschlussspannung von $0,95U/U_N$ bis auf $0,75U/U_N$. I_N ist dabei der 5h-Entladestrom. Bei einer Batterie mit einer Nennkapazität von 160 Ah ist dies ein Entladestrom von 32 A. In Zahlen bedeutet dies eine Reduzierung der Entladeschlussspannung von 1,9 V bis auf 1,5 V. Bild 6.2 zeigt die Reduzierung der Entladeschlussspannung in Abhängigkeit von der Entladezeit für eine 160Ah Bleibatterie der Fa. Sonnenschein [Heinemann 1998].

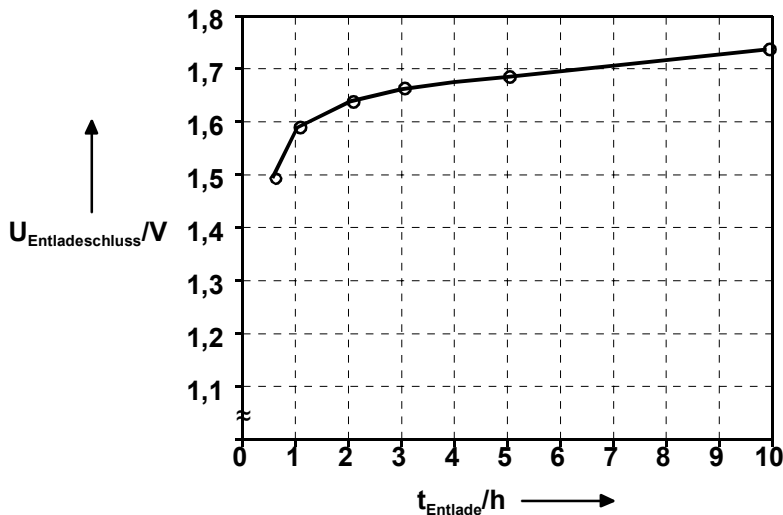


Bild 6.2 Entladeschlussspannung in Abhängigkeit von der Entladezeit

Die Entladeschlussspannung $U_{\text{Entladeschluss}}$ in Bild 6.2 korreliert mit dem der Zelle entnommenen Strom. Es wird z.B. für eine einstündige Entladung der Batterie, was hier einem Strom von 160 A entspricht, die Entladeschlussspannung auf 1,6 V festgelegt. Es ergeben sich mit Bild 6.1 vergleichbare Werte. Prinzipiell wird mit der Reduzierung der Entladeschlussspannung proportional zur Stromentnahme dem in Kapitel 3 beschriebenen Effekt, nämlich dass die entnehmbare Ladung mit Erhöhung der Stromentnahme sinkt, zum Teil Rechnung getragen.

Generell wird bei einer Entladetiefe von 80% der Nennkapazität der Entladestrom stark begrenzt. Dies geschieht, um eine Tiefentladung einzelner Zellen zu vermeiden. Mit diesem „weichen“ Entladeschluss lässt sich z.B. ein Elektrostraßenfahrzeug noch eine Weile mit verminderter Fahrleistung fortbewegen. Auch hier muss die Batterietemperatur berücksichtigt werden. Denn bezogen auf eine Batterietemperatur von 30 °C verringert sich bei tieferen Temperaturen die entnehmbare Ladung aus der Batterie um rund 1 %/K. Für Temperaturen unter 0 °C vergrößert sich dieser Faktor auf rund 2 %/K. Das bedeutet, dass sich die entnehmbare Ladung bis zum Erreichen einer Entladetiefe von 80 % ebenfalls mit der Temperatur reduziert und entsprechend angepasst werden muss. Bild 6.3 zeigt eine typische Kapazitätskurve in Abhängigkeit von der Temperatur [Heinemann 1998].

In Bild 6.3 ist die Nennkapazität von 100 % bei einer Temperatur von 25 °C erreicht. Anzumerken ist, dass die Bezugstemperatur je nach Hersteller zwischen den Werten 25 °C und 30 °C variiert. Dies ist bei den Algorithmen des Batteriemangements zu beachten. Der Verlauf kann, wie oben beschrieben wurde, mit einer Abnahme der entnehmbaren Kapazität von 1%/K für Temperaturen größer 0 °C und 2 %/K für Temperaturen unter 0 °C beschrieben werden.

Als weiterer begrenzender Faktor kommt die Batterietemperatur hinzu. Bei Batterietemperaturen über 50 °C muss der Entladestrom stark reduziert werden. Im Elektrostraßenfahrzeug führt dies dazu, dass nur noch ein Notlauf-Betrieb mit geringer Leistung möglich ist.

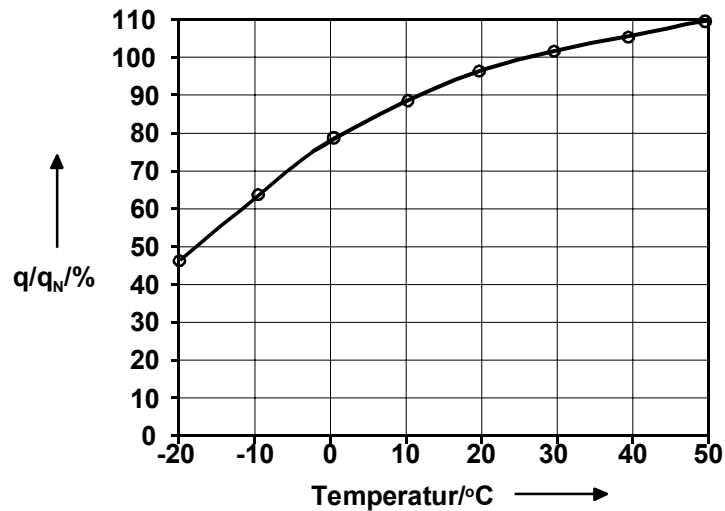


Bild 6.3 Entnehmbare Kapazität bezogen auf die Nennkapazität in Abhängigkeit von der Temperatur

Wie gezeigt wurde, hängt die Kapazität einer Batterie von der Temperatur und der Stromentnahme ab. In der Praxis wird deswegen die Entladetiefe von 80% anhand der Batteriespannung bestimmt. D.h. bei Unterschreiten einer definierten Entladeschlussspannung wird der Entladestrom schrittweise bis auf Null reduziert. Dies ist auch aus Bild 6.1 zu ersehen.

Aus den oben beschriebenen Abhängigkeiten wird der Algorithmus für das Batteriemangement abgeleitet. In Bild 6.4, Bild 6.5 und Bild 6.6 werden exemplarisch Algorithmen für die Temperatur-, Spannungs- und Stromabhängigkeiten gezeigt. Es wird von der Messung an Teilbatterien ausgegangen. Der entsprechende Ablauf muss also für jede Teilbatterie wiederholt werden.

Im Temperatur-Algorithmus, den Bild 6.4 zeigt, wird für eine Temperatur von 40 °C die Kühlung eingeschaltet. Dieser Wert ist willkürlich gewählt. Er hängt z.B. von der Einsatzart und dem Einsatzort der Batterie ab. Ebenso ist die Stromreduktion bei Überschreiten der Grenze des thermischen Bereichs danach zu wählen. Für Bild 6.4 wurde eine Reduzierung um 20 % festgelegt.

Der Spannungs-Algorithmus überwacht lediglich das Einhalten des elektrischen Betriebsbereiches. Wenn die aktuelle Teilbatteriespannung U_{TB} unter die minimale Entladeschlussspannung U_{TBES} fällt, muss der Strom aus der Batterie reduziert werden.

Der Strom-Algorithmus dient vor allem als Sicherheitsfunktion. Falls eine Stromreduzierung durch den Temperatur-Algorithmus oder den Spannungs-Algorithmus fehlge-

schlagen ist, was z.B. bei einem Fehler während der Kommunikation mit dem Stellglied der Fall sein könnte, wird dies der Strom-Algorithmus erneut versuchen. Schlägt auch dieser Versuch fehl, wird die Batterie zwangsweise vom Verbraucher getrennt.

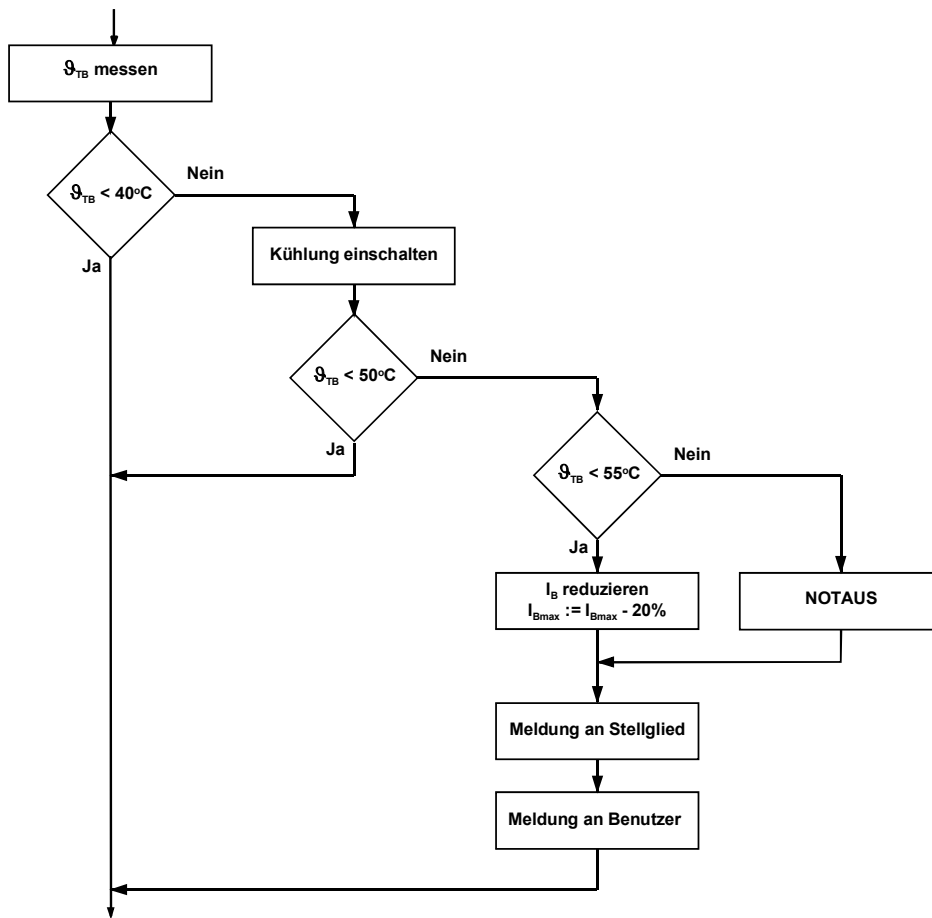


Bild 6.4 Temperatur-Algorithmus für eine Bleibatterie beim Entladen

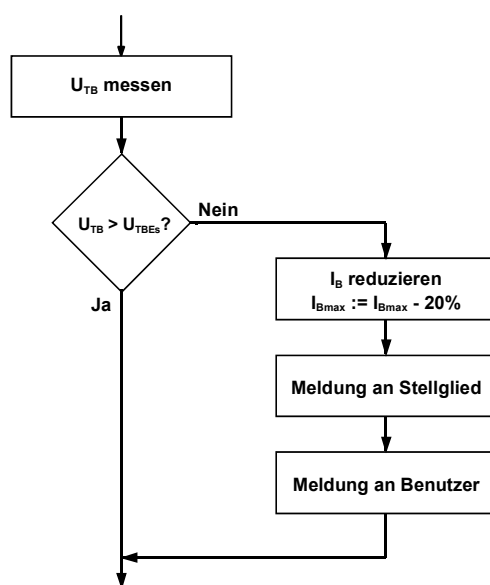


Bild 6.5 Spannungs-Algorithmus für eine Bleibatterie beim Entladen

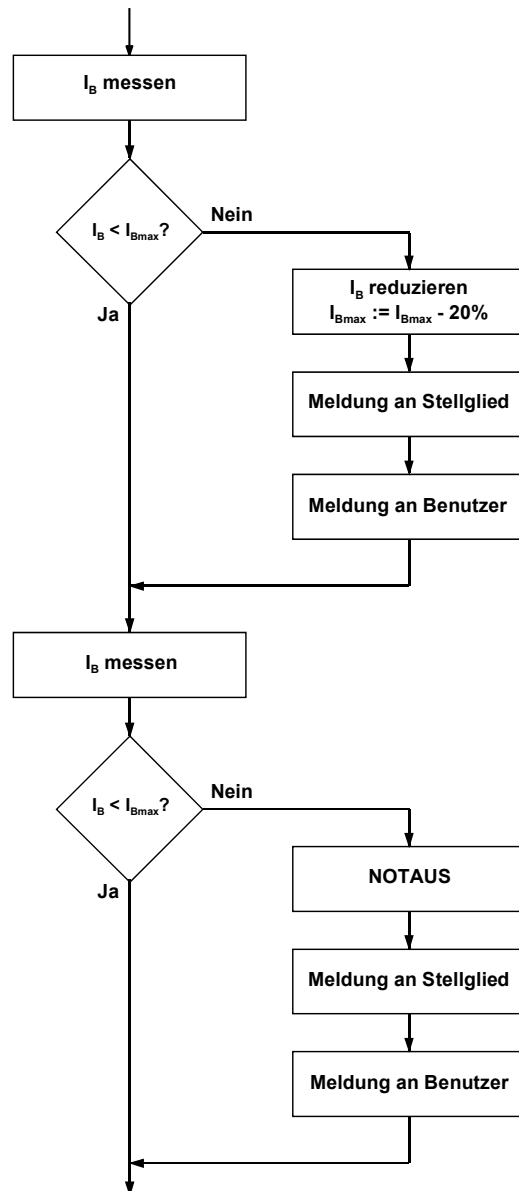


Bild 6.6 Strom-Algorithmus für eine Bleibatterie beim Entladen

Generell könnte auch das Stellglied den Strom messen. Da aber das Batteriemanagementsystem, wie in Kapitel 4 definiert, mit der Batterie die Einheit Batteriesystem bildet, muss auch dieses den Strom erfassen. Wie aus den obigen Bildern zu erkennen ist, kommen die Algorithmen ohne spezielles Batteriemodell aus. Es werden lediglich Batterie-Eckdaten benötigt.

Bild 6.1 beschreibt auch die elektrischen Grenzen beim Laden der verschlossenen Bleibatterie. Es wird dort im Falle des Einsatzes in der Traktion unterschieden in Ladung und Nutzbremmung. Für die Ladung soll der maximale Ladestrom auf I_N begrenzt werden. Für die nur kurzzeitig auftretende Nutzbremmung dagegen sind $3I_N$ erlaubt. Generell kann eine Bleibatterie auch mit höheren Strömen geladen werden, allerdings lässt sich damit die Batterie nicht 100 % vollladen. Vergleichbar mit den Ausführungen in Kapitel 3 zur Entladung mit großen Strömen gilt hier ähnliches bei der Ladung mit großen Strömen.

In Bild 6.1 ist ebenfalls zu erkennen, dass die Ladeschlussspannung temperaturabhängig angepasst werden muss. Für die Ladung einer verschlossenen Bleibatterie gilt generell, dass die Spannung grundsätzlich zu begrenzen ist, da die Ladespannung zwar oberhalb des zur Umsetzung der aktiven Masse erforderlichen Potentials, aber unterhalb der Wasserzersetzungsspannung eingestellt werden muss. Bild 6.7 zeigt die erforderliche Temperaturkompensation der Ladespannung für eine verschlossene Bleibatterie [Kalker 1994].

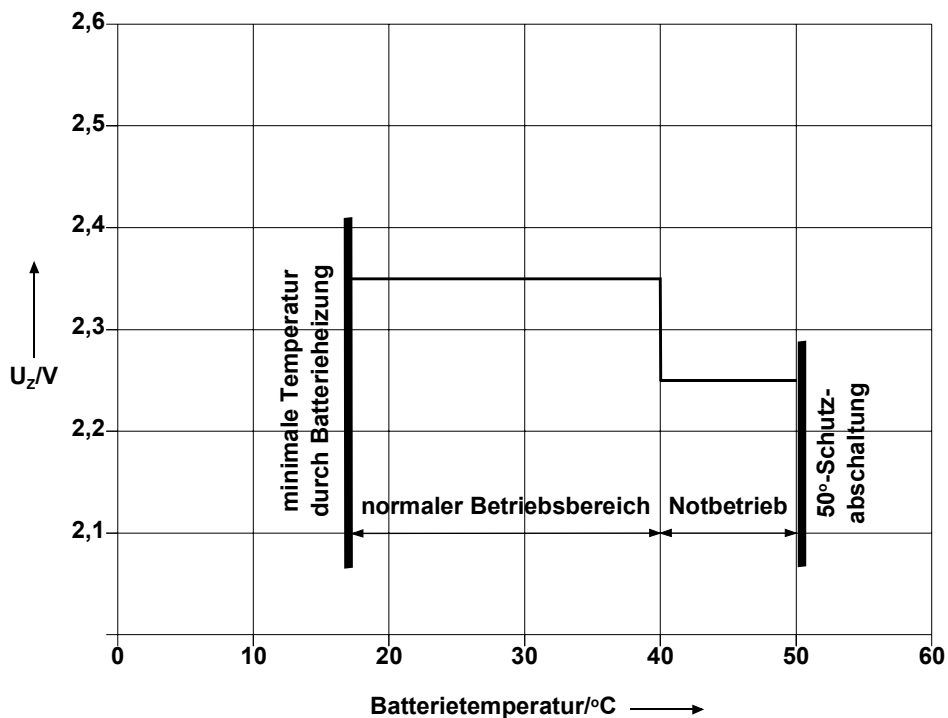


Bild 6.7 Erforderliche Temperaturkompensation der Ladespannung einer verschlossenen Bleibatterie

In Bild 6.7 ist zu erkennen, dass der normale Lade-Betriebsbereich der Batterie zwischen 15 °C und 40 °C liegt. In dem Bereich von 18 °C bis 40 °C wird vom Batteriehersteller (Sonnenschein) für eine verschlossene Bleibatterie eine Ladespannung von 2,35 V/Zelle angegeben. Unterhalb von 18 °C ist eine Ladespannung von 2,4 V/Zelle erforderlich. Allerdings kann es bei Spannungen um und knapp über 2,4 V/Zelle zu einer lokal erhöhten Wasserzersetzung kommen. Deswegen empfiehlt der Hersteller, die Batterie soweit zu erwärmen, dass mit einer Spannung unterhalb 2,4 V/Zelle, z.B. mit 2,35 V/Zelle, geladen werden. Die Erwärmung der Batterie kann durch eine Batterieheizung erreicht werden. Deswegen wird für den normalen Betriebsbereich 15 °C als untere Grenze angegeben. Zwischen 40 °C und 50 °C ist eine Ladung bei einer auf 2,25 V/Zelle reduzierten Ladespannung möglich. Dies sollte allerdings nur im Notfall erfolgen. Weiter ist zu erkennen, dass bei Batterietemperaturen über 50 °C keine Ladung mehr erlaubt ist.

Wie oben gezeigt wurde, muss eine Anpassung der Ladeschlussspannung in Abhängigkeit von der Temperatur für verschlossene Batterien erfolgen. Diese Anpassung hängt vom Batterietyp, vom Batteriehersteller und der Einsatzart ab. Tabelle 6.1 zeigt die empfohlene Ladespannung für eine Erhaltungsladung bei einer verschlossenen Bleibatterie für den USV-Einsatz [NIFE 2000].

Tabelle 6.1 Erhaltungsladespannung und Batterietemperatur bei einer verschlossenen Bleibatterie im USV-Einsatz

Erhaltungsladespannung/V/Zelle	Batterietemperatur/°C
2,5	-20
2,4	-10
2,35	0
2,3	10
2,27	20
2,25	25
2,23	30
2,21	35
2,19	40

Ein Vergleich von Bild 6.7 mit den Werten aus Tabelle 6.1 zeigt prinzipiell die gleiche Tendenz, wobei die Werte aus Tabelle 6.1 unter denen von Bild 6.7 liegen. Dies liegt darin begründet, dass für Erhaltungsladungen im Bereich der USV-Anlagen die Ladespannung in der Regel etwas unterhalb der Ladeschlussspannung des regulären Ladens liegt.

Anders liegt der Fall bei geschlossenen Bleibatterien im USV-Einsatz. Hier liegt der empfohlene Betriebstemperaturbereich zwischen 10 °C und 30 °C. Hier wird für eine Erhaltungsladung eine Ladespannung von 2,23 V/Zelle bei einer Batterietemperatur von 20 °C angegeben [NIFE 2000a].

Ähnlich wie beim Entladen der Batterie wird der Algorithmus des Batteriemagements auch beim Laden in den Temperatur-, Spannungs- und Strom-Algorithmus aufgeteilt.

Bild 6.8 zeigt, dass mit dem Temperatur-Algorithmus nicht nur der thermische Betriebsbereich überwacht, sondern auch die Ladeschlussspannung entsprechend angepasst wird. Bei Überschreiten der für das Laden maximal zulässigen Temperatur trennt das Batteriemangement die Batterie vom Ladegerät.

Der Spannungs-Algorithmus (Bild 6.9) überwacht nur das Überschreiten der maximal zulässigen Ladeschlussspannung. Diese ist, wie oben beschrieben wurde, eine Funktion der Temperatur.

Auch der Strom-Algorithmus dient lediglich zur Überwachung. Bei Überschreiten des maximalen Ladestromes wird die Ladung beendet.

In allen Algorithmen ist eine Kommunikation mit anderen Instanzen, wie z.B. dem Ladegerät, notwendig. Die Forderung nach der Kommunikationsfähigkeit wurde bereits in Kapitel 4 postuliert.

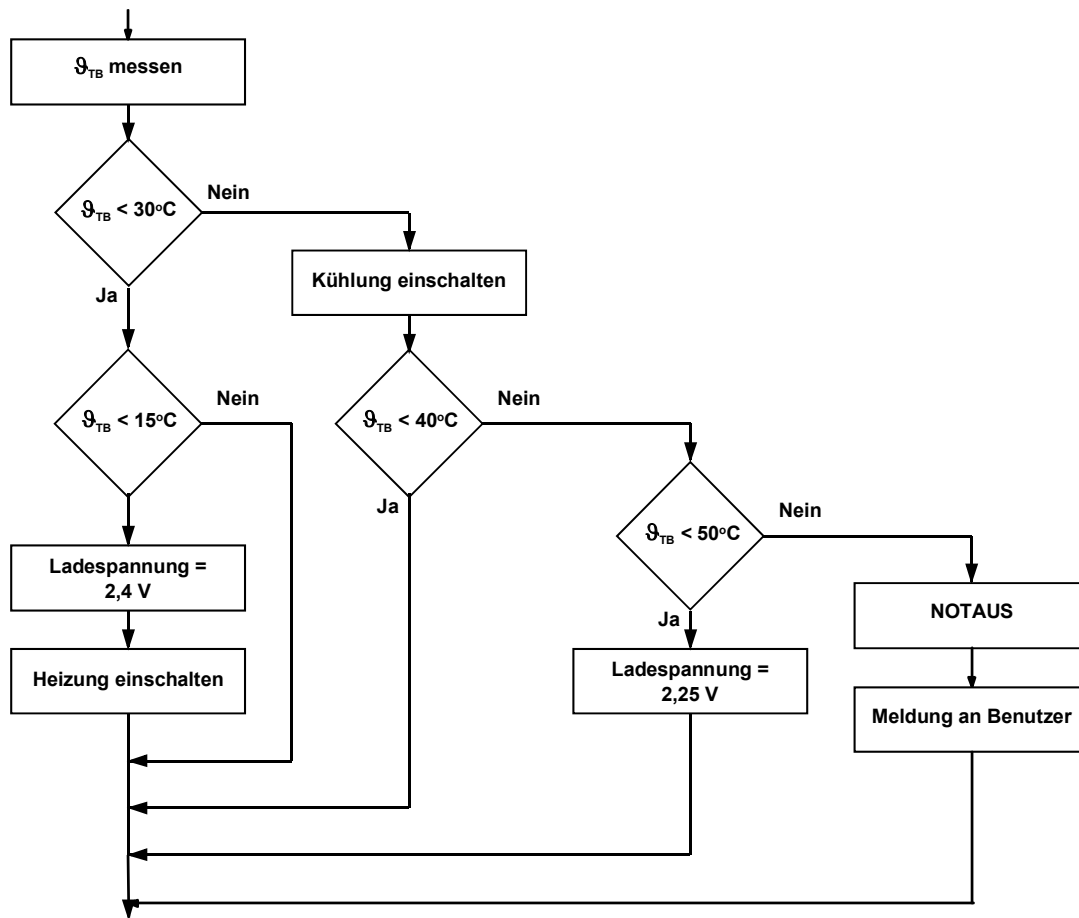


Bild 6.8 Temperatur-Algorithmus für eine Bleibatterie beim Laden

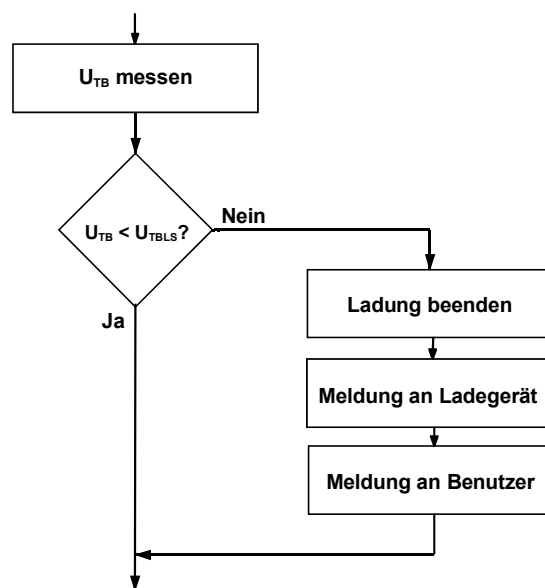


Bild 6.9 Spannungs-Algorithmus für eine Bleibatterie beim Laden

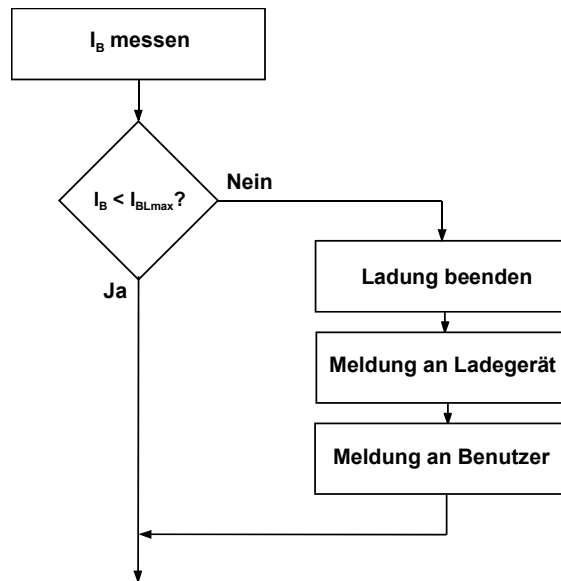


Bild 6.10 Strom-Algorithmus für eine Bleibatterie beim Laden

6.1.2 NiCd- und NiMh-Batterien

Die Systeme NiCd-Batterie und NiMh-Batterie unterscheiden sich elektrisch und thermisch nur wenig, so dass für beide derselbe Algorithmus für das Batteriemangement verwendet werden kann. Wie in Kapitel 2 beschrieben wurde, bestehen Unterschiede lediglich im Betriebstemperaturbereich für Temperaturen unter -10 °C , in der Energiedichte und im Preis.

Der elektrische Betriebsbereich dieser Batterien ist größer als der einer Bleibatterie, da aufgrund des gegenüber einer Bleibatterie niedrigeren Innenwiderstandes die NiCd- und die NiMh-Batterie eine bessere Hochstromfähigkeit haben. Dies zeigt sich sowohl beim Entladen als auch beim Laden. Bild 6.11 zeigt die Entladecharakteristik einer NiMh-Hochenergie-Rundzelle für verschiedene Entladeströme. Die Zelle hat eine Kapazität von 150 Ah [Köhler 1997].

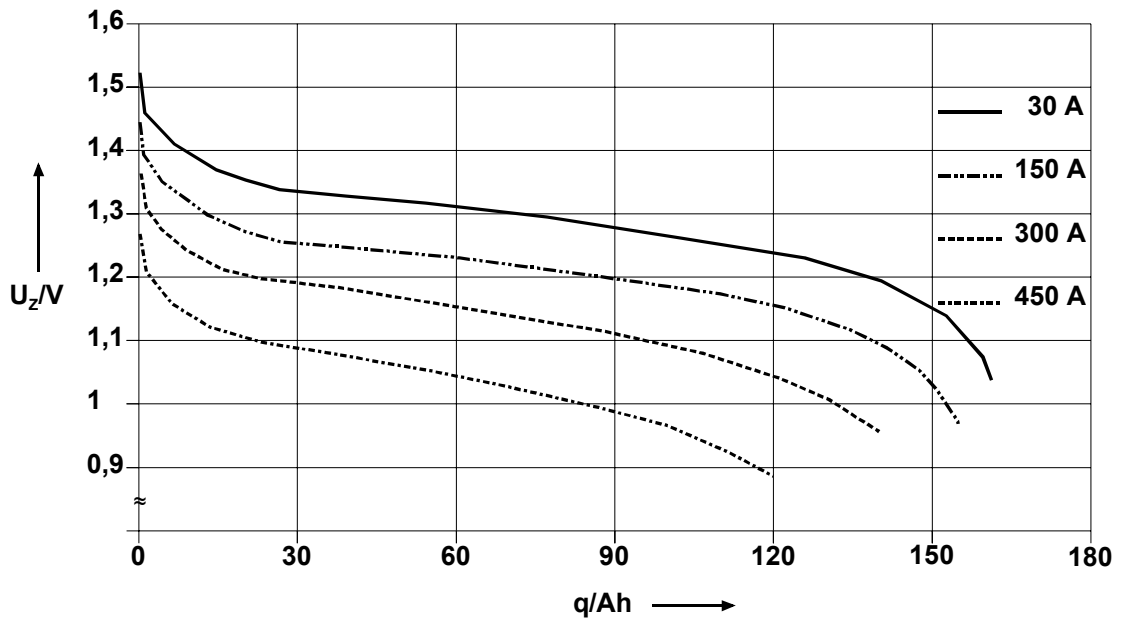


Bild 6.11 Entladekurven einer NiMh-Hochenergiezelle

Für den Algorithmus des Batteriemangements ist entscheidend, dass, wie Bild 6.11 zu entnehmen, die Entladeschlussspannung mit der Entladezeit und damit mit dem Entladestrom variiert. Auch bei diesen Batterien hängt die Entladeschlussspannung von der Vorgeschichte ab. Für die Zelle nach Bild 6.11 liegt die Entladeschlussspannung zwischen $0,85U/U_N$ und $0,75U/U_N$. Einen vergleichbaren Verlauf zeigt auch eine vielzellige NiMh-Batterie für den Traktions-Einsatz [Gereth 1994]. Bei den Höchstleistungszellen, die bis $30C_1$ entladen werden können, geht die Entladeschlussspannung nach Bild 6.12 auf bis zu $0,5U/U_N$ zurück [Köhler 1997]. Bild 6.12 zeigt die Entladung einer 10Ah-Zelle.

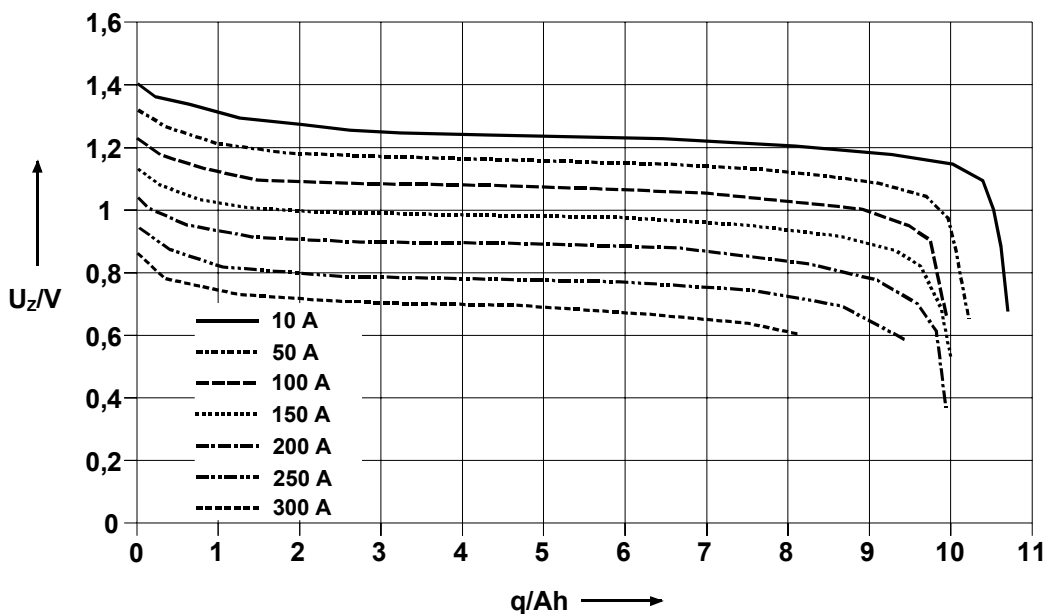


Bild 6.12 Entladekurven einer NiMh-Höchstleistungszelle für verschiedene Entladezeiten

C_1 ist dabei der einständige Entladestrom. Für die 10Ah-Zelle in Bild 6.12 bedeutet dies, dass C_1 einem Entladestrom von 10 A entspricht.

Nach Bild 6.12 ist hier die Korrelation zwischen der minimalen Entladespannung und dem Entladestrom nur gering. D.h. die Entladeschlussspannung ist von dem Entladestrom und damit der Vorgeschichte nahezu unabhängig.

NiCd- und NiMh-Batterien sind gegenüber einer Tiefentladung wesentlich toleranter als eine Bleibatterie. Dies liegt in der Überdimensionierung der negativen Elektrode gegenüber der positiven Elektrode begründet. Diese „Reserve“ erlaubt, wenn auch nur mit begrenztem Strom, ein Überladen und Tiefentladen dieser Zellen. Auch eine Umpolung, was im Falle der Reihenschaltung zum Entladeschluss hin vorkommen kann, ist erlaubt [Köhler 2001].

Weiter ist die Temperaturabhängigkeit der NiCd- und NiMh-Batterien mit einer Abnahme der Kapazität von 0,5 %/K für Temperaturen kleiner 25 °C deutlich niedriger als die der Bleibatterie [Thanner 1993].

Wie bei der Bleibatterie wird auch bei den NiCd- und NiMh-Batterien eine Batterietemperatur von 50 °C als obere Betriebsgrenze angesehen.

Die Batteriespannung geht in den Algorithmus für das Batteriemangement beim Entladen der Batterie insofern mit ein, als dass nach Unterschreiten der minimal zulässigen Entladespannung der Entladestrom auf einen für das Tiefentladen der Zellen unkritischen Wert begrenzt wird. Beide Werte, die minimal zulässige Entladespannung und die Strombegrenzung bei Tiefentladung, sind batteriespezifische Größen.

Temperatur-, Spannungs- und Stromalgorithmen für das Entladen von NiCd- und NiMh-Batterien entsprechen denen der Bleibatterie. Bei einer Implementierung muss allerdings die Entladeschlussspannung der Batterie entsprechend angepasst werden.

Das Laden der NiCd- und NiMh-Zellen kann, aufgrund der oben beschriebenen Hochstromfähigkeit, mit wesentlich größeren Strömen als bei den Bleibatterien erfolgen. So können Hochleistungszellen mit $5C_1$ und Höchstleistungszellen mit $20C_1$ in kurzer Zeit bis zu 80 % geladen werden [Köhler 2001]. Begrenzend für die Schnellladung ist dabei der Temperaturanstieg der Zellen.

Generell sollte die NiCd-Batterie nicht oberhalb 35 °C und die NiMh-Batterie nicht oberhalb 30 °C geladen werden [Schöpe 1997].

Bild 6.13 zeigt die Ladecharakteristik einer NiMh-Batterie bei schnellem Aufladen [Köhler 1997].

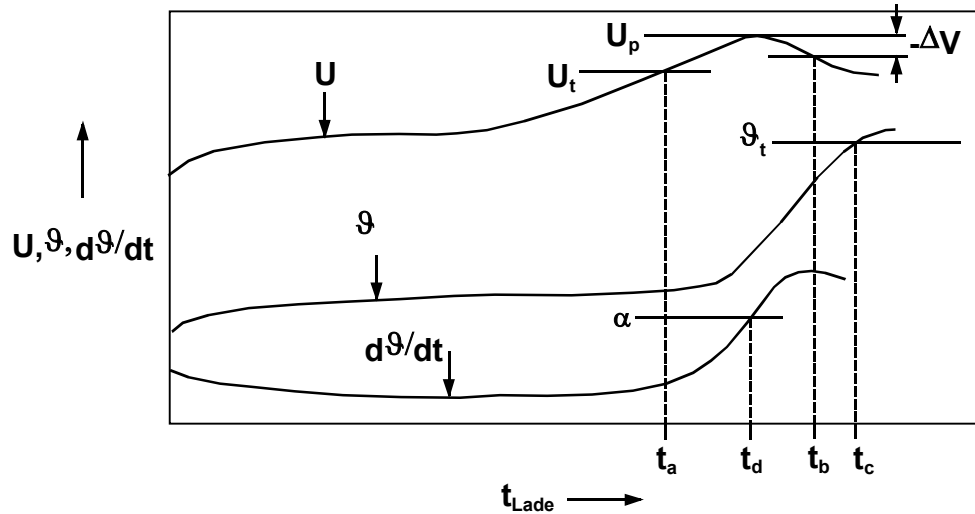


Bild 6.13 Ladecharakteristik einer NiMh-Batterie bei schnellem Aufladen

Zum Zeit t_a erreicht die Zellenspannung den Wert U_t . Bei dieser Spannung sind ca. 70 % der Ladung erreicht. Diese Spannung kann benutzt werden, um ab diesem Punkt den hohen Ladestrom einer Schnellladung zu reduzieren. Dies ist vor allem interessant, wenn die Batterie an diesem Punkt bereits in der Nähe ihrer thermischen Grenzwerte ist. Der Wendepunkt α in der Ableitung der Temperaturkurve kann zu dem gleichen Zweck benutzt werden. Der am häufigsten benutzte Parameter für das Erkennen des Ladeendes ist das Absinken der Zellenspannung um $-\Delta V$ nach Durchlaufen des Spannungsmaximums U_p . Die Zelltemperatur Θ_t kann als zusätzlicher Abschaltparameter verwendet werden. Für NiCd-Batterien gelten die gleichen Aussagen. Es ist hier zu beachten, dass der Spannungsrückgang $-\Delta V$ bei Ladeende bei NiMh-Batterien weniger stark ausgeprägt ist als bei NiCd-Batterien. Generell gilt, dass bei vielzelligen Batterien aufgrund der Differenzen der einzelnen Zellen das Absinken der Zellenspannung nach Durchlaufen des Spannungsmaximums nicht so stark ausgeprägt ist wie bei Einzelzellen.

Bild 6.14 zeigt den Temperatur-Algorithmus beim Laden von NiCd- und NiMh-Batterien.

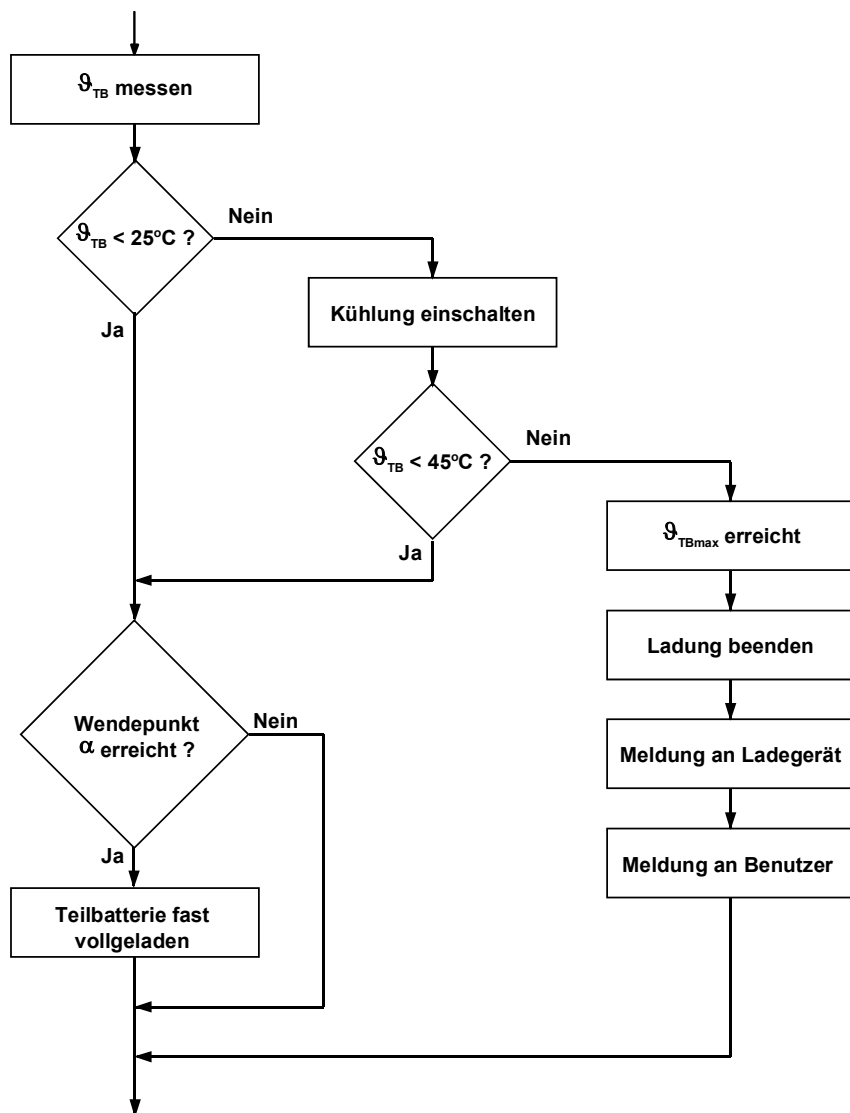


Bild 6.14 Temperatur-Algorithmus für Ladebetrieb von NiCd- und NiMh-Batterien

Die Temperaturen in Bild 6.14 sollen nur Anhaltswerte darstellen. Sie variieren in der Praxis in Abhängigkeit vom Einbauort, der Kühlart und dem Batterietyp. Das Erreichen des Wendepunktes der Ableitung der Temperatur α gibt an, dass die Batterie nahezu vollgeladen ist. Das Erreichen der maximal zulässigen Ladetemperatur kann auch als NOTAUS-Kriterium genutzt werden, wie bei den Bleibatterien beschrieben wurde.

Der Spannungs- und der Strom-Algorithmus sind vom Aufbau gleich den entsprechenden Algorithmen der Bleibatterie. Allerdings haben beide nur eine Sicherheitsfunktion, da das Erreichen einer bestimmten Ladespannung nicht als Kriterium für das reguläre Ladeende benutzt wird. Das Überschreiten einer definierten Ladespannung deutet also auf einen Fehler beim Laden hin und muss zum zwangsweisen Abschalten führen.

6.1.3 Lithium-Batterien

Der Algorithmus des Batteriemanagementsystems für Lithium-Batterien gestaltet sich insofern schwierig, da zum einen die Lithium-Batterien in die Grundsysteme Li-Ion, Li-Metall und Lithium-Polymer zu unterteilen sind und zum anderen nur wenige Informationen zum elektrischen und thermischen Verhalten dieser Zellen vorliegen. Lithium-Batterien im Geräteinsatz werden hier nicht näher betrachtet, da dieses Anwendungsgebiet nicht die harten Forderungen des Bordnetzes oder der Traktion hat und es für den Gerätebereich eine Reihe von integrierten Batteriemanagementsystemen bereits gibt. Eine Auswahl wird im Kapitel 9 beschrieben.

Für die Li-Metall-Batterie lässt sich über den Algorithmus für das Batteriemangement nur sehr wenig sagen. Diese Batterie ist bisher nur als Labormuster verfügbar. Laut Hersteller ist diese Batterie überladefest und tiefentladefähig [Stassen 2001]. Es gibt keine Aussagen über elektrische und thermische Grenzen.

Li-Polymer-Batterien für das 42V-Kfz-Bordnetz und die Traktion sind noch in der Prototypenphase. Auch hier gibt es wenige gesicherte Aussagen. Bekannt ist, dass der Innenwiderstand über den Temperaturbereich von 40 °C bis –20 °C um rund den Faktor 6,5 ansteigt [Heise 2001]. Dies bedeutet, dass bei gleicher Stromentnahme sich die Batteriespannung in diesem Temperaturbereich ebenfalls um den gleichen Faktor ändert.

Über die Li-Ionen Batterien liegen Informationen vor, die die Definition eines Algorithmus für das Batteriemangement erlauben. Bild 6.15 zeigt die Entladecharakteristik einer 60Ah-Li-Ionen-Hochleistungszelle [Köhler 2001].

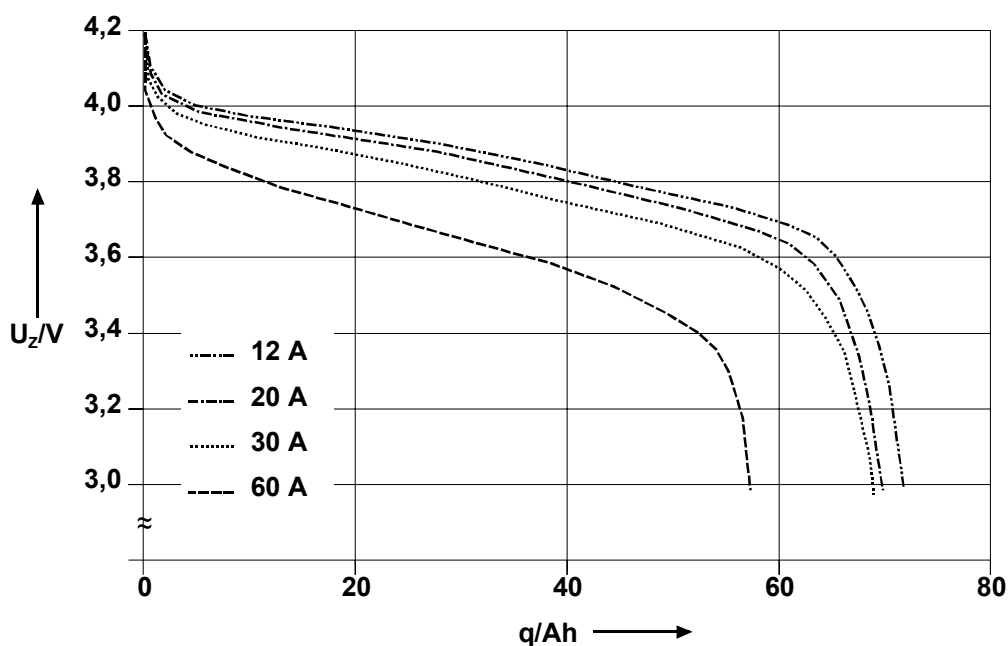


Bild 6.15 Entladecharakteristik einer Li-Ionen-Zelle

In Bild 6.15 ist zu erkennen, dass für größere Ströme bei einer Begrenzung der Entladeschlussspannung auf 2,8 V nicht die komplette in der Batterie verfügbare Energie entnommen werden kann. Es ist hier auch keine Reduzierung der Entladeschlussspannung in Abhängigkeit von der Stromhöhe vergleichbar mit den Blei-, NiCd- und NiMH-Batterien vorgesehen.

Die thermische Obergrenze im Betrieb liegt bei 60 °C. Bei Überschreiten dieser Temperatur besteht die Gefahr des Zersetzens des organischen Elektrolytes. Die untere Grenze der Batterietemperatur ist nach Kapitel 2 zu –10 °C definiert.

Das Laden der Li-Ionen-Batterie erfordert eine exakte Überwachung der einzelnen Batteriezellen. Die Ladeschlussspannung einer Li-Ionen-Batterie im Traktionseinsatz muss innerhalb einer Toleranz von 0,2 % eingehalten werden. Ob und wie die Ladeschlussspannung mit der Batterietemperatur variiert werden muss, ist bisher nicht veröffentlicht. Ansonsten gilt für das Laden ebenfalls die thermische Obergrenze von 60 °C.

Die Spannungs- und Strom-Algorithmen beim Laden und Entladen entsprechen denen einer Bleibatterie. Der Temperatur-Algorithmus beim Entladen entspricht ebenfalls dem einer Bleibatterie, wogegen beim Laden die Ladeschlussspannung im Gegensatz zur Bleibatterie nicht in Abhängigkeit von der Batterietemperatur variiert wird.

6.1.4 NaS- und NaNiCl-Batterie

Das Ladeverfahren für die NaS- und die NaNiCl-Batterie unterscheidet sich zwar von dem der Bleibatterie, aber der Spannungs- und Strom-Algorithmus des Batteriemanagementsystems ist im Wesentlichen derselbe. Es muss allerdings beachtet werden, dass nach Zellenausfall die Ladeschlussspannung der Batterie angepasst werden muss. Ein Zellenausfall bei der NaNiCl-Batterie führt zu einer Verringerung der Gesamtspannung um die Ruhespannung der Anzahl der ausgefallenen Zellen, da diese bei Ausfall prinzipbedingt niederohmig werden [Böhm 1997]. Bei der NaS-Batterie werden ausgefallene Zellen durch eine zusätzliche elektronische Schaltung überbrückt, da diese Zellen bei Ausfall prinzipbedingt hochohmig werden [Kahlen 1994].

Der Temperatur-Algorithmus muss bei den Hochtemperatur-Batterien die gleichen Aufgaben wie bei den oben diskutierten Batterien erfüllen. Wird die Batterie zu kalt, muss geheizt werden und wird die Batterie zu warm, muss gekühlt werden. Der Unterschied zu den anderen Batterien ist das Betriebstemperatur-Niveau von rund 300 °C.

6.2 Aktueller Ladezustand

Das Feststellen des aktuellen Ladezustandes einer Batterie ist die schwierigste Aufgabe des Batteriemanagements. Es spielen Faktoren wie Vorgeschichte, Alterung, Batterietemperatur, Entladestrom und Entladespannung eine Rolle. Es sind in der Literatur

eine Reihe von Lösungsansätzen bekannt, die mit mehr oder weniger großem Aufwand mehr oder weniger gute Ergebnisse liefern. Es gibt eine Reihe von Geräten für den Einsatz mit Bleibatterien. So z.B. ein Gerät zum Feststellen des aktuellen Ladezustandes von Bleibatterien im Traktionseinsatz [Wille 1983]. Dieses arbeitet auf der Basis des Messens von Batteriespannung, Batteriestrom und Batterietemperatur unter Berücksichtigung der Alterung. Auch die Impedanzspektroskopie wird benutzt [Karden 2001]. Es wird hier mit Frequenzen vom mHz- bis zum kHz-Bereich gearbeitet, um bei Bleibatterien den Ladezustand zu bestimmen. Eine andere Methode für Blei- und NiCd-Batterien ist der Versuch, mit Hilfe der Energiebilanz auf den aktuellen Energieinhalt zu schließen [Gutekunst 1990]. Der Versuch beruht darauf, dass sich mit Hilfe der Energiebilanz bei gasdichten Batterien die chemisch gespeicherte Energie berechnen lässt. Allerdings müssen dazu die thermischen Daten der Batterie wie Wärmekapazität und Wärmeübergangswiderstand genau bekannt sein. Im Bereich der NiCd-Batterien gibt es eine Reihe von Vorschlägen. Bei dieser Batterie ist es, wie oben beschrieben, prinzipiell problematisch den Ladeschluss und damit den vollgeladenen Zustand zu erkennen. Auch hier werden Geräte vorgeschlagen, die auf der Basis der Impedanzspektroskopie arbeiten [Soellner 1986]. Es wird der Effekt ausgenutzt, dass bei sehr kleinen Frequenzen im mHz-Bereich eine Abhängigkeit der komplexen Impedanz einer NiCd-Batterie vom Ladezustand beobachtet werden kann. Auch die Volumenänderung der aktiven Masse beim Laden und Entladen wurde untersucht [Lexow 1979]. Diese wird durch eine Kraft- oder Streckenmesseinrichtung erfasst. Weiter wurde vorgeschlagen, mit einer Nickel-Sauerstoff-Pilotzelle den Ladezustand einer NiCd-Batterie zu erfassen [Viswanathan 1988]. Ein weiteres Konzept schätzt die während des Ladens entstehenden Ladeverluste durch Sauerstoffgasung ab und berücksichtigt diese bei der Ladungsbilanz [Meiwes 1988]. Ein anderer Ansatz berechnet zusätzlich beim Entladen die entnehmbare Ladung ebenfalls als Funktion des Stromes, der Temperatur und der Temperaturvorgeschichte [Schöpe 1994]. Damit kann der Temperatur-Memory-Effekt kompensiert werden. Auch das Prinzip der Fuzzy-Logic wird eingesetzt [Heinemann 1998]. Hier geht allerdings die Selbstentladung nicht mit ein.

Die Anzeige des aktuellen Ladezustandes ist hauptsächlich interessant für die Elektrotraktion. Wenig Sinn macht dabei eine Anzeige der Restreichweite. Letztere hängt u.a. vom Fahrstil und von der Geländeform ab, was letztendlich die Prädiktion in den Bereich des Schätzens überführt. USV-Anlagen werden in der Regel im Ladeerhaltungsbetrieb betrieben, bei ihnen ist der Anfangsladezustand gut abschätzbar. In Geräten, z.B. im Mobilfunk, reicht es aus, den Ladezustand mit vier Balken anzuzeigen. Generell gilt, dass trotz der Vielfalt keines der vorgeschlagenen Systeme über einen längeren Zeitraum und vor allem bei Batterien mit unbekanntem Alterungszustand mit einer ausreichenden Genauigkeit arbeiten kann. Im Folgenden werden die prinzipiellen Probleme der Ladezustandsbestimmung diskutiert.

Es gibt drei wesentliche Probleme bei der Bestimmung des Ladezustandes. Diese sind die Bestimmung des Zustandes „vollgeladen“, die Alterung und vor allem die Selbstentladung.

Die Bestimmung des Zustandes „vollgeladen“ erscheint bei Bleibatterien und Li-Ionen-Batterien aufgrund der deterministischen Ladeschlussspannung relativ einfach. Hier wird die Batterie als „vollgeladen“ definiert, wenn nur noch der Ladeerhaltungsstrom fließt. Es muss allerdings dabei beachtet werden, dass bei den Bleibatterien die Ladeschlussspannung an die Temperatur angepasst ist. Weiter muss vorausgesetzt werden, dass alle Zellen dieselbe Ladung aufgenommen haben. Dies ist aufgrund von Fertigungstoleranzen nicht zu erreichen. Fabrikneue Traktionsbatterien z.B. schwanken in der Kapazität um $\pm 10\%$ [Kalker 1994]. Dies führt zu der oben genannten maximalen Entladetiefe von 80 %. Umgekehrt bedeutet dies, dass die Ladezustandsanzeige bei 20 % Restladung 0 % anzeigen muss. Bei der NiCd- und der NiMh-Batterie ist das Erkennen des Zustandes „vollgeladen“ deutlich komplexer. Hier kann der Übergang von der endothermen Ladereaktion in die exotherme Gasungsreaktion, die bei verschlossenen Batterien dem Sauerstoffkreislauf entspricht, ausgenutzt werden. Nach Bild 6.13 ist der daraus resultierende Temperaturanstieg zeitverzögert und als Folge daraus wird die Batterie systematisch überladen. Eine andere Möglichkeit ist die oben beschriebene ΔU -Methode, bei der das Absinken der Zellspannung bei Konstantstromladung als Kriterium für „vollgeladen“ genutzt wird. Die Genauigkeit dieser Methode hängt vom gewählten ΔU ab. Es ist auch zu beachten, dass in vielzelligen Batterien das Maximum der Gesamt-Ladespannung abflacht, da nicht alle Zellen zur gleichen Zeit dieses erreichen. Damit wird die ΔU -Erkennung ungenauer. Es kann auch aus der Berechnung des Sauerstoffstromes auf „vollgeladen“ geschlossen werden. Der Sauerstoffstrom ist der Anteil des Ladestromes, der bei offenen Batterien in die Sauerstoffgasung und bei verschlossenen Batterien in den Sauerstoffkreislauf fließt [Schöpe 1994]. Bei der NaS- und der NaNiCl-Batterie folgt auf eine Plateau-Phase ein deutlicher Anstieg der Batteriespannung zum Ladeende hin. Dies kann als „vollgeladen“-Kriterium verwendet werden.

Die Alterung der Batterie hängt von der Bauart und von der Temperatur ab. Die wichtigsten Alterungsprozesse einer verschlossenen Bleibatterie sind, wie auch in Kapitel 3 beschrieben, z.B. der Wasserverlust, die Korrosion des positiven Gitters, die Korrosion des Stromableiters der negativen Elektrode und die Wasserstoffentwicklung am negativen Gitter. Weiter ist die Alterung von der Temperatur abhängig. Es gilt hier, wie bei vielen chemischen Prozessen, dass sich die Alterungsgeschwindigkeit je 10 K Temperaturerhöhung ungefähr verdoppelt. Bei der Li-Ionen-Batterie kommt noch erschwerend hinzu, dass aufgrund der Stabilität der eingesetzten Materialien eine kalendarische Lebensdauer von nur bis zu drei Jahren bei normaler Umgebungstemperatur erreicht wird [Köhler 2001]. Für einen Betrieb mit höherer Temperatur greift die oben genannte Regel und die Alterungsvorgänge werden noch beschleunigt. Die Bestimmung des Ladezustandes bei gealterten Batterien ist somit mit einigen Unwägbarkeiten verbunden. Dies gilt vor allem bei Batterien, die nicht über ihre gesamte Lebensdauer mit einem Ladezustandsmessgerät ausgerüstet waren.

Ein weiteres Problem bei der Ladezustandserkennung ist die Selbstentladung. Diese ist bei Batterien im USV-Einsatz weniger problematisch, da USV-Batterien in der Regel im Ladeerhaltungsbetrieb arbeiten und die Selbstentladung damit ausgeglichen wird. Bei Geräten und in der Traktion dagegen stellt die Selbstentladung ein großes Problem bei

der Ladezustandserkennung dar. Die Selbstentladung ist vom Batterietyp und der Zeit abhängig, wie in Kapitel 3 beschrieben wurde. Eine weitere Einflussgröße ist die Temperatur. Weiter verläuft die Selbstentladung nicht linear mit der Zeit. So ist für NiCd-Batterien die Selbstentladung unmittelbar nach einer Vollladung am größten. In den ersten 24 h danach kann sie bei Raumtemperatur durchaus 10 % betragen [Schöpe 1997]. Aufgrund der vielfältigen Einflussmöglichkeiten kann die Selbstentladung für die Bestimmung des Ladezustandes vom Batteriemangement nur abgeschätzt werden. Generell gilt, je länger die Standzeit einer Batterie, desto schwieriger wird die Abschätzung der Selbstentladung.

Aus der Diskussion der drei Hauptprobleme der Ladezustandsbestimmung lässt sich erkennen, dass es keine allgemeingültige Lösung geben kann, die mit einer für die Traktion hinreichenden Genauigkeit arbeitet. Als hinreichende Genauigkeit für die Traktion werden hier mindestens 90 % Genauigkeit gefordert, denn gerade bei den geringen Reichweiten der Elektrostraßenfahrzeuge ist jedes Prozent wichtig. In der Literatur angegebene Werte für realisierte Systeme gelten immer nur für eine spezielle Batterie in einem speziellen Anwendungsfall. So wird ein Fehler von unter 3 % zwischen den prognostizierten und tatsächlich erreichten Werten für die der Batterie entnehmbare Ladung angegeben [von Bloh 1995]. Ein anderes System arbeitet mit einem Fehler kleiner 3 % für Prüfstandsmessungen, hat aber einen Fehler im Bereich 8 % für reale Messungen [Heinemann 1998].

6.3 Aktuelle Qualität

Die aktuelle Qualität beschreibt nicht den momentanen Ladezustand der Batterie, sondern sie beinhaltet die momentan mögliche Kapazität und damit auch den Alterungszustand der Batterie und den Pflegezustand der Batterie.

Der Alterungszustand setzt sich aus irreversiblen und reversiblen Alterungserscheinungen zusammen. Die irreversiblen Alterungsprozesse wurden in Kapitel 3 und Kapitel 6.2 bereits beschrieben. Diese führen dazu, dass die Batterie früher oder später das Ende ihrer Gebrauchsdauer erreicht hat. Als Ende der Gebrauchsdauer ist eine maximale Kapazität von noch 80 % der Nennkapazität definiert [DIN43539, 1985]. Die reversiblen Alterungsmechanismen werden unter dem Begriff Memory-Effekt zusammengefasst.

Der bekannteste Memory-Effekt ist der, dass nach einer Reihe von Teilentladungen sich die der Batterie entnehmbare Kapazität scheinbar verringert. Dieser Effekt tritt bei Bleibatterien und bei NiCd-Batterien auf. Für NiMh- und Li-Ionen-Batterien gibt es keine Literaturhinweise, dass dieser Effekt dort auch auftritt. Einen Ansatz zur Deutung dieses Effektes bei NiCd-Batterien findet man bei Barnard [Barnard 1976]. Hier wird davon ausgegangen, dass der Effekt dann auftritt, wenn die Batterie nach einer Teilentladung längere Zeit mit einem kleinen Strom überladen wurde. Der Effekt kann unterbunden werden, wenn der Zustand „vollgeladen“ sicher erkannt wird und damit keine Überladung stattfindet oder wenn die Batterie vor dem Laden vollständig entladen wurde.

Letzteres wird von modernen Ladegeräten im Gerätebereich gemacht. Bei NiCd-Batterien kann dieser Memory-Effekt durch mehrmaliges Zyklisieren mit vollständiger Entladung und anschließender Standard-Ladung rückgängig gemacht werden [Schöpe 1997]. Für die Deutung dieses Effekts bei den Bleibatterien gibt es eine Reihe unterschiedlicher Ansätze [Hullmeine 1989], [Hollenkamp 1991], [Pavlov 1993]. Generell tritt der Effekt auf, wenn mit hohen Strömen entladen und mit kleinen Strömen geladen wird, was für den Betriebsfall der Traktion typisch ist. Dadurch kann der Effekt zumindest in der Traktion nicht unterbunden werden. Allerdings kann auch dieser Alterungseffekt rückgängig gemacht werden. Dies kann bei Bleibatterien entweder durch Zyklisieren mit kleinen Entlade- und großen Ladeströmen oder durch Tiefentladen der Batterie erfolgen. Letzteres führt zwar zu einer Steigerung der entnehmbaren Ladung, sollte aber vermieden werden, da jede Tiefentladung die Batterie schädigt. Der zweite Memory-Effekt, der sogenannte Temperatur-Memoryeffekt, beschreibt den Einfluss der Temperaturvorgeschichte auf die entnehmbare Ladung [Schöpe 1994]. Die entnehmbare Ladung einer Zelle sinkt, wenn die Entladetemperatur unter der Ladetemperatur liegt. Arbeitet die Zelle im nächsten Zyklus für das Laden und Entladen auf der Entladetemperatur des Zyklus davor, dann sollte die entnehmbare Ladung konstant bleiben. Es lässt sich allerdings beobachten, dass erst nach einigen Zyklen die entnehmbare Ladung auf einen konstanten stationären Wert sinkt. Die Unterschiede zwischen dem stationären Wert und dem maximal davon abweichenden Wert liegen für eine Temperaturänderung von 20 K bei wenigen Prozent und damit deutlich unter der Kapazitätsänderung aufgrund des Temperaturunterschiedes. Der Temperatur-Memoryeffekt kann nur vermieden werden, wenn eine Temperaturänderung bei geladener Batterie unterbleibt.

Beide Memory-Effekte können vom Batteriemangement direkt nicht beeinflusst werden. Im Falle des zuerst beschriebenen Effektes kann das Batteriemangement erkennen, dass die entnehmbare Kapazität relativ schnell sinkt und kann eine Warnmeldung an eine andere Instanz abgeben. Der zweite Memory-Effekt gleicht sich bei stationärer Temperatur nach einigen Zyklen wieder von selbst aus. Für das Batteriemangement ist nur interessant, dass nach einem Temperatursprung sich die entnehmbare Ladung zunächst nicht so stark vermehrt oder vermindert wie nach der Kapazitäts-Temperatur-Kurve zu erwarten wäre. Generell fällt dies aufgrund des oben beschriebenen geringen Unterschiedes kaum ins Gewicht.

Der Pflegezustand einer Batterie schließt nicht nur die optische Gepflegtheit der Batterie, also z.B. saubere Batterie-Anschlüsse oder keine Ausblühungen, sondern auch die elektrische Gepflegtheit in Form eines hohen Isolationswiderstandes ein. Dabei ist erstere für die zweite mitentscheidend. Der Isolationswiderstand wird in der Regel nicht vom Batteriemangement selbst, sondern von einem Zusatzgerät ermittelt. Dieses überträgt seine Daten zum Batteriemangementsystem, das wiederum weitere Entscheidungen trifft. Diese Geräte werden auch als Isolationswächter bezeichnet. Die Isolationswächter werden in Anlagen eingesetzt, bei denen keine galvanische Verbindung zwischen den Batteriepolen und einer Bezugsmasse besteht. D.h. die Batterien werden als Inselnetz betrieben. Dies ist in der Elektrotraktion und oft auch in stationären Systemen, z.B. bei Einsatz in der Photovoltaik, der Fall. Ein Isolationsfehler kann z.B. durch eine Leckage eines Zellgehäuses, durch einen Fehler außerhalb des Batteriesys-

tems in der restlichen Anlage oder auch durch extreme Verschmutzung verursacht werden. Ein erster Isolationsfehler führt noch nicht zu einer Betriebsstörung. Tritt dagegen noch ein zweiter Isolationsfehler auf, kommt es zur Betriebsstörung und eventuellen Gefährdung des Benutzers. Zur Erfassung des Isolationswiderstandes werden die direkten und die indirekten Messmethoden unterschieden [Kahlen 1999].

Die direkte Methode unter Benutzung einer Wechselspannung ist nur dann geeignet, wenn der Isolationsfehler relativ niederohmig ist. Diese Methode erfordert zudem einen relativ großen technischen Aufwand. Die direkte Bestimmung des Isolationswiderstandes aus einer Kurzschlussstrom- und Leerlaufspannungsmessung führt zu einem sehr großen Messstrom, wenn der Isolationswiderstand sehr klein ist. Dies könnte die Messeinrichtung zerstören. Eine weitere direkte Methode ist die Messung des Stromes in der Hin- und Rückleitung von der Batterie zu einem Verbraucher [Sway-Tin 1996]. Dieses Verfahren ist vergleichbar mit einem Fehlerstrom-Schutzschalter in der Hausinstallation. Die indirekte Methode errechnet den Isolationswiderstand aus einer Leerlauf- und einer Belastungsmessung. Da der Belastungswiderstand bekannt ist, ist eine Strommessung nicht erforderlich. Diese Messmethode ist in Normen definiert [EN1987 1996], [ISO/WD 1997]. Dort werden Messgeräte mit einem Innenwiderstand $>10 \text{ M}\Omega$ vorgeschrieben. Dazu müssen aufwändige Messverstärker eingesetzt werden. Mit einer speziellen Schaltung lassen sich diese vermeiden [Kahlen 1999]. Bild 6.16 zeigt das Prinzip der Schaltung.

Nach Bild 6.16 werden an den Klemmen der Batterie zwei Kondensatoren in Reihe geschaltet. Der Mittelpunkt zwischen den Kondensatoren wird über hochohmige Widerstände zur Masse geführt. Über den endlichen Isolationswiderstand R_{iso} werden die Kondensatoren auf die Spannungen zwischen Pluspol und Isolationswiderstand und Minuspol und Isolationswiderstand aufgeladen. Danach wird zunächst der Kontakt S_1 umgeschaltet, so dass der Verstärker V_1 die Spannung U_1 misst. An dessen Ausgang ergibt sich der Wert $-U_1^*$. Diese Spannung wird analog-digital umgesetzt und im steuernden Mikrocontroller gespeichert. Dann wird S_1 wieder in den ursprünglichen Zustand zurückgeschaltet und die Kondensatoren laden sich wieder wie oben beschrieben auf. Jetzt wird der Kontakt S_2 umgeschaltet. Damit ergibt sich am Ausgang des Verstärkers V_2 die Spannung U_2^* , die nach Analog-Digital-Umsetzung ebenfalls im Mikrocontroller gespeichert wird. Aus den Spannungen U_1^* und U_2^* lässt sich die Gesamtspannung an den Batterieklemmen errechnen. Die Gesamtspannung wird nach Aufladen der Kondensatoren und Umschalten beider Schalter S_1 und S_2 zum Vergleich direkt gemessen. Beim Vergleich wird überprüft, ob die Spannung U_1^* größer oder kleiner als die Spannung $\frac{1}{2}(U_1^* + U_2^*)$ ist. Ist z.B. U_1^* größer als die errechnete Vergleichsspannung und damit auch größer als U_2 , so wird der Schalter S_3 geschlossen und die Batterie mit dem entsprechenden Messwiderstand R_m am Pluspol belastet. Danach wird mit dem Verstärker V_1 der neue Spannungswert U_1' gemessen. Der Isolationswiderstand errechnet sich zu:

$$R_{iso} = \frac{U_1^* - U_1'}{U_1'} \cdot R_m \quad \text{Gl. (6.1)}$$

Die eingesetzten Operationsverstärker brauchen dabei aufgrund des Schaltungsprinzips keinen Eingangswiderstand $>10\text{ M}\Omega$. Die Schaltung ist zum Patent angemeldet [Kahlen 1997b].

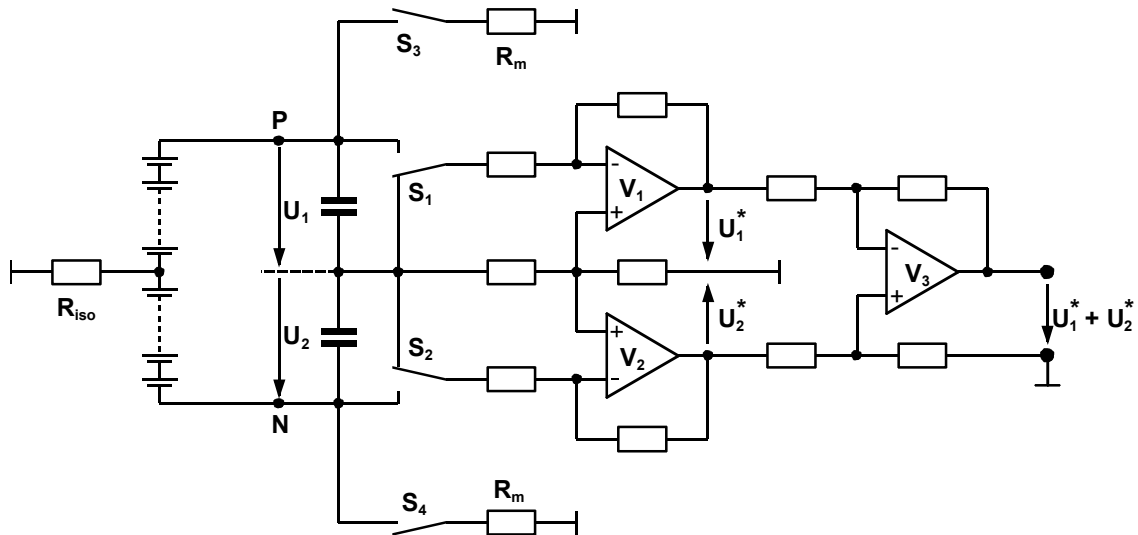


Bild 6.16 Messschaltung zur Bestimmung des Isolationswiderstandes

Die in diesem Kapitel beschriebenen Batteriemangement-Algorithmen können mit einem Mikrocontroller oder Mikroprozessor abgearbeitet werden. Aus den Ausführungen zu den Algorithmen ist weiter zu erkennen, dass an ein Batteriemangementssystem hohe Anforderungen an die Präzision der Messdatenaufbereitung, Messdatenerfassung und Messdatenverarbeitung gestellt werden müssen. Im folgenden Kapitel wird diese Problematik untersucht.

7 Fehleranalyse von Batteriemanagementsystemen

Im vorangegangenen Kapitel wurden die Algorithmen für ein Batteriemanagementsystem beschrieben. Die Batteriedaten müssen dazu mit einer ausreichenden Genauigkeit ermittelt werden. Deshalb benötigt jedes Batteriemanagementsystem abhängig von der Topologie eine oder mehrere Datenerfassungseinheiten, die aus den Teilen Anpassung, Analog-Digital-Umsetzer mit Referenzspannung und einem Mikrocontroller bestehen (Bild 7.1).

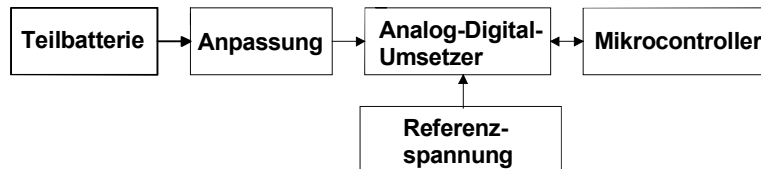


Bild 7.1 Blockschaltbild Datenerfassungseinheit

Im Falle der Topologie der direkten Verdrahtung ist die Datenerfassungseinheit nach Bild 7.1 nur in der Zentraleinheit vorhanden, bei der Topologie des Systems mit verteilten Datenerfassungseinheiten jeweils in jeder Datenerfassungseinheit. Im Folgenden werden die Baugruppen Anpassung und AD-Umsetzung auf ihre Fehler, Auflösung, Toleranzen und Driften hin untersucht. Die zu erfassenden Größen sind jeweils die Teilbatteriespannung und die Teilbatterietemperatur.

7.1 Fehlerquellen der Anpassung und Analog-Digital-Umsetzung

7.1.1 Anpassung

Die Anpassung ist notwendig, damit die Größen der Teilbatterie an den Eingangsbereich des AD-Umsetzers so angepasst werden können, dass dieser möglichst im Bereich der höchsten Auflösung arbeitet. Es werden hierzu drei Varianten am Beispiel der Teilbatteriespannung unterschieden.

Die erste ist der direkte Anschluss der Teilbatteriespannung an den Eingang des AD-Umsetzers. Dies ist nur möglich, solange die Teilbatteriespannung für alle Betriebsfälle im Eingangsspannungsbereich des AD-Umsetzers liegt. Weiter sollte die Teilbatteriespannung im Bereich der höchsten Auflösung liegen. Beim direkten Anschluss ohne Anpassschaltung tritt durch die Anpassung kein Fehler auf.

Die zweite Variante ist der Einsatz eines Spannungsteilers, wie in Bild 7.2 gezeigt wird. Hier belastet der Eingangsstrom des AD-Umsetzers den Spannungsteiler. Dies führt zu einem systematischen Fehler, der umso kleiner wird wie das Widerstandsverhältnis R_2 zum Eingangswiderstand des AD-Umsetzer, R_{ADU} , kleiner wird.

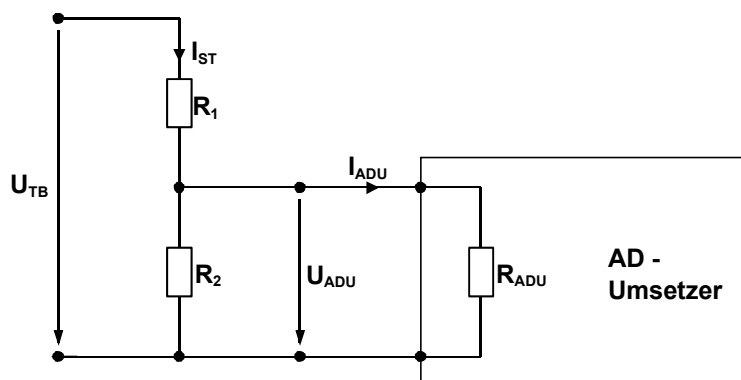


Bild 7.2 Anpassung mittels Spannungsteiler

Für ein Verhältnis 1:1000 zwischen dem Strom I_{ST} durch den Spannungsteiler und dem Eingangsstrom I_{ADU} des AD-Umsetzers errechnet sich ein systematischer relativer Fehler von -0,05 %. Vorausgesetzt wurde dabei, dass die Werte für R_1 und R_2 in der gleichen Größenordnung liegen. Der Eingangsstrom I_{ADU} für z.B. den in dem in Kapitel 5 beschriebenen Batteriemangement eingesetzten AD-Umsetzer, beträgt 500 nA [MAXIM 1998].

Generell darf die Anpassschaltung die Teilbatterie nicht zu stark belasten. Zu beachten ist, dass bereits ein Strom I_{ST} von $I_{ST} = 5 \text{ mA}$ eine Entladung in der Größenordnung der Selbstentladung einer 100Ah-Blei-Gel-Batterie verursacht. Dies erfordert für die Auslegung der Widerstände R_1 und R_2 Werte im $k\Omega$ -Bereich.

Die Toleranzen und Driften der Widerstände des Spannungsteilers ergeben dessen Fehler. Nach Kapitel 6 ist eine hohe Genauigkeit für die Messschaltung notwendig. Deshalb werden für R_1 und R_2 Widerstände mit einer Grund-Toleranz von $\pm 0,1 \%$ gewählt. Das bedeutet einen relativen Fehler f_T durch die Grund-Toleranz von:

$$f_T = \pm 0,1\%$$

Zusätzlich zur Grund-Toleranz der Widerstände kommen deren Temperaturkoeffizient und Langzeitdrift. Während der Temperaturkoeffizient reversible Änderungen zur Folge hat, ist die Langzeitdrift irreversibel. Der Temperaturkoeffizient kann sowohl positiv als auch negativ sein unabhängig von der Temperaturänderung. Die Langzeitdrift oder auch Langzeitänderung ist immer positiv [Beyschlag 1993]. Die Langzeitänderung hängt von der Gebrauchsdauer und der Oberflächentemperatur des Widerstandes während des Gebrauchs ab. Für die worst-case-Betrachtung wird hier als mittlere Gebrauchstemperatur eine mittlere Umgebungstemperatur von $15 \text{ }^\circ\text{C}$ erhöht um 20 K definiert. Die Erhöhung um 20 K schließt auch eine Erwärmung bei einer Montage direkt in Batterienähe mit ein. Als mittlere Gebrauchstemperatur ergeben sich somit $35 \text{ }^\circ\text{C}$. Diese Temperatur dient als Basis zur Bestimmung der Langzeitdrift. Analog dazu wird die maximal im Betrieb auftretende Oberflächentemperatur als maximale Umgebungstemperatur von $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ebenfalls erhöht um 20 K definiert. Mit dieser maximalen Betriebstemperatur von $50 \text{ }^\circ\text{C}$ wird die maximale Abweichung aufgrund des Temperaturkoeffizienten im Betrieb bestimmt.

Ein typischer Temperaturkoeffizient T_K für hochwertige SMD-Widerstände ist $T_K = \pm 15$ ppm/K [VITROHM 1997]. Die Bezugstemperatur für den Temperaturkoeffizient ist 20 °C. Für die worst-case-Berechnung wird der größte Temperaturhub benutzt. Die Batterien werden praktisch nie unter -10 °C betrieben, so dass der Temperaturhub in positive Richtung und in negative Richtung mit jeweils 30 K gleich groß ist. Mit diesem Temperaturhub von 30 K und dem Temperaturkoeffizienten $T_K = \pm 15$ ppm/K wird die relative Abweichung aufgrund der Temperaturänderung f_g pro Widerstand zu:

$$f_g = \pm 0,045\%$$

Wenn für die Betriebsdauer des Batteriemanagementsystems eine Zeit von zehn Jahren angesetzt wird, so entspricht dies rund 90.000 h. Die relative Abweichung aufgrund der Langzeitdrift f_L wird bei einer mittleren Gebrauchstemperatur von 35 °C damit pro Widerstand zu [Beyschlag 1993]:

$$f_L = +0,1\%$$

Es wurde vorausgesetzt, dass die Widerstände R_1 und R_2 in der gleichen Größenordnung liegen. Damit ist auch deren Verhalten praktisch gleich und die resultierende Abweichung des Ist-Wertes vom Soll-Wert kann für beide Widerstände gleich gesetzt werden. Diese setzt sich aus der Grund-Toleranz, der Temperaturdrift und der Langzeitdrift wie folgt zusammen:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_2}{R_2} = f_T + f_g + f_L = \pm 0,1\% \pm 0,045\% + 0,1\%$$

Dies ergibt für die Widerstände einen Toleranzbereich von:

$$-0,045\% \leq \frac{\Delta R}{R} \leq +0,245\%$$

Für den unbelasteten Spannungsteiler im Falle der Messung der Teilbatteriespannung U_{TB} gilt nach Bild 7.2:

$$ST = \frac{U_{ADU}}{U_{TB}} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} \quad (7.1)$$

Mit Gl. (7.1) ergibt sich ein relativer Fehler aufgrund der Widerstandstoleranzen von

$$\frac{\Delta ST}{ST} = f_{ST} = \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_2 + \Delta R_1}{R_2 + R_1} \quad (7.2)$$

Unter der oben getroffenen Annahme gleicher Widerstände R_1 und R_2 vereinfacht sich Gl. 7.2 zu:

$$f_{ST} = \frac{\frac{\Delta R_2}{2} - \frac{\Delta R_1}{2}}{R} \quad (7.3)$$

Unter der Annahme einer Grund-Toleranz für R_1 und R_2 von jeweils $\pm 0,1\%$ liegt die durch die Grund-Toleranz ohne Berücksichtigung der Temperatur- und Langzeitdrift bedingte maximale Abweichung in den Grenzen von $\pm 0,1\%$.

Unter Berücksichtigung der maximalen Temperaturdrift und der Langzeitdrift ergibt sich für die maximale Abweichung des Spannungsteilers f_{STmax} :

$$f_{STmax} = \pm 0,145\%$$

Die dritte Variante nutzt einen Operationsverstärker mit entsprechender Beschaltung zur Anpassung. Eine typische Schaltung zeigt Bild 7.3.

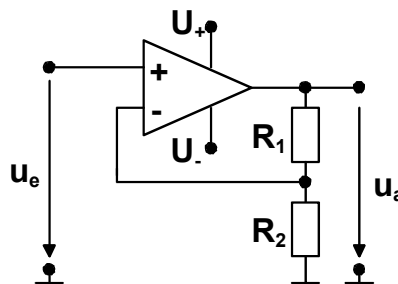


Bild 7.3 Anpassschaltung mit Operationsverstärker

Die Spannungsverstärkung v_u der Schaltung nach Bild 7.3 ist unter der Voraussetzung eines idealen Operationsverstärkers:

$$\frac{u_a}{u_e} = v_u = 1 + \frac{R_1}{R_2} \quad (7.4)$$

Nach Gl. 7.4 ist unter der getroffenen Voraussetzung die Verstärkung nur von den Widerständen abhängig. Es ergibt sich somit ein relativer Fehler $\Delta v_u/v_u$ von :

$$\frac{\Delta v_u}{v_u} = \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \quad (7.5)$$

Die Toleranzen der Widerstände werden wie oben berechnet eingesetzt. Damit ergibt sich für den maximalen relativen Fehler f_v der Verstärkung im Worst-Case:

$$f_v = \frac{\Delta v_u}{v_u} = \pm 0,29\%$$

Unter der Annahme eines Verstärkungsfaktors von 2, der dem Verstärkungsfaktor für eine gute Anpassung einer Bleibatterie-Zelle entspricht (Tabelle 7.1), errechnet sich der absolute Fehler der Verstärkung F_v bedingt durch die Widerstände zu:

$$F_v = v_u \cdot f_v = 2 \cdot (\pm 0,29\%) = \pm 0,58\%$$

In der Praxis ist der Operationsverstärker nicht wie oben angenommen ein idealer Verstärker. Vornehmlich die Offsetspannung, die Offsetspannungs-Temperaturdrift und die Offsetspannungs-Langzeitdrift führen zu einer, wenn auch relativ geringen, Abweichung vom idealen Verstärker. Vorausgesetzt wird ein Standard-Operationsverstärker, der eine maximale Abweichung von rund ± 5 mV hat [VALVO 1985]. Diese führt bei einer Ausgangsspannung von 5 V und einem Verstärkungsfaktor von zwei zu dem absoluten Fehler F_{Off} von:

$$F_{Off} = \pm 0,2\%$$

Aus dem absoluten Fehler aufgrund der Offsetspannung F_{Off} und dem absoluten Fehler F_v aus der Verstärkung ergibt sich als absoluter Gesamtfehler F_{OP} für die Anpassung mit dem Standard-Operationsverstärker:

$$F_{OP} = F_{Off} + F_v = \pm 0,2\% \pm 0,58\% = \pm 0,78\%$$

Mit einem speziellen Operationsverstärker für Messzwecke lässt sich dieser Fehler stark reduzieren. So hat z.B. der Operationsverstärker MAX420 eine Offsetspannung von $5 \mu\text{V}$ [MAXIM 1989]. Dies reduziert den Fehler F_{OP} praktisch auf den Fehler aufgrund der Verstärkung. Der Fehler F_{OP} wird damit zu:

$$F_{OP} = \pm 0,58\%$$

7.1.2 Analog-Digital-Umsetzer

Ein Analog-Digital-Umsetzer arbeitet in der oberen Hälfte seines Eingangsspannungsbereichs mit der größten Auflösung. Um diese auszunutzen, müssen die Lade- und Entladeschlussspannungen in diesen Bereich abgebildet werden. Unter der Annahme, dass der Eingangsspannungsbereich des AD-Umsetzers 0..5 V beträgt, wird die Ladeschlussspannung unabhängig vom Batterietyp zu 4,6 V definiert. Damit können eventuell auftretende höhere Spannungen z.B. am Ende der Ladephase, noch sicher erfasst werden. Die Entladeschlussspannung darf 2,5 V nicht unterschreiten.

Damit wird garantiert, dass der AD-Umsetzer immer im Bereich der höchsten Auflösung arbeitet. Tabelle 7.1 zeigt die Anpassung für eine Einzelzellenüberwachung abhängig vom Batterietyp.

Tabelle 7.1 Anpassung der Ladeschluss- und Entladeschlussspannung

Typ	Ladeschlussspannung/V	Entladeschlussspannung /V	Anpassbereich /V
Blei	2,4	1,8	4,6 ... 3,5
Blei-Gel	2,35	1,8	4,6 ... 3,5
NiCd	1,45	0,9	4,6 ... 2,85
NiMh	1,45	0,9	4,6 ... 2,85
Li-Ionen	4,1	2,7	4,6 ... 3,0

Nach Tabelle 7.1 sind die typischen Zellenspannungen der einzelnen Batterietypen auf den oben beschriebenen Bereich abbildbar. Die Entladeschlussspannungen liegen nach der Anpassung alle über 2,5 V. Es müssen Anpassschaltungen mit Operationsverstärkern eingesetzt werden. Lediglich bei der Li-Ionen-Batterie ist eine Anpassung unnötig, da die Lade- und Entladeschlussspannungen bei dem hier vorausgesetzten Eingangsspannungsbereich des AD-Umsetzers schon im Bereich der größten Auflösung liegen.

Ein AD-Umsetzer mit einer Auflösung von 10 Bit stellt einen guten Kompromiss zwischen Aufwand und Kosten dar. Bei einer Auflösung von 10 Bit und einem Eingangsspannungsbereich von 0...5 V ist die maximale Abweichung aufgrund der Auflösung $\pm 2,5$ mV. D.h. der AD-Umsetzer hat einen relativen Fehler von $\pm 0,05$ % bezogen auf den Messbereichsendwert. Damit wird der maximale absolute Fehler aufgrund der Auflösung für eine Eingangsspannung von 2,85 V zu $\pm 0,088$ % und für 4,6 V zu $\pm 0,054$ %. Zu diesem Fehler aufgrund der Quantisierung kommen noch weitere Fehler, wie der Offset-Fehler, die Offset-Drift oder die Nichtlinearität hinzu.

Der Fehler aufgrund der Auflösung wird bei Einsatz eines AD-Umsetzers mit mehr Quantisierungsstufen verringert. Als Beispiel soll der in dem in Kapitel 5 beschriebenen Batteriemanagementsystem eingesetzte AD-Umsetzer MAX 111 genommen werden [MAXIM 1998]. Dieser AD-Umsetzer arbeitet nach dem Dual-Slope-Prinzip. Er bietet bei einer Umsetzzeit von 20,48 ms eine Auflösung von 14 Bit bei einem Eingangsspannungsbereich von 0..1,8 V. Der absolute Fehler bedingt durch die Auflösung des AD-Umsetzers beträgt hier theoretisch bei entsprechender Anpassung der Ladeschlussspannung auf 1,6 V $\pm 0,003$ % und bei der entsprechenden Entladeschlussspannung von 1,0 V $\pm 0,005$ %. Nach dem Datenblatt beträgt der relative Fehler für die obigen Spannungen allerdings $\pm 0,1$ %. In diesem Fehler sind alle im AD-Umsetzer auftretenden Fehler enthalten, d.h. bei einer Rechnung mit diesem Wert wird der Worst-Case beschrieben. Das bedeutet der absolute Fehler für die Ladeschlussspannung von 1,6 V errechnet sich zu $\pm 0,112$ % und für die Entladeschlussspannung von 1,0 V zu $\pm 0,18$ %.

7.1.3 Referenzquelle

Der Analog-Digital Umsetzer benötigt, unabhängig von der Auflösung und dem Funktionsprinzip, eine Referenzspannungsquelle mit einer möglichst hohen Genauigkeit. Eine typische Referenzquelle hat einen absoluten Fehler von $\pm 0,06\%$ und eine Temperaturdrift von 7 ppm/K [MAXIM 1992]. Die Langzeitstabilität dieser Quelle beträgt 20 ppm/kh . Mit den in Kapitel 7.1 definierten Temperaturen ergibt sich somit ein absoluter Fehler verursacht durch die Temperaturdrift von $0,02\%$. Der absolute Fehler in Abhängigkeit von der Langzeitdrift errechnet sich für eine Gebrauchsdauer von 90.000 h zu $0,18\%$. Damit wird der absolute Gesamtfehler der Referenzquelle F_{Ref} zu:

$$F_{\text{Ref}} = \pm 0,06\% + 0,02\% + 0,18\%$$

Der Fehler liegt somit im Bereich von:

$$+ 0,14\% \leq F_{\text{Ref}} \leq + 0,26\% .$$

7.1.4 Mikrocontroller

Ein Mikrocontroller veranlasst die AD-Umsetzung und speichert die Teilbatteriedaten. Im Falle der Topologie der direkten Verdrahtung übernimmt er auch die weitere Verarbeitung der Daten und die Kommunikation mit anderen Instanzen. Bei der Topologie mit den verteilten Datenerfassungseinheiten erfolgt im Mikrocontroller in der Regel keine weitere Verarbeitung, sondern die Daten werden zur Zentraleinheit weitergereicht, die dann ihrerseits die weitere Verarbeitung übernimmt. Insgesamt wird die Speicherung und Verarbeitung der Daten als fehlerfrei betrachtet.

7.2 Gesamtfehler der Anpassung und Analog-Digital-Umsetzung

Bei der Betrachtung des Gesamtfehlers werden zwei Fälle unterschieden.

Fall 1: AD-Umsetzer, Auflösung 10 Bit,
Standard-Operationsverstärker, Verstärkungsfaktor 2

Fall 2: AD-Umsetzer, Auflösung 14 Bit,
Spannungsteiler, Teilverhältnis 1:2

Weiter wird jeweils der Gesamtfehler in den beiden Zuständen Ladeschluss und Entladeschluss betrachtet, da in diesen beiden Zuständen der Fehler des AD-Umsetzers unterschiedlich ist. Betrachtet wird der ungünstigste Fall, d.h. die höchste im Betrieb auftretende Temperatur und eine Betriebszeit von 90000 h . Es werden die Fehler der Teileinheiten addiert. Der Summenfehler F_{Sum} setzt sich aus dem Fehler bedingt

durch die Anpassschaltung F_{Anp} , dem Fehler aufgrund der AD-Umsetzung F_{ADU} und dem Fehler durch die Referenzspannung F_{Ref} zusammen:

$$F_{Sum} = F_{Anp} + F_{ADU} + F_{Ref}$$

Im Fall 1 wird von einem Eingangsspannungsbereich des AD-Umsetzers von 0..5 V ausgegangen. Weiter werden hier einzelne Zellen überwacht. Die Anpassung erfolgt mit Hilfe eines Standard-Operationsverstärkers. Für den Fehler beim Ladeschluss F_{SumL1} ergibt sich somit:

$$F_{SumL1} = \pm 0,78\% \pm 0,054\% \pm 0,06\% + 0,02\% + 0,18\%$$

Der Fehler F_{SumL1} liegt damit im Bereich:

$$-0,694\% \leq F_{SumL1} \leq +1,094\%$$

Der Fehler bei Entladeschluss F_{SumE1} überstreicht einen größeren Bereich als der Fehler F_{SumL1} , da in diesem Fall der Fehler aufgrund der Auflösung des AD-Umsetzers größer ist. Der Fehler F_{SumE1} liegt somit im Bereich:

$$-0,728\% \leq F_{SumE1} \leq +0,128\%$$

Der Fall 2 geht von einem Eingangsspannungsbereich des AD-Umsetzers von 0..1,8 V aus. Weiter wird auch hier eine Einzelzellenüberwachung vorausgesetzt. Die Anpassung erfolgt mit einem Spannungsteiler. Der Fehler beim Ladeschluss F_{SumL2} errechnet sich zu:

$$F_{SumL2} = \pm 0,145\% \pm 0,112\% \pm 0,06\% + 0,02\% + 0,18\%$$

Der Fehler F_{SumL2} liegt damit im Bereich:

$$-0,117\% \leq F_{SumL2} \leq +0,517\%$$

Aufgrund des größeren Fehlers durch den AD-Umsetzer beim Erfassen der Entladeschlussspannung ergibt sich für den Fehler F_{SumE2} ein größerer Bereich als für den Fehler F_{SumL2} . Für den Fehler F_{SumE2} ergibt sich:

$$-0,185\% \leq F_{SumE2} \leq +0,585\%$$

Die Toleranzen der Ladeschlussspannung für Blei-, NiCd- und NiMh-Batterien liegen im Bereich $\pm 2\%$. Für Lithium Batterien allerdings werden hierfür Toleranzen kleiner als $\pm 0,5\%$ gefordert. Die kritische Toleranz dabei ist die positive Toleranz, da bei deren Überschreiten die Batterie überladen wird. Die negative Toleranz gibt lediglich an, wie voll die Batterie mindestens geladen wird. Die Entladeschlussspannungen

sind unkritischer als die Ladeschlussspannungen. Ein Fehler von $\pm 3\%$ kann hier toleriert werden. Wie oben beschrieben, ist der Fehler bei der Spannungsmessung im Falle der Entladeschlussspannung größer als bei der Ladeschlussspannung. Da aber die Toleranz der Entladeschlussspannung größer als die der Ladeschlussspannung ist, wirkt sich dies nicht negativ aus. Die Toleranzen der Ladeschlussspannung für Blei-, NiCd- und NiMh-Batterien sind zu erfüllen. Nur bei den Lithium-Batterien reicht die Qualität der Datenerfassung nicht aus.

Der Fall 2 ist von der Abweichung günstiger als der Fall 1, zumal im Fall 1 beim Fehler des AD-Umsetzers nur der Quantisierungsfehler berücksichtigt wurde. Deshalb wird für die weiteren Betrachtungen der Fall 2 weiter betrachtet. Im Folgenden werden Möglichkeiten zur Reduzierung des Gesamtfehlers durch eine Kalibrierung untersucht.

7.3 Kalibrierung

Die Kalibrierung kann entweder direkt nach der Produktion des Batteriemanagementsystems, also noch vor dem Einbau, oder während des Betriebs des Batteriemanagementsystems erfolgen.

Ein Abgleich vor dem Einbau minimiert im Fall 2 den Fehlereinfluss durch die Toleranz der Widerstände und den Grundfehler der Referenzspannung. Die Temperatur- und Langzeitdrift können dadurch nicht minimiert werden. Die Qualität dieses Abgleichs hängt von der Genauigkeit der dazu benutzten Quelle ab. Für die Berechnung des Fehlerbereichs der Ladeschlussspannung wird eine Abgleichunsicherheit von $\pm 0,1\%$ angenommen. Es ergibt sich somit für den gesamten Fehler im Fall 2 und Abgleich in der Fertigung F_{SumL2AbF} :

$$F_{\text{SumL2AbF}} = \pm 0,04\% \pm 0,112\% + 0,02\% + 0,18\% \pm 0,1\%$$

Der Fehlerbereich errechnet sich daraus zu:

$$-0,057\% \leq F_{\text{SumL2AbF}} \leq +0,457\%$$

Ein Vergleich mit dem Fehlerbereich beim Ladeschluss ohne Abgleich im Fall 2 zeigt nur eine relativ geringe Reduzierung des Fehlers. Dies liegt darin begründet, dass zwar die Toleranz der Widerstände und der Grundfehler der Referenzspannung eliminiert werden, aber die Toleranz des Abgleichs hinzukommt.

Der Abgleich während des Betriebes erfordert einen Vergleich. Dazu muss die Teilbatterie von der Anpassschaltung getrennt werden. Ein Verbinden der dem AD-Umsetzer zugeordneten Referenzquelle mit dem Eingang der Anpassschaltung und anschließendem Messen bringt keinen Erfolg, da die aktuelle Abweichung der Referenzspannung vom Sollwert aufgrund der Temperatur- und Langzeitdrift nicht be-

kannt ist. Der Einsatz einer zweiten Referenzquelle als Vergleichsquelle führt nur dann zu einem besseren Ergebnis, falls die Vergleichsquelle eine niedrigere Temperatur- und Langzeitdrift aufweist als die dem AD-Umsetzer zugeordnete Referenzquelle. Diese Möglichkeit scheidet in der Regel aus Kostengründen aus. Durch Einfaches „Auf Masse legen“ lässt sich lediglich die Abweichung der Anpassschaltung bestimmen. Es verbleiben dann noch die Drift- und Temperaturfehler der Referenzspannungsquelle und der Fehler des AD-Umsetzers. Die Abgleichunsicherheit kann hier zu Null gesetzt werden, da der geringe Eingangsstrom der Anpassschaltung in Verbindung mit einem niederohmigen Feldeffektransistor als Schalter praktisch keine Abweichung von „Null“ verursacht. Der gesamte Fehler im Fall 2 mit Abgleich während des Betriebs $F_{SumL2AbB}$ wird damit zu:

$$F_{SumL2AbB} = \pm 0,112\% + 0,02\% + 0,18\%$$

Der Fehlerbereich reduziert sich auf:

$$+ 0,088\% \leq F_{SumL2AbB} \leq +0,312\%$$

Bild 7.4 zeigt die Fehlerbereiche im Fall 2 ohne Abgleich und für die verschiedenen Arten des Abgleichs.

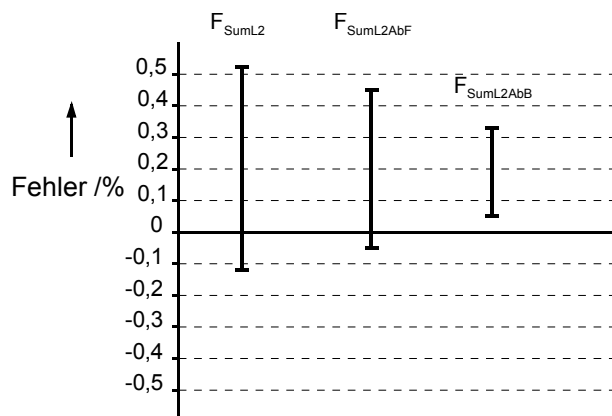


Bild 7.4 Fehlerbereiche in Abhängigkeit vom Abgleich

Nach Bild 7.4 sind die Varianten mit dem Abgleich während der Fertigung und während des Betriebes für die Li-Ionen-Batterien ausreichend genau. Letztere Variante ist der günstigste Fall.

7.4 Fehlerquellen der Sensoren

Es werden die beiden Teilbatteriegrößen Teilbatteriespannung und Teilbatterietemperatur erfasst. Die Teilbatteriespannung kann, wie in 7.1 beschrieben, direkt an die Anpassschaltung angeschlossen werden. Für die Erfassung der Teilbatterietemperatur ist zusätzlich ein Temperatursensor notwendig. Ebenso wird für die Messung des

Gesamtstromes ein Stromsensor benötigt. Die Anpassschaltungen für den Temperatur- und den Stromsensor können wie oben beschrieben ausgeführt werden.

7.4.1 Temperatursensor

Die Genauigkeit der Messung der Teilbatterie-Temperatur wird nicht nur von den Toleranzen des Temperatursensors, dessen Anpassschaltung, dem AD-Umsetzer und der Referenzquelle bestimmt, sondern auch davon wo und wie der Temperatursensor an die Teilbatterie angebracht ist. Letzteres muss vom Batteriehersteller genau festgelegt werden. Von Seiten des Batteriemagements muss zusätzlich zu den oben beschriebenen Toleranzen die Toleranz des Temperatursensors selbst berücksichtigt werden. Ein geeigneter Sensor ist z.B. der Temperatursensor LM35, der eine Grundtoleranz von 0,5 K hat [National 1984]. Dazu kommt eine Nichtlinearität von typisch $\pm 1/4$ K. Mit diesem Temperatursensor und einer nicht kalibrierten Anpassung und AD-Umsetzung lässt sich die Batterietemperatur in einem Toleranzbereich von ± 2 K bestimmen. Dies ist ausreichend um die Forderungen nach Kapitel 6 zu erfüllen.

7.4.2 Stromsensor

Die Messung des Batteriestromes erfolgt in der Zentraleinheit. Wie bei der Temperaturmessung kommt hier zu dem Fehler durch die Anpassung und AD-Umsetzung die Toleranz des Stromsensors hinzu. Aufgrund der durch das Stromwandlerprinzip bedingten Potentialtrennung wird anstelle eines Shunts ein Stromwandler eingesetzt. Ein Shunt hat außerdem den Nachteil, dass zu der Grund-Toleranz, die bei einem Shunt der Klasse 0,5 bezogen auf den Messbereichsendwert $\pm 0,5$ % beträgt, noch der Fehler aufgrund des für die Potentialtrennung notwendigen Isolierverstärkers hinzukommt.

Ein typischer Stromwandler für den Einsatz im Traktionsbereich hat einen relativen Fehler von $\pm 0,8$ % [LEM 2000]. Dieser Fehler ist bezogen auf den Nennstrom von 250 A. Der absolute Fehler beträgt somit ± 2 A. Mit der nichtkalibrierten Anpassung und AD-Umsetzung erweitert sich der Fehlerbereich auf rund ± 4 A. Dies ist zum Einhalten der in Kapitel 6 definierten Stromgrenzen ausreichend. Für eine Berechnung der Rest-Ladung in Batterien in USV-Anlagen ist dieser Fehlerbereich auch ausreichend. Hier ist in der Regel der entnommene Strom relativ konstant und vorher berechenbar, so dass der Stromwandlerbereich darauf angepasst werden kann. Im Bereich der Traktion, bei der ein weiter Strombereich überstrichen wird, kann mit obiger Toleranz die Rest-Ladung nicht exakt bestimmt werden.

Die Worst-Case Rechnungen zeigen, dass es prinzipiell möglich ist, Batteriemagementsysteme zu entwickeln, die den Anforderungen an die Genauigkeit genügen. Es wurde hier eine Gebrauchsdauer von 10 Jahren vorausgesetzt. Dies entspricht

der Lebensdauer von Batterien in USV-Anlagen. In der Traktion wird mit einer Gebrauchsdauer einer Batterie von 4-5 Jahren im Falle einer Bleibatterie und von 10 Jahren im Falle einer NaNiCl-Batterie gerechnet [Kalker 1994], [Dustmann 2001]. Da nach Kapitel 4 das Batteriemanagement mit der Batterie zusammen ein Batteriesystem bildet, reduziert sich im Fall der Bleibatterie auch die Gebrauchsdauer des Batteriemanagementsystems. Dies verringert den Fehler aufgrund der Langzeitdrift für die Widerstände nur gering [Beyschlag 1993]. Bei der Referenzspannungsquelle ist der Fehler aufgrund der Langzeitdrift proportional zur Gebrauchsdauer [MAXIM 1992]. Damit wird auch der Gesamt-Fehler geringer.

Generell muss ein Batteriemanagementsystem in einem engen Toleranzbereich arbeiten und gehört damit in den Bereich genauer Messgeräte. Wie diese muss auch ein Batteriemanagementsystem auf seine Genauigkeit hin geprüft werden. Weiter ist bei einem Batteriemanagementsystem auch der implementierte Algorithmus zu testen. Dazu sind entsprechende Testgeräte und Testverfahren notwendig, die in Kapitel 8 beschrieben werden.

8 Test von Batteriemanagementsystemen

Nach Kapitel 7 sind Batteriemanagementsysteme präzise Messgeräte, die die Algorithmen nach Kapitel 6 abarbeiten. Diese Systeme müssen auf ihre Funktionalität, d.h. auf das korrekte Abarbeiten der Algorithmen, und auf ihre Genauigkeit, d.h. auf das korrekte Erfassen von Batteriegrößen, getestet werden. Weiter sollen auch das thermische Batteriemangement und der Ladeausgleich geprüft werden.

8.1 Test des elektrischen Batteriemagements

Der Test des elektrischen Batteriemagements könnte mit einer realen Batterie erfolgen. Aufgrund des großen zu überdeckenden elektrischen und thermischen Betriebsbereiches würde dies allerdings zu einer lange dauernden Testprozedur führen, bei der die Batterie unter Umständen auch noch geschädigt werden würde. Deshalb ist ein Testsystem, das unabhängig von einer realen Batterie arbeitet, für die Prototypenentwicklung wie für den Produktionstest notwendig [Hauck 1995].

Prinzipiell werden zwei Topologien für das Testsystem unterschieden. Die erste Topologie prüft die Sensoren mit dem Batteriemanagementsystem mit. Diese Topologie zeigt Bild 8.1.

Hier sind die Temperatursensoren der Teilbatterien und der Stromsensor des Batteriestromes physikalisch vorhanden. Die Temperatursensoren werden mittels eines Klimaschranks auf die erforderlichen Temperaturen gebracht. Der Stromsensor wird aus einer Stromquelle, die den Batteriestrom nachbildet, gespeist. Dazu kann bei Einsatz eines Stromwandlers der zum Testen notwendige Strom durch Erhöhen der Windungszahl auf der Primärseite des Stromwandlers reduziert werden, falls die Wandler-Bauart dies zulässt. Die Teilbatteriespannung wird als Spannung ohne Sensor direkt vom Batteriemanagementsystem erfasst. Es wird dazu eine programmierbare Spannungsquelle eingesetzt.

Diese Topologie eignet sich nur zum Test von Prototypen, da der Aufwand, vor allem wegen des Klimaschranks, relativ groß ist. Weiter muss hier beachtet werden, dass zu den Toleranzen der Sensoren noch die Toleranzen des Klimaschranks und der Stromquelle hinzukommen.

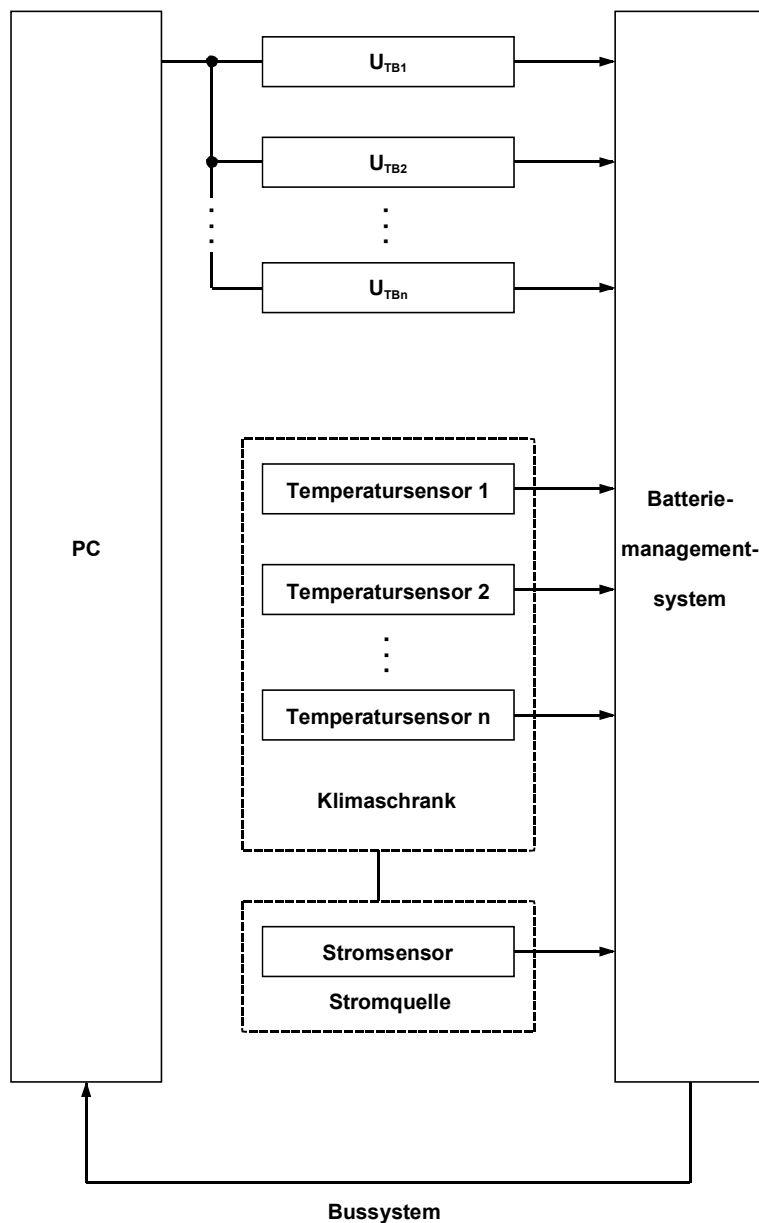


Bild 8.1 Prüfen eines Batteriemanagementsystems inklusive der Sensorik

Bei der zweiten Topologie werden alle Batteriegrößen nachgebildet (Bild 8.2).

In Bild 8.2 sind die Temperatursensoren und der Stromsensor nicht physikalisch vorhanden. Die Ausgangsspannung der Temperatursensoren und die Spannung an der Bürde des Stromwandlers werden mit einer programmierbaren Spannungsquelle realisiert. Damit ist die Temperatur im Gegensatz zum Test im Klimaschrank in kurzer Zeit variierbar. Diese Topologie eignet sich sowohl für die Prototypenentwicklung als auch für einen Produktionstest. Die Funktionsfähigkeit und die Genauigkeit der Sensoren muss bei dieser Topologie vorausgesetzt werden.

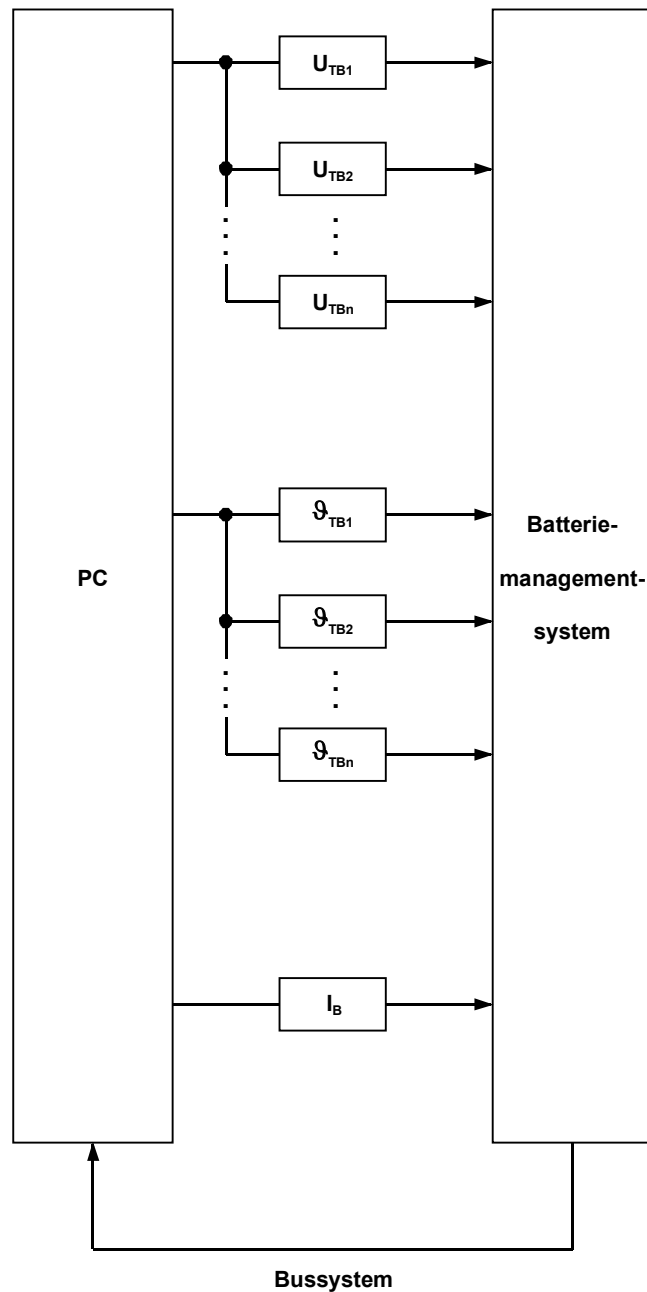


Bild 8.2 Prüfen eines Batteriemanagementsystems mit Nachbildung der Sensoren

Beiden Topologien gemeinsam ist die Nachbildung der Teilbatteriespannungen mittels einer programmierbaren Spannungsquelle. Den prinzipiellen Aufbau einer für die Nachbildung der Batteriegrößen geeigneten Spannungsquelle zeigt Bild 8.3.

Der Digital-Analog-Umsetzer kann die Teilbatteriegrößen U_{TB} und ϑ_{TB} oder den Batteriestrom I_B ausgeben. Der DA-Umsetzer wird von einem Mikrocontroller gesteuert. Der Mikrocontroller selbst ist über ein Bussystem mit einem PC verbunden. Der Einsatz eines Bussystems erleichtert die Potentialtrennung zwischen den einzelnen Kanälen. Ein DA-Umsetzer mit einer Auflösung von 12 Bit kann als kleinste theoretische Spannungsänderung 1,22 mV ausgeben, bei einer maximalen Ausgangsspannung

von 5 V. Der typische Fehler eines solchen DA-Umsetzers beträgt $\pm 0,2\%$ bezogen auf den Endwert [MAXIM 1993]. Dies entspricht einem absoluten Fehler von 10 mV. Damit kann z.B. die Ladeschlussspannung für eine Li-Ionen-Batterie von $4,15 \pm 0,02$ V nachgebildet werden.



Bild 8.3 Programmierbare Spannungsquelle

Das Blockschaltbild des realisierten Testgerätes zeigt Bild 8.4.

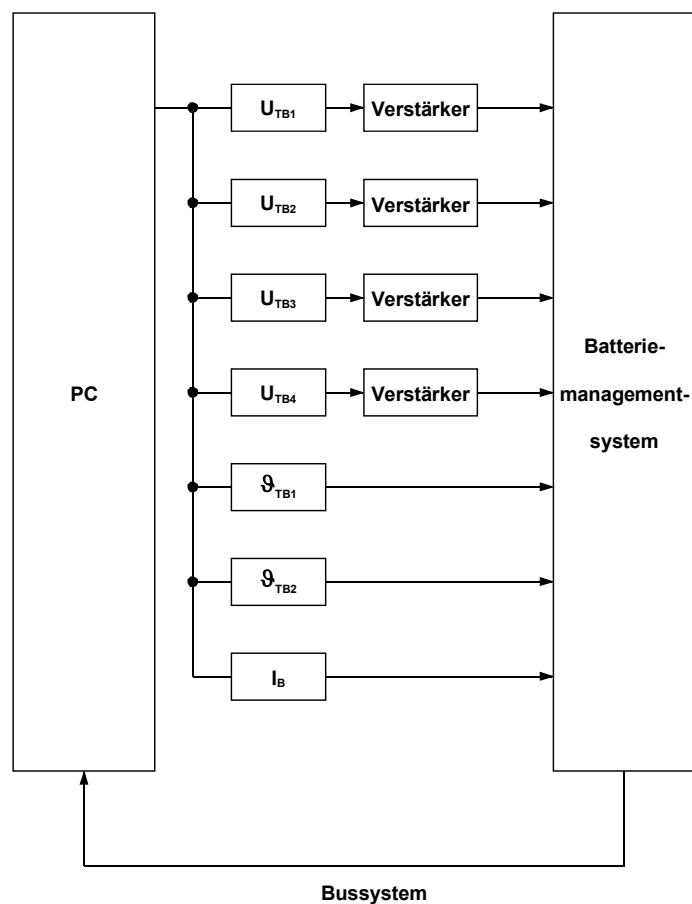


Bild 8.4 Blockschaltbild des Testgerätes

Nach Bild 8.4 sind Einheiten für die Nachbildung von vier Teilbatteriespannungen, zwei Teilbatterietemperaturen und dem Batteriestrom realisiert. Zum Test vielzelliger Batterien mit Zellüberwachung müssen mehrere Datenerfassungseinheiten aus der gleichen Teilbatteriespannungs-Nachbildung versorgt werden. Dies ist nicht von Nachteil, da auch bei einer gut gepflegten realen Batterie die Teilbatteriespannungen nicht alle unterschiedlich sind. Das gleiche gilt für die Teilbatterietemperatur-Nachbildung. Die wenigen Einheiten reichen somit für einen kompletten Test aus.

Für die Nachbildung der Teilbatteriespannung sind weiter programmierbare Verstärker vorgesehen. Damit können auch Teilbatterien, die aus einer Zusammenschaltung von Einzelzellen bestehen, getestet werden. Prinzipiell ist das System aufgrund der Busstruktur, an die alle Nachbildungseinheiten angeschlossen sind, erweiterterbar. Die Rückkopplung vom Batteriemanagementsystem zum PC erfolgt ebenfalls über ein Bussystem. Hier wird der zur Kommunikation mit anderen Instanzen vorhandene CAN-Bus genutzt. Weiter ist es notwendig, dass im Batteriemanagementsystem ein Testmodus implementiert ist, in dem die kompletten erfassten Daten und die daraus abgeleiteten Aktionen dem PC übermittelt werden. Dieser wertet die verschiedenen Szenarien aus und erstellt ein Prüfprotokoll. Einen Teil des Prüfalgorithmus und vor allem das Zusammenspiel beim Testen zeigt Bild 8.5.

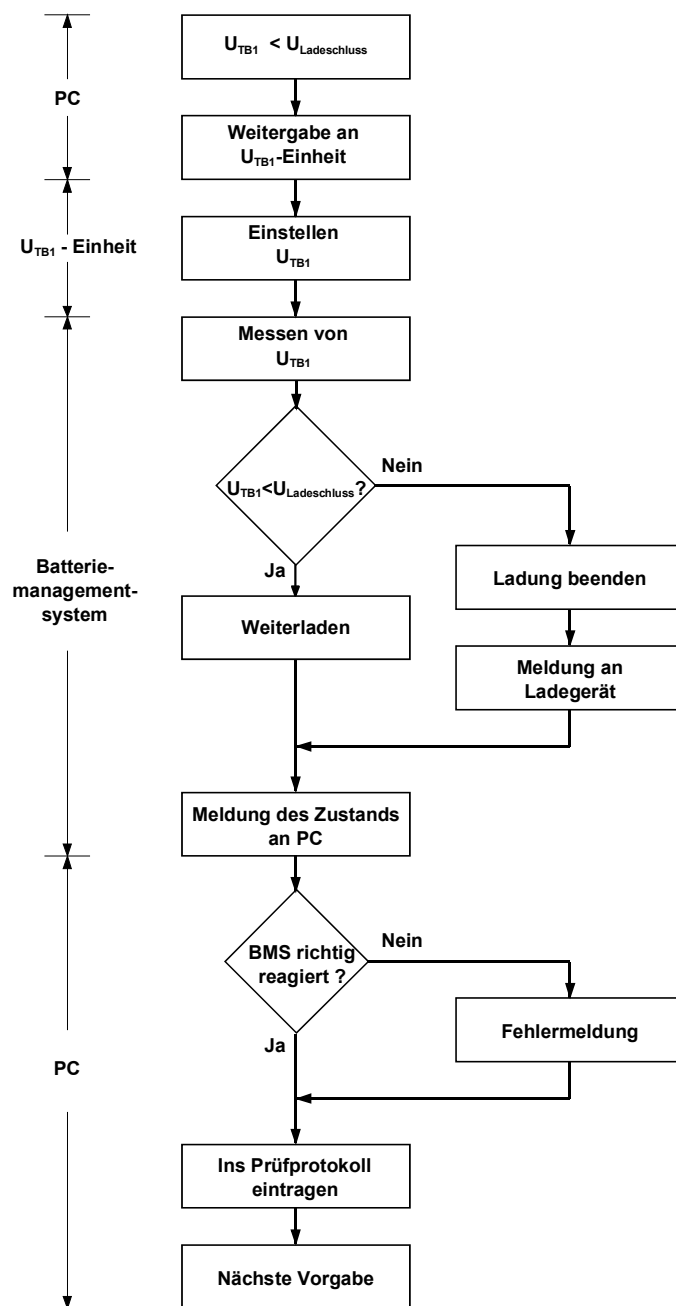


Bild 8.5 Teil des Prüfalgorithmus des Batteriemangement-Tests

Der Algorithmus nach Bild 8.5 prüft, ob vom Batteriemanagementsystem erkannt wird, dass die Teilbatteriespannung U_{TB1} unter oder über der Ladeschlussspannung liegt. Dazu gibt der PC für U_{TB1} einen Wert für die Ladeschlussspannung vor. Dieser wird von der programmierbaren Spannungsquelle eingestellt und das Batteriemangement erfasst diese Spannung im Rahmen des Ablaufes des Batteriemangement-Algorithmus. Das Batteriemanagementsystem verarbeitet die erfassten Daten und reagiert entsprechend darauf. Wie das System sich entschieden hat, wird dem PC mitgeteilt und von diesem protokolliert.

8.2 Test des thermischen Batteriemagements

Der Test des thermischen Batteriemagements erfolgt ebenfalls mit dem Testgerät nach Bild 8.4. Es wird dabei überprüft, ob bei Erreichen der entsprechenden Temperaturen die Kühlung oder die Heizung vom elektrischen Batteriemangement eingeschaltet werden. Dies wird über die Rückkopplung dem PC gemeldet. Es kann noch zusätzlich der Pegel an dem entsprechenden Steuerausgang des Batteriemangementssystems überprüft werden.

Die Heiz- und Kühleinrichtungen selbst müssen nach der Montage an der realen Batterie getestet werden. Dazu werden für den Funktionstest die Steuereingänge auf die entsprechenden Pegel gelegt und die Funktionen Heizen und Kühlen geprüft. Dies kann unabhängig vom Batteriemanagementsystem erfolgen.

8.3 Test des Ladeausgleichs

Die Funktion des Ladeausgleichs in der Topologie „Energiezuführung“ lässt sich mit dem Testgerät nach Bild 8.4 nicht prüfen. Dazu müsste eine Senke vorhanden sein. Bei der direkten Verdrahtung kann daher mit dem Testgerät nur erkannt werden, ob tiefer entladene Teilbatterien entsprechend selektiert werden. Bei dem in Kapitel 5 beschriebenen Batteriemanagementsystem kann die Funktion des Ladeausgleichs nur in Verbindung mit einer realen Batterie geprüft werden. Bei diesem System läuft der Ladeausgleich nebenläufig zum Batteriemangement-Algorithmus mit. Es kann hier nur überprüft werden, ob der Ladeausgleich bei Erreichen der Vollladung beendet wird.

Das Schalten des Bypasses bei der Topologie „Energieumsetzung“ dagegen kann mit dem Testgerät erkannt werden. Zum einen gibt das elektrische Batteriemangement dazu den Befehl, was über die Rückkopplung vom PC erkannt wird, und zum anderen kann dies aus der Änderung der nachgebildeten Teilbatteriespannung aufgrund des nach dem Schalten des Bypasses verringerten Eingangswiderstandes zumindest theoretisch erkannt werden.

Der Ladeausgleich mit der Topologie „Energieumverteilung“ kann vom Testgerät aus dem gleichen Grund wie bei der Topologie „Energiezuführung“ nicht geprüft werden. Eine Prüfung der Funktion kann hier nur mit einer realen Batterie erfolgen.

Es ist ein Test des korrekten Abarbeitens des Algorithmus und des korrekten Erfassens der Batteriegrößen durch das elektrische Batteriemangement möglich. Dieser Test lässt sich rechnergestützt mit einer entsprechenden Rückkopplung automatisieren. Der Test des thermischen Batteriemagements und des Ladeausgleichs erfordert dagegen den Einsatz einer realen Batterie. Weiter ist zu beachten, dass das Testgerät an das zu testende Batteriemagementsystem angepasst sein muss. Dies gilt auch umgekehrt.

9 Integrierte Batteriemanagementsysteme

Die in Kapitel 4 vorgestellten Topologien arbeiten auf der Basis eines Mikrocontrollers mit entsprechender Datenerfassungseinheit und sind diskret aufgebaute Systeme. Deren Einsatzgebiete sind hauptsächlich die Traktion und stationäre Anlagen. Eine Reihe dieser Systeme kann einen Ladeausgleich durchführen und ein thermisches Batteriemangement steuern. Im Gerätebereich dagegen finden sich integrierte Batteriesysteme. Es werden Ein-Chip-Lösungen eingesetzt, die das elektrische Batteriemangement oder auch nur Teile davon umfassen. Zu beachten ist, dass im Gerätebereich nur eine geringe Anzahl von Teilbatterien, für manche Anwendungen ist sogar eine einzelne Zelle ausreichend, zu überwachen sind.

Ein Ladeausgleich ist im Gerätebereich nicht vorgesehen und auch nicht unbedingt notwendig, da hier nur wenige Zellen in Reihe geschaltet sind. Dies zeigen auch eigene Untersuchungen. Exemplarisch sind in Bild 9.1 die Abweichungen nach dem Ladeende von zehn in Reihe geschalteten NiCd-Zellen mit einer Kapazität von jeweils 2200 mAh über 15 Zyklen dargestellt.

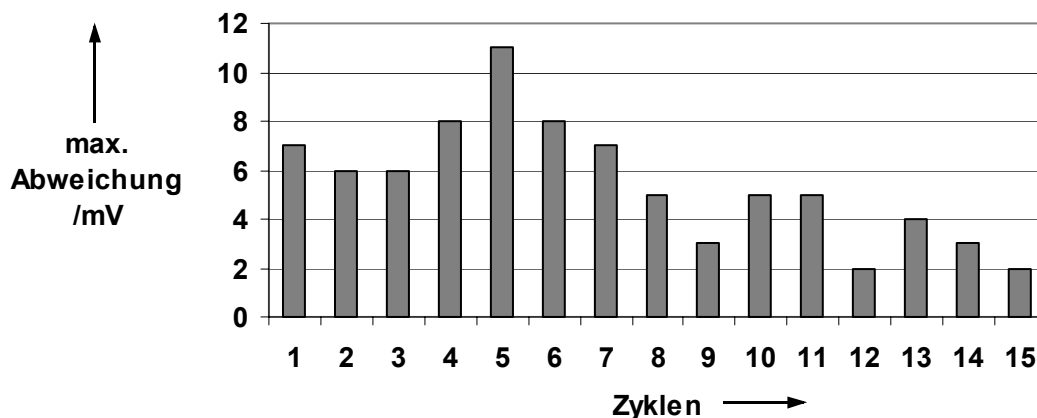


Bild 9.1 Maximale Abweichung innerhalb zehn NiCd-Zellen nach dem Ladeende

Nach Bild 9.1 liegt die maximale Differenz, gemessen direkt nach dem Beenden des Ladevorganges, bei 11 mV. Dies liegt nach Kapitel 7 innerhalb der Messtoleranz von Batteriemanagementsystemen. Damit ist ein weiterer Ladeausgleich nicht möglich und auch nicht notwendig. Das Ansteigen der maximalen Abweichung im 4. und 5. Zyklus liegt darin begründet, dass die Batterien nach einer längeren Lagerzeit zunächst wieder aktiviert werden mussten.

Ein thermisches Batteriemangement ist für die Gerätebatterien nicht vorgesehen. Es kann lediglich in Abhängigkeit von der Batterietemperatur eine Ladung oder Entladung unterbunden werden. Das thermische Batteriemangement ist praktisch auf die Traktion mit ihren extremen Betriebsbereichen beschränkt.

9.1 Klassifizierung der integrierten Batteriemanagementsysteme

Die Batteriemanagementsysteme im Gerätebereich entsprechen entweder der Topologie Batteriemanagementsystem für die „ganze“ Batterie oder der Topologie Teilbatterieüberwachung mit direkter Verdrahtung. Zu unterscheiden sind diese weiter in die reinen Monitorsysteme, die nur Batteriedaten erfassen und weitergeben, in Ladekontrollsysteme, die das Laden der Batterie managen und nur das Einhalten der Ladeschlussspannung überwachen und in komplette Systeme für das elektrische Batteriemangement.

9.1.1 Integrierte Batteriemonitore

Die Batteriemonitore arbeiten nach der Definition in Kapitel 4 beobachtend und greifen selbst nicht aktiv ein. Sie werden unterschieden in Systeme, die als Ah-Zähler fungieren und Systeme die Teilbatteriedaten erfassen.

Die Systeme, die nur eine Lade-/Entlade-Kontrolle durchführen, gehören zu der ersten Klasse von Monitorsystemen. Sie arbeiten als Ah-Zähler und geben Informationen über den Ladezustand (SOC) der überwachten Batterie ab [Texas 2000]. Weiter ist ein Temperatursensor mitintegriert, so dass die Abhängigkeit der Kapazität von der Temperatur von einer übergeordneten Instanz, z.B. einer Zentraleinheit, mitberücksichtigt werden kann. Es können damit auch die Temperaturgrenzen überwacht werden. Für die Kommunikation ist eine serielle Datenübertragung über ein sogenanntes Single-Wire-Bussystem vorgesehen. Diese Systeme entsprechen im Prinzip einer „Tankanzeige“.

Die zweite Klasse der Monitorsysteme erfasst Teilbatteriedaten, z.B. Spannung und Temperatur [Dallas 2000]. Diese Systeme entsprechen den Slaves in der Topologie mit den verteilten Datenerfassungseinheiten. Wie oben erfolgt auch hier die Datenübertragung über ein Ein-Draht-Bussystem. Weiter können kleinere Datenmengen in dem Baustein gespeichert werden.

9.1.2 Integrierte Ladecontroller

Unter den integrierten Lade-Controllern werden Laderegler verstanden, die speziell an eine Batterie-Technologie, z.B. Lithium-Ionen-Batterien, angepasst sind [National 2000]. Dieser Baustein kann eine Li-Ionen-Zelle oder zwei in Reihe geschaltete Zellen laden. Der absolute Fehler der Ladeschlussspannung ist zu ± 30 mV spezifiziert. Die meisten Lade-Controller sind für Li-Ionen-Batterien ausgelegt, da wie in Kapitel 6 beschrieben wurde, diese Batterie die höchsten Anforderungen an das Einhalten der Ladeschlussspannung stellt.

9.1.3 Integriertes elektrisches Batteriemangement

Die aufwändigsten Systeme im Gerätebereich bieten ein integriertes elektrisches Batteriemangement. Diese Schaltungen werden auch als Batterie-Controller bezeichnet [MAXIM 2000]. Dieser Schaltkreis bietet eine Lade-/Entlade-Kontrolle, gibt den Ladezustand anhand von fünf Leuchtdioden aus, erfasst die Batterietemperatur und kann vier Teilbatteriespannungen bis zu einer Gesamtspannung von 20,48 V erfassen. Außerdem verfügt der Chip über zwei serielle Kommunikationsschnittstellen. Eine der Kommunikationsschnittstellen ist als Smart Battery Bus (SMB) Interface ausgelegt [Knop 1996]. Über die SMB-Schnittstelle kann das Batteriemangement z.B. beim Einsatz der Batterie in einem Laptop diesem mitteilen, dass die Batterie leer wird. Der Laptop seinerseits hat dann die Möglichkeit den Prozessortakt zu reduzieren oder sonstige Energiesparmöglichkeiten zu ergreifen.

9.2 Integrierte Batteriemangementsysteme als Datenerfassungseinheiten

Wie oben beschrieben wurde, entspricht die zweite Klasse der integrierten Batteriemonitore den Slaves bei der Topologie Teilbatterieüberwachung mit verteilten Datenerfassungseinheiten nach Kapitel 4. Damit sind die integrierten Batteriemonitore prinzipiell auch für die Datenerfassung an vielzelligen Batterien geeignet. Notwendig ist allerdings, dass der Ein-Draht-Bus potentialgetrennt ausgeführt wird. Bild 9.2 zeigt die in Verbindung mit einer 60V-Bleibatterie für den Traktionseinsatz zu Versuchszwecken aufgebaute Struktur.

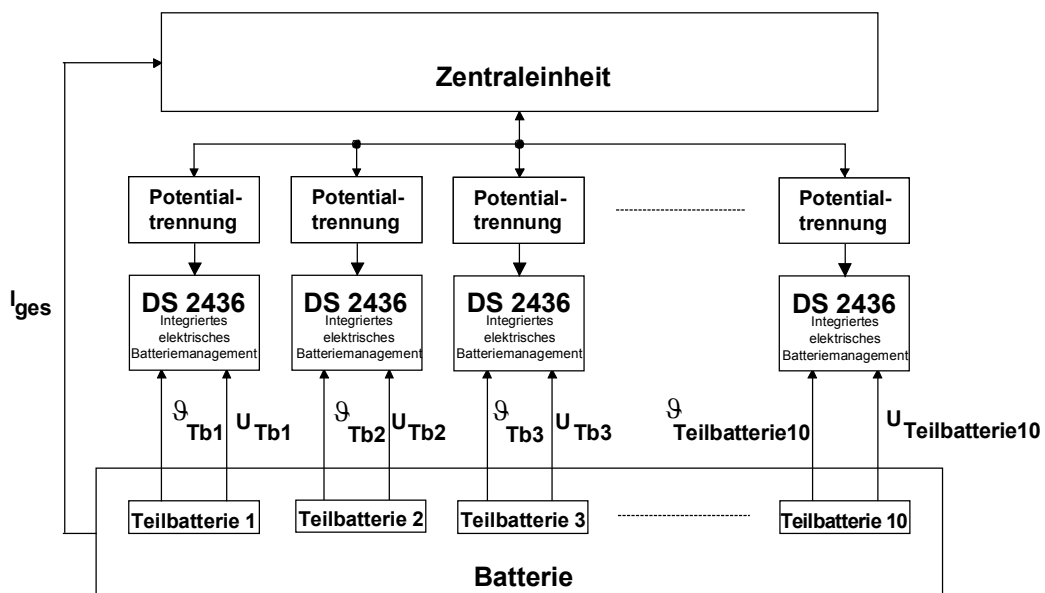


Bild 9.2 System mit integrierten verteilten Datenerfassungseinheiten

In Bild 9.2 wird jedem 6V-Modul der Bleibatterie, das einer Teilbatterie entspricht, ein Baustein vom Typ DS2436 zugeordnet [Dallas 2000]. Dieser kommuniziert mit der Zentraleinheit über einen Ein-Draht-Bus. Übertragen werden die Teilbatteriespannung und die Teilbatterietemperatur. Jeder Chip hat bereits werksseitig eine Identifikationsnummer, so dass eine Zuordnung der Teilbatterien einfach möglich ist. Das System mit den integrierten verteilten Datenerfassungseinheiten arbeitet ebenfalls mit einem Master-Slave-Protokoll. Bild 9.3 zeigt den Spannungsverlauf beim Entladen einer Teilbatterie. Die Daten wurden dabei mit dem System nach Bild 9.2 erfasst.

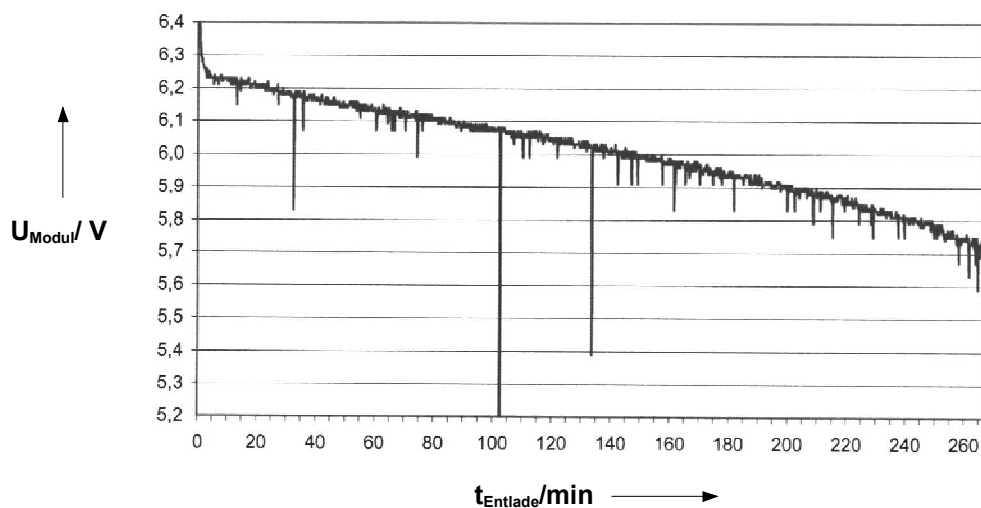


Bild 9.3 Spannungsverlauf beim Entladen eines 6V-Bleibatteriemoduls

In Bild 9.3 sind einige Störungen bei der Messung zu erkennen, die sich aber durch eine geeignete Filterung in der Zentraleinheit eliminieren lassen. Insgesamt ist der Einsatz der integrierten Datenerfassungseinheit eine kostengünstige Alternative zu den Slaves, die mit einem Mikrocontrollersystem aufgebaut sind. Allerdings muss beachtet werden, dass mit den integrierten Datenerfassungseinheiten kein Ladeausgleich möglich ist.

10 Zusammenfassung

Ausgehend von den Batterien nach dem Stand der Technik werden die Einflüsse auf diese untersucht. Es stellt sich heraus, dass vor allem Batterien für den Einsatz in der Traktion und in stationären Anlagen nur mit nicht zu vernachlässigenden Toleranzen gefertigt werden können. Dazu kommt der Einfluss durch den Betrieb, der in Verbindung mit der Fertigungstoleranz und der Lagerbeanspruchung eine Überwachung der Batterie mit einem elektronischen Überwachungs- und Steuergerät, einem sogenannten Batteriemanagementsystem, zwingend notwendig macht. Nur damit kann die aktuelle Qualität einer Batterie erhalten oder verbessert werden.

Es folgt eine Klassifizierung von Batteriemanagementsystemen, die ihrerseits in elektrisches Batteriemangement, thermisches Batteriemangement und Ladeausgleich aufgeteilt werden. Für diese drei Teileinheiten werden jeweils eine Reihe von Topologien definiert. Das Batteriemanagementsystem mit verteilten Datenerfassungseinheiten und Energiezuführung für den Ladeausgleich wird als Beispiel für eine Geräteentwicklung detailliert beschrieben.

Grundlegend für Batteriemanagementsysteme sind deren Algorithmen. Nach der Definition der elektrischen und thermischen Betriebsbereiche verschiedener Batterien werden typische Algorithmen für den Lade- und Entladebetrieb vorgestellt. Weiter werden Verfahren zur Bestimmung des aktuellen Ladezustandes einer Batterie diskutiert. Im Falle eines Betriebes in einem Inselnetz geht in die aktuelle Qualität einer Batterie auch der Isolationswiderstand mit ein. Näher beschrieben wird ein Gerät zur Messung des Isolationswiderstandes.

Das Batteriemangement fordert eine hohe Genauigkeit bei der Datenerfassung. Es werden typische Datenerfassungseinheiten und Sensoren auf ihre Fehlerquellen und die daraus resultierenden Toleranzen untersucht. Weiter werden Kalibrierungsmöglichkeiten diskutiert.

Ein weiterer Punkt ist der Test von Batteriemanagementsystemen. Ein Test mit einer realen Batterie nimmt eine längere Zeit in Anspruch. Außerdem besteht dabei die Gefahr einer Schädigung der Batterie. Es wird ein rechnergestütztes System zum Test des elektrischen Batteriemagements vorgestellt.

Abschließend werden integrierte Batteriemanagementsysteme, die im Gerätebereich Anwendung finden, klassifiziert. Es wird gezeigt, dass diese integrierten Lösungen als Ersatz für Datenerfassungseinheiten bei Batterien im Traktions- und Stationärbetrieb eingesetzt werden können.

Insgesamt wird nachgewiesen, dass elektronische Überwachungs- und Steuergeräte unabhängig vom Batterietyp und der Einsatzart zum Erhalt oder zur Verbesserung der aktuellen Qualität von Batterien nicht nur sinnvoll sondern für neuere Batterietechnologien unbedingt notwendig sind.

11 Literaturverzeichnis

- [Abouda 2000] Abouda, K.; Briat, O.; Vinassa, H.; Henry, H.:
Design, Realization and Experimentation of a Ni-MH Battery Monitoring System (BMS) for Electric Vehicles
Electric Vehicle Symposium EVS 17, Montreal, 2000
- [Angelis 1987] Angelis, J.; Birnbreier, H.; Haase, H.:
Hochenergiebatterie für Elektrostraßenfahrzeuge
etz 14/87, 1987
- [Atmel 1994] Atmel:
AT89C2051 8-Bit Microcontroller with 2 Kbytes Flash
Atmel Corporation, San Jose, 1994
- [Barnard 1976] Barnard, R.; Crickmore, G.; Lee, J.; Tye, F.:
A Cause of "Stepped" Discharge Curves in Nickel-Cadmium Cells
Power Sources 6, Research and Development in Non-Mechanical Electrical Power Sources, Proceedings of the 10th International Symposium, Brighton, 1976
- [Barnes 1997] Barnes, S.; Fleming, F.; Longardner, W.; Ravalovich, A.:
Thermal Management for Hybrid-Electric Vehicle Valve-Regulated Lead-Acid Batteries
Electric Vehicle Symposium EVS 12, Anaheim, 1994
- [Berndt 1995] Berndt, D.:
Elektrochemische Energiespeicher
Fachtagung Batterien und Batteriemangement, Haus der Technik, Essen, 1995
- [Berndt 2001] Berndt, D.:
Bleibatterien
Fachtagung Batterien und Brennstoffzellen für Bordnetz und Traktion, Haus der Technik, Essen, 2001
- [Berndt 2001a] Berndt, D.:
Grundlagen elektrochemischer Energiespeicher und -wandler
Fachtagung Batterien und Brennstoffzellen für Bordnetz und Traktion, Haus der Technik, Essen, 2001
- [Beyschlag 1993] Beyschlag:
Widerstände für die Elektronik
Beyschlag GmbH, Heide, 1993

- [Blanchard 2002] Blanchard, P.; Gaignerot, L.; Herreyre, S.; Rigobert, G.; Sarre, G.:
Progress in SAFT Li-Ion Cells and Batteries for Automotive Applications
Electric Vehicle Symposium EVS 19, Busan, 2002
- [Böhm 1997] Böhm, H.:
Die ZEBRA Batterie, eine Hochenergiebatterie für Elektrostraßenfahrzeuge
Fachtagung Batterien, Energiespeicher und Leistungsspeicher, Haus der Technik, Essen, 1997
- [Dallas 2000] Dallas Semiconductor:
DS2436 Battery ID/Monitor Chip
http://www.dalsemi.com/Prod_info/Battery/batman.html
- [Digatron 1996] Digatron:
Batlog micro
Digatron GmbH, Aachen, 1996
- [DIN43539, 1985] DIN43539:
Akkumulatoren, Prüfungen, Allgemeines und allgemeine Prüfungen
Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE, Beuth Verlag, Berlin, 1985
- [Dustmann 2000] Dustmann, C.:
The Swiss ZEBRA Battery System
Electric Vehicle Symposium EVS 17, Montreal, 2000
- [Dustmann 2001] Dustmann, C.:
ZEBRA® Batterie – Systeme im Einsatz für Nutzfahrzeuge
Fachtagung Batterien und Brennstoffzellen für Bordnetz und Traktion, Haus der Technik, Essen, 2001
- [EN1987, 1996] EN 1987-1:
Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge – Besondere Festlegungen für die Sicherheit – Teil 1: Bordeigene Energiespeicher
1996
- [Eveready 2000] Eveready Battery Company
Nickel Cadmium Batteries
http://data.energizer.com/batteryi...ication_manuals/nickel_cadmium.htm

- [Fischer 1996] Fischer, D.; Lohner, A.; Mauracher, P.:
Batteriemanagement: Erhöhung der Zuverlässigkeit von USV
etz, 4/1996
- [Gagnol 1994] Gagnol, P.; Alzieu, J. ; Berckmams, P. ; Smimite, H. :
On-Board Management System for EV Batteries : A Field Ex-
periment on different EVS of EDS Fleet
Electric Vehicle Symposium EVS 12, Anaheim, 1994
- [Garten 1974] Garten, W.:
Bleiakkumulatoren
VARTA Fachbuchreihe Band 1, VARTA Batterie AG, Hannover,
1974
- [Gereth 1994] Gereth, R.; Kruger, F.:
Neue Impulse für das Elektro-Straßenfahrzeug
etz Bd. 115 (1994) Heft 1
- [Gutekunst 1990] Gutekunst, K.; Naunin, D.:
Determination of the Status of Charge of Sealed NiCd- and Lead-
Acid-Batteries for Small Electric Vehicles by Measurement of Tem-
perature and Pressure
Electric Vehicle Symposium EVS 10, Hong Kong, 1990
- [Harats 1995] Harats, Y.:
The Electric Fuel™ System Solution for an Electric Vehicle
Fachtagung Batterien und Batteriemangement, Haus der Tech-
nik, Essen, 1995
- [Hauck 1995] Hauck, B.:
Testbench for Battery Management Systems
Electric Vehicle Technology EVT '95, Paris, 1995
- [Hauck 1997] Hauck, B.; Kahlen, H.:
Batteriemanagementsysteme in Theorie und Praxis
Jahrestagung Angewandte Elektrochemie, Gesellschaft Deut-
scher Chemiker, Wien 1997, GDCh-Monographie Bdd. 12, 1997
- [Hauck 1997a] Hauck, B.:
Batteriemanagementsysteme für Geräte- und Traktionsbatterien
Fachtagung Batterien, Energiespeicher und Leistungsspeicher,
Haus der Technik, Essen, 1997

- [Hauck 1998] Hauck, B.:
Test and Evaluation of the Battery Management System with the Two Wire Bus
Electric Vehicle Symposium EVS 15, Brüssel, 1998
- [Hauck 2001] Hauck, B.:
Comparison of charge equalization methods for traction batteries
European Power Electronics Conference EPE 2001, Graz, 2001
- [Heinemann 1998] Heinemann, D.; Naunin, D.:
Happy batteries
Electric & Hybrid Vehicle Technology '98
- [Heinemann 1999] Heinemann, D.; Naunin, D.:
A Battery Management System for optimized Control and Diagnosis of Traction Batteries in EVs and HEVs
Electric Vehicle Symposium EVS 16, Peking, 1999
- [Heise 1999] Heise, V.:
Lithium Polymer Batterien, Stand der Delphi Entwicklung
Fachtagung Batterien und Brennstoffzellen für Fahrzeuge und Anlagen, Haus der Technik, Essen, 1999
- [Heise 2001] Heise, V.:
Lithium Polymer Batterien für den automobilen Einsatz
Fachtagung Batterien und Brennstoffzellen für Bordnetz und Traktion, Haus der Technik, Essen, 2001
- [Hollenkamp 1991] Hollenkamp, A.:
Premature Capacity Loss in Lead/Acid Batteries: A Discussion of the Antimony-Free Effect and Related Phenomena
Journal of Power Sources, 36, 1991
- [Hornung 1998] Hornung, M.; Braun, M.:
A Charging and Charge Equalization System For Series Connected Batteries
Electric Vehicle Symposium EVS 15, Brüssel, 1998
- [Hullmeine 1989] Hullmeine, U.; Voss, E.; Winsel, A.:
Effect of Previous Charge/Discharge History on the Capacity of the PbO₂/PbSO₄ Electrode: The Hysteresis or Memory Effect
Journal of Power Sources, 25, 1989

- [Hung 1993] Hung, S.; Hopkins, D.; Mosling, C.:
Extension of Battery Life via Charge Equalization Control
IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 40, NO. 1,
1993
- [ISO/WD 1997] ISO/WD 6469-1:
*Electric Road Vehicles – Safety Specifications – Part 1: On-
board energy storage*
1997
- [Kahlen 1994] Kahlen, H.; Jahnke, B.; Schmidt, C.; Ziegenbein, B.:
Überbrückungselement
Patentschrift DE 3426199 C2, 1994
- [Kahlen 1996] Kahlen, H.; Hauck, B.:
*Battery Management with a Two Wire Bus for Single Cell Charg-
ing and Measurement*
Electric Vehicle Symposium EVS 13, Osaka, 1996
- [Kahlen 1997] Kahlen, H.:
Natrium-Schwefel-Hochenergiebatterien
Fachtagung Batterien, Energiespeicher und Leistungsspeicher,
Haus der Technik, Essen, 1997
- [Kahlen 1997a] Kahlen, H.; Hauck, B.:
Vorrichtung zur Überwachung einer Akkumulatoren-Batterie
Offenlegungsschrift DE 19535675 A1, 1997
- [Kahlen 1997b] Kahlen, H.; Hauck, B.:
*Schaltungsanordnung zur Bestimmung des Isolationswiderstan-
des einer Akkumulatorenbatterie*
Offenlegungsschrift DE 19618897A1, 1997
- [Kahlen 1999] Kahlen, H.; Koch, H.:
Automatische Messung des Isolationswiderstands einer Batterie
etz, Heft 6/1999
- [Kalker 1994] Kalker, M.; Zander, E.:
Aufs Batterie-Management kommt es an!
MobilE, 2/1994
- [Kalker 1994] Kalker, M.; Zander, E.:
Batteriemanagement für Antriebsbatterien von Elektrofahrzeugen
Symposium Neue Techniken für Elektrofahrzeuge, Interlaken
1994

- [Karden 2001] Karden, E.:
Using low-frequency impedance spectroscopy for characterization, monitoring, and modeling of industrial batteries
Dissertation RWTH Aachen, 2001
- [Kiehne 1980] Kiehne, H. (Hrsg):
Batterien
Expert-Verlag, Ehningen, 1980
- [Knop 1996] Knop, I.:
Smart Batteries
Entwicklerforum Batterien und Ladekonzepte, München, 1996
- [Köhler 1997] Köhler, U.; Niggemann, E.; Jahn, U.:
Nickel-Metallhydrid-Batterien für Geräte und Traktionsanwendungen
Fachtagung Batterien, Energiespeicher und Leistungsspeicher, Haus der Technik, Essen, 1997
- [Köhler 2001] Köhler, U.; Kümpers, J.:
Nickel-Metallhydrid- und Lithium-Ionen-Batterien für zukünftige Bordnetzsysteme
Fachtagung Batterien und Brennstoffzellen für Bordnetz und Traktion, Haus der Technik, Essen, 2001
- [Koskinen 1998] Koskinen, T.; Haakana, A.:
A Vehicle Control System with Remote Battery Monitoring and Multimedia Capabilities
Electric Vehicle Symposium EVS 15, Brüssel, 1998
- [Kruger 1996] Kruger, F.; Böttcher, F.; Brandt, K.; Köhler, U.; Niggemann, E.:
Recent Advances in Battery Technology for Electric Vehicles
Electric Vehicle Symposium EVS 13, Osaka, 1996
- [Kutkut 1994] Kutkut, N.; Divan, D.; Novotny, D.:
Charge Equalization For Series Connected Battery Strings
29. IEEE-IAS Annual Meeting Conference Record 1994
- [LEM 2000] LEM
Datenblatt Current Transducer LA 255-S/SP5
<http://www.lem.com>
- [Lexow 1979] Lexow, K.; Kraft, H.:
Vorrichtung zur Messung des Ladezustandes von wiederaufladbaren galvanischen Elementen
Patentschrift DE 2925248 C2, 1979

- [Linden 1995] Linden, D. (Editor):
Handbook of Batteries
Mc Graw Hill, New York, 1995
- [Lindemark 1991] Lindemark, B.:
Individual Cellvoltage Equalizers (ICE) For Reliable Battery Performance
13. International Telecommunications Energy Conference, Intellec 91, Kyoto, 1991
- [Lohner 1998] Lohner, A.:
Batteriemanagement für verschlossene Blei-Batterien am Beispiel von Unterbrechungsfreien Stromversorgungen
Dissertation, RWTH Aachen, 1998
- [Marginèdes 2002] Marginèdes, D.; Huglo, F.; Brégeon, L.; Heilbronn, B.; Lascaud, S. :
Lithium Polymer Battery program achievement
Electric Vehicle Symposium EVS 19, Busan, 2002
- [MAXIM 1992] MAXIM
Datenblatt MAX873/875/876
<http://www.maxim-ic.com>
- [MAXIM 1989] MAXIM:
Datenblatt MAX420
MAXIM Integrated Products, Sunnyvale, 1989
- [MAXIM 1993] MAXIM:
Datenblatt MAX508
New Releases Data Book Volume II, MAXIM Integrated Products, 1993
- [MAXIM 1998] MAXIM:
Datenblatt MAX110/MAX111
<http://www.maxim-ic.com>
- [MAXIM 2000] MAXIM:
MAX1780 Advanced Smart Battery Pack Controller
<http://www.maxim-ic.com>
- [Meiwes 1988] Meiwes, J.; Salkind, A.; Nowak, D.:
Development of a State-of-Charge Indicator for NiCd Batteries and the Performance of a New Experimental NiCd Battery for Electric Vehicles
Electric Vehicle Symposium EVS 9, Toronto, 1988

- [Microchip 1994] Microchip:
MTA 11200 Intelligent Battery Management IC
Datenblatt Microchip, 1994
- [Miyamoto 1996] Miyamoto, T.; Touda, M.; Katamaya, K.:
Advanced Battery System for Electric Vehicle (FEV-II)
Electric Vehicle Symposium EVS 13, Osaka, 1996
- [Morin 1996] Morin, C.; Perelle, M.:
Lithium-Ion Battery Electronic Control System for Electric Vehicle Application
Electric Vehicle Symposium EVS 13, Osaka, 1996
- [Müllejans 1999] Müllejans, R.:
Nickel-Cadmium Akkumulatoren in industriellen Anwendungen
Fachtagung Batterien und Brennstoffzellen für Fahrzeuge und Anlagen, Haus der Technik, Essen, 1999
- [National 1984] National Semiconductor
LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors
National Semiconductor Corporation, Santa Clara, 1984
- [National 2000] National Semiconductor
LM3622 Lithium-Ion Battery Charger Controller
<http://www.national.com>
- [NIFE 2000] NIFE
Verschlossene Bleibatterien
<http://www.nife-tnb.de/sites/prod-vblei.html>
- [NIFE 2000a] NIFE
Geschlossene Bleibatterien
<http://www.nife-tnb.de/sites/prod-gblei.html>
- [Ohms 2001] Ohms, D.:
Bipolare NiMH-Batterien
Fachtagung Batterien und Brennstoffzellen für Bordnetz und Traktion, Haus der Technik, Essen, 2001
- [Pascual 1997] Pascual, C.; Krein, P.:
Switched Capacitor System for Automatic Series Battery Equalization
Proceedings IEEE Applied Power Electronics Conference, Atlanta, 1997

- [Pavlov 1993] Pavlov, D.:
Premature Capacity Loss (PCL) of the Positive Lead/Acid Battery Plate: A New Concept to Describe the Phenomenon
Journal of Power Sources, 42, 1993
- [Rafalovich 1995] Rafalovich, A.; Schmidter, T.:
Thermal Management of Electric Batteries for Electric and Hybrid Vehicles
Electric Vehicle Technology EVT 95, Paris, 1995
- [Retzlaff 1992] Retzlaff, W.:
On Board Battery Diagnostic and Charge Equalizing System (BADICHEQ)
Electric Vehicle Symposium EVS 11, Florenz, 1992
- [Retzlaff 1996] Retzlaff, W.:
On-Board Battery Management System BADICOaCH
Electric Vehicle Symposium EVS 13, Osaka, 1996
- [SAFT 2000] SAFT
Rechargeable portable batteries: Use and handling precautions for MP Li-Ion cells
<http://www.saft.fr/telecome/common/html/sftel014.htm>
- [Schmidt 1998] Schmidt, H.; Anton, L.:
Charge Equalizer-Konzepte zum optimalen Betrieb seriell verschalteter Batterien
5. Design & Elektronik Entwicklerforum Batterien Ladekonzepte & Stromversorgungsdesign, München, 1998
- [Schöpe 1994] Schöpe, F.:
Batteriemangement für Nickel-Cadmium Akkumulatoren
Dissertation RWTH Aachen, 1994
- [Schöpe 1997] Schöpe, F.; Karden, E.; Küssel, R.:
Batteriemagementsysteme für Elektrostraßenfahrzeuge
Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT), Frankfurt, 1997
- [Schöpe 1997a] Schöpe, F.:
Memoryeffekte in Geräte-, Anlagen- und Traktionsbatterien
Fachtagung Batterien, Energiespeicher und Leistungsspeicher, Haus der Technik, Essen, 1997

- [Seger 2001] Seger, P.; Koerner, C.; Wagener, A.; Kabza, H.:
A Modular Battery Management System for Various Types of Batteries in a Series Hybrid Drivetrain
Electric Vehicle Symposium EVS 18, Berlin, 2001
- [SGS 1996] SGS Thomson:
Leistungsverstärker TDA7294V
SGS Thomson, 1996
- [Shinpo 1997] Shinpo, T.; Suzuki, H.:
Development of Battery Management System for Electric Vehicle
Electric Vehicle Symposium EVS 14, Orlando, 1997
- [Siedle 1998] Siedle, C.; Anton, L.; Schmidt, H.:
Ladungsausgleichssysteme für mehrzellige Batterien – Ergebnisse eines Langzeitversuchs
Symposium „Moderne elektrische Energietechnik einschließlich Elektrochemische Energiequellen“, BAKWVT Mannheim, 1998
- [Siemens 1995] Siemens:
SAB 80C517/80C537 8-Bit CMOS Single-Chip Microcontroller
Siemens AG, Bereich Halbleiter, München, 1995
- [Simon 1994] Simon, M.:
Badicheq, Battman und Battery Control Module
Mobile, 2/1994
- [Sinsteden 1854] Sinsteden, W.:
Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie
Band 92, 1854
- [Soellner 1986] Soellner, J.:
Impedanzspektrometrische Messungen an Nickel-Cadmium-Akkumulatoren zur Entwicklung einer verbesserten Ladezustandsanzeige für die Magnetschwebbahn TRANSRAPID
AEG, Berlin, 1986
- [Stassen 2001] Stassen, I.:
Wiederaufladbare Lithium-Metall-Batterien für Elektrofahrzeuge
Fachtagung Batterien und Brennstoffzellen für Bordnetz und Traktion, Haus der Technik, Essen, 2001
- [Sway-Tin 1996] Sway-Tin, Min; Dhameja, S.:
Dielectric Breakdown Sensing for Electric Vehicle Applications
SAE SP-1156, Strategies in Electric and Hybrid Vehicle Design, 1996

- [Tafel 1905] Tafel, J.:
Zeitung physicalische Chemie
50, 1905
- [Taguchi 1985] Taguchi, G.; Wu, Y.:
Introduction to Offline Quality Control
Central Japan Quality Control Association, Nagaya, 1985
- [Taniguchi 1994] Taniguchi, T.; Moriya, T.; Tsuji, T; Hironaka, K.:
Stabilization of Charging and Discharging Function of Sealed Type Lead-Acid Battery
Electric Vehicle Symposium EVS 12, Los Angeles, 1994
- [TEXAS 2000] TEXAS INSTRUMENTS:
Advanced Battery Monitor IC bq2019
Texas Instruments Incorporated, Dallas, 2000
- [Thanner 1993] Tanner, T.:
Batterien für Elektrostraßenfahrzeuge
MobilE, 4/1993
- [Tomazic 1992] Tomazic, G.:
Erprobung der Zink-Brom-Batterie
Kahlen, H. (Hrsg): *Batterien*, Fachbuchreihe Haus der Technik,
Vulkan-Verlag, Essen, 1992
- [Valvo 1985] VALVO:
Professionelle Integrierte Analog-Schaltungen
Datenblatt LM324
VALVO, Hamburg, 1985
- [Viswanathan 1988] Viswanathan, S.; Charkey, A.:
Aircraft Battery State-of-Charge and Charge Control System
Energy Research Corporation, Danbury, CT, 1988
- [VITROHM 1997] VITROHM
Katalog VITROHM Widerstände 1997/1998
VITROHM 1997
- [von Bloh 1995] von Bloh, J.; Hoogerwaard, G.; Schöpe, F.:
Batteriemanagementsystem für Nickel-Cadmium-Batterien
etz, Heft 21/1995

- [Wille 1983] Wille, G.:
Ein Beitrag zur Ermittlung des Energieverbrauchs und der Reichweite von Elektrostraßenfahrzeugen
Dissertation RWTH Aachen, 1983
- [Winter 1997] Winter, M.; Wachtler, M.; Yang, J.; Wrodnigg, G.; Buqa, H.; Lie, L.; Besenhard, J.:
Aktive Materialien für Lithium-Ionen-Zellen
Jahrestagung Angewandte Elektrochemie, Gesellschaft Deutscher Chemiker, Wien 1997, GDCh-Monographie Bd. 12, 1997
- [Zander 1996] Zander, E.; Hanauer, D.; Mentzer, J.:
Batteriemangement für E-Fahrzeuge
MobilE, 2/1996