

Schlussbericht 2004, 7. Dezember 2004

# OPAL (Optimierung der Antriebsbatterie) (eines Elektrofahrzeuges)

Autor und Koautoren	Meier-Engel Karl
beauftragte Institution	HTI Biel
Adresse	Quellgasse 21 / Postfach 2501 Biel
Telefon, E-mail, Internetadresse	032 358 00 55, <a href="mailto:karl.meier@hti.bfh.ch">karl.meier@hti.bfh.ch</a> , <a href="http://www.hti.bfh.ch">www.hti.bfh.ch</a>
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	46157 / 86237
Dauer des Projekts	0.9.02 bis 31.7.04 (verlängert bis 31.12.04)

## ZUSAMMENFASSUNG

### Projektziel

In dieser Studie ging es um die Optimierung des Batterie-Managements für die Antriebsbatterien von Elektrofahrzeugen. Dazu wurde eine Batterie gewählt, wie sie für das Elektrofahrzeugs "SAM" verwendet wird. Die Batterie besteht aus 14, in Serie geschalteten, wartungsfreien 12-Volt Bleiakкумуляtor Blöcken, des Typs Hawker "Genesis" oder "Odyssee", mit einer Nominalkapazität von 26 Ah.

Wartungsfreie Bleiakкумуляtoren, d.h. sogenannte "ventil-gesteuerte Akkumulatoren" ("valve-regulated batteries"), sind für Elektrofahrzeuge attraktiv wegen ihres relativ niedrigen Preises (im Vergleich zu Nickel-Cadmium, Nickel-Metallhydrid oder Lithium Batterien). Die vom Hersteller (Hawker) angegebene Zyklenlebensdauer von 400 Vollzyklen wurde im Fahrzeug in der Praxis jedoch bei weitem nicht erreicht. Selbst nach Ersatz einzelner Blöcke kam man kaum über 200 Zyklen. Ziel dieses Projektes war es, Richtlinien für die Parameter des Batterie-Managements (Ladekennlinie, Temperatur, mechanische Kompression, End-Spannung der Entladung, usw.) zu ermitteln, um eine optimale Zyklenlebensdauer zu erzielen. Solche Richtlinien sollten Allgemeingültigkeit für das Management von wartungsfreien Bleiakкумуляtoren haben.

*Bitte umblättern!*

Im Zyklenbetrieb wird die Lebensdauer von Bleiakkumulatoren meistens durch die fortschreitende Desintegration des elektrochemisch aktiven Materials in der positiven Elektrode (Bleiodioxid) begrenzt. (Verlust des Zusammenhalts der aktiven Masse, und dadurch Verlust des mechanischen und elektrischen Kontaktes zwischen den Partikeln der aktiven Masse). Dieser Prozess ist begleitet vom Aufquellen der aktiven Masse. Weitere wichtige Alterungsmechanismen sind: Sulfatierung der aktiven Massen (was z.B. bei ungenügender Ladung der Fall ist); Korrosion der Gitter der positiven Elektroden (was insbesondere bei zu hohen Ladespannungen, d.h. bei zu starker Ueberladung, sowie bei zu hohen Temperaturen auftreten kann); Wasserverlust, d.h. Austrocknung des Elektrolyten (was ebenfalls bei zu hohen Ladespannungen, bei zu starker Ueberladung, und bei zu hohen Temperaturen zum Problem wird). Ein optimales Batteriemanagement muss vermeiden, dass einer dieser Faktoren frühzeitig überhand nimmt.

### Durchführung der Versuche

Im Testlabor der Hochschule für Technik und Informatik, Vauffelin, wurden Zyklientests mit vier kompletten Antriebsbatterien (nominale Batteriespannung 168 Volt) durchgeführt. Die Ladung erfolgte mit einem konstantem Strom (I-Phase) von 13 A (d.h. 0.5 C), bis zu einer definierten Spannungsgrenze (z.B. 2.45 Volt pro Zelle). Die Ladung wurde dann bei dieser konstanten Spannung (U-Phase) fortgesetzt, und zwar für eine Zeitspanne welche von der Dauer der I-Phase abhing (I-U Kennlinie). Schliesslich wurde bei einzelnen Tests eine zweite I-Phase (bei kleinem konstantem Strom) angefügt, wobei aber auch hier eine obere Spannungsbegrenzung (z.B. 2.6 Volt pro Zelle) angewendet wurde (I-U-I Kennlinie). Der Entladestrom betrug 16 A. Die Endspannung wurde nach kurzen Vorversuchen auf 10.5 Volt pro Block begrenzt, welches 1.75 Volt pro Zelle entspricht. Es wurde auch der Einfluss der Temperatur (Abstand zwischen Batterieblöcken, Kühlung mittels Ventilator), sowie der Einfluss einer mechanischen Kompression, untersucht. Batterietemperatur, Wasserverlust (durch Gewichtsmessung), Kapazität und Innenwiderstand wurden periodisch gemessen.

### Resultate und Schlussfolgerungen

#### -Mechanische Kompression

Die Zyklen-Lebensdauer kann wesentlich verbessert werden, wenn eine **genügende mechanische Kompression** der Elektroden-Platten gewährleistet ist. Dies kann durch mechanisches, seitliches Einspannen der einzelnen Batterie Kästen erreicht werden., wodurch das Ausbuchen (Aufblähen) der Batterie Kästen verhindert wird. Die mechanische Abstützung der Seitenwände der Batterie Kästen wurde in diesem Projekt mittels U-förmiger Aluminiumprofile erreicht, welche gleichzeitig den für die Kühlung benötigten Abstand sicherstellten. Die seitliche Abstützung ist insbesondere bei höheren Temperaturen nötig, weil dann die mechanische Festigkeit der Kastenwände vermindert ist. Die Notwendigkeit der seitlichen Abstützung wurde erst entdeckt, als (zwecks Kühlung) zwischen den einzelnen Batterieblöcken Abstände eingeführt wurden.

#### -Betriebstemperatur

Eine **erhöhte Temperatur** (z.B. über 35 °C) kann sich für die Zyklenzahl vorteilhaft auswirken. Bei erhöhter Temperatur (wichtig insbesondere während der ersten Phase der Ladung) scheidet sich das Bleiodioxid in kompakterer Form ab, wodurch sich der Zusammenhalt der aktiven Masse verbessert. Am Ende der Ladung sollte jedoch die Temperatur nicht zu hoch ansteigen (z.B. nicht über 45 °C) um die Gitterkorrosion und den Wasserverlust möglichst klein zu halten. Es sollte deshalb vorzugsweise eine

temperaturgesteuerte Ventilation zur Kühlung verwendet werden. Es existiert also klar ein Optimum für die Betriebstemperatur.

### **-Ladekennlinie**

Es ist aus der einschlägigen Literatur bekannt, dass **hohe Ladeströme** (z.B. 1 bis 2 C) sich vorteilhaft auswirken, weil sich dann die aktive Masse in Form von sehr aktivem Bleidioxid abscheidet. Im vorliegenden Projekt wurde der Einfluss der Grösse des Ladestroms nicht untersucht. Es wurde ein Strom von 13 A (das ist 0.5 C) verwendet, begrenzt durch die Leistung des Ladegerätes des Elektrofahrzeugs SAM.

Die **Ladespannung** muss in jedem Fall (in Funktion der Temperatur) limitiert werden, z.B. bei

40 °C auf 2.40 Volt pro Zelle (I-U Kennlinie). Die Verwendung einer zweiten I-Phase führt zu erhöhtem Wasserverbrauch, und wahrscheinlich auch zu erhöhter Korrosion. Die zweite I-Phase kann durch eine verlängerte U-Phase (mit vorzugsweise etwas kleinerem Wert der Spannung) ersetzt werden. Falls Zeit zur Verfügung steht, kann die Ladung mittels einer mehrstündigen Schwebeladung (Float Charge) bei 2.27 Volt pro Zelle komplettiert werden. Je mehr Zeit für die Ladung zur Verfügung steht, desto niedriger können die Spannungsgrenzen angesetzt werden, und desto kleiner kann der Wasserverlust gehalten werden. In jedem Fall ist aber eine gewisse Ueberladung nötig, um die volle Ladung zu gewährleisten, und um zu verhindern, dass die Batterie mit der Zeit "verhungert". Die Ueberladung muss aber begrenzt werden, um den Wasserverlust klein zu halten. Es gilt auch hier den optimalen Kompromiss zu finden.

### **-Wasserverbrauch**

Der Wasserverbrauch kann durch periodische **Ueberwachung des Gewichtes** der einzelnen 12-Volt Batteriekästen ermittelt werden. Der Wasserverbrauch steigt mit zunehmender Ladespannung und bei Verwendung einer zweiten I-Phase. Der Wasserverbrauch ist eine Funktion des Ueberladefaktors. Der Wasserverbrauch steigt auch mit zunehmender Temperatur. Bei einem mittleren Wasserverbrauch von etwa 5 mg pro Batterieblock, pro Ah Batteriekapazität und pro Zyklus liessen sich 400 komplette Zyklen erreichen. Der Wasserverbrauch könnte durch Verwendung eines Wasserstoff-Sauerstoff Rekombinationskatalysators noch weiter gesenkt werden.

### **-Entlade-Endspannung**

Die Endspannung der Entladung sollte **nicht zu tief** gewählt werden. Bei einem Entladestrom von

16 A (entsprechend 0.6 C) ist z.B. eine mittlere Endspannung von 10.5 Volt pro Batterieblock (1.75 Volt pro Zelle) zu empfehlen. Bei tieferen Endspannungen werden die schwächsten Batterieblöcke zu tief entladen, oder sogar umgepolt, was ihre Lebensdauer drastisch vermindert. Ein Vergleich der Spannung der ersten Hälfte der Antriebsbatterie (Batterieblöcke 1 bis 7) mit der Spannung der zweiten Hälfte der Antriebsbatterie (Batterieblöcke 8 bis 14), d.h. die Verwendung eines Mittelabgriffs, erlaubte eine Früherkennung schwacher Batterieblöcke.

### **-Empfehlungen, zukünftige Entwicklungen**

Bei der Optimierung des Batterie Managements geht es um die Feinabstimmung zwischen den dem Benutzer zur Verfügung stehenden Parametern:

Mechanische Kompression

Betriebstemperatur

Ladestrom  
Ladespannung  
Ueberladefaktor  
Wasserverbrauch  
Entlade.Endspannung

Wir empfehlen, auf eine zweite I-Phase zu verzichten, und dafür die U-Phase (bei entsprechend tieferen Werten für die Spannung) zu verlängern, um den Ueberladefaktor klein zu halten. Voraussichtlich liesse sich die Zyklen Lebensdauer der getesteten Batterie (Hawker Genesis oder Odyssee) durch eine weitere Erhöhung der mechanischen Kompression (welche quantitativ erfasst werden sollte, z.B. in Newton pro  $\text{cm}^2$ ), durch eine Verlängerung der U-Phase und/oder einer Schwebeladungsphase, bei niedrigerer Spannung, und natürlich durch eine Erhöhung des Ladestroms, auf über 500 Zyklen steigern. Bei guter mechanischen Kompression könnte man eventuell sogar die Betriebstemperatur noch etwas senken, womit der Wasserverlust klein gehalten werden kann. Der Wasserverlust wird bei einer Lebensdauer von über 500 Zyklen voraussichtlich zum kritischen, lebensbegrenzenden Faktor.

7. Dezember 2004

# OPAL

## Optimierung der Antriebsbatterie eines Elektrofahrzeuges



Mit Unterstützung des Bundesamtes für Energie BFE



Karl Meier-Engel©



Projektpartner

## Inhalt

<b>SCHLÜSSELWÖRTER .....</b>	<b>7</b>
<b>1. ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>7</b>
<b>2. GLOSSAR; BEGRIFFSERKLÄRUNGEN .....</b>	<b>8</b>
<b>3. BATTERIE.....</b>	<b>9</b>
<b>4. DIE RUETSCHI-SONDE .....</b>	<b>11</b>
<b>5. DEFINITION DER TESTBEDINGUNGEN .....</b>	<b>11</b>
<b>6. PROJEKTVERLAUF .....</b>	<b>13</b>
<b>7. CHRONOLOGIE DES TESTVERLAUFS .....</b>	<b>15</b>
<b>8. INNENWIDERSTAND RI.....</b>	<b>18</b>
<b>9. GEWICHT DER BATTERIEBLÖCKE.....</b>	<b>19</b>
<b>10. BEURTEILUNG VON DEFECTEN BATTERIEBLÖCKEN.....</b>	<b>25</b>
<b>11. UNTERSCHIEDLICHE BLOCKSPANNUNGEN.....</b>	<b>29</b>
<b>12. BATTERIETEMPERATUR.....</b>	<b>31</b>
<b>13. KAPAZITÄTSABNAHME IN FUNKTION DER ZYKLENZAHL....</b>	<b>32</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS UND LINKS .....</b>	<b>33</b>

### Projektpartner

Projektleitung:

Berner Fachhochschule

Hochschule für Technik und Informatik Biel-Bienne

Fachbereich Automobiltechnik

Karl Meier-Engel, Professor für Elektrotechnik und Elektronik

Quellgasse 21

2501 Biel-Bienne

Andreas Kessi

Projektingenieur

Paul Rüetschi

Ferme "Vers chez Grison"

1421 Grandevent

Daniel Ryhiner

Alpenstrasse 38

2502 Biel/Bienne

☎	032 358 00 55
FAX	032 321 65 00
e-mail	<a href="mailto:karl.meier@hti.bfh.ch">karl.meier@hti.bfh.ch</a>
	<a href="http://www.hti.bfh.ch">http://www.hti.bfh.ch</a>
☎	032 358 00 56
e-mail	<a href="mailto:andreas.kessi@hti.bfh.ch">andreas.kessi@hti.bfh.ch</a>
☎	024 436 13 00
FAX	024 436 22 00
e-mail:	<a href="mailto:paul.ruetschi@bluewin.ch">paul.ruetschi@bluewin.ch</a>
☎	079 250 33 40
☎	032 323 19 18
e-mail	<a href="mailto:d.ryhiner@bluewin.ch">d.ryhiner@bluewin.ch</a>

## Schlüsselwörter

Bleibatterie; Batteriemanagement; Ladeverfahren; Batterieprüfung

### 1. Zusammenfassung

Beim Projekt OPAL geht es um die Optimierung der Lebensdauer von Bleibatterien eines Elektrofahrzeugs. Untersucht wurden VRLA-Batterien wie sie im Elektrofahrzeug SAM verwendet werden.

Eine wichtige Erkenntnis aus diesem Projekt ist, dass jeder einzelne Batterieblock mechanisch abgestützt werden sollte.

Die nutzbare Kapazität einer Serienschaltung wird durch den schwächsten Batterieblock bestimmt.

Für Serienschaltung empfiehlt sich die Entladung bei einer mittleren Endspannung von 10.5 V pro 12 V-Batterieblock zu beenden.

Die Verwendung einer zweiten I-Phase bei der Ladung führt zu einem erhöhten Wasserverlust.

Anstelle der zweiten I-Phase könnte die U-Phase verlängert werden.

Die Ladespannung sollte in Funktion der Batterietemperatur geregelt werden!

Während der ersten I-Phase der Ladung sollte die Temperatur vorzugsweise über 30°C sein.

In Fahrzeugen sollte die Batterie vorzugsweise thermisch isoliert werden. Zur Vermeidung von zu hohen Temperaturen (z.B. > 45°C), sollte eine Ventilation vorgesehen werden.

Zur Überwachung des Batteriezustandes genügt die Messung der Gesamtspannung nicht. Ideal wäre die Überwachung jeder einzelnen Zelle, oder mindestens jedes einzelnen 12 V Blockes.

Weil dies aus Kostengründen kaum realisiert werden kann, empfiehlt sich die Verwendung eines Mittelabgriffs für die Spannungsmessung. Zum Beispiel, für die Batterie des Elektrofahrzeuges SAM, welche aus 14 Batterieblöcken zu je 12 V besteht, könnte die Spannung der ersten 7 Batterieblöcke  $U_{1-7}$  mit derjenigen der nächsten 7 Batterieblöcke  $U_{8-14}$  verglichen werden. Bei einer Differenz von 2 Volt oder mehr kann angenommen werden, dass ein Fehler vorliegt.

Bei allen getesteten Batteriesätzen wurde bestätigt, dass immer ein einzelnen Batterieblock die geringste Kapazität aufweist. Das bedeutet, dass bei einer Serienschaltung die Nennkapazität häufig nicht zur Verfügung steht.

Es ist grundsätzlich ratsam, das gewählte Batteriemanagement auf einer geeigneten Prüfeinrichtung zu testen.

## 2. Glossar; Begriffserklärungen

Antriebsbatterie	Im Text auch mit „Batterie“ bezeichnet. Sie besteht aus 14 in Serie geschalteten Batterieblöcken.
Batterieblock	Einzelne 12V – Batterie
Batteriemanagement	sämtliche Massnahmen zur Beherrschung der Ströme, Spannungen und Temperaturen. In der Regel ist dafür eine elektronische Steuerung erforderlich.
$C_{10}$	Entladekapazität bei 10-stündiger Entladung, bei Raumtemperatur und bis zu einer End-Spannung von 1,67 V pro Zelle [2].
Entladezyklus	Eine einzelne Entladung der Batterie, mit nachfolgender Aufladung.
I-Phase	Zu Beginn der Aufladung wird die Batterie mit einem konstanten Ladestrom aufgeladen, bis eine vorgegebene Spannung erreicht wird. Bei vielen Anwendungen wird nach der U-Phase eine zweite I-Phase angewendet. Damit kann die Ladezeit verkürzt werden.
HTA Biel HTI	Hochschule für Technik und Architektur Biel Seit dem 20. Oktober 2003 gilt die Bezeichnung „Hochschule für Technik und Informatik“
U-Phase:	Nachdem die Spannung einen bestimmten Wert erreicht hat, wird sie konstant gehalten.
Prüfstand F	Batterieprüfstand der HTI für das Simulieren von Fahrzyklen
Prüfstand EPA	Batterieprüfstand der HTI für Standardprüfungen
Ruetschi-Sonde	Eine von Dr. Paul Ruetschi entwickelte Referenzelektrode, mit welcher die Spannung der positiven und negativen Platten individuell gemessen werden kann [6]
VRLA	Valve regulated lead-acid batteries



### 3. Batterie

Die Antriebsbatterie des Elektrofahrzeuges SAM besteht aus 14 in Serie geschalteten 12 V-Batterieblöcken. Es handelt sich um sogenannte „Ventil-gesteuerte Batterien“ (valve regulated batteries). Der Elektrolyt ist in einem Mikrofaser Vlies absorbiert.

#### 3a Hawker Genesis Batterie

Batterietyp:	Hawker Genesis EP Series G12V26Ah10EP [L1]
Lieferant:	Banner Batterien (Schweiz) AG [L2] Dorfstrasse 29 5745 Safenwil
Nennspannung:	12 V
Kapazität C <sub>10</sub> :	26 Ah
Gewicht:	10,1 kg
Abmessungen lhb:	166,75 mm, 175,77 mm, 125,91 mm
Anschlüsse:	Mit einer Schraube M6
Anzahl positive Platten pro Zelle:	5
Anzahl negative Platten pro Zelle:	6

#### 3a Hawker Odyssey Batterie



Nachdem mit der Hawker Genesis Batterien unbefriedigende Resultat erzielt wurden, stellte sich die Frage, ob sich die Hawker Odyssey Batterie besser für die Anwendung in Elektrofahrzeugen eignet.

Batterietyp:	Hawker Odyssey PC925
Lieferant:	EBT ERO-Batterietechnik. GmbH

Nennspannung:	12 V
Kapazität C <sub>10</sub> :	27 Ah
Gewicht:	10,9 kg
Abmessungen lhb:	168,6 mm, 179 mm, 128 mm
Anschlüsse:	Mit einer Schraube M6
Anzahl positive Platten pro Zelle:	4
Anzahl negative Platten pro Zelle:	5

Bild 1: Odyssey-Batterie

#### Testzyklus

##### Entladen:

Endspannung:	10,8 V pro Batterieblock während 9 Zyklen 10,5 V pro Batterieblock beim 10. Zyklus
Entladestrom:	16 A
Max. zulässige Batterietemperatur:	60°C

Laden:

I-Phase: Konstantstrom:  $I = 13 \text{ A}$  bis  $U = 29,4 \text{ V}$  Gesamtspannung  
Messung der Zeit  $t_1$  für die I-Phase  
U-Phase:  $U = 14,7 \text{ V}$  pro Batterieblock (2,45 V/Zelle) während  $t_2 = 1,5 * t_1$   
Zweite I-Phase:  $U = 15,6 \text{ V}$  pro Batterieblock (2,6 V pro Zelle)

### Batterie 260504



Bild 2: Bei der Batterie 260504 wurde zwischen die Batterieblöcke eine Abstützung eingebaut. Die ganze Batterie wird mit einem Spannsatz vorgespannt. Damit soll ein übermässiges Wachsen der positiven Platten verhindert werden.

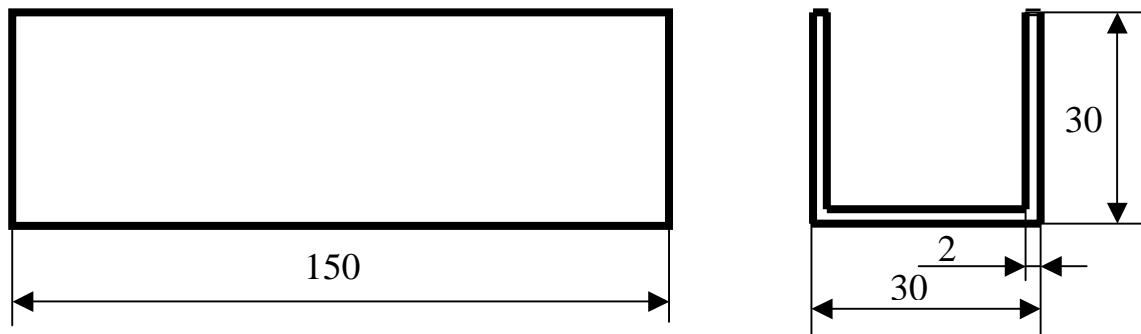


Bild 3: Masszeichnung des Aluminiumprofils welches für die Abstützung der Batterieblöcke eingesetzt wurde.

## 4. Die Ruetschi-Sonde

Eine Referenzelektrode für Batterien [6]

Diese Referenzelektrode wurde von Dr. Paul Ruetschi entwickelt und patentiert. Damit kann die Spannung der positiven oder der negativen Platte gegenüber dieser Elektrode gemessen werden. Beim Projekte OPAL wurde sie eingesetzt, um bei defekten Batterieblöcken die defekte Zelle zu lokalisieren. Damit konnte durch gezieltes Zerlegen der Batterie und einer Analyse des Schadenbildes die Ursache des Defektes gefunden werden.



Bild 4: Die Ruetschi-Sonde ist eine Silber-Silbersulfat Referenzelektrode. Der schlauchförmige Teil der Elektrode (im bild rechts) kann durch das Entlüftungsventil in die Batterie gesteckt werden. In Bezug auf diese Referenzelektrode haben die positiven Platten eine Spannung von etwa +1 Volt, die negativen Platten eine Spannung von etwa -1 Volt.

## 5. Definition der Testbedingungen

a) Laden gemäss dem Manual von HAWKER [3]

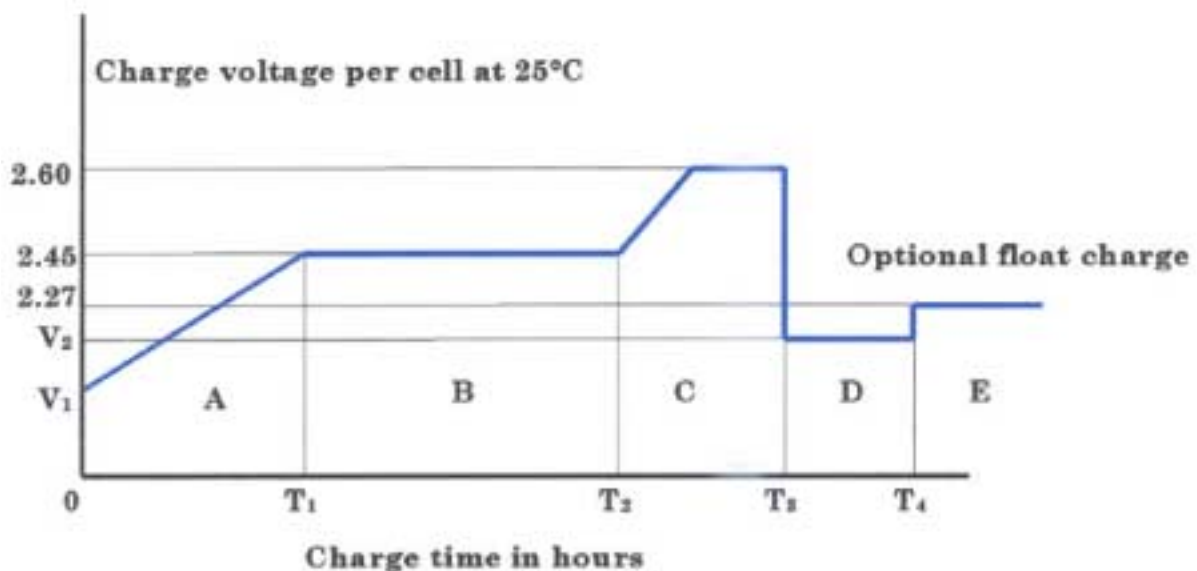


Bild 5: Ladekennlinie von Hawker für Batterien [1].

- A: Ladung mit konstantem Strom (I-Phase). Der Ladestrom beträgt 13 A. Dauer der I-Phase:  $t_1$   
 Umschaltzeitpunkt von I-Phase auf U-Phase: 2.45 Volt pro Zelle (206 Volt für die Batterie)  
 B: Ladung bei konstanter Spannung (U-Phase). Dauer:  $1.5 t_1$   
 C: Ladung bei konstantem Strom (zweite I-Phase) Der Ladestrom beträgt 1 A. Dauer: 1 h  
 Spannungsbegrenzung auf 2.60 Volt pro Zelle  
 D: Ladepause. Dauer: 1 h  
 E: Falls gewünscht unbegrenzte Schwebeladung bei 2.27 Volt pro Zelle.

Maximal zulässige Betriebstemperatur: 60 °C

Insgesamt wurden 3 komplette Batterien (bestehend aus 14 Batterieblöcken zu je 12 V) getestet.

### b) Entladen

Entladestrom: 16 A

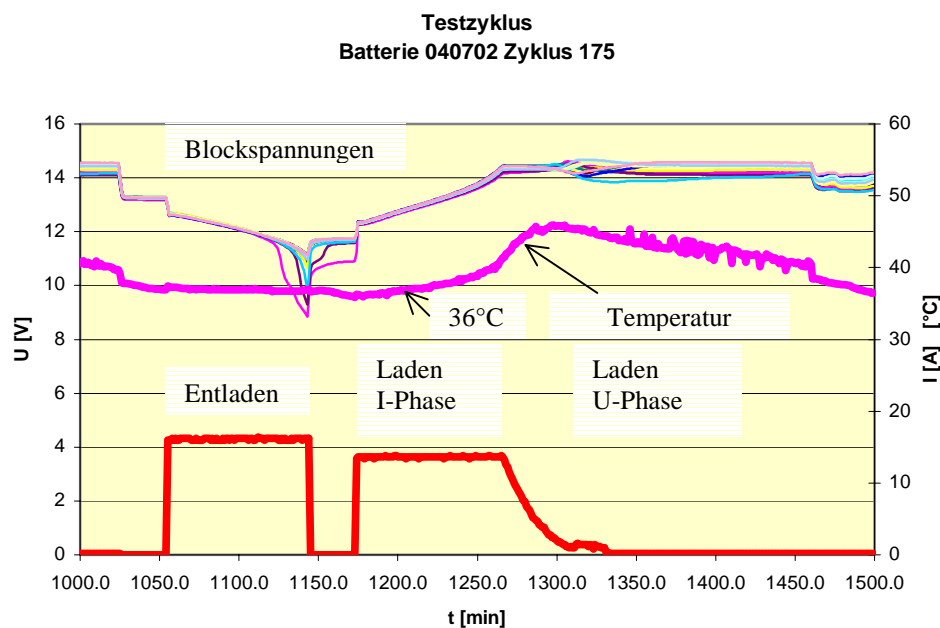
End-Spannung: 136 Volt (9.7 Volt pro Batterieblock oder 1.62 Volt pro Zelle), später 147 Volt (10.5 Volt pro Batterieblock oder 1.75 Volt pro Zelle)

Testbedingungen für die Odyssee Batterie:

Entladestrom 16 A

End-Spannung der Entladung: während 9 Zyklen: 10.8 Volt pro Batterieblock (1.80 Volt pro Zelle)

Beim 10. Zyklus 10.5 Volt pro Batterieblock (1.75 Volt pro Zelle).



*Bild 6: Testzyklus ohne zweite I-Phase für Batterie 040702. Im Gegensatz zum praktischen Einsatz im Fahrzeug wird die Pause zwischen dem Laden und Entladen kurz gehalten. Damit kann rasch eine hohe Zyklenzahl erreicht werden. Zu Beginn der Ladung beträgt die Temperatur 36°C.*

*Beim abgebildeten Zyklus beträgt die Spannung bei der U-Phase 2,38 V/Zelle. Die Dauer der U-Phase betrug  $3,5 \cdot t_1$ .*

*Interessant ist die Feststellung, dass die verlängerte U-Phase zu einer Reduktion der maximalen Temperatur führt.*

## 6. Projektverlauf

Es wurden vier komplette Antriebsbatterien getestet. Die Batteriebezeichnung ist das Datum der Inbetriebnahme.

### Batterie 040702

Zu Beginn des Projektes wurde die Antriebsbatterie des Elektrofahrzeugs SAM im Originalbatteriekasten auf unserem Prüfstand gemessen.

Vor dem Testbeginn und periodisch während des Testverlaufs wurde jeder Batterieblock auf einer Präzisionswaage gewogen. Damit kann der Gewichtsverlust während des Testverlaufs erfasst werden. Der Gewichtsverlust lässt Rückschlüsse auf den Wasserverbrauch zu.

Im weiteren wurde der Innenwiderstand jedes Batterieblocks gemessen. Dazu wurde die Batterie kurzzeitig belastet. Gleichzeitig wurden die Spannungs- und Stromwerte mit einem Speicheroszilloskop gemessen und ausgewertet. Dabei ergaben sich Werte von 5,1 bis 6 mΩ für den Innenwiderstand.

Die Ladung erfolgte bei Testbeginn mit dem Originalladegerät (IUI-Kennlinie). Während des ganzen Tests wurden die Spannungen der einzelnen Batterieblöcke laufend gemessen und aufgezeichnet.

Bereits nach den ersten Zyklen wurde festgestellt, dass die einzelnen Batterieblöcke in der Spannung voneinander abwichen.

Die Gesamtspannung ist kein zuverlässiger Indikator für den Zustand der Batterie. Ideal wäre eine laufende Überwachung jeder einzelnen Zelle. Weil dies aus Kostengründen kaum realisierbar ist, haben wir untersucht, ob die Messung der mittleren Batteriespannung sinnvoll sein könnte. Zu diesem Zweck haben wir bei der Testbatterie welche aus 14 Batterieblöcken besteht, die Spannung der Batterieblöcke 1 bis 7 gemessen und mit der Spannung der Batterieblöcke 8 bis 14 verglichen. Dabei zeigte sich deutlich, dass bei der Entladung ein Spannungsunterschied von über 2 V auf einen defekten Batterieblock hinweist.

Bei den ersten Tests wurde die Entlade-Endspannung auf 136 V festgelegt. Das entspricht einer mittleren Blockspannung von 9,7 V. Dabei sanken einzelne Batterieblöcke bis auf eine Spannung von 9,4 V ab (1,57 V/Zelle). Weil dies unzulässig tief ist, wurde die Entlade-Endspannung auf 147 V erhöht. Das entspricht einer mittleren Spannung von 10,5 V pro Batterieblock (1,75 V/pro Zelle).

Bereits ab Zyklus 44 wurde ein deutlicher Gewichtsverlust festgestellt.

Deshalb wurde auf die zweite I-Phase beim Laden verzichtet. Dazu wurde das Originalladegerät ausgeschaltet und die Ladung wurde direkt vom Prüfstand durchgeführt.

Die Spannung während der U-Phase wurde abgesenkt (von 2,45 – 2,38 V/Zelle) weil die Batterietemperatur Werte von 40 bis 55°C erreichte. Die Dauer der U-Phase wurde dabei sukzessive auf  $3,5 \cdot t_1$  verlängert. Grundsätzlich sollte die Ladespannung der Batterietemperatur angepasst werden!

Die Abstände zwischen den Batterieblöcken wiesen den vom Hersteller verlangten Wert nicht auf.

Nach dem Zyklus 200 wurde die Batterie mit Abständen von 30 mm zwischen den Batterieblöcken, auf einem Holzrost montiert. Die Temperatur sank sofort auf 30 bis 38°C.

Der Test wurde beim Zyklus 241 abgebrochen, bei einer Restkapazität von 20 Ah.

### Batterie 280303

Für diesen Versuch wurde die Batterie in einen Holz-Kasten eingebaut, in welchem die Batterieblöcke auf einem Holz-Rost platziert waren. Der Abstand zwischen den einzelnen Blöcken betrug 30 mm. Zur Lüftung wies der Kasten an beiden Enden Bohrungen auf. Ein Ventilator war in der Mitte des Deckels angeordnet.

Die Spannung der U-Phase betrug 2,38 Volt pro Zelle, für eine Dauer von  $3,5 \cdot t_1$

Die Batterietemperatur lag bei 25 bis 35 °C.

Bei diesem Versuch war die Gewichtsabnahme (Wasserverbrauch) deutlich kleiner als bei der Batterie 040702.

Der Kapazitätsverlust war dagegen wesentlich grösser als bei der Batterie 040702, und die erreichte Zyklenzahl entsprechend kleiner. Ein defekter Batterieblock wurde bei Zyklus 80 ersetzt. Bei der Demontage wurde festgestellt, dass die Gitter im oberen Teil der Platten korrodiert waren.

Der Test wurde bei Zyklus 129 abgebrochen, bei einer Restkapazität von 13 Ah.



*Bild 7: Einbau der Batterie 280303 in eine Holzkiste. Seitliche Bohrungen und ein Ventilator auf der Kiste sorgen für die Kühlung der Batterien.*

### Batterie 160903

Diese Batterie wurde ebenfalls im Holzkasten eingebaut, wie die Batterie 280303.

Der Innenwiderstand der einzelnen Batterieblöcke betrug 4,6 bis 5 m $\Omega$ .

Nach dem Zyklus 168 betrug der Innenwiderstand 5,8 bis 8,5 m $\Omega$ .

Bei Testabbruch stellten wir eine deutliche Bauchung der Blockkasten fest.

Weil sich bereits nach kurzer Zeit ein deutlicher Kapazitätsverlust bemerkbar machte, wurde vermutet, dass die Ladung mit der einfachen IU-Kennlinie ungenügend war.

Deshalb wurde die zweite I-Phase nach dem Zyklus 43 wieder eingeführt. Die Maximalspannung wurde dabei auf 218 V begrenzt. Das entspricht der Vorschrift von Hawker [1], einer Zellenspannung von 2,6 V. Als Folge dieser Massnahme stieg die Kapazität von 16 auf 21 Ah. Das hatte eine momentane Zunahme der Kapazität zur Folge (Siehe Bild 23).

Weil der Strom in der zweiten I-Phase sehr klein war (<1 A), wurde nach dem Zyklus 79 die Maximalspannung der zweiten I-Phase auf 2,68 V pro Zelle erhöht. Danach nahm die Kapazität nicht mehr zu, dafür stieg der Gewichtsverlust = Wasserverbrauch deutlich an.

Nach Zyklus 149 wurde der Ventilator nur während der Entladung eingeschaltet. Dadurch erhöhte sich die Temperatur beim Laden. Das hatte eine Zunahme der Kapazität zur Folge.

Nach Zyklus 159 wurde die Spannungslimite der zweiten I-Phase wieder auf 2.60 Volt pro Zelle reduziert.

Diese Resultate decken sich mit Beobachtungen von SAM-Benutzern. Wenn sich die Antriebsbatterie vor der Ladung auf Raumtemperatur abkühlte, stellte man einen deutlichen Kapazitätsverlust fest.

Beim Zerlegen eines solchen Batterieblockes zeigte sich, dass die positive Platte sulfatiert war.

Aus der Elektrochemie ist bekannt, dass die Abscheidung von Bleidioxid beim Aufladen bei höherer Temperatur besser funktioniert. Bei tiefen Temperaturen wird die Haftung des Bleidioxids schlechter. Das hat zur Folge dass ein Teil der aktiven Masse nicht mehr am folgenden Entladeprozess teilnimmt.

Bleibatterien sollten auf Grund dieser Ueberlegungen möglichst bei einer Anfangstemperatur von mindestens 35° bis etwa 45° aufgeladen werden. Für die Praxis empfiehlt sich eine Wärmeisolation.

Gleichzeitig sollten sie mit einem Kühlsystem ausgestattet sein, welches im Fahrbetrieb Temperaturen über 45°C verhindert.



### Batterie 260504

Für diesen Versuch wurde die Hawker Odyssey Batterie gewählt. Diese ist mit einem Gewicht von 10,9 kg pro Batterieblock 800 g schwerer als ein Block der Genesis-Batterie.

Die Abstände von 30 mm zwischen den Batterieblöcken werden mit einem Aluminiumprofil gewährleistet. Die ganze Batterie wird mit einem Spanset vorgespannt.

Im Verlauf des Zyklentests wurde festgestellt, dass zuerst der Batterieblock Nr. 1, danach die Nr. 12, wieder die Nr. 1 und die Nr. 7 die schwächste Kapazität aufweisen.

Beim Zyklus Nr. 322 wurde der Batterieblock Nr. 7 ersetzt. Dank der Abstützung der Seitenwände war die Bauchung des Gehäuses relativ gering. Die Zunahme des Breitenmasses betrug etwa 3,5 mm.

Beim Zerlegen der Batterie zeigte sich, dass die aktive Masse der positiven Platte trotz der Vorspannung über das Bleigitter wachsen konnte.

Es ist daher anzunehmen, dass die Zyklenzahl mit einer grösseren Vorspannung und einem reduzierten Wasserverbrauch noch weiter gesteigert werden kann.

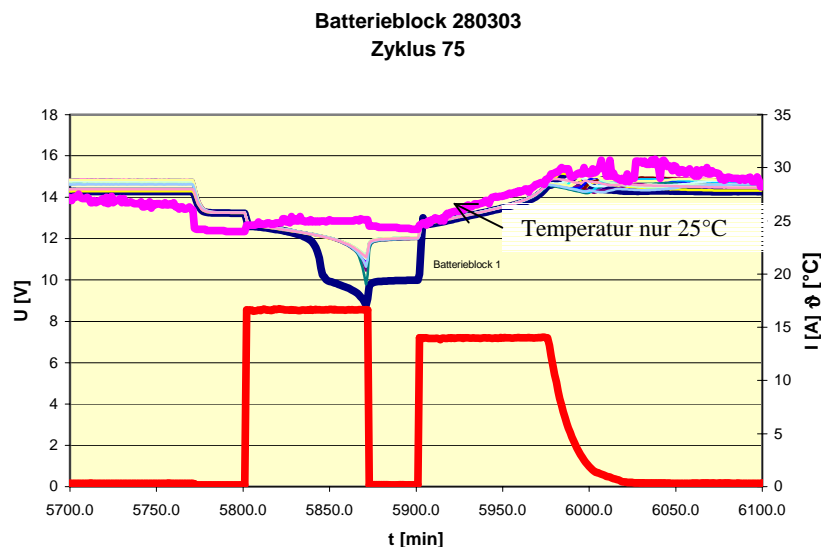
Nach 403 Zyklen wurde der Test abgebrochen. Bei dieser Zyklenzahl fiel beim Block 12 eine Zelle infolge Kurzschluss aus.

## 7. Chronologie des Testverlaufs

Spannung, Strom und Temperatur wurden während des gesamten Testverlaufs registriert.

Messinterval: 1 Minute. Für jeden Zyklus lassen sich deshalb die Daten abrufen und graphisch darstellen.

Beispiele sind Bilder 6, 8 und 9.



*Bild 8: Die obere violette Kennlinie zeigt den Temperaturverlauf. Die übrigen Kennlinien zeigen den Spannungsverlauf der 14 Batterieblöcke an. Bei der Entladung ist deutlich zu erkennen, dass die Spannung (blaue Linie) des Batterieblock 1 sehr früh zusammenbricht. Bei Beginn der Ladung beträgt die Temperatur nur 25°C.*

*Die untere rote Kennlinie zeigt zuerst den Entladestrom mit 16 A und anschliessend die Ladung mit 13 A.*

### Batterie 040702

Datum	Zyklenzahl	Aktivität
10.7.02	0	Feststellen der Masse (Gewicht)
15.7.02	0	Feststellen des Innenwiderstandes
	1	Inbetriebnahme des Zyklentest Entladeendspannung 136 V, Ladespannung 2,45 V pro Zelle
29.7.02	24	Feststellen der Masse (Gewicht) und des Gewichtsverlustes
5.8.02	44	Feststellen der Masse (Gewicht) und des Gewichtsverlustes Wechsel vom CREE-Ladegerät auf Ladung durch Prüfstand; Ladung ohne zweite I-Phase. End Spannung der Entladung auf 147 V (10,5 V pro Block, 1,75 V pro Zelle) erhöht.
12.8.02	57	Zeit für U-Phase verlängert auf $2,8 \cdot t_1$
19.8.02		Spannung der U-Phase abgesenkt auf 2,4 V pro Zelle
25.8.02	65	Feststellen der Masse (Gewicht) und des Gewichtsverlustes
27.8.02	89	Feststellen der Masse (Gewicht) und des Gewichtsverlustes
28.8.02	92	Spannung der U-Phase abgesenkt auf 2,37 V pro Zelle
2.9.02		Minuspul bei Batterieblock 13 oxidiert
		Spannung der U-Phase erhöht auf 2,38 V pro Zelle
3.9.02	106	Feststellen der Masse (Gewicht) und des Gewichtsverlustes
4.9.02		EPA bleibt in U-Phase blockiert während etwa 12 h
5.9.02		Batterie 2 mit 12 V-Ladegerät einzeln nachladen
10.9.02	128	Testunterbruch infolge Ausfall des Batterieblocks 9
12.9.02	128	Feststellen der Masse (Gewicht) und des Gewichtsverlustes
2.10.02	128	<u>Batterieblock Nr. 9 ersetzt durch 9a</u>
	129	Laden mit LEAB-Ladegerät zum Feststellen der Charakteristik
9.10.02	131	Wechsel vom LEAB-Ladegerät auf Ladung durch Prüfstand
15.10.02	150	Feststellen der Masse (Gewicht) und des Gewichtsverlustes
15.10.02	150	U-Phase verlängert auf $3,5 \cdot t_1$
20.11.02	200	<u>Batterieblock Nr. 3 ersetzen durch 3a</u>
7.1.03	220	Versuch mit grösserem Abstand zwischen den einzelnen Blöcken (etwa 30 mm) ergibt tiefere Batterietemperatur von etwa 30 bis 35°C
15.1.03	241	Nachfüllen von Wasser in die Zellen ergibt keine Verbesserung der Kapazität

### Batterie 280303

Für diesen Test wurde die Batterie in einen geschlossenen Holzkasten eingebaut. Zwischen den einzelnen Batterieblöcken wurde ein Abstand von 30 mm eingehalten. Jeder Block war also von einem Luftmantel umgeben. Ein Ventilator sorgte für ständige Kühlung der Batterie. Die Spannung während der U-Phase betrug 2.38 Volt pro Zelle.

Die Dauer der U-Phase betrug  $3,5 \cdot t_1$ .

Datum	Zyklenzahl	Aktivität
28.3.03	0	Feststellen der Masse (Gewicht)
31.3.03	0	Inbetriebnahme
8.4.03	18	Messen des Gewichtes und des Innenwiderstandes
17.4.03	40	Messen des Gewichtes und Festhalten der Daten
24.4.03	61	Messen des Gewichtes und Festhalten der Daten
30.4.03	80	Messen des Gewichtes und Festhalten der Daten Batterieblock 1 ersetzt
7.5.03	102	Messen des Gewichtes und Festhalten der Daten
13.5.03	121	Messen des Gewichtes und Festhalten der Daten
20.5.03	139	Messen des Gewichtes und Festhalten der Daten; Testabbruch



### Batterie 160903; Zyklus 148

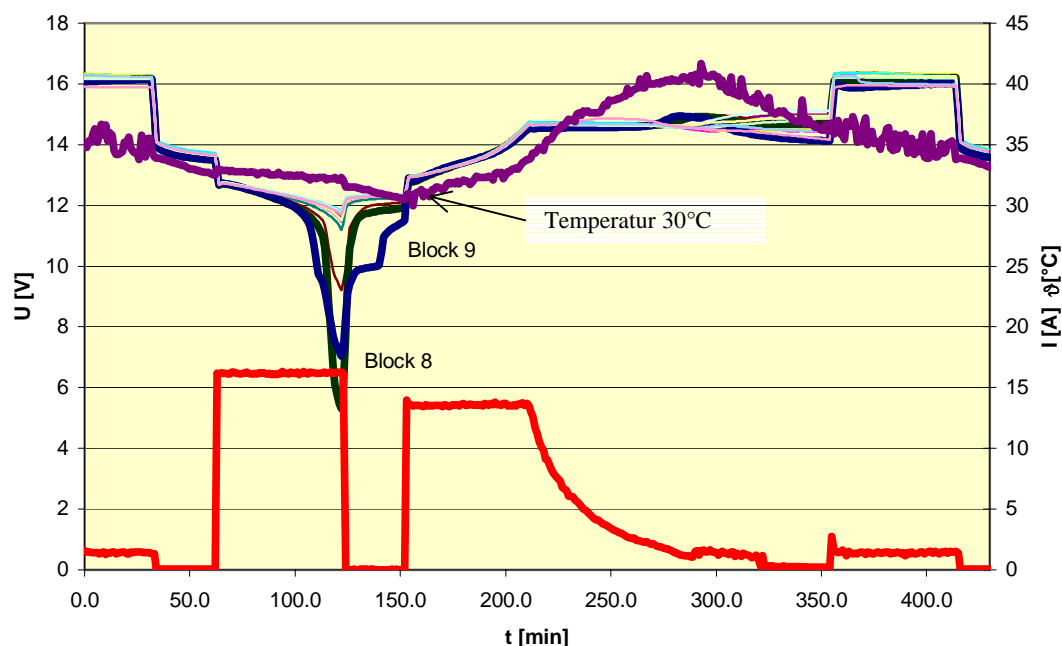


Bild 9: Die Batterie 160903 hat bei Zyklus 148 noch eine Kapazität von 16 Ah. Zwei Batterieblöcke 8 und 9 sind defekt. Bei Beginn der Ladung beträgt die Temperatur nur 30°C.

### Batterie 160903

Bei diesem Test wurde die Batterie in einen geschlossenen Holzkasten eingebaut, so dass jede Batterie von einem Luftmantel umgeben ist. Zudem sorgt ein Ventilator für eine ständige Kühlung der Batterie. Die Spannung während der U-Phase beträgt 2,38 V/Zelle. Die Dauer der U-Phase beträgt  $3,5 \cdot t_1$ .

Datum	Zyklenzahl	Aktivität
16.09.03	0	Feststellen der Masse (Gewicht) und der Abmessung sowie des Innenwiderstandes
24.9.03	0	Inbetriebnahme des Zyklentest
10.10.03	25	Messen des Gewichtes und Festhalten der Daten
22.10.03	43	Messen des Gewichtes und Festhalten der Daten
27.10.03		Ladekennlinie mit <u>zweiter I-Phase ergänzt</u> $U_{\max} = 2,6$ V pro Zelle; Dauer der U-Phase $2,5 \cdot t_1$
31.10.03	72	Messen des Gewichtes und Festhalten der Daten
5.11.03	79	Messen des Gewichtes und Festhalten der Daten
6.11.03		<u>Erhöhung der Spannung der zweiten I- Phase</u> von 2,6 auf 2,68V pro Zelle
18.11.03	125	Messen des Gewichtes und Festhalten der Daten
26.11.03	149	Messen des Gewichtes und Festhalten der Daten Ventilatorsteuerung einrichten: beim Laden nicht Einschalten Einbau eines Thermostat: Ventilator steuern <b>beim Entladen</b>
2.12.03	159	Spannung während I-Phase auf 2,6 V pro Zelle reduziert
5.12.03		Der Einbauort des Thermostats ist ungünstig: die Temperatur steigt über 50°C an
9.12.03	168	Messen des Gewichtes, der Innenwiderstandes und Festhalten der Daten
	177	Thermostat steuert den Ventilator während U-Phase, zweiter I-Phase Pause und Entladen
17.12.04	187	Messen des Gewichtes und Festhalten der Daten
29.12.03	207	Messen des Gewichtes und Festhalten der Daten
13.1.04	223	Messen des Gewichtes und Festhalten der Daten
20.1.04	249	Messen des Gewichtes und Festhalten der Daten
26.1.04	270	Messen des Gewichtes und Festhalten der Daten
2.2.04	300	Messen des Gewichtes und Festhalten der Daten

9.2.04	319	Messen des Gewichtes und Festhalten der Daten
17.2.04	339	Messen des Gewichtes und Festhalten der Daten
21.2.04	358	Messen des Gewichtes und Festhalten der Daten Testabbruch

### Batterie 260504

Für diese Test wurde die Ladekennlinie von Hawker mit der zweiten I-Phase gewählt!

Datum	Zyklenzahl	Aktivität
26.05.04	0	Wägen der Batterieblöcke
	0	Prüfstand einrichten
2.6.04	0	Messen von $R_i$
15.6.04	20	Wägen, Messen von $U_0$ , und Messen von $R_i$
13.6.04	41	Wägen, Messen von $U_0$ , und Messen von $R_i$
1.7.04	61	Wägen, Messen von $U_0$ , und Messen von $R_i$
9.7.04	79	Wägen, Messen von $U_0$
19.7.04	100	Wägen, Messen von $U_0$
27.7.04	120	Wägen, Messen von $U_0$ , und Messen von $R_i$
5.8.04	141	Wägen, Messen von $U_0$
1.8.04	159	Wägen, Messen von $U_0$
11.8.04	159	Wägen, Messen von $U_0$
21.8.04	182	Wägen, Messen von $U_0$
26.8.04	203	Wägen, Messen von $U_0$ , und Messen von $R_i$
7.9.04	222	Wägen, Messen von $U_0$
14.9.04	242	Wägen, Messen von $U_0$
24.9.04	270	Wägen, Messen von $U_0$
30.9.04	284	Wägen, Messen von $U_0$
8.10.04	304	Wägen, Messen von $U_0$ , und Messen von $R_i$
14.10.04	322	Wägen, Messen von $U_0$ ; Batterieblock Nr. 7 ersetzt
21.10.04	342	Wägen, Messen von $U_0$
27.10.04	362	Wägen, Messen von $U_0$
3.11.04	382	Wägen, Messen von $U_0$
10.11.04	403	Wägen, Messen von $U_0$ , und Messen von $R_i$ , Abbruch des Tests

## 8. Innenwiderstand $R_i$

Innenwiderstand  $R_i$  vor dem Zyklentest[m $\Omega$ ]

Batterie 040702 bei Testbeginn

Datum	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
15.7.02	5	5,3	6	5,2	5	5	5	5,2	5,8	5,3	5	5,2	5,1	5,4

Batterie 280303 bei Testbeginn

Datum	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
8.4.03	5,2	5,2	4,9	4,9	4,9	4,9	5,0	4,8	4,9	5,2	5,3	4,8	4,8	5,1

30.4.03 Ersatzbatterie 300403-1  $R_i = 4,8$  mOhm

Batterie 160903 bei Testbeginn

Datum	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
16.9.03	5	4,9	4,8	5	4,9	4,8	5	5	4,8	5	4,9	4,9	5	4,6

Batterie 160903 bei Zyklus 168

Datum	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
10.12.03	5,8	6,1	5,8	5,9	6,4	7,3	6,3	8,5	7	6,5	6,5	6,2	6,3	5,8

Batterie 160903 bei Zyklus 358

Datum	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
10.12.03	9	9	9	10	9	16	8,5	6,8	7,5	8,8	8,5	9	8,5	7,5

Ersatzbatterieblock 160903-8a: 5 mΩ  
Ersatzbatterieblock 160903-9a: 5,1 mΩ

### Innenwiderstand

Datum	Zykl	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2.6.04	0	5,4	5,0	5,0	5,0	5,1	5,1	5,0	6,5	5,0	4,9	5,1	5,0	4,9	5,0
15.6.04	20	4,1	4,5	4,3	4,5	4,3	4,2	4,5	4,5	4,3	4,0	4,7	4,2	4,2	4,2
23.6.04	41	4,8	4,2	4,2	4,8	4,2	5,2	4,3	4,2	4,6	4,2	4,4	4,3	4,8	4,4
1.7.04	61	4,5	4,4	4,2	4,8	4,3	4,5	4,5	4,2	4,0	4,0	4,3	4,5	4,2	4,5
27.7.04	120	5,2	4,6	4,5	4,8	4,5	4,5	4,7	4,7	4,8	4,3	4,5	4,6	4,5	4,5
26.8.04	202	5,3	4,7	4,8	5,1	4,9	4,8	4,9	4,9	5,0	4,8	4,9	4,9	4,9	5,0
8.10.04	304	5,8	5,3	5,2	5,5	5,2	5,2	5,5	5,5	5,3	5,1	5,2	5,3	5,0	5,2
11.11.04	403	5,8	5,5	5,8	5,5	6,0	6,0	5,9	6,0	10,2	5,7	5,6	5,8	5,5	5,5

## 9. Gewicht der Batterieblöcke

Gewicht [g]

Batterie 040702 Fabrikationsdatum 2001

Datum	Zyklus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
10.7.02	0	9869	9879	9856	9964	9963	10080	10099	9956	9730	10085	9882	9986	9870	9852
29.7.02	24	9864	9874	9853	9958	9957	10074	10093	9950	9726	10079	9876	9980	9865	9847
		-5	-5	-3	-6	-6	-6	-6	-6	-4	-6	-6	-6	-5	-5
5.8.02	44	9858	9869	9849	9953	9952	10068	10089	9946	9722	10074	9870	9975	9860	9842
		-11	-10	-7	-11	-11	-12	-10	-10	-8	-11	-12	-11	-10	-10
15.8.02	65	9850	9856	9843	9944	9944	10058	10082	9940	9718	10065	9861	9968	9853	9835
		-19	-23	-13	-20	-19	-22	-17	-16	-12	-20	-21	-18	-17	-17
27.8.02	89	9846	9853	9842	9941	9940	10055	10079	9937	9716	10061	9856	9965	9849	9832
		-23	-26	-14	-23	-23	-25	-20	-19	-14	-24	-26	-21	-21	-20
3.9.02	106	9846	9852	9840	9940	9939	10054	10078	9936	9715	10061	9856	9965	9848	9831
		-23	-27	-16	-24	-24	-26	-21	-20	-15	-24	-26	-21	-22	-21
12.9.02	128	9845	9852	9840	9939	9938	10053	10078	9935	9714	10060	9855	9965	9846	9830
		-24	-27	-16	-25	-25	-27	-21	-21	-16	-25	-27	-21	-24	-22
2.10.02										9987*					
15.10.02	150	9844	9854	9838	9937	9936	10052	10076	9934	9980	10059	9854	9964	9844	9829
		-25	-25	-18	-27	-27	-28	-23	-22	-7	-26	-28	-22	-26	-23
29.10.02	175	9842	9853	9837	9936	9934	10052	10075	9933	9978	10058	9854	9963	9842	9828
		-27	-26	-19	-28	-29	-28	-24	-23	-9	-27	-28	-23	-28	-24
8.11.02	200	9841	9851	9835	9935	9933	10051	10074	9932	9977	10057	9853	9962	9841	9827
		-28	-28	-21	-29	-30	-29	-25	-24	-10	-28	-29	-24	-29	-25
28.11.02				9880+											
16.12.02	220	9841	9854	9864	9934	9933	10050	10073	9932	9976	10057	9853	9961	9840	9827
		-28	-25	-16	-30	-30	-30	-26	-24	-11	-28	-29	-25	-30	-25
7.1.03	221	9874	9890			9966									
15.1.03	241	9872	9888	9863	9933	9965	10050	10073	9931	9975	10056	9853	9961	9840	9826
		-2**	-2**			-1**									

\* Batterie 9 ersetzt

+Batterie 3 ersetzt

\*\*Wasser nachgefüllt

Der Gewichtsverlust erklärt sich durch Wasserverlust (Verdampfen, Elektrolyse).

Nach dem Zyklus 200 wurde der Zwischenraum zwischen den Blöcken auf 30 mm erhöht und das Temperaturmaximum bei der Ladung sank auf 30 bis 35°C.

Nach dem Zyklus 220 wurde Wasser in die Blöcke 1, 2 und 5 nachgefüllt. Dabei sollte geprüft werden, ob die Kapazität durch nachfüllen von Wasser bei einer trockenen Batterie gesteigert werden kann.

Das Erniedrigung der Ladespannung führte zu einer Verminderung des Wasserverbrauchs, aber auch zu niedrigeren Temperaturen

Gewicht [g]  
Batterie 280303 (300403-1)

Datum	Zyklus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
28.3.03	0	9694	9705	9737	9743	9689	9748	9764	9717	9708	9718	9752	9725	9780	9741
8.84.03	18	9692	9703	9735	9741	9688	9746	9762	9715	9707	9716	9750	9723	9778	9739
		-2	-2	-2	-2	-1	-2	-2	-2	-1	-2	-2	-2	-2	-2
17.4.03	40	9691	9702	9734	9740	9687	9745	9761	9714	9706	9715	9750	9722	9777	9738
		-3	-3	-3	-3	-2	-3	-3	-3	-2	-3	-2	-3	-3	-3
24.4.03	61	9691	9702	9733	9740	9686	9745	9761	9714	9705	9715	9749	9722	9776	9738
		-3	-3	-4	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-4	-3
30.4.03	80	9690	9702	9732	9739	9686	9744	9760	9713	9705	9714	9749	9721	9776	9737
		-4	-3	-5	-4	-3	-4	-4	-4	-3	-4	-3	-4	-4	-4
		9777													
7.5.03	102	9775	9701	9732	9739	9686	9744	9760	9713	9704	9714	9748	9721	9776	9737
		-2	-4	-5	-4	-3	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
13.5.05	121	9774	9701	9732	9739	9685	9744	9760	9713	9704	9714	9748	9721	9776	9737
		-3	-4	-5	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
20.5.03	139	9773	9701	9732	9738	9685	9743	9759	9712	9704	9713	9748	9720	9775	9736
		-4	-4	-5	-5	-4	-5	-5	-5	-4	-5	-4	-5	-5	-5

Waage: METTLER-TOLEDO SB 32001 DR  
Wiederholbarkeit:  $\pm 0,5$  g [5]  
Kalibrierung: jährlich durch Lieferfirma

Gewicht [g]  
Batterie 160903 Fabrikationsdatum 03

Datum	Zyklus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
16.9.03	0	9744	9793	9802	9857	9753	9771	9794	9846	9822	9865	9854	9822	9862	9919
10.10.03	25	9742	9791	9800	9855	9751	9769	9792	9845	9822	9863	9852	9820	9860	9917
		-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-1	0	-2	-2	-2	-2	-2
22.10.03	43	9742	9790	9800	9854	9751	9769	9791	9844	9822	9863	9851	9819	9859	9917
		-2	-3	-2	-3	-2	-2	-3	-2	0	-2	-3	-3	-3	-2
31.10.03	72	9740	9789	9798	9853	9749	9768	9789	9843	9821	9861	9850	9818	9858	9918
		-4	-4	-4	-4	-4	-3	-5	-3	-1	-4	-4	-4	-4	-1
5.11.03	79	9739	9788	9797	9852	9748	9766	9788	9841	9820	9860	9848	9816	9856	9918
		-5	-5	-5	-5	-5	-5	-6	-5	-2	-5	-6	-6	-6	-1
18.11.03	125	9736	9784	9793	9848	9744	9762	9783	9835	9813	9856	9845	9812	9853	9914
		-8	-9	-9	-9	-9	-9	-11	-11	-9	-9	-9	-10	-9	-5
26.11.03	149	9732	9781	9790	9845	9739	9757	9778	9831	9809	9852	9841	9808	9849	9910
		-12	-12	-12	-12	-14	-14	-16	-15	-13	-13	-13	-14	-13	-9
9.12.03	168	9720	9767	9777	9830	9726	9740	9765	9818	9790	9839	9829	9794	9837	9892
		-24	-26	-25	-27	-27	-31	-29	-28	-32	-26	-25	-28	-25	-27
									9872*	9776*					
17.12.03	187	9713	9760	9771	9824	9719	9728	9758	9849	9754	9833	9823	9788	9831	9886
		-31	-33	-31	-33	-34	-43	-36	-23	-22	-32	-31	-34	-31	-33
29.12.03	207	9709	9757	9767	9821	9715	9725	9754	9845	9751	9830	9819	9786	9827	9884
		-35	-36	-35	-36	-38	-46	-40	-27	-25	-35	-35	-36	-35	-35
13.1.04	223	9705	9755	9765	9817	9713	9728	9751	9843	9748	9826	9816	9780	9825	9883
		-39	-38	-37	-40	-40	-43	-43	-29	-28	-39	-38	-42	-37	-36
20.1.04	249	9698	9749	9758	9810	9706	9723	9745	9839	9743	9820	9810	9774	9819	9878
		-46	-44	-44	-47	-47	-48	-49	-33	-33	-45	-44	-48	-43	-41
26.1.04	270	9694	9745	9755	9805	9702	9720	9742	9835	9739	9816	9806	9770	9816	9875

		-50	-48	-47	-52	-51	-51	-52	-37	-37	-49	-48	-52	-46	-44
2.2.04	300	9687	9739	9748	9796	9694	9713	9735	9828	9731	9808	9799	9763	9808	9869
		-57	-54	-54	-61	-59	-58	-59	-44	-45	-57	-55	-59	-54	-50
9.2.04	319	9683	9736	9746	9794	9691	9711	9733	9825	9728	9806	9796	9761	9805	9866
		-61	-57	-56	-63	-62	-60	-61	-47	-48	-59	-58	-61	-57	-53
17.2.04	339	9679	9733	9743	9790	9688	9709	9729	9822	9725	9802	9792	9758	9803	9865
		-65	-60	-59	-67	-65	-62	-65	-50	-51	-63	-62	-64	-59	-54
21.2.04	358	9675	9730	9739	9785	9683	9705	9726	9818	9720	9798	9788	9754	9800	9862
		-69	-63	-63	-72	-70	-66	-68	-54	-56	-67	-66	-68	-62	-57

\* Batterieblock 8 und 9 ersetzt

### Batterie 260504

Dat. 04	Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
26.5.	0	10584	10572	10599	10533	10616	10542	10550	10610	10602	10608	10581	10593	10581	10577
15.6.	20	10580	10568	10596	10530	10612	10539	10547	10606	10598	10604	10578	10588	10578	10574
		-4	-4	-3	-3	-4	-3	-3	-4	-4	-4	-3	-5	-3	-3
23.6.	41	10578	10566	10594	10528	10610	10537	10545	10605	10595	10601	10577	10586	10576	10573
		-6	-6	-5	-5	-6	-5	-5	-5	-7	-7	-6	-7	-5	-4
1.7.	61	10576	10563	10561	10526	10608	10535	10542	10602	10592	10598	10574	10583	10573	10571
		-8	-9	-8	-7	-8	-7	-8	-8	-10	-10	-9	-10	-8	-6
9.7.	79	10574	10561	10589	10523	10605	10532	10539	10600	10589	10595	10572	10580	10570	10569
		-10	-11	-10	-10	-11	-10	-11	-10	-13	-13	-11	-13	-11	-8
19.7.	100	10571	10557	10585	10520	10602	10529	10535	10597	10586	10591	10569	10577	10567	10566
		-13	-15	-14	-13	-14	-13	-15	-13	-16	-17	-14	-16	-14	-11
27.7.	120	10568	10553	10582	10516	10598	10525	10531	10594	10581	10587	10565	10574	10563	10563
		-16	-19	-17	-17	-18	-17	-19	-16	-21	-21	-18	-19	-18	-14
5.8.	141	10565	10549	10579	10514	10595	10522	10527	10591	10577	10583	10561	10571	10560	10560
		-19	-23	-20	-19	-21	-20	-23	-19	-25	-25	-22	-22	-21	-17
11.8.	159	10559	10541	10571	10505	10587	10515	10520	10584	10571	10576	10554	10565	10552	10553
		-25	-31	-28	-28	-29	-27	-30	-27	-31	-32	-29	-28	-29	-24
21.8.	182	10556	10537	10566	10500	10583	10511	10515	10580	10567	10572	10549	10561	10548	10549
		-28	-35	-33	-33	-33	-31	-35	-31	-35	-36	-34	-32	-33	-28
26.8.	203	10553	10533	10563	10496	10579	10506	10510	10577	10563	10568	10546	10558	10544	10546
		-31	-39	-36	-37	-37	-36	-40	-34	-39	-40	-37	-35	-37	-31
7.9.	222	10550	10529	10560	10492	10575	10502	10505	10573	10559	10564	10542	10554	10540	10543
		-34	-43	-39	-41	-41	-40	-45	-38	-43	-44	-41	-39	-41	-34
14.9.	242	10547	10526	10556	10489	10572	10500	10503	10570	10557	10561	10539	10552	10537	10539
		-37	-46	-43	-44	-44	-42	-47	-41	-45	-47	-44	-41	-44	-38
24.9.	270	10544	10521	10551	10484	10568	10495	10499	10566	10554	10556	10535	10549	10533	10535
		-40	-51	-48	-49	-48	-47	-51	-45	-48	-52	-48	-44	-48	-42
30.9.	284	10543	10520	10550	10483	10566	10493	10497	10564	10552	10555	10533	10547	10532	10533
		-41	-52	-49	-50	-50	-49	-53	-47	-50	-53	-50	-46	-49	-44
8.10	304	10540	10517	10547	10480	10563	10490	10494	10561	10550	10552	10531	10545	10529	10531
		-44	-55	-52	-53	-53	-52	-56	-50	-52	-55	-52	-48	-52	-46
14.10.	322	10538	10515	10545	10477	10561	10487	10492	10559	10548	10549	10528	10543	10527	10529
		-46	-57	-54	-56	-55	-55	-58	-52	-54	-58	-55	-50	-54	-48
14.10.*								10543							
21.10	342	10536	13511	13542	10474	10557	10484	10522	10555	10545	10546	10525	10540	10523	10526
		-48	-61	-57	-59	-59	-58	-21	-56	-57	-61	-58	-53	-58	-51
27.10	362	10533	10509	10539	10470	10555	10481	10517	10552	10542	10542	10523	10538	10520	10523
		-51	-63	-60	-63	-61	-59	-26	-59	-60	-65	-60	-55	-61	-54
3.11.	382	10530	10505	10536	10468	10552	10477	10512	10549	10540	10539	10520	10535	10517	10520
		-54	-67	-63	-65	-64	-63	-31	-62	-62	-68	-63	-58	-64	-57
10.11	403	10528	10502	10534	10464	10549	10474	10508	10546	10537	10536	10517	10533	10514	10517
		-56	-70	-65	-69	-67	-66	-35	-65	-65	-71	-66	-60	-67	-60

\* Batterieblock Nr. 7 ersetzt

Aus den periodischen Gewichtsmessungen konnten die Wasserverluste ermittelt werden.

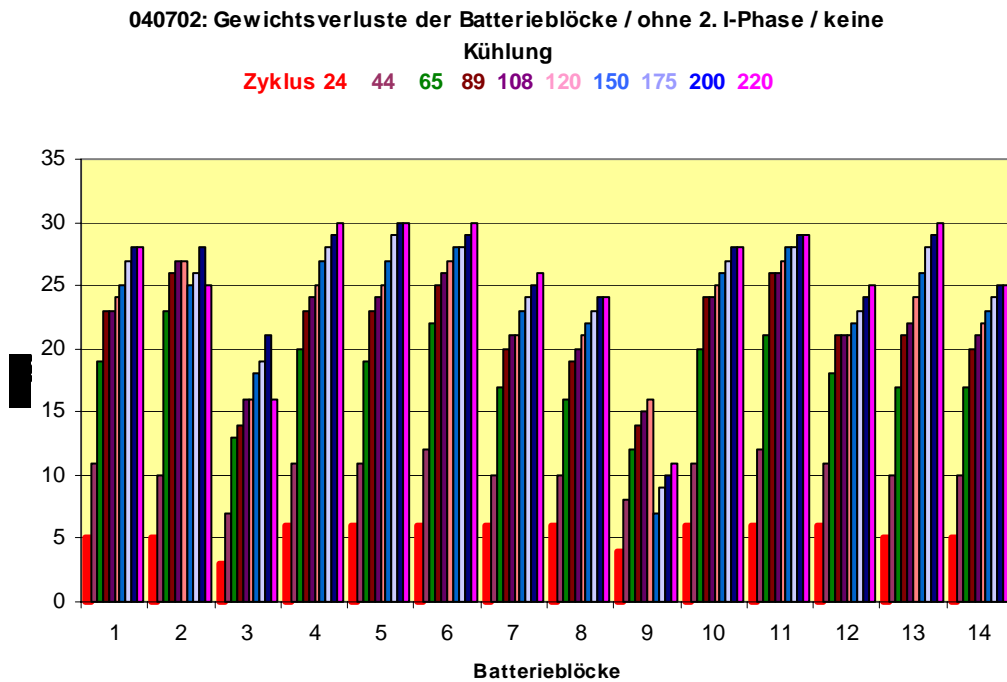


Bild 10: Das Gewicht jedes Batterieblockes wurde in Abständen von 20 – 25 Zyklen gemessen. Die Gewichtsreduktion widerspiegelt den Wasserverbrauch.

### Batterie 280303

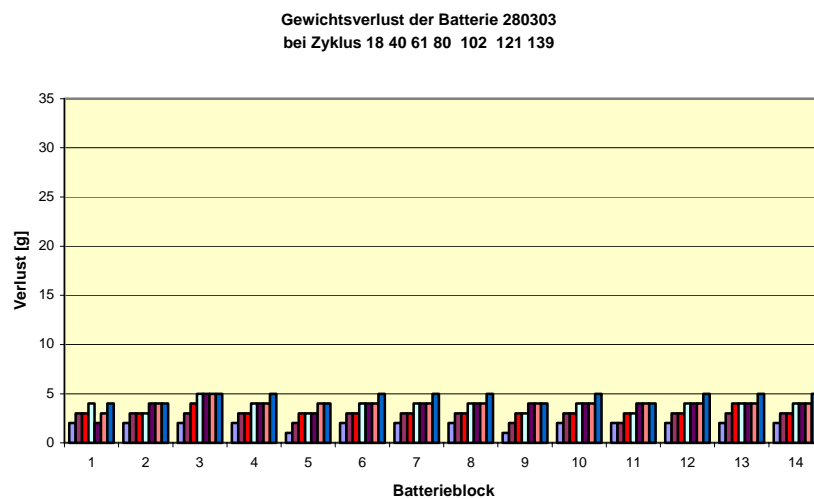


Bild 11

Batterie 160903

**160903: Gewichtsverlust / Wasserverbrauch / mit 2. I-Phase / mit Kühlung**

bei Zyklus 25, 43, 72, 79, 125, 149, 168, 187, 207, 223, 249, 270, 300, 319, 339, 358

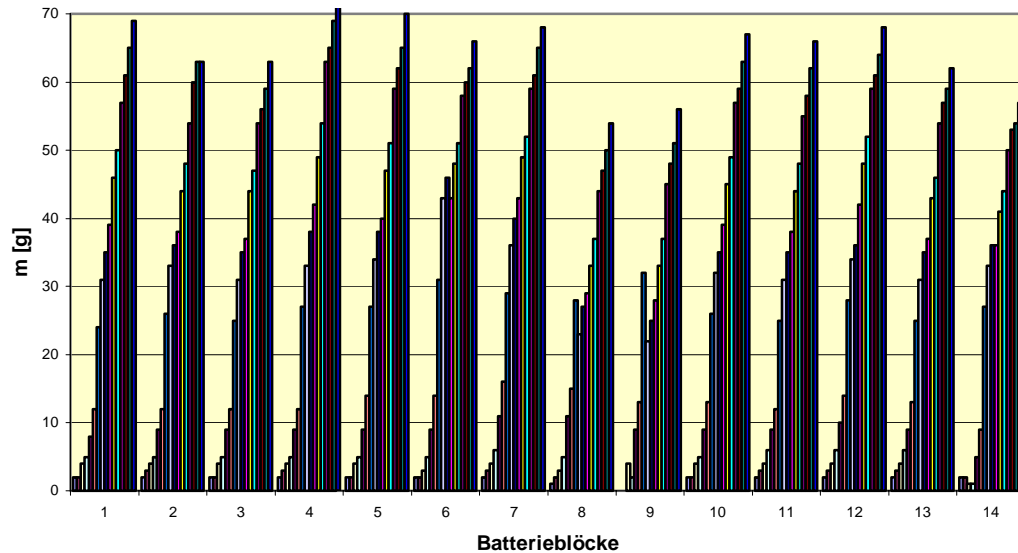


Bild 12: Mit der Erhöhung der Maximalspannung der zweiten I-Phase nimmt der Wasserverbrauch deutlich zu. Von Zyklus 149 bis 168 wurde die Temperatur der Batterie auf über 50°C erhöht. Dies hatte sofort einen massiven Anstieg des Wasserverbrauchs zur Folge

**260504 Gewichtsverlust**

10, 41, 61, 79, 100, 120, 141, 159, 182, 203, 222, 242, 270, 284, 304, 322, 342, 362, 382, 403

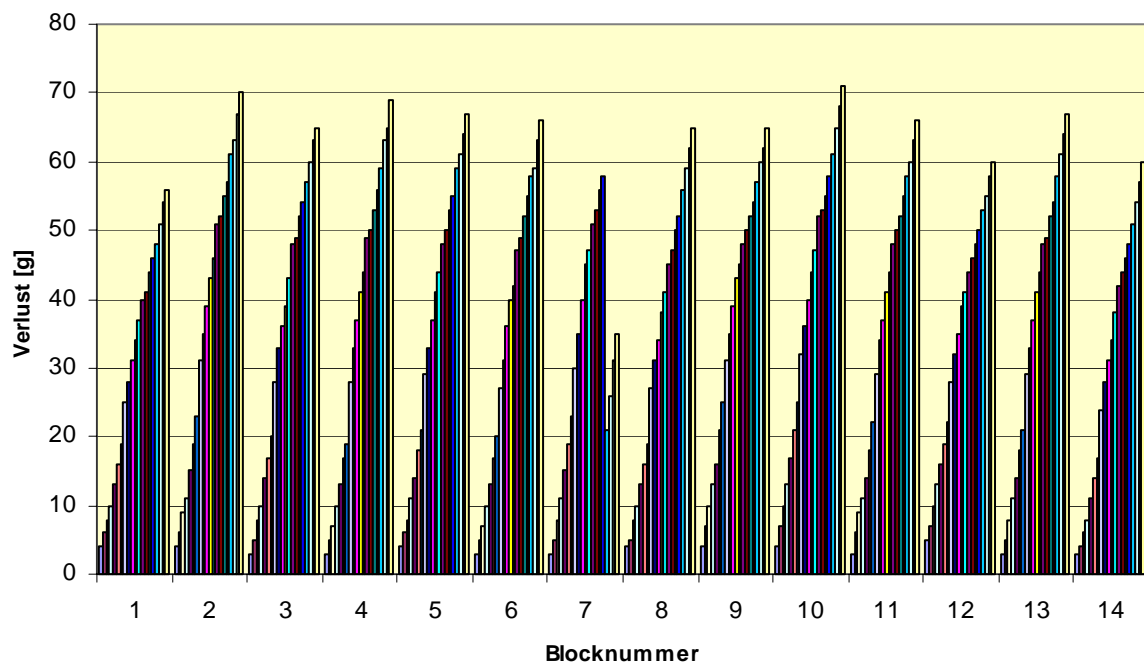


Bild 13: Die Werte bewegen sich zwischen 55 und 70 g pro Batterieblock. Die Veränderung beim Block 7 ist darauf zurückzuführen, dass dieser Block nach dem Zyklus 322 ersetzt wurde.

Durch den Gewichtsverlust steigt die Säurekonzentration in den Zellen. Die Zunahme der Säurekonzentration spiegelt sich in den Werten für die Spannung bei offenem Stromkreis (Open Circuit Voltage, Ruhespannung, Quellenspannung).

Für die Batterie 260504 wurden folgende Werte der Quellenspannung gemessen:

Verlauf der Quellenspannung (Open circuit Voltage OCV)  
Batterie 260504

Dat.	Z.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
15.6.	20	13.24	13.28	13.27	13.27	13.27	13.27	13.27	13.27	13.28	13.27	13.26	13.27	13.28	13.27
23.6.	41	13.277	13.332	13.324	13.322	13.321	13.323	13.31	13.323	13.332	13.335	13.305	13.303	13.314	13.317
1.7.	61	13.271	13.326	13.310	13.312	13.305	13.297	13.30	13.306	13.341	13.335	13.290	13.295	13.312	13.298
9.7.	79	13.276	13.316	13.312	13.311	13.307	13.303	13.303	13.309	13.323	13.322	13.297	13.294	13.307	13.302
19.7.	100	13.202	13.234	13.231	13.233	13.230	13.220	13.218	13.222	13.229	13.227	13.212	13.205	13.220	13.215
27.7.	120	13.271	13.304	13.304	13.307	13.306	13.293	13.292	13.299	13.305	13.300	13.288	13.275	13.296	13.294
5.8.	141	13.249	13.277	13.268	13.275	13.283	13.269	13.274	13.275	13.281	13.268	13.248	13.236	13.236	13.257
11.8.	159	13.255	13.270	13.265	13.272	13.279	13.270	13.284	13.279	13.280	13.269	13.249	13.244	13.255	13.251
21.8.	182	13.31	13.323	13.315	13.319	13.325	13.309	13.301	13.313	13.312	13.315	13.298	13.296	13.304	13.302
27.8.	203	13.317	13.335	13.326	13.334	13.337	13.317	13.316	13.318	13.321	13.328	13.312	13.311	13.316	13.31
7.9.	222	13.318	13.339	13.329	13.336	13.342	13.320	13.311	13.316	13.315	13.329	13.315	13.314	13.322	13.316
14.9.	242	13.364	13.385	13.372	13.380	13.385	13.369	13.334	13.357	13.351	13.372	13.361	13.362	13.368	13.363
24.9.	270	13.372	13.395	13.380	13.385	13.388	13.375	13.345	13.363	13.35	13.377	13.368	13.367	13.374	13.369
30.9.	284	13.359	13.378	13.367	13.370	13.371	13.362	13.341	13.352	13.346	13.360	13.353	13.354	13.359	13.356
8.10.	304	13.370	13.393	13.382	13.379	13.385	13.379	13.342	13.368	13.363	13.375	13.367	13.370	13.374	13.371
14.10.	322	13.373	13.395	13.383	13.385	13.386	13.382	13.343	13.365	13.355	13.376	13.367	13.371	13.375	13.371
14.10.*								13.00							
21.10.	342	13.375	13.398	13.383	13.383	13.387	13.381	13.053	13.373	13.354	13.383	13.369	13.376	13.381	13.375
27.10.	362	13.369	13.388	13.372	13.381	13.384	13.380	13.129	13.365	13.339	13.378	13.363	13.361	13.374	13.367
3.11.	382	13.345	13.366	13.344	13.348	13.359	13.356	13.177	13.275	13.339	13.356	13.341	13.322	13.350	13.345
10.11.	402	13.375	13.395	13.378	13.398	13.395	13.392	13.221	13.376	11.949	13.373	13.372	13.351	13.385	13.373

Beim Zyklus 100 erfolgte die Messung nach einer Ruhepause von 67 h.

Normalerweise wurde eine Ruhezeit von 24 h eingehalten.

\* Batterieblock Nr. 7 ersetzt

260504 Quellenspannung

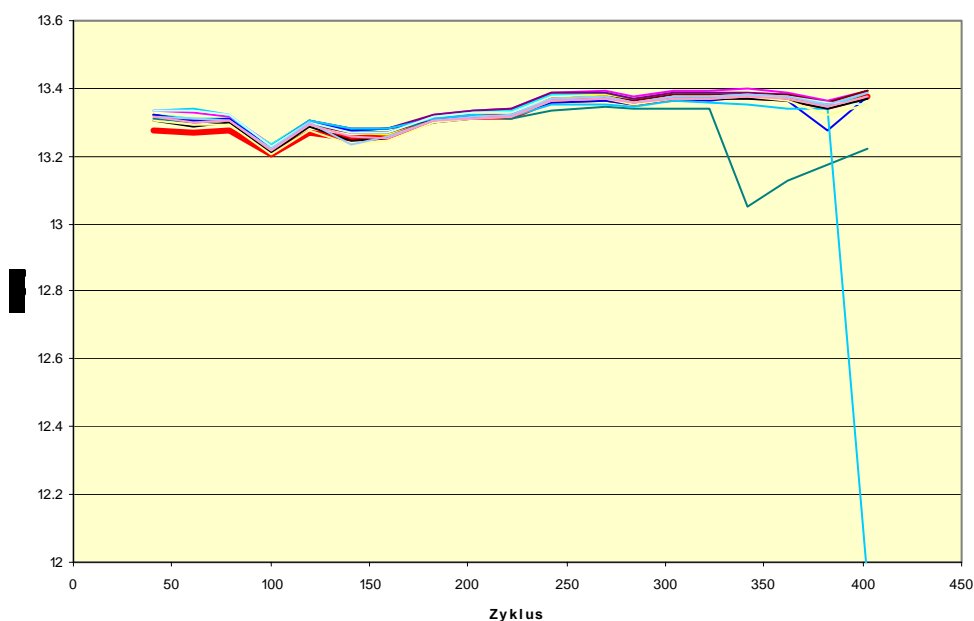


Bild 14: Die Quellenspannung steigt während dem Testverlauf leicht an. Dies lässt auf eine Zunahme der Säuredichte schliessen. Grund: Durch den Wasserverbrauch nimmt die Säuredichte zu.

Der Knick beim Zyklus 322 wird durch den Einbau einer neuen Batterie verursacht.

Der Ausfall des Batterieblocks Nr. 7 wird am Schluss durch den Spannungseinbruch angezeigt.



## 10. Beurteilung von defekten Batterieblöcken

### Batterie 040702

#### Batterieblock 040702 - 9

Ausfall nach Zyklus 128

Zustand der positiven Platte: gut

Masse der positiven Platte: gut

Zustand der negativen Platte: Bildung von Bleischwamm links und rechts der Platte (typisches Zeichen einer zyklischen Belastung). Zustand äusserlich unauffällig.

Zustand der Separatoren: ziemlich trocken

Es fällt auf, dass der Batterieblock Nr. 9 einen überdurchschnittlichen Innenwiderstand aufweist. Zudem ist das Gewicht zu Beginn des Tests minimal.

**Ausfallgrund:** Sulfatierte Negative Elektrode (Sauerstoffeintritt?)

#### Batterieblock 040702-3

Ausfall nach Zyklus 200

Zustand der positiven Platten: ankorrodiert

Zustand der negativen Platten: leicht sulfatiert

Bildung von Bleischwamm links und rechts der Platte

Zustand der Separatoren: sehr trocken

**Ausfallgrund:** Sulfatierte Negative Elektrode (Sauerstoffeintritt?)

### Batterieblock 280303-1

#### Batterieblock 280303

Zyklus 75

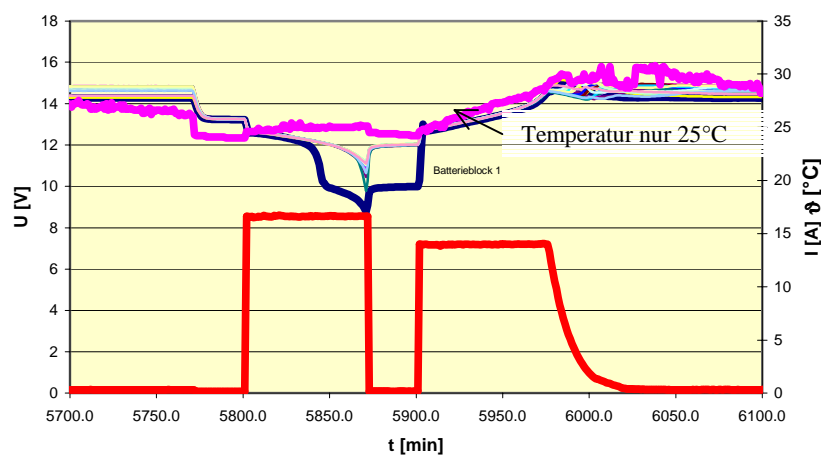
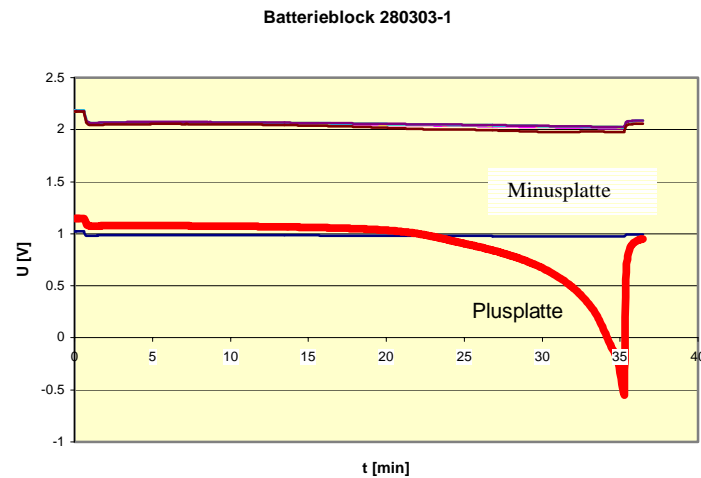


Bild 15: Die obere violette Kennlinie zeigt den Temperaturverlauf. Die übrigen Kennlinien zeigen den Spannungsverlauf der 14 Batterieblöcke an. Bei der Entladung ist deutlich zu erkennen, dass die Spannung (blaue Linie) des Batterieblock 1 sehr früh zusammenbricht. Bei Beginn der Ladung beträgt die Temperatur nur 25°C.

Die untere rote Kennlinie zeigt zuerst den Entladestrom mit 16 A und anschliessend die Ladung mit 13 A.



**Bild 16: Entladung des gealterten (75 Zyklen) Batterieblocks 280303-1**  
 Die Spannung der negativen und positiven Platten wurde separat, mit Hilfe der Ruetschi-Sonde, aufgezeichnet. Die Plus-Platten (rote Linie) haben zu Beginn der Entladung eine Elektroden-Spannung (in Bezug auf die Referenz-Elektrode) von +1 Volt. Im Verlauf der Entladung sinkt die Spannung in ausgeprägter Weise. Die Minus-Platten (blaue Linie) zeigen eine konstante Spannung von -1 Volt bis zum Schluss der Entladung. Die Kapazität wird also durch die Plusplatten begrenzt.  
 Die oberste Kurve in Bild 6 zeigt die Zellenspannung einer guten Zelle.

Ausfall nach Zyklus 80 (dieser Batterieblock ist bereits bei den ersten 10 Zyklen aufgefallen)

Innenwiderstand bei Zyklus 80: 4,8 mOhm

Lieferung: Februar 2002

Zerlegt am: 15.5.03

Feststellungen:

- Positive Platten: aktive Masse ist weich
- Gitter im oberen Teil stark korrodiert
- Negative Platten: kein Moos am Plattenrand
- am unteren Rand leicht sulfatiert
- Elektrolyt: OK
- Separatoren: gut

**Ausfallgrund:** Offensichtlich ist die Korrosion des Gitters der positiven Platte für den Kapazitätsabfall verantwortlich.



Bild 17: Die defekte Plusplatte: Im oberen Bereich ist die Gitterkorrosion deutlich zu erkennen.

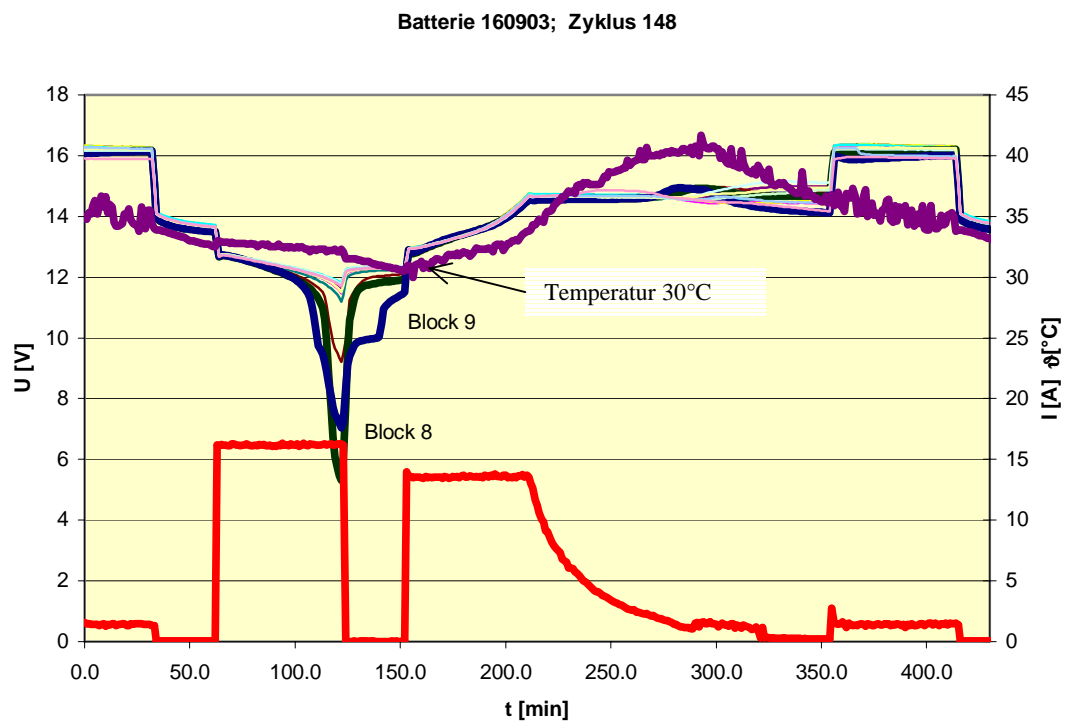


Bild 18: Die Batterie 160903 hat bei Zyklus 148 noch eine Kapazität von 16 Ah. Zwei Batterieblöcke 8 und 9 sind defekt. Bei Beginn der Ladung beträgt die Temperatur nur 30°C.

Nach dem Abschluss des Testes der Batterie **160903** wurden drei Batterien zerlegt:

**Block 160903-1** Innenwiderstand: 9 m $\Omega$

Negative Platte: 6 Platten pro Zelle, Dicke: 1,2 mm

guter Zustand, an den seitlichen Rändern hat es Bleischwamm,

Positive Platte: 5 Platten pro Zelle, Dicke: 0,9 mm

Das Gitter ist stark korrodiert, die aktive Masse ist pastenförmig und lässt sich leicht ablösen

Glasfaservlies: sehr trocken

**Block 160903-6** Innenwiderstand: 16 mΩ

Negative Platte: 6 Platten pro Zelle, Dicke: 1,2 mm

Guter Zustand, an den seitlichen Rändern hat es Bleischwamm

Positive Platte: 5 Platten pro Zelle, Dicke: 0,9 mm

Das Gitter ist extrem stark korrodiert; die aktive Masse ist pastenförmig und fällt raus.

Glasfaservlies: sehr trocken

**Block 160903-14** Innenwiderstand: 7,5 mΩ

Negative Platte: 6 Platten pro Zelle, Dicke: 1,2 mm

Guter Zustand, an den seitlichen Rändern hat es Bleischwamm

Positive Platte: 5 Platten pro Zelle, Dicke: 0,9 mm

Gitter etwas korrodiert; die aktive Masse ist pastenförmig und fällt raus.

Glasfaservlies: sehr trocken

Bei allen Batterien konnte eine Längenzunahme um etwa 10 mm festgestellt werden.

**Block 260504-7**

Nach dem Zyklus 322 wurde der Batterieblock 260504-7 zerlegt:

Innenwiderstand: 5,5 mΩ (nach dem Zyklus 304 gemessen)

Negative Platte: 5 Platten pro Zelle

guter Zustand; an den seitlichen Rändern hat es Bleischwamm,

Positive Platte: 4 Platten pro Zelle

Das Gitter ist stark korrodiert, die aktive Masse ist über das Gitter hinaus gewachsen, die aktive Masse haftet schlecht am Gitter, ein Teil haftet beim Demontieren am Separator

Glasfaservlies: trocken; Feuchtigkeit ist noch erkennbar

Feststellung: Trotz dem Vorspannen der Seitenwände der Batterieblöcke ist die aktive Masse über das Gitter hinaus gewachsen.

Die Batteriebreite hat von 163 mm auf 167,5 mm zugenommen.

Schlussfolgerung: Der Anpressdruck sollte noch weiter erhöht werden.

Kommentar: Es ist davon auszugehen, dass die Zyklenzahl mit einem grösseren Anpressdruck noch weiter erhöht werden kann. Dazu müsste der Wasserverlust etwas reduziert werden. Die Temperatur beim Beginn der Ladung beträgt etwa 30°C. Sie sollte mit Vorteil durch eine bessere Regelung auf etwa 35°C erhöht werden.

Nach den Testabbruch bei Zyklus 403 wurde der Batterieblock Nr. 9 zerlegt.

Der Ausfall wurde von der Zelle Nr. 6 (beim Pluspol) verursacht.

Innenwiderstand bei Testabbruch: 10 mΩ

Negative Platten: 5 Platten pro Zelle

Die Platten weisen an den Rändern eine deutliche Schwammbildung auf. Deutliche sichtbare braune Färbung zeigt an, dass die Zelle umgepolt wurde.

Die Platte war sulfatiert.

Positive Platte: 4 Platten pro Zelle.

An den Rändern ist deutlich Bleischwamm zu erkennen. Die Gitter sind vor allem im oberen Bereich stark korrodiert. Die Platten sind sulfatiert

Glasfaservlies: völlig ausgetrocknet, keine Feuchtigkeitsspuren erkennbar

Ausfallursache: **Bleischwamm hat an den Plattenrändern zu einem Kurzschluss geführt. Die Platten haben sich entladen.**

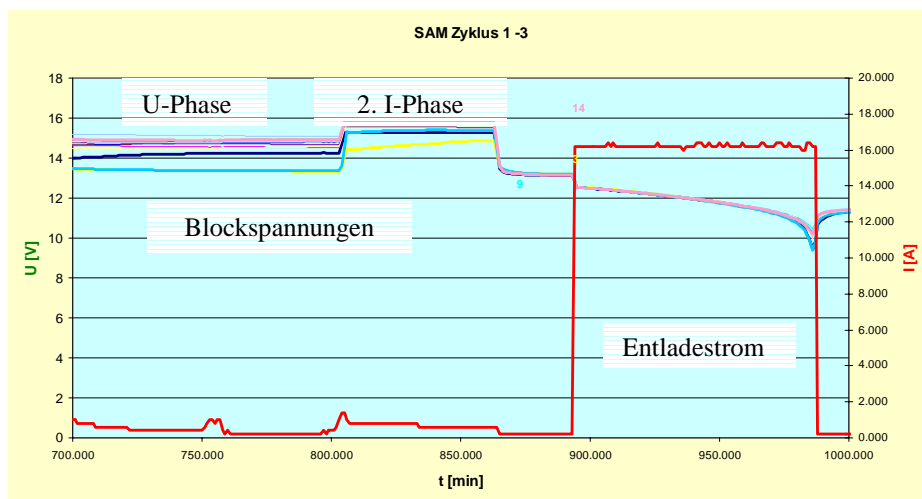
**Damit wurde die Gitterkorrosion und die Sulfatierung stark beschleunigt.  
Beim Entladen fand an den Platten ein Ladeprozess statt.**

## 11. Unterschiedliche Blockspannungen

In Serie geschaltete Batterieblöcke sollten bezüglich Kapazität eine möglichst kleine Streuung aufweisen. Schwache Batterieblöcke riskieren Tiefentladung oder sogar Umpolung. Die Messung der Gesamtspannung erlaubt keine Aussage über die Gleichmässigkeit der Kapazitäten der einzelnen Batterieblöcke.

Die Ueberwachung der Spannung jedes einzelnen Blockes ist aufwendig und teuer. Es empfiehlt sich deshalb die Verwendung eines Mittelabgriffs für die Spannungsmessung. So könnte beispielsweise die Spannung der Batterieblöcke 1 bis 7 mit derjenigen der Blöcke 8 bis 14 verglichen werden. Falls die Differenz einen Wert von 2 Volt übersteigt, ist ein Batterieblock defekt.

Batterie 040702  
**Unterschiedliche Blockspannungen**



*Bild 19: Bereits die ersten Messungen zeigten, dass die Spannungen der Batterieblöcke während der U-Phase der Ladung unterschiedliche Werte aufwiesen.*

### Spannungsdifferenz zwischen den Batteriehälften

Batterie 040702; Zyklus 120

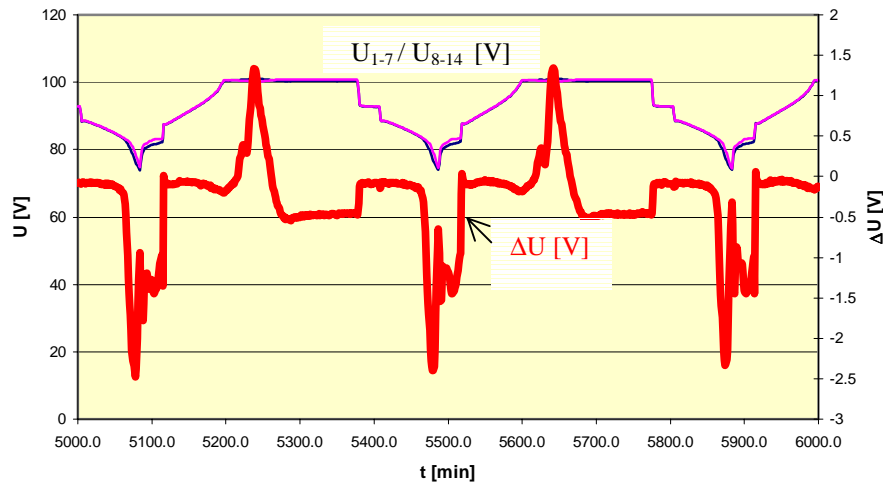


Bild 20: Sobald (insbesondere am Ende der Entladung) die Spannungsdifferenz (rote Linie) zwischen der ersten und der zweiten Hälfte der Antriebsbatterie 2 V überschreitet muss davon ausgegangen werden, dass eine Zelle defekt ist.

Schon bald nach Testbeginn wurde festgestellt, dass die Abschaltspannung (End-Spannung) am Ende der Entladung nicht zu tief gewählt werden darf, um zu verhindern dass sich einzelne Batterieblöcke zu tief entladen. Bei Testbeginn wurde die Endspannung auf 136 Volt festgelegt. Dies entspricht einer mittleren Blockspannung von 9.7 Volt, und einer Zellspannung von 1,62 Volt. Dabei sank aber die Spannung einzelner Blöcke bis auf 9.4 Volt (1.57 Volt pro Zelle). Deshalb wurde für die weiteren Tests eine mittlere Endspannung von 10.5 Volt gewählt (1.75 Volt pro Zelle).

## 12. Batterietemperatur

Bei den Tests mit der Batterie 040702 bestand zwischen den einzelnen Batterieblöcken kein Abstand. Die Batterie wurde weder belüftet noch gekühlt. Die Batterietemperatur stieg bis auf 55°C.

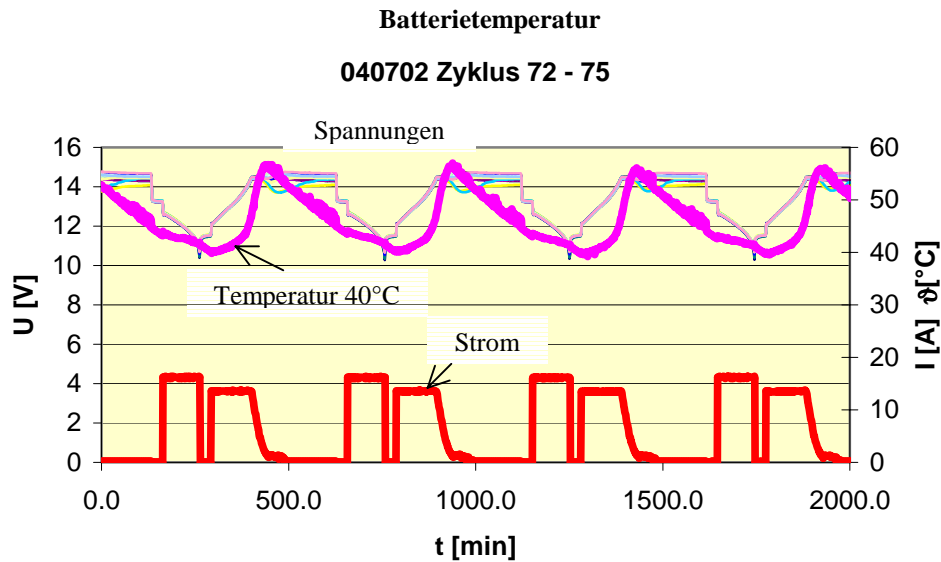


Bild 21: Die Batterietemperatur während dem Testzyklus beträgt zwischen 40 und 55°C.

Nachdem zwischen den Batterieblöcken ein Zwischenraum und eine Lüftung (Ventilation) eingerichtet wurde, konnte die Temperatur auf maximal 38°C gesenkt werden.

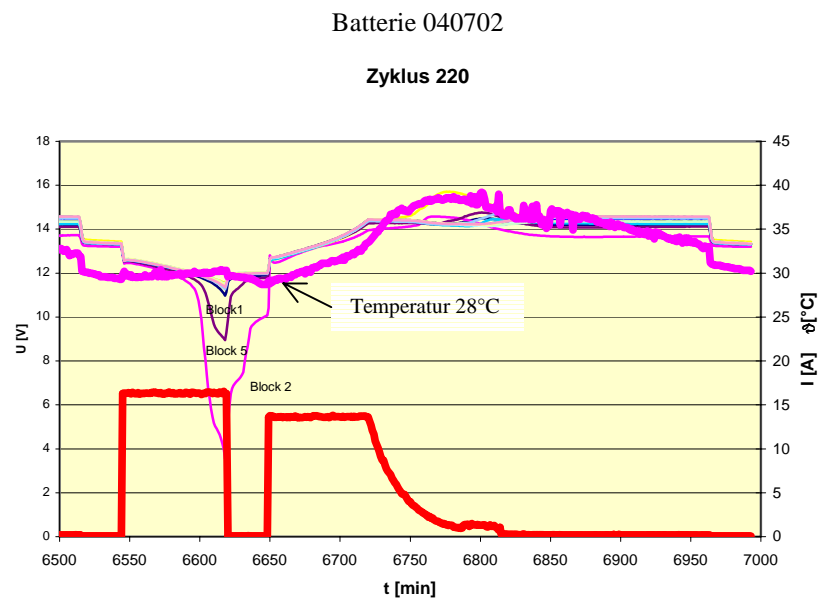


Bild 22: Nachdem die Batterien mit einem Zwischenraum von etwa 30 mm auf ein paar Holzlatten montiert wurden, konnte eine deutlich tiefere Temperatur festgestellt werden (Maximalwerte 35 bis 40°C).

### 13. Kapazitätsabnahme in Funktion der Zyklenzahl

Die Resultate der Kapazitätsmessungen für die vier getesteten Batterien sind in Bild 21 dargestellt.

#### Kapazitätskennlinien

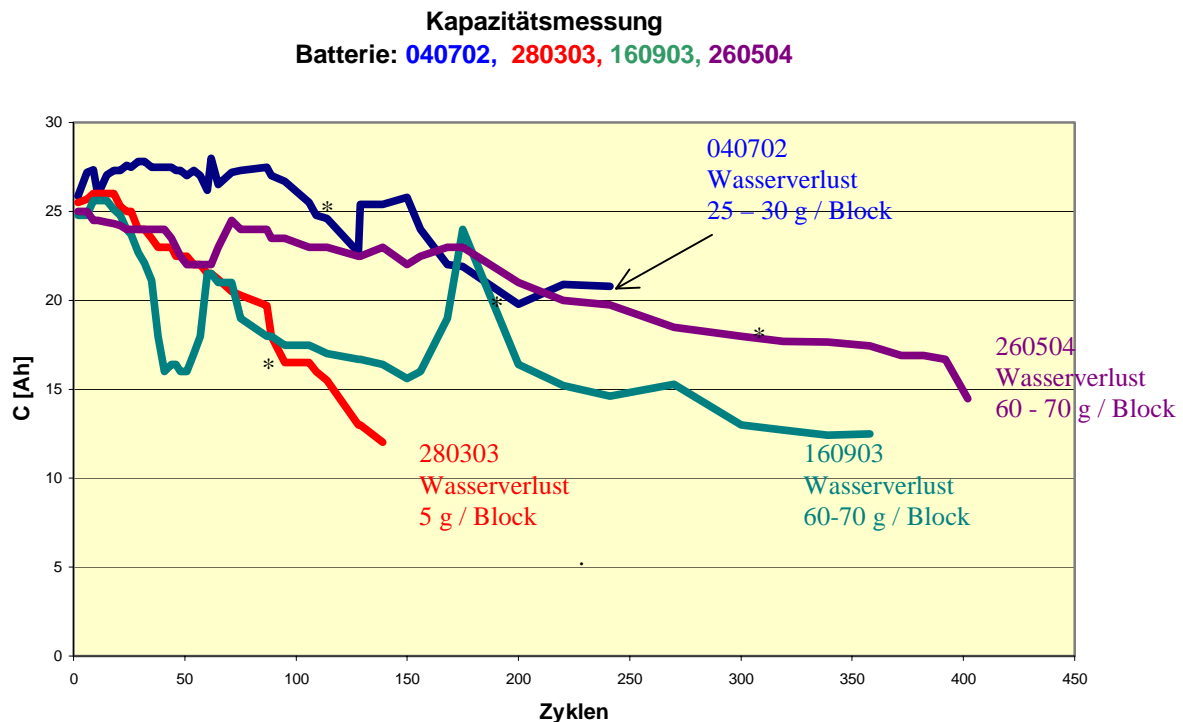


Bild 23: Die beste Zyklenzahl wurde mit der Batterie 260504 (Odyssee) erzielt. Hier waren die Seitenwände der Batterieblöcke mechanisch mittels Aluminiumprofilen abgestützt und mittels eines Spannsets zusammengepresst. An den mit \* bezeichneten Stellen wurde ein defekter Batterieblock ersetzt.

#### Batterie 040702

Batterieblöcke ohne Abstand im Originalbehälter montiert.

Maximaltemperatur 55 °C

Ab Zyklus 44 ohne zweite I-Phase. Spannung der U-Phase sukzessive reduziert von 2.45 auf 2.38 Volt pro Zelle, und dafür sukzessive Verlängerung der U-Phase auf 3.5 t<sub>1</sub>

Durch diese Massnahmen konnte die maximale Temperatur auf 45 °C reduziert werden. Auch der Wasserverlust konnte so verringert werden.

Defekte Batterie blöcke wurden ersetzt bei Zyklus 128 und bei Zyklus 200.

#### Batterie 280303

Batterieblöcke mit 30 mm Abstand voneinander in einem geschlossenen Holzkasten montiert.

Dauerne Luft-Kühlung durch Ventilator.

Spannung der U-Phase 2.38 Volt pro Zelle.

Ohne zweite I-Phase

Maximaltemperatur 30 °C

Wasserverbrauch nach 180 Zyklen nur 5 g pro Block.

Defekter Batterieblock ersetzt bei Zyklus 80.

Offensichtlich ist die Ladung ungenügend.

#### Batterie 160903

Einbau im Holzkasten wie bei Batterie 280303

Spannung der U-Phase 2.38 Volt pro Zelle. Dauer der U-Phase 3.5 t<sub>1</sub>

Nach Zyklus 43: Wieder-Einführung der zweiten I-Phase mit U<sub>max</sub> 2.60 Volt pro Zelle. Dauer 1 h

Dabei wurde die Dauer der U-Phase auf 2.5 t<sub>1</sub> verkürzt.

Maximaltemperatur 40 °C

Batterieblöcke am Ende der Lebensdauer stark aufgebaucht.



Die Kapazitätsspitze bei Zyklus 180 ist auf einen Betriebsfehler zurückzuführen (Stark erhöhte Temperatur).

**Batterie 260504 (Odyssee)**

Seitliche Abstützung der einzelnen Batterieblöcke mittels mechanischer Vorspannung (Spannset).

U-Phase mit 2.45 Volt pro Zelle. Dauer der U-Phase 1.5 t<sub>1</sub>. Ganzer Test mit zweiter I-Phase.

Ventilator Kühlung nur während der u-Phase.

Maximaltemperatur 40 °C.

Defekter Batterieblock ersetzt bei Zyklus 322.

Anmerkung zur Batterie 040702:

Der Batterieblock, welcher bei Zyklus 320 als Ersatz für den defekten Block 040702-9 eingebaut wurde, hatte bei der Anlieferung nur eine Quellenspannung von 12.29 Volt. Das heisst, dass nahezu 50 % entladen war.

Gemäss Manual des Herstellers (3) sind die Batterien spätestens nach einer Lagerung von 2 Jahren, oder bei einer Quellenspannung von 11.58 Volt pro Block nachzuladen.

Das eindrückliche Resultat mit der Batterie 260504 weist auf die Bedeutung der mechanischen Abstützung der einzelnen Batterieblöcke hin.

Auf Grund der erzielten Resultate ist anzunehmen, dass die Zyklenzahl durch eine Vergrösserung der Vorspannkraft, durch Ladung ohne zweite I-Phase, aber dafür mit verlängerter U-Phase bei tieferer Spannung, und damit einer Senkung der Temperatur, noch weiter gesteigert werden kann.

## Literaturverzeichnis und Links

### Literatur

- [1] Hawker Energy: Charging pure lead-tin batteries, A guide for CYCLON and Genesis products, first edition, March 1999
- [2] Hawker Energy: Genesis Selection Guide, First Edition
- [3] Hawker Energy: Manual for Genesis-batteries, fifth edition 1999
- [4] Meier-Engel Karl: VEBILA, Verbesserung der Lebensdauer von Batterien mit einem intelligenten Ladegerät; Jahresbericht 2001 HTA Biel-Bienne; Abteilung Automobiltechnik
- [5] METTLER-TOLEDO; Technische Dokumentation
- [6] Ruetschi Paul: *Silver-silver sulfate reference electrodes for lead-acid batteries*; Journal of Power Sources 113 (2003) 363-370
- [7] Ruetschi Paul : Anleitung zum optimalen Umgang mit Batterien zur Verlängerung der Lebensdauer.
- [8] Kalyan Jana: ODYSSEY Drycell Batteries; Fifth Edition Rev1; May 2003

### Links

- [L1] [www.hepi.com](http://www.hepi.com)
- [L2] [www.bannerbatterien.com](http://www.bannerbatterien.com)