

# Parallel geschaltete Batterien

Andreas Jossen, BaSyTec GmbH  
www.BaSyTec.de, AJ@basytec.de

## **Einführung**

Oft werden Anlagen aufgebaut, die aus mehreren parallel geschalteten Batteriestrings bestehen. Da eine derartige Anlage durch den Ausfall eines Batteriestrings noch funktionsfähig ist, wenn auch eingeschränkt, ist die Zuverlässigkeit im Vergleich zu Einstringanlagen höher. Demgegenüber stehen natürlich höhere Kosten, da eine Batterie billiger als zwei Batterien mit jeweils der halben Kapazität ist. Auch sind Verkabelungsaufwand und Platzbedarf von Mehrstringspeichern im Vergleich zu Einstringspeichern erheblich größer. Ferner muß bedacht werden, daß für Wartungsarbeiten ein vielfaches an Zeit notwendig ist. Für die Verwendung von Mehrstringanlagen gibt es im wesentlichen zwei Gründe. Als erstes hat die Batterieindustrie ein großes Interesse daran, da so mit einer kleinen Modellpalette (geringere Entwicklungs- und Produktionskosten) ein großer Kapazitätsbereich abgedeckt werden kann. Der zweite Grund kommt aus dem Bereich der unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV). Bei dieser Anwendung wird die Batterie für Monate oder sogar Jahre mit Erhaltungsladung betrieben, um dann im Ernstfall entladen zu werden. Hier ist eine hohe Zuverlässigkeit gefordert, die sich durch Parallelschalten von mehreren Batteriestrings erreichen läßt. Ferner läßt sich bei derartigen Systemen ein Teil der Batterie testen, ohne daß die Bereitschaft der Anlage eingebüßt wird. Beim Einsatz in photovoltaischen Anlagen ergeben sich im Vergleich zu USV Anlagen jedoch ganz andere Belastungen. Eine permanente tägliche Zyklisierung, oft überlagert von einer mit dem Wetter verbundenen Zyklisierung, belastet die Batterie mit mittleren bis kleinen, stark schwankenden Strömen. Dies ist mit eine Ursache, daß durch die Batteriestrings unterschiedliche Ströme fließen können. Die damit verbundenen Erscheinungen werden, obwohl es sich hier i.d.R. um eine gemischte Parallel- und Serienschaltung handelt, im weiteren als "**Paralleleffekt**" bezeichnet. Bei PV Anlagen wurde beobachtet, daß bei parallel geschalteten Batterien sich im Laufe der Zeit die Batteriestrings verschiedenartig entwickeln. Bei der beschriebenen Anlage ist die Ursache<sup>1</sup> auf den Ausfall einer Zelle in einem String zurückzuführen, so daß dieser String im Laufe der Zeit immer weniger zyklisiert wurde. Der Ausfall wurde auch nicht rechtzeitig erkannt, da der funktionsfähige Batteriestring entsprechend tiefer zyklisiert wurde.

---

<sup>1</sup> Der für den Ausfall dieser Zelle verantwortliche Alterungsmechanismus wird in der angegebenen Literaturstelle nicht näher beschrieben.

## Grundlagen

Ein einfaches Ersatzschaltbild für  $n$  parallel geschaltete Batterien ist in Bild 1 dargestellt.

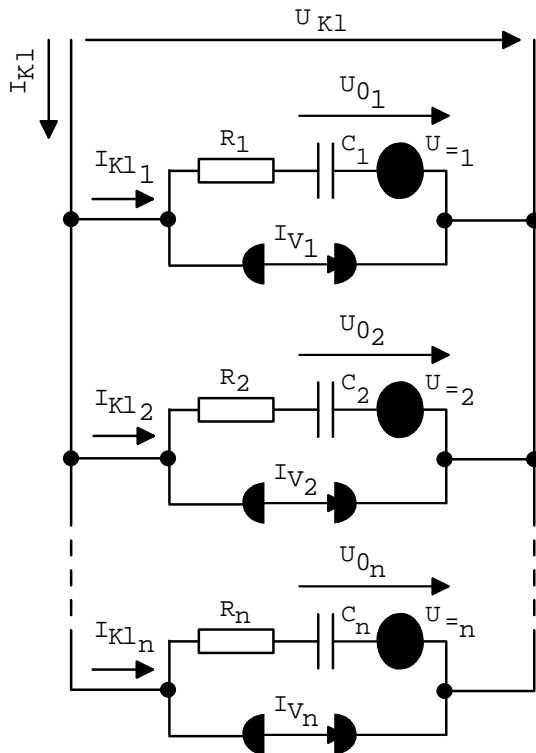


Bild 1: Einfaches Ersatzschaltbild für parallel geschaltete Batterien.

Für die Klemmengrößen der Gesamtbatterie gelten:

$$U_{Kl} = U_{Kl_1} = U_{Kl_2} = \dots = U_{Kl_n} \quad (1)$$

$$I_{Kl} = \sum_{i=1}^n I_{Kl_i} = \sum_{i=1}^n \left( I_{V_i} + \frac{U_{Kl} - U_{0_i}}{R_i} \right) \quad (2)$$

Für den Fall einer **eingepprägten Klemmenspannung** ergibt sich für die Abhängigkeit des Klemmenstroms einer Zelle von den Parametern einer anderen Zelle:

$$\frac{\delta I_{Kl_k}}{\delta R_j} = , \quad \frac{\delta I_{Kl_k}}{\delta I_{V_j}} = , \quad \frac{\delta I_{Kl_k}}{\delta U_{0_j}} = \quad \text{für } k \neq j \quad (3)$$

D.h., daß im Falle einer eingepprägten Klemmenspannung der Arbeitspunkt einer Zelle nicht von den Parametern der anderen Zellen beeinflusst wird. Für einen **eingepprägten Klemmenstrom** kann die Gleichung (2) nach der Klemmenspannung aufgelöst werden:

$$U_{Kl} = \frac{I_{Kl} + \sum_{i=1}^n \left( \frac{U_{0i}}{R_i} - I_{V_i} \right)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}} \quad (4)$$

Mit der starken Vereinfachung, daß der Verluststrom und der Innenwiderstand unabhängig von der Klemmenspannung sind, gilt für die Abhängigkeit der Klemmenspannung von den Parametern einer Zelle:

$$\frac{\delta U_{Kl}}{\delta R_j} = \frac{I_{Kl} + \sum_{i=1}^n \left( \frac{U_{0i}}{R_i} - I_{V_i} \right) - U_{0j} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}{\left( R_j \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \right)^2}, \quad \frac{\delta U_{Kl}}{\delta I_{V_j}} = - \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}, \quad \frac{\delta U_{Kl}}{\delta U_{0j}} = \frac{1}{R_j \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}} \quad (5)$$

Für die Abhängigkeit des Klemmenstroms einer Zelle von den Parametern einer anderen Zelle folgt:

$$\frac{\delta I_{Kl_k}}{\delta R_j} = \frac{1}{R_k} \cdot \frac{\delta U}{\delta F}, \quad \frac{\delta I_{Kl_k}}{\delta I_{V_k}} = \frac{1}{R_k} \cdot \frac{\delta U}{\delta I}, \quad \frac{\delta I_{Kl_k}}{\delta U_{0j}} = \frac{1}{R_k} \cdot \frac{\delta U}{\delta U_0} \quad (6)$$

Demnach wird bei einem eingprägten Klemmenstrom der Arbeitspunkt einer Batterie von den Parametern der anderen Batterien beeinflusst.

Im Vergleich zur Serienschaltung kehren sich die Verhältnisse bei eingprägtem Strom und bei eingprägter Spannung genau um (Duale Schaltung).

Die entnehmbare Kapazität von parallel geschalteten Batterien kann auf Grund einer möglichen inhomogenen Stromverteilung nicht exakt angegeben werden. Die entnehmbare Kapazität bei einer Konstantstromentladung kann jedoch mit

$$\sum_{i=1}^n K_{Zelle_i} \Big|_{I_{Kl_i}=I_{Kl}} \leq K_{Ges} \leq \sum_{i=1}^n K_{Zelle_i} \Big|_{I_{Kl_i}=I_{Kl} \frac{K_{Zelle_i}}{K_{Ges}}} \quad (7)$$

eingegrenzt werden. Die rechte Seite der Gleichung beschreibt den bestmöglichen Fall, d.h. die Stromaufteilung zwischen den Zellen erfolgt in der Art, daß die Zellströme während der Entladung konstant sind und alle Zellen zum selben Zeitpunkt erschöpft sind. Der ungünstigste Fall tritt ein, wenn alle Zellen nacheinander entladen werden, da die entnehmbare Kapazität mit zunehmenden Entladestrom abnimmt. Für den Zusammenhang zwischen der entnehmbaren Kapazität und dem Entladestrom gilt in guter Näherung die Peukert Gleichung.

Für den Ladegrad der Gesamtbatterie als Funktion der Ladegrade der Zellen gilt:

$$p = \sum_{i=1}^n \left( \frac{K_{N_i}}{K_N} \cdot p_i \right) \quad \text{mit } K_N = \sum_{i=1}^n K_{N_i} \quad (8)$$

Die Nennkapazität ist hier die Summe der Nennkapazitäten der Zellen.

Die Ursachen, die zu verschiedenen Ladegraden in den Batterien führen können, sind unterschiedliche Temperaturen und unterschiedliche Zellcharakteristiken auf Grund von Herstellungstoleranzen. Insbesondere führen abweichende Säuredichten zu unterschiedlichen Spannungslagen der Batterien und damit zu einer inhomogenen Stromverteilung.

Für das Überladeverhalten von parallel geschalteten Batterien gilt:

$$I_V = \sum_{i=0}^n I_{V_i} = \sum_{i=1}^n \left( I_{0_i} \cdot \exp \left( \frac{U_{K_i} - U_N}{K_{1_i}} + K_{2_i} \cdot \frac{T_i - T_N}{T_i \cdot T_N} \right) \right) \quad (9)$$

Diese Gleichung kann nicht in die Form der für eine Zelle gültigen Überladecharakteristik umgeformt werden. Für den Fall, daß die Parameter  $K_{1_i}$  und  $K_{2_i}$  für alle Zellen identisch sind und alle Zellen dieselbe Temperatur aufweisen, gilt:

$$I_V = \underbrace{\left( \sum_{i=1}^n I_{0_i} \right)}_{I_0} \cdot \exp \left( \frac{U_{K_i} - U_N}{K_1} + K_2 \cdot \frac{T - T_N}{T \cdot T_N} \right) \quad (10)$$

Dieser Zusammenhang gilt näherungsweise bei baugleichen Batterien, die identisch betrieben wurden, da dann die Streuungen der Parameter  $K_{1_i}$  und  $K_{2_i}$  sehr gering sind. In diesem Fall können  $K_1$  und  $K_2$  als die arithmetischen Mittel der Zellparameter angegeben werden.

## **Durchgeführte Messungen**

### **Ausgleichsvorgänge**

Eine einmal entstandene Asymmetrie wird während eines Ladevorgangs innerhalb relativ kurzer Zeit weitgehend aufgehoben. In Bild 2 sind die Stromverläufe zweier gleichaltriger, parallel geschalteter Batterien vom Typ Vb 625 für eine IU-Ladung dargestellt. Der Batterie 2 wurde vor dem Ladevorgang eine Ladung von 6.5 Ah entnommen. Der Verlauf des Differenzstromes dieser Messung und von zwei weiteren Messungen ist in Bild 3 dargestellt. Der Umschaltzeitpunkt zwischen strom- und spannungsbegrenzter Ladung, fällt hierbei immer mit dem Maximum des Differenzstromes zusammen. Das Maximum des Differenzstromes steigt mit zunehmender Ladungsdifferenz der Batterien, ist aber auf den maximalen Ladestrom begrenzt. Dieser starke Stromanstieg ist ein Grund für die Begrenzung der Anzahl von parallel zu schaltenden Batterien. Ein ähnliches Verhalten ergibt sich auch während einer Entladung nahe dem Entladeschluß, wenn die Batterien unterschiedliche Kapazitäten haben. Die Folge einer derartigen Entladung sind unterschiedliche Entladegrade der einzelnen Batterien, und es ergibt sich bei der anschließenden Ladung wieder ein Ausgleichsvorgang.

Im Vergleich zu Ausgleichsvorgängen bei in Serie geschalteten Batterien, werden die Batterien mit höheren Ladegraden nicht mit zusätzlicher Gasentwicklung und beschleunigter Korrosion belastet. Andererseits kann es bei verschieden gealterten Zellen zu einer unterschiedlichen Gasentwicklung kommen. Bei einer eingprägten Klemmenspannung ergeben sich dann unterschiedliche Halbzellenpotentiale in den einzelnen Batterien und somit auch unterschiedliche Korrosionsgeschwindigkeiten.

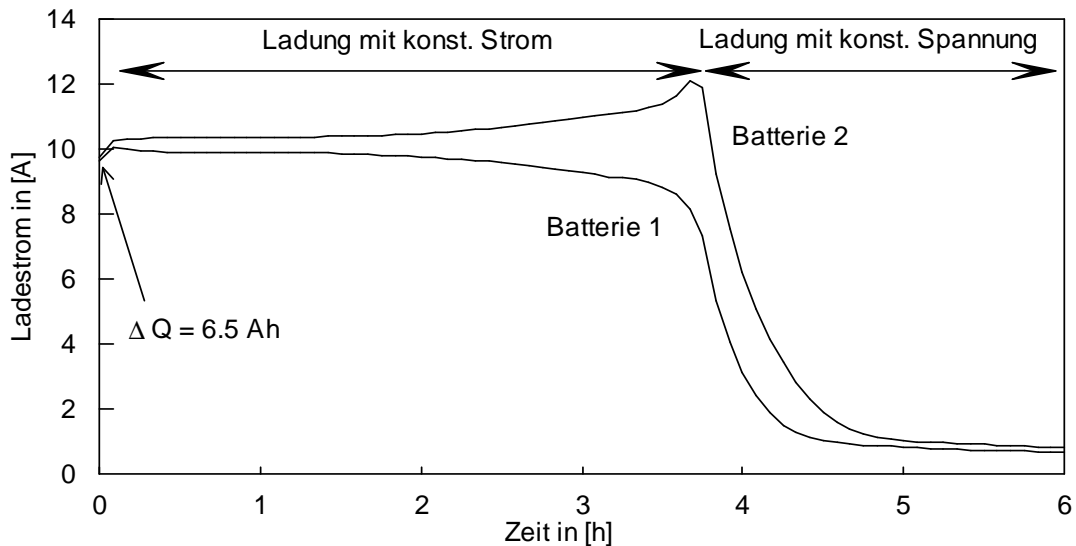


Bild 2: Klemmenstromverläufe eines IU-Ladevorgangs für zwei parallel geschaltete Batterien vom Typ Vb 625 bei 25 °C.

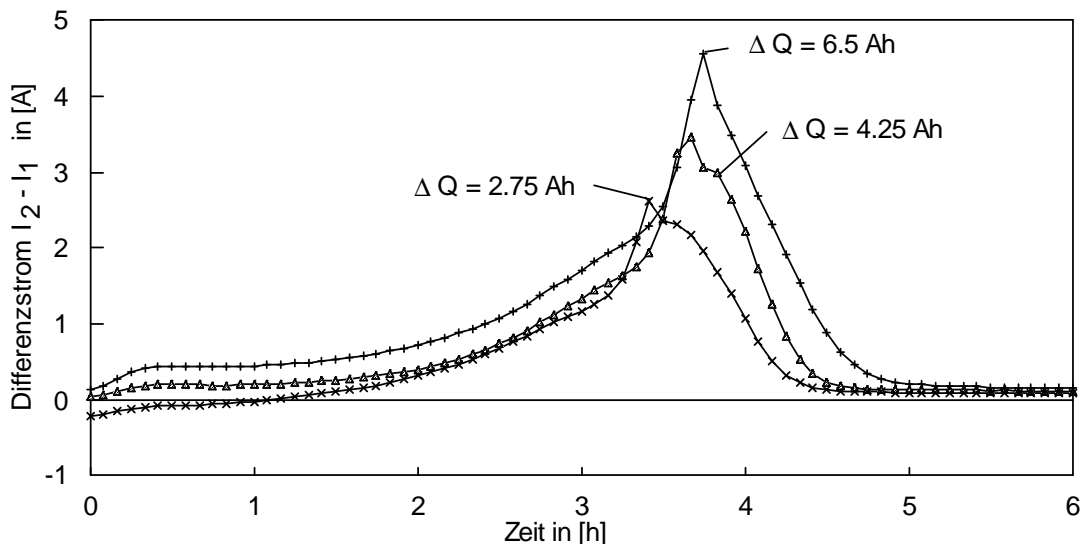


Bild 3: Differenzströme zweier parallel geschalteter Batterien vom Typ Vb 625 für unterschiedliche Ladungsdifferenzen während eines IU-Ladevorgangs bei 25 °C

### **Das Verhalten bei solartypischem Betrieb**

Für zwei mit einem solartypischen Tageszyklus belastete, parallel geschaltete Batterien vom Typ Vb 625, ergeben sich die in Bild 4 dargestellten Verläufe für den Differenzstrom ( $I_1 - I_2$ ) und die Differenzladung ( $Q_1 - Q_2$ ). Es zeigt sich eine deutliche

Inhomogenität in der Stromaufteilung zwischen den beiden Batterien beim Laden und Entladen. Im stromfreien Zustand sind Kreisströme erkennbar. Die Ladungsdifferenz beträgt im eingeschwungenen Zustand etwa 2.5 Ah pro Tag. Demnach ergibt sich eine mittlere Differenz der Ladegrade von 0.02. Ferner zeigt sich, daß Batterie 2 im eingeschwungenen Zustand um etwa 2 Ah stärker als Batterie 1 zyklisiert wird. Während des Ladevorgangs (z.T. mit eingprägter Spannung) gleichen sich die Ladegrade beider Batterien an und während einer Entladung laufen sie auseinander. Ferner ist anzunehmen, daß bei unterschiedlichen Temperaturen die Ladegrade ebenfalls auseinanderlaufen, da die Hauptreaktionen temperaturabhängig sind.

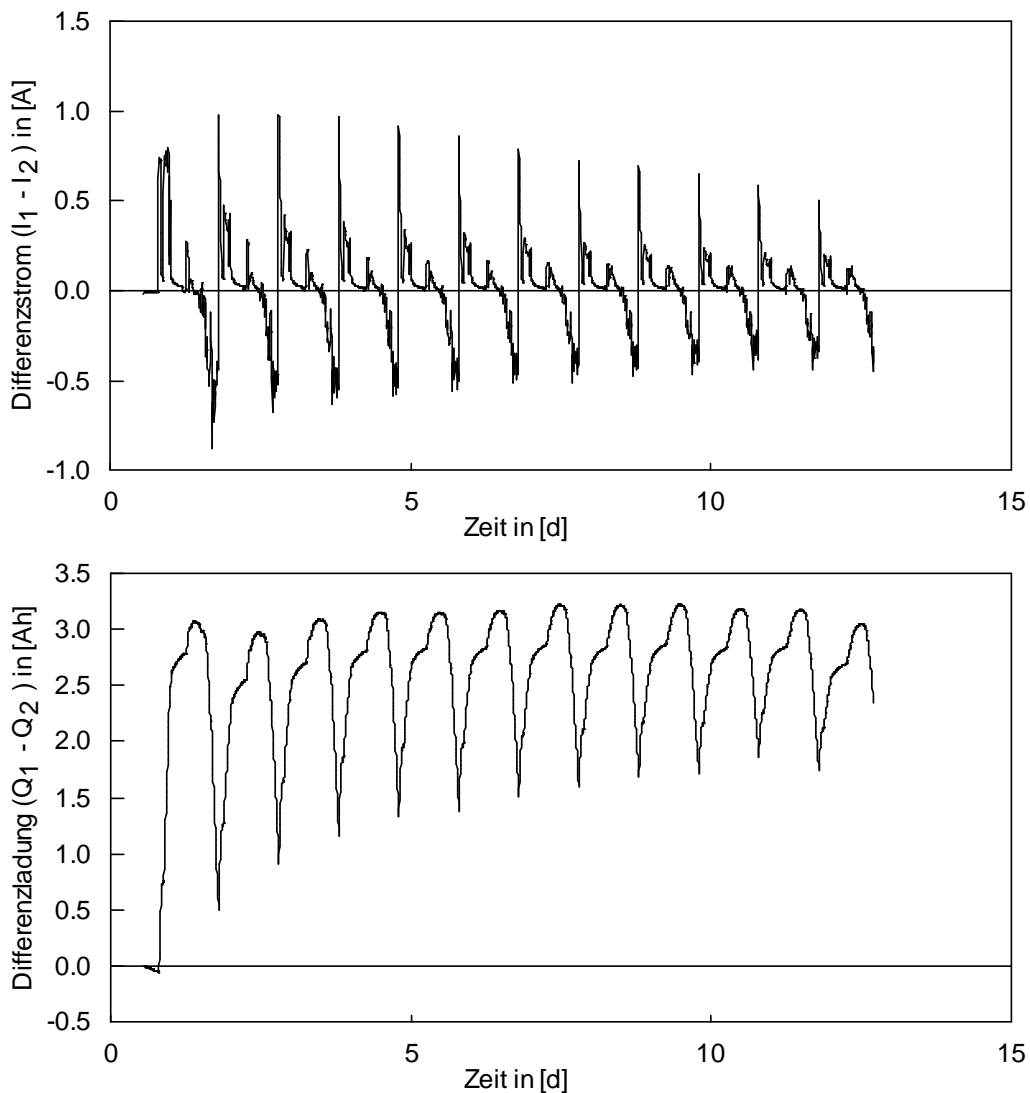


Bild 4: Verlauf des Differenzstromes und der Differenzladung für zwei parallel geschaltete Batterien vom Typ Vb 625.

### **Zusammenfassung**

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß eine Parallelschaltung von Batterien zu einer unterschiedlichen Belastung der Batterien führt. Unterschiedliche Ladezustände werden während einer Konstantspannungsladung in relativ kurzer Zeit

aufgehoben. Andererseits ergeben sich bei allen anderen Betriebsarten inhomogene Stromaufteilungen, die unter Umständen zu einem Auseinanderlaufen der Ladezustände führen können. Nach Möglichkeit sollte daher das Parallelschalten von Batterien bei photovoltaischen Inselnssystemen vermieden werden.

## 2 Weiterführende Literatur

- [1] Shepherd, C. M.:  
Design of Primary and Secondary Cells - II An Equation Describing Battery Discharge,  
Journal of the Electrochemical Society, Vol. 112, No. 7, 1965, S.657 - 664
- [2] Degner, T. et al.:  
Modelling the operational behaviour of lead acid battery storage in renewable energy systems,  
Sonderdruck, Universität Oldenburg, Forschungsgruppe *Physik regenerativer Energiequellen*
- [3] Berndt, D.:  
Stationary Lead Acid Batteries, Operational Conditions, Future Aspects,  
7. International Telecommunications Energy Conference (INTELEC),  
München 1985, S. 125 - 132
- [4] McCarthy, S. et al.:  
Operational Experiences with Batteries in the 16 PV Pilot Plants,  
9th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, Freiburg 1989, S.1142-1145
- [5] McCarthy, S. et al.:  
Battery Cell Testing in Photovoltaic Systems,  
9th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, Freiburg 1989, S.832-834
- [6] van der Weiden, T.C.J. et al.:  
Battery Research in the Terschelling PV System,  
10th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, Lissabon 1991, S.771-773
- [7] Schadel, J.:  
The 4 kW PV Pilot Plant "Muttler",  
Tenth E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, Lissabon 1991, S.763-765
- [8] Mitoff, S.P.:  
Computer Modelling of Electrically Parallel Arrays of Sodium-Sulphur Cells,  
Power Sources 7, Brighton 1978, S. 733 - 742
- [9] Garche, J.:  
Einfluß von Tiefentladungen auf die Batterielebensdauer,  
Aus dem Workshop "Elektrochemische Speicher in regenerativen Energiesystemen",  
Sonderdruck vom ZSW Geschäftsbereich 3, Helmholtzstraße 8,  
W7900 Ulm, 17.-18.6.1993
- [10] Ahm, P.:  
Monitoring of Batteries,  
11th E. C. Photovoltaic Solar Energy Conference, S. 1102 - 1104,  
Montreux, Schweiz 1992
- [11] Bergvik, S. und Bjorkstrom, L.:



Prolonged Useful Life and Reduced Maintenance of Lead-Acid Batteries, by Means of Individual Cell Voltage Regulation,  
6. International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), New Orleans 1984, S.63 - 66

- [12] Schmidt, H. und Siedle, C.:  
Der Charge Equalizer - Die Lösung eines alten Batterieproblems,,  
Achstes nationales Symposium Photovoltaische Solarenergie, S.229 - 239,  
Staffelstein 1993