

Ladezustandserkennung durch simulative Batteriebeobachtung

Peter Beckhaus¹, Christian Hardt³, Gerhard Krost², Sina Souzani¹

(¹) Zentrum für BrennstoffzellenTechnik ZBT GmbH Duisburg

Lotharstr. 1, 47057 Duisburg, www.zbt-duisburg.de

Tel.: +49-203-379-3020 / Fax: +49-203-379-3946 / p.beckhaus@zbt-duisburg.de

(²) Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, Elektrische Anlagen und Netze

(³) Institut für Solare Energieversorgungstechnik ISET Kassel

Abstract

Bleiakkumulatoren finden zwar eine weit verbreitete Anwendung in vielen technischen Bereichen, wie zum Beispiel als Starter- oder Antriebsbatterien, in Notstromanlagen und als Energiespeicher in elektrischen Inselsystemen. Jedoch stellt die exakte Zustandserkennung von Bleiakkumulatoren noch immer ein großes technisches und operationales Problem dar. Wichtig für den störungsfreien Betrieb von autarken Hybrid-Energieversorgungssystemen ist insbesondere die zuverlässige Erkennung des Batterieladestandes, da dieser häufig als primäre Regelgröße genutzt wird und somit z.B. über Zu- bzw. Abschaltung von Backup-Komponenten zur Bereitstellung elektrischer Leistung entscheidet. In diesem Paper wird ein Verfahren der Zustandserkennung durch ein im Fachgebiet Elektrische Anlagen und Netze der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg entwickeltes Beobachtungssystem von Bleiakkumulatoren vorgestellt.

Zustandsanalyse unter Nutzung eines Batteriemodells

Die Aufgabe eines Systems zur Beobachtung von Bleibatterien im Betrieb besteht in erster Linie darin, möglichst viele für die Führung der Gesamtanlage relevante Informationen zu sammeln. Mit diesen soll die Betriebsführung dahingehend unterstützt werden, dass

- die Verfügbarkeit der Anlage sichergestellt,
- ein möglichst hoher Gesamtwirkungsgrad erreicht und
- die Lebensdauer der Bleiakkumulatoren erhöht wird.

Erreicht werden kann eine solche Batteriebeobachtung zum einen durch die direkte Überwachung leicht messbarer Größen wie z. B. Strom, Spannung und Temperatur; daraus lassen sich jedoch nur eingeschränkte Aussagen für den Anlagenbetrieb - insbesondere über den aktuellen Ladezustand des Akkumulators – ableiten [3]. Andererseits besteht die Möglichkeit, über beobachtende Algorithmen zusätzliche Informationen z. B. über innere Zustände des Akkumulators zu gewinnen und seinen Einsatz in der Gesamtanlage auf dieser Basis flexibler zu steuern. Ein solcher Algorithmus ist die hier vorgestellte Ladezustandserkennung auf Basis eines in [2] vorgestellten detaillierten Modells, welches zur Berechnung der Klemmenspannung von Bleiakkumulatoren eine Reihe interner elektrischer und elektrochemischer Größen berücksichtigt und daraus den aktuellen Ladezustand errechnet.

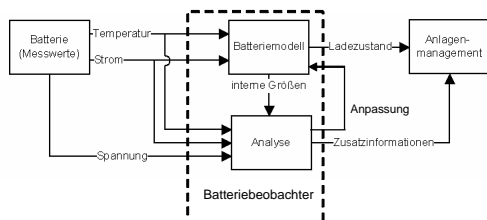


Abbildung 1 zeigt eine Übersicht über den neu entwickelten

Abbildung 1: Zustandsmittlung unter Nutzung eines Batteriemodells

Batteriebeobachtungsalgorithmus mit dem in seinem Kern eingebundenen Akkumulator-Modell. Der Algorithmus läuft zyklisch im Minutentakt ab und liefert so auch im Kurzzeitbereich noch verlässliche Aussagen. Eingangsgrößen sind die Batterietemperatur (entweder als Messwert oder – falls nicht verfügbar - als Ergebnis der Berechnung des vorhergehenden Rechenschrittes des Akkumulatormodells), der aktuell gemessene Klemmenstrom sowie die Klemmenspannung. Aus Temperatur und Klemmenstrom sowie unter Kenntnis des Vorzustands (als Ergebnis des vorhergehenden Rechenschrittes) ermittelt das Batteriemodell den aktuellen Ladezustand des Akkumulators. Als Kontrollgröße dient die gemessene Klemmenspannung: die Analysefunktion des Batteriebeobachters erkennt Differenzen dieses Messwertes zu der vom Akkumulatormodell gerechneten Klemmenspannung und nimmt bei Abweichungen eine entsprechende Angleichung der inneren Systemgrößen des Akkumulatormodells vor.

Die im Akkumulatormodell berechneten internen Größen können außerdem in einer weitergehenden Analyse des Batteriezustandes - auch unter zusätzlicher Verwendung der aktuell gemessenen Werte - verwendet werden.

Verwendetes Batteriemodell

Das verwendete Bleiakkumulator-Modell nach Müller [2] basiert auf dem in Abbildung 2 gezeigten Ersatzschaltbild. Die Eingangsgröße Gesamtstrom I_{batt} teilt sich an positiver und negativer Elektrode jeweils in den Hauptreaktionsstrom I_{Hr} und den Nebenstrom I_N auf, der die Umladung der Doppelschicht verursacht. Außerdem werden der Innenwiderstand des Akkumulators R_i und der Gasungsstrom I_G berücksichtigt.

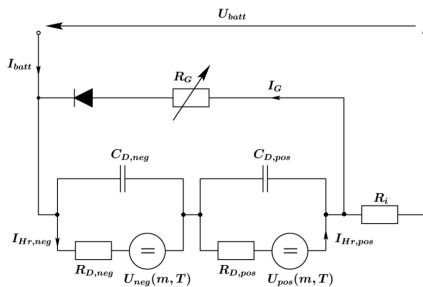


Abbildung 2: Ersatzschaltbild der Bleibatterie

Die Berechnung der einzelnen Elemente des Ersatzschaltbildes erfolgt dabei auf Basis geometrischer Daten des behandelten Akkumulators, wie zum Beispiel Plattengeometrie und -aufbau, Gehäusegrößen und Materialien, die bei der initialen Parametrierung des Modells vorgegeben werden müssen.

Laden oder Entladen des Akkumulators verändern die internen Materialvolumina sowie die Oberflächen und Materialdichten der Platten dynamisch mit der Zeit; diese Phänomene sind in der Modellierung durch eine konsequente Abbildung der auftretenden Prozesse

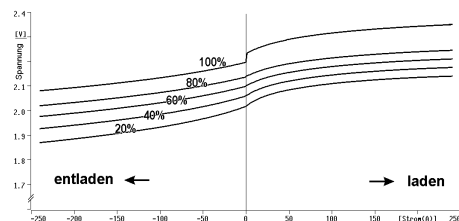


Abbildung 3: Ladezustandsabhängige Spannungs-Stromkennlinie eines nach [2] modellierten Bleiakkumulators

berücksichtigt: Das Modell berechnet die elektrochemischen Umsätze in der Batterie, die Säurekonzentration in den Elektroden und im Außenraum sowie den Diffusionsausgleich zwischen diesen Bereichen. Des Weiteren werden Elektrodenpotenzial, Ruhepotenzial, Innenwiderstand und Gasungsstrom sowie die Sulfatverteilung in den Poren ermittelt. Mit diesen Werten können der Hauptreaktionsstrom, der eine normgerechte Ladezustandsbestimmung durch

Bilanzierung ermöglicht, und die Klemmenspannung der Batterie errechnet werden. Die einzelnen Zusammenhänge sind ausführlich in [2] wiedergegeben. Das Batteriemodell hat sich durch seine hohe Präzision sowohl in der Bestimmung der Klemmenspannung als auch in der Ermittlung des Batterieladezustands in vielen Fällen als besonders geeignet herausgestellt. In Abbildung 3 sind beispielhaft Modellergebnisse in Form von Strom-Spannungs-Scharen für verschiedene Ladezustände, ausgehend jeweils von einem Ruhezustand der Batterie, dargestellt.

Initialisierung

Das Batteriemodell geht in seinem Grundzustand jeweils vom Voll-Ladezustand aus. Da der hier betrachtete Beobachtungsalgorithmus jedoch auch im laufenden Anlagenbetrieb, beispielsweise nach einer Betriebsstörung, startfähig sein muss, ist eine Modellinitialisierung notwendig. In einer Startbeobachtungsphase wird zunächst eine grobe Schätzung des Ladezustandes aufgrund der gemessenen Spannung vorgenommen. Auf dessen Basis werden dann initial die internen Größen des Batteriemodells durch einen virtuellen Entladeprozess angepasst. Das Akkumulatormodell wird dann zyklisch mit den aktuellen Strom- und Temperaturmesswerten aufgerufen und bildet somit ein Abbild der realen Batterie.

Modellkalibrierung

Das Modell des Akkumulators versucht ein möglichst genaues Abbild der Realität wiederzugeben. Allerdings ist sowohl nach dem Neustart der Routine als auch im laufenden Betrieb durch eine Drift im Langzeitbereich eine zunehmende Abweichung zwischen Messwerten und Modellwerten unvermeidlich. Diese wird durch Ungenauigkeiten in der Modellierung und Parametrierung verursacht. Zusätzlich spielen aber auch Fehler bei der Messung der Eingangsgrößen eine Rolle. In der Regel liegen Messwerte von Batterien nur im Raster von mindestens einer Minute vor, die Daten sind dann meist Mittelwerte über den entsprechenden Zeitraum, wodurch kurzzeitige Stromschwankungen und -spitzen nicht repräsentiert sind.

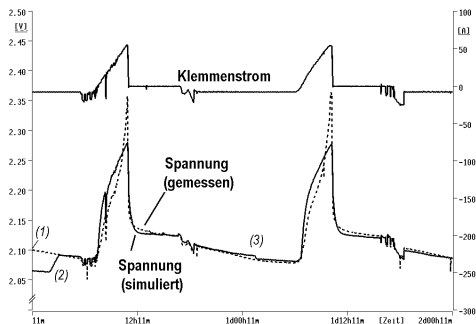


Abbildung 4 Startkalibrierung und Korrektur des Batteriebeobachters

Um die durch diese Drift entstehenden Abweichungen zu minimieren, muss das Modell von Zeit zu Zeit rekaliert werden, so dass die internen Größen den realen Gegebenheiten angepasst werden. Die Notwendigkeit der Rekalibrierung wird dabei vom Batteriebeobachtungssystem durch Analyse der Spannungsabweichung zwischen Mess- und Modellwert erkannt. Die Kalibrierung erfolgt durch virtuelle Lade- bzw. Entladevorgänge des Akkumulator-Modells.

Verifikation

Der Batteriebeobachtungsalgorithmus wurde mit Hilfe von Messwerten aus der Jülicher Solar-Wasserstoff-Demonstrationsanlage PHOEBUS verifiziert. In dieser Anlage sind 110 Akkumulatoren des Typs Hagen OCSM 1380 installiert; die Klemmengrößen Strom, Spannung und Temperatur liegen als Messwerte im Minutentakt vor. In Abbildung 4 ist der Start des Batteriebeobachters am 1. April 1999 um 0:00 Uhr dargestellt. Das Batteriemodell wird

nach dem Start, ausgehend vom Vollladezustand, auf den geschätzten Ladezustand entladen (1). Im anschließenden zyklischen Betrieb rechnet das Modell parallel zum realen Prozess jede Minute den entsprechenden Spannungswert aus. Nach 2 Stunden wird vom Batteriebeobachtungsalgorithmus der erste Kalibrierungsdurchlauf gestartet. Es wird eine erhebliche Abweichung des Modellwertes (durchgezogene Linie) vom gemessenen Zellen-Spannungswert (gestrichelt) erkannt und das Akkumulator-Modell schrittweise „nachgeladen“ (2). Nachdem das Modell einen Tageszyklus „erlebt“ hat, ist ein genaueres Ergebnis der Berechnungen möglich. Um 1 Uhr des Folgetages (3) wird das Modell auf Veranlassung des Beobachtungsalgorithmus wieder etwas entladen und damit ein zuverlässiger Ladezustandswert erreicht. Es ist aber auch ersichtlich, dass das im Beobachtungsalgorithmus verwendete Akkumulator-Modell nach [2] trotz hoher Genauigkeit nicht alle Effekte in einer Bleibatterie berücksichtigen kann. Die Spannungsüberhöhungen sind vermutlich durch inhomogene Säureverteilung oder andere Effekte zu erklären. Solche kurzfristigen Modellfehler sind unvermeidlich, da das Modell nicht die gesamte „Geschichte“ des Akkumulatorbetriebs beobachten konnte. Insgesamt zeigt sich jedoch eine hohe Konstanz bei der Berechnung auch über mehrere Wochen hinweg (Abbildung 5).

Zusätzliche Analysefunktionen

Zusätzlich zur beschriebenen Ladezustandsberechnung ist der Batteriebeobachtungsalgorithmus in der Lage, eine Reihe weiterer Informationen bereitzustellen, die gerade unter dem Gesichtspunkt der Alterungserkennung von Bleiakkumulatoren hilfreich sind. Da ein Alterungsmodell zurzeit nicht Bestandteil des Batteriemodells ist, muss hier eine Beobachtung mit Hilfe rein analytischer Verfahren durchgeführt werden. Hieraus ergibt sich die Möglichkeit, vorzeitige Batteriealterung durch eine vorausschauende Betriebsführung zu vermeiden. Zu den zusätzlichen Funktionen des Batterieobachteters zählen:

- Anregung der Ausgleichladung durch Zyklusanalyse,
 - kompensierte Grenzspannungsüberwachung durch simulative, normgerechte Ladung bzw. Entladung und
 - Ladezustandsprognose durch Hochrechnung auf Basis der aktuellen Betriebsdaten.
- Bei diesen Untersuchungen wird zum Teil eine Kopie des Online-Modells mit seinen aktuellen Betriebsparametern genutzt.

Zusammenfassung

Mit dem vorgestellten Algorithmus wurde ein umfangreiches Batterie-Analysetool geschaffen, das die für eine flexible Betriebsführung von Energieanlagen mit Akkumulatoren erforderlichen Informationen gesichert und detailliert zur Verfügung stellen kann. Eingesetzt wird dieses Programm in einem Managementsystem für dezentrale Energieversorgungssysteme [1] und hat sich hier als verlässlicher Baustein erwiesen.

Literatur

- [1] Beckhaus, P.: *Simulation und Anlagenmanagement für dezentrale Energieversorgungssysteme*; Dissertation, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, 2002, Logos-Verlag Berlin, ISBN 3-89722-992-7
- [2] Müller, C.: *Interaktives Modell für den Betrieb von Photovoltaikanlagen mit Energiespeicherpfadern*; Dissertation, Gerhard-Mercator-Universität GH Duisburg, 1997
- [3] Wollny M., Rotherth, M., Willer B., Bopp G., Sauer D. U., u.a.: *Ladezustandserfassung: Begriffsbestimmungen, Referenzverfahren, Testdatensätze*; Workshop „Elektrochemische Speichersysteme für regenerative Energieversorgungsanlagen“, Ulm, 4.-5.5.1999, Hg.: Forschungsverbund Sonnenenergie

18. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad
Staffelstein, 12.-14.03.2003

Danksagung

Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden in einer Reihe von Forschungsprojekten in den Jahren 1991 bis 2001 an der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg erzielt. Gefördert wurden diese Entwicklungen durch die Arbeitsgemeinschaft Solar des Landes Nordrhein-Westfalen (www.ag-solar.de).

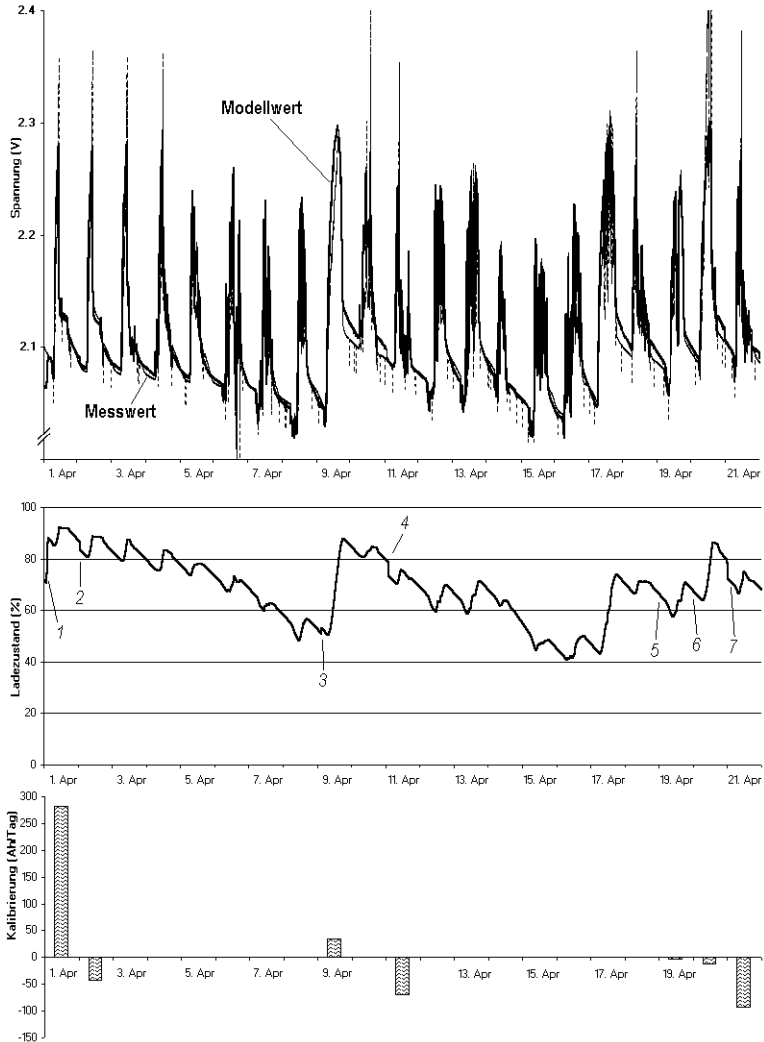


Abbildung 5: Kalibrierung und Korrektur des Batteriebeobachters über einen Zeitraum von 21 Tagen am Beispiel einer 1380Ah-Batterie

State of charge analysis by means of simulative accumulator model

Peter Beckhaus¹, Christian Hardt³, Gerhard Krost², Sina Souzani¹

(¹) Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH Duisburg

Lotharstr. 1, 47057 Duisburg, www.zbt-duisburg.de

Tel.: +49-203-379-3020 / Fax: +49-203-379-3946 / p.beckhaus@zbt-duisburg.de

(²) Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, Elektrische Anlagen und Netze

Bismarckstr. 81, 47048 Duisburg, www.uni-duisburg.de/fb9/ean

(³) Institut für Solare Energieversorgungstechnik ISET

Königstor 59, 34119 Kassel, www.iset.de

Lead acid batteries are common components of large and small energy systems. But the online analysis of them is still a major problem for the setup of control strategies for these systems. The reliable recognition of the battery charge is evident for the control of e.g. hybrid systems. This paper presents a new approach in battery analysis using an algorithm that allows supervising the battery while in operation. The idea of the algorithm is the inclusion of a detailed model to give a numeric basis of the evaluation. The algorithm is running in parallel to the real operation of the battery and uses measurable data like current, voltage and temperature as input for the accumulator-model and for further evaluation purposes.

One aim of the research was to develop a supervising process that is able to self adjust itself even without knowledge of the past of the accumulator operation. This also includes the possibility of a flat start of the process in any situation of battery operation. In fig. 4 the start behaviour of the process is shown: After start the model parameters are being pre-set to an evaluated state of charge (1). With 2 hours of operation the algorithm is able to analyse a good value for the state of charge and recalibrates the model to this value. Measured and calculated voltages are indicating that the models parameters are quite good already. After one night of cyclic operation only a short recalibration fixes the rest-fault. The accumulator model than is able to calculate relevant values for the accumulator state of charge even during the following days, fig. 5. Slight differences between measured and calculated values (due to model faults and accumulator misbehaviour) are still corrected by the process.

The supervising algorithm also is doing further calculations regarding for instance the necessity of overloading the battery and fault analysis of the battery.