

# Batteriediagnostik und Batteriemonitoring in Hybridfahrzeugen

## Battery diagnosis and battery monitoring in hybrid electric vehicles

Tilman Sanders, Julia Kowal, Wladislaw Waag, Jochen Bernhard Gerschler, Dirk Uwe Sauer, RWTH Aachen, ISEA, Aachen, Deutschland

### Kurzfassung

Da auch in konventionellen Fahrzeugen die Belastung der Batterie durch die stetig wachsende Zahl von elektrischen Verbrauchern am Limit ist, ist es von besonderer Bedeutung, Zustand und Leistungsfähigkeit der Batterie zu jedem Zeitpunkt zu kennen. Es hat sich gezeigt, dass die Anforderungen nur erfüllt werden können, wenn die Batteriediagnostik neben Spannungs- und Temperaturmessung auch über eine Strommessung mit einer hohen Genauigkeit über einen weiten Strombereich verfügt.

Die Zustandbestimmung ist durch Kombination verschiedener Verfahren und der Berücksichtigung von Ungenauigkeit von Messdaten und Algorithmen mit hoher Zuverlässigkeit möglich. Grundsätzlich ähnliche Ansätze können für Blei-, Lithium-Ionen- und NiMH-Batterien verwendet werden. Hierbei stellen gerade Verfahren für Bleibatterien ob ihrer Komplexität eine besondere Herausforderung dar.

### Abstract in English

Even in conventional passenger cars the load on the batteries is at its limit due to the increasing number of electrical loads. It is therefore of special importance to know the status and the power capability of the battery at any time. To fulfil these requirements it is necessary that the battery diagnostics has a precise current measurement available in addition to the voltage and temperature measurements.

Battery diagnosis is most successful if different algorithms are combined and errors from the measurements and the algorithms are taken actively into account. The general structure of battery diagnosis algorithms can be used for lead-acid, lithium-ion and NiMH batteries. However, the complexity is highest for lead-acid batteries.

## 1 Einleitung

Batterien sind ein zentraler Bestandteil des elektrischen Bordnetzes konventioneller Fahrzeuge und eine der kritischsten Komponenten in Bezug auf Zuverlässigkeit und Lebensdauer. Laut Pannenstatistik des ADAC sind mit steigender Tendenz 35% der Pannen auf Fehler des elektrischen Systems zurückzuführen [1]. Davon wiederum sind 50% einem Versagen der Batterie zuzurechnen.

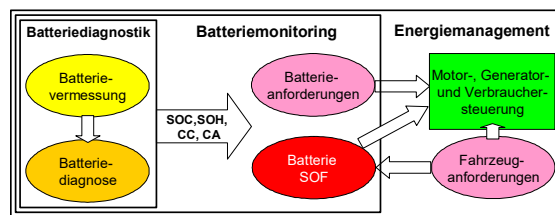
Für einen zuverlässigen Betrieb des Fahrzeugs und ein effizientes Energiemanagement ist eine genaue Bestimmung des Zustands der Batterie notwendig. Dafür müssen Ladezustand, Leistungsfähigkeit und Alterungszustand des Speichers bestimmt werden (Batteriediagnostik). Diese Informationen gibt das Batteriemonitoring an das Energiemanagement weiter, das letztendlich einen Durchgriff auf die Steuerung der Verbraucher und den Generator hat und dabei stets zwi-

schen dem Bedarf des Fahrzeugs und dem Zustand des Speichers abwägt. Die eigentliche Batteriezustandserkennung oder Batteriediagnostik ist unabhängig vom Fahrzeug, in dem es eingesetzt wird, und den Anforderungen des Fahrzeugs. Über die hier beschriebenen Funktionen hinaus, übernimmt das Batteriemonitoring typischerweise auch die Überwachung von sicherheitskritischen Zuständen und kann in kritischen Fehlerfällen eine Notfallabschaltung der Batterie vornehmen.

Die Teilung der Funktionalität in die drei Gruppen ist wichtig, um möglichst allgemeine Ansätze verwenden und die Verantwortlichkeiten für die Bereitstellung von Informationen und das Fällen von Entscheidungen klar zuordnen zu können.

Der Ladezustand (State of Charge – SOC) ist der „Füllgrad“ der Batterie und wird typischerweise als Prozentsatz der Gesamtkapazität ausgedrückt werden. Die Gesamtkapazität ist ein Parameter, der sich durch Alterung und Temperatur stetig verändert. Es ist also in der Regel die Angabe des SOC und der aktuellen Kapazität notwendig, um

aus den Angaben die verfügbare Energiemenge abzuleiten. Der SOC kann auf verschiedene Größen bezogen werden. Für die interne Berechnung des SOC ist es sinnvoll, die sich über die Betriebsdauer nicht ändernde Nennkapazität ( $C_N$ ) zu verwenden. Die Ausgabe an den Nutzer wird besser auf die aktuell verfügbare Kapazität bezogen ( $SOC_{act}$ ).  $SOC_{act}$  nimmt stets Werte zwischen 0 und 100% an, während der auf die Nennkapazität ( $C_N$ ) bezogene Ladezustand je nach Zustand der Batterie und Temperatur auch Werte kleiner 0% annehmen kann [2]<sup>1</sup>. Eine ausführliche Diskussion der Definition von Ladezustand und Kapazität findet sich in Kapitel 3.



**Bild 1:** Schematische Darstellung und Abgrenzung der funktionellen Einheiten „Batteriediagnostik“, „Batteriemonitoring“ und „Energiemanagement“.

Im nachfolgenden Kapitel werden einige Aspekte der Messwerterfassung und der Anforderungen an die Hardware diskutiert (Kapitel 2). Einige generelle Ansätze für die Batteriediagnostik werden kurz in Kapitel 4 beschrieben und im Kapitel 5 wird beispielhaft eine konkrete Umsetzung für NiMH-Batterien vorgestellt.

## 2 Messwerte und Hardwareanforderungen

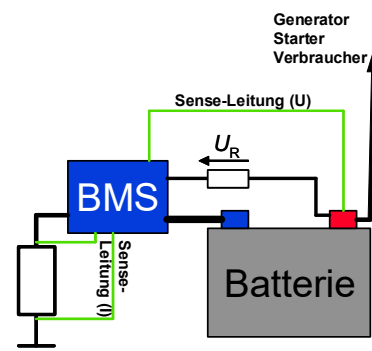
Die grundsätzlichen Anforderungen an die Messtechnik unterscheiden sich nicht für 12 Volt-Starterbatterien und Batterien für Hybridfahrzeuge. Natürlich sind die Spannungslagen unterschiedlich, die eigentlichen Diagnosealgorithmen arbeiten typischerweise aber auf Basis von auf die Zellspannung normierten Werten und sind damit unabhängig von der Spannungslage.

Nachfolgend werden die verschiedenen Messgrößen kurz diskutiert, die typischerweise erfasst werden können. Zusätzliche physikalische Größen wie Elektrolytkonzentration oder Zellinnen-druck, die wertvolle Zustandsinformationen liefern würden, sind hier nicht aufgeführt. Eine

<sup>1</sup> Dies kann z.B. auftreten, wenn bei hohen Temperaturen mehr Ladungsmenge als die Nennkapazität entnommen wird. Per Definition wird aber ein Ladezustand über 100% ausgeschlossen. Der Vollladezustand ist im Gegensatz zum Entladende ein klar definierter physikalischer Zustand.

Messung dieser Größen ist zu vertretbaren Kosten und unter Aufrechterhaltung der notwendigen Zuverlässigkeit über die Lebensdauer des Batteriesystems heute nicht möglich.

**Spannung:** Eine Spannungsmessung an jedem Punkt jenseits der Batteriepole kann zu erheblichen Abweichungen bei der Bestimmung der Batteriespannung führen. Verantwortlich dafür sind die Ohm'schen Spannungsabfälle über den Leitungen. Die an der Batterie tatsächlich anliegende Spannung ist dann geringer als der eigentliche Spannungswert. Daher sollte die Spannungsmessung jeweils möglichst direkt an der Batterie mit Sense-Leistungen abgegriffen werden (Bild 2).



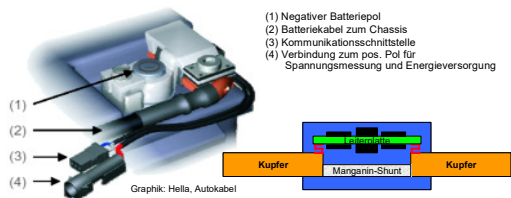
**Bild 2:** Schematische Darstellung von Strom- und Spannungsmessung an einer Batterie mit Sense-Leitungen für Strom- und Spannungsmessung

Messgenauigkeiten von besser als 5 mV/Zelle sind in fast allen Fällen notwendig. Sollen Impedanzparameter bestimmt werden, ist in den meisten Fällen eine deutliche höhere Messgenauigkeit notwendig. Zusätzliche Informationen zur Homogenität der Zellen in Batteriesystemen mit hohen Spannungen und damit einer hohen Anzahl von in Serie geschalteten Zellen sind wertvoll und können durch die Messung von Teilspannungen an einzelnen Zellen oder Strängen erzielt werden.

**Temperatur:** Typischerweise wird heute die Temperatur von Starterbatterien nicht direkt an der Batterie gemessen. Um die Ladeschlussspannung für die Batterie mit der Temperatur zu korrigieren, wird häufig ein Temperaturwert verwendet, der in einem Steuergerät gemessen wird. Dieser Wert wird dann in einigen Fällen mit Hilfe thermischer Modelle auf die Batterietemperatur umgerechnet. Da die Temperatur die Leistungsfähigkeit einer Batterie ganz erheblich beeinflusst, ist eine genaue Kenntnis der Temperatur für die meisten Algorithmen eine wichtige Eingangsgröße. Daher sollte die Temperatur möglichst direkt an der Batterie gemessen werden. Allerdings liefert auch eine Messung der Temperatur direkt am Batteriegehäuse oder dem Batteriepol noch nicht

die Temperatur im Inneren der Batterie. Daher sollten auch in diesem Fall zusätzlich thermische Modelle zur Bestimmung der Batterieinnentemperatur eingesetzt werden. Aber auch diese Modelle können in der Regel nicht die Inhomogenitäten der Temperaturverteilung im Inneren der Batterie wiedergeben, die sich zwangsläufig einstellen [3]. Messgenauigkeiten bei der Temperatur von 1 K sind daher ausreichend.

**Strom:** Eine Strommessung ist für fast alle modernen Verfahren, die auf einer Stromintegration oder adaptiven Batteriemodellen basieren, zur Bestimmung von Ladezustand und Kapazität notwendig. Die besondere Anforderung an die Strommesstechnik in Fahrzeugen ergibt sich aus dem sehr großen Messbereich. Es muss eine hohe Genauigkeit für Ströme zwischen etwa 10 mA und 1000 A erreicht werden, um sowohl die Ruhestrome in Parkphasen als auch Startströme zuverlässig zu erfassen.



**Bild 3:** Schematische Darstellung des intelligenten Batteriesensors von Hella für den Einsatz an 12 Volt-Blei-Starterbatterien und Aufbau für die Strommessung (rechts).

In Klein- und Mittelklassefahrzeugen befindet sich heute noch keine Messtechnik zur Messung des Stromes. Aber durch die neue Generation von Batteriemonitoringsystemen, die speziell für diese Aufgabe entwickelte Mikrocontroller nutzen ([4], [5]) wurde ein Sensor verfügbar, der derzeit bereits in einigen Oberklassewagen eingesetzt wird und dessen Einsatz auch in Klein- und Mittelklassewagen zur Unterstützung des Start/Stop-Betriebs in Vorbereitung ist. Ein System der Firma Hella ist in Bild 3 dargestellt [6], die Firma Bosch bietet ein ganz ähnliches System mit gleicher technologischer Basis in Bezug auf die Strommessung an [7]. Neben dem in Bild 3 dargestellten Konzept mit einer Strommessung über einen niederohmigen Shunt, werden auch Systeme mit Hall-Sensoren zur Strommessung angeboten [8]. Diese haben den Vorteil einer potentialfreien Messung und können problemlos nachgerüstet werden, da keine Integration in ein Kabel notwendig ist. Allerdings wird mit den Shunt-basierten Verfahren eine höhere Messgenauigkeit im ganzen Messbereich erreicht.

**Innenwiderstand und Impedanz:** Das dynamische Verhalten einer Batterie beim Laden oder

Entladen kann nicht vollständig durch Ladezustand, Alterungszustand und Temperatur beschrieben werden. Konzentrationsgradienten im Elektrolyten und die nachfolgenden Diffusions- und Relaxationsprozesse werden bestimmt durch die Kurzfristhistorie, die insbesondere durch das Stromprofil beschrieben werden kann. Impedanzmessungen werden entweder bei bestimmten Frequenzen oder über einen Frequenzbereich durchgeführt und können wertvolle zusätzliche Informationen liefern, die aus Realteil, Imaginärteil oder Betrag und Phasenwinkel abgeleitet werden können. Verfahren mit aktiver Anregung durch Einprägen eines Signals können unterschieden werden von passiver Anregung, bei der nur die im Bordnetz bereits vorhandenen Stromschwankungen als Anregungssignal verwendet werden. In jedem Fall wird eine genaue und zeitgleiche Messung von Strom und Spannung benötigt. Innenwiderstände von Starterbatterien liegen typischerweise im Bereich von 10 mΩ und darunter. Die Messgenauigkeit sollte bei etwa 0,1 mΩ liegen.

### 3 Definition von Kapazität und Ladezustand

In der Literatur findet sich eine Vielzahl unterschiedlicher Definitionen für die Kapazität und damit auch für den Ladezustand. Noch problematischer ist die Tatsache, dass oftmals Kapazitäten und Ladezustände angegeben werden, ohne dass klar definiert ist, auf was sich die Werte beziehen. Nachfolgend wird eine in sich schlüssige Definition für Kapazitäten und Ladezustände gegeben, auf die im Prinzip alle Fälle abgebildet werden können. Die Definitionen wurde erarbeitet für Bleibatterien, sind aber für andere Batterietechnologien direkt übertragbar. Dabei berücksichtigen die Definitionen folgende Einflüsse auf die Kapazität<sup>2</sup>:

**Volladung** – Der einzige physikalisch-chemisch eindeutig definierte Zustand für wiederaufladbare Batterien ist die Vollladung. Wenn alle noch aktiven und verfügbaren Teile der Aktivmassen in den geladenen Zustand gebracht worden sind, dann kann der Ladezustand nicht mehr weiter erhöht werden. Fließt bei der Ladung trotzdem

<sup>2</sup> Bei Batterien wird typischerweise immer die Kapazität als Maß für die Größe bestimmt. Mit Kapazität wird die Ladungsmenge, gemessen in As oder Ah, angegeben. Diese Strommenge kann direkt mit der Umsetzung von Material in den chemischen Reaktionen korreliert werden. Die entnommene Energie hängt dagegen von verschiedenen weiteren Faktoren wie dem Batteriestrom und der Temperatur ab.

noch Strom, geht dieser in eine Nebenreaktion wie Gasung oder Korrosion und führt zu keiner Erhöhung des Ladezustands mehr.

**Art der Vollladung** – Unterschieden wird eine maximale Vollladung entsprechend der Vorgaben der Batteriehersteller (für Blei-Starter-Batterien mit flüssigem Elektrolyt z.B. die EN-Ladung: 24 Stunden Ladung bei 16 Volt und 25°C) und der im normalen Betrieb maximal erreichbaren Vollladung (in Kraftfahrzeugen ist dies z.B. eine Ladung mit 14.7 Volt bei 25°C und 3 Stunden Konstantspannungsladung). Die maximale Vollladung wird mit *EN* und die Betriebsvollladung mit *Operational* bezeichnet. Nur die *EN*-Vollladung entspricht der vorstehenden Definition einer echten Vollladung (siehe auch Bild 4).

**Kapazitätsverlust** – Unterschieden werden zwei Arten des Kapazitätsverlusts. Der irreversible Kapazitätsverlust beschreibt den Verlust an entnehmbarer Ladungsmenge durch Alterung, der auch durch optimale Ladeverfahren nicht rückgängig gemacht werden kann. Der reversible Kapazitätsverlust beschreibt dagegen den Verlust an verfügbarer Ladungsmenge, der den aktuellen Betriebsbedingungen zuzuordnen ist. Dazu gehören z.B. unvollständige Ladungen durch zu geringe Spannung oder zu geringe Ladedauer. Reversible Kapazitätsverluste können durch eine geeignete Behandlung der Batterien rückgängig gemacht werden. Dem Nutzer steht aber nur die um den reversiblen Kapazitätsverlust reduzierte Kapazität zur Verfügung.

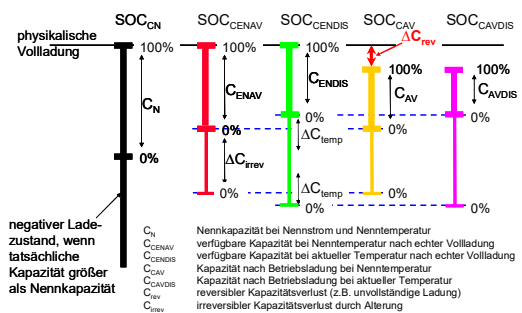
**Temperatur** – Für fast alle Batterietechnologien steigt die entnehmbare Kapazität mit steigender Temperatur. Entsprechend sinkt die entnehmbare Kapazität, wenn die Temperatur sinkt. Die Temperatur ist eine relativ langsam veränderliche Größe, deswegen kann eine aktuelle Kapazität in Abhängigkeit der Temperatur bestimmt werden.

**Stromstärke** – Typischerweise sinkt mit zunehmender Stromstärke die entnehmbare Kapazität. Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt für Bleibatterien. Die Definition einer sich verändernden Kapazität ist aber für den Betrieb im Feld kaum möglich, da auch die längerfristige Vergangenheit und nicht nur die aktuelle Stromstärke eine Auswirkung hat. Zudem wechseln die Stromstärken sehr schnell. Würde bei jeder Änderung der Stromstärke eine neue Kapazität und damit ein veränderter Ladezustand angegeben, wäre dies für ein Batterie- und Energiemanagement vollkommen inakzeptabel, da auf dieser Basis keine sinnvollen Managemententscheidungen getroffen werden können. Daher werden alle Ka-

pazitäten in Bezug auf den Nennstrom  $I_N$  angegeben.

Daraus ergeben sich verschiedene Definitionen der Kapazität. Die Nennkapazität ist eine vom Hersteller für eine bestimmte Temperatur  $T_N$  und einen bestimmten Entladestrom  $I_N$  angegebene Kapazität, die bei einer Entladung bis zur definierten Entladeschlussspannung  $U_{entlade}$  nach einer optimalen Vollladung (*EN*-Ladung) entnommen werden kann. In Deutschland werden bei Starterbatterien typischerweise die folgenden Parameter verwendet:  $T_N = 25^\circ\text{C}$ ,  $I_N = I_{20}^3$ ,  $U_{entlade} = 10,5 \text{ V}$ . Die Nennkapazität wird als eine Invariante behandelt. Diese Kapazität ist aber nur in Ausnahmefällen identisch mit der Anfangskapazität, also der Kapazität, die man unter den für die Nennkapazität definierten Randbedingungen für die neue Batterie erhält. Diese kann höher oder niedriger als die Nennkapazität ausfallen.

Im Einzelnen werden neben der Nennkapazität  $C_N$  vier weitere Kapazitätswerte definiert. Details zu den aktuellen Definitionen finden sich in [19].

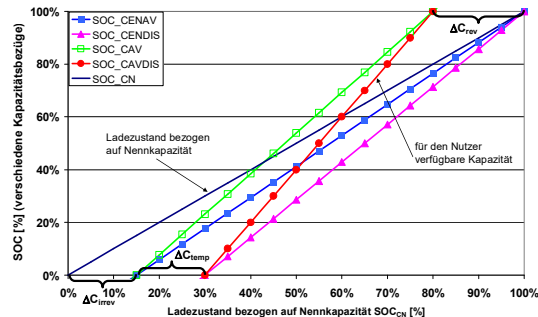


**Bild 4: Schematische Darstellung verschiedener Kapazitätsdefinitionen und der zugehörigen Ladezustandsskalen. Weitere Erläuterungen im Text.**

Aus dem Verhältnis aus verfügbarer bzw. entnehmbarer Ladungsmenge und den entsprechend unterschiedlich definierten Kapazitätswerten (siehe [19]) ergibt sich der auf die jeweilige Kapazitätsdefinition bezogene Ladezustand. In Bild 4 sind die Ladezustandsdefinitionen dargestellt. Dabei kann der Ladezustand auf keiner Skala über 100% hinausgehen. Ladezustände kleiner 0% können bei  $SOC_{CN}$  auftreten, wenn die Batterie über mehr Kapazität verfügt, als durch die Nennkapazität definiert ist. Auf allen anderen Skalen können negative Ladezustände nur dann auftreten, wenn die Batterien bei Strömen kleiner als der Nennstrom entladen werden.

<sup>3</sup> Batterieströme werden typischerweise in relativen Einheiten angegeben. Die Angabe  $I_{20}$  ist z.B. der Strom, mit dem die Batterie in 20 Stunden beginnend bei einer EN-Volladungen unter den Nennbedingungen entladen werden kann. Der Index bezeichnet also die Entladedauer. Die Nennkapazität ergibt sich dann zu  $C_N = 20 \times I_{20}$ .

Um aus einer Ladezustandsangabe schließen zu können, welche Ladungs- oder Energiemenge noch zur Verfügung steht, muss stets zusätzlich zum Ladezustand die Kapazität angegeben werden, auf deren Skala der Ladezustand definiert ist.



**Bild 5: Zusammenhang der Ladezustände in Bezug auf die verschiedenen Kapazitätsdefinitionen. Annahme für Berechnung: Nennkapazität  $C_N = 100$  Ah, Kapazität der neuen Batterie entspricht  $C_N$ , irreversibler Kapazitätsverlust  $\Delta C_{irrev} = 15$  Ah, reversibler Kapazitätsverlust  $\Delta C_{rev} = 20$  Ah, Kapazitätsabnahme durch Temperatur kleiner als Nennkapazität  $\Delta C_{temp} = 15$  Ah.**

Alle Ladezustände können durch Dreisatz ineinander umgerechnet werden, wenn die Kapazitätswerte bekannt sind. Bild 5 zeigt ein Beispiel für eine Batterie, die bei tiefen Temperaturen betrieben wird und sowohl einen reversiblen als auch einen irreversiblen Kapazitätsverlust aufweist. Die Daten sind typisch für eine Starterbatterie mittleren Alters in den Wintermonaten. Die Abbildung zeigt, wie sich die Ladezustandswerte auf den verschiedenen Skalen als Funktion des auf die Nennkapazität bezogenen Ladezustands verhalten.

Es wird deutlich, wie wichtig saubere Definitionen von Kapazitäten und Ladezustand sind. Ohne die Angabe der Definition haben die Werte nahezu keine Aussagekraft. Die Darstellung verdeutlicht aber auch, dass eine präzise Bestimmung des Ladezustands von einer genauen Bestimmung des reversiblen ( $\Delta C_{rev}$ ) und des irreversiblen ( $\Delta C_{irrev}$ ) Kapazitätsverlusts sowie der temperaturabhängigen Kapazitätsänderung ( $\Delta C_{temp}$ ) abhängt.

#### 4 Verschiedene Verfahren zur Zustandsbestimmung

Die Bestimmung der Batteriezustandsvariablen ist auch dann schwierig, wenn die gemessenen Daten mit hoher Genauigkeit und Zuverlässigkeit vorliegen. Hersteller und Vertreiber von Batteriediagnose- und Batteriemonitoringsystemen geben

in der Regel keine Details zu ihren Verfahren bekannt. Es findet sich in der Literatur aber eine Reihe von wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu diesem Thema. Dabei ist allerdings festzustellen, dass viele der dort vorgeschlagenen Verfahren für die Anwendung in der Praxis wenig geeignet sind. Die Gründe dafür lassen sich vor allem in zwei Klassen einteilen:

1. Die Algorithmen sind nicht robust genug in Bezug auf die schwierigen Einsatzbedingungen im Feld.
2. Die Algorithmen haben einen hohen Rechen- und Speicherbedarf, der auf kostengünstigen Mikrocontrollern im Feldeinsatz nicht bereitgestellt wird.

Nachfolgend sind einige Ansätze kurz beschreiben, die bei Beachtung der Spezifikation verschiedener Batterietechnologien in verschiedenen Modifikationen auch für unterschiedliche Batterietechnologien eingesetzt werden können.

Die **Ah-Integration** benötigt eine hohe Genauigkeit der Strommessung sowohl während Parkphasen (einige 10 mA) als auch während Startvorgängen (einige 100 A). Ein Fehler von nur 10 mA führt in 7 Tagen bei einer 50 Ah-Batterie bereits zu einem Fehler von mehr als 3% in der Ladezustandsbestimmung. Zusätzlich ergeben sich Fehler aus einer unvollständigen Erfassung der internen Verluste. Als Basis für die Batteriediagnose wird aber heute kaum noch auf die Ah-Integration in Verbindung mit weiteren Verfahren verzichtet. Die Einführung neuer, hochgenauer Stromsensoren (siehe Kapitel 2) hat dieses Verfahren erheblich voran gebracht. Dennoch ist die Ah-Bilanz nie langzeitstabil und kann daher nur in Kombination mit stützenden Verfahren eingesetzt werden.

Eine Messung der **Ruhe-spannung** als Indikator für den Ladezustand kann nur im Ruhezustand durchgeführt werden, wenn ausreichend Zeit zum Ausgleich der inneren Diffusionsvorgänge vergangen ist. Effekte wie Säureschichtung in Bleibatterien [9] oder die Hysterese in NiMH-Batterien [10] können aber auch dann noch zu erheblichen Fehlern führen. Je nach Batterietechnologie können die Abweichungen zwischen tatsächlichem und über die Ruhespannung bestimmtem Ladezustand mehr als 50% betragen.

Verschiedene Verfahren verwenden **Impedanzmessungen**. Dabei wird die Impedanz entweder bei einer einzelnen Frequenz oder über einen weiten Frequenzbereich bestimmt. Die Verfahren unterscheiden sich auch darin, ob Realteil, Betrag, Phasenwinkel oder Imaginärteil bestimmt werden. Impedanzdaten können insbesondere zur

Bestimmung der Hochstromfähigkeit der Batterie verwendet werden, aber auch Verfahren zur Bestimmung des Ladezustands aus dem Innenwiderstand der Batterie sind bekannt [11]. Bestimmte Alterungserscheinungen, wie Korrosion oder die Ablösung von Elektroden, können ebenfalls durch Impedanzmessungen detektiert werden [12].

**Batteriemodelle** mit unterschiedlichen Komplexitätsgraden werden eingesetzt, um über das Modell auf die inneren Zustandsparameter zu schließen, die einer Messung nicht direkt zugänglich sind. Eingesetzt werden heuristische Modelle oder stark vereinfachte physikalisch-chemische Modelle, wobei letztere im Prinzip genauer sind, dafür aber wesentlich mehr Informationen für die Parametrierung benötigen und dementsprechend instabiler in Bezug auf Parameterabweichungen, z.B. in Folge von Fertigungstoleranzen, sind. Um die inneren Zustände zu bestimmen, werden oftmals Beobachtersysteme wie der Kalman-Filter verwendet, die aus dem Vergleich der Messgrößen und der Modellausgabe eine Adaption der inneren Parameter bis zur Übereinstimmung von Modell und Messung durchführen [13]. Eine vollständige physikalisch-chemische Beschreibung der Batterie durch ein Modell scheitert im Fahrzeug in der Regel an dem hohen Rechen- und Speicheraufwand solcher Modelle.

**Selbstlernende und selbstadaptierende Kennfelder**, die kontinuierlich die Prognose mit dem tatsächlichen durch die Messungen dokumentierten Zustand der Batterie abgleichen und sich bei auftretenden Abweichungen automatisch anpassen, sind ein effizientes Verfahren um die sich mit der Alterung der Batterien kontinuierlich ändernden Eigenschaften zu erfassen. Zudem können diese Verfahren sich auch an unterschiedliche Batterien anpassen, die aufgrund von Fertigungstoleranzen oder unterschiedlicher eingesetzter Materialien eine vom Standard abweichende Charakteristik aufweisen. Selbstadaptierende Kennfelder können für verschiedene Klassen von Daten eingesetzt werden, z.B. für Leistungspulse, Startpulse oder Abhängigkeiten der Kapazität von der Temperatur [1].

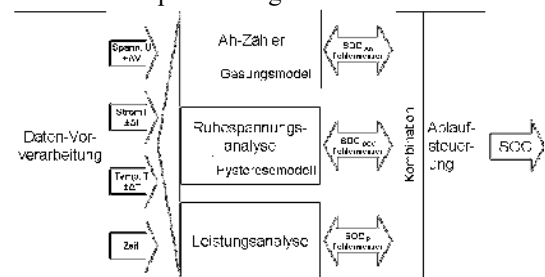
## 5 Batteriediagnostik für NiMH-Batterien

In Fahrzeuganwendungen ist die Lebensdaueranforderung wesentlich höher als in Consumeranwendungen. Typischerweise werden mehr als 10 Jahre wartungsfreie Lebensdauer erwartet. Dies

kann nur durch ein verbessertes Zelldesign und ein intelligentes Batteriemangement erreicht werden. Dafür müssen Ladezustand (state of charge – SOC) und Alterungszustand (state of health – SOH) ebenso wie die Leistungsfähigkeit (state of function – SOF) zu jedem Zeitpunkt genau bestimmt werden.

Standardansätze, die auf reiner Ah-Bilanzierung, auf Ruhespannungsmessungen oder auf Vergleichstabellen basieren, können die notwendige Zuverlässigkeit nicht erreichen. Bei NiMH-Batterien stellen insbesondere der geringe Ah-Wirkungsgrad und eine starke Hysterese der Ruhespannung (open circuit voltage – OCV) große Anforderungen an die Verfahren, um eine Langzeitstabilität zu erreichen.

Um dies zu erreichen, wird eine Kombination verschiedener Verfahren verwendet, die sich gegenseitig stützen und in verschiedenen Betriebsbereichen unterschiedlich genaue Ergebnisse liefern. Für das Beispiel eines Batteriemagements für NiMH-Batterien werden dafür die Ruhespannung, die gemessene Leistungsfähigkeit, die Ah-Bilanz inklusive eines Gasungsansatzes und ein Hysteresemodell der Ruhespannung verwendet. Die Modelle tauschen Daten und Informationen untereinander aus. Jedes Verfahren bestimmt auch seine momentane Genauigkeit und aus der Gesamtheit der Informationen aus allen Modellen inklusive der angenommenen Genauigkeit wird eine Aussage über die Zustände der Batterie getroffen. Durch die Redundanz der Modelle wird eine wesentlich höhere Sicherheit in den Aussagen erreicht, als dies mit einem einzelnen Modell möglich wäre. Zudem sinken die Anforderungen an die Hardware, da auch weniger genaue Messwerte zu akzeptablen Ergebnissen führen.



**Bild 6: Schematische Darstellung eines robusten Algorithmus für die Ladezustands und Zustandsbestimmung von Batteriespeichern**

Bild 6 zeigt schematisch den Aufbau des Gesamtverfahrens, das ausgehend von der Erfassung und Aufarbeitung der Messwerte für Strom, Spannung, Temperatur und Zeit unter konsequenter Berücksichtigung der zu erwartenden Fehler durch verschiedene Verfahren und Algorithmen den Ladezustand bestimmt.

Im Folgenden wird nur auf einige Verfahren zur Bestimmung des Ladezustands eingegangen. Weitere Verfahren zur Ladezustandsbestimmung sowie zur Leistungsvorhersage finden sich in [14]

## 5.1 Ladezustand

### 5.1.1 Ah-Bilanz und Gasungsmodell

Eine Ah-Bilanz integriert die Ladungsmenge, die der Batterie zugeführt oder entnommen wird, über einen bestimmten Zeitraum auf. Aus dem Verhältnis des aktuellen Werts der Ladebilanz und der Nennkapazität kann der aktuelle Ladezustand bestimmt werden, wenn der Startwert für den Ladezustand und der Anteil des Stroms, der in Nebenreaktionen fließt und nicht zur Aufladung der aktiven Massen führt, bekannt sind.

Prinzipiell ist die Ah-Bilanzierung das genaueste Verfahren zur Bestimmung des Ladezustands. Allerdings geht die Genauigkeit verloren, wenn sich über die Zeit Fehler in der Strommessung aufsummieren, die inneren Verluste nicht präzise bestimmt werden können oder der Startladezustand nicht ausreichend genau bekannt ist. In der Praxis treffen alle drei vorgenannten Probleme auf und damit verliert die Ah-Bilanz mit zunehmender Bilanzierungsdauer an Genauigkeit.

$$SOC_N(t) = SOC_N(t_0) + \frac{1}{C_N} \cdot \int_{t_0}^{t_0+t} (i_{bat}(\tau) - i_{verlust}(\tau)) d\tau \quad (1)$$

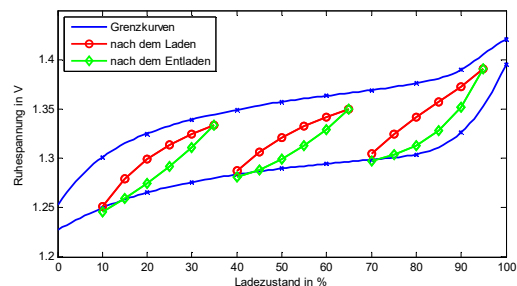
Für die inneren Verluste durch Nebenreaktionen wird angenommen, dass diese bei NiMH-Batterien allein durch die Zersetzung von Wasser, der so genannten Gasung, entstehen. Der Gasungsstrom wird dabei mit einer exponentiellen Abhängigkeit von Spannung und Temperatur modelliert. Der gleiche Ansatz mit einem entsprechenden Satz Parameter kann auch für Bleibatterien verwendet werden.

Da sich die Gasungscharakteristik mit der Betriebsdauer ändert oder durch Fertigungstoleranzen Unterschiede zwischen verschiedenen Batterien auftreten, müssen andere Verfahren die Ah-Bilanzierung stützen und regelmäßig korrigieren. Allerdings kann kein anderes Verfahren die kurzfristige dynamische Änderung des Ladezustands so genau anzeigen, wie eine Ah-Bilanz. Die diskutierten Fehler spielen über kurze Integrationszeiten keine Rolle und so lässt sich die Änderung des Ladezustands z.B. im dynamischen Fahrzeugbetrieb sehr genau an der Ah-Bilanz ablesen.

Korrekturen sind also nur in Bezug auf die langfristige Drift notwendig.

### 5.1.2 Leerlaufspannung und Hysterese-Modell

Eines der stützenden Verfahren ist die Auswertung der Leerlaufspannung („open circuit voltage“, OCV), die gemessen werden kann, wenn über längere Zeit hinweg kein Strom mehr geflossen ist, also z.B. dann, wenn das Fahrzeug geparkt ist und die Batterie dabei von allen Verbrauchern getrennt ist. Fließt weiterhin ein kleiner Laststrom, muss eine entsprechende Kompensation vorgenommen werden. Wie bei den meisten Batterien sinkt bei NiMH-Batterien die Leerlaufspannung mit zunehmender Entladetiefe. Allerdings weist die NiMH-Batterie eine Besonderheit auf, die eine Ladezustandsbestimmung aus der Ruhespannung erheblich erschwert. Die Leerlaufspannung zeigt eine ausgeprägte Hysterese in Abhängigkeit der Vorgeschichte der Batterie [15]. Wird der gleiche Ladezustand aus einer Ladung oder einer Entladung heraus angefahren, ergeben sich unterschiedliche Leerlaufspannungen. Bild 7 zeigt eine bei Raumtemperatur aufgezeichnete Ruhespannungs-Hysterese einer NiMH-Zelle.



**Bild 7: Gemessene Leerlaufspannung einer NiMH-Zelle bei 25°C. Die obere und die untere Grenzkurve der Hysterese ergeben sich bei einem vollständigen Lade- bzw. Entladezyklus. Die kleineren Teil-Hysteresen resultieren aus Teilzyklen. Die markierten Punkte sind Messwerte, bestimmt nach jeweils zwei Stunden Ruhezustand.**

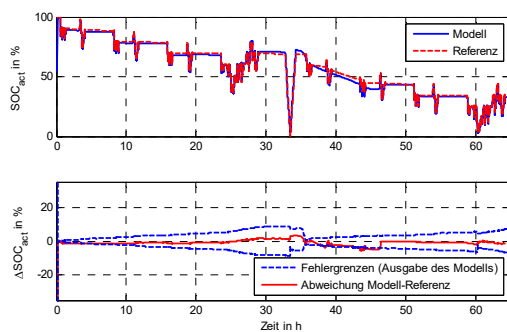
Wird die Hysterese nicht berücksichtigt, ist die Ladezustandsbestimmung aus der Leerlaufspannung praktisch wertlos. Für die Zelle, die für die Kurven in Bild 7 vermessen wurde, kann eine Ruhespannungsmessung von 1,31 Volt jeden Ladezustand zwischen 15 und 85% bedeuten.

Genauere Informationen zum Hysterese-Modell finden sich in [14].

## 5.2 Vergleich zwischen Messung und Echtzeit-Prognose

Simulationen mit realistischen Strom-, Spannungs- und Temperaturprofilen wurden zur Validierung der beschriebenen Verfahren durchgeführt.

Für die Validierung der Ladezustandsbestimmung wurde ein Stromprofil, das typische Fahrbedingungen für eine Hybridbatterie simuliert, auf eine 6,5 Ah NiMH-Zelle gegeben. Der Zyklus enthält Ruhephasen, Temperaturänderungen im Bereich zwischen  $-20^{\circ}\text{C}$  und  $40^{\circ}\text{C}$  und überstreicht den gesamten Ladezustandsbereich. Der Referenzladezustand wurde durch eine definierte Vollladung zu Beginn des Tests, eine Zwischenentladung nach 33 Stunden sowie einer Bestimmung der Restentladung am Ende des Tests bestimmt. Zwischen diesen Fixpunkten wurden der Referenzladezustand durch Stromintegration und einer für die jeweiligen Abschnitte berechneten Korrektur des Verluststroms bestimmt. Dem zu validierenden Algorithmus stehen die Informationen aus den Referenzpunkten nicht zur Verfügung. Startpunkt für den Algorithmus ist ein Ladezustand von 50%. Bild 8 zeigt einen Vergleich des Referenzladezustands mit der Ausgabe des Algorithmus. Es ergeben sich Abweichungen bis zu 5%. Das Vertrauensintervall für den Ladezustand hat eine maximale Breite von  $\pm 9\%$ .



**Bild 8:** Vergleich des mit dem Algorithmus bestimmten Ladezustands aus Messdaten und einem Referenzladezustand (obere Graphik) sowie den Abweichungen zwischen den beiden Werten (untere Graphik). Zusätzlich zeigt die untere Graphik die vom Verfahren ausgegebenen Genauigkeitsgrenzen.

## 6 Besonderheiten weiterer Batterietechnologien

Vorstehend wurde exemplarisch das Konzept eines Batteriemonitoringsystems am Beispiel von

NiMH-Batterie dargestellt. Dieses Konzept kann in seiner Struktur auch auf andere Speichertechnologien übertragen werden. Dabei sind jeweils einige technologie-spezifische Effekte zu beachten, die nachfolgend diskutiert werden sollen.

### 6.1 Blei-Batterien

Blei-Batterien stellen für die Batteriediagnostik eine besondere Herausforderung dar. Unterschieden werden muss zwischen den verschlossenen Batterien, in Kraftfahrzeugen wird der Vlies-Batterietyp eingesetzt, und den geschlossenen Batterien mit flüssigem Elektrolyten.

In Blei-Batterien treten eine Vielzahl von Alterungsmechanismen auf, die Kapazität ist sehr stark von Temperatur und Stromstärke abhängig und aufgrund der aktiven Rolle des Elektrolyten bei den Elektrodenreaktionen treten ausgeprägte Relaxationsprozesse und Ungleichgewichte auf. Hier ist insbesondere das Phänomen der Säure-schichtung zu nennen, in dessen Folge die Korrelation zwischen Ruhespannung und Ladezustand sehr schlecht ist und damit eine Stützung des Ladezustands über die Ruhespannung kaum zuverlässig möglich ist. Eine Verbesserung der Prognose kann nur erreicht werden, wenn die Säure-schichtung aktiv modelliert wird, was einen erheblichen Modellentwicklungs- und Rechenaufwand bedeutet.

Lade- und Entladeprozess sind in Bleibatterien stark asymmetrisch, so dass aus dem Verhalten im Entladefall nur sehr begrenzt auf den Ladefall geschlossen werden kann. Dazu kommt insbesondere für die Ladeakzeptanz eine starke Abhängigkeit von der Vorgeschichte und es sind starke reversible Alterungseffekte zu beobachten, die die Bestimmung des aktuellen Zustands schwierig machen [16].

Für die Ladezustandsbestimmung besteht ein weiteres Problem darin, dass eine vollständige Ladung der Batterie sehr lange dauert und z.B. in konventionellen Kraftfahrzeugen so gut wie nie vorkommt. Damit kann eine Rekalibrierung des Ladezustands durch Erkennung der Vollladung quasi nicht erreicht werden.

In verschlossenen Bleibatterien sind die Diffusionszeitkonstanten für Elektrolytgradienten wesentlich länger. Daraus folgt, dass lange Warteperioden eingehalten werden müssen, bis eine Bestimmung des Ladezustandes aus der Ruhespannung zu zuverlässigen Ergebnissen führt.

Eine Möglichkeit zur Stützung des Ladezustands sind Expertensysteme, die aus der Beobachtung von Zustandsgrößen wie Strom, Spannung und



Temperaturen Abschätzung auf den Ladezustandsbereich zulassen und mit deren Hilfe die Ah-Bilanzierung gestützt werden kann [17], [9].

## 6.2 Lithium-Ionen-Batterien

Lithium-Ionen-Batterien weisen in den heute eingesetzten Produkten keine nennenswerten Nebenreaktionen auf. Dadurch wird eine Ah-Bilanzierung nicht durch eine ungenaue Berücksichtigung von inneren Ah-Verlusten gestört.

Die Ruhespannung hat eine deutliche Abhängigkeit vom Ladezustand (außer bei  $\text{LiFePO}_4$ ) und kann daher gut für eine Ladezustandsbestimmung herangezogen werden. Bei Temperaturen oberhalb von  $10^\circ\text{C}$  dauert auch die Relaxation der Überspannung nicht sehr lange, so dass nach längstens zwei Stunden sehr stabile Werte abgelesen werden können. Allerdings haben Messungen an verschiedenen Lithium-Ionen-Batterien auch eine leichte Hysterese in der Ruhespannung abhängig von der Vorgeschichte gezeigt. Die Hysterese ist allerdings wesentlich kleiner als bei NiMH-Batterien und führt bei Nichtbeachtung nur zu begrenzten Fehlern.

Bei moderaten und hohen Temperaturen ist die Leistungsfähigkeit in weiten Ladezustandsbereichen nur wenig vom Ladezustand abhängig.

Aufgrund der Empfindlichkeit der Lithium-Ionen-Batterien bei Überladungen oder Tiefentladungen ist eine Überwachung der Spannung aller Zellen notwendig. Droht die Über- oder Tiefentladung muss die Batterie durch Leistungsreduktion oder Abschalten geschützt werden. Insgesamt ist die Sicherheitsüberwachung von Lithium-Ionen-Batterien eine zentrale Aufgabe des Batteriemonitorings.

## 6.3 Doppelschichtkondensatoren (SuperCaps)

Die Zustandsbestimmung ist bei SuperCaps etwas einfacher, als bei den klassischen Sekundärbatterien. Der Ladezustand kann hier nach kurzer Ruhephase zuverlässig aus der Ruhespannung bestimmt werden. Das mehr als wenige 10 Sekunden zurückliegende Belastungsprofil hat kaum Einfluss auf das elektrische Verhalten und die Alterung führt im Wesentlichen zu einer Zunahme des Innenwiderstands und zu einer Abnahme der Kapazität. Beide Größen lassen sich gut mittels aktiver oder passiver Impedanzmessung bestimmen [18].

Während Standzeiten findet in den ersten Stunden eine starke Selbstentladung statt, die bei der

Vorhersage des Ladezustands berücksichtigt werden muss. Das Batteriemonitoring kann diesen Zustand aber gut verfolgen, da sich die Selbstentladung in einer direkten Abnahme der Ruhespannung ausdrückt.

## 7 Grenzen der Genauigkeit der Ladezustandsbestimmung

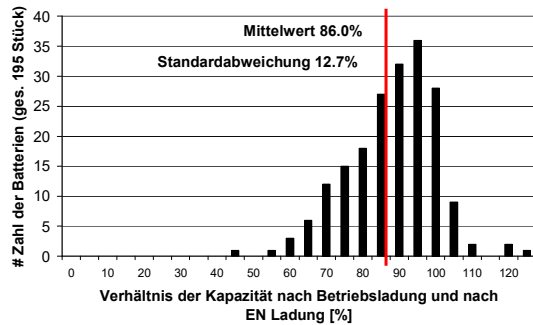
Vor dem Hintergrund der vorstehend genannten Probleme, ist insbesondere bei Bleibatterien die Bestimmung der verfügbaren Kapazität mit großen Fehlern belastet. Aufgrund der starken Abhängigkeiten von Temperatur und Strom, insbesondere aber dem großen Unsicherheitsfaktor bei der Definition einer vollen Batterie, ergeben sich bei Batterien aus dem normalen Kfz-Betrieb bereits Unterschiede in der Kapazität nach einer im Fahrzeug maximal möglichen Ladung (Betriebsladung) und einer ausführlichen Ladung nach einem von den Batterieherstellern empfohlenen Ladeverfahren (EN-Ladung) von im Mittel 14% mit einer Standardabweichung von 12,7% (Bild 9, [16]). Die Problematik der verschiedenen Faktoren, die die Kapazität bestimmen, wurde in Kapitel 3 bereits diskutiert.

In der Konsequenz heißt dies, dass ein Nutzer im normalen Betrieb alleine durch die Unkenntnis darüber, wie stark die Batterie nach einer Ladephase in Bezug auf die maximal mögliche Ladung geladen ist, Fehler im deutlich zweistelligen Prozentbereich macht. Zusätzlich kann die Batterie bei höheren Temperaturen noch besser geladen werden. Dadurch kann die entnehmbare Kapazität unter gleichen Bedingungen (z.B.  $25^\circ\text{C}$ ,  $I_{20}$ ) abhängig von der vorhergehenden Ladung um weitere 10% variieren [16]. Für eine Validierung einer Ladezustandsausgabe stellt dies erhebliche Probleme da, weil die Referenzpunkte bei der Vollandung bereits erheblichen Fehlern bzw. Interpretationsbedarf unterliegen. Wenn aber bereits die Referenzpunkte derartigen Fehlern unterliegen, folgt auch, dass Ladezustandsangaben nur eine begrenzte Genauigkeit haben können.

Eine weitere Schwierigkeit stellt die Validierung von Ladezustandsanzeigen dar. Dafür muss ein Referenzladezustand bestimmt werden, der mindestens auf der Angabe eines Startwertes für den Ladezustand, der zugrunde zu legenden Kapazität und einer Referenzmessung durch eine Restentladung zur Bestimmung der entnehmbaren oder der verfügbaren Kapazität besteht. Neben der Restentladung muss auch für die Bestimmung der Kapazität eine Entladung der Batterie vorgenommen werden. Für verschiedene Starterbatterie-

rien sind aber irreversible Kapazitätsverluste durch einzelne Entladungen mit  $I_{20}$  von 10% der Kapazität und mehr festgestellt worden<sup>4</sup>. Jede Bestimmung der Referenzpunkte hat also direkt auch wieder ein Einfluss auf den Zustand der Batterie selber.

Bei Bleibatterien, die bereits einige Zeit im Feld Einsatz sind, ist eine nachweisbare Genauigkeit von besser als 10% für den maximalen Fehler nicht erreichbar. Genauere Werte sind nur für ganz neue Batterien und zeitlich begrenzte Zeiträume nach einer maximalen Vollladung möglich.



**Bild 9:** Ergebnisse eines Feldtests, bei dem 195 Batterien zufällig aus Kraftfahrzeugen ausgebaut wurden (Alter ein bis fünf Jahre, alle Batterien mit flüssigem Elektrolyten). Die Kapazität wurde bestimmt nach einer Operational-Ladung (IU-Ladung mit 3 Stunden U-Ladung bei 14,7 V und 25°C) und in gleicher Weise nach einer EN-Ladung (IU-Ladung über insgesamt 24 h bei 16 V und 25°C). Daten aus [16].

Da die Vollladung bei den NiMH- und Li-Ionen-Batterien sowie bei SuperCaps in mittleren Temperaturbereichen wesentlich einfacher zu erreichen ist, sind die Fehler hier geringer. Allerdings zeigen NiMH-Batterien bei höheren Temperaturen (insbesondere > 45°C) ein sehr schlechtes Verhalten, so dass die Bestimmung des Vollladezustands kaum noch möglich ist, da die inneren Verluste den Ladestrom aufzehren und damit für den Nutzer unklar ist, wann die Batterie in Bezug auf den chemischen Zustand die Vollladung erreicht hat. Auch bei Temperaturen deutlich unter 0°C weisen Lithium-Ionen- und NiMH-Batterien ein schlechtes Ladeverhalten auf, so dass die Vollladung schwer zu definieren ist. Dementspre-

<sup>4</sup> Blei-Starterbatterien sind auf sehr hohe Leistungen und einen Betrieb nahe der Vollladung ausgelegt. Eine vollständige Entladung tritt im normalen Betrieb nicht auf und ist daher kein Qualitätsmerkmal der Batterie. Bei Starterbatterien werden die vollständigen Entladungen aber im Labor zur Zustandsbestimmung durchgeführt. Andere Bleibatterietypen, die z.B. im Elektrotraktionsbereich eingesetzt werden, sind für den zyklischen Betrieb ausgelegt und können je nach Qualität der Batterie einige 100 bis deutlich über 1000 Vollentladezyklen aushalten.

chend ist wieder die Ladezustandsbestimmung ebenfalls um die Ungenauigkeit bei der Vollladung unbestimmt.

Die Qualität von Batteriediagnostikverfahren wird oftmals auf die Genauigkeit des Ladezustands reduziert. Wie oben gezeigt wurde, ist hier nur eine begrenzte Genauigkeit erreichbar und verifizierbar. Auf der anderen Seite ist der Ladezustand in der Regel nur eine Hilfsgröße bei der Bestimmung der eigentlich relevanten Parameter, die dann auch den State of Function (SOF) definieren. Wichtig sind Parameter wie Startfähigkeit, Ladeakzeptanz oder Leistungsfähigkeit für Beschleunigungsprozesse. Diese Größen weisen in weiten Betriebsbereichen eine relativ geringe Sensitivität in Bezug auf den Ladezustand auf, so dass auch bei einem Fehler von 10% bei der SOC-Bestimmung die relevanten Größen durchaus mit der ausreichender Genauigkeit wiedergegeben werden können.

## 8 Zusammenfassung

Batteriediagnostik und Batteriemonitoring sind schwierige Aufgaben und es müssen für jede Speichertechnologie die Eigenheiten des Systems betrachtet und bei der Entwicklung der Algorithmen berücksichtigt werden. Eine genaue Definition von Kapazität und Ladezustand ist die Grundvoraussetzung für nachvollziehbare und interpretierbare Angaben und auch für die Verifikation.

Für einen robusten Einsatz im Feld erweisen sich selbstadaptierende Verfahren, die sich durch kontinuierlichen Vergleich der Prognose mit gemessenen Werten dem Batterietyp und dem Batteriealter anpassen als geeignet. Voraussetzung für alle modernen Verfahren ist die Verfügbarkeit von genauen Messwerten zu Strom, Spannung und Temperatur. Messungen der Impedanz, möglichst in verschiedenen Frequenzbereichen, sind wertvolle weitere Informationen.

Im Beitrag wurde ein Batteriediagnosesystem für NiMH-Batterien zur Bestimmung des Ladezustands vorgestellt. Dabei wird die Hysterese in der Ruhespannung berücksichtigt und damit eine erhebliche Verbesserung der Genauigkeit erreicht werden. Das Verfahren arbeitet robust und kann in seiner Grundstruktur auch für Lithium-Ionen- und Bleibatterien eingesetzt werden. Insbesondere für Bleibatterien sind aber einige zusätzliche Verfahren notwendig, um ein langzeitstabiles Verfahren zu erhalten.

Für Entwickler und Anwender von Verfahren ist wichtig zu erkennen und zu akzeptieren, dass die Genauigkeit derartiger Verfahren immer begrenzt

bleiben wird. Die Bestimmung der Referenzpunkte hängt von sehr vielen Parametern ab und im laufenden Feldbetrieb sind die genauen Bedingungen nicht ausreichend bekannt, um z.B. präzise in allen Fällen eine Vollladung zu definieren, was wiederum die Voraussetzung für eine Bestimmung der verfügbaren Kapazität darstellt.

Teile dieses Beitrags sind dem Beitrag „Batteriediagnostik und Batteriemonitoring“ entnommen, der kürzlich im Expert-Verlag erschienen ist [14].

## Literatur

- [1] ADAC: Deutschland, deutschlandweite Pannenstatistik, 2005
- [2] D.U. Sauer, G. Bopp, A. Jossen, J. Garche, M. Rothert, M., Wollny.: State of charge—what do we really speak about? 21<sup>st</sup> International Telecommunications Energy Conference Presented (INTELEC'99), Kopenhagen, 1999
- [3] D. Linzen, E. Karden, D.U. Sauer, J. Schiffer, E. Surewaard: Thermal investigation and modeling of batteries for automotive applications, 21<sup>st</sup> Electric Vehicle Symposium (EVS21), Monaco, 2005
- [4] ISABELLENHÜTTE Heusler GmbH & Co. KG: Front end data acquisition for battery management system in automotive applications, vorläufiges Datenblatt, V. 10.9, 7.11.2005
- [5] Analog Devices, Inc.: MicroConverter Integrated, Precision Battery Sensor ADuC7030, vorläufiges Datenblatt, Rev. PrE, 2006
- [6] M. Rosenmayr: Energiemanagement mit dem Intelligenten Batteriesensor IBS, auto & elektronik, Ausgabe 07-08/2005, Hüthig Verlag
- [7] J. Häffner, B. Frey, M. Merkle, K. Schiller: Batteriezustandserkennung BZE und Elektronischer Batterie-Sensor EBS, Tagung Energiemanagement und Bordnetze, Haus der Technik, Essen, 12.10.2004
- [8] LEM: Automotive current sensor DHAB S/14, Datenblatt, 2006
- [9] D. U. Sauer: Optimierung des Einsatzes von Blei-Säure-Akkumulatoren in Photovoltaik-Hybrid-Systemen unter spezieller Berücksichtigung der Batteriealterung, Dissertation, Universität Ulm, 2003
- [10] V. Srinivasan, J.W. Weidner, J. Newman: Hysteresis during Cycling of Nickel Hydroxide Active Material, J. Power Sources, 148 (2001) 969-980
- [11] F. Huet: A review of impedance measurements for determination of the state-of-charge or state-of-health of secondary batteries, J. Power Sources, 70 (1998) 59-69
- [12] J. Gerschler, A. Hammouche, D. U. Sauer: Investigation of cycle-life of lithium-ion batteries by means of electrochemical impedance spectroscopy, 1. Symposium Impedanzspektroskopie, Essen, 2006
- [13] C. Sarfert: Verfahren und Vorrichtung zur Zustandserfassung von technischen Systemen wie Energiespeicher, Europäisches Patent EP1231475A2, 2002
- [14] D.U. Sauer, O. Bohlen: Batteriediagnostik und Batteriemonitoring, in „Neue elektrische Antriebskonzepte für Hybridfahrzeuge“ Hrsg. Heinz Schäfer, Expert Verlag, Renningen, 2007
- [15] M. Thele, M. Radin-Macukat, D.U. Sauer, O. Bohlen, D. Linzen, E. Karden: Impedance-based modeling of electrochemical energy storage devices – A successful implementation for NiMH batteries used in design tools for hybrid electric vehicles, 22<sup>nd</sup> Electric Vehicle Symposium (EVS22), Yokohama, Japan, 2006
- [16] D. U. Sauer, E. Karden, B. Fricke, H. Blanke, M. Thele, O. Bohlen, J. Schiffer, J. B. Gerschler, R. Kaiser: Charging performance of automotive batteries – An underestimated factor influencing lifetime and reliable battery operation, J. Power Sources, 168 (2007) 22-30
- [17] R. Kaiser: Optimierung eines Batteriemanagementsystems zum Einsatz in photovoltaischen Stromversorgungssystemen, PhD Thesis, Ulm, Germany 2005
- [18] O. Bohlen, D.U. Sauer: How to achieve the maximum lifetime for supercapacitors - A quantitative analysis of cell balancing systems and a proposal for improved cell protection concepts, 22<sup>nd</sup> Electrical Vehicle Symposium (EVS22), Yokohama, 2006
- [19] D.U. Sauer, O. Bohlen, T. Sanders, W. Waag, R. Schmidt, J.B. Gerschler. Batteriezustandserkennung: Mögliche Verfahrens- und Algorithmenansätze, Grenzen der Batteriezustandserkennung; "Energiemanagement und Bordnetze II", Hrsg. Matthias Schöllmann, Expert-Verlag, , Renningen, 2007, S.1-30, ISBN-13 978-3-8169-2649-8