

Drahtlose Sensoren für Batterie-Zellen

- ein Diskussionsbeitrag aus Sicht einer Anwendung -

Tobias Krannich, Stephan Plaschke, Karl-Ragmar Riemschneider, Jürgen Vollmer
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Technik und Informatik, Berliner Tor 5, 20099 Hamburg
vollmer@etech.haw-hamburg.de karl-ragmar.riemschneider@haw-hamburg.de

Zusammenfassung—Bisher werden die mehrzelligen Traktions- und Automobilbatterien nur als Gesamtsystem überwacht. Es wird ein Lösungsansatz vorgestellt, bei dem jede Zelle dieser Batterien mit drahtlosen Sensoren ausgestattet wird. Das erlaubt den robusten und vor allem kostengünstigen Zugang zu den Zellen. Die Sensoren messen die Zellenspannungen und die Temperaturen. Mit dieser Vielzahl an zusätzlichen Messstellen kann die Batterieüberwachung, die Zustandsprognose und der wirtschaftliche Batteriebetrieb erheblich verbessert werden. An der HAW Hamburg wurden verschiedene Varianten von drahtlosen Sensoren aufgebaut. Auf einer Gabelstapler-Traktionsbatterie wurde eine Batterieüberwachung erprobt. Die Anwendung für Automobilbatterien soll als Hauptziel folgen.

I. EINFÜHRUNG

Große mehrzellige Akkumulatorbatterien finden sich in vielen Bereichen unserer technischen und industriellen Umgebung wieder. Von ihnen wird hohe Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit verlangt.

Traktionsbatterien liefern die Energie für einen großen Teil der Gabelstapler, für Förderwagen in automatisierten Fabriken und die umweltfreundlichen Hybridautos der Zukunft.

Weltweit starten viele hundert Millionen Akkumulatoren die Verbrennungsmotoren unserer Automobile¹. Darüber hinaus puffern sie das Automobil-Bordnetz mit immer mehr elektrischen Verbrauchern. In dieser Rolle kommt der altbekannteren Autobatterie in bereits wenigen Jahren eine lebenswichtige Funktion zu, wenn mit elektrischer Energie gelenkt und gebremst werden wird.

Problem: Unterschiedliche Zellenzustände

Die Alterung der Batterie führt im Laufe der Betriebsdauer dazu, dass der Zustand der in Reihe geschalteten Zellen sehr unterschiedlich wird. Bisher ist eine zuverlässige Beurteilung der verbleibenden Batteriekapazität nur mit erheblicher Unsicherheit möglich, da keine Messwerte von allen Zellen verfügbar sind, sondern die Gesamtbatterie nur als 'Blackbox' betrachtet wird.

Lösungsansatz: Einzel-Zellen-Überwachung

Im verfolgten neuartigen Lösungsansatz werden Messwerte von jeder einzelnen Batteriezelle aufgenommen und drahtlos übertragen. Sehr kompakte Sensor-Mikrocontroller-Systeme sollen dazu direkt in jeder Zelle montiert werden. Diese

¹Produziert werden 300-350 Mio Starterbatterien für über 8 Mrd. \$ p.a., in Deutschland über 15 Mio. Stück im Wert von ca. 300 Mio Euro, davon ein Drittel für Neufahrzeuge

Sensoren sind so robust auszulegen, dass sie in den Innenraum der Batteriezelle eingebaut werden können. Dort werden sie an beiden Elektrodenplatten angeschlossen, andere Leitungsverbindungen sind nicht notwendig. Die ermittelten und vorverarbeiteten Sensordaten der Zellen werden von einer zentralen Einheit gesammelt und ausgewertet. Gemeinsam bilden sie ein Netz, bei dem Kommunikation und Messaufgabe aufeinander sehr eng abgestimmt sind.

Die Überwachung erfolgt also in einem Zusammenwirken aus verteilter Datenerfassung und Vorverarbeitung, einer auf sehr verschiedenartige Betriebsfälle angepassten Netzwerk-kommunikation und einem 'Entscheider' auf der Basis eines zu entwickelnden, verteilten Batteriemodells.

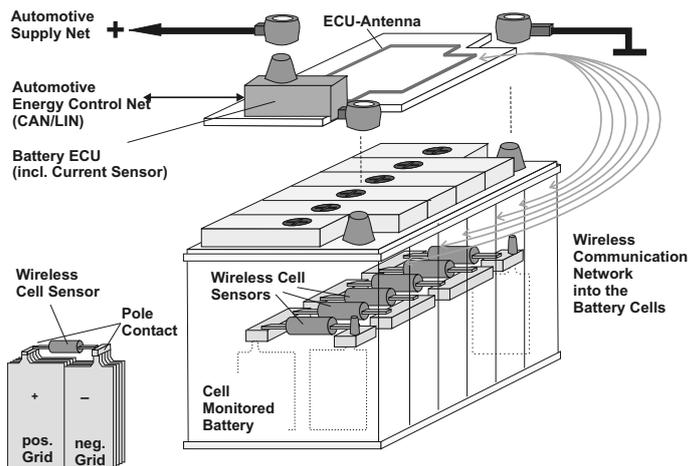


Abbildung 1. Konzept für die Überwachung der Automobilbatterie

II. ANWENDUNGEN

Industrielle Anwendung: Gabelstapler-Traktionsbatterien

Elektrische Flurförderzeuge - insbesondere Gabelstapler - werden von Bleibatterien versorgt, die bis zu 40 Zellen umfassen. Sie wiegen teilweise über 1.5 Tonnen und kosten einige tausend Euro. Abschätzungen ergeben, dass durch besseres Batteriemangement eine bis zu 30 % höhere Wirtschaftlichkeit und Verfügbarkeit der Batterie erreicht werden könnte. Dies entspricht einem Anwendernutzen von vielen hundert Euro je Traktionsbatterie.

Fernziel: Automobilbatterie

Die Abbildung 1 zeigt ein Grobkonzept der Verwendung im Automobil, das mit Industriepartnern diskutiert wurde.

Der Ausgangspunkt für die Einführung in das Automobil ist die Einbeziehung der Gesamtstrommessung, weil das bereits bei ersten Fahrzeugen in Serie erfolgt. Dort führt man die Plusleitung der Batterie über einen Shunt durch das Batteriesteuergerät, das wird als „intelligente Batterieklemme“ beworben [4][9]. Die Anbindung an andere Steuergeräte erfolgt über einen CAN-Bus oder wahrscheinlicher über einen LIN-Bus. Angebunden wird sicherlich das Bordnetzsteuergerät bzw. der Feldregler des Generators, der zukünftig ebenfalls einen Buszugang erhalten wird. Das Batteriesteuergerät mit der drahtlosen Sensorik wird als Erweiterung der „intelligenten Batterieklemme“ gesehen.

Für die Antenne des Steuergerätes soll eine Konstruktion gefunden werden, die kompakt und mit verschiedenen Batteriegrößen und Einbausituationen in den Fahrzeugen kompatibel ist. Die Sensoren selbst sind hingegen konstruktiv vorteilhaft, weil sie ohne Anschlüsse in der Batterie „verschwinden“.

Wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Die Traktionsbatterie lässt Lösungen in naher Zukunft technisch machbar erscheinen. Der geschätzte Kostenrahmen von ca. hundert Euro pro System ist mit konventionellen Bauelementen, also für die Stückzahlen bei Gabelstaplern passend, erreichbar. Der Nutzen muss noch durch Feldversuche quantifiziert werden. Für Erprobungen und Experimente bildet die Traktionsbatterie eine gute Plattform.

Für die Automobile der Zukunft muss die Zuverlässigkeit der Versorgung mit elektrischer Energie zwingend verbessert werden. Daher kann ein Kostenbeitrag von den kostensparenden elektrischen Systemen in der Fahrfunktion, dazu gehören die elektrischen Lenkhilfen und die elektromechanischen Bremse (EMB), kommen. Die Automobilbatterie ist dennoch preissensitiv. Nach diskutierten Schätzungen sind Herstellkosten von weniger als 20 Euro für das Gesamtsystem der Batterieüberwachung bzw. von weniger als einem Euro pro Sensor erforderlich. Das wird nur durch vollständig integrierte, maßgeschneiderte Lösungen in Massenproduktion zu erreichen sein. Viele Fragen dazu sind offen, zumindest der Marktumfang spricht nicht dagegen.

III. ZIELE UND LÖSUNGEN

Zuverlässigkeit durch bessere Prognose

Durch die Alterung können die Zellen im Lebensdauerzustand, dem State of Health (SOH), sehr unterschiedlich werden. Einem Batterie-Zustandsschätzer im Fahrzeug oder im Ladesystem steht bisher nur die Gesamtspannung und ggf. der Gesamtstrom zur Verfügung. Dadurch wird es zu einer zunehmenden Fehlbeurteilung des Ladezustandes, des State of Charge (SOC), kommen. Noch entscheidender ist für die elektrische Bremse die Prognose der sog. Hochstromverfügbarkeit, des State of Function (SOF). Nur mit Hilfe der zellenweisen Überwachung kann ein Batteriemodell einzelne Zellen als

geschädigt, d.h. nicht mehr hochstromfähig, identifizieren. Damit wird dieser bisher unerkannte, aber kritische Zustand rechtzeitig bemerkt.

Überwachung gegen Schädigungen erhöht Lebensdauer

Für Batteriezellen sind bekanntermaßen drei Zustände schädlich. Das sind der Betrieb bei Übertemperatur, die Überladung und die Tiefentladung.

Durch das Nichterkennen der Tiefentladung wird jedoch die vorgeschädigte Zelle nochmals besonders geschädigt. Dieser Effekt verstärkt sich fortlaufend und führt letztlich zum unerwarteten, scheinbar plötzlichen Ausfall.

Eine Zellenüberwachung anstelle der Gesamtbatterieüberwachung löst das Problem, bisher unerkannte Tiefentladungen können nun rechtzeitig bemerkt und Überladungen verhindert werden.

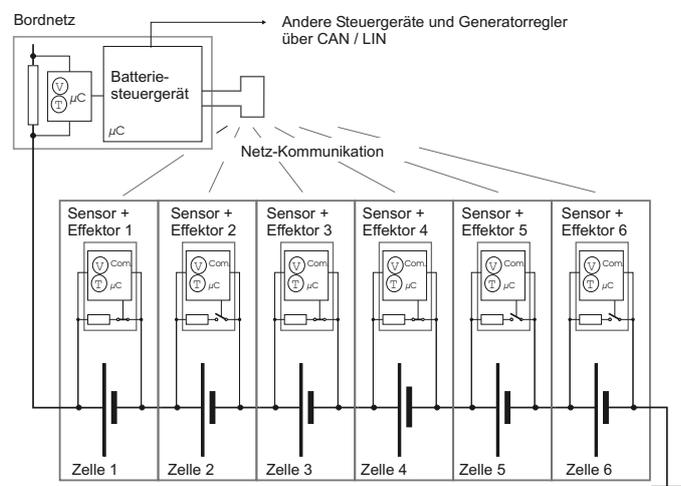


Abbildung 2. Prinzipdarstellung der Ladungsbalancierung: Als Beispiel werden Parallelstrompfade für die Zelle 1,3 und 4 geschaltet, um den Ladezustand (SOC) an die Zellen 2,5,6 anzugleichen

Besonderheit: Ladungsbalancierung durch Effektor im Sensor-knoten

Sind ohnehin Sensorknoten in jede Zelle montiert, dann kann dort auch ein einfacher Effektor realisiert werden.

Dieser Effektor ist ein jeweils einschaltbarer Parallelstrompfad zu den Zellenpolen von mittlerer Belastbarkeit und mit Strombegrenzung². Wird dieser Pfad bei einer weniger gealterten Zelle während der Ladung eingeschaltet, dann wird dort mit etwas weniger Strom geladen, die anderen Zelle werden umso stärker geladen. Wird dieser Parallelpfad in der Ruhephase bei Zellen mit hoher Zellenspannung zeitweise eingeschaltet, verlieren sie langsam einen Teil der zuviel gespeicherten Ladung.

²Nur bis zu einem Strom von 200mA bis 500mA erscheint ein elektronischer Schalter für den Parallelpfad integrierbar zu sein, es geht also um eine Langzeit-Beeinflussung.

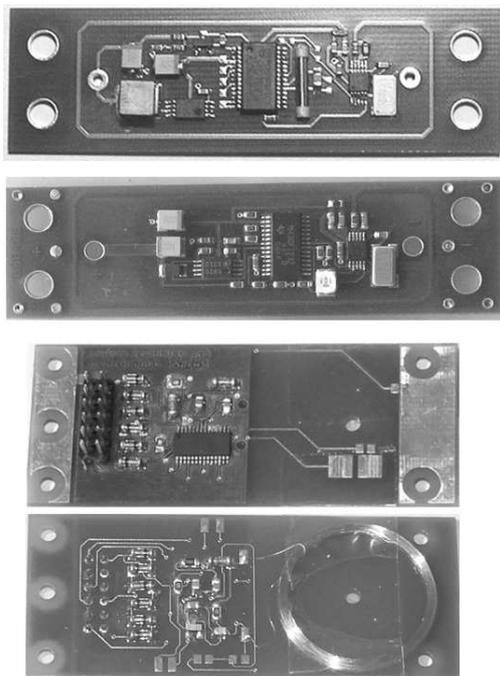


Abbildung 3. Versuchsmuster für Zellen Sensoren

oben: **Version UHF/LF**
 Sensorknoten mit UHF-Uplink und mit LF-Downlink, noch nicht verwendet
 darunter: **Version UHF/-**
 Sensorknoten mit UHF-Uplink und ohne LF-Downlink
 Muster wurden eingesetzt für Vorversuch Traktionsbatterie [13]
 darunter/unten: **Version LF/LF**
 Sensorknoten mit LF-Downlink und LF-Uplink (Vorder-/Rückseite)
 Muster erprobt in Laborversuchen [7][1]

Der Vorteil eines solchen Ausgleiches liegt darin, dass der nächste Lade-/Entlade-Zyklus auf gleichem oder zumindestens besser angeglichenem Ladungsniveau beginnt. Batteriefachleute nennen das Verfahren Symmetrierung oder Chargebalancing. Bei stationären Industriebatterien wird das Balancieren durch das Wartungspersonal vorgenommen. Bisher war das Verfahren für eine Automobilbatterie kaum denkbar. Der drahtlose Zugang zur Zelle könnte das nun ermöglichen.

Die Einbringung eines Effektors ist noch vertieft zu untersuchen und zu bewerten. Dazu muss für die Sensorcontroller ein dezentrales, ein kooperatives oder ein zentrales Entscheidungsmodell erarbeitet werden.

IV. PRAKTISCHE VORARBEITEN

Die Vorarbeiten führten bisher zu drei Varianten:

Version UHF/LF: Der Sensor-Controller MSP430F1232 mit 10-bit-ADC und integriertem Temperatursensor kommuniziert mit einem UHF-Uplink³ durch einen mit OOK gesteuerten PLL-Schaltkreis (433MHz ISM) und einer angepassten Schleifenantenne auf der Trägerplatine. Der LF-Downlink mit

³Uplink bedeutet hier von den Sensoren zum Steuergerät, Downlink vom Steuergerät zu den Sensoren.

125 KHz Träger benutzt eine Spulen-Antenne mit Ferritkern, die auch für RF-ID-Transponder (Wegfahrsperr) genutzt wird. Dieser Down-Link ist primär für eine einfache Wake-up-Funktion und Synchronisierung konzipiert.

Durch einen Step-Up-Converter ist der Abfall der versorgenden Zellen Spannung sogar bis unter 0.5 Volt erlaubt.

Version UHF/-: Es wurde auf den Downlink verzichtet, um den Aufwand für eine erste Versuchsserie zu reduzieren[13]. Die Übertragung hat sich als sehr robust erwiesen, sowohl unter ungünstigsten Ausbreitungsbedingungen (Batteriedeckel und Trog aus Metall), als auch in der Störsicherheit (Antriebsmotoren, Ladegerät).

Version LF/LF: Dieser Sensor nutzt Kommunikations-Lösungen, die in der RF-ID-Technologie verbreitet sind. Es wird ein gemeinsamer Antennenschwingkreis für beide Richtungen benutzt. Für den Downlink und Uplink wird ein 125 kHz Träger amplitudenmoduliert. Der Uplink benutzt die Modulation durch Belastung des Antennenkreises (2-ASK). Als Besonderheit ist zu nennen, dass keine Betriebsspannung aus der Zelle entnommen werden muss, diese wird durch Gleichrichtung des Downlink-Signals gewonnen. Auch diese Lösung liefert über einige Dezimeter Reichweite verlässliche Messwerte. Die Datenübertragung ist im Down- und Uplink bis zu 5 kBit/s brutto möglich [7]. Die Energiebilanz des Controllers und der Kommunikation ist den Versionen zuvor überlegen. Von Vorteil ist sicher die niedrige Trägerfrequenz, welche im metallischen Umfeld weniger Abschattung und Nullstellen hat.

Entscheidung für proprietäre Lösungen

Für die Übertragung wurde in den genannten Versionen kein standardisiertes Verfahren oder kommerzielles Modul benutzt, sondern eine Eigenimplementation. Der verwendete Controller kann die Mess- und Übertragungsaufgaben auch noch bei energiesparenden 80 kHz Takt durchführen.

Alle Varianten benutzen im Basisband den ungenauen und temperaturdriftenden integrierten RC-Oszillator [7], ein Quarz sollte hier bewusst eingespart werden. Die eigene Lösung lässt ein Einmessen des Empfängers auf die Zeitfehler des Senders zu (sog. Run-In-Verfahren).

Die Versionen mit UHF-Uplink benötigen jedoch zwingend einen Quarz-Oszillator für die Sende-PLL, um den ISM-Regularien zu genügen. Für automotiv Anwendungen qualifiziert, ist ein solcher Quarz teurer als das eines kleinen Controllers (s. auch [14]). Die Kosten würden sich mit der Zellenanzahl multiplizieren, also sich mindestens sechsfach auswirken. Die LF/LF-Version benötigt keinen Quarz im Sensor, jedoch eine vergleichsweise aufwändige Antennenspule. Optimierte Step-Up-Converterspulen der ersten beiden Versionen besitzen ebenfalls nennenswerte Kosten. Für die Anwendung auf Traktionsbatterien sind diese Bauelementekosten noch erträglich, jedoch wird für die Automobilbatterie eines günstigeren technischen Konzept gefordert.

Bei den Antennenkosten hat die UHF-Übertragung klare Vorteile. Für die LF-Varianten muss eine größere Spulen-

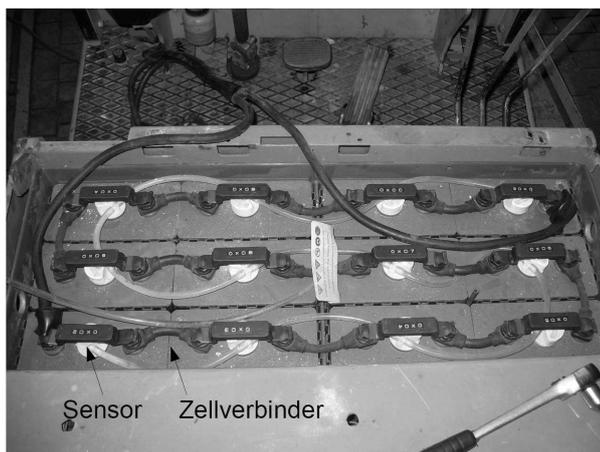


Abbildung 4. Drahtlos kommunizierende Zellsensoren auf der Batterie des Gabelstaplers der HAW Hamburg [13]

tenne oder Ferritantenne am Steuergerät genutzt werden, die ähnlich der eines RF-ID-Readers aufgebaut ist.

Erste Ergebnisse

Durch die Versuche an der Traktionsbatterie wurden erste Erfahrungen gewonnen, siehe Abbildung 4. So zeigte sich ein starker Unterschied im Lebensdauerzustand (SOH) durch Alterung der Zellen. Für eine Zelle wird die aktuelle Kapazität (SOC) bis zur Tiefentladung ausgeschöpft, während die anderen Zellen noch über nutzbare Kapazität verfügen, siehe Abbildung 5.

Die Temperaturwerte der Zellen sind von erheblichem Wert für die Batteriemodelle. Die Temperaturmessung der Controller über integrierte Dioden besitzt große Streuungen im Anfangswert und im Temperaturkoeffizienten. Daher wurde eine einfache Kalibrierung für den Sensor entwickelt. Prinzipiell sind die Sensoren, die auf der Zelle montiert werden, denen in der Zelle bezüglich der Temperaturbestimmung unterlegen.

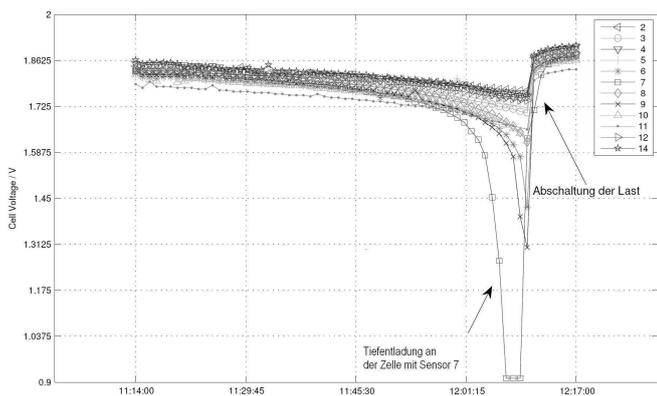


Abbildung 5. Zellenspannungen während 75 Minuten Entladung mit Vollast des Stapler-Antriebsmotors[13]. Der einbrechende Spannungsverlauf an einen Sensor zeigt eine Zelle mit schädigender Tiefentladung, dieses Problem war bisher an der Spannung der Gesamtbatterie nicht erkennbar.

V. ZUSAMMENFASSUNG UND BEWERTUNG

Bisher wurde für die Anwendung gezeigt:

- die Zellsensoren liefern wertvolle Informationen und sind gut in bestehende Batteriesysteme integrierbar
- die drahtlose Arbeitsweise ist stabil und für die raue Umgebung vorteilhaft
- Standardübertragungsverfahren oder Funkmodule, die einen Quarz im Sensor erfordern, waren nicht notwendig
- auch handelsübliche Controller sind geeignet, um wie RF-ID-Transponder ohne Energiequelle zu arbeiten
- dort können Systemtakte unter 100 kHz ausreichen, wenn auf Softwareoverhead verzichtet wird
- eine niedrige Betriebsfrequenz kann Vorteile haben, z.B. für Wakeup-Funktionen oder die Synchronisierung

Viele Aspekte sind noch offen, unter anderem:

- die Erfassung von schnellen Laständerungen, zunächst hat die Werterfassung statistischen Charakter
- die Nutzung des Sensor-Controllers, um autark Bewertungen und Entscheidungen zu treffen (z.B. Messregime bei schnellen Ereignissen ändern)
- Konstruktive Fragen (z.B. Umspritzung), Feldversuche

Der Ansatz, dass Sensornetze für große Batterien gerade durch die drahtlose Auslegung Vorteile bieten, ist durch die Arbeiten bestärkt worden. Favorisiert werden von den Autoren Lösungen, die sich am RF-ID-Bereich orientieren.

LITERATUR

- [1] Eger, Torsten; Entwicklung von Hard- und Software eines Readers für drahtlose Sensorik mit Resonanzabgleich; Diplomarbeit an der HAW Hamburg 2008
- [2] Finkenzeller, Klaus, RFID-Handbuch, 4. Auflage, Hansa-Verlag, 2006
- [3] Form, T., Vorlesung Fahrzeugelektronik, TU Braunschweig, 2006 inb. Teil 5 Teil 8 und Teil 9 über <http://www.ifr.ing.tu-bs.de> erreichbar
- [4] Heim, A. (BMW Group München) Intelligenter Batteriesensor: Schlüsselkomponente für das Energiemanagement der Zukunft VDI-Berichte, Elektronik im Kraftfahrzeug, Baden-Baden, 2003
- [5] Heinemann, D., Strukturen von Batterie- und Energiemanagementsystemen mit Bleibatterien und Ultracaps, Dissertation, TU Berlin 2007
- [6] Hetzler, Ullrich, Batterie- und Energiemanagement in Kraftfahrzeugen-Anwendungen von ISA-ASIC und Präzisionsschunt bei BMW-Fahrzeugen E&E-Kompodium (Referenzbook Elektronik und Entwicklung) 2005/2006 www.isa-asic.de/files/2005-06-eekompendium.pdf
- [7] Krannich, Tobias Experimentalsystem für einen Sensor-Controller mit drahtloser Energie- und Datenübertragung; Diplomarbeit an der HAW Hamburg 2008
- [8] Lehold, Jürgen, Die elektrische Infrastruktur für zukünftige Fahrerassistenzsysteme, 5. Braunschweiger Symposium, Automatisierung und Assistenzsystem für Transportmittel 2004
- [9] N.N. Der Elektronische Batteriesensor, Firmenschrift Bosch, 2007
- [10] N.N., Transponder Cookbook, Part 4, FAE Training Identifikation Firmenschrift Philips, 1993
- [11] N.N. HellaKGaA Hueck & Co., Energiemanagement - Technische Informationen (Broschüre) 2008 im Internet www.hella.com/.../ti_em_d.pdf
- [12] Notten, P. (Philips Research/TU Eindhoven) Battery Management Methods, pers. Kommunikation
- [13] Plaschke, Stephan; Experimentalsystem für drahtlose Batteriesensorik; Diplomarbeit an der HAW Hamburg 2008
- [14] Polityko D.-D., Niedermayer M, Guttowski S, John W., Reichl H.; Drahtlose Sensornetze: Aspekte der Hardwareminiaturisierung 2. GI/ITG KuVS Fachgespräch Drahtlose Sensornetze, 2004
- [15] Pop, V., Bergveld, H., Danilov, D., Regtien, P., Notten, P. Battery Management Systems, Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications Philips Research Book Series 2008
- [16] Riemschneider, K.-R. Wireless Battery Management System, Pat.appl. WO2004/047215A1, US020060152190A1, EP000001573851A1