

# Monitoraggio, modellazione e analisi delle batterie per l'elettromobilità

**Martin Kiel**  
RWTH – Aachen

**Andreas Mangler**  
Direttore marketing strategico  
Rutronik

La spettroscopia di impedenza elettrochimica (EIS) si sta affermando come metodologia per la caratterizzazione, fra l'altro, delle batterie agli ioni di litio. Questo anche in ragione del fatto che è ora possibile integrare una soluzione system-on-chip monolitica come MD8710 all'interno di un sistema di batterie

La spettroscopia di impedenza elettrochimica (EIS) si sta rapidamente imponendo come tecnica per il dimensionamento e la caratterizzazione delle batterie e di altri sistemi elettrochimici. I vantaggi di questo metodo di misura non invasivo possono essere sfruttati non solo nella modellazione delle unità di immagazzinamento dell'energia, come le batterie e le celle a combustibile, ma anche nel settore della ricerca di base e della diagnostica sulle batterie. In molti casi è ora possibile evitare il ricorso ad apparecchiature di laboratorio e a sistemi complessi e sfruttare invece soluzioni system-on-chip integrate all'interno del sistema di batterie stesso.

## I motivi di una scelta

Il principale ostacolo è assicurare una fonte permanente di alimentazione elettrica nel momento in cui le funzioni principali sono sempre più spesso realizzate per mezzo di apparecchi elettronici. La registrazione effettiva dello stato reale di una batteria – rispetto alle prestazioni, allo stato di carica (SOC-State of Charge) e all'invecchiamento (SOH - stato di salute) – così come altri aspetti quali il monitoraggio delle celle, la previsione delle prestazioni, la strategia



operativa, la gestione termica, il bilanciamento delle celle, l'invecchiamento delle celle e la gestione della carica ad alta tensione sono fattori decisivi per determinare le distanze che un veicolo può percorrere con ciascuna carica e la durata complessiva della batteria. Tuttavia, queste variabili fisiche e/o elettrochimiche possono solo essere definite in modo preciso (e quindi utile) solamente nel caso la batteria venga definita in modo matematicamente esatto e modellata e rappresentata sotto forma di un circuito equivalente complesso. La tecnica EIS rappresenta un ausilio prezioso per il conseguimento di questo obiettivo.

Attualmente la batteria agli ioni di litio si propone come una tra le più promettenti tra le tecnologie per l'immagazzinamento dell'energia disponibile per i veicoli ibridi di

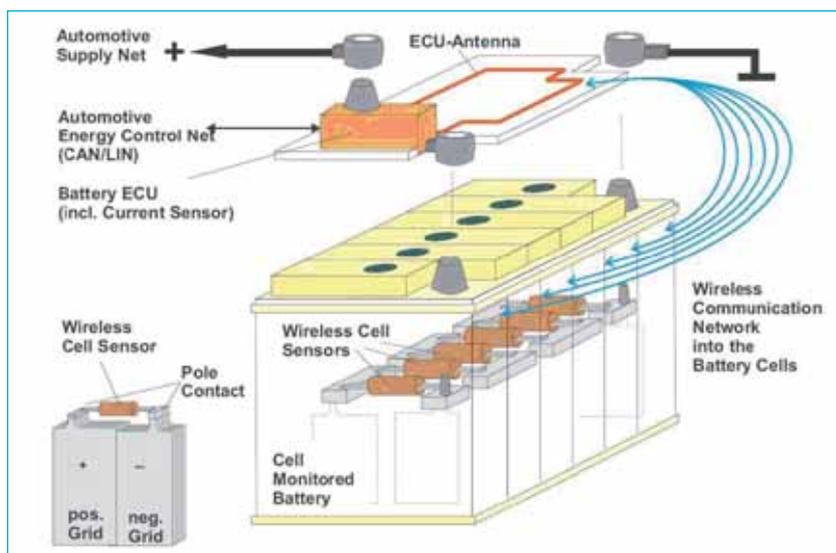


Fig. 1 - Un possibile sistema di integrazione nel veicolo (Fonte: HAW di Amburgo, Facoltà di Tecnologia e Informatica, Dipartimento di Informazione e di Tecnologia Elettrica)

prossima generazione. Tuttavia, indipendentemente dalla tecnologia utilizzata, la comunicazione fra celle e/o le diverse pile (stack) è un elemento da tenere nella massima considerazione. Per tale motivo l'istituto HAW di Amburgo ha sviluppato alcune proposte a livello di sistema (Fig. 1) per connettere gli elementi del sensore delle celle e quelli di bilanciamento delle celle con il dispositivo di controllo.

### Da un sistema start/stop all'auto puramente elettrica

I tipi di veicoli azionati elettricamente spaziano da quelli con semplici sistemi start/stop ai cosiddetti "mild-hybrid" - veicoli con motore a combustione interna affiancato da motore/generatore elettrico fino ai sistemi full-hybrid. I veicoli full-hybrid di tipo parallelo sono azionati direttamente da un motore a combustione o da un motore elettrico. Nei motori full-hybrid seriali, per contro, l'azionamento è puramente elettrico. In questo caso, tuttavia, è possibile attivare, se necessario, un cosiddetto "range extender" (sotto forma di un piccolo motore a combustione interna) per ricaricare le batterie. Le problematiche più complesse da affrontare sono quelle relative ai veicoli azionati in modo puramente elettrico.

### La gestione delle batterie

La tecnologia di accumulo dell'energia è una tecnologia chiave per lo sviluppo di motori alternativi ed ecologici. Allo scopo di ottenere una densità elevata di impaccamento e allo stesso tempo una gestione termica ottimale e un peso ridotto, sono state realiz-

zate le cosiddette celle prismatiche piatte. Queste celle offrono un vantaggio rispetto alle celle convenzionali a celle rotonde, in quanto il loro elevato rapporto fra superficie e volume garantisce una maggiore efficienza di raffreddamento. Il raffreddamento è un aspetto da tenere nella massima considerazione in quanto per impedire l'invecchiamento accelerato delle celle agli ioni di litio, le temperature operative nel nucleo della cella devono essere mantenute all'interno dei limiti definiti dal produttore. Questi sono compresi tipicamente fra 40 °C a 60 °C.

Un aumento di temperatura di 10K fa raddoppiare la velocità di invecchiamento: questa, come specificato dall'equazione di Arrhenius, è la relazione che intercorre tra il processo di invecchiamento e la temperatura delle batterie. Per assicurare che le temperature richieste siano mantenute per l'intero tempo di funzionamento, è necessario raffreddare la batteria. Questo significa che la batteria e i sistemi di gestione termica devono essere progettati con l'aiuto di simulazioni e di modelli elettrici e termici. Monitorando ogni singola cella (stato di carica e stato di salute), abbinando in modo intelligente i dati ottenuti con il sistema di gestione termica della batteria e usando gli opportuni algoritmi di controllo all'interno del sistema di

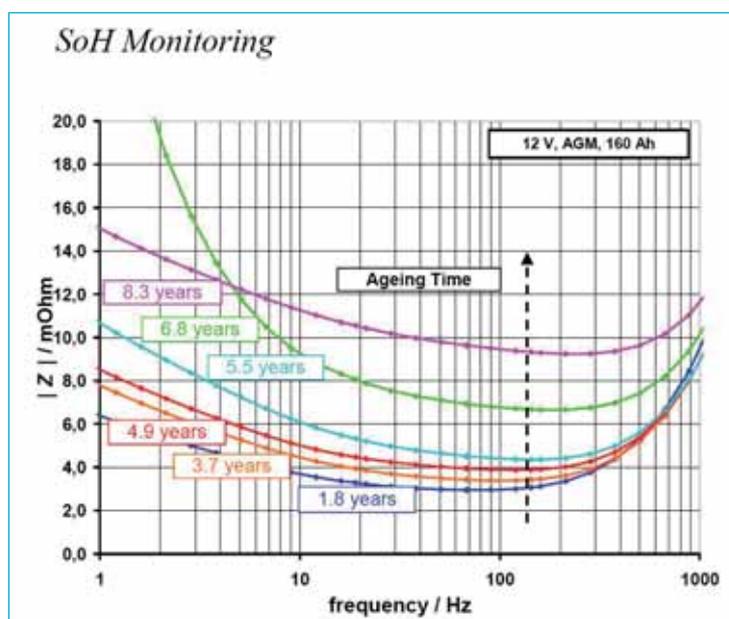
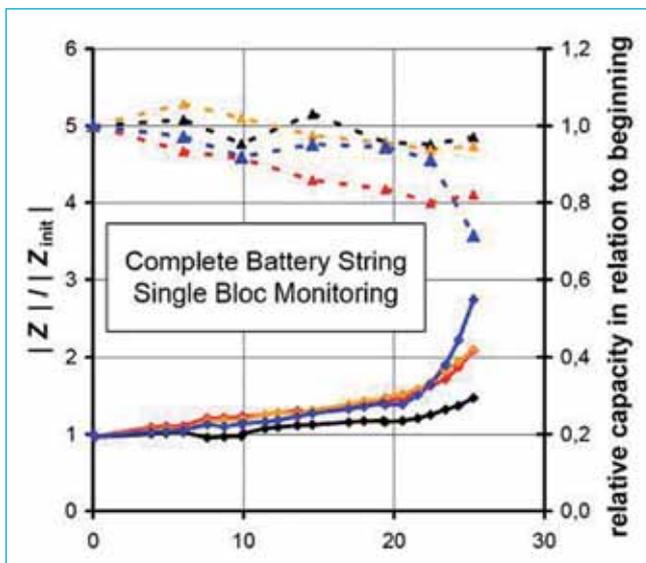


Fig. 2 - Aumento dell'impedenza della batteria al piombo di un UPS durante l'invecchiamento artificiale alla temperatura ambiente di 65 °C



**Fig. 3 - Variazione dell'impedenza e della capacità di un banco di batterie durante un processo di invecchiamento artificiale. Le curve mostrano l'evoluzione dei singoli blocchi di batterie del banco**

gestione della batteria (BMS), è possibile evitare l'invecchiamento precoce delle celle della batteria.

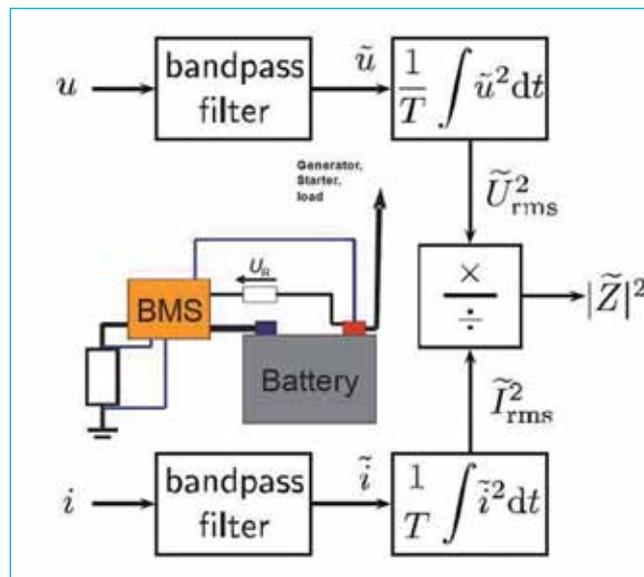
**EIS - Spettroscopia di impedenza elettrochimica**

La spettroscopia di impedenza elettrochimica ha raggiunto uno stadio che ne permette l'uso non solo in ambiente di laboratorio, ma anche per prodotti destinati a mercati di massa come quello industriale e dell'elettromobilità (ovvero della mobilità a trazione elettrica). Tra i numerosi esempi di applicazioni si possono annoverare il monitoraggio dell'invecchiamento basato sull'impedenza (SOH - stato di salute) e il monitoraggio in linea delle batterie degli autoveicoli. Oltre a essere adatta per valutare la corrente e la tensione delle batterie, la spettroscopia di impedenza può anche essere usata per monitorare la resistenza interna delle batterie stesse. Il monitoraggio dell'impedenza si è dimostrato essere utile in particolar modo come un mezzo per la misurazione del processo di invecchiamento delle batterie usate per alimentare un gruppo di continuità (UPS). I risultati di un esperimento di invecchiamento su larga scala con monitoraggio continuo dell'impedenza della batteria sono riportati nelle figure 2 e 3. Durante un test di invecchiamento artificiale a una temperatura più alta sono state effettuate misure regolari della capacità residua e dell'impedenza interna di vari blocchi di batterie e delle singole celle. La figura 2 riporta l'andamento del valore di impedenza rispetto alla frequenza per ciascuno stadio di invecchiamento. I dati relativi all'età sono ottenuti dall'invecchiamento artificiale. Le batterie sono state conservate a 65 °C a tensione costante. Questo è equivalente

approssimativamente a un fattore di invecchiamento di 16 rispetto alle condizioni a temperatura ambiente. La figura 3 mostra i risultati delle misure per un banco completo di batterie: le curve riportano la crescita dell'impedenza della batteria dei singoli blocchi e la misura della capacità corrispondente. La figura indica che esiste una relazione fra il gradiente di impedenza e la perdita di capacità. Tuttavia, fino ad ora non è stato possibile stabilire alcuna correlazione diretta e generalmente valida fra impedenza e capacità. Ciononostante, il monitoraggio continuo dell'impedenza della batteria consente di registrare in modo rapido le differenze fra singoli blocchi, specialmente nel caso di banchi di batterie di grandi dimensioni.

**Diagnosi delle batterie a bordo del veicolo**

Il numero sempre crescente di dispositivi elettronici di controllo nei veicoli fa aumentare le richieste avanzate sulla batteria di rete a bordo. Per questo motivo, la diagnosi a bordo sta diventando sempre più importante per le batterie che presiedono all'avviamento del veicolo. Generalmente, un sensore di batteria è connesso a un sistema di gestione delle batterie (BMS): esso risulta composto da una resistenza (shunt) o da sensori di Hall per la misura della corrente, un sensore di tensione e un sensore di temperatura. Tutti questi parametri sono valutati dal BMS al fine di ottenere informazioni sullo stato della batteria. Qui, ancora una volta, la spettroscopia di impedenza può essere di aiuto completando le misure di corrente e di tensione con i dati di impedenza dipendenti dalla frequenza. Sono due le



**Fig. 4 - Impiego della spettroscopia di impedenza passiva per la diagnosi a bordo delle batterie di avviamento**

modalità operative previste: la cosiddetta eccitazione attiva, effettuata attraverso generatori di segnale montati sul chip o l'eccitazione passiva. Il metodo di eccitazione passiva sfrutta i disturbi causati dal carico elettronico attivo della rete presente a bordo (Fig. 4). Il flusso di corrente e le tensioni sono analizzate per un intervallo di frequenze filtrate con l'aiuto di funzioni matematiche base. Questo consente di calcolare l'impedenza della batteria.

### Principi base di spettroscopia di impedenza con eccitazione attiva

La spettroscopia di impedenza elettrochimica è effettuata sulle batterie sottoponendo il campione di misura a una corrente alternata sinusoidale e misurando la risposta in tensione. Inoltre, è possibile sovrapporre la corrente continua allo scopo di impostare il punto di lavoro del campione di misura. Con l'aiuto di trasformate di Fourier discrete è quindi possibile calcolare l'impedenza complessa del campione di misura in base all'equazione:

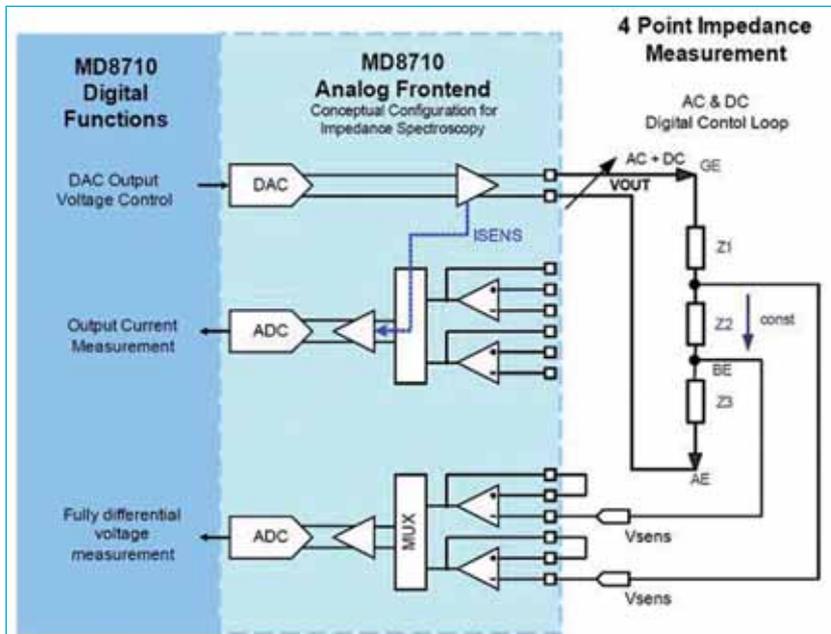
$$Z = \frac{u}{i} = \frac{\hat{U} \cdot e^{j2\pi f t}}{I \cdot e^{j2\pi f t}} = \frac{\hat{U}}{I} \cdot e^{j2\pi f (t_2 - t_1)} = \frac{\text{Re}\{u\} + j\text{Im}\{u\}}{I}$$

In figura 5 è illustrato nel principio il metodo di misura della spettroscopia di impedenza con il componente M8710 di Infineon (che verrà analizzato successivamente). In questo caso Z1, Z2 e Z3 sono reti complesse miste e rappresentano il circuito equivalente della batteria. Per agevolare l'eccitazione della batteria con correnti più elevate si deve inserire uno stadio di potenza fra MD8710 e la batteria. Variando la frequenza di eccitazione è possibile determinare uno spettro di impedenza completo Z(f). La figura 6 riposta lo spettro di una cella a ioni di Litio per diverse correnti di carica. Si può osservare che esiste una chiara interrelazione fra la risposta in tensione e la corrente continua - in particolare per le frequenze più basse. La figura mostra anche l'intervallo di frequenze sotto esame. Per le misure di impedenza sulle batterie, questo è tipicamente compreso fra parecchi kHz e qualche mHz (se non qualche decina di μHz).

La rappresentazione di Nyquist (Fig. 6) mostra la parte immaginaria negativa visualizzata sopra la parte reale. Questo tipo di rappresentazione semplifica l'interpretazione dei circuiti elettrici equivalenti, e con un po' di esperienza, è possibile valutare variazioni in un singolo elemento molto rapidamente al variare dello spettro.

### Il monitoraggio e la diagnosi delle celle richiede un sistema connesso in rete

Uno dei diversi prerequisiti di un sistema 'intelligente' di gestione dell'energia, adatto per ogni tecnologia di batterie,

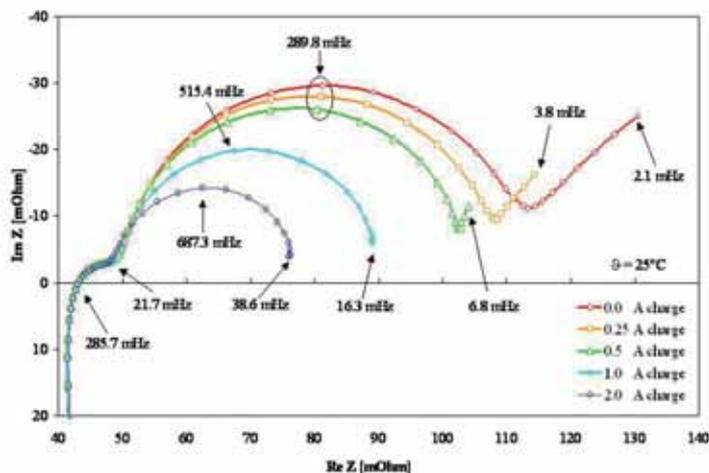


**Fig. 5 - Rappresentazione schematica delle connessioni in una misura a 4 punti. In questa configurazione il segnale di misura della corrente è instradato internamente. Il ritorno del segnale di misura di corrente può anche essere effettuato attraverso il secondo canale del convertitore A/D**

è la trasmissione dei dati relativi alla batteria raccolti remotamente verso un punto di raccolta locale di un BMS centrale in cui possono essere archiviati (come già riportato in Fig. 1). Da questa postazione i dati possono quindi essere trasferiti, se necessario, a un fornitore di servizi online, che si occupa della raccolta e valutazione dei dati. In questo modo è anche possibile confrontare e correlare dati statistici provenienti da intere flotte di veicoli. A sua volta, la banca dati sulla flotta può servire come una fonte di informazioni da cui ricavare parametri di controllo. Per soddisfare questo requisito, Rutronik ha sviluppato una soluzione su chip ad alto grado di integrazione in collaborazione con Infineon: il dispositivo di analisi su chip singolo MD8710 (Fig. 7). Esso include un processore ARM-Cortex-R4 come unità centrale, un'unità di protezione della memoria, un controllore di interrupt, un controllore DMA e un watchdog timer. L'interfaccia analogica del componente può essere usata in applicazioni che richiedono un'elaborazione dei segnali analogici abbastanza complessa. Essa dispone di due ADC a 16 bit indipendenti e di due DAC, sempre a 16 bit. I canali DAC possono essere alimentati con

i dati provenienti da un generatore integrato di forme d'onda, mentre, per ciascun ADC, sono disponibili due OPA per ADC liberamente configurabili per la pre-elaborazione analogica (ad esempio come amplificatori a transimpedenza per ingressi in corrente). Allo scopo di ottenere un livello di integrazione ancora più spinto, è previsto un ADC a 12 bit con quattro ingressi multiplex esterni ausiliari e un sensore di temperatura. Due canali DAC completamente separati per la sintesi del segnale e due canali ADC per l'analisi dei segnali operano in modo completamente simultaneo e sincrono. Questo consente di determinare corrente, tensione e fase. Lo scambio di dati può essere effettuato sia attraverso un'interfaccia USB 2.0, sia anche attraverso un modulo Bluetooth integrato nel chip. Oltre a ciò, sono presenti le seguenti interfacce: I2C, SPI e UART.

Usando un generatore di tensione esterno, l'unità di gestione dell'alimentazione (PMU) genera e controlla tutte le tensioni richieste per l'alimentazione del chip. La PMU può gestire diverse modalità di risparmio di energia e di risveglio ed effettua il controllo della carica di una batteria Li-ion o LiPo. MD8710 è dotato di un controllore per display che supporta LCD a matrice e rende disponibili funzioni audio aggiuntive, impiegate ad esempio per l'emissione di segnali di avviso o per un'uscita vocale. Le quattro uscite PWM integrate possono essere usate per il controllo diretto dei commutatori a semiconduttori ai fini del bilanciamento delle celle.



**Fig. 6 - Spettro di impedenza di una cella agli Ioni di Litio con correnti di carica sovrapposte di diverse intensità in un diagramma di Nyquist**

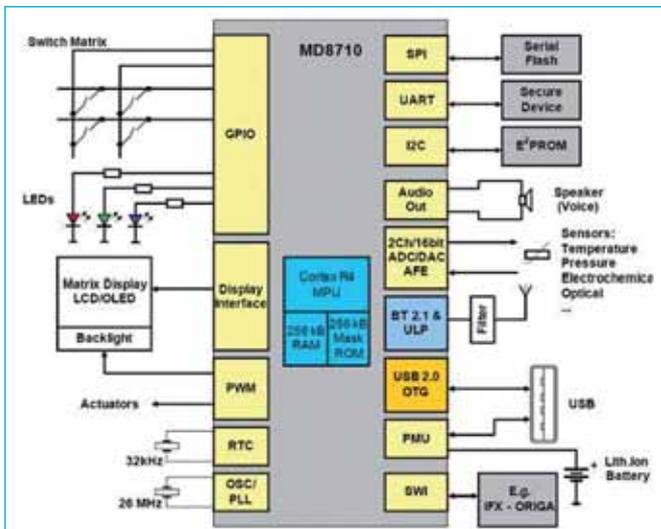


Fig. 7 - Tutte le funzioni dell'MD8710 visualizzate in modo semplificato come diagramma a blocchi

### Piattaforme e integrazione per ridurre i costi

Grazie a un nuovo kit di valutazione per questo componente sarà possibile ridefinire i sistemi di gestione delle batterie, le prestazioni dei commutatori per il bilanciamento attivo delle celle, al fine della loro implementazioni in applicazioni pratiche. Ora per i produttori di batterie e per gli OEM che operano nel settore automobilistico devo affrontare la prossima grande sfida: la modellizzazione e la simulazione di celle, pile e/o batterie complete. ■

### Bibliografia

- [1] Kiel, M.; Sauer, D.W.: *Impedanzspektroskopie an Batterien – D&E Entwicklerforum. (Spettroscopia di impedenza nelle Batterie – Forum degli sviluppatori D&E)*
- [2] Gronwald, F.: *Intelligente Batteriesensorik. (Sensoristica intelligente per batterie) Auto Kabel Management GmbH*
- [3] Schöllmann, Dr. M.: *Intelligente Batteriesensorik (5.6.2004); (Sensoristica intelligente per batterie) www.hanser-automotive.de/fileadmin/heftarchiv/2004/3278.pdf*
- [4] Scheda prodotto MD8710 Revisione della Panoramica di Prodotto 0.5, 2011-03-28
- [5] Forster, F.: *Gestione Intelligente delle Batterie; come integrare gli Accumulatori nei Veicoli Ibridi ed Elettrici in modo ottimale e sicuro Elektronik Praxis (15.03.2010)*
- [6] Informazioni sul Progetto MST BMBF, VDE, VDI, IT; Sviluppo di una batteria agli Ioni di Litio per applicazioni in campo automobilistico – LiHeBe (26.5.2010); Partner del progetto: Behr, RWTH Aachen, Batteria Li-Tec – Numero di promozione del progetto 16SV3680