



25 Kilogramm pure Energie

Entwicklung eines effizienten Batterie-Management-Systems
für den Mercedes-Benz S 400 HYBRID



25 Kilogramm – so viel wiegt die Hybrid-Batterie des Mercedes-Benz S 400 HYBRID, der 2009 auf den Markt kommt. Die Batterie besteht aus 35 zylindrischen Lithium-Ionen-Akkus und liefert eine Spitzenleistung von bis zu 15 kW (20 PS). Der elektrische und thermische Schutz dieses Energiepaketes ist eine der wichtigsten Aufgaben des Batteriesteuergerätes, dessen Algorithmik ein Joint Venture aus Johnson Controls und SAFT entwickelt. Zur Generierung der Steuergerätesoftware kommt dSPACE TargetLink zum Einsatz.

Mercedes-Benz S 400 HYBRID

Bei dem S 400 HYBRID handelt es sich um einen Mild-Hybrid, dessen elektrischer Antrieb für den Motorstart, die Start-Stopp-Funktion, das Boosten und das Rekuperieren verwendet wird. Der kompakte, scheibenförmige Elektromotor ist platzsparend im Wandlergehäuse zwischen Motor und der Siebenstufen-Automatik 7G-TRONIC eingebaut. Dieser sogenannte Außenläufer ist ein 3-Phasen-Drehstrom-Permanentmagnet-Elektromotor, der bei 120 Volt Betriebsspannung eine Maximalleistung von 15 kW (20 PS) und ein Startdrehmoment von 160 Nm entwickelt. Dank des platzsparenden Einbaus der Hybridbatterie im Motorraum an Stelle der herkömmlichen Starterbatterie bleiben die großzügigen

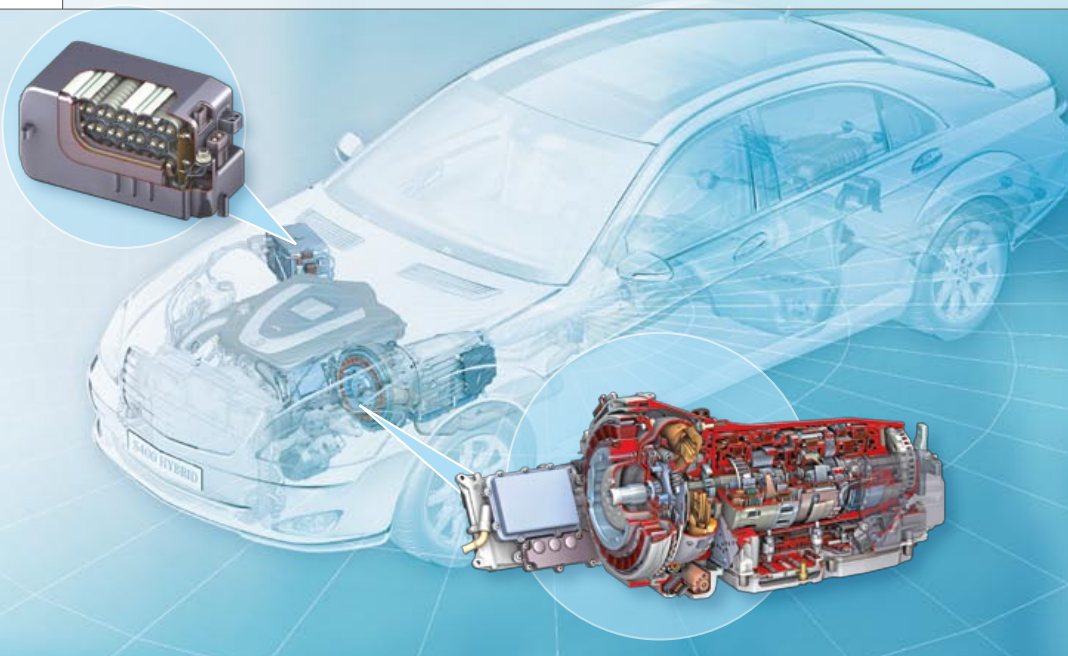


Abbildung 1: Der S 400 HYBRID verfügt über einen Mild-Hybrid-Antrieb. Die Lithium-Ionen-Hochvoltbatterie ist im Motorraum verbaut.

Innenraummaße und das Kofferraumvolumen unverändert erhalten (Abbildung 1). Die Lithium-Ionen-Batterie dient nicht nur als Energiespeicher für den Elektromotor, sondern ist über den Spannungswandler auch mit dem 12-Volt-Bordnetz verbunden, das Standardverbraucher wie die Scheinwerfer und die Komfortfeatures versorgt. Besonders beim Motorstart ist die Batterie gefordert. Hier macht sich ein Leistungsabfall der Batterie – beispielsweise durch Selbstentladung oder tiefe Außentemperaturen – zuerst bemerkbar. Falls es dennoch einmal an Ladung mangeln sollte, wird der Fremdstart per Starthilfekabel vom Hybridsystem unterstützt. Die 12-Volt-Bleisäure-Batterie ist im Kofferraum eingebaut und versorgt neben den Standardverbrauchern auch das Überwachungssystem der Hochvoltkomponenten mit Energie. Sie kann dank des Zusammenspiels mit der Lithium-Ionen-Batterie deutlich kleiner und leichter ausgelegt werden. Der Verbrennungsmotor wurde speziell für den Mild-Hybrid ausgelegt. Mercedes-Benz nutzt dabei die Vorzüge des Atkinson-Prinzips, das den thermischen Wirkungsgrad des Motors erhöht und gleichzeitig den Treibstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen reduziert. Die Nachteile des Atkinson-Prinzips, wie bei-

spielsweise die niedrigere maximale Motordrehzahl und ein relativ geringes Drehmoment im unteren Drehzahlbereich, werden durch den Elektromotor kompensiert. Ein umfangreiches Energiemanagement sorgt dafür, dass alle Komponenten des Hybridstranges (Batterie, Elektromotor, Spannungswandler) optimal auf die Anforderungen des

Gekühlte Hybridbatterie

Herzstück des modular aufgebauten, besonders kompakten und hoch effizienten Hybridantriebs ist die neue, speziell für den Einsatz in Fahrzeugen entwickelte Lithium-Ionen-Hochvoltbatterie (Abbildung 2). Wesentliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Nickel-Metallhydrid-Batterien sind die höhere Energie-

„Mit dem Seriene-Generator TargetLink haben wir ein neu entwickeltes Reglermodell schnell in serienreifen Code für ein Hybrid-Batterie-Management-System umgesetzt.“

Torben Materna, Johnson Controls-SAFT

Fahrzeugs reagieren. Der Elektromotor unterstützt den Verbrennungsmotor beim Beschleunigen und fungiert beim Bremsen als Generator mit Rekuperationsfunktion. Die Hybridbatterie stellt insbesondere während der Startphase über den Spannungswandler elektrische Energie für das Bordnetz zur Verfügung. Zusätzlich sorgen passende Arbeitspunktverschiebungen dafür, dass der Verbrennungsmotor auch in so unterschiedlichen Fahrsituationen wie Überlandfahrten und Stadtverkehr immer im Bereich mit optimalem Wirkungsgrad arbeitet.

dichte und der bessere elektrische Wirkungsgrad bei kompakteren Abmessungen und geringerem Eigengewicht. Die Hybridbatterie liefert eine Klemmenspannung von 128 V bei einem maximalen Strom von 200 A in Lade- und Entladerichtung. Sie besteht aus 35 Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit einer Nennspannung von jeweils 3,6 V und einer Kapazität von 7 Ah (Abbildung 3). Zur Kühlung ist die Batterie mit der Klimaanlage des Fahrzeugs verbunden. Die Batteriekühlung hat dabei immer eine höhere Priorität als die manuellen Einstel-



Abbildung 2: Die Lithium-Ionen-Hochvoltbatterie wiegt 25 Kilogramm. Sie verfügt über ein hochfestes Gehäuse mit integrierter Kühlung.



Abbildung 3: Die Hochvoltbatterie ist aus 35 Lithium-Ionen-Zellen aufgebaut.

lungen des Fahrers an der Klimaanlage und kann selbst bei ausgeschalteter Klimaanlage die volle Kühlleistung abrufen.

Batterie-Management-System

Das Batterie-Management-System (BMS) ist die Schaltzentrale für alle elektrischen, thermischen (physikalischen) und chemischen Prozesse der Batterie. Das BMS ist als eigenständiges Steuergerät in der Batterie verbaut. Die implementierten Funktionen sind:

- Sicherheitsfunktionen (z.B. Spannungsabschaltung)
- Ladezustandsanzeigen (über das Kombiinstrument, Abbildung 4)
- Ermittlung der Strom-, Spannungs- und Leistungsgrenzen
- Temperaturmanagement
- Überprüfung des Alterungszustands
- Ausgleichen von Ladezustandsunterschieden (Balancieren)

Neben diesen Steuerungsfunktionen dient das Steuergerät auch als BlackBox, d.h., es hält ständig alle Batteriedaten zum Abruf per Diagnosefunktion bereit. Um bei den verwendeten hohen Spannungen und Strömen stets einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, sorgen zahlreiche Sicherheitsfunktionen dafür, dass an den Hochspannungskontakten der Batterie nur im Betriebszustand eine Spannung anliegt. Einbau, Transport und Lagerung der Batterie sind damit völlig gefahrlos möglich.

Vernetzung des Batterie-Management-Systems

Damit das BMS so arbeiten kann wie vorgesehen, muss es in andere Systeme eingreifen und Daten anderer Komponenten zur Auswertung abrufen. Daher ist es mit allen Steuergeräten im Hybridzweig verbunden:

- Energiemanagement (Motorsteuergerät)
- Leistungselektronik (Elektromotor)
- Spannungswandler (DC-DC)

Um schnelle Fehlerreaktionen zu gewährleisten, tauschen Batterie und Klimasteuerung einige Nachrichten direkt aus, beispielsweise die Kühlanforderung der Batterie und den Kühlungsstatus.

Steuerungsstrategien für die Batterie

Um eine lange Lebensdauer der Batteriezellen zu gewährleisten und die Batterieleistung immer optimal zu nutzen, sorgen Kühlungsstrategien für ein Einregeln der Batterietemperatur bei ca. 30 °C. Bei extremer Belastung wird eine Überhitzung außerdem durch eine Strom- und Spannungsbegrenzung vermieden. Diese Maßnahmen beugen Langzeitschäden und einem Kapazitätsverlust der Zellen vor. Die Temperaturregelung ist so ausgelegt, dass die Batterietemperatur 50 °C nur in Ausnahmefällen überschreitet (Abbildung 5).

Auch zu niedrige Temperaturen, die besonders dann auftreten können, wenn das Fahrzeug nicht benutzt wird, können der Batterie schaden. Im Betriebszustand wird die Batterie

durch Stromentnahme sofort erwärmt. Eine zu hohe Strombelastung bei Temperaturen unter -20 °C kann zu einer Lithium-Abscheidung führen, die die Batteriekapazität massiv senkt. Die Ruhephasen des Fahrzeugs werden gezielt für Rekalibrierungen, Sicherheitschecks und den Ausgleich von Zellladeunterschieden genutzt. Besonders der Ausgleich der Zellladeunterschiede ist von zentraler Bedeutung, weil die Lebensdauer der Batterie entscheidend von einem gleichmäßigen Ladezustand der Zellen abhängt. Um das Ladeniveau aller Zellen anzugleichen, werden auf Basis von Ladezustandsanalysen Zellen gezielt entladen. Dadurch kann die Leistungsfähigkeit der Batterie immer voll ausgeschöpft werden, ohne einzelne Zellen zu überlasten (Abbildung 6).

Glossar

Atkinson-Prinzip – Verlängerung der Expansionsphase gegenüber der Verdichtungsphase beim Viertakter durch längeres Offenhalten des Einlassventils zwischen Ansaugen und Verdichten („fünfter Takt“).
Ergebnis: Höherer Wirkungsgrad und geringer Verbrauch.

Boosten – Hinzuschalten des Elektromotors bei Leistungsspitzen.

Mild-Hybrid – Ein Hybridfahrzeug, dessen Elektromotor den Verbrennungsmotor bei Bedarf unterstützt, aber nicht alleine den Vortrieb übernimmt.

Rekuperation – Speicherung überschüssiger Energie in der Batterie (beispielsweise beim Bremsen).



Abbildung 4a: Das Fahrzeug reduziert seine Geschwindigkeit auf unter 60 km/h. Der Elektromotor fungiert als Generator und wandelt die mechanische Bewegungsenergie des Fahrzeugs in elektrische Energie zum Laden der Hybridbatterie (Rekuperation). Im Kombiinstrument wird dieser Vorgang durch einen grünen Energiefluss zur Batterie dargestellt. Die zu 50 % geladene Batterie wird weiter geladen.



Abbildung 4b: Das Fahrzeug beschleunigt auf über 50 km/h. Der Elektromotor verbraucht Strom aus der Batterie und unterstützt den Verbrennungsmotor beim Antrieb. Im Kombiinstrument wird der Vorgang durch einen roten Energiefluss zu den Rädern dargestellt. Die Batterieladung liegt durch die vorhergehende Rekuperation nun bei 51 %.



Abbildung 4c: Das Fahrzeug brems bis zum Stillstand (Geschwindigkeit 0 km/h, Verbrennungsmotor und Elektromotor sind abgeschaltet). Der Ladezustand der Batterie hat sich nach dem erneuten Bremsen und Rekuperieren auf 52 % erhöht.

Modellbasierter Entwicklungsprozess

Eine besondere Herausforderung bei diesem Projekt bestand darin, das Know-how der Batterieexperten und die Anforderungen der Fahrzeugingenieure zu bündeln und ein System zu entwickeln, das eine hohe Fahrzeugverfügbarkeit bei gleichzeitigem Schutz der Batteriezellen gewährleistet. Dabei galt es, theoretische Batteriemodelle und unter Laborbedingungen gewonnene Zelldaten so in ausführbare Software umzuformen, dass sie praxistauglich sind und trotzdem ein hohes Maß an Genauigkeit liefern. Mit Hilfe der modellbasierten Ent-

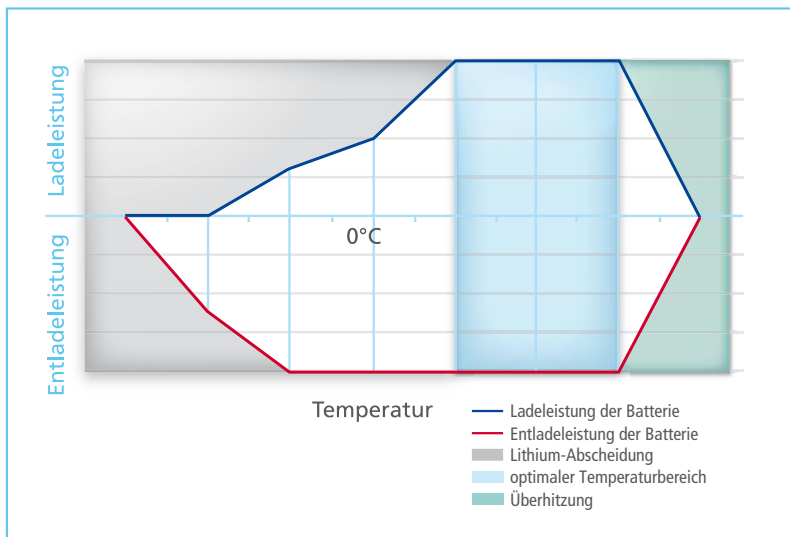
wicklung und des Seriencode-Generators TargetLink von dSPACE war es möglich, vorhandene Simulink Batteriealgorithmen und Batteriekennlinien einfach in das Reglermodell zu integrieren und vorhandene Simulink-Batteriemodelle zur Validierung zu nutzen. Weil bei diesem Projekt die Regelung erstmalig für die Lithium-Ionen-Technologie ausgelegt wurde, war eine vollständige Neuentwicklung der Reglersoftware ohne den Einsatz von Legacy-Code aus Vorgängerprojekten erforderlich. Hauseigene Modellierungsrichtlinien, die auf den von dSPACE herausgegebenen Modellierungsrichtlinien aufsetzen, halfen beim Vor-

bereiten des Modells für eine bestmögliche Umsetzung in effizienten Seriencode. Weil auch die Funktionsentwickler des im Motorsteuergerät implementierten Energiemanagements (EMM) TargetLink einsetzen, gestaltete sich die Zusammenarbeit besonders reibungsfrei und die firmenübergreifenden Abstimmungen zwischen den Entwicklern des EMM und des BMS wurden erheblich vereinfacht.

Implementierung des Batteriereglers

Das Batteriesteuergerät ist mit einem TriCore-Mikrocontroller von Infineon ausgestattet. Um die modellierte Reglersoftware auf dem Steuergerät zu implementieren, muss aus dem Modell serientauglicher Festkomma-Code generiert werden. Dazu wurden zunächst im dSPACE Data Dictionary alle Daten von projektglobaler Relevanz wie beispielsweise applizierbare Variablen definiert. Die notwendige Skalierung der Variablen erfolgte im Modell mit Hilfe der Skalierungunterstützung in TargetLink. Durch den Vergleich von Model-in-the-Loop (MIL)- und Software-in-the-Loop (SIL)-Simulationen wurde der Festkomma-Code validiert. Das Laufzeitverhalten und der Ressourcenbedarf des Codes für den Zielprozessor wurden mit dem Evaluationsboard TriBoard TC 1796 per Processor-in-the-Loop (PIL)-Simulation überprüft (Abbildung 7). Schon die

Abbildung 5: Die elektrische Leistungsfähigkeit der Hybridbatterie für Lade- und Entladevorgänge in Abhängigkeit von der Batterietemperatur.



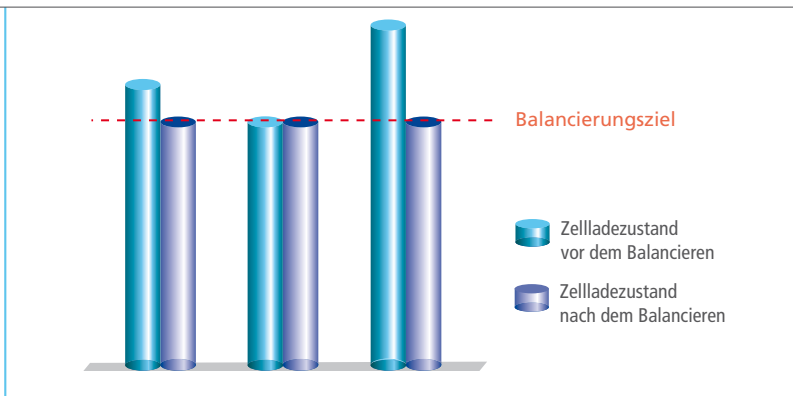


Abbildung 6: Quasi im Hintergrund gleicht das Batterie-Management-System während der Fahrzeugruhephasen Zellladeunterschiede aus und stellt so sicher, dass sich alle Zellen der Batterie immer im optimalen Ladezustand befinden.



Torben Materna, Johnson Controls-SAFT Advanced Power Solutions GmbH
Torben Materna ist Softwareprojektleiter und -Entwickler für Lithium-Ionen-Batteriemanagementsysteme bei Johnson Controls-SAFT Advanced Power Solutions in Hannover.

ersten PIL-Tests zeigten bei besonders rechenintensiven Programmteilen ein sehr gutes Laufzeitverhalten des Codes. Auch im Verlauf der weiteren Entwicklung konnte der mit 150 MHz getaktete Prozessor die Echtzeitanforderungen der Software stets erfüllen. Für das Reglermodell generierte TargetLink etwa 25.000 Codezeilen. Der Seriene-Code-Generator erwies sich als unproblematisch in der Handhabung und führte schnell zu serientauglichen Ergebnissen.

Inbetriebnahme und Ausblick

Das Batteriesteuergerät wurde zunächst an einem Prüfstand getestet. Dabei konnten beispielsweise die Sicherheitsfunktionen geprüft und das Einhalten der Temperaturreglung sichergestellt werden. In Versuchsfahrten wurde die Eignung des Systems für öffentliche Straßen sowie Sommer- und Winterbetrieb erprobt. Die Hybridbatterie samt Steuergerät erwies sich dabei als robustes System, das in der Lage ist, kontinuierlich ausreichend elektrische Energie zur

Verfügung zu stellen. Derzeit erfolgen Untersuchungen, das System in weiteren Fahrzeugen einzusetzen. Durch den modularen Aufbau der Software ist es möglich, die in diesem Projekt entwickelten und validierten Batteriealgorithmen auch in andere Projekte einfließen zu lassen. ■

Torben Materna
Johnson Controls-SAFT
Advanced Power Solutions GmbH
Deutschland

Abbildung 7: Die wesentlichen Phasen der modellbasierten Entwicklung des Batterie-Management-Systems (BMS) und die jeweils durchgeführten Arbeitsschritte.

