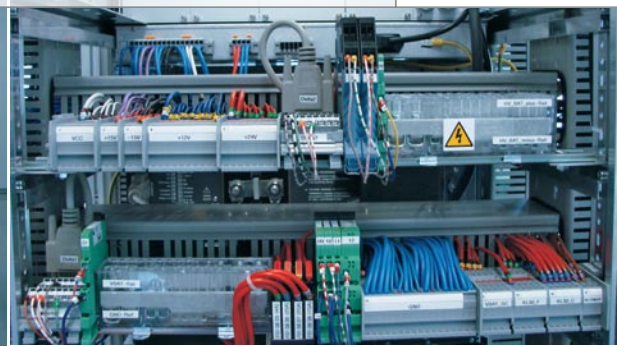


dSPACE HIL-Simulatoren als Testsysteme für Lithium-Ionen-Batteriemanagementsysteme bei der BMW Group

Virtuelle Energiezellen





Wie lange konventionelle Antriebe den Markt noch dominieren werden, kann niemand mit Sicherheit sagen. Sicher hingegen ist, dass das Zeitalter der elektrischen Antriebe längst begonnen hat. Für die Fahrzeuge der Zukunft sind heute umfangreiche Steuergeräte-Tests notwendiger denn je, da Komplexität und Umfang der Software mit atemberaubender Geschwindigkeit zunehmen. Die Funktionsentwicklung und der Steuergerätestest eines von der BMW Group entwickelten Batteriemanagementsystems für Lithium-Ionen-Energiespeicher erfolgt an einem dSPACE Simulator. Die Entwickler können damit Batteriezellen in Echtzeit simulieren und untersuchen, ob das Batteriemanagementsystem allen Anforderungen gerecht wird.

Elektrisches System im Fahrzeug

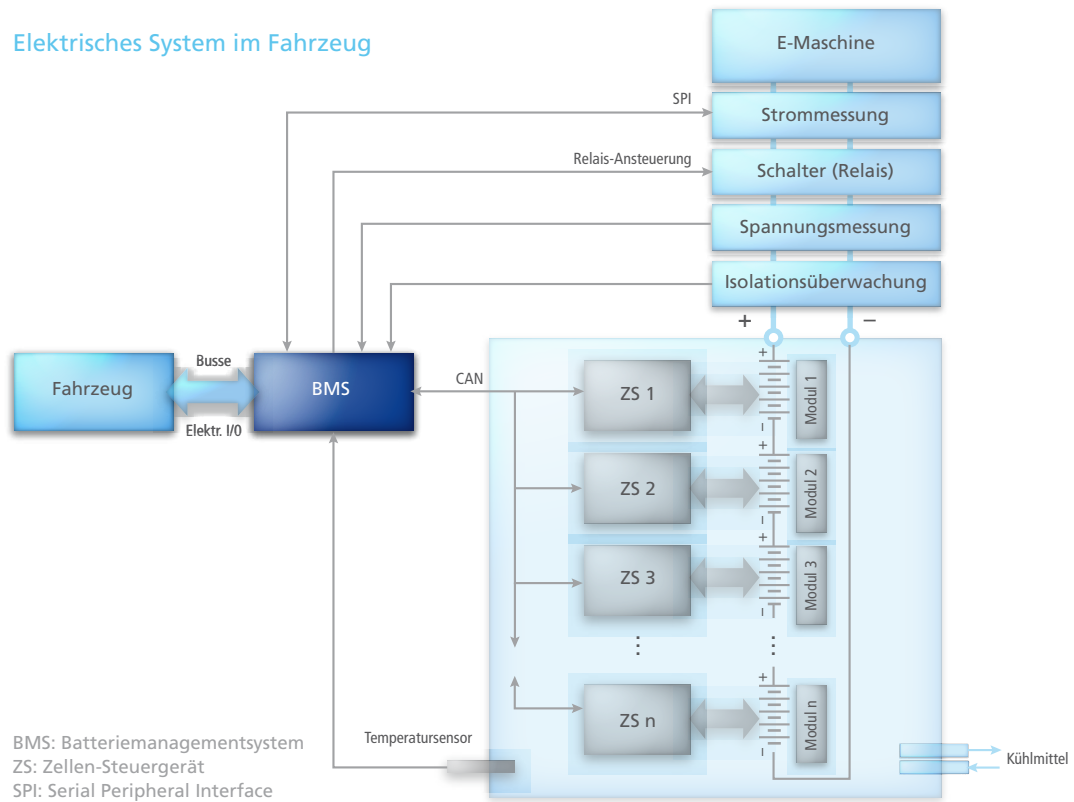


Abbildung 1: Das Batteriemangement wird über das BMS in Verbindung mit den ZS-Einheiten durchgeführt, die direkt mit den Speichermodulen verbunden sind und diese überwachen.

Herausforderung: Elektrische Mobilität

Die Geschichte des Fahrzeugantriebs durchläuft eine interessante Evolutionsstufe: Ingenieure entwickeln Antriebskonzepte von morgen – unter Berücksichtigung vieler neuer Effizienz- und Sicherheitskriterien. Für den elektrifizierten Antriebsstrang bieten sich Lithium-Ionen-Energiespeicher mit einem wirtschaftlich sinnvoll darstellbaren Mix aus hoher Energie- und Leistungsdichte sowie langer Lebensdauer an. Um Gefahren zu vermeiden, ist es unbedingt erforderlich, die typischerweise über einen Spannungsbereich von mehreren 100 Volt verfügenden Energiespeicher innerhalb spezifizierter Grenzwerte zu betreiben. Eine besondere Herausforderung besteht darin, diese Energiespeicher im Automobil sicher zu beherrschen und dabei eine optimale Fahrzeugverfügbarkeit zu gewährleisten. Neben den hohen Sicherheitsanforderungen gilt es auch, die

für Leistungsfähigkeit und Lebensdauer optimalen Betriebsbedingungen einzuhalten.

Batteriemanagementsysteme für Hochvolt-Energiespeicher

Um die Überwachung und Umsetzung dieser Anforderungen kümmert sich ein elektronisches Steuerungssystem, das sogenannte Batteriemanagementsystem (BMS). Das BMS überwacht den elektrischen und thermischen Zustand des Energiespeichers. Über diverse integrierte Steuermodule und Aktuatoren kann es diesen bzw. seine einzelnen Zellen beeinflussen. Typische Funktionen sind zum Beispiel Schutz gegen Tiefentladung, Überladung und thermische Überlastung. Im Automobil ist das BMS mit dem Fahrzeugbus verbunden, wodurch es Fahrzustände und Betriebszustände erkennen kann. Aufgrund der hohen Spannungen und Ströme der verwendeten Energiespeicher

kommt dem BMS eine sicherheitskritische Bedeutung zu. Um die funktionale Sicherheit des Systems im Fahrzeug zu gewährleisten, sind die Anforderungen an die Entwicklung nach ISO 26262 einzuhalten.

Aufbau des Batteriemanagement-Steuergerätesystems

Um die für die Elektrifizierung des Antriebsstrangs notwendigen hohen Spannungen und Ströme zu realisieren, sind die Lithium-Ionen-Energiespeicher aus kaskadierten Zellmodulen aufgebaut. Für ihre Überwachung und Steuerung ist bei BMW ein umfangreiches Steuergerätesystem (Abbildung 1) zuständig. Es setzt sich aus einem Zellen-Steuergerät (ZS) pro Batteriemodul und einem übergeordneten BMS zusammen, die per CAN verbunden sind. Ein ZS ist hauptsächlich für die Messung der Zellspannung sowie die gezielte Entladung der Zellen zuständig und das BMS führt das Batteriemangement durch.

Aufgabe des Batteriemanagementsystems

Das BMS ist die Schaltzentrale für alle elektrischen, thermischen und chemischen Prozesse der Batterie. Folgende Funktionen sind implementiert:

Cell Balancing: Um einen gleichmäßigen Ladezustand der Zellen zu erreichen, werden auf Basis von Ladezustandsanalysen Zellen gezielt symmetriert. Somit wird die optimale Leistungsfähigkeit der Zellen gewährleistet und eine Zellüberlastung ausgeschlossen, was wiederum über die Lebensdauer entscheidet.

Temperaturmanagement: Kühlungsstrategien sorgen für eine Temperaturregulierung, um die Lebensdauer der Speicherzellen zu erhöhen und die optimale Leistung zu garantieren. Bei extremer Belastung wird eine Überhitzung durch eine Strombegrenzung oder durch Regulierung des Kühlkreislaufes vermieden.

Ladekontrolle: Regelung der entnehmbaren und der beim Laden aufzuwendenden Energie, um den Ladewirkungsgrad zu optimieren.

Sicherheitsfunktionen: Um bei hohen Spannungen und Strömen stets einen sicheren Betrieb zu gewährleisten,

sorgen zahlreiche Sicherheitsfunktionen dafür, dass an den Hochspannungskontakten der Batterie nur in definierten Betriebszuständen eine Spannung vorliegt. Einbau, Transport und Lagerung der Batterie sind somit gefahrlos möglich.

Isolationsüberwachung: Beide Pole der Batterie müssen aus Sicherheitsgründen gegenüber der Karosseriemasse vollständig galvanisch isoliert sein. Die Einhaltung wird mit dem Isolationswächter geprüft.

On-Board-Diagnose: Tritt während des Betriebs ein Fehler oder eine Überschreitung von Grenzwerten auf, erfolgt ein Eintrag in den Fehlerpeicher, der von extern ausgelesen werden kann.

Hinzu kommen Funktionen, mit denen beispielsweise wichtige Batteriezustände dargestellt und kontrolliert werden:

- Messung und Anzeige des Ladezustands
- Überwachung des Allgemeinzustands
- Ermittlung des Alterungszustands
- Berechnung der verfügbaren Leistung und Energie
- Einhaltung der Strom-, Spannungs- und Leistungsgrenzen

Konzeption des HIL-Simulators

Um die BMS- und ZS-Steuergeräte vollständig zu testen, müssen ihnen die unterschiedlichen Ladungs- und Betriebszustände des Energiespeichers reproduzierbar zur Verfügung stehen. Die Lösung liefert eine mehrstufige, den Testanforderungen entsprechende Simulation sowohl einzelner Batteriezellen als auch des kompletten Zellmoduls. Um Sicherheitsaspekten zu genügen, wird die Gesamtspannung durch Anpassung im Steuergerät auf unter 60 V skaliert. Hierfür hat dSPACE eine sehr genaue und schnelle 60-V-Spannungsquelle entwickelt, die im Gegensatz zu normalen Netzgeräten die Spannung ebenso schnell absenken wie anheben kann. Die Gesamtspannungssimulation muss der Einzelzellsimulation dynamisch folgen können, um konsistente Werte für das Steuergerät zu generieren.

Für die Einzelzellenemulation ist der Simulator wie folgt konzipiert: Eine emulierte Zellspannung wird dem Steuergerät mit einer hohen Genauigkeit zur Verfügung gestellt. Die Emulation der Zellen von ZS1 erfolgt mit einer hochgenauen Spannungsquelle der Firma Scienlab electronic systems GmbH. Sie liefert eine von 0 bis 5 Volt regelbare und galvanisch



Zusammenfassung und Ausblick

isolierte Klemmenspannung, die mit bis zu 150 mA belastbar ist. Diese Emulatoren sind zu einem Zellmodul kaskadiert, das eine Spannung von 60 V liefert. Ströme und Spannungen der einzelnen Zellen können direkt auf dem Emulator vermessen werden und ermöglichen den Test der Cell-Balancing-Funktion.

Die Emulation ausgewählter Zellen wird mit verminderter Genauigkeit, aber der Möglichkeit einer elektrischen Fehlerrückmeldung versehen. Für diese Zellmodule steht ebenfalls eine Emulation von notwendigen Temperaturfühlern zur Verfügung. Weitere Zellmodule werden per Restbussimulation in das System eingebunden (Abbildung 2).

Die Kommunikation zwischen der dSPACE-Hardware und dem Scienlab Cell Emulator erfolgt über eine dSPACE-Low Voltage Differential Signaling (LVDS)-Schnittstelle. Durch ein sogenanntes Plug-on Device (POD) von dSPACE wird die serielle LVDS-Schnittstelle auf Seiten des Cell Emulators in eine parallele Mikrocontroller-

Schnittstelle umgewandelt. Auf diese Weise lässt sich bei einer Leitungslänge von bis zu 5 Metern eine sehr schnelle Datenübertragung (400 ns pro Messwert) erreichen. Die Zellspannungen können in weniger als einer Millisekunde verstellt werden.

HIL als Batterie-Simulationsumgebung

Mit dem so konfigurierten dSPACE Hardware-in-the-Loop (HIL)-Simulator ist es möglich, den Energiespeicher vollständig zu simulieren. Als Simulationsmodell dient ein bei der BMW Group entwickeltes Batterie-Modell. In einer Testautomatisierung werden die erforderlichen Testfälle erstellt und ausgeführt. Mit diesen Testfällen bildet der Simulator die Batteriezustände nach, bei denen das Batteriemanagementsystem zu prüfen ist. Gleichzeitig kann der Simulator die Steuerströme und Signale der Steuergeräte erfassen und so ihre Funktion auswerten. Der Steuergerätestest gibt Aufschluss darüber, ob Fehler erkannt werden, richtig reagiert wird und die entspre-

Derzeit sind mehrere dSPACE-Simulatoren für die Entwicklung und den Test der Batteriemangement-Steuergeräte bei BMW installiert. Die Systeme werden sowohl für die Funktionsentwicklung als auch den Freigabetest der Steuergeräte eingesetzt. Die HIL-Simulation hat sich als ein probates Instrument für die Entwicklung und den Test von Batteriemangement-Steuergeräten erwiesen. Für zukünftige Entwicklungsprojekte im Bereich Batteriemangement wird die HIL-Simulation eine wichtige Rolle spielen.

chende Regelstrategie durchgeführt wird. Für bestimmte Testabläufe ist es erforderlich, hochdynamische Vorgänge, wie zum Beispiel plötzliche Spannungseinbrüche und andere transiente Vorgänge sowie Kurzschlüsse, an den Batteriepolen sehr genau zu simulieren.

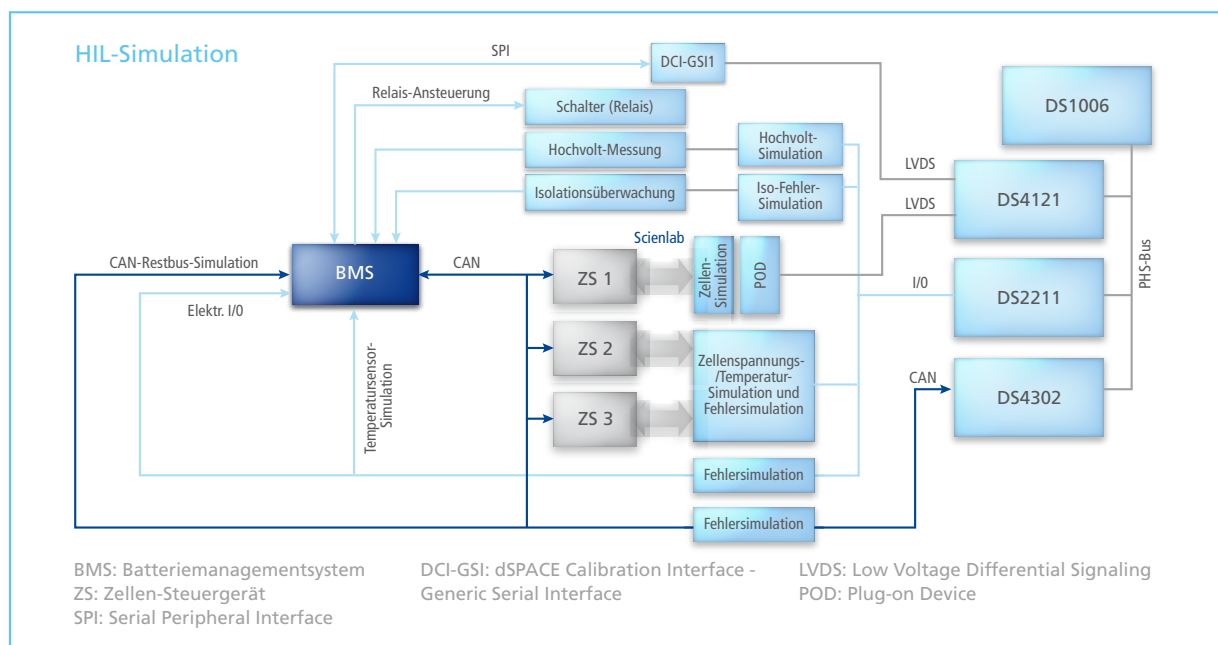


Abbildung 2: Das BMS, einige Zellmoduleemulatoren und weitere Echtteile sind im HIL-Simulator integriert. Die Testumgebung wird durch dSPACE-Komponenten vervollständigt.

Elektrische Fehlersimulation

Bei Fehlern in der Batterie oder im Kabelbaum muss das BMS unter allen Umständen korrekt funktionieren und entsprechend reagieren. Wichtiger Bestandteil der HIL-Simulation ist daher die elektrische Fehlersimulation. Mit einer Failure Insertion Unit (FIU) können verschiedene Fehlerarten auf alle I/O- und Kommunikationskanäle aufgeschaltet werden, beispielsweise

- Kabelbruch,
- Kurzschlüsse nach Masse oder mit anderen Steuergerätesignalen, und
- Wackelkontakte.

Diese Fehlersimulation wird sowohl auf den elektrischen I/O- als auch auf den CAN-Leitungen des BMS und den Zellsteuergeräten durchgeführt.

Test der Isolationsüberwachung

Die Pole der Batterie müssen aus Sicherheitsgründen vom Fahrzeugchassis-Potenzial getrennt sein (IT-Netz). Das Steuergerät ist in der Lage zu prüfen, ob einer der beiden Pole der Batterie einen zu niedrigen Isolationswiderstand zum Chassis aufweist. Für den HIL-Test können definierte Widerstandswerte sowohl auf der Plus- als auch auf der Minuseite vorgegeben werden, die der BMW-Spezifikation für diesen Test entsprechen und bestimmte Bereiche der

Isolationswerte repräsentieren. Das Steuergerät muss daraufhin diese Fehlerfälle erkennen und reagieren (z.B. das System abschalten).

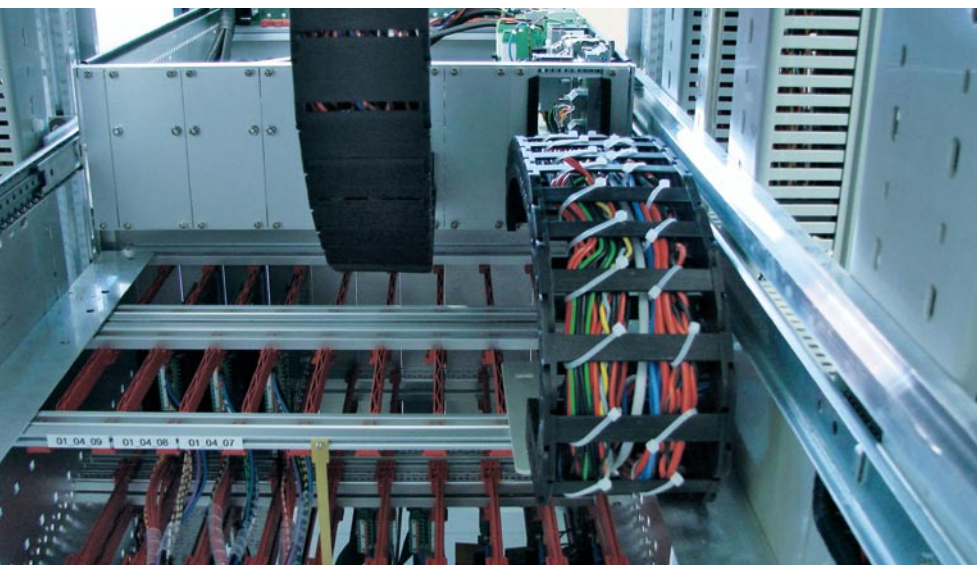
Bewertung des Testsystems

Mit Hilfe der HIL-Simulation ist es möglich, eine Batterie realitätsnah zu simulieren und alle Zustände zu erzeugen, um die Funktionen weiterzuentwickeln und in systematischen Tests zu prüfen. Das ist sowohl mit elektrischen als auch den Kommunikationsschnittstellen (SPI, CAN inkl. Software-Gateway-Funktion) möglich. Des Weiteren stehen leistungsfähige Funktionen zur Simulation elektrischer Leitungsfehler und Isolationsfehler zur Verfügung, die ein wichtiger Bestandteil der Testabläufe zur Freigabe von Steuergeräten sind. Das System von dSPACE hat sich im Betrieb als stabil und zuverlässig erwiesen. Die emulierten Zell- und Klemmenspannungen sind für die Prüfung elementarer Batteriemangementfunktionen, wie z.B. Balancing, hinreichend genau. Der Simulator erfüllt die Anforderungen für die Überprüfung des BMS sowohl bei Funktionstests als auch beim Test der Kommunikation im Steuergeräteverbund. ■

Mit freundlicher Genehmigung der BMW Group.

Kommunikation via SPI-Interface

Die Kommunikation zwischen Steuergerät und Sensorik findet beim BMS über SPI (Serial Peripheral Interface)-Schnittstelle statt. Bei SPI handelt es sich um einen sehr generischen Standard zur synchron-seriellen Master-Slave-Kommunikation integrierter Schaltkreise untereinander. SPI ist demnach für sehr kurze Leitungslängen ausgelegt, was eine Herausforderung für den Simulator-Einsatz darstellt, weil der Aufbau meistens größere Leitungslängen erfordert, als es im Fahrzeug der Fall ist. Um eine Integration im HIL zu ermöglichen, wird ein von dSPACE entwickelter LVDS-SPI-Umsetzer genutzt. Der Umsetzer befindet sich direkt am Steuergerät und wandelt die SPI-Daten in ein LVDS-Protokoll um, über das Leitungslängen von 5 Metern realisiert werden. Ebenso werden über die LVDS-Schnittstelle ankommende Daten in SPI umgesetzt und an das Steuergerät weitergeleitet.



Fazit

- Elektrifizierter Antriebsstrang stellt neue Herausforderungen an die Entwicklung und den Test von Batteriemangement-Steuergeräten
- Testsystem zur virtuellen Nachbildung der elektrischen und thermischen Eigenschaften eines Lithium-Ionen-Energiespeichers bis auf Zellebene
- Umfassende Funktionstests unter Anwendung elektrischer Fehlersimulation für ein Batteriemangementssystem