

Zentrale Herausforderungen und Designaspekte bei Hochspannungs-Batteriemanagementsystemen



© AdobeStock/ Angelo

Ingenieure der praktischen Herausforderungen bewusst sein, die während der Entwicklung und des gesamten Lebenszyklus des Batteriesystems auftreten können. Jedes BMS-Designelement bringt seine eigenen Herausforderungen mit sich, von der Auswahl der richtigen Designarchitektur bis hin zur Implementierung robuster Kommunikationsprotokolle.

Herausforderungen

Im Folgenden werden die wichtigsten Herausforderungen behandelt, die von BMS-Designern und -Ingenieuren zu berücksichtigen sind:

1. Kabelgebundene und drahtlose BMS-Architektur

Kabelgebundene BMS-Architekturen basieren auf robusten, abgeschirmten Kommunikationsleitungen. Diese verbinden die Zellüberwachungseinheiten (CMUs) mit dem Master Controller. Kabelgebundene Systeme bieten ein hohes Maß an Zuverlässigkeit sowie elektromagnetische Störfestigkeit. Allerdings gehen hohe Spannungen und hohe Zellanzahlen auch mit einer erhöhten Komplexität einher.

Drahtlose BMS-Architekturen (wBMS) machen komplizierte Kabelbäume überflüssig und tragen zur Senkung der Herstellungskosten sowie Reduktion der Fehlerquellen bei der Übertragung bei. Allerdings stellen Datenintegrität, Latenzkontrolle und Cybersicherheit zentrale Herausforderungen für drahtlose Systeme dar. Bild 1 zeigt Kabelgebundene und drahtlose BMS-Architekturen im Vergleich

Drahtlose Transceiver

Um diese Herausforderungen zu bewältigen, besteht für Ingenieure die Möglichkeit, drahtlose Transceiver mit geringem Stromverbrauch einzusetzen, die sich für Umgebungen mit hoher Konzentration elektromagnetischer Felder eignen.

Die Notwendigkeit, funktionale Sicherheitsstandards wie ISO 26262 einzuhalten, ist ein weiterer komplizierender Faktor für beide Architekturmodelle. Angesichts der Entwicklung der BMS-Architekturen von kabelgebundenen hin zu drahtlosen Designs kommt der genauen Batteriezustandsabschätzung eine umso größere Relevanz zu.

2. Abschätzung des Lade- und Gesundheitszustands

Herausforderungen bei der Abschätzung des Ladezustands (SoC) und des Gesundheitszustands (SoH) der Batterie: Der **SoC (State of**

Das Batteriemanagementsystem (BMS) ist die Schaltzentrale von Hochspannungs-Batteriepacks (HV-Batteriepacks). Es spielt eine entscheidende Rolle für die Sicherheit und Effizienz des gesamten Batteriespeichersystems. Anwendungen wie Elektrofahrzeuge (EVs), Speicher für erneuerbare Energien oder industrielle Anwendungen erfordern ein sorgfältig konzipiertes BMS, um den Zustand der Batterie zu überwachen, mit externen Steuereinheiten zu kommunizieren und kritische Ausfälle wie thermisches Durchgehen zu verhindern.

Bei Hochspannungsanwendungen steigt die Konzeptionskomplexität von Energiespeichersystemen. Dies ist hauptsächlich auf die hohe Zelldichte zurückzuführen, die eine Echtzeitüberwachung der einzelnen Batteriemodule hinsichtlich Temperatur, Spannung, Strom und SoC/SoH-Zustandsabschätzungen erfordert.

Das BMS entscheidet

Ein mangelhaft konzipiertes BMS kann zu einer Verschlechterung der Batterieleistung, Ineffizienzen und gefährlichen Ausfällen führen, die Brände oder Explosionen zur Folge haben können. Ein gut konzipiertes BMS hingegen ermöglicht die Maximierung der Batterieleistung, gewährleistet Sicherheit und erleichtert die Systemintegration. Ohne ein zuverlässiges BMS ist es daher nicht möglich, die Leistungs- und Sicherheitsanforderungen eines HV-Batteriesystems zu erfüllen.

Angesichts der zentralen Bedeutung des HV-Batteriemanagementsystems müssen sich BMS-



Autoren:

Sanskar Chopra (oben links)
Product Marketing Manager

Amr Elwakil (oben rechts)
Director Engineering

Mohamed Abdelrazek (unten links)
Embedded SW Technical Lead

Mahmoud Tolba (unten rechts)
Senior Hardware Engineer (Level 2)

Arrow Electronics
www.arrow.com

Wired and Wireless BMS Architecture

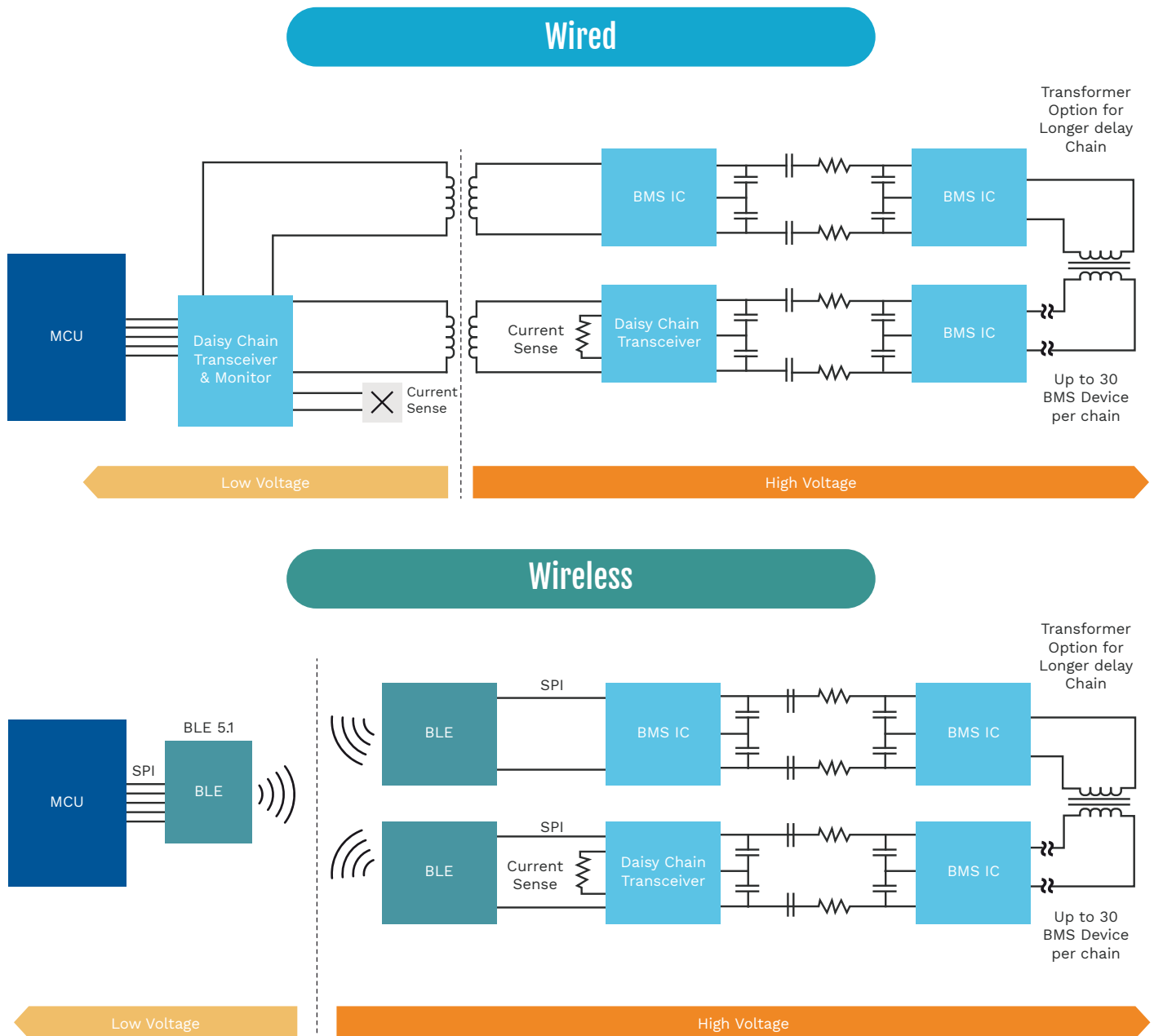


Bild 1: Kabelgebundene und drahtlose BMS-Architekturen im Vergleich

Charge) bestimmt, wie viel Energie eine Batterie im aktuellen Zustand zur Verfügung hat, während der **SoH (State of Health)** die langfristige Leistungsminderung der Batterie beschreibt. Bild 2 zeigt die Veränderungen des SoC und des SoH in Abhängigkeit von den Lade- und Entladezyklen.

- Die **Schätzung des SoC** ist aufgrund der sich ändernden Batteriedynamik schwierig. Es gibt verschiedene Schätzmethoden, wie beispielsweise die Coulomb-Zählung, die Leerlaufspannungsmethode (OCV, Open-Circuit Voltage) und Kalman-Filtertechniken.

Eine Kombination aus Coulomb-Zählung, Kalman-Filterung und OCV-Kalibrierung ist in der Regel optimal, Systemdesigner müssen jedoch die Sensorgenauigkeit und Verarbeitungseffizienz optimieren, um unnötige Komplexität und einen übermäßigen Stromverbrauch zu vermeiden.

- Die **SoH-Schätzung** gestaltet sich noch schwieriger, da sie die Überwachung der langfristigen Batteriedegradation erfordert. Die kapazitätsbasierte Methode ist für die praktische Anwendung nicht geeignet, da sie die Batterie belastet. Die Genauigkeit der Messung des Innenwiderstands wird durch Temperatur- und

SoC-Schwankungen beeinflusst. Die Wirksamkeit des Kalman-Filtermodells hängt wiederum von der Verfügbarkeit brauchbarer Batteriealterungsmodelle ab. Bei maschinellen Lernverfahren ergeben sich Herausforderungen hinsichtlich der Rechenkosten, der Voraussetzungen für kontinuierliches Lernen und des Bedarfs an großen Trainingsdatensätzen.

Eine kombinierte SoH-Schätztechnik auf der Grundlage von Impedanzmessung, Kalman-Filterung und Spannungsüberwachung ermöglicht es, Echtzeitüberwachung, langfristige Trends und rechnerische Machbarkeit miteinander abzustimmen.

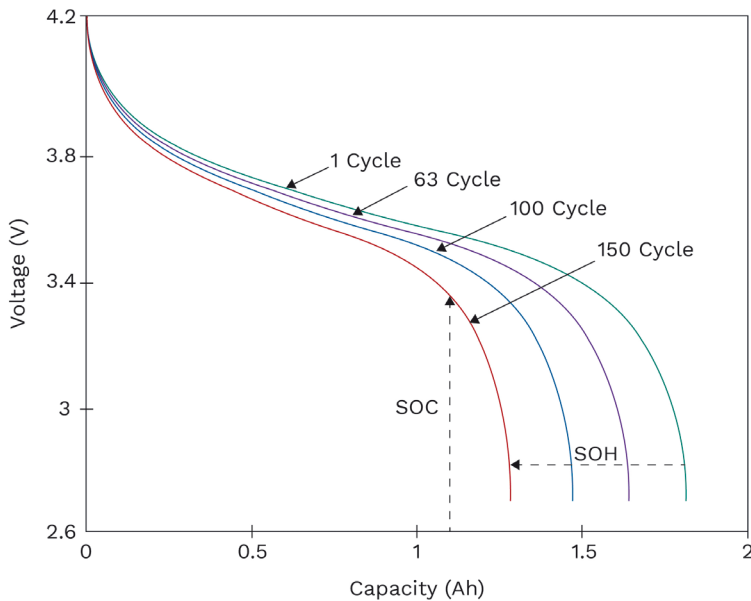


Bild 2: SoC und SoH

Active vs Passive Cell Balancing

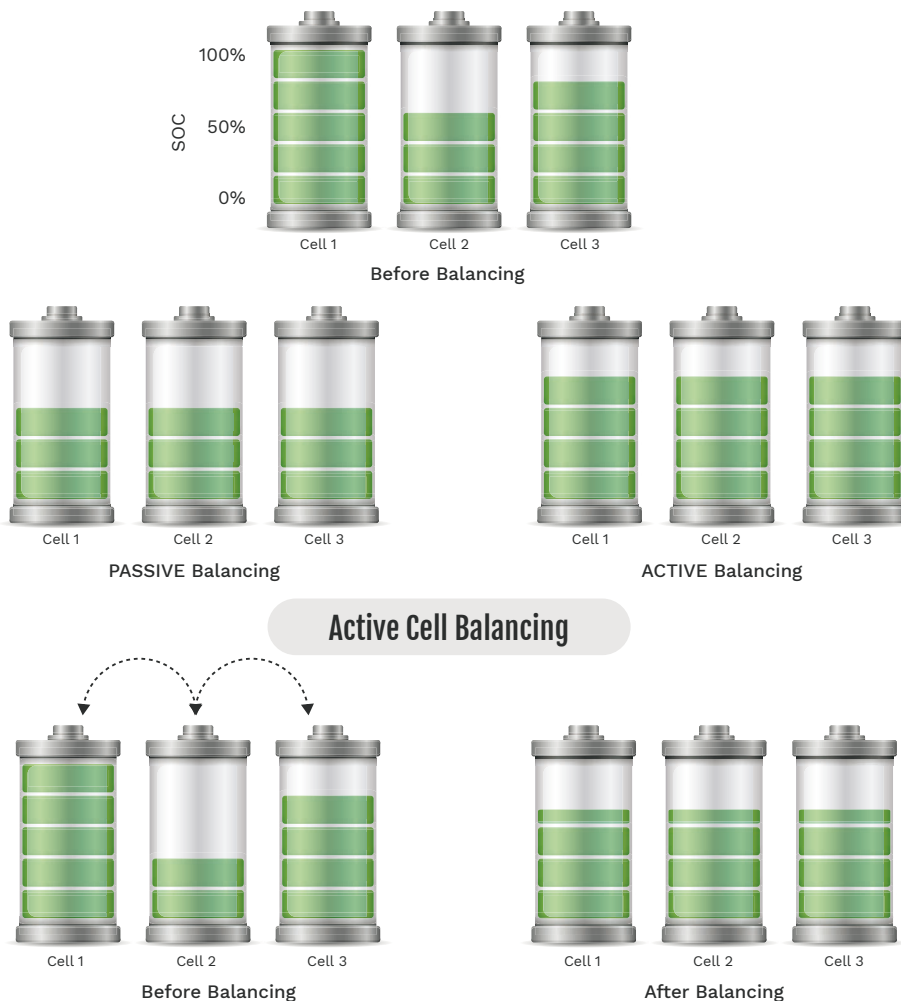


Bild 3: Aktiver und passiver Zellausgleich im Vergleich. Der Zellausgleich trägt ebenfalls wesentlich zur Erhaltung der Leistungsfähigkeit eines Akkupacks bei.

3. Aktiver und passiver Zellausgleich im Vergleich

Beim **passiven Zellausgleich** werden Ableitwiderstände verwendet, um überschüssige Ladung in Form von Wärme abzuleiten. Dies ist eine kostengünstige, einfache und platzsparende Lösung für die meisten Anwendungen. Allerdings ist sie ineffizient und für Akkus mit hoher Kapazität oder langer Lebensdauer ungeeignet, da sie zu energieintensiv ist und große Ladezustandsunterschiede nicht ausgleichen kann.

Beim **aktiven Zellausgleich** hingegen wird die Ladung zwischen den Zellen übertragen, wobei ein geschalteter Kondensator, eine induktive oder transformatorgekoppelte Schaltung zum Einsatz kommt. Der aktive Zellausgleich verbessert zwar die Energieeffizienz und verlängert die Lebensdauer von Batterien, ist jedoch mit einer erhöhten Komplexität des Designs verbunden. Die Herausforderungen bestehen dabei insbesondere im Hinblick auf den Kompromiss zwischen Ausgleichsgeschwindigkeit und Schaltungsgröße, die Isolierung zwischen den Zellen und das Wärmemanagement der aktiven Komponenten. Beim Systemdesign muss sichergestellt werden, dass es zu keiner Beeinträchtigung des Hauptstrompfads oder der Kommunikationssignale durch die aktiven Ausgleichsschaltungen kommt, insbesondere in Hochspannungssystemen mit strengen EMI-Spezifikationen (Bild 3).

4. Steuerung und Überwachung von Aktoren

Die Aktoren in einem Hochspannungs-Batteriemanagementsystem (HV-BMS), wie Schütze, Vorladeschaltungen, Kühlsystemumpen oder Sicherheitsabschaltungen, müssen präzise gesteuert werden (Bild 4). Die größte Herausforderung besteht darin, die Aktoren unter verschiedenen Betriebs- und Fehlerbedingungen so zu koordinieren, dass ein sicherer Betrieb des Akkus gewährleistet ist. Dabei müssen die Überwachung des Aktorzustands (über Positionssensoren oder Stromrückmeldung), die Reaktionszeit und die Fehlerdiagnose in Steuerungsstrategien berücksichtigt werden.

Darüber hinaus birgt die Konstruktion von Hochspannungsschützern eine Reihe von Herausforderungen, wie z. B. die Begrenzung des Einschaltstroms, die Lichtbogenlöschung und das Verschweißen von Kontakten. Die Implementierung des Aktorzustands in die Fehlerbehandlungslogik des BMS ist wichtig, insbesondere im Hinblick auf die Bewahrung der funktionalen Sicherheit. Aktorentreiber müssen galvanisch isoliert sein, eine Echtzeitüberwachung ermöglichen und robust gegenüber transienten Spannungsereignissen sein, um eine Beeinträchtigung der Systemsicherheit oder Beschädigung der Komponenten durch unsachgemäßen Betrieb zu verhindern.

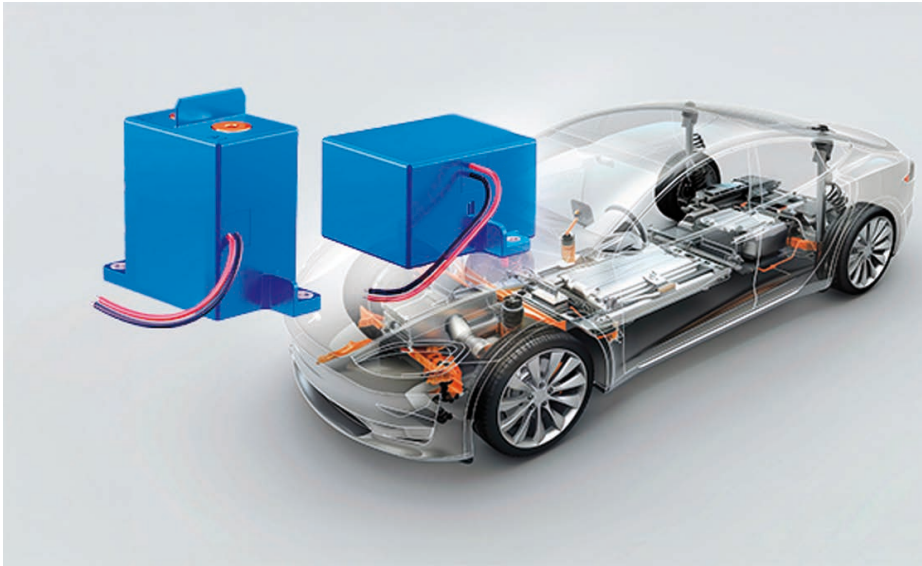


Bild 4: Steuerung von Aktoren

5. Kommunikationsprotokolle und Master-Slave-Architektur

Ein Hochspannungs-BMS basiert in der Regel auf einer Master-Slave-Architektur mit mehreren Slave-CMUs (Bild 5). Diese überwachen die Zellenspannungen, Temperaturen und den Ausgleichsstatus und melden diese Daten an einen zentralen Master Controller. Dieser Top-Down-Ansatz birgt Herausforderungen in Bezug auf Datenaggregation, Fehlerisolierung und Redundanzsteuerung.

Kommunikationsprotokolle wie CAN, CAN FD, SPI oder Ethernet sollten auf der Grundlage der erforderlichen Datenübertragungsrate und der Erweiterbarkeit des Systems ausgewählt werden. CAN weist beispielsweise eine zuverlässige Leistung auf, ist jedoch nicht für die Bandbreite in großen Akkupacks geeignet. Ethernet hingegen bietet einen höheren Durchsatz mit ausgefeilter Isolierung und Fehlerprüfung.

Aspekte wie die Knotensynchronisation, Messungen, Zeitstempel und Sicherheit müssen von

Konstrukteuren ebenfalls berücksichtigt werden. Der Diagnosedeckungsgrad und die Fehlertoleranz sind von entscheidender Bedeutung, um Ausfällen auf Systemebene aufgrund von Kommunikationsfehlern vorzubeugen.

6. Sicherheit

Produktsicherheit, funktionale Sicherheitsstandards und -konformität: Bei der Konstruktion eines Hochspannungs-BMS sind zwei wichtige Sicherheitsaspekte zu berücksichtigen: Produktsicherheit und funktionale Sicherheit. Die **Produktsicherheit** gewährleistet die physische Widerstandsfähigkeit des Systems gegenüber mechanischen Vibrationen, thermischer Belastung und elektrischen Gefährdungen. Dazu gehört die Auswahl der richtigen Materialien, Isolierung und mechanischen Konstruktion, um Verletzungen unter vorhersehbaren Fehlerbedingungen zu vermeiden.

Die **funktionale Sicherheit** betrifft die Funktionsweise des BMS bei Fehlern wie thermischem Durchgehen, Kommunikations- oder Sensorausfällen. Sie stellt sicher, dass das System Fehler erkennen und entsprechend reagieren kann, indem es das Risiko eines unsicheren Betriebsverhaltens verringert. Bestimmte Normen wie IEC 61508 und IEC 60730 Anhang H werden häufig zur Regelung dieses Betriebsverhaltens herangezogen.

Die bewährte Vorgehensweise besteht darin, sich für die Sicherheit auf Hardware- und Systemebene an IEC 61508 zu orientieren und IEC 60730-1 Anhang H für die Softwaresteuerung

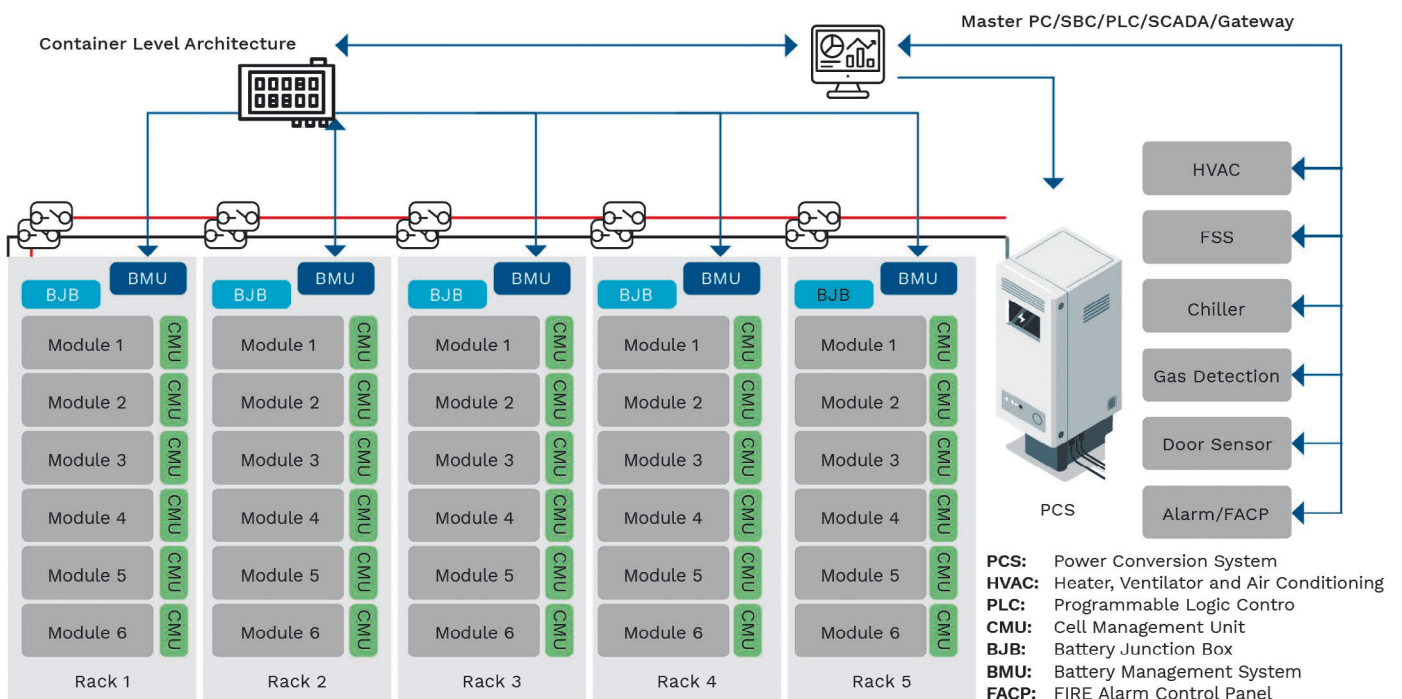


Figure 5: Master Slave Architecture

Bild 5: Master-Slave-Architektur

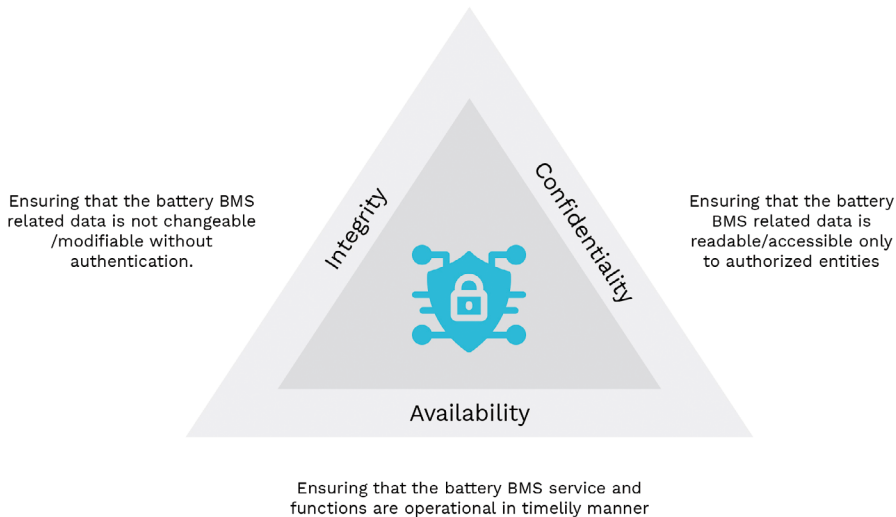


Bild 6: Grundlagen der Cybersicherheit in BMS

heranzuziehen. Diese duale Konformitäts-/Normenstrategie ebnet den Weg für die globale Zertifizierung, die robuste Entwicklung von Lebenszyklen und die Erlangung der Marktreife.

7. Vorschriften und Systemdesign

Neue Vorschriften für Batteriemanagementsysteme und damit verbundene Herausforderungen beim Systemdesign: Eine Reihe von aktuell geltenden Vorschriften zielen darauf ab, eine größere Transparenz, Sicherheit und Nachhaltigkeit bei der Konstruktion von BMS zu gewährleisten.

Beispielsweise wurde mit der EU-Batterieverordnung 2023/1542 der „Batteriepass“ eingeführt. Ab 2027 soll dadurch eine Echtzeit-Rückverfolgbarkeit und die Dokumentation des CO₂-Fußabdrucks ermöglicht werden. Dies erfordert sicheres Datenhandling, Cloud-Integration und eine rückverfolgbare Protokollierung der Batterielebensdauer.

Internationale Normen wie UN/DOT 38.3, IEC 62619 und UL 1973 sehen Konstruktionsvorgaben für thermische Sicherheit und Fehlererkennung vor. Es gibt außerdem verschiedene Vorschriften für Second-Life-Batterien, während

Recyclingziele zusätzlich die Notwendigkeit von SoH-Tracking und modularen Designs erhöhen, um die Wiederverwendung zu erleichtern.

Um allen diesen Anforderungen gerecht zu werden, muss das BMS OTA-Compliance-Updates, Nachhaltigkeitskennzahlen und eine sichere Datenerfassung unterstützen, ohne dabei die Leistung oder Skalierbarkeit zu beeinträchtigen.

8. Cybersicherheit

Herausforderungen und Umsetzung der Cybersicherheit in Batteriemanagementsystemen (Bild 6): Batteriemanagementsysteme sind heute über IoT-, KI- und Cloud-Plattformen vernetzt. Aufgrund dieser Konnektivität ist die Cybersicherheit ein entscheidender Aspekt bei der Systemkonzeption. Zahlreiche Bedrohungen wie Firmware-Manipulation, Denial-of-Service-Angriffe und Datenschutzverletzungen können sich negativ auf die Sicherheit und Leistung auswirken.

Zur Minimierung dieser Risiken bieten sich Ingenieuren verschiedene Strategien, wie z. B. End-to-End-Verschlüsselung, sichere Firmware-Updates, Intrusion Detection und Multi-Faktor-Authentifizierung. Blockchain-basierte Datenin-

tegrität wird ebenfalls als Option für die Rückverfolgbarkeit des Lebenszyklus in Betracht gezogen.

Eingebettete Cybersicherheit

Allerdings müssen dabei Herausforderungen wie begrenzte Verarbeitungsressourcen, durch Verschlüsselung verursachte Latenzzeiten und die Einhaltung sich weiterentwickelnder Standards (z. B. ISO/SAE 21434, IEC 62443) berücksichtigt werden. Zukunftsfähige BMS-Designs erfordern von Anfang an eingebettete Cybersicherheit, um sowohl die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften als auch Betriebsstabilität sicherzustellen.

Fazit

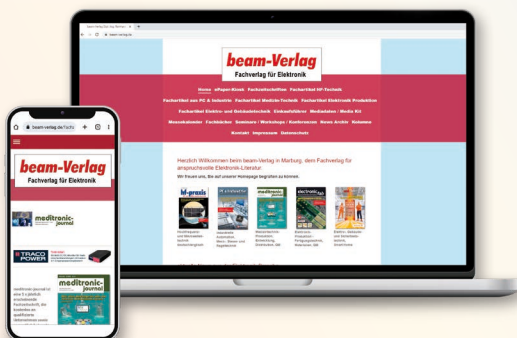
BMS-Ingenieure und Systemintegratoren müssen sich mit den hier besprochenen Herausforderungen auseinandersetzen. Um robuste BMS-Lösungen für Elektrofahrzeuge, für die Speicherung erneuerbarer Energien oder für industrielle Anwendungen zu entwickeln, sollten die genannten Designaspekte berücksichtigt werden.

Mit einem speziellen BMS Center of Excellence (CoE) bietet eInfochips Entwicklungsdienstleistungen für Hochspannungs-BMS für verschiedene industrielle Anwendungen wie Elektrofahrzeuge, Energiespeichersysteme, erneuerbare Energien, Industrieanlagen usw. Mithilfe seiner hauseigenen Labore und Infrastruktur unterstützt eInfochips seine Kunden bei der schlüsselfertigen Entwicklung von BMS-Hardware, eingebetteter Software, industriellem/mechanischem Design, Software-Engineering, funktionaler Sicherheitsbewertung, Cybersicherheitsimplementierung und der Einhaltung gesetzlicher Standards und Zertifizierungen.

Um die Entwicklung des BMS zu optimieren, hat eInfochips ein produktionsreifes HV-BMS-Referenzdesign auf Basis der NXP S32K3 MCU geschaffen, das den Normen IEC 61508 und IEC 60730 entspricht.

Weitere Informationen finden Sie in unserem Whitepaper: <https://www.einfochips.com/resources/publications/key-challenges-and-design-considerations-in-high-voltage-battery-management-systems/> ◀

www.beam-verlag.de



MIT EINEM KLICK SCHNELL INFORMIERT!

- Umfangreiches Fachartikel-Archiv zum kostenlosen Download
- Aktuelle Produkt-News aus der Elektronikbranche
- Unsere Zeitschriften und Einkaufsführer als E-Paper
- Messekalendar
- Ausgewählte Workshops und Seminare