Springer Vieweg

ATZ extra

Artikel aus ATZelektronik
09/2026



Reichweite, Leistung, Fahrerlebnis:

Elektroantriebe intelligent kalibrieren

ETAS



© depositphotos I Gorodenkoff I Etas

Mit optimierter Kalibrierung zum leistungsstarken E-Antrieb

Die Entwicklung von Elektroantrieben ist ein Balanceakt. Ingenieurinnen und Ingenieure müssen Reichweite, Lebensdauer und Fahrdynamik maximieren, ohne Kosten und Funktionssicherheit zu vernachlässigen. Der Schlüssel liegt in einer ganzheitlichen Systemoptimierung. Etas zeigt, wie sich Effizienz und Fahrerlebnis durch intelligentes Messen und Kalibrieren von Batterie, Antriebsstrang und Thermomanagement steigern lassen.

VERFASST VON



Dipl.-Ing. (BA) Klaus Grabmaier
ist Technical Architect Measurement & Calibration bei der Etas GmbH in Stuttgart.



Dr. Mike Wolter
ist Solution Manager Measurement & Calibration bei der Etas GmbH in Stuttgart.

Zweifellos ist die Elektromobilität endgültig auf dem Vormarsch. Zwar verschafft die richtige Kalibrierung des Antriebs grundsätzlich jedem Fahrzeug, unabhängig von seiner Antriebsart, einen entscheidenden Qualitätssprung, für Elektrofahrzeuge (Electric Vehicles, EVs) gilt dies jedoch in besonderem Maße. Denn die Entwicklung von Elektroantrieben ist mit komplexen Wechselwirkungen und Zielkonflikten verbunden. Es gilt, maximale Reichweite und Leistung mit der Forderung nach geringem Gewicht, langer Lebensdauer, hoher Betriebssicherheit sowie beherrschbaren Entwicklungs- und Hardwarekosten in Einklang zu bringen. Zugleich verspricht die Optimierung des Elektroantriebs durch eine angepasste Mess- und Kalibrierstrategie den Automobilherstellern handfeste Wettbewerbsvorteile. Diese umfassen einerseits eine verbesserte Leistungsfähigkeit bei geringeren Kosten, andererseits aber auch ein verbessertes Nutzererlebnis, angefangen beim Fahrkomfort bis hin zur verlässlich exakten Restreichweitenanzeige.

Elektroantriebe sind komplexe, vernetzte Systeme, deren Bestandteile eng miteinander verknüpft sind und sich gegenseitig beeinflussen. Die Optimie-

rung der einzelnen Komponenten ist daher zwar ein wichtiger Zwischenschritt, das eigentliche Potenzial aber liegt in der ganzheitlichen Integration und Koordination der Subsysteme. Am Ende steht dann idealerweise ein möglichst perfekt abgestimmtes Zusammenspiel der drei Kernsysteme Hochvoltbatterie, elektrischer Antriebsstrang und Thermomanagement.

HOCHVOLT-BATTERIESYSTEM

Das Hochvolt-Batteriesystem ist nicht nur Herzstück, sondern auch zentraler Kostenfaktor moderner Elektrofahrzeuge. Es besteht im Wesentlichen aus den Batteriezellen, der unterstützenden Peripherie und dem Batteriemanagementsystem (BMS) als zentraler Steuereinheit. Die Leistungsfähigkeit des Systems hängt dabei maßgeblich von seinem Ladezustand (State of Charge, SoC), dem Alterungszustand (State of Health, SoH) und der Betriebstemperatur ab.

Bei der Entwicklung besteht die Kunst darin, für das Batteriesystem den besten Kompromiss aus maximaler Leistung, langer Lebensdauer und hoher Betriebssicherheit zu finden. Die Optimierung erfolgt dabei über einen iterativen Mess- und Kalibrierprozess. An dessen Anfang steht die präzise Echtzeiterfassung von Einzelzellspannungen, Strömen und Temperaturen im gesamten Batteriepack. Mittels dedizierter Mess- und Analysewerkzeuge (zum Beispiel Etas Inca und MDA) lässt sich die Unmenge verschiedener Daten so aufbereiten und zueinander in Beziehung setzen, dass kritische Zustände wie Überlast einzelner Batteriezellen, insbesondere aber auch Zelldrift und die Effizienz des Balancing-Prozesses, sichtbar werden, **BILD 1**.

ZELL-IMBALANCE-MINIMIERUNG

Die so gewonnenen Erkenntnisse bilden dann die Basis für eine gezielte Feinjustierung der Algorithmen im BMS, bei der Schutzfunktionen gezielt optimiert und die Genauigkeit bei der Berechnung von SoC und SoH weiter verbessert werden. Eine immer wichtigere Rolle spielen dabei auch Methoden wie Coulomb-Zählung und Kalman-Filter. Diese finden vor allem Anwendung bei den inzwischen häufig verbauten Lithium-Eisenphosphat-Zellen (LFP-Zellen), deren Ladezustand sich über die Zellspannung kaum verlässlich bestimmen lässt.

Für den Automobilhersteller ist das ein lohnendes Unterfangen, denn erst durch das genaue Ermitteln des Ladezustands jeder einzelnen Zelle und durch die Minimierung der Zell-Imbalance lässt sich das Potenzial des Batteriesystems voll ausschöpfen. Am Ende stehen eine höhere Reichweite, eine verlängerte Lebensdauer und eine souveräne Leistungsentfaltung des Fahrzeugs. Ein solchermaßen präzise kalibriertes System ermöglicht es, die Batterien effizienter auszulegen und somit die Kosten zu senken.

ELEKTRISCHER ANTRIEBSSTRANG

Kaum weniger bedeutsam für die Leistungsfähigkeit des EV ist der elek-



BILD 1 Erfassung und Analyse von Echtzeitdaten zu Einzelzellspannungen, Strömen und Temperaturen machen kritische Zustände, Zell-Imbalance und die Effizienz des Balancing-Prozesses sichtbar (Screenshot) (© Etas)

trische Antriebsstrang. Bestehend aus Elektromotor(en), Leistungselektronik und Getriebe, wandelt er die elektrische Energie in Vortrieb um. Sein Wirkungsgrad ist jedoch keine feste Größe, sondern stark von Drehzahl und angefordertem Drehmoment abhängig. Die Herausforderung besteht darin, den Antriebsstrang über das gesamte Einsatzspektrum des Fahrzeugs hinweg möglichst oft in seinem effizientesten Bereich zu betreiben. Sind zwei Motoren verbaut, erlaubt die Betriebsstrategie, die Motoren mit ihren unterschiedlichen Eigenschaften gezielt zur Erreichung hoher Effizienz zu nutzen. Für die bestmögliche Konfiguration werden im realen Fahrbetrieb und auf dem Prüfstand zunächst zeitsynchron elektrische Leistungsdaten wie Hochvoltströme und -spannungen am Inverter mit Fahrzeugdaten aus Steuergeräten und Netzwerken erfasst und zusammengeführt. Die anschließende Datenanalyse und Modellbildung deckt Ineffizienzen auf und ermöglicht die Generierung detaillierter Wirkungsgrad- und Verlustkennfelder für die jeweilige Motor-Inverter-Einheit, **BILD 2**.

Diese Kennfelder sind Grundlage für die finale Kalibrierung des Antriebsstrangs. Zunächst per Simulation mittels Software-in-the-Loop (SiL) sowie Hardware-in-the-Loop (HiL) und anschließend im Fahrzeug werden die Parameter der Steuergerätesoftware so justiert, dass Determinanten wie Drehmomentaufteilung und Rekuperation im Antriebsstrang perfekt zusammenspielen. Im Fokus steht dabei nicht allein die maximale Effizienz, sondern auch eine gelungene Abstimmung auf das Fahrgefühl. Übergänge, die beispielsweise aus dem Zuschalten einer zweiten Achse oder dem Wechsel von rekuperativem zu mechanischem Bremsen resultieren, müssen für den Fahrer harmonisch und unmerklich ablaufen.

INTELLIGENTE DREHMOMENTVERTEILUNG

Bei Allrad- oder Mehrmotorensystemen liegt das größte Effizienzpotenzial in der intelligenten Verteilung des Antriebsmoments, dem Torque Splitting. Stellschraube hierfür ist die Fahrzeugsteuereinheit (Vehicle Control Unit, VCU), die als zentraler Antriebskoordinator bei jeder Anforderung durch die Fahrerin oder den Fahrer in Echtzeit die optimale Drehmomentverteilung berechnet, um so die Gesamtverluste des Systems zu minimieren. Die zuvor vermessenen Wirkungsgradkennfelder für jede einzelne Motor-Inverter-Einheit dienen hierfür als Datengrundlage. Den Torque-Splitting-Algorithmus in der VCU gilt es so zu kalibrieren, dass er das geforderte Drehmoment anhand dieser Kennfelder möglichst effizient auf die Motoren aufteilt. Dabei wird die Strategie verfolgt, eine Achse komplett abzuschalten, wann immer es die Fahrsituation erlaubt, damit sich der vom Drehmoment unabhängige Grundverbrauch der Motoren reduziert. Dies sorgt für eine signifikante Reduzierung des Energieverbrauchs und maximiert folglich die Reichweite. Gleichwohl darf auch hier der Effizienzgewinn das Fahrerlebnis nicht schmälern. Das Ein- und Ausblenden der Motordrehmomente des Mehrmotorsystems muss daher ein homogenes Fahrgefühl gewährleisten, ohne die Fahrsicherheit zu kompromittieren.

PRÄDIKTIVES THERMOMANAGEMENT

Ein weiterer entscheidender Faktor für die Effizienz des Elektroantriebs ist die Optimierung des Thermomanagements. Aufgrund des hohen Wirkungsgrads moderner Elektromaschinen steht während der Fahrt kaum nutzbare Abwärme zur Verfügung. Folglich muss nahezu die gesamte Energie zum Heizen oder Kühlen von Batterie und Fahrzeuginnenraum der Traktionsbatterie entnommen werden, was die Reichweite unmittelbar reduziert. Beim Thermomanagement kommt es demnach darauf an, mit möglichst geringem Energiebedarf bei jeder Witterung und ohne Abstriche bei Leistung und Komfort die konkurrierenden thermischen Anforderungen auszubalancieren. So wird die Hochvoltbatterie beispielsweise aktiv über die Klimaanlage gekühlt und tritt damit in direkte Konkurrenz zur Klimatisierung der Kabine. Andersherum werden die Fahrmotoren mitunter in einen speziellen Betriebsmodus versetzt, in dem sie gezielt hohe Verluste erzeugen, die zum Aufheizen von Batterie und Innenraum genutzt werden. Der Weg zum richtigen Thermomanagement führt daher zwar über eine detaillierte Analyse der thermischen Energieflüsse und des thermodynamischen Prozesses des Kältemittelkreislaufs, die anschließende Kalibrierung jedoch sollte nicht nur die optimale Balance innerhalb des thermischen Systems herstellen, sondern auch dessen Verzahnung

BILD 2 Kalibrierung der Motor-Inverter-Einheit im Antriebsstrang: Die Analyse der Messdaten deckt Ineffizienzen auf und ermöglicht die Optimierung des Gesamtsystems hinsichtlich Effizienz und Fahrkomfort (© Etas)



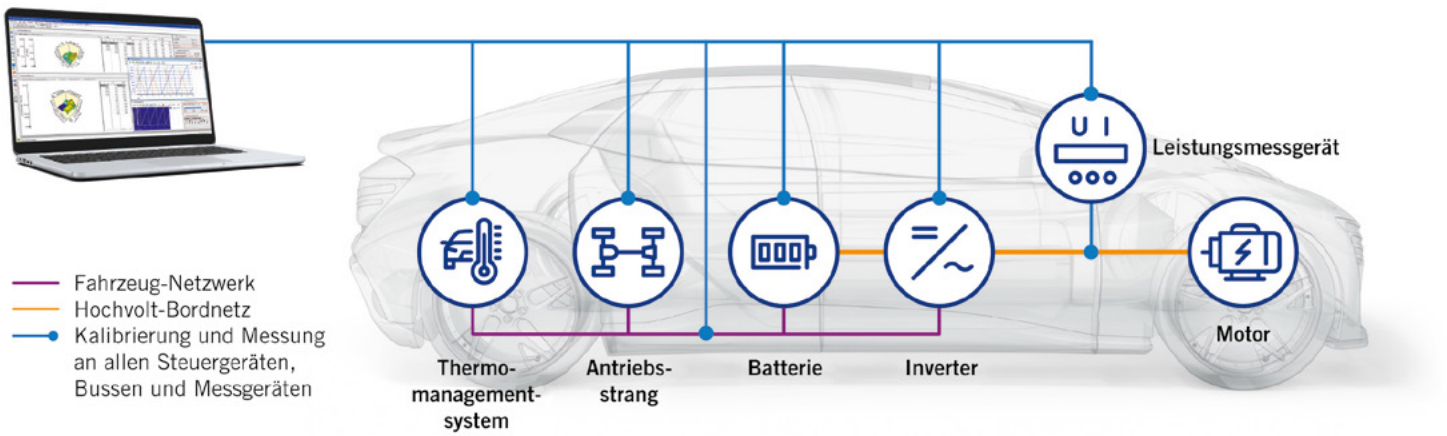


BILD 3 Zur Optimierung des Gesamtsystems werden die Systemparameter anhand von Messdaten aus den Steuergeräten aller Domänen, der Netzwerkkommunikation sowie analogen Messdaten aus dem Hochvoltsystem kalibriert (© Etas)

mit dem Antriebsstrang einbeziehen.

Besonderes Potenzial liegt darüber hinaus in der prädiktiven Steuerung des Thermomanagementsystems unter intelligenter Nutzung von Navigations- und Fahrzeugdaten. So kann etwa die Batterie bereits vor einem geplanten Schnellladevorgang, unter Berücksichtigung von Faktoren wie Fahrprofil, Topografie, Außentemperatur und zu erwartender Leistung der Ladesäule, auf die optimale Temperatur von bis zu 60 °C vorkonditioniert werden. Eine solchermaßen vorausschauende Regelung maximiert nicht nur die Ladeleistung, sondern steigert Effizienz und Lebensdauer des Elektroantriebs insgesamt.

AUFLÖSUNG VON ZIELKONFLIKTEN UND EFFIZIENTES DATENMANAGEMENT

Die spezifische Optimierung von Traktionsbatterie, Antriebsstrang und Thermomanagement stellt eine grundlegende Voraussetzung dar. Jedoch birgt die übergreifende Harmonisierung dieser Einzeldisziplinen nicht nur weiteres großes Potenzial, sondern ist funktional notwendig. Denn der Zielkonflikt zwischen Effizienz und Lebensdauer der Komponenten auf der einen und Fahrdynamik und Fahrkomfort auf der anderen Seite begleitet das EV im Betrieb permanent weiter. Kernaufgabe der finalen Fahrzeugkalibrierung ist es daher, diesen Widerstreit durch eine hierarchische Regelungsarchitekturen aufzulösen, **BILD 3**. Das bedeutet, eine auf maximale Effizienz ausgelegte Betriebsstrategie bildet zwar die Basis, kann aber in bestimmten Situationen von übergeordneten Funktionen übersteuert werden. So hat die Fahrdynamik, gesteuert durch das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP), in kritischen Momenten stets Vorrang. Ebenso kann eine Komforteigenschaft höher als die Komponentenlebensdauer gewichtet werden, etwa wenn bei niedrigem Ladestand oder kalter Batterie dennoch eine hohe Leistung freigegeben wird. Über Fahrmodi wie „Eco“, „Comfort“ oder „Sport“ erhält die Fahrerin oder der Fahrer die Möglichkeit, diese Priorisierung selbst zu beeinflussen. Das Ergebnis ist ein intelligentes Fahrzeug, das meist hocheffizient operiert, aber bei Bedarf verzögerungsfrei maximale Stabilität und Leistung bereitstellt.

Grundlage für die komplexe Abstimmung des gesamten Elektroantriebs ist ein effizientes Datenmanagement. Die gewaltigen Datenmengen aus Testfahrten und Prüfstandsläufen erfordern eine robuste Infrastruktur. Der Aufbau eines zentralen Datenspeichers in der Cloud, der als Referenz (Single Source of Truth, SSOT) für alle Messdaten dient, ist hier ein entscheidender Erfolgsfaktor. Solch eine Plattform, zum Beispiel eine Kette aus EATB, Data Operator und Ascmo von Etas, bricht Datensilos auf, ermöglicht die globale und kollaborative Arbeit von Entwicklungsteams und schafft die Voraussetzung für auf künstliche Intelligenz gestützte Analysen, Modellierung und eine schnelle, zielführende Kalibrierung.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ein moderner Elektroantrieb ist mehr als die Summe seiner Teile. Eine intelligente Kalibrierung koordiniert daher nicht allein das Zusammenspiel aller Komponenten in Batteriesystem, Antriebsstrang und Thermomanagement, sondern bringt diese drei Kernsysteme auch miteinander in Einklang. Erst der bestmögliche Kompromiss aus Reichweite, Lebensdauer, Kosten und Fahrdynamik ermöglicht die Umsetzung eines Elektrofahrzeugs, das gleichermaßen hohe Effizienz und sehr gutes Fahrererlebnis bietet. Gegenwart und Zukunft der Elektromobilität sind gekennzeichnet von scharfem Wettbewerb, hohem Kostendruck und schonendem Ressourceneinsatz. In solch einem Umfeld wandelt sich eine intelligente, datengetriebene Kalibrierungsstrategie vom reinen Entwicklungsschritt zum strategischen Erfolgsfaktor.

IMPRESSUM:
Sonderausgabe 2026 in Kooperation mit ETAS GmbH, Robert-Bosch-Straße 1, 44803 Bochum; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Postfach 1546, 65173 Wiesbaden, Amtsgericht Wiesbaden, HRB 9754, USt-IdNr. DE81148419

GESCHÄFTSFÜHRER:
Stefanie Burgmaier | Andreas Funk | Alexandra Dambeck

PROJEKTMANAGEMENT: Anja Trabusch

TITELBILD:
© depositphotos | Gorodenkoff | Etas

ETAS

Let's kickstart future mobility



Empowering Tomorrow's Automotive Software

www.etas.com