

## SICHERE MESSUNG HOHER STRÖME UND SPANNUNGEN

# Funktionsprüfung eines Brennstoffzellen-Antriebs

Brennstoffzellenfahrzeuge sind ein wesentlicher Bestandteil der Elektromobilität. Die Kernkomponente des Antriebs ist der elektrochemische Reaktor, der Brennstoffzellen-Stack. Auf Prüfständen wird die Inbetriebnahme durchgeführt und alle wesentlichen Funktionen getestet. Danach werden die Anforderungen an den gesamten Brennstoffzellen-Antrieb mit einer System-Validierung überprüft. Alle Grunddaten des Brennstoffzellen-Antriebs werden hochgenau gemessen und die Leistungsparameter nachgewiesen.



© Fokussiert | AdobeStock

Der Brennstoffzellen-Stack besteht aus einem Stapel von einzelnen Brennstoffzellen. In jeder dieser in Serie geschalteten Zellen wird in einer sogenannten „kalten Verbrennung“ die chemische Reaktionsenergie des kontinuierlich zugeführten Wasserstoffs und Luftsauerstoffs in elektrische Energie umgewandelt. Dazu bedarf es eines genau arbeitenden Versorgungssystems, das Wasserstoff, Luftsauerstoff und Feuchtigkeit fein ge-

regelt zuführt. Der Stack wird über ein Kühlsystem, das auch eine Heizung enthält, konditioniert.

Der Brennstoffzellen-Strom ist ein Maß für die auftretende Stromdichte im Stack. Je nach Charakteristik der Brennstoffzelle führt der Ausgangsstrom der Brennstoffzelle zu einer aktuellen Brennstoffzellenspannung, die synchron gemessen werden muss. Diese sogenannte Stapelspannung setzt sich aus der Anzahl der Brennstoffzellen im

Stack zusammen. Ohne Leistungsabgabe hat der Brennstoffzellen-Stack eine bestimmte Leerlaufspannung, die ebenfalls in allen Testabläufen kontrolliert wird.

Der brennstoffzellenelektrische Antrieb ist meist eine eigene komplette Zulieferkomponente eines Fahrzeugs (Bild 1). Im Verbund mit den anderen Komponenten des Antriebsstrangs ergibt sich die Gesamt-Fahrzeugleistung und -dynamik. Die Kenndaten, Funktionen und Eigenschaften des Brennstoffzellen-Antriebs werden auf Prüfständen bis zur Auslieferung mit unterschiedlichen Tests nachgewiesen.

Die Energie wird an den DC/DC-Wandler abgegeben, der alle weiteren Hochvolt-Aggregate und Komponenten eines Fahrzeugs bedient. Sie sind über das Hochvolt-Bordnetz miteinander verbunden. Die Leistungselektronik des Reglers enthält ebenfalls wichtige Funktionen, wie die Einstellung des Stack-Sollstroms für den jeweiligen Betriebsmodus. Er enthält weiterhin einen Hochsetzsteller, beispielsweise auf 700 V für den Motor-Antriebsstrang (Inverter und E-Motor) und die Traktionsbatterie.

Brennstoffzellen-Fahrzeuge verfügen in der Regel über diverse Betriebsmodi, je nach der gewählten Betriebsstrategie und der gewählten Fahrdynamik. Der Brennstoffzellen-Stack liefert die notwendige elektrische Energie so-

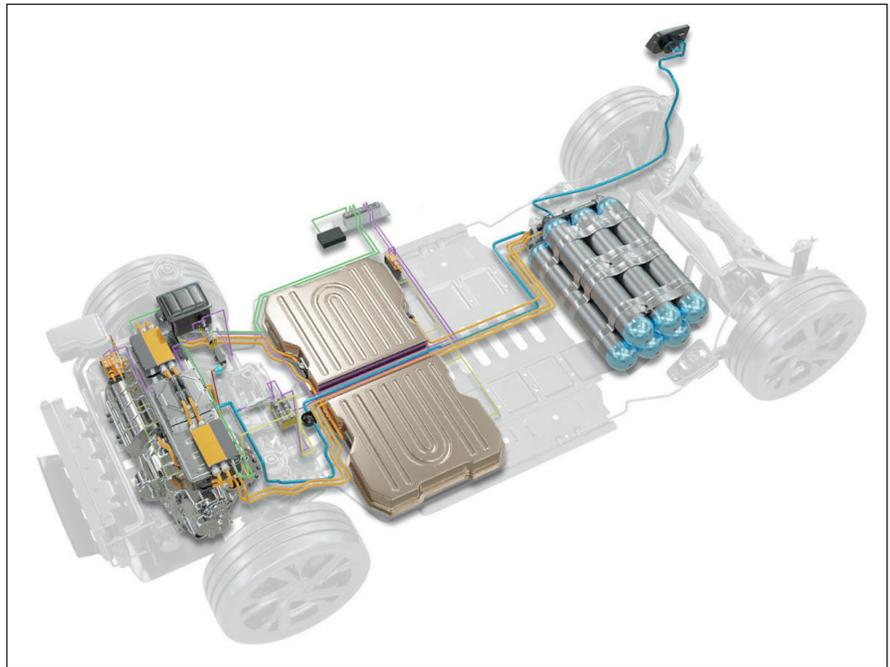
wohl für den Fahrtrieb als auch das Aufladen der Batterie.

**Herausforderung**

Die Funktionstests umfassen alle Betriebsfunktionen wie Kühlkreislauf, Kühlregelung, Heizung, Wasserstoffpfade (Anodenpfad), Luftpfade (Kathodenpfad), Hochvoltpfade, Sensorik und Brennstoffzellensteuergerät. Zur Funktionsprüfung und Validierung des Brennstoffzellen-Antriebssystems ist die exakte Messung unterschiedlicher physikalischer Parametern erforderlich. Neben Temperaturen, Volumenströmen, Feuchte und Drücken sind Hochvolt-sichere Messungen von hohen Strömen, Spannungen in den Hochvoltpfaden notwendig. Daraus werden die abgegebene Energie, die Leistung und der Wirkungsgrad berechnet.

Die einzelnen Subsysteme für Wasserstoff, Luft und Kühlkreislauf werden einzeln in Betrieb genommen und appliziert. Für den Start des Brennstoffzellen-Systems wird ein definierter Anfahrprozess durchgeführt. Danach werden die spezifischen Systemfunktionen getestet: Kaltstartverhalten, Warmlaufphasendauer, Betriebspunkte, Thermomanagement oder die Kühlkreisläufe. Eine Funktionsprüfung weist nach, ob sich das System so verhält wie es sollte, beispielsweise ob alle Regelungsparameter richtig eingestellt sind.

Mit der Validierung werden die Systemanforderungen wie Leistungsparameter, Reaktionsgeschwindigkeit bei Laständerungen oder Lebensdauer mit Versuchen und Dauerläufen nachgewiesen. Durch die Strom-, Spannungs- und



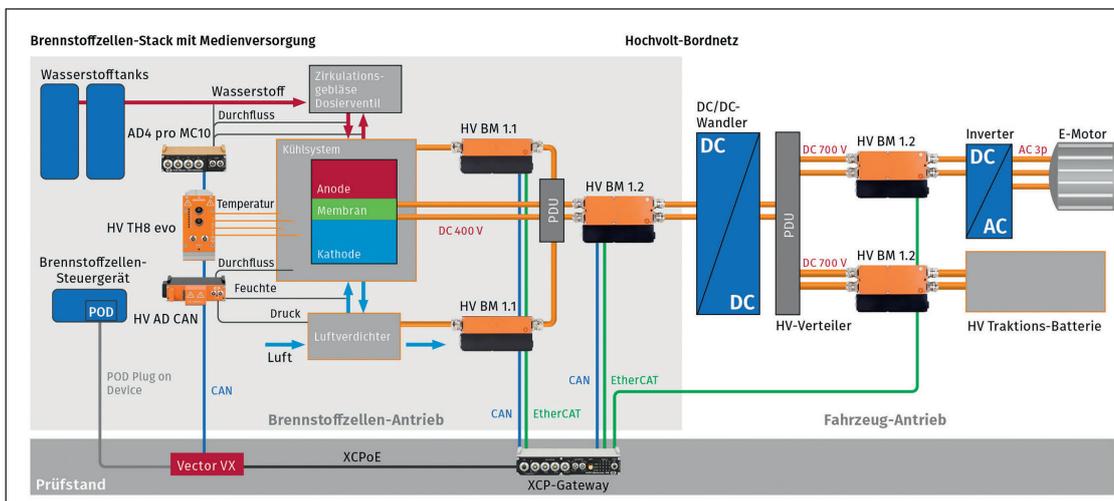
**Bild 1: Brennstoffzellenfahrzeug ausgerüstet mit CSM HV-Messtechnik und HV-Breakout-Modulen © CSM**

Leistungsmessung wird der korrekte Betrieb in den verschiedenen Betriebsphasen geprüft. Beispielsweise der Kennlinienverlauf der Leistung während der Warmlaufphase, für Anfahren, Lastwechsel, Teillast- und Spitzenlast sowie verschiedener anderer markanter Betriebspunkte. Die auftretende Spannungswelligkeit im HV-DC-Kreis muss überprüft werden, denn für Größe und Steilheit sind Grenzen definiert. Auch die erlaubte Ripplestrombelastung, beispielweise im Spitzenlastbetrieb, muss verifiziert werden.

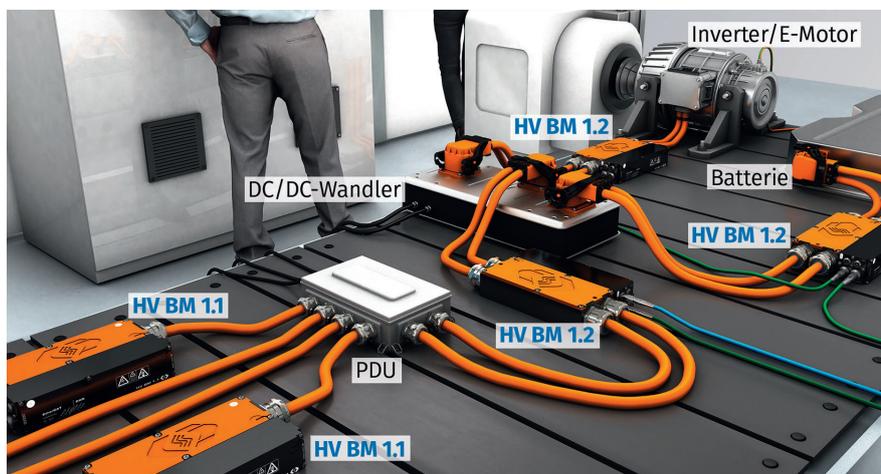
Mit der Messung von Strömen, Spannungen und Leistungen in den Hochvoltpfaden werden auch alle transienten Vorgänge überprüft. Beispiels-

weise beim Einschalten des Brennstoffzellen-Stacks oder dem Zuschalten von Aggregaten wie dem Luftverdichter oder der Kühlsystemheizung. Hier muss man die Strom- und Spannungskurven mit einer hohen Abtastrate von 1 MS/s betrachten, um Spannungseinbrüche, Amplitudenflanken, Ripplegrößen und störende subharmonische Frequenzanteile zu bewerten.

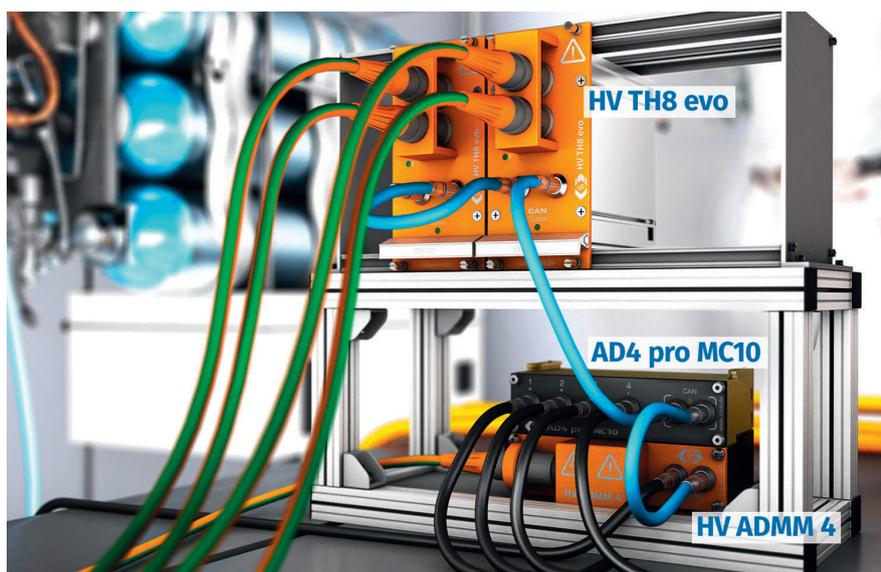
Letztlich werden die spezifizierten Wirkungsgradkennlinien des Brennstoffzellen-Antriebs nachgewiesen. Der Wirkungsgrad ist die abgegebene Energie im Verhältnis zum verbrauchten Wasserstoff. Er ist abhängig vom Lastpunkt und der optimalen Versorgung mit den unterschiedlichen Medien: Wasserstoff, Luft-



**Bild 2: Brennstoffzellen-Antrieb auf dem Prüfstand: Der Brennstoffzellen-Stack liefert den notwendigen Strom über einen HV-Stromverteiler für alle anderen Komponenten. Verbraucher sind die HV-Aggregate für die Medienversorgung des Stacks. © CSM**



**Bild 3:** Mit verschiedenen HV-Breakout-Modulen werden Ströme und Spannungen an allen Stellen im Hochvolt-Bordnetz gemessen, um die elektrischen Energieflüsse aufzunehmen. © CSM



**Bild 4:** Mit weiteren HV-sicheren und konventionellen Messmodulen werden die Temperaturen im Brennstoffzellen-Stack sowie Durchflussraten, Drücke und Feuchtigkeit in der Stack-Versorgung gemessen. © CSM

sauerstoff, Feuchtigkeit und Kühlung. Eine nichtoptimale Versorgung, beispielsweise der Stack-Befeuchtung, führt zu einem Abfall der Stapelspannung.

Durch die genaue Messung und Analyse von Strom, Spannung, Leistung und Wirkungsgrad werden alle systemrelevanten Performance-Parameter des Brennstoffzellen-Antriebs verifiziert und nachgewiesen (Bild 2).

### Messlösung von CSM

Zur direkten Strom-, Spannungs-, und Leistungsmessung wird ein Breakout-Modul HV BM 1.2 in die H+ und H- Leitungen zum DC/DC-Wandler und zur Batterie eingesetzt (Bild 3). Weitere Breakout-Module HV BM 1.1 messen die Ströme

des Luftverdichters und des Kühlsystems. Die einfache Strommessung kann über CAN-Abtastwerte von beispielsweise 1 kHz durchgeführt werden. Für schnelle Messungen von Strom, Spannung und Leistung bis 1 MS/s sind die HV BM ebenfalls über EtherCat vernetzt. Für die Strommessungen innerhalb von Nebenaggregaten können CSM LEM-Sensorkapakte verwendet werden, die über AD4 ECAT MiniModule anzuschließen sind.

Die Abtastwerte der Breakout-Module und der LEM-Sensorkapakte und AD4 ECAT Module werden mit einem XCP Gateway gebündelt und über XCPonEthernet (XCPoE) an die Prüfstands-Software übertragen. Mit den AD4 ECAT MiniModulen werden gleichzeitig alle weiteren Spannungen gemessen

sen die für die Verifizierung notwendig sind. An der Stack-Versorgung werden mit weiteren CSM Nieder- und Hochvolt-Modulen alle wichtigen physikalischen Parameter der Medienversorgung gemessen. Die Sensoren zur Messung von Volumenströmen, Druck und Feuchtigkeit sind an konventionelle AD4 MiniModule angeschlossen (Bild 4). Temperaturen werden an hochvoltkritischen Stellen über HV TH8 evo Module gemessen. An Hochvolt-unkritischen Stellen wird mit THMM 16 MiniModulen gemessen.

### Vorteile

Mit den konventionellen- und Hochvolt-Messmodulen von CSM lässt sich der Prüfstand genau nach den Mess-Anforderungen ausrüsten. Hochvolt-Messmodule kommen an Komponenten zum Einsatz, in denen Hochvolt-kritische Stellen gemessen werden. Schnelle EtherCAT-Messmodule erlauben eine hohe Abtastrate.

Hochvolt-Breakout-Module ermöglichen die direkte Messung von hohen Strömen, Spannungen und der Leistung in der HV-Leitung. Die Abtastwerte werden über CAN oder für schnelle Messungen bis 1 MS/s über EtherCAT an den Prüfstand gesendet. Für Strommessungen an Bauraum-Engstellen werden LEM-Sensorkapakte eingesetzt. Diese Stromwandler sind über ein ADMM4-Messmodul angeschlossen, das ebenfalls die gleichzeitige Spannungsmessung ausführt.

Die Einbindung in eine Prüfstands-Software wie ETAS Inca zur schnellen Messung ist denkbar einfach: Die Software-Ergänzung CSM Inca AddOn ETH ermöglicht eine einfache Integration der CSM Messmodule in die Mess- und Verstell-Software der Bosch-Tochter. Die Konfiguration erfolgt dabei über eine angepasste Oberfläche. Für die genaue Leistungsanalyse ist die Vector Software vMeasure exp mit dem E-Mobility Analyzer ideal. ■ (eck)

[csm.de](http://csm.de)



**Dipl.-Ing. Johann Mathä** hat an der Hochschule Esslingen Nachrichtentechnik studiert. Nach Karrierestationen bei Acterna und Yokogawa ist er seit 2019 Manager E-Mobility bei der CSM GmbH. © CSM