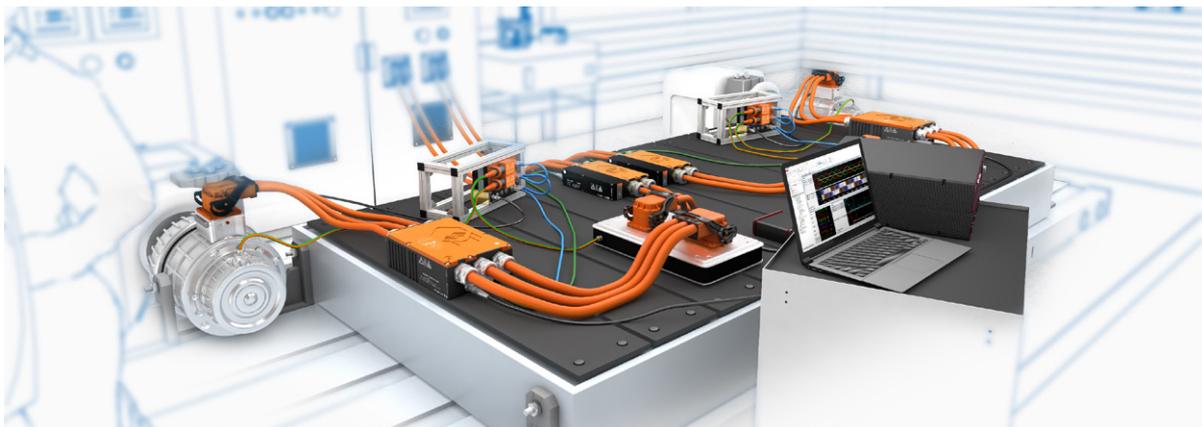


Leistungsanalyse an Antriebssträngen mit mehreren Elektromotoren

   HV Leistungsmessung

Performante Elektrofahrzeuge fahren mit zwei, drei oder vier Elektromotoren im Antriebsstrang. Die Abstimmung der Motorensteuerung ist aufwendig und erfordert eine genaue Leistungsanalyse, um die angestrebten Fahreigenschaften zu testen. In der frühen Entwicklungsphase wird deshalb das Zusammenspiel der einzelnen Inverter und Elektromotoren auf Antriebsstrangprüfständen und in Versuchsfahrzeugen getestet. Alle Leistungsflüsse zwischen den Komponenten müssen dazu in Echtzeit analysiert und die Rohdaten aufgezeichnet werden.



Hintergrund

Die Fahreigenschaften werden durch die Architektur des Antriebsstranges wesentlich festgelegt: Arbeiten zwei E-Motoren an der Hinterachse oder jeweils eine E-Achse vorne und hinten. Die Varianten werden in Zukunft vielfältig sein, bis hin zu 4 Motoren bei High-Performance-Fahrzeugen.

Die Kenn- und Performancedaten des kompletten Antriebsstranges werden mit Leistungsmessungen nachgewiesen. Vorher ist dazu eine Feinabstimmung der Leistungselektronik und der Motoren notwendig.

Leistungsanalysen zeigen, ob das Motorenmanagement die Steuerung der einzelnen Motoren bei schnellen Wechseln von Beschleunigung, Bremsen, Rekuperation und Reaktionen bei Lastsprüngen oder unter Voll- und Teillast wie erwartet ausführt. Mit

der Aufnahme der Wirkungsgradkennfelder der einzelnen Komponenten und des gesamten Antriebsstranges werden die Entwicklungsziele überprüft. Die Reichweitenziele werden mit Energiemessungen getestet.

In weiteren Entwicklungsphasen werden mit Test-Fahrzyklen die Performancedaten und die Integration des Antriebstranges im Gesamtfahrzeug verifiziert. Die Leistungsmesstechnik muss dabei im Fahrzeug eingebaut sein, um die Messungen auf Road-to-Rig-Prüfständen und auf der Straße ausführen zu können. Das Messsystem muss dabei sowohl unabhängig im Loggerbetrieb arbeiten als auch in die Automatisierung von Prüfständen integrierbar sein.





Herausforderung

Gewollt ist eine Messinstrumentierung von Prüfständen, die sowohl die Messung aller physikalischen Parameter als auch die gleichzeitige Erfassung der Steuergerätedaten mit einem einheitlichen System ausführt. Das Messsystem muss also eine vielkanalige, synchronisierte, elektrische und mechanische Leistungsanalyse sowie gleichzeitig die Hochvolt-sichere Temperaturmessung beinhalten, um zu erkennen, ob Komponenten im Betriebstemperaturbereich arbeiten. Alle Messergebnisse müssen in Echtzeit erfasst werden, um online direkt Fehlerreaktionen auf der Leitwarte oder im Fahrzeug erkennen zu können.

Außerdem müssen die gemessenen Rohdaten aufgezeichnet werden, um später genauere Untersuchungen bei transienten Vorgängen, Fehlern und Auffälligkeiten vornehmen zu können. Probleme können dann genau analysiert und Ursachen identifiziert werden.

Besondere Anforderungen werden an die Leistungsanalyse gestellt: In allen AC-Leitungen zu den Elektromotoren muss die effektive Leistung der einzelnen

Motorwicklungen ermittelt werden, um die radindividuelle Steuerung der Inverter zu validieren.

Für die genaue Leistungsanalyse müssen die Messdaten zeitsynchron erfasst werden. Strom- und Spannungsmessung müssen phasensynchron erfolgen, um elektrische Leistungen in Echtzeit genau zu berechnen.

Auch der Inverter-Wirkungsgrad ist in Echtzeit zu erfassen, um das Design der Leistungselektronik zu verifizieren. Schon kleine Sprünge in den Wirkungsgradkurven zeigen hier Designschwächen auf. Gleiches gilt für die Wirkungsgradkennlinien der Elektromotoren, die die Konstruktion der E-Maschine belegen.

Die Wirkungsgradanalyse der Inverter muss die Energieflüsse in beide Richtungen richtig erfassen: Beispielsweise den Wirkungsgrad in den verschiedenen Fahrsituationen bei Belastungsübergängen und dem Wechsel zum Rekuperieren.



CSM Messtechniklösung

Mit dem E-Mobility-Messsystem können komplexe Antriebsstränge einfach und skalierbar für die Leistungsmessung instrumentiert werden.

Für die Leistungsanalyse werden aktive **Hochvolt Breakout-Module (HV BM)** eingesetzt, die über temperaturkompensierte Shuntmodule die hohen Ströme und Spannungen synchron messen. An den Shuntmodulen im Innern der Breakoutmodule erfolgt gleichzeitig die A/D-Wandlung und Protokollumsetzung auf EtherCAT oder XCP-overEthernet. Mit den Breakoutmodulen **HV BM 1.2** und **HV BM 3.3** wird jeweils vor und nach dem Inverter gemessen.

Abbildung 1 zeigt eine Leistungsanalyse an einem Antriebsstrang, der jeweils eine E-Achse vorne und hinten besitzt. Hochvolt Breakout-Module (HV BM) sind zur Leistungsmessung direkt in die Hochvolt-Leitungen eingesetzt. Zwei HV BM 3.3 messen die AC-Ströme und -Spannungen zwischen den E-Motoren und der Leistungselektronik. Zwei HV BM 1.2 messen zwischen der HV-Batterie und den Invertern. Sie sind jeweils über EtherCAT® mit einem HV BM 3.3 vernetzt sowie zeitlich

synchronisiert. Die HV BM erfassen Ströme und Spannungen bis $\pm 2.000 \text{ V} / \pm 2.000 \text{ A}$.

Mit zwei Zählermodulen **CNT4 evo** werden Drehzahl und Drehmoment an den Achswellen für die mechanische Leistungsanalyse erfasst. Die Hochvolt-sichere Temperaturmessung erfolgt mit HV TH MiniModulen (**HV TH**). Über CAN sind die Module als Messkette verbunden und ebenfalls mit den HV BM 3.3 vernetzt. Diese arbeiten als Gateway für alle angeschlossenen EtherCAT®- und CAN-Messmodule.

Beide HV BM 3.3 senden die Messdaten direkt über XCP-on-Ethernet an den Messrechner oder den Vector Smart Logger. Vector Smart Logger sind leistungsfähige und robuste Hardware-Plattformen, die speziell für das zeitsynchrone parallele Aufzeichnen mit hohen Abtastraten von schnellen Messmodulen, Busnachrichten, Videostreams, Radar-Rohdaten und Steuergeräte-internen

Auf dem Vector Smart Logger **VP6400** (Abbildung 1) werden die Daten in Echtzeit erfasst und aufgezeichnet. Die Software **CANape log** oder **vMeasure log** enthält die Funktionsbibliothek **eMobilityAnalyzer**, welche alle Leistungsberechnungen parallel mit der Erfassung ausführt.

Die Daten der Steuergeräte für Leistungselektronik und E-Motoren können über eine Vector Schnittstelle **VX1000** aufgenommen werden. Auch die Steuergerätedaten und die physikalischen Messdaten von den CSM Messmodulen werden mit dem Vector Smart Logger über PTP synchronisiert.

In diesem Smart Logger ist eine PTP Grandmaster-Clock enthalten. Die Messmodule sind damit per PTP genauer als 1 µs synchronisiert (PTP: Precision Time Protocol nach Standard IEEE1588).

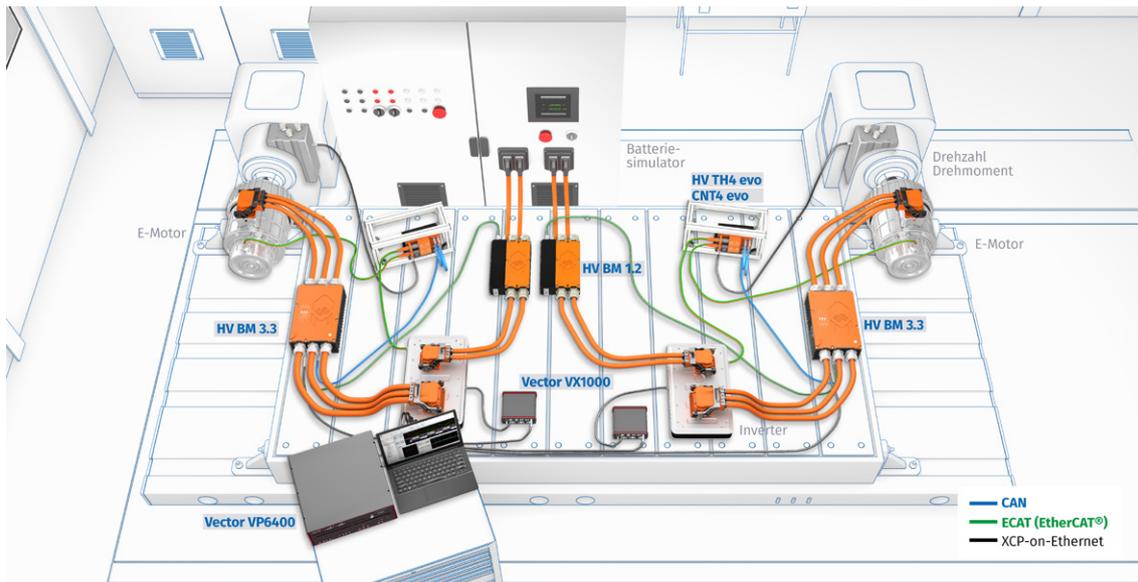


Abb. 1: Leistungsanalyse mit dem Vector CSM E-Mobility-Messsystem an einem elektrischen Antriebsstrang mit zwei Achsmotoren und gleichzeitiger Erfassung der Steuergerätedaten. Je ein Zählermodul erfasst Drehmomente und Drehzahlen der Achswellen und jeweils zwei Temperaturmessmodule die Wärme an Messpunkten im Inneren der Motoren und Inverter. Das Messsystem ist per PTP synchronisiert.

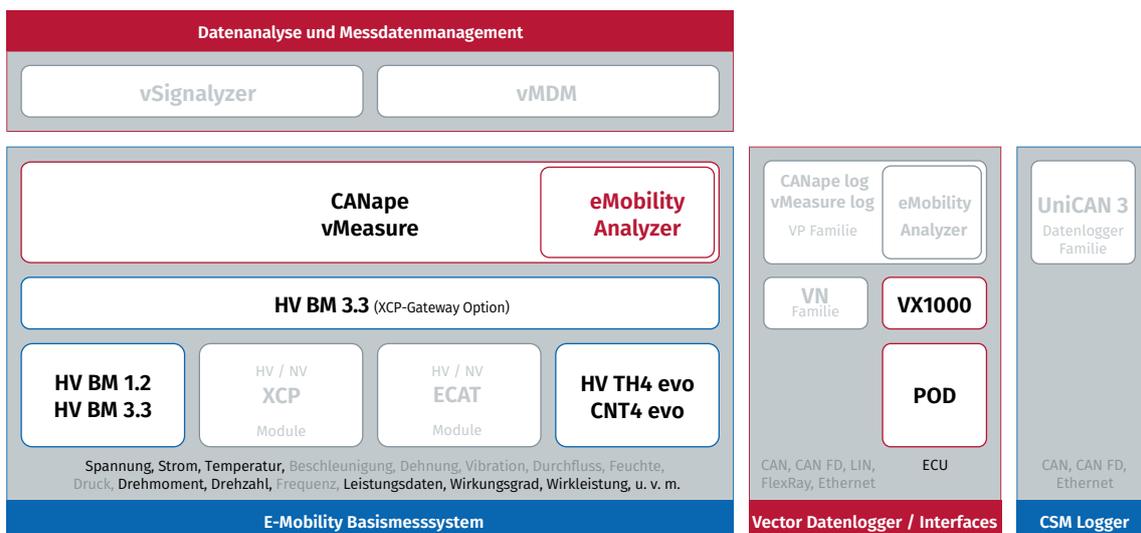


Abb. 2: Die Leistungsanalyse an Antriebssträngen mit mehreren Elektromotoren in der Systematik des Vector CSM E-Mobility-Messsystems

Vector eMobilityAnalyzer

Der eMobilityAnalyzer ist eine Funktionsbibliothek der Softwarepakete CANape und vMeasure von Vector Informatik. Er vereinfacht die Analysen bei der Entwicklung elektrifizierter Fahrzeuge.

Unter Verwendung komplexer mathematischer Algorithmen werden aus Rohsignalen, wie Strom und Spannung, resultierende, aussagekräftige Kenngrößen wie z. B. Leistungen, Energien, Verluste und Wirkungsgrade berechnet.

Die einzelnen Funktionen berechnen gezielt alle Kenngrößen für eine Anwendung:

E-Motor Leistungsanalyse
Inverter-Wirkungsgrad
Harmonischen oder Oberwellen E-Motor
Mechanische Leistung der Motorwelle
Mechanische Achsleistungsparameter
Analyse eines Gleichstromsignals
Welligkeit eines Gleichstromsignals
Wirkungsgrad Ladesystem
PWM Leistungsanalyse
DC/DC-Wandler Wirkungsgrad

Tab. 1: Im eMobilityAnalyzer enthaltene Funktionspakete

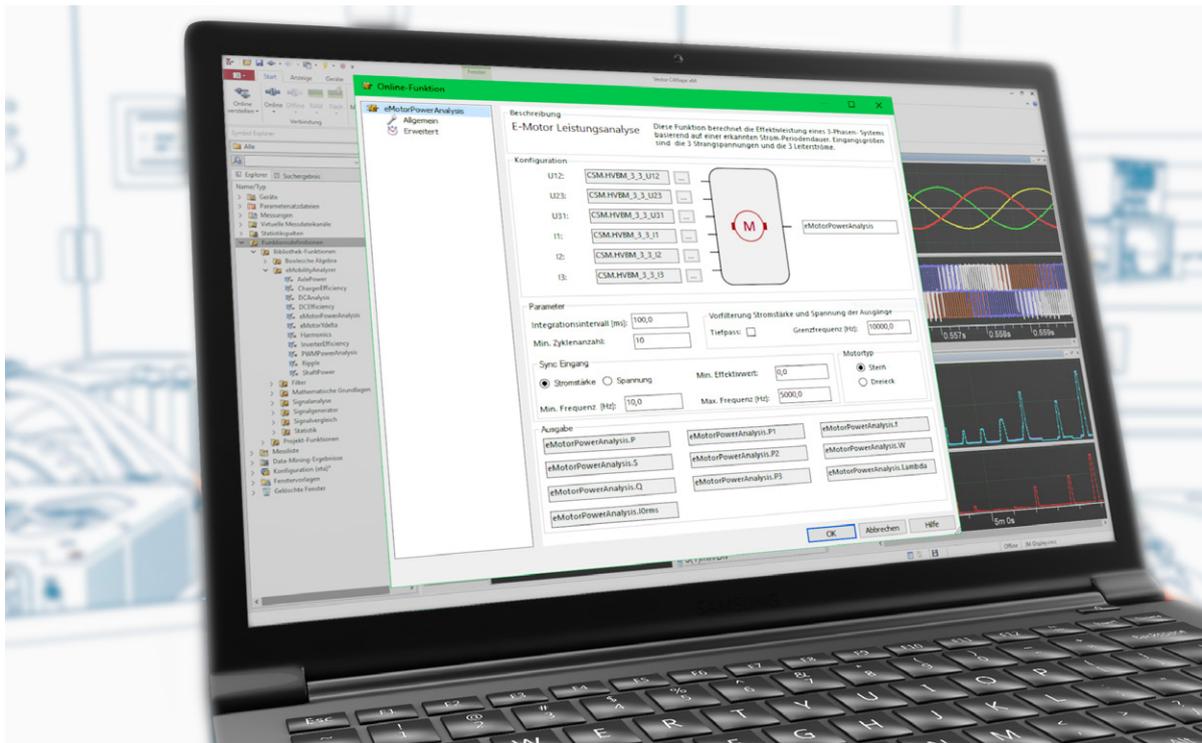


Abb. 3: E-Motor-Leistungsanalyse Online-Berechnungsfunktion des Vector eMobilityAnalyzers

HV Leistungsmessung
 Leistungsanalyse an Antriebssträngen mit mehreren Elektromotoren

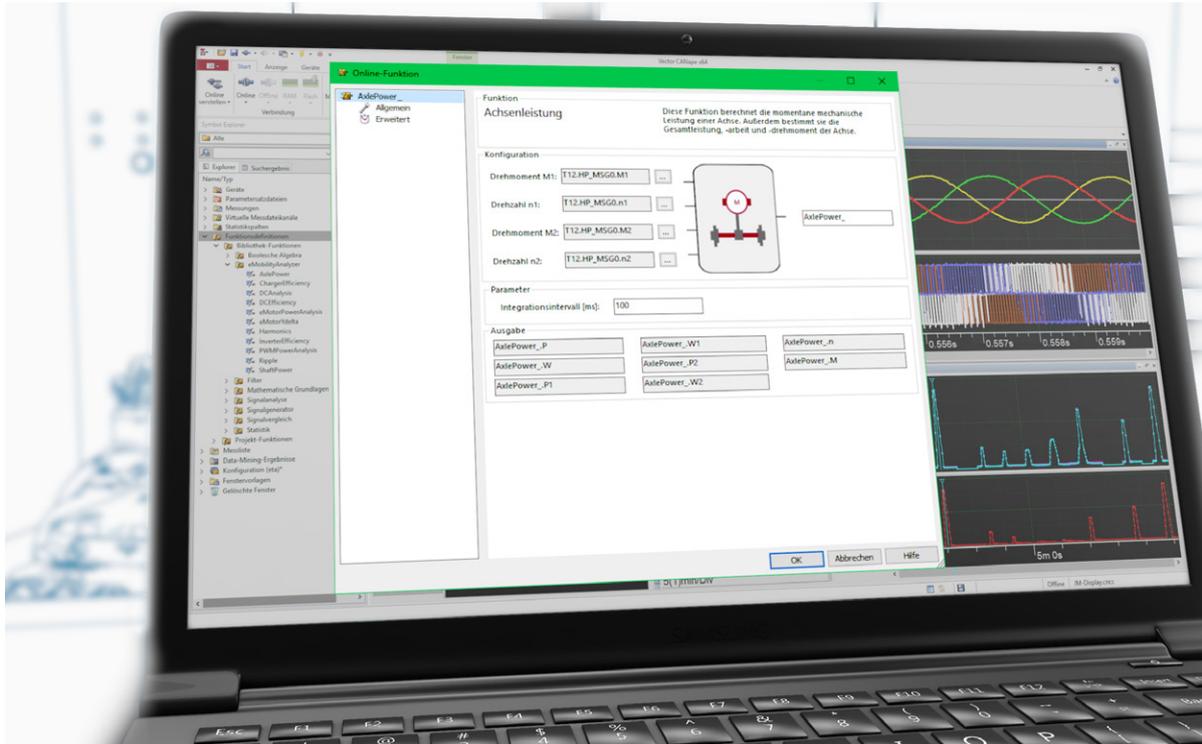


Abb. 4: Achsenleistung Online-Berechnungsfunktion des Vector eMobilityAnalyzers



Abb. 5: Leistungsanalyse eines zehnjährigen Testlaufs am Prüfstand mit CANape. Die Rohwerte der Außenleiterspannungen und Strangströme sind im oberen Bereich dargestellt. Die dabei berechneten elektrischen Größen wie Wirk-, Blind- und Scheinleistung und die berechnete mechanische Leistung sind unten links numerisch aufgeführt. Rechts unten die drei berechneten Effektivwerte der Motorströme.

Leistungsmessung im Antriebsstrang

In den HV Breakout-Modulen 3.3 ist die Leistungsmessschaltung angelegt (Abbildung 6). Dabei werden die AC-Strangströme (I_1, I_2, I_3) direkt gemessen, phasensynchron dazu die AC- Außenleiterspannungen zwischen den Phasen (U_{12}, U_{23}, U_{31}). Die Abtastung erfolgt jeweils mit 2 MS/s. Der eMobilityAnalyzer berechnet aus den Messwerten alle E-Motor-Leistungswerte wie Wirk-, Schein- und Blindleistung den Leistungsfaktor oder die Effektivleistungen der Wicklungen in Echtzeit.

Der eMobilityAnalyzer kann mehrere Leistungsanalysen gleichzeitig durchführen, wodurch sich mehrere Motoren parallel analysieren lassen. Die Versuchingenieure haben so die Möglichkeit, die Abstimmung der Traktionssteuerung genau zu untersuchen, beispielsweise bei einem Vierradantrieb.

An den Inverter-Eingängen werden die DC-Leistungen über HV BM 1.2 Module erfasst.

Der eMobilityAnalyzer bestimmt aus den gemessenen Rohdaten direkt die Wirkungsgrade in Echtzeit. Dadurch kann das Lastkollektiv von Inverter und E-Motor genau untersucht werden, beispielsweise der Wirkungsgrad in den verschiedenen Fahrsituationen im Übergang zwischen Beschleunigen, Bremsen und Rekuperation, wenn bei kleinen Strömen der Wirkungsgrad einbricht.

Auch die Energieflüsse werden analysiert, um bei Fahrzyklen die Energieaufnahme der beiden E-Achsen zu bestimmen. Damit können Feinabstimmungen der Motorsteuerung für unterschiedliche Fahrmodi, Fahrdynamiken und Belastungszustände vorgenommen werden.

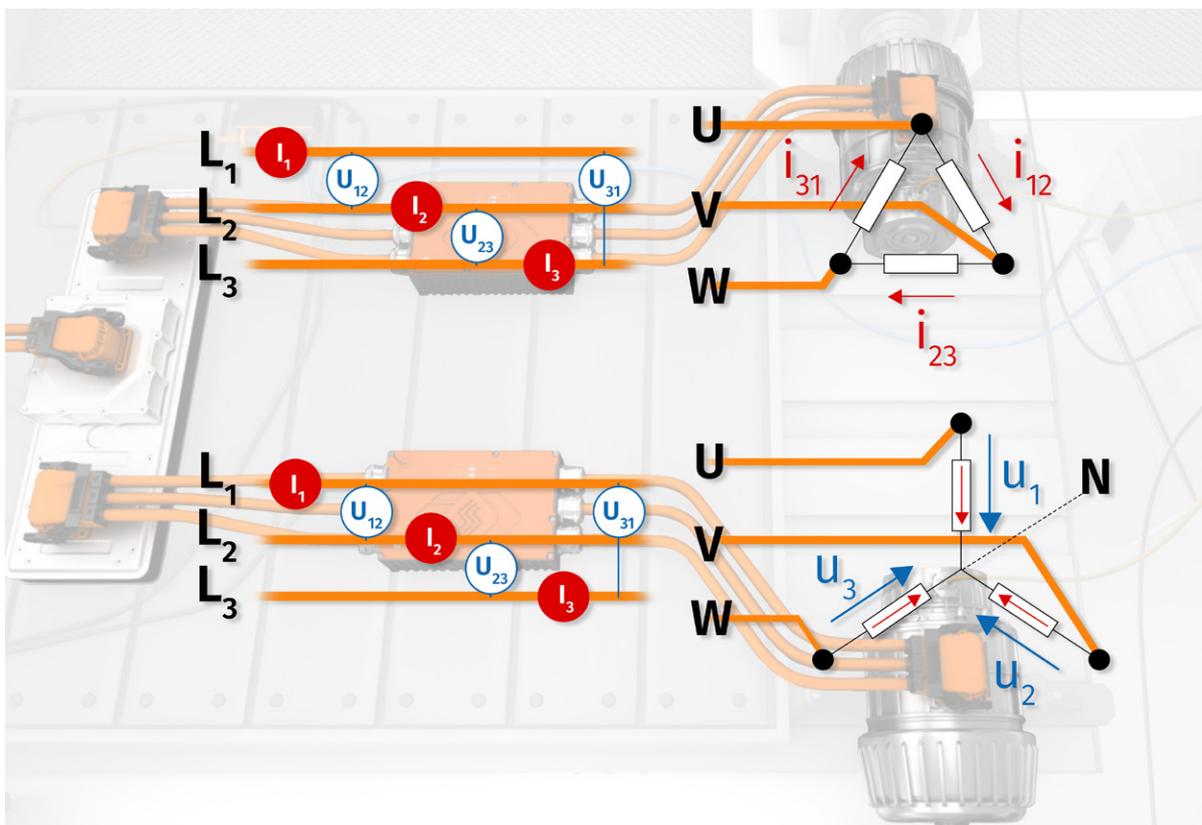


Abb. 6: Messschaltung im HV BM 3.3 zur Echtzeitleistungsanalyse mit dem Vector eMobilityAnalyzer. Mit der Stern-Dreiecks-Transformation werden die nicht direkt messbaren Leiter-zu-Leiter-Stromstärken I_{12}, I_{23}, I_{31} und Sternspannungen U_1, U_2 und U_3 berechnet.



Abb. 7: HV Breakout-Modul 3.3.: Über eine EtherCAT- und CAN-Schnittstelle kann das Messsystem mit weiteren Messmodulen erweitert werden. Über eine Gbit-Ethernet-Schnittstelle werden die Daten an den Messrechner gesendet. Über die Kabelverschraubungen werden (geschirmte) HV-Leitungen bis 95 mm² innerhalb des Gehäuses angeschlossen.

Leistungsmessung im Antriebsstrang

Die dreiphasige Leistungsmessung wird mit der Messschaltung im HV BM 3.3 zeitsynchron ausgeführt.

Der eMobilityAnalyzer berechnet die Leistungen über die Stern-Dreieck-Transformation. Die Augenblickswerte (Abtastwerte) der Leiterströme (I_1 , I_2 , I_3) und Leiter-zu-Leiter-Spannungen (U_{12} , U_{23} , U_{31}) werden zu den Dreiecks-Strömen (I_{12} , I_{23} , I_{31}) und Sternspannungen (U_1 , U_2 , U_3) umgerechnet. Daraus werden alle Leistungswerte des Elektromotors genau berechnet. Für die Berechnung von Intervall-bezogenen Größen arbeitet im eMobilityAnalyzer ein ausgeklügelter Algorithmus der alle Leistungsparameter berechnet.

Diese Methode der Leistungsberechnung bietet gleich mehrere Vorteile:

- ▶ Zur Leistungsmessung wird kein künstlicher Sternpunkt benötigt, der mit der Motorkonstruktion nichts zu tun hat.
- ▶ Es entstehen keine Fehlerquellen, wie bei sonst üblichen Messschaltungen, beispielsweise bei der Aronschaltung durch Ableitströme.
- ▶ Ableitströme des Motorsystems können erkannt werden.
- ▶ Verdrahtungsfehler, wie sie gewöhnlich bei den komplizierten Leistungs-Messschaltungen zu einem Messrack häufig vorkommen, sind ausgeschlossen.
- ▶ Die Effektivleistung der einzelnen Motorwicklungen wird genau berechnet.
- ▶ Die wirklichen Verhältnisse im Motor und alle Asymmetrien sind auf einen Blick erkennbar.

HV BM PowerLok Stecksystem

Für Flexibilität im Prüfstand und dem einfachen Adaptieren von Prüfstandssystemen ist das PowerLok-Stecksystem (von Amphenol) vorgesehen. Damit können einzelne Prüflinge rasch und fehlerfrei auf dem Prüfstand angeschlossen werden, beispielsweise der Austausch des Universalumrichters gegen den später im Fahrzeug vorgesehenen Inverter.

Auch komplette Antriebsstrangkomponenten lassen sich so einfach verbinden: Soll in den Antriebsstrang eine weitere komplexe Komponente, wie ein Brennstoffzellenantrieb, eingebunden werden, so können beide Komponenten aber auch zusammengesteckt im Verbund unabhängig voneinander getestet werden.



Abb. 8: Über PL-Stecksysteme können die Leitungen auch einfach an die HV Breakout-Module angeschlossen werden. Dies erleichtert die Instrumentierung bei wechselnden zu prüfenden Komponenten.



Vorteile

Mit dem dezentralen Aufbau des E-Mobility Messsystems lassen sich Prüfstände und Versuchsfahrzeuge einfach mit Messtechnik instrumentieren. Instrumentierung und Messungen in Komponenten- und Antriebsstrangprüfständen sind denen in Versuchsfahrzeugen auf Fahrzeug- und Rollenprüfständen identisch.

Durch die Messung mit Breakout-Modulen in den Hochvolt-Leitungen ist eine störungsfreie Erfassung der Messdaten gewährleistet. Breakout-Module enthalten ein Schirmungskonzept, damit die Schirmung des Hochvoltbordnetzes geschlossen ist.

Die Messkette ist einfach erweiterbar und an allen Messstellen kurz ausgeführt und die A/D-Wandlung erfolgt im störsicher gekapselten IP67-Modulgehäuse an der Messstelle.

Eine vielkanalige Leistungsanalyse ist bei Antriebssträngen auch mit mehreren E-Motoren, beispielsweise bei Allrad- oder Nutzfahrzeugen, einfach und zeitsparend zu installieren. Soll beispielweise ein viermotoriger Allradantrieb untersucht werden, kann die Messkonfiguration wie in Abb. 1 gedoppelt werden. Die Leistungsanalyse kann dann an 4 Motoren und 4 Invertern gleichzeitig erfolgen. Damit können auch komplexeste Antriebsstränge ausgemessen werden.

Die elektrische Leistungsmessung wird über

HV Breakout-Module und CANape oder vMeasure ausgeführt. Leistungsanalytoren und Messracks sind nicht notwendig. Eine komplexe, störanfällige Verkabelung zwischen Stromsensoren und Leistungsanalytoren entfällt. Die Installationszeit des Messsystems wird erheblich verkürzt. Fehlerquellen bei der Verkabelung der Messschaltung sind ausgeschlossen.

Elektrische Leistungsmessung, mechanische Leistungsmessung, Wirkungsgradmessung und Temperaturmessung werden mit einem skalierbaren Messsystem durchgeführt. Es können temperaturgenaue Leistungs- und Wirkungsgradanalysen an allen Betriebspunkten durchgeführt werden. Beispiele sind die Wirkung des Kühlmantels der Elektromotoren, die Wärmeabfuhr der Leistungselektronik oder die Temperaturabhängigkeit von Magnetfluss und Drehmomentgenauigkeit der Motoren.

Bei elektrischen Antriebssträngen mit mehreren Motoren können leicht Messdaten von 100 MB pro Sekunde und mehr anfallen, die mit den performanten Smart Loggern von Vector Informatik aufgezeichnet und ausgewertet werden. Die Daten der Messtechnik und der Steuergeräte werden zeitsynchron erfasst. Die Integration des Vector CSM E-Mobility-Messsystems in die Prüfstandsautomatisierung ist durch moderne und Standard-Bussysteme und Protokolle (CAN, EtherCAT®, XCP) einfach durchzuführen.



Verwendete Produkte

HV Breakout-Modul - Typ 1.2

Das HV Breakout-Modul (BM) Typ 1.2 wurde für einphasige Messungen von Strom, Spannung und Leistung konzipiert. Es ist ideal geeignet für die Messung an großen Verbrauchern wie Elektromotoren, die mit separaten Kabeln für HV+ und HV- ausgestattet sind.

Das HV Breakout-Modul 1.2 ist in zwei Versionen zum Anschluss über Kabelverschraubungen oder PL500 Stecksystem (HV BM 1.2C) verfügbar.



HV Breakout-Modul - Typ 3.3

Das HV Breakout-Modul (BM) 3.3 wurde speziell für die sichere und präzise dreiphasige Messung in HV-Spannung führenden Kabeln konzipiert. Die Innenleiterströme und Außenleiter-Spannungen werden direkt erfasst und 100% synchron und phasengenau über XCP-on- Ethernet ausgegeben.

Der Anschluss erfolgt entweder über Kabelverschraubungen, durch die die HV-Leitungen in das Modul geführt werden (HV BM 3.3) oder über ein PL300 Stecksystem (HV BM 3.3C).



HV TH4 evo

Das Thermo-Messmodul HV TH4 evo erlaubt sichere Temperaturmessungen mit Thermoelementen an Hochvolt-Komponenten. Durch seine kompakte Bauform und verstärkte Isolierung bis 1.000 V RMS eignet es sich besonders für den dezentralen Einsatz im Fahrversuch.



CNT4 evo

Das CNT4 evo ist ein hochpräzises Messmodul für die Messung von Frequenzen bis 300 kHz, zur Ermittlung von Tastverhältnissen, zur Ermittlung von Perioden- und Pulsdauer sowie Ereignis-, Auf- und Abwärtszählung. Drehzahlen können direkt im Modul erfasst und als Wert auf den CAN-Bus ausgegeben werden. Zudem kann der Zeitversatz zwischen benachbarten Kanälen gemessen werden.



Komplettlösungen aus einer Hand:

CSM stellt Ihnen umfangreiche Komplettpakete aus Messmodulen, Sensoren, Verbindungskabeln und Software zur Verfügung - zugeschnitten auf Ihre individuellen Bedürfnisse.

Weitere Informationen zu unseren Produkten erhalten Sie auf www.csm.de oder per E-Mail unter sales@csm.de.



CSM GmbH Zentrale (Deutschland)

Raiffeisenstraße 36 • 70794 Filderstadt
☎ +49 711-77 96 40 ✉ sales@csm.de

CSM Büro Südeuropa (Frankreich, Italien)

Site d'Archamps
178, rue des Frères Lumière • Immeuble Alliance – Entrée A
74160 Archamps France
☎ +33 450-95 86 44 ✉ info@csm-produits.fr

CSM Products, Inc. USA (USA, Kanada, Mexiko)

1920 Opdyke Court, Suite 200 • Auburn Hills, MI 48326
☎ +1 248 836-4995 ✉ sales@csmproductsinc.com

CSM (RoW)

Vector Informatik (China, Japan, Korea, Indien, Großbritannien)
ECM AB (Schweden)
DATRON-TECHNOLOGY (Slowakei, Tschechien)
Unsere Partner garantieren Ihnen eine weltweite
Verfügbarkeit. Sprechen Sie uns einfach an.

Unser Unternehmen ist zertifiziert.



Alle erwähnten Marken- und Warenzeichen sind Eigentum ihrer jeweiligen Besitzer.
Irrtum und Änderungen jederzeit ohne Ankündigung vorbehalten.
CANopen® und CiA® sind eingetragene Warenzeichen der Gemeinschaft CAN in Automation e.V.
EtherCAT® ist eine eingetragene Marke und patentierte Technologie, lizenziert durch die
Beckhoff Automation GmbH, Deutschland.