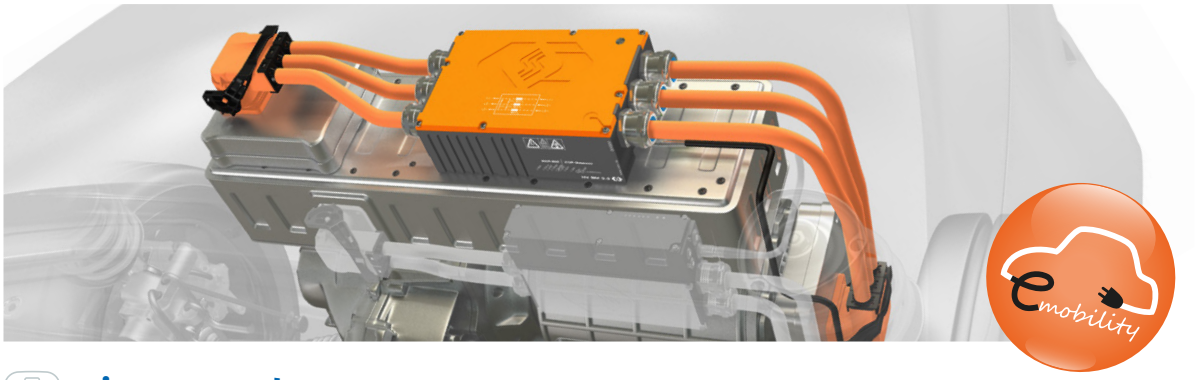
# Echtzeit-Wirkungsgradmessung an Inverter und Elektromotor

HV Leistungsmessung

Die Reichweite von elektrischen Fahrzeugen muss für eine erfolgreiche Mobilitätswende gesteigert werden. Eine Voraussetzung dafür ist die weitere Optimierung des Energieflusses im elektrischen Antriebsstrang. Im folgenden Beispiel wird gezeigt, wie eine präzise Echtzeit-Wirkungsgradmessung mit dem Vector CSM E-Mobility Messsystem erfolgt.




## Hintergrund

Die Reichweite ist ein wichtiges Kriterium, um die Akzeptanz von Elektrofahrzeugen bei Kunden zu steigern und die Mobilitätswende zu meistern. Für eine gesteigerte Reichweite müssen alle Bestandteile des elektrischen Antriebsstranges so optimiert werden, dass die Batterieenergie mit maximaler Leistung auf die Straße gebracht wird und so wenig wie möglich durch Verluste an den Komponenten verloren geht.

Dem Inverter als Bestandteil der Leistungselektronik kommt hier eine besondere Bedeutung zu: Er stellt die Verbindung zwischen Energiespeicher und Motor dar. Der Inverter sorgt für die nötige Kommutierung der Versorgungsspannung in den vom Drehstrommotor benötigten drei-Phasen-Wechselstrom und regelt über die pulsweitenmodulierte Spannung die Drehzahl und das Drehmoment des Motors. Bei der Umwandlung des von der Batterie bereitgestellten Gleichstroms geht ein geringer Teil der Energie durch Abwärme und Schaltleistung verloren.

Weiterhin wandelt der Inverter bei der Rekuperation auch in umgekehrter Richtung:

Während des Bremsvorganges fungiert der Elektromotor als Generator und erzeugt Wechselstrom, welcher nach Gleichrichtung durch den Inverter der Batterie wieder zugeführt werden kann.

Aus diesem Grund ist die Optimierung des Inverters eine wesentliche Voraussetzung für eine gewünschte Reichweitensteigerung. In der Praxis hat sich hierzu die Überprüfung des Wirkungsgrades als probates Mittel erwiesen, um Änderungen in der Bauweise oder Software evaluieren zu können.

Für die Elektromobilität werden Prüfstände erweitert oder neu aufgebaut, um die neuen Anforderungen erfüllen zu können. Der Aus- oder Aufbau soll natürlich kosteneffizient bewerkstelligt werden. Das verwendete Messsystem soll durch hohe Genauigkeit und Flexibilität breite Anwendungsmöglichkeiten erlauben. Auf dem Prüfstand werden der komplette Antriebsstrang oder auch nur einzelne Komponenten wie der Inverter unterschiedlichen Betriebszuständen ausgesetzt und das Verhalten überprüft.

## Herausforderung

Die verwendete Messtechnik für die Wirkungsgradmessung am Inverter muss natürlich die Hochvolt-Sicherheit gewährleisten. Zudem soll nah am Sensor gemessen werden, einerseits um Sicherheitsrisiken durch lange Sensorleitungen zu minimieren und andererseits Störungen, wie sie in langen Leitungen in Form von EMV-Störungen auftreten, zu vermeiden.

Zur Erfassung der hohen Ströme und Spannungen vor und nach dem Inverter müssen diese zeitlich hoch aufgelöst in den Leitungen des Hochvolt-Bordnetzes synchron abgetastet werden. Dabei muss als Grundlage für eine präzise Leistungsberechnung direkt und phasengenau gemessen werden. Für die umfangreichere Analyse des Wirkungsgraderes müssen zudem weitere Messgrößen, wie Temperaturen im Inverter, hochvoltsicher und synchron erfasst werden. Die Kontrolle der Invertertemperatur ist notwendig, da bei der Wirkungsgradmessung bestimmte Arbeitspunkte schnell angefahren werden und so der Wirkungsgrad bei festgelegten Temperaturen bestimmt werden kann.

## CSM Messtechniklösung

Hochvolt Breakout-Module (HV BM) können zur synchronen Messung ein- oder dreiphasiger Spannungen und Ströme verwendet werden. Sie sind der Ausgangspunkt für präzise Analysen mit der eMobilityAnalyzer-Bibliothek der Software vMeasure von Vector Informatik.

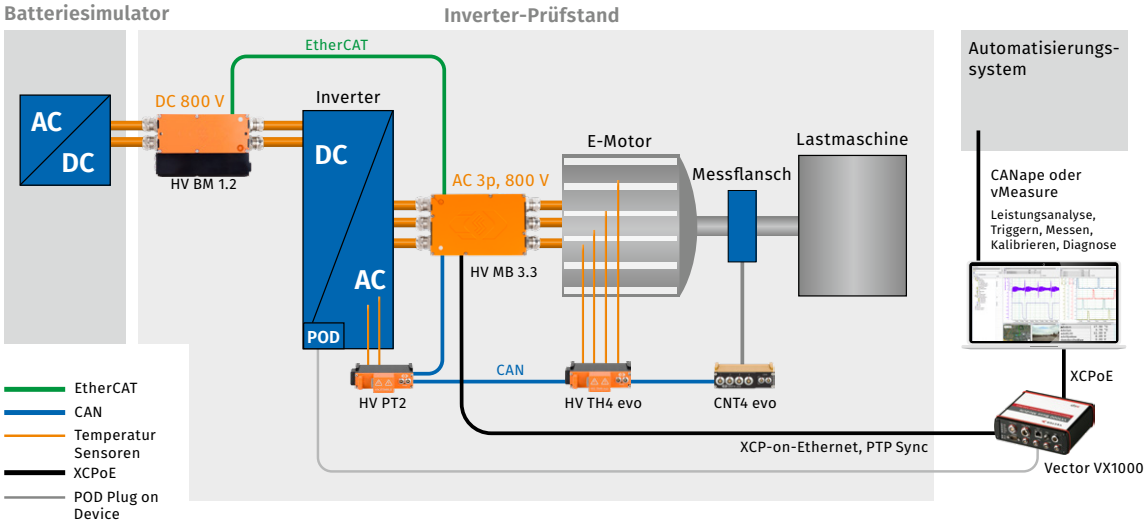



Abb. 1: Messaufbau für die Wirkungsgradmessung am Prüfstand mit dem Vector CSM E-Mobility-Messsystem

Ein **HV BM 1.2** wird direkt in die Leitungen zwischen Batteriesimulator und Inverter eingesetzt. Der Anschluss erfolgt entweder über Kabelverschraubungen oder mit Hilfe des PL500 Stecksystems (Variante HV BM 1.2C). Das HV BM 1.2 misst einphasig den DC Strom und die Spannungen in getrennt ausgeführten HV+ und HV- Leitungen und gibt die Daten über EtherCAT® mit einer Messdatenrate von bis zu 1 MHz weiter.

Zwischen Inverter und Elektromotor wird ein **HV Breakout-Modul 3.3** eingesetzt. Die HV-Leitungen werden entweder durch Kabelverschraubungen in das Gehäuse geführt oder über ein PL300-Stecksystem (mit der Variante HV Breakout-Modul 3.3C) angeschlossen und in diesem Fall über Interlock gesichert. Die für die phasensynchrone Messung von Strom und Spannung nötige Messschaltung 3W3P (3V3A), ist direkt im Modul angelegt. Dadurch entfallen aufwändige Verkabelungen. Die Messdaten werden mit einer Datenrate von bis zu 2 MHz pro Messgröße über XCP-on-Ethernet übertragen.

Abb. 2: HV Breakout-Modul 3.3 für die dreiphasige Messung zwischen Inverter und Elektromotor

Ein HV-sicheres Temperaturmessmodul **HV PT2** erfasst gleichzeitig die herrschenden Temperaturen im Inverter.

Mit der XCP-Gateway Option für das HV Breakout-Modul 3.3 stehen eine zusätzliche EtherCAT®- und CAN-Schnittstelle im Modul zur Verfügung. Damit können das HV BM 1.2 (über EtherCAT®) sowie das Temperaturmessmodul HV PTMM (über CAN) direkt an das HV BM 3.3 angeschlossen werden. Über EtherCAT® sind die beiden HV Breakout-Module zeitlich genauer als 1 µs synchronisiert.

Eine **Vector Schnittstelle VX1000** ermöglicht zusammen mit einem Vector POD die Erfassung von Steuergeräte-internen Größen des Inverters. Die Messdaten von VX1000 und den HV Breakout-Modulen sind mittels Precision Time Protocol (PTP) gemäß IEEE 1588 exakt synchronisiert.

Das Vector **eMobilityAnalyzer** Paket ist integraler Bestandteil von Vector CANape und vMeasure exp und erledigt die gewünschte Leistungsanalyse und Wirkungsgrad-Berechnung.

In den HV Breakout-Modulen 3.3 ist die Leistungsmessschaltung 3P3W (3 Phase 3 Wire) schon angelegt. Das bedeutet, dass die Phasenströme(I1, I2, I3) direkt und die Spannungen zwischen den Phasen (U12, U23, U31) phasen-synchron gemessen werden. Die Abtastung erfolgt mit 2 MS/s. Alle digitalen Messwerte der CSM Messmodule werden über XCP an den Messrechner gesendet. Der eMobilityAnalyzer berechnet alle E-Motor Leistungswerte in Echtzeit wie Wirk-, Schein-, und Blindleistung, den Leistungsfaktor und die Effektivleistungen der Wicklungen.

Die Inverter-Wirkungsgrad Analyse wird einfach mit einer weiteren Funktion parallel ausgeführt. Sie berechnet alle notwendigen Parameter wie aufgenommene Leistung und Energie am Eingang, sowie abgegebene Leistung und Energie am Ausgang, Verlustleistung, Verlustenergie, den Wirkungsgrad und die Frequenz des Drehfeldes.

Über die Vector Schnittstelle VX1000 werden die Messgrößen von Steuergeräten ebenfalls synchron erfasst um diese gleichzeitig mit den Messwerten aus den CSM Messmodulen zu analysieren. Damit können die internen Mess- und Stellgrößen des Inverters direkt mit dem ermittelten Wirkungsgrad korreliert werden.

Soll zusätzlich der Wirkungsgrad des Elektromotors bestimmt werden, muss nur ein **Counter-Messmodul CNT 4 evo** angeschlossen werden: Über einen Drehmoment-Messflansch wird damit die mechanische Ausgangsleistung erfasst und kann als Wert für die Wirkungsgradberechnung miteinbezogen werden. Auch dieses Messmodul wird über den CAN-Bus des HV BM 3.3 angeschlossen.

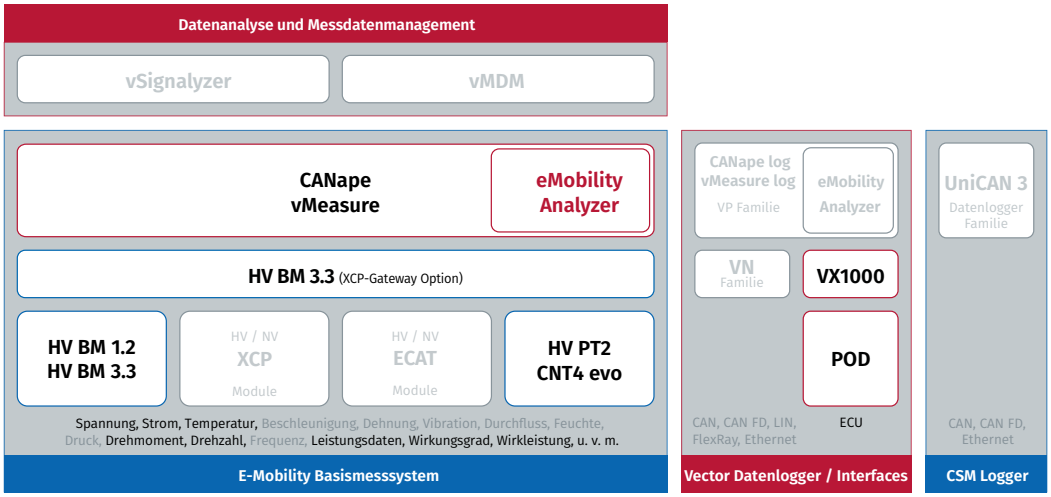



Abb. 3: Die Echtzeit-Wirkungsgradmessung an Inverter und Elektromotor in der Systematik des Vector CSM E-Mobility-Messsystems

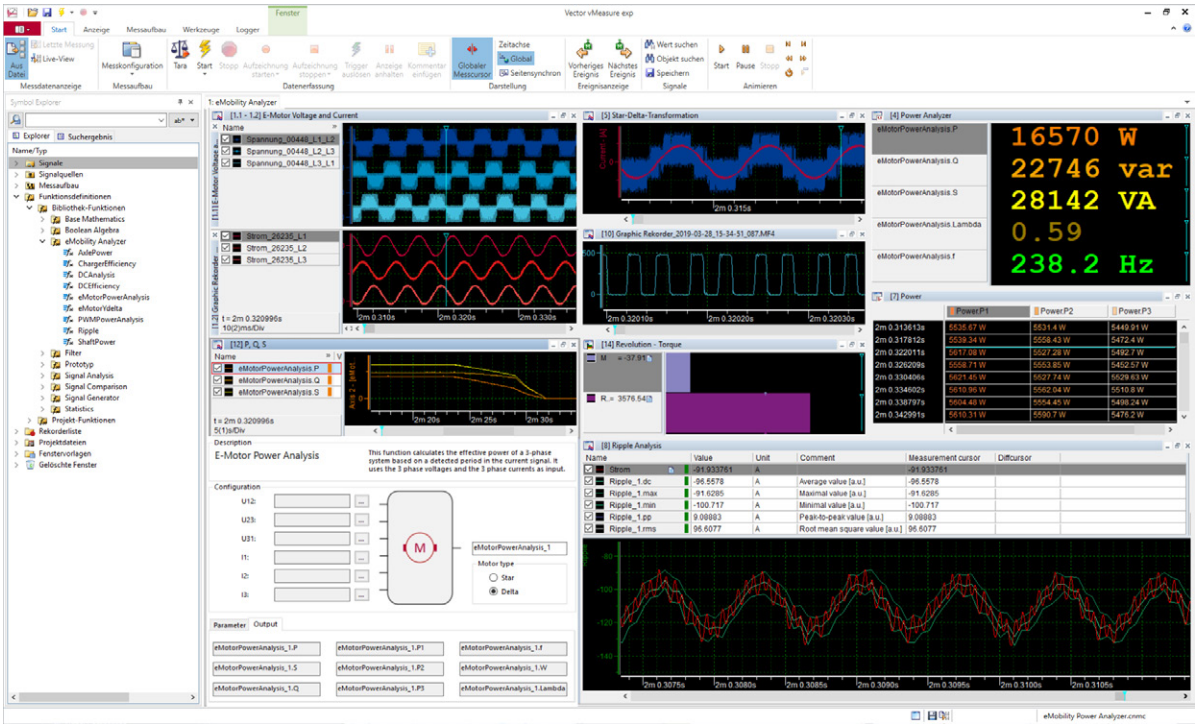



Abb. 4: Vector Software vMeasure mit geöffneter Funktionsbibliothek eMobilityAnalyzer und Leistungsanalysen

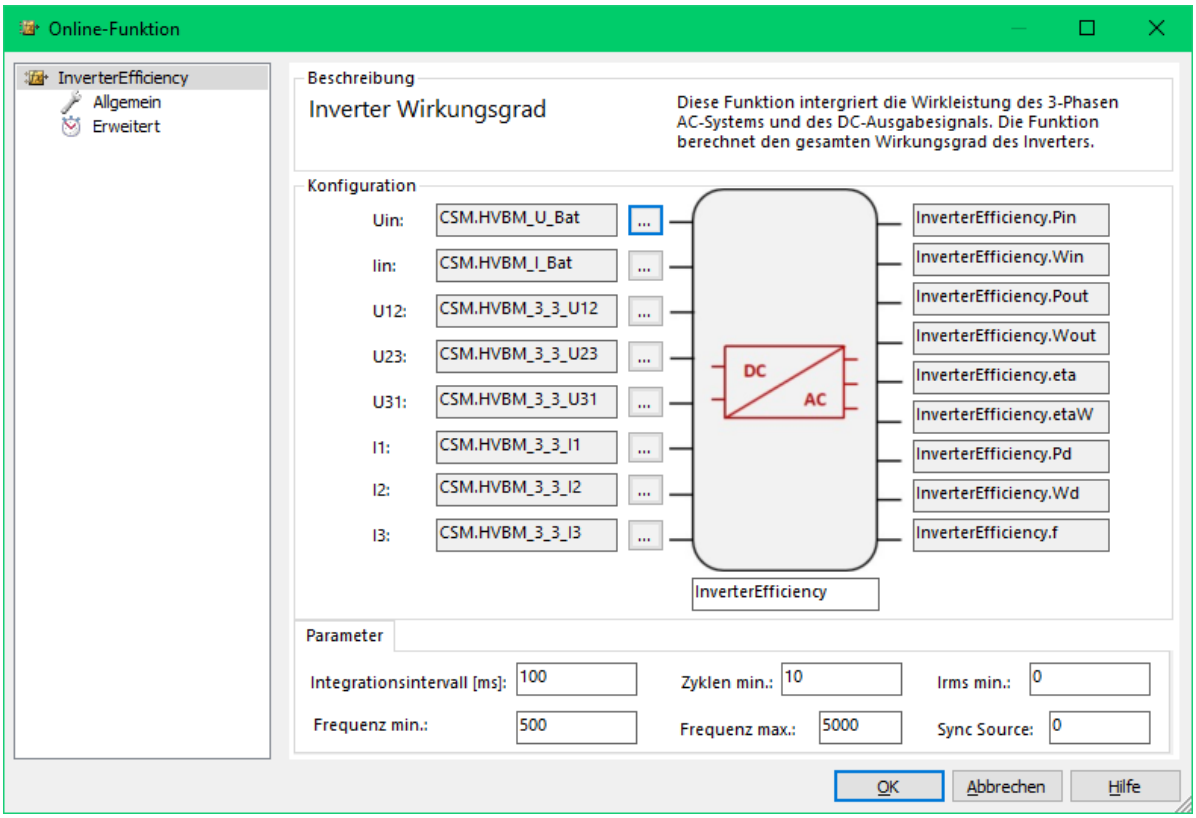



Abb. 5: Wirkungsgrad-Analyse mit dem eMobilityAnalyzer

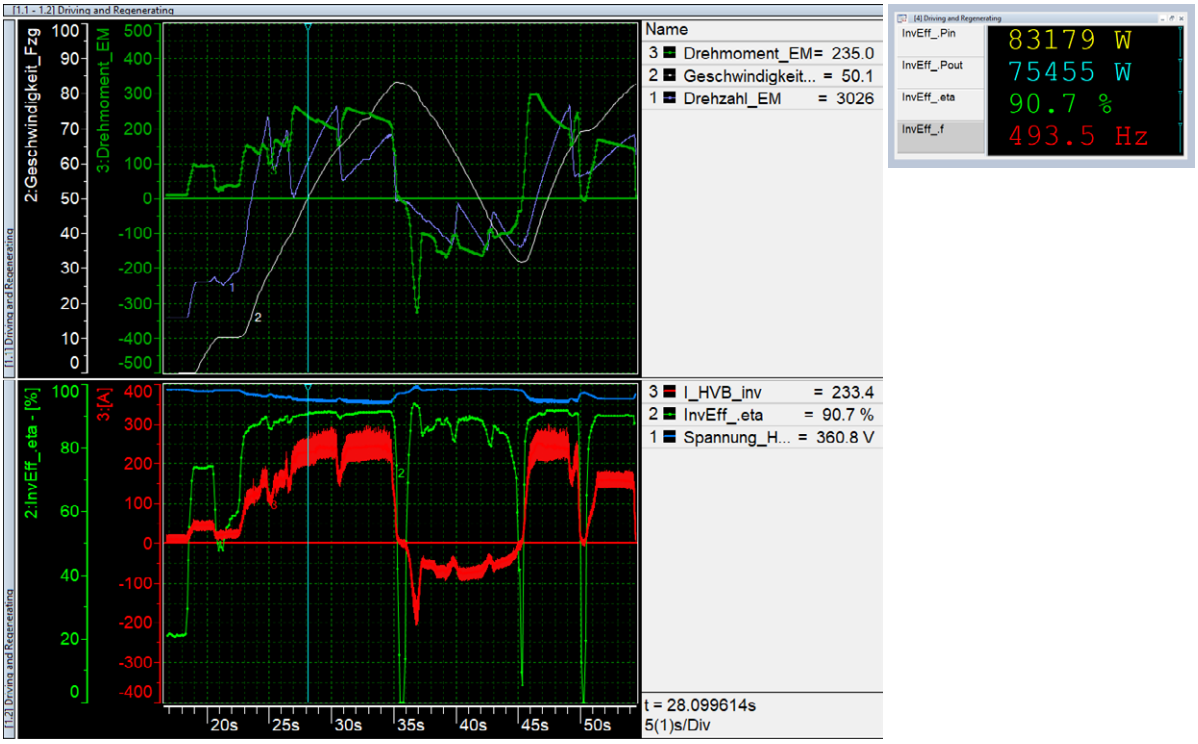



Abb. 6: Ausschnitt einer Testfahrt eines Elektrofahrzeugs mit einer elektrischen Nennleistung von 75 kW und instrumentiertem CSM Vector E-Mobility-Messystem (vgl. Abb.1). Dem Geschwindigkeitsprofil, das im oberen Plot (weiß) dargestellt ist, kann man entnehmen, wann das Fahrzeug beschleunigt und wann es verzögert wird. Entsprechend ist der im unteren Plot in Rot dargestellte Strom positiv oder negativ. Die Leistungselektronik des Fahrzeugs arbeitet beim Fahren als Inverter, mit Wirkungsgraden von über 90 % bei größerer Last, und als Ladegerät, wenn der Motor als Generator beim Rekuperieren betrieben wird. Beim Laden werden ebenfalls Wirkungsgrade von bis zu 90 % erreicht. Es ist zu sehen, dass bei kleinen Strömen während den Lastwechseln die Wirkungsgrade sowohl des Inverters als auch Ladegeräts schlechter werden. Die Berechnung der Wirkungsgrade kann direkt während der Messung oder im Nachhinein erfolgen. Sie erfolgt mit der Auswertefunktion (vgl. Abb. 4), die im Funktionspaket eMobilityAnalyzer von Vector (in CANape und vMeasure) enthalten ist. Diese Auswertefunktion ermittelt auch die Frequenz der Motorströme des Drehfeldes.

## Vorteile

Der wesentliche Vorteil des Vector CSM E-Mobility-Messsystems liegt im dezentralen Aufbau der Messtechnik mit CSM Messmodulen und der gleichzeitigen Erfassung von Messgrößen aus den Steuergeräten der Messobjekte mit Vector Schnittstellen und Software. Der einfache Einbau der HV Breakout-Module in die Hochvolt-Leitungen erleichtert und verkürzt die Instrumentierung des Prüfstandes. Zusätzlich ist die Schirmung der HV-Leitung im HV BM mit geführt.

Über Stecksysteme (HV BM 1.2C mit PL500 und HV BM 3.3C mit PL500) lassen sich die HV Breakout-Module leicht in den Messaufbau einsetzen. Dadurch können Prüflinge schnell getauscht und so unterschiedliche Konfigurationen geprüft werden.

Zudem können weitere Messmodule direkt an die HV BM 3.3 oder HV BM 3.3C angeschlossen werden, wodurch sich der Messaufbau weiter verschlankt.

Die synchronisierte, gleichzeitige Analyse von Prüfstandsmesswerten und Messdaten aus Steuergeräten erleichtert die Validierungsaufgaben erheblich.

Mit der Erfassung von Strom- und Spannungsabtastwerten über Breakout-Module und der Echtzeitberechnung von AC und DC Leistungen wird der Einsatz von klassischen Leistungsanalysatoren und Stromwandler-Systemen vermieden. Dadurch ist ein zentrales Messrack im Prüfstand mit langen Sensorleitungen nicht mehr notwendig. Die vielkanalige Leistungsberechnung erfolgt mit vMeasure und der Funktionsbibliothek eMobilityAnalyzer.

Mit dem Vector eMobilityAnalyzer können neben der Leistungs- und Wirkungsgradberechnung gleichzeitig weitere wichtige Analysen zur Antriebsstrang-Validierung vorgenommen werden. Beispielsweise die DC-Ripple Analyse, Achsleistungen oder Messungen an weiteren Strang-Komponenten.

Das Vector CSM E-Mobility-Messsystems gewährleistet die Hochvolt-Sicherheit vom Sensor bis zur Datenerfassung und ist äußerst einfach zu skalieren. Dadurch können bei Bedarf leicht weitere Messungen vorgenommen werden. Die Synchronität bleibt dabei stets gewährleistet. Die Echtzeit-Wirkungsgradberechnung erlaubt eine schnelle und einfache Überprüfung und Optimierung der Komponenten im elektrischen Antriebstrand und spart wertvolle Zeit in der Entwicklung. Zudem sind die robusten CSM-Messmodule auch für Messungen während des Fahrversuchs geeignet: Werte aus dem Prüfstand können so leicht unter realen Bedingungen auf der Straße überprüft werden.

## Verwendete Produkte

### HV Breakout-Modul – Typ 1.1 | 1.2

Die HV Breakout-Module (BM) Typ 1.1 und Typ 1.2 wurden speziell für einphasige Messanwendungen an HV-Spannung führenden Kabeln konzipiert. Strom und Spannung werden gemessen und die Momentanleistung wird online im Modul berechnet.

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 PT2

Das Messmodul HV PT2 mit 2 Messeingängen in 4-Leiter-Technik für PT100- bzw. PT1000-Sensoren ist bestens für präzise Temperaturmessungen im Hochvolt-Umfeld geeignet.

### 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.

ISO 9001, ISO 14001
Zertifiziertes Integriertes Managementsystem für Qualität und Umwelt
www.tuev-sued.de/ms-zert

DAkkS Deutsche Akkreditierungsstelle D-K-15214-01-00

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.

**Copyright © 2022 CSM Computer-Systeme-Messtechnik GmbH**

013_Wirkungsgradmessung_HV-Inverter_UC_0300_DEU
11.11.2022