

# ANFORDERUNGEN AN HYBRIDPRÜFSTÄNDE DER ZUKUNFT

In Kooperation entwickelten Denso Automotive Deutschland und Technogerma Systems einen Prüfstand für elektrische Antriebssysteme für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Der neue Prüfstand ermöglicht umfangreiche Emulations- sowie Simulationsmöglichkeiten und bietet volle Flexibilität und offene Schnittstellen. Alle drei Kernbausteine – Batterie, Leistungselektronik und Elektromotor – können hier unabhängig oder als Einheit virtuell sowie real geprüft werden.

## AUTOREN



**DIPL.-ING. ULRICH SCHWARZ**  
ist Senior Manager EV/HV  
Engineering Pre-Development bei  
Denso in Wegberg.



**DIPL.-ING. THOMAS LUX**  
ist Ingenieur für EV/HV  
Engineering Pre-Development bei  
Denso in Wegberg.



**DIPL.-ING. MANFRED KAISER**  
ist Senior Ingenieur Prüftechnologie  
und zuständiger Projektleiter bei  
Technogerma Systems in Darmstadt.



**DIPL.-ING. WOLFRAM KLASS**  
ist Leiter Vertrieb und Marketing bei  
Technogerma Systems in Darmstadt.

## REALITÄTSNAHE PRÜFUNGEN

Strom ist aus dem Antrieb der Zukunft nicht mehr wegzudenken. Trotzdem ist noch Entwicklungsarbeit an den elektrischen Antriebsmaschinen und Batterien sowie der Elektronik dazwischen notwendig. Realitätsnahe Prüfungen, die in einem frühen Forschungs- und Entwicklungsstadium benötigt werden, konnten bisher nur durch Prüfstände mit unzureichender Dynamik durchgeführt werden. Weder die Response-Zeiten der Belastungsmaschinen, noch die Möglichkeiten der Emulation von Batterie und elektrischen Antrieben genügten den Anforderungen und dienten nur der Verbesserung und Prüfung von Serien- oder seriennahen Produkten. Ein neuer Hybridprüfstand bietet Denso umfangreiche Emulations- und Simulationsmöglichkeiten und kann bereits weit vor der Prüfung von Prototypen eingesetzt werden. Alle Parameter müssen bestimm- und änderbar sein und somit einen dynamischen Prüfstandsbetrieb ermöglichen. Der Prüfstand musste ohne konkrete Vorgaben aus bereits real existierenden Prüfheften für die Prüfzyklen zukünftiger Anforderungen entwickelt werden.

## AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE

Die drei wesentlichen Baugruppen von hybrid- oder vollelektrischen Elektroantrieben (Elektromotor, Leistungselektronik zur Wandlung der elektrischen Spannung und Batterie) finden ihre jeweiligen Entsprechungen in den Abschnitten des Prüfstands. Neben der Synchronmaschine von Krebs und Aulich,

die hier unter anderem eine konventionelle Verbrennungskraftmaschine simulieren kann, sind ein Klimaschrank für die Leistungselektronik und Konditioniereinheiten für Batterie und Elektromotor die Hauptbauteile des Prüfstands, ❶.

Die elektrischen Antriebskomponenten können schnell sowohl gekühlt als auch aufgeheizt werden. Szenarien wie eine Hochgeschwindigkeitsfahrt, die in einem Stau endet, werden so simulierbar: Zunächst wird der Inverter durch Fahrtwind gekühlt; die Temperatur ist ausgeglichen. Durch den Stillstand im Stau steigen die Temperaturwerte in kürzester Zeit immens. Folgen wie Überhitzung mit Brandgefahr bei nicht vorhandenen Sicherheitsreserven und -systemen fließen sofort in die weitere Entwicklung ein. Über die Flüssigkonditionierung kann ein Temperaturbereich von -30 bis +120 °C abgebildet werden. Die Lufttemperatur des Klimaschranks kann von -40 bis +180 °C und die Luftfeuchte in einem Bereich von 5 bis 95 % konditioniert werden, ❷.

## SICHERHEITANFORDERUNGEN

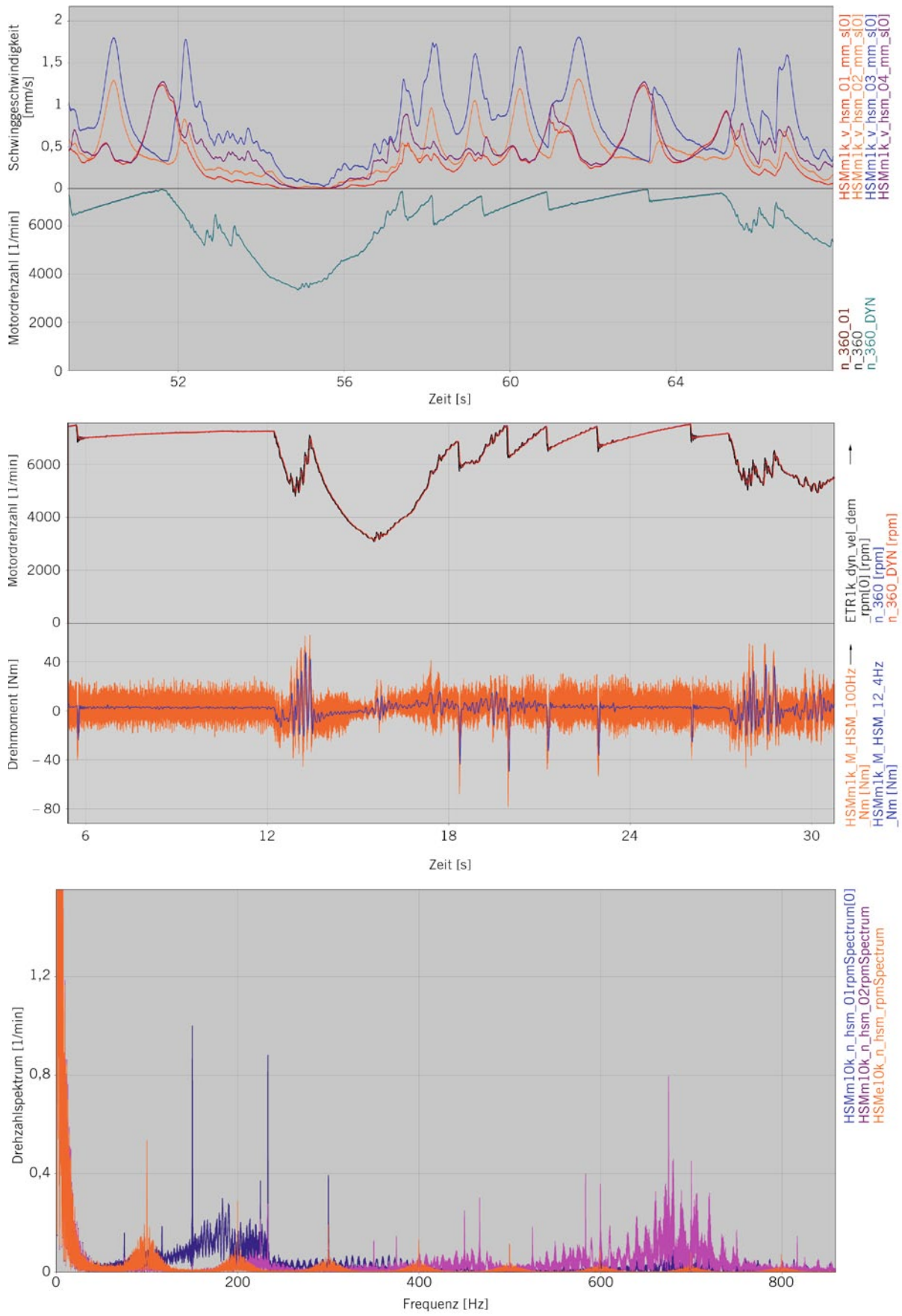
Um Sicherheitsanforderungen zu erfüllen, ist der Innenraum als Hochspannungssicherheitszelle ausgelegt. Der Batterieemulator kann mit seinem weiten Einsatzbereich für die Prüfung von diversen Antriebseinheiten genutzt werden. Als Steuerelektronik für Rapid Control Prototyping (RCP) kommt die in den Prüfstand vernetzte Autobox von dSpace zum Einsatz, mit der in Echtzeit neue Regelungskonzepte entwickelt und optimiert werden können. Vernetzung ist ein zentrales Thema: Relevante Systeme für Regelung, Steuerung und Konditionie-



❶ Blick in den Prüfraum mit Synchronmaschinensystem und Klimakammer



❷ Temperaturkonditioniersystem (-30 bis +120 °C), zweifach vorhanden



③ Drehzahlzyklus mit Fokus auf Schwingungsverhalten des Antriebsstrangs und des Elektromotors (Prüfling) (oben); Drehzahlzyklus mit Fokus auf Drehmoment im Antriebsstrang (Mitte); Frequenzanalyse der Antriebsstrangdrehzahlen (unten)

rung von Prüfstand und Prüflingen sind durch neuartige Schnittstellen mit dem Kontrollsystem verknüpft.

Die Synchronmaschine erreicht Drehzahlen von bis zu 20.000/min. Geringstmögliche Vibrationen sind für den sicheren Betrieb des Antriebsstrangs wichtig, daher wird der gesamte Messstrang mit Beschleunigungssensoren überwacht. Hinter der flüssiggekühlten Antriebsmaschine wird das Drehmoment über eine Kupplung an einen für diese Hochgeschwindigkeitsapplikation speziell entwickelten Lagerbock mit Keramiklagern abgegeben. Dort wird der Prüfling (Elektromotor) montiert. Über Frequenzanalysen kann das Vibrationsverhalten der An- und Abtriebsmaschinen und des Antriebsstrangs ausgewertet werden. Zur Messung der Geschwindigkeit ist ein Resolver am Dynamometer angebracht. Ein Drehmomentflansch mit hoher Auflösung sitzt vor der Kupplung. Die Geschwindigkeitsmessung erfolgt mittels eines hochauflösenden Drehzahlgebers. Das gesamte Prüffeld rund um die Synchronmaschine ist auf neun Luftfedern gelagert, um Einflüsse zur weiteren Prüfstandsumgebung zu eliminieren. Die Maße der Trägerplatte von 5000×4900 mm ermöglichen auch, dass künftig ein kompletter Antriebsstrang, beispielsweise zur Ermittlung des Schwingverhaltens, aufgebaut werden kann. Damit sind fahrzeugrealistische Prüfungen bis an die Radnaben realisierbar, die bisher nur mit einem vollständigen Fahrzeugprototyp auf einem Rollenprüfstand eingeschränkt möglich waren.

### SCHWINGUNGSKOMPENSATION

Antriebsstrangschwingungen in unterschiedlichen Konstellationen können durch die Belastungsmaschine künstlich initiiert und durch die Regelung des integrierten elektrischen Antriebs (Elektromotor) kompensiert werden, ④.

Werden Hybridmodule vor allem in Modellen der gehobenen Mittel- oder Oberklasse mit großen konventionellen Motoren eingesetzt, geht der Trend zum Downsizing: Weniger Zylinder übernehmen gemeinsam mit einem Elektromotor den Antrieb. So nimmt beispielsweise der Einsatz von Dreizylindermotoren zu, die völlig andere Lauf- und Vibrationsverhalten als Motoren mit vier oder mehr Zylindern aufweisen. Die Drehmomentanregungen dieser Motoren kann die

Synchronmaschine simulieren. Zur realistischen Umsetzung der Prozessdynamik ist eine schnelle Ansteuerung der Maschine mit ausreichender Leistung und ausreichendem Drehmoment nötig. Dazu wird die Belastungsmaschine, die über eine maximale Beschleunigung von mehr als 70.000/min\*s verfügt, über eine neuartige 8-kHz-Schnittstelle angesteuert. Bereits innerhalb einer Millisekunde stehen mehrere 100 Nm Drehmoment für die Belastung des Prüflings bereit. Das Massenträgheitsmoment des Rotors ist äußerst gering. Die Regelung ist über das dSpace-System voll in die Echtzeit-Umgebung integriert, wodurch alle Möglichkeiten zum RCP gegeben sind.

Die Regelung der Leistungselektronik in einem Hybridfahrzeug ermöglicht einen effizienten Ausgleich der Drehschwingungen des Antriebsstrangs; Fahreindruck und Handling werden deutlich verbessert. Ebenso ist die Dauerhaltbarkeit ein wichtiges Entwicklungskriterium, da Schwingungen langfristig Schäden im Antriebsstrang erzeugen können.

### PRÜFUNG DER LEISTUNGSELEKTRONIK

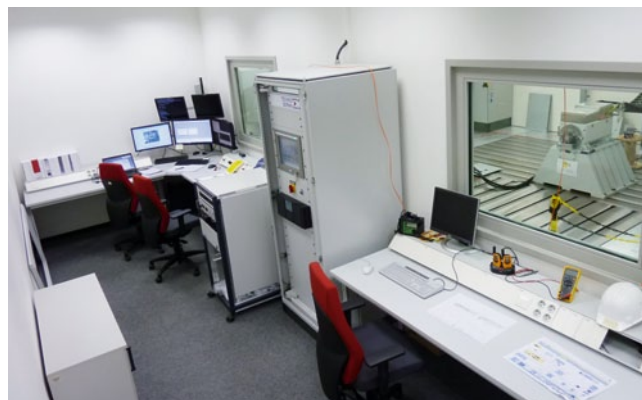
Um die Ergebnis- und Regelgüte zu erhöhen, kommt der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) eine große Bedeutung zu. Elektromagnetische Störimpulse können bei der Steuerung von Komponenten und bei Messergebnissen multiple Schäden anrichten. Störsignale von hochstromführenden Leitungen können die Synchronmaschine und den Prüfling beeinflussen. Obwohl der EMV-Integrationsleitfaden zur Erzielung von elektromagnetischer Verträglichkeit in elektrischen Anlagen der Automobilindustrie (EMV-ILA) noch nicht zum

Branchenstandard gehört, bildet er die Basis für den Prüfstand.

Ein Batterieemulator ermöglicht die Prüfung der Leistungselektronik mit realen Elektromotor. Über den Antrieb durch die Synchronmaschine kann auch die Ein- speisung aus einer Rekuperation in das Gesamtsystem, also die Fahrzeug-Hochvoltbatterie, simuliert werden. Künftig mögliche Batteriespannungen werden durch den DC-Emulator zur Verfügung gestellt. Eine neuentwickelte, optische Schnittstelle sorgt für hohe Dynamik in der Führungsgröße. Mit einer kundenspezifischen Prüfstandskonditionierung wird die Temperatur der Umgebung, der Kühlflüssigkeit der elektrischen Antriebskomponenten sowie des Klimaschranks konditioniert. Im doppelten Boden des Prüfstands befinden sich die Konditionierungseinheiten, die mit kaltem Prozesswasser (6 °C) und einer Tiefkältesole (-45 °C) versorgt werden. Die Raumluft wird über eine Luftkonditionierung den gewünschten Bedingungen angepasst, ④.

### FAZIT

Die hohe Dynamik der Prüfstandskomponenten bildet die Basis für Forschungs- und Entwicklungsarbeit, die einen Schritt vor bisherigen Testläufen auf Prüfständen ansetzt. Strom breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit aus, dem tragen Mess- und Regeltechnik Rechnung. Allerdings sind auch die Störpotenziale wesentlich größer als bei gängigen Prüfständen. Zudem wächst die Komplexität der Messtechnik zur Generierung von entwicklungsrelevanten Ergebnissen. Mit einer Datenerfassung von bis zu 100 kHz sammelt Denso die Messdaten, die zentral über eine optische dSpace-Anbindung zusammenlaufen.



④ Kontrollraum mit Blick auf den Testraum