Neues Elektroantriebslabor für das Automobil der Zukunft

© FKFS

Das FKFS stellt Anfang 2019 ein neues Antriebslabor zur Entwicklung und Erprobung rein elektrischer Fahrzeugantriebe bereit, das mehrere Prüfstände umfasst. Im Fokus steht die ganzheitliche Betrachtung des elektrischen Antriebsstrangs höchster Leistung. Einen besonderen Forschungsschwerpunkt stellt die Entwicklung zuverlässiger und sicherer Antriebe für das automatisierte Fahren dar.

AUTOREN

Dipl.-Ing. Ulrike Weinrich
ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Bereich Kraftfahrzeugmechatronik/Software am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart.

Dr.-Ing. Markus Orner
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Kraftfahrzeugmechatronik/Software am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart.

Dipl.-Ing. Marco Schlüter
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Kraftfahrzeugmechatronik/Software am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart.

Dr.-Ing. Gerd Baumann
ist Bereichsleiter im Bereich Kraftfahrzeugmechatronik/Software am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart.

EINLEITUNG

Die Erforschung, Entwicklung und Erprobung zukunftsweisender Pkw-Antriebssysteme auf der Basis von Verbrennungsmotoren mit konventionellen und alternativen Kraftstoffen stellt seit der Gründung im Jahr 1930 ein Kernarbeitsgebiet des FKFS dar. Mit der Jahrtausendwende wurde die Forschung an Hybridantrieben intensiviert, sodass am FKFS heute ein umfassendes Know-how in der Auslegung, Simulation und Betriebsstrategie elektrifizierter Antriebe verfügbar ist [1].

Im Rahmen zahlreicher öffentlich geförderter und industrieller Projekte in jüngster Zeit wurde das F&E-Portfolio um die rein elektrischen Antriebe und deren Komponenten erweitert, mit den Schwerpunkten elektrische und thermische Auslegung sowie Reichweitenoptimierung [2, 3].

Mit der Eröffnung des Elektro-Antriebslabors wird das FKFS gemeinsam mit seinen Partnern aus der Automobilindustrie die aktuellen Herausforderungen bei der Vorentwicklung und Serieneinführung des Elektroantriebs anpacken:

- Ermittlung und Prüfstandsimplementierung realistischer Lastkollektive für spezifische Einsatzszenarien, beispielsweise Endkundenbetrieb und Rundstrecke [4]
- Mechanische, thermische und elektrische Vermessung und Optimierung von E-Maschinen mit höchster Drehzahl und SiC-Invertern bei Batteriespannungen bis 1000 V
- Optimierung der Fahrbarkeit, insbesondere unter den Aspekten Derating, Schwingungen und Ansprechverhalten [5].

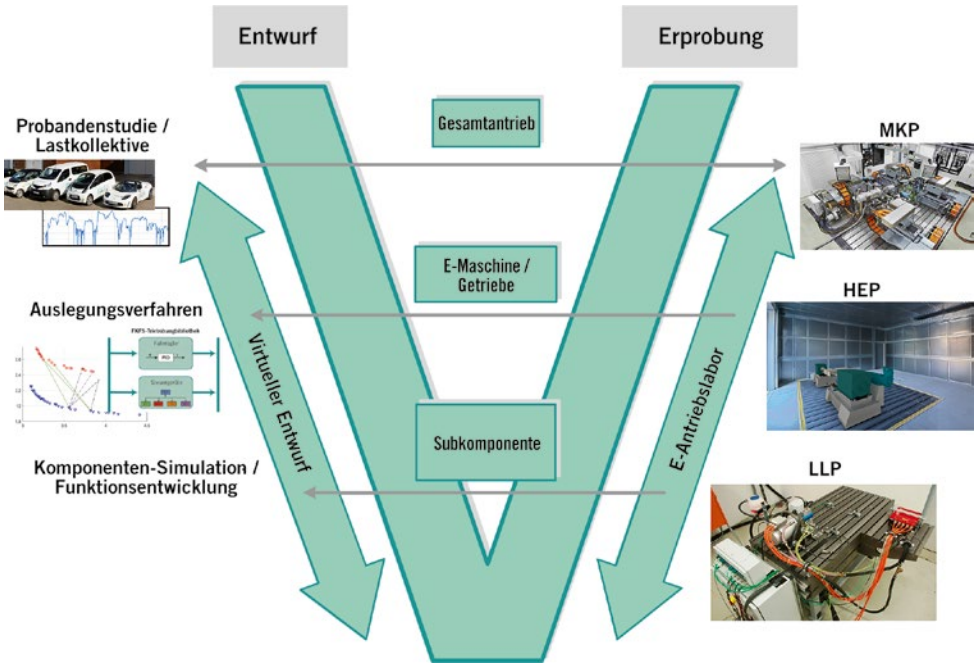

BILD 1 V-Modell – elektrische Antriebsstränge am FKFS (© FKFS)

DURCHGÄNGIGER ENTWICKLUNGSPROZESS FÜR E-ANTRIEBE

Das V-Modell wird häufig zur Entwicklung mechatronischer Systeme eingesetzt. Das Portfolio des FKFS für die Erforschung und Entwicklung elektrischer Antriebsstränge kann entlang des V-Modells in **BILD 1** abgebildet werden.

In der Entwurfsphase werden virtuelle Entwurfsmethoden eingesetzt, an deren Anfang die Erfassung von Lastkollektiven, zum Beispiel zur Prüfstandserprobung von Antriebssträngen mittels statistisch abgesicherter Probandenstudien steht. Die fundierte Methodik zur Erfassung solcher Kollektive beinhaltet auch die Ausstattung der Versuchsträger mit unterschiedlichster Messtechnik für den Feldeinsatz. Darauf aufbauend ermöglicht die FKFS-Triebstrangbibliothek den schnellen und systematischen Aufbau von Antriebsstrangvarianten [2]. Diese können manuell als auch automatisiert erzeugt werden. Mithilfe geeigneter Auslegungsverfahren wie beispielsweise multikriterieller Optimierung werden Anforderungen für Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs definiert. Simulationen auf Komponenten-/Subkomponentenebene werden abschließend zur detaillierten Auslegung und im Bereich der Funktionsentwicklung (zum Beispiel Derating und Betriebsstrategien) durchgeführt.

Für die Validierungsphase, **BILD 1** (rechts), des V-Modells, die den Schwerpunkt dieses Artikels darstellt, liefern die Prüfstände des Elektroantrieblabors umfassende Möglichkeiten zur Erprobung. Mithilfe des Lastlos-Prüfstands (LLP) können bei hohen Drehzahlen zum Beispiel thermische Effekte in Rotor und Stator ohne Last analysiert werden. Dadurch können in einer sehr frühen Entwicklungsphase einzelne Aspekte der E-Maschine präzise untersucht und somit Subkomponenten frühzeitig validiert werden.

Bei dem im Aufbau befindlichen Hochleistungs-Elektro-Antriebsprüfstand (HEP) stehen die Erprobung der Komponenten des E-Antriebs, also E-Maschine, Getriebe und Achse bis in höchste Leistungsklassen im Vordergrund. Dies beinhaltet unter anderem Wirkungsgradvermessung, Dauerläufe, Applikation und thermische Vermessung der einzelnen Komponenten unter Last. Dadurch werden die während der Auslegungsphase an die Komponenten gestellten Anforderungen validiert.

Für die anschließende Erprobung des gesamten elektrischen Antriebsstrangs wird der Multi-Konfigurations-Prüfstand (MKP) aktuell um einen leistungsfähigen Batteriesimulator erweitert. Dies ermöglicht die Erprobung von Allrad-Antriebssystemen für für reine Elektroantriebe und Plug-in-Hybride. Gleichzeitig erfolgt die Validierung der Antriebsauslegung.

NEUER PRÜFSTAND FÜR ELEKTRO-ANTRIEBE HÖCHSTER LEISTUNG

Das FKFS errichtet derzeit als Generalunternehmer einen neuen Prüfstand (HEP) im eigenen Hause zur Erprobung elektrischer Antriebsstränge. Zahlreiche Forschungsprojekte in den vergangenen Jahren lieferten ein umfassendes Ver-

ständnis für Prüfstandstechnik und dienen als Grundlage zur optimalen Auslegung des HEP.

Um die hohen, aber auch noch teilweise unsicheren Anforderungen für künftige elektrische Antriebsstränge in Bezug auf Leistung, Drehzahlen und Spannungslage erfüllen zu können, wurde der HEP auf wegbereitende Kenndaten ausgelegt, **TABELLE 1**. Der Prüfstand ist als flexibler Antriebsprüfstand mit zwei Radmaschinen und einer Antriebsmaschine aufgebaut. Alle Prüfstandsmaschinen sind als hochdynamische PSM ausgeführt, wodurch Erprobungen mit sehr hohen Drehzahlgradienten ermöglicht werden.

Die Energieversorgung der E-Maschinenprüflinge in den Prüfzellen erfolgt über leistungsfähige Batteriesimulatoren, mit denen unterschiedliche Spannungsniveaus für Bordnetze aller Spannungsebenen nachgestellt werden können. Neben konstanten Spannungsniveaus kann auch das Verhalten realer Batterien mithilfe komplexer Modelle in Echtzeit simuliert und gestellt werden.

Der flexible Aufbau des Prüfstands ermöglicht es, bedarfsgerecht einzelne Komponenten oder den gesamten E-Antrieb zu erproben. So können Getriebe/Achsaufbauten für E-Antriebe geprüft werden. Diese sind in der E-Antriebstechnik aus Packaging-Gründen achsparallel mit sehr geringen Achsabständen aufgebaut. Dies erfordert neuartige Erprobungsmethoden mit hochpräziser Mechanik und geeigneten Prüfstandsaufbauten. Daher werden die Prüfstandsmaschinen, insbesondere die Antriebsmaschine und deren Unterbau, sehr schmal ausgeführt, **BILD 2**.

Für Tests von E-Maschinen steht entweder die hochdrehende Antriebsmaschine als Lastmaschine zur Verfügung oder es werden zwei Prüflinge gegeneinander im Back-to-back getestet. Die Energie wird dazu aus dem Batteriesimulator zugeführt. Bei der Erprobung des gesamten E-Antriebs werden der passende Getriebe- und E-Maschinenprüfling gemeinsam aufgebaut.

Eintriebsmaschine			
Drehzahl	**Drehmoment**	**Leistung**	**Dynamik (bei Last)**
20.000/min	900 Nm	700 kW	+/- 50.000/min/s
Radmaschinen			
Drehzahl	**Drehmoment**	**Leistung**	**Dynamik**
3000/min	6.000 Nm	720 kW	+/- 35.000/min/s
Batteriesimulator			
Spannung	**Strom**	**Leistung**	**Dynamik (Stromsprung)**
0… 1000 V	1600 A	1160 kW	0,4 ms

TABELLE 1 Kenndaten des Hochleistungs-Elektroantrieb-Prüfstands (© FKFS)

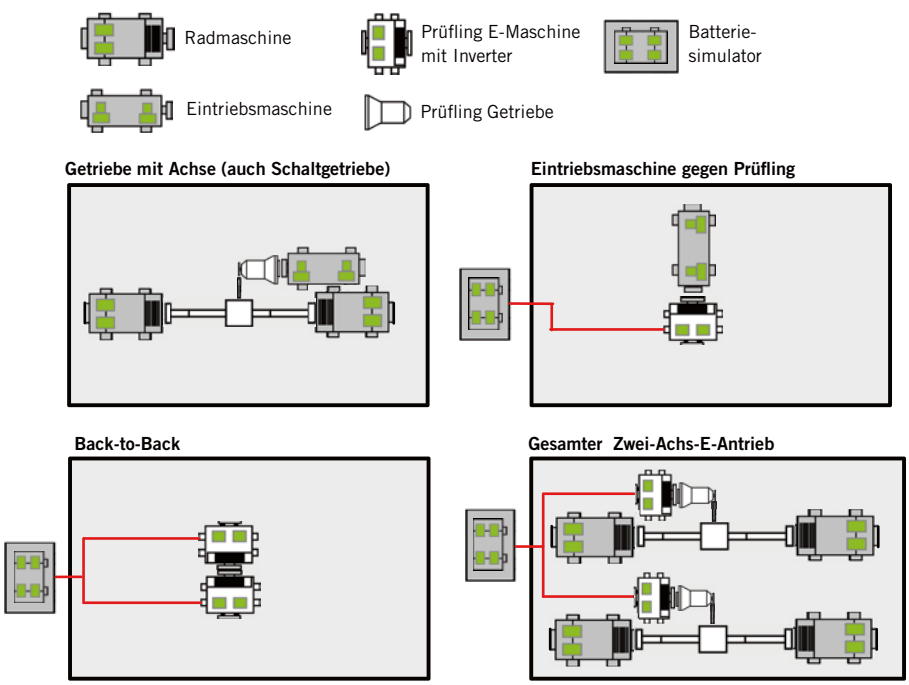

BILD 2 Erprobungsmöglichkeiten für Elektro-Antriebsstränge (© FKFS)

Die möglichen Erprobungsumfänge sind vielfältig. Neben Antriebsapplikation und Funktionsentwicklung stehen auch dynamische Belastungstests und Dauererprobungen zur Verfügung. Außerdem können Wirkungsgrad- und Systemvermessungen mit hochpräziser Leistungsmesstechnik und Parameteridentifikation von E-Maschinen dargestellt werden. Um eine präzise Wirkungsgrad- beziehungsweise Verlustmessung durchführen zu können, kommen sowohl hochgenaue Sensoren für elektrische und mechanische Messgrößen als auch exakte Erfassungssysteme zum Einsatz.

Neben der Erprobung dient der Prüfstand auch der Erforschung von bislang unzureichend beherrschten Phänomenen im elektrischen Antrieb. Effekte in der E-Maschine, die am Lastlosprüfstand in einer frühen Entwicklungsphase ohne Drehmoment erforscht werden, können am HEP unter Teil- und Volllast vertiefend untersucht werden. Dazu zählen beispielsweise das thermische Verhalten, NVH oder elektrische Effekte in den Lagern und Wicklungen, die durch sehr steile Schaltflanken und hohe Spannungslagen verursacht werden. Entsprechende, regelbare Konditioniereinheiten für Wasser- und Ölmedien stehen zur Verfügung. Für NVH-Untersuchungen an Antrieb und E-Maschine wurde die Prüfzelle mit entsprechender Schallverkleidung ausgestattet.

Einen weiteren Schwerpunkt sieht das FKFS darin, neuartige Erprobungsmethoden der E-Antriebsentwicklung zu erforschen. Insbesondere hohe Drehzahlen bis 20.000/min und die entsprechenden Anforderungen an Steifigkeit und Ausrichtungstoleranzen erfordern neue Lösungsansätze.

HOCHDYNAMISCHE ERPROBUNG VON HYBRIDEN ALLRADANTRIEBEN

Ein Alleinstellungsmerkmal des neuen E-Antriebslabors ist die durchgängige Ausstattung der Prüfstände mit permanenterregten Synchronmaschinen und schnellen Umrichteranlagen. Damit werden hochdynamische Erprobungen des Antriebsstrangs ermöglicht, etwa die Untersuchung von Lastwechseln und Schaltvorgängen mit Reifenschlupfsimulation. Bei der Erprobung von Elektroantrieben steigen die Anforderungen an die Prüfstands-dynamik weiter, weil auch die Dynamik der Prüflinge wesentlich höher ist als beim Verbrennungsmotor und aufgrund des Drehzahlniveaus komplexe Schwingungsphänomene auftreten können.

Bei der Regelung von Antriebsstrangsprüfständen handelt es sich um eine komplexe Mehrgrößenregelung, was auf die mechanische Kopplung der Prüfstandsmaschinen durch den Prüfling zurückzuführen ist. Dadurch können sich die maschinenselektiven Regelkreise gegenseitig erheblich stören, wobei sich die Neigung von Antriebssträngen zu schwach gedämpften Schwingungen verschärfend auswirkt. Ein Beispiel hierfür sind die in **BILD 3** dargestellten schwingenden Verläufe der Stellgröße und der Regelabweichung einer radseitigen Drehzahlregelung unter dem Einfluss eines sprungförmigen Drehmomentverlaufs an der Eintriebsmaschine, der regelungstechnisch als Störgröße betrachtet wird.

Aus diesen Gründen werden bei der Regelung dynamischer Antriebsstrangprüfstände gerne Vorsteuerungen, Störgrößenaufschaltungen, Entkopplungen und aktive Dämpfungen eingesetzt, die am FKFS seit Jahren intensiv untersucht und weiterentwickelt werden, um den steigenden Dynamikanforderungen Rechnung zu tragen. In diesem Zusammenhang wurde die Dissertation „Regelung von Antriebsstrangprüfständen“ angefertigt, die 2018 erscheinen wird.

Die Wahl der eingesetzten Regelungsarten hängt stark von den jeweiligen Untersuchungszielen ab. So ist es beispielsweise zum Zwecke der Systemidentifikation in vielen Fällen sinnvoll, auf eher synthetische Regelungsarten wie Drehzahl- oder Drehmomentregelungen zurückzugreifen, die sehr hohe Freiheitsgrade in der Versuchsführung erlauben. Auf diese Weise ist es möglich, Szenarien darzustellen, die im Fahrzeug nicht realisiert werden können. Bei anderen Untersuchungen wie zum Beispiel der Schaltungsapplikation wird häufig eine hohe Realitätsnähe gefordert, sodass sich Straßenlastsimulationen anbieten. Sie zählen zu den Hardware-in-the-Loop-Simulationen und schließen den Wirkungskreis aus dem realen Prüfling und dem virtuellen Fahrzeug sowie seiner Umgebung. Das neue Elektroantriebs-Labor des FKFS verfügt über eine große Spannbreite von Regelungsarten und HiL-Simulationen, um verschiedenste Anforderungen abzudecken und unterschiedlichste Aufgabenstellungen bearbeiten zu können.

Die beschriebene Regelungsstrategie wurde an einem vom FKFS betriebenen hochdyanmischen Antriebsstrang- und Hybrid-Prüfstand (MKP) umgesetzt, **BILD 4**. Ab Ende 2018 wird es möglich sein, gleichzeitig die beiden vollständigen Achsen eines leistungsfähigen all-

Test and Measurement Technology.
Designed for You.

Gantner instruments

Q.series X
NeXt Generation in
Data Acquisition
More Power and More
Flexibility – One Module Fits All

Messmodule für alle relevanten Signale verfügbar

- Mehrkanalmodule
- Universalmodule
- Hochvoltmodule
- Schnelle hochauflösende Digitalisierung
- Leistungsfähige Signalkonditionierung
- Galvanische Trennung
- Ein Modul, verschiedene Schnittstellen

One Fits All:

DIN-Schiene

Portables System

19"-System, 3HE

Gantner Instruments GmbH
Austria: Tel. +43 5556 77463-0
office@gantner-instruments.com
Germany: Tel. +49 6151 95136-0
testing@gantner-instruments.com
www.gantner-instruments.com

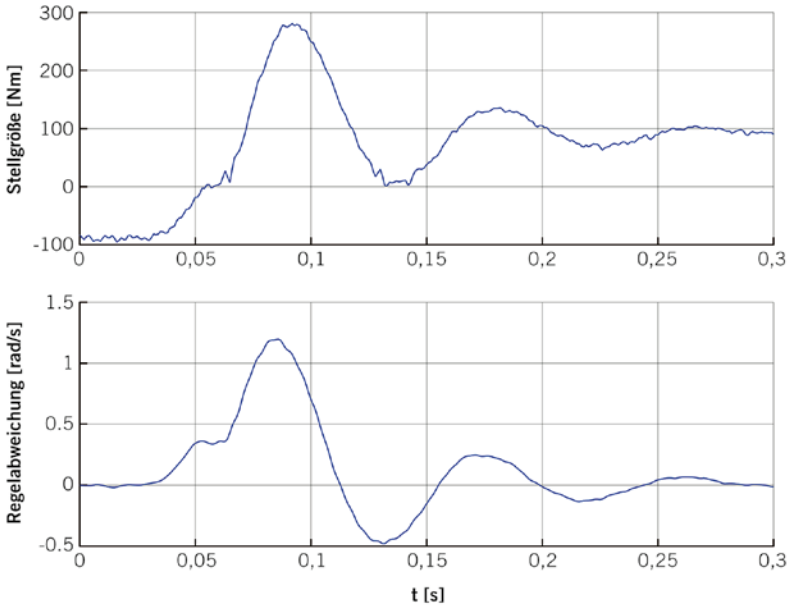

BILD 3 Radseitige Drehzahlregelung bei sprungförmiger eintriebseitiger Störgröße (© FKFS)

radgetriebenen Elektrofahrzeugs an einem gemeinsamen Batteriesimulator zu betreiben. Zukünftig ist an diesem Prüfstand eine Erweiterung mit Hochdrehzahl-Eintriebsmaschinen geplant, sodass zusätzliche Erprobungsmöglichkeiten speziell für Getriebe und Achsen von E-Antrieben geschaffen werden.

ENTWICKLUNGSPRÜFSTAND FÜR HOCHDREHZAHL-ELEKTROMASCHINEN

Der Lastlosprüfstand (LLP), **BILD 5**, ist eine Entwicklungsumgebung für Hochdrehzahl-Elektromaschinen und rundet das Angebot des neuen Elektroantriebslaborshinsichtlich Vorentwicklungsthemen ab. Der große Vorteil des Lastlosprüfstands in Bezug auf Frontloading liegt darin, dass der zu erprobende Prüfling geschleppt wird. Entsprechend können Prototypen untersucht werden, die die mechanischen und/oder thermischen Trägheiten eines potenziellen Serienantriebs aufweisen. Der Prüfling selbst benötigt keine elektromagnetischen Komponenten und keine Leistungselektronik. Somit werden Konzeptideen in einem frühen Stadium in Bezug auf mechanische, thermische und hydrodynamische Fragestellungen untersucht und beispielsweise Simulationsergebnisse validiert. Hierdurch wird eine Reifegraderhöhung auf Komponentenebene erreicht, die zu einer Verkürzung der Entwicklungszeit führt.

Bei der Konzeption der Hardware und Software wurde großen Wert auf einen modularen, flexiblen und echtzeitfähigen Aufbau zur Erzeugung hochgenauer Ergebnisse gelegt. Ein Hauptaugenmerk liegt auf der Ausbreitung gezielter thermischer Einträgen durch mehrere elektrische Energiequellen in den Prüfling. Weitere Wärmeeinträge und Wärmeabfuhr werden mittels Fluiden durch Öl- oder Wasserkonditionierungen realisiert. Somit können sowohl Temperaturverteilungen im Prüfling als auch Kühlkonzepte mit einer hohen Genauigkeit untersucht werden. Das nutzbare Drehzahlband des Lastlosprüfstands erstreckt sich bis 24.000 /min. Um eine hohe Flexibilität zu gewährleisten, wird eine echtzeitfähige und frei programmierbare Steuerung eingesetzt. In Kombination mit einer integrierten Messtechnik ergibt sich ein Prüfstand, der zentral mit einem Programm gesteuert wird. Eine Vielzahl gängiger Schnittstellen zeichnet die Zukunftsfähigkeit und Erweiterbarkeit des Prüfstands aus.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Einen weiteren Zukunftsaspekt stellt die Entwicklung von Elektroantrieben für das hochautomatiserte Fahren dar. Dabei bestehen erhöhte Anforderungen an die funktionale Sicherheit und Zuverlässigkeit des Antriebssystems, die in einem gemeinsamen Grundlagenprojekt von FKFS, Universität Stuttgart, Opel und ZF erforscht wurden [6]. Auch die Lastkollektive der Antriebskomponenten im automatisierten Fahrzeug unterscheiden sich vom manuellen Fahren. Dieses Themenfeld wird aktuell in einer Forschungskooperation Digital E-Drive von Daimler, Bosch und FKFS bearbeitet [7]. Das neue E-Antriebslabor wird die Erprobung solcher hoch verfügbarer Antriebe unter realistischen Lastkollektiven und Ausfallszenarien ermöglichen.

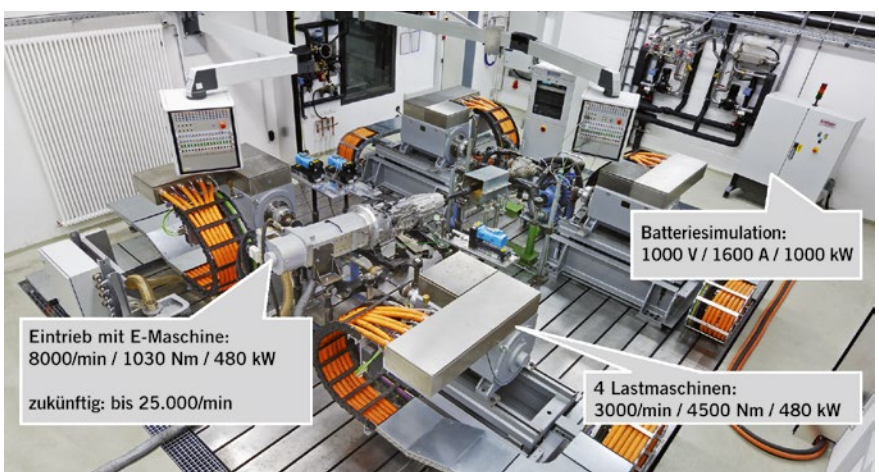

BILD 4 Erprobung eines Allrad-Antriebsstrangs am MKP (© FKFS)

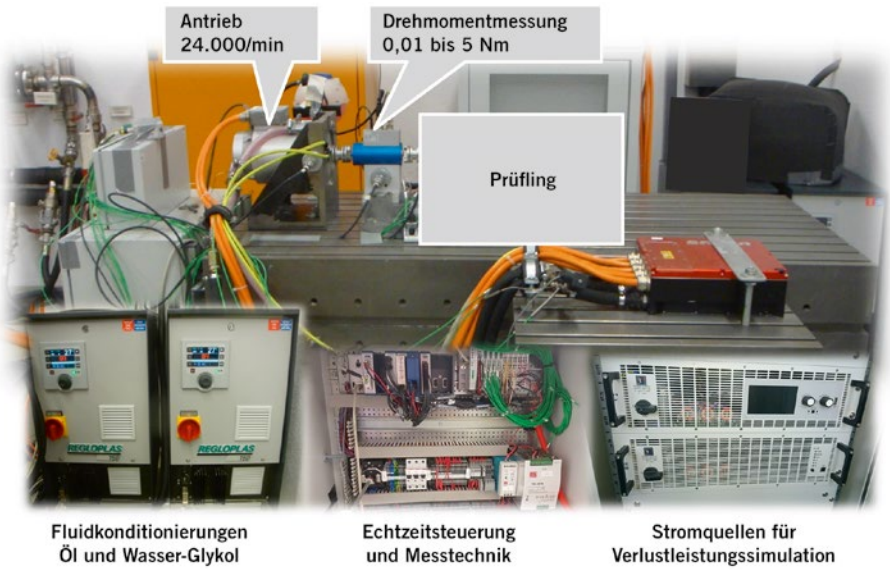

BILD 5 Hochdrehzahlerprobung am LLP mit thermischer Konditionierung (© FKFS)

LITERATURHINWEISE

[1] Riemer, T.: Vorausschauende Betriebsstrategie für ein Erdgashybridfahrzeug. Dissertation, Universität Stuttgart, 2012

[2] Ebel, A.; Orner, M.; Riemer, T.; Reuss, H.-C.: Optimierte Auslegung von Antriebssträngen mittels der FKFS-Triebstrangbibliothek. VDI/VDE-Fachtagung AUTOREG, Berlin, 2017

[3] Becker, G.: Ein Fahrerassistenzsystem zur Vergrößerung der Reichweite von Elektrofahrzeugen. Dissertation, Wiesbaden, 2016

[4] Engelhardt, T.: Derating-Strategien für elektrisch angetriebene Sportwagen. Wiesbaden, 2017

[5] Schlüter, M.; Reuss, H.-C.; Uphaus, F.: Objectification Of User's Feeling Of Pedal-Induced Acceleration Changes Regarding Agility And Acceptance Of Discomfort. 26. Aachen Colloquium, Aachen, 2017

[6] Pitz, J: Zuverlässigkeit und Sicherheit von Elektrofahrzeugen. BMBF-Statusseminar Elektromobilität, 23.11.2015. Online: https://www.tib.eu/de/such.en/id/TIBKAT%3A880885971/, aufgerufen am 06.08.2018

[7] Aachen 2025. Onine: http://www.hanser-automotive.de/branchennews/aktuelle-branchen-news/article/forschungsprojekt-zur-automatisierung-und-vernetzung-von-e-fahrzeugen.html, aufgerufen am 06.08.2018

DANKE

Die Autoren danken Dipl.-Ing. Nicolai Stegmaier und Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss für die engagierte Mitwirkung bei der Erstellung des Beitrags.

DIESER BEITRAG IST IM E-MAGAZIN VERFÜGBAR UNTER:
www.emag.springerprofessional.de/atz

Anzeigen-Sonderveröffentlichung

EVIDAS – In nur 2 Klicks zum Messergebnis

Die zuverlässige Software zum Erfassen und Analysieren von Daten mit Cloud-Integration – Jetzt 30 Tage kostenlos testen!

EVIDAS ist die neue Datenerfassungssoftware vom führenden Messtechnik-Anbieter HBM, mit der Sie in zwei einfachen Schritten zu Ihrem Messergebnis gelangen: Einfach Ihre ausgewählten intelligenten Sensoren (TEDS) anschließen und direkt mit Ihrer Messung loslegen. Der hoch entwickelte und saubere Workflow der Software EVIDAS liefert Ihnen hervorragende visuelle Rückmeldungen.

Basierend auf der zukunftsweisenden 64-bit-.NET-Technologie bietet EVIDAS moderne, offene Software-Schnittstellen. Dank hervorragender Benutzerfreundlichkeit macht die Software Ihre Messaufgaben zu einem Vergnügen.

Zudem können Sie zwischen fünf Sprachen wählen (Englisch, Deutsch, Chinesisch, Japanisch und Französisch) und Ihre Daten nach dem Erfassen automatisch in das HBM Cloud-Storage hochladen und mit Ihren Kollegen rund um den Globus teilen.

Probieren Sie EVIDAS gleich aus! Mehr Informationen unter:
www.hbm.com/evidas