

AUTOREN



**Philipp Weber, M. Sc.**  
ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).



**Stefan Hähnlein, M. Sc.**  
ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Elektrotechnischen Institut (ETI) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).



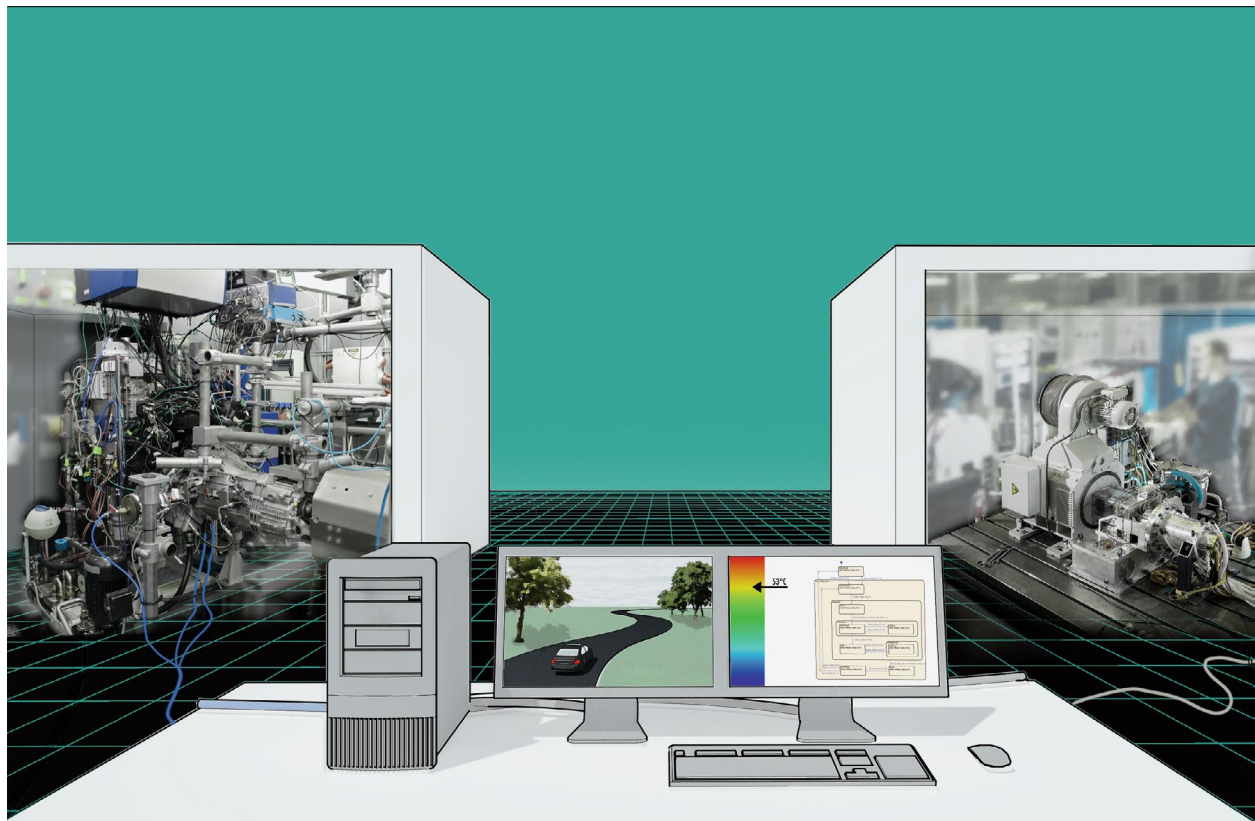
**Philip Rautenberg, M. Sc.**  
ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).



**Dr.-Ing. Marcus Gohl**  
ist Leiter Basisentwicklung bei der APL Automobil-Prüftechnik Landau GmbH in Landau.

# Potenziale durch gekoppelte Prüfstände

Technologietrends wie Elektrifizierung und automatisiertes Fahren resultieren in einer erhöhten Komplexität im Fahrzeugentwicklungsprozess. Verteilte Entwicklungswerkzeuge können dabei in vielfältigen Anwendungen unterstützen. Im FVV-Projekt „Methodik Hybriderprobung“ (Nr. 1363) wurde eine Methodik für einen virtuellen Prüfstandsverbund für hybridelektrische Antriebe am Karlsruher Institut für Technologie unter Begleitung durch APL entwickelt. Dadurch können bereits im Stadium der Komponentenentwicklung Untersuchungen auf Systemebene durchgeführt werden.



1	MOTIVATION
2	WEITERENTWICKLUNG VON METHODEN UND STANDARDS
3	ANFORDERUNGEN UND ANWENDUNGEN DER VERNETZTEN VALIDIERUNG
4	BETRACHTETE TESTFÄLLE UND ERGEBNISSE
5	ZUSAMMENFASSUNG

## 1 MOTIVATION

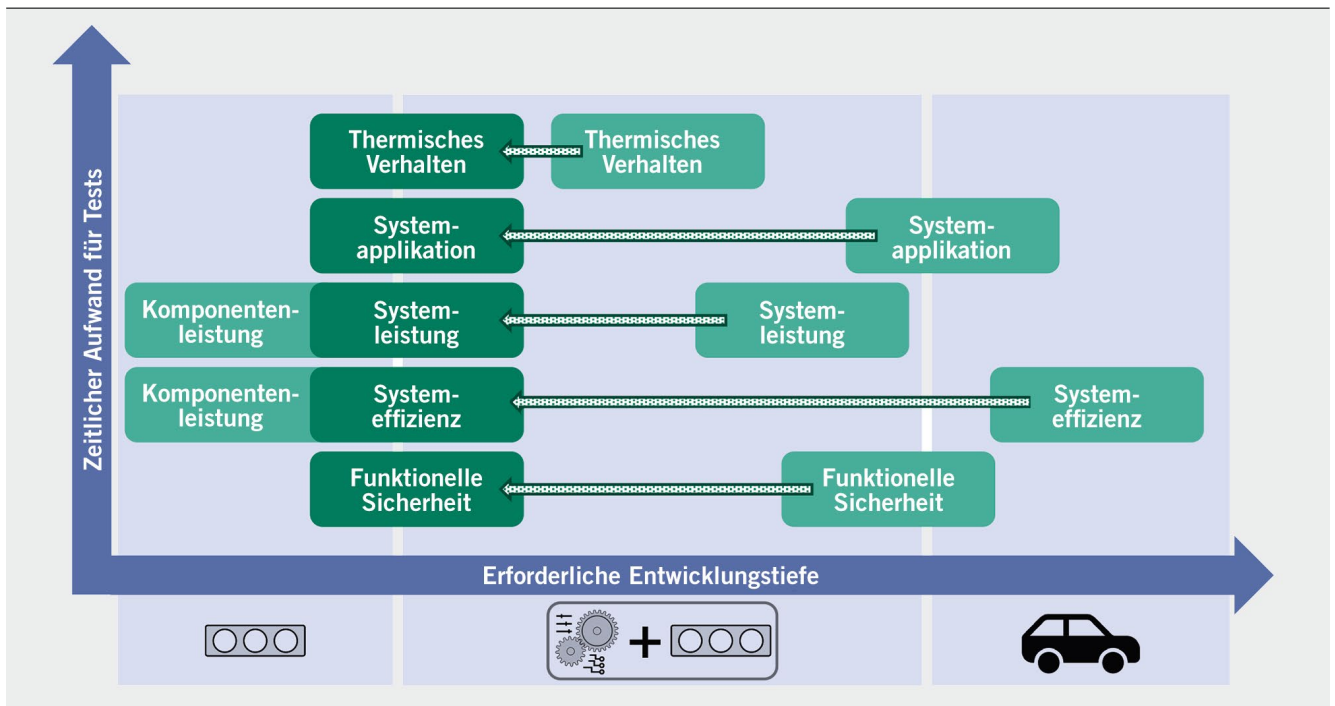
Hybridelektrische Fahrzeuge (Hybrid Electric Vehicles, HEVs) zeichnen sich durch eine erhöhte Komplexität aus, unter anderem bedingt durch die Vielzahl der Steuererätefunktionen für den Antriebsstrang bestehend aus Verbrennungskraftmaschine (VKM) und Elektrischer Maschine (EM). Dadurch ergeben sich sowohl auf System- als auch auf Bauteilebene vielfältige Konzepte, die mit entsprechenden Tests abgesichert werden müssen. Für eine effiziente Entwicklung in der Konzeptions- und in der Integrationsphase wird zunehmend auf virtuelle Produktentwicklung sowie durchgängige Werkzeugketten gesetzt, beispielsweise die unter dem Überbegriff X-in-the-Loop (XiL) zusammengefassten Methoden [1]. Darunter fallen auch Engine-in-the-Loop(EiL)-Prüfstände, bei denen eine VKM mitsamt einer Simulation von Restantriebsstrang, Fahrzeug, Fahrer und Umgebung betrieben wird, um möglichst realitätsnahe Versuchsbedingungen zu schaffen. Drei Institute des KIT, das Institut für Kolbenmaschinen (IFKM), das Elektrotechnische Institut (ETI) sowie das Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST), haben gemeinsam mit APL diese Verfahren durch eine Prüfstandsverbundmethodik weiterentwickelt, um den Aufwand in der Validierung komplexer werdender Systeme wiederum zu minimieren.

## 2 WEITERENTWICKLUNG VON METHODEN UND STANDARDS

Zur Verbesserung der Aussagekraft wurden gängige XiL-Ansätze in den vergangenen Jahren erweitert. Vormalig rein virtuelle Komponenten, wie zum Beispiel die EM, werden nun mit realer Hardware an einem zweiten Prüfstand installiert und mit dem EiL-Prüfstand vernetzt. Dies stellt eine Weiterentwicklung zum Ansatz der Co-Simulation dar und wird als Echtzeit-Co-Simulation bezeichnet. So wie die ursprüngliche Co-Simulation von Standards wie dem Functional Mockup Interface (FMI) unterstützt wird, wurde im Zuge des ACOSAR-Projekts das Distributed Co-Simulation Protocol (DCP) zur Kopplung von Hardware erarbeitet [2]. Durch die Anwendung dieses Protokolls im Rahmen des hier beschriebenen Projekts soll eine möglichst standardisierte Vorgehensweise zur Vernetzung von Prüfständen geschaffen werden. Damit verbunden sind potenzielle Zeit- und Kosteneinsparungen für Anwendungen aus unterschiedlichen Bereichen. Dabei lag ein besonderer Fokus auf der Entwicklung einer Methodik zur Implementierung der virtuellen Kopplung. Durch eine strukturierte Herangehensweise kann eine beliebige Anzahl von Prüfständen schnell und vor allem sicher zu einem Systemprüfstand erweitert werden.

## 3 ANFORDERUNGEN UND ANWENDUNGEN DER VERNETZTEN VALIDIERUNG

Je nach Aufbau der Vernetzung ergibt sich durch die vorgestellte Methodik ein breites Anwendungsfeld. In **BILD 1** ist schematisch die zeitliche Verschiebung einzelner Gesamtfahrzeug-Testfälle in die Komponenten-Testphase dargestellt. Die damit verbundene Zeit- und Kostenersparnis kann durch vernetzte Prüfstände erzielt werden. Je nach Testfall sind dabei verschiedene Anforderungen, resultierend aus unterschiedlichen Randbedingungen, wie mechanische,



**BILD 1** Kopplung von EM- und VKM-Prüfstand zur Verlagerung von Testfällen des Gesamtfahrzeugversuchs in den Komponentenversuch (© KIT)

elektrische und thermische Grenzen sowie Gradienten der Prüflinge und Prüfstandstechnik, zu erfüllen. Technische Eigenschaften von Antriebsmaschinen wie das maximale Drehmoment oder Wirkungsgradkennfelder werden bei möglichst konstanten Temperaturen ermittelt. Dagegen erfordert die Absicherung thermischer Grenzfälle eine ausreichend dynamische Konditionierung der Versuchsträger, um so das lastbedingte Aufheiz- und Abkühlverhalten realistisch abzubilden. Neben entsprechend spezifizierten Konditioniereinheiten müssen hierfür unter anderem auch Temperaturmodelle in die Testumgebung eingebunden werden. Im Falle hoher Dynamikanforderungen für Drehzahl- und Drehmoment muss darüber hinaus eine geringe Latenz zwischen den Netzwerkteilnehmern sowie schnelle Messtechnik vorhanden sein. Gegebenenfalls können diese zusätzlich durch Latenz-Kompensationsalgorithmen erweitert werden [3]. Eine andere Möglichkeit stellt die gezielte Auslagerung der (Teil-) Modelle zur Berechnung des dynamischen Verhaltens an die entsprechenden Prüfstände dar.

Zur Umsetzung des Vernetzungsaufbaus wurden im Zuge dieses Projekts unter anderem folgende Lösungen implementiert:

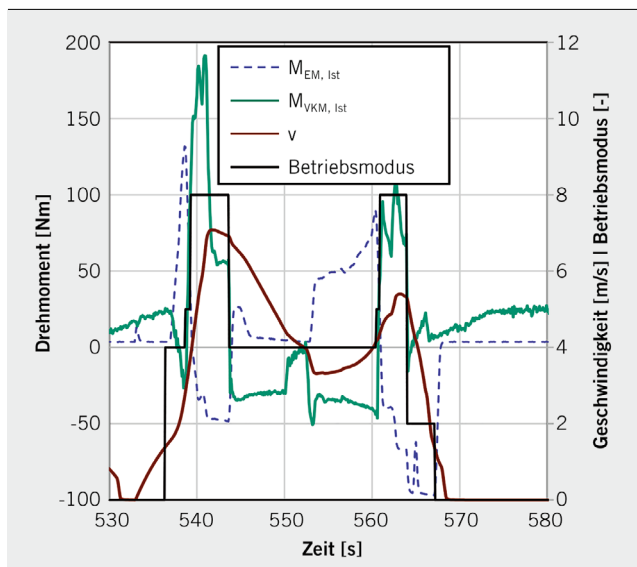
- Kopplung über das Netzwerk-Protokoll UDP/IP
- Implementierung des DCP-Standards zur vereinfachten Inbetriebnahme von Echtzeit-Co-Simulations-Szenarien
- Aufrüstung und Einbindung geeigneter Konditioniereinheiten
- Entwicklung von Funktionen zum drehmomentgeregelten Betrieb der EM sowie Algorithmen für verschiedene Fälle von Derating
- schnelle Drehzahl-/Drehmoment-Messung zum Betrieb der EM im geschlossenen Regelkreis mit der über UDP/IP gekoppelten Fahrzeugsimulation
- Erstellung einer Hybridbetriebsstrategie zur Aufteilung der Last und Berücksichtigung thermischer Effekte.

Weitere Informationen zum Prüfstands- und Vernetzungsaufbau wurden in [4] beschrieben. In standardisierten Testzyklen wie dem Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle (WLTC) sowie Bergfahrten mit hohen Lastanforderungen konnten damit mehrere der in **BILD 1** dargestellten Testfälle untersucht werden.

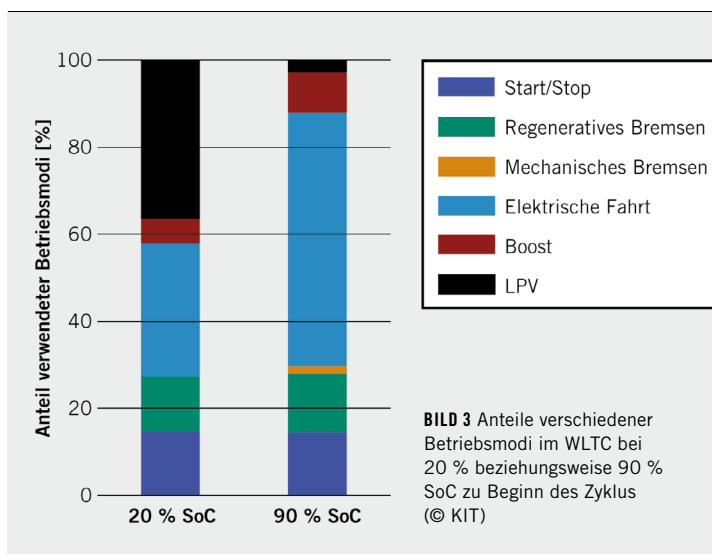
#### 4 BETRACHTETE TESTFÄLLE UND ERGEBNISSE

Neben dem in [4] vorgestellten thermischen Verhalten wurden auch die Themenfelder Systemapplikation, -effizienz und -leistung betrachtet. Im Folgenden werden beispielhaft verschiedene Ergebnisse mit einer funktionsorientierten Betriebsstrategie dargestellt, die unter dem Begriff der Systemapplikation zusammengefasst wurden.

In **BILD 2** ist die geschwindigkeits(v)- beziehungsweise lastabhängige Aufteilung von VKM- und EM-Moment ( $M_{VKM, Ist}$  und  $M_{EM, Ist}$ ) in Abhängigkeit des situativ aktiven Betriebsmodus zu erkennen. Nach Beschleunigung aus dem Stillstand wechselt das Fahrzeug vom Modus „0“ (Stop) in den Modus „4“, um elektrisch anzufahren. Kurz darauf wird die VKM zugeschaltet und von der EM unterstützt, Modus „5“ (Boost). Anschließend wechselt das Fahrzeug in den Modus „8“ (Lastpunktverschiebung, LPV), was sich durch das negative EM-Moment von zeitweise circa -50 Nm und ein erhöhtes positives VKM-Moment äußert. Beim nachfolgenden Bremsvorgang wird zurück in den elektrischen Fahrmodus geschaltet. Aufgrund der anfallenden Schleppverluste der nicht abgekoppelten VKM muss die EM ein positives Moment stellen. Sofern die Prüfstands-umgebung eine Abkopplung der VKM vom restlichen Antrieb zulässt, kann auch regenerativ gebremst (Modus „2“) werden. Im gezeigten Beispiel müssen aber die



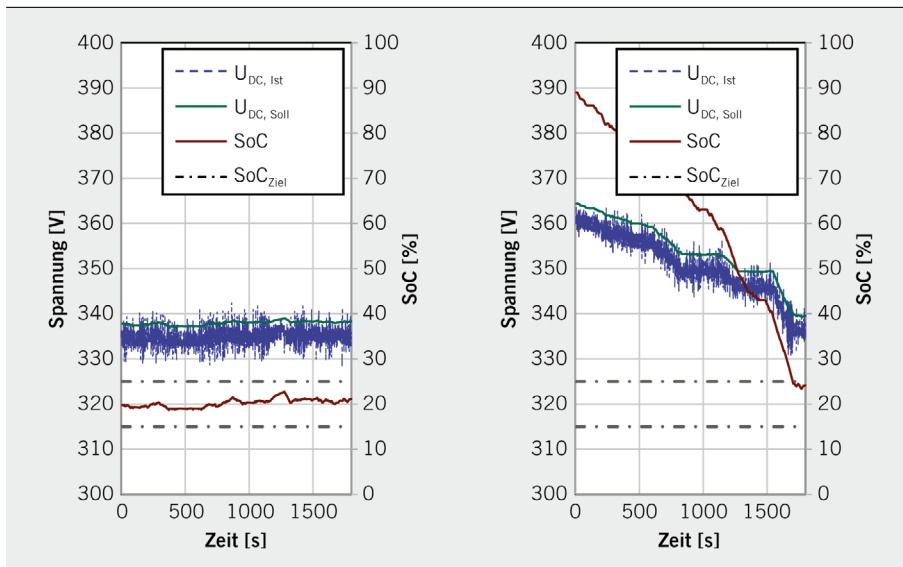
**BILD 2** Variation der Drehmomenten-Aufteilung durch Betriebsmoduswechsel (© KIT)



**BILD 3** Anteile verschiedener Betriebsmodi im WLTC bei 20 % beziehungsweise 90 % SoC zu Beginn des Zyklus (© KIT)

Schleppverluste durch die EM kompensiert werden. Eine regenerative Bremsung ist erst bei stärkeren Verzögerungen, wie circa ab Sekunde 570, umgesetzt.

In **BILD 3** sind die prozentualen Anteile der einzelnen Betriebsmodi bei zwei WLTC-Messungen aufgetragen. Hierbei wird der Effekt unterschiedlicher Startwerte des Batterieladezustands (State of Charge, SoC) untersucht, bei 20 % beziehungsweise 90 %. Während Start/Stop-Phasen nahezu in gleicher Häufigkeit auftreten, zeigt sich ein deutlich höherer Anteil rein elektrischer Fahrt bei 90 % Start-SoC. Dagegen wird das virtuelle Fahrzeug beim WLTC mit niedrigerem Start-SoC häufig im Lastpunktverschiebungsmodus betrieben. Auffällig ist zudem noch, dass bei hohem Start-SoC in manchen Fällen auch mechanisch statt regenerativ gebremst wird. Dies liegt darin begründet, dass bei der gewählten Parametrierung des Hybridcontrollers regeneratives Bremsen erst unter einem SoC von 85 % erlaubt wurde.



**BILD 4** Zwischenkreisspannung und SoC der Batterie in Abhängigkeit des Start-SoC und des Betriebsmodus im CS-Modus (links) und im CD-Modus (rechts) © KIT

Bei zertifizierungsrelevanten WLTC-Tests von HEV müssen mehrere Messungen durchgeführt werden. Dies beinhaltet Tests, in denen ausgehend von 100 % SoC rein elektrisch bis zur unteren Ladezustandsgrenze (Charge-depleting Mode, CD) gefahren wird.

Außerdem werden Prüfläufe mit leerer Batterie durchgeführt, in denen der Ladezustand innerhalb eines Zielbereichs ( $SoC_{Ziel}$ ) erhalten werden muss (Charge-Sustaining Mode, CS), dargestellt in **BILD 4**. Neben der stetigen Entladung im CD-Modus (rechts) sowie

# Aufstiegsstoff

Wirkt schon in kleiner Dosis.

Wer nach oben will braucht **adhäsion**, die einzige deutsche Fachzeitschrift für industrielle Kleb- und Dichttechnik: Wertvolles Insiderwissen, praxisrelevante Informationen und neueste Trends und Technologien.

## Ihre Abovorteile:

- ✓ 10 Ausgaben im Jahr
- ✓ Jede Ausgabe inkl. E-Magazin – NEU!
- ✓ „Handbuch Klebtechnik“ kostenlos für Abonnenten
- ✓ Freier Zugriff auf das Online-Archiv mit Fachbeiträgen seit 2003
- ✓ Keinerlei Risiko, jederzeit kündbar

Jetzt 2 Ausgaben kostenlos testen:  
[www.meinfachwissen.de/adhaesion](http://www.meinfachwissen.de/adhaesion)



**adhäsion** KLEBEN+DICHTEN

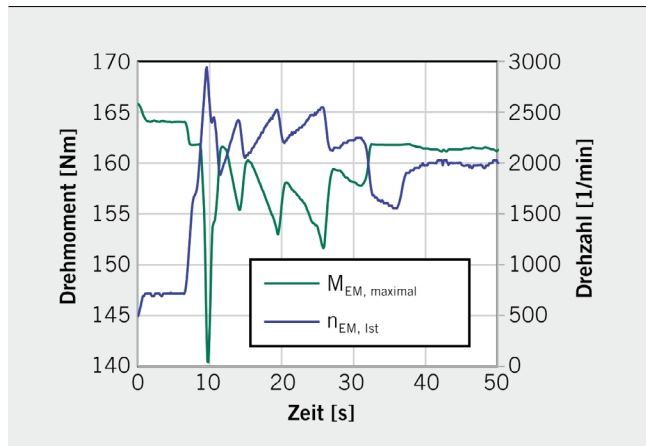


BILD 5 EM-Derating als Funktion drehzahlabhängiger Kriterien (© KIT)

der Einhaltung des spezifizierten SoC-Bereichs im CS-Modus (links) ist die Zwischenkreisspannung der EM dargestellt. Hierbei folgt der gemessene, eingestellte Wert ( $U_{DC, Ist}$ , blau gestrichelt) dem Vorgabewert ( $U_{DC, Soll}$ , grün), der über das Prüfstandsnetzwerk vom EiL-Prüfstand zum EM-Prüfstand übermittelt wird. An dieser Stelle sei angemerkt, dass je nach Ausgangslage der vorhandenen Steuersoftware der EM bestimmte Funktionsumfänge für den gekoppelten Betrieb im Gesamtsystem ergänzt werden müssen:

- Eine Nachführung der Zwischenkreisspannung muss bei der Berechnung der Stromsollwerte für ein Wunschdrehmoment berücksichtigt werden.
- Für den Betrieb der EM in hohen Drehzahlbereichen müssen Funktionen der Software für den Feldschwähebereich implementiert sein.
- Zum Schutz der EM vor thermischer Überlastung muss ein entsprechendes Leistungs-Derating implementiert werden, falls Betriebsbereiche in der Überlast gefordert sind.

Die genannten Funktionalitäten führen entsprechend des Betriebszustandes zu einer Reduktion des maximal möglichen Moments, das im Hybridcontroller berücksichtigt werden muss.

Funktionen zum Bauteilschutz von EM umfassen neben dem in [4] gezeigten thermischen Derating auch Derating in Abhängigkeit der EM-Drehzahl ( $n_{EM, Ist}$ ). Ein Beispiel für die Reduktion des maximal zulässigen Drehmoments ( $M_{EM, maximal}$ ) ist in Abhängigkeit der EM-Drehzahl in BILD 5 dargestellt. Zu erkennen ist eine Reduzierung von  $M_{EM, maximal}$  ab circa 2200/min um circa 20 Nm. Durch Schaltvorgänge im Getriebe wird die Drehzahlanforderung gesenkt und der Wert des Maximaldrehmoments wieder erhöht.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Artikel wurde gezeigt, wie eine Vernetzung zweier Prüfstände erfolgen kann und welche Messungen damit beispielhaft durchgeführt werden können. Dabei wurde auf die wachsende Bedeutung von Echtzeit-Co-Simulation verwiesen. Erwähnenswert ist hier insbesondere die Standardisierung geeigneter Protokolle für diese Anwendungsfälle, die durch eine Weiterentwicklung der Funktionen des FMI hin zum DCP unterstützt werden. Je nach Testfall bedingt der Aufbau einer vernetzten Validierungsumgebung verschiedene Anpassungen von Prüfstands-Hardware und -Software, die für dieses Projekt beispielhaft skizziert wurden. Anhand verschiedener Ergebnisse wurde erläutert, wie die vorgestellte Entwick-

lungsumgebung für das Themenfeld Systemapplikation verwendet werden kann. Insbesondere die Validierung verschiedener Regelungsalgorithmen im Gesamtsystemkontext kann damit durchgeführt werden.

## LITERATURHINWEISE

- [1] Schreiber, V.; Büchner, F.; Lehne, C.; Ivanov, V.: X-in-the-Loop-Ansatz zur Entwicklung von Elektrofahrzeugen. In: MTZextra 26 (2021), Sonderheft 1, S. 18–23
- [2] Mikelsons, L. et al.: Advanced Co-Simulation Open System Architecture: Acosar-Abschlussbericht: gemeinsamer Abschlussbericht: Förderzeitraum: 01.09.2015-31.08.2018. Renningen: Robert Bosch GmbH, 2019
- [3] Nickel, D.; Behrendt, M.; Bause, K.; Albers, A.: Connected testbeds – Early validation in a distributed development environment. 18. Internationales Stuttgarter Symposium, Stuttgart, 2018
- [4] Rautenberg, P.; Degel, J. P.; Hähnlein, S.; Weber, P.: Thermische Tests im gekoppelten Prüfstandsbetrieb. In: MTZextra 26 (2021), Sonderheft 1, S. 36–39

## DANKE

Das Forschungsvorhaben (FVV-Projektnr. 1363) wurde am Elektrotechnischen Institut (ETI) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer, am Institut für Fahrzeugsystemtechnik – Institutsteil Fahrzeugtechnik (FAST) des KIT unter der Leitung von Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin und am Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) des KIT unter der Leitung von Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch durchgeführt. Es wurde von der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e. V. mit Eigenmitteln finanziell gefördert und von einem Arbeitskreis unter der Leitung von Dr.-Ing. Marcus Gohl (APL Automobil-Prüftechnik Landau GmbH) begleitet. Die Autoren bedanken sich bei den Fördergebern, der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e. V. und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens. Dank für die Unterstützung gilt außerdem Jan Philipp Degel (ETI), Dr.-Ing. Martin Gießler (FAST) und Dr.-Ing. Olaf Toedter (IFKM).



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: [www.mtz-worldwide.com](http://www.mtz-worldwide.com)