



© KIT

Thermische Tests im gekoppelten Prüfstandsbetrieb

Die Entwicklung von hybridelektrischen Antriebssträngen erfordert einen erhöhten Testaufwand. Am Karlsruher Institut für Technologie wurde aus diesem Grund im Rahmen eines Projekts eine Methode zur Erprobung von hybridelektrischen Antriebssträngen mit Fokus auf thermische Tests entwickelt und in einem Aufbau aus zwei kooperierenden Verbrennungs- und Elektromotorenprüfständen demonstriert.

Durch die Elektrifizierung von konventionellen Antriebssträngen können Kraftstoffverbrauch sowie Schadstoffausstoß reduziert werden, um die zunehmend strikte Emissions-Gesetzgebung einzuhalten. Mit der kommenden Euro-7-Norm rückt auch ein erweiterter Temperaturbereich, voraussichtlich von -10 bis +45 °C [1], in den Fokus der Fahrzeugzulassung. Die damit verbundene Komplexitätssteigerung erhöht

den Entwicklungsaufwand für hybridelektrische Fahrzeuge (Hybrid Electric Vehicle, HEV) weiter. Neben Straßentests müssen dabei vielfältige Untersuchungen auf Komponenten-, Antriebsstrang- und Fahrzeugprüfständen durchgeführt werden. Hierbei kann die virtuelle Kopplung von Prüfständen zur Reduktion von kostenintensiven Prüfaufwänden beitragen, wie in [2] und [6] demonstriert.

Dieser Ansatz wurde im vorliegenden Projekt weiterentwickelt, um virtuell-physikalische Hybridantriebe zu erproben. Neben der Erarbeitung von Anforderungen an die Vernetzung von Prüfständen wurde im Projekt das thermische Verhalten der einzelnen Komponenten untersucht. In diesem Beitrag werden die Prüfstände und der Aufbau des Simulationsmodells vorgestellt sowie Ergebnisse der thermischen Tests aus dem gekoppelten Betrieb gezeigt.

PRÜFSTANDSAUFBAU

Der vernetzte Prüfstandsaufbau für hybridisierte Antriebsstränge koppelt einen Prüfstand für Verbrennungskraftmaschinen (VKM) mit einem Prüfstand für elektrische Maschinen (EM). Am VKM-Prüfstand ist ein Reihensechszylinder Benzinmotor mit einer Leistung von

AUTOREN



Philip Rautenberg, M. Sc. ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).



Jan Philipp Degel, M. Sc. ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Elektrotechnischen Institut (ETI) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).



Stefan Hähnlein, M. Sc. ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Elektrotechnischen Institut (ETI) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).



Philipp Weber, M. Sc. ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

225 kW und einem maximalen Drehmoment von 400 Nm als Prüfling installiert. Auf dem EM-Prüfstand ist eine permanenterrregte Synchronmaschine inklusive Leistungselektronik (LE) mit einer Leistung von 85 kW und einem maximalen Drehmoment von 200 Nm aufgebaut. Der Verbrennungsmotor kann über eine Öl- sowie eine Wasserkonditionierung temperaturgeregelt betrieben werden. Die Sollwerte dieser Temperatureinheiten werden von einer Fahrzeugsimulation über ein Automatisierungssystem vorgegeben. Die grundlegende Anordnung der Kühlsysteme beider

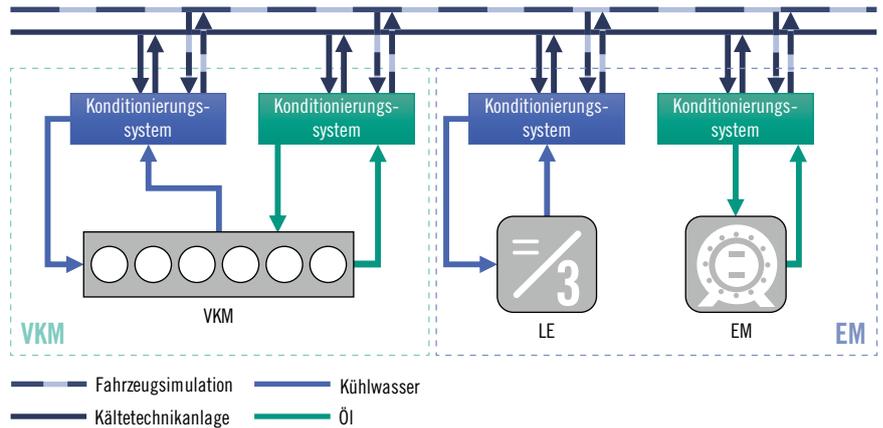


BILD 1 Schematische Darstellung des Aufbaus der Kühlsysteme von EM- und VKM-Prüfstand (© KIT)

Prüfstände ist in **BILD 1** dargestellt. Die Medien-Temperaturen von EM und LE können ebenso mithilfe von Konditionierungseinheiten geregelt werden.

Um die Gültigkeit des zusammengesetzten Versuchsaufbaus zu verifizieren, wurde eine Marktanalyse von HEV auf dem europäischen Markt in 2019 und 2020 durchgeführt und die Aufteilung der Gesamtantriebsleistung von EM und VKM am Markt verfügbarer HEV in **BILD 2** dargestellt. Diese Marktanalyse zeigt, dass die in diesem Projekt verwendeten Prüflinge für VKM und EM eine marktübliche Leistungsaufteilung für HEV repräsentieren.

ENTWICKLUNGSUMGEBUNG

Eine Fahrzeugsimulationsumgebung dient als Integrationsplattform für virtuelle und virtuell-physikalische Tests,

BILD 3. Das Modell spiegelt dabei die Fahrzeugumgebung, den Fahrer sowie das Fahrzeug als P2-Plug-in-Hybrid wider. Erweitert wurde die Simulationsumgebung um ein Fahrermodell sowie detaillierte Teilmodelle für die Betriebsstrategie im Hybridsteuergerät, das Wandler-Automatikgetriebe, die Batterie sowie Temperaturmodelle. Diese virtuellen Komponenten wurden durch Vermessungen der Komponenten eines Hybridfahrzeugs (Leistungsaufteilung siehe KIT-Fahrzeug in **BILD 2**) parametrisiert. Das Fahrermodell generiert dabei Gas- und Bremspedalstellungspositionen, um ein vorgegebenes Geschwindigkeitsprofil zu fahren. Das Hybridsteuergerät interpretiert die vom Fahrermodell vorgegebenen Pedalpositionen und verteilt die zu stellenden Antriebsmomente auf die Prüflinge VKM und EM. Im Verzögerungsfall teilt das Hybridsteuergerät die

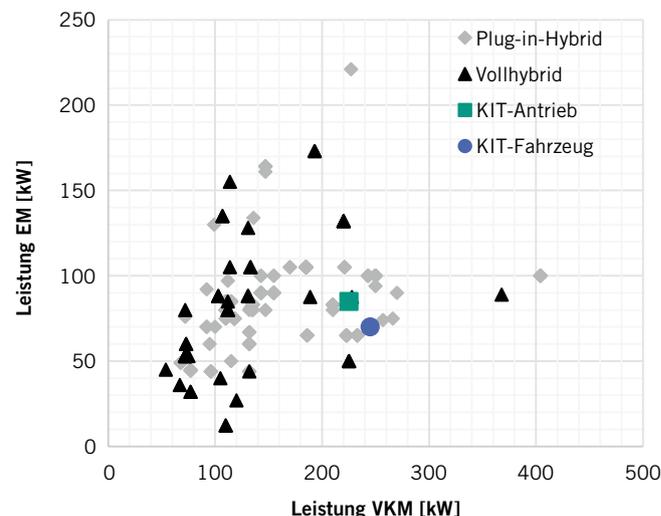


BILD 2 Vergleich des Versuchsaufbaus inklusive Referenzfahrzeug mit auf dem europäischen Markt verfügbaren HEV im Zeitraum 2019 bis 2020 (© KIT)

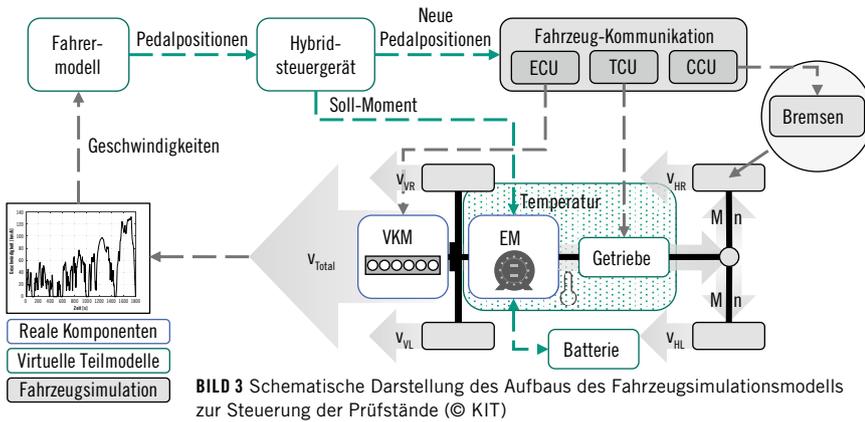


BILD 3 Schematische Darstellung des Aufbaus des Fahrzeugsimulationsmodells zur Steuerung der Prüfstände (© KIT)

Bremsmomente auf die EM und eine virtuelle Bremse auf. Im Gegensatz zur EM werden für die VKM und die Bremse die Drehmomentvorgaben erneut in Pedalpositionsvorgaben umgewandelt, damit diese das jeweilig geforderte Moment stellen. Das virtuelle Wandler-Automatikgetriebe dient zur Übertragung der Antriebsstrangdrehzahlen beziehungsweise -drehmomente an die virtuellen Räder. Die virtuelle Batterie stellt die für die EM benötigte Zwischenkreisspannung zwischen Batterie und Leistungselektronik, die in Abhängigkeit des Ladezustands variiert. Zusätzlich zu den bisher vorgestellten Modellen kommen auch Temperaturmodelle zur Abbildung realistischer Betriebstemperaturen zum Einsatz. Diese ermöglichen unter anderem eine Parallelschaltung der Temperaturkreisläufe von realer EM und virtuellem Getriebe. Dabei wird unter anderem die Getriebeöl-Ausgangstemperatur berechnet, mit der realen EM-Öl-Ausgangstemperatur unter Berücksichtigung der Massenströme addiert und über den Kühler in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit die Eingangstemperatur für EM und Getriebe bestimmt. Diese dient wiederum als Sollwert für das Öl-Konditionierungssystem am realen Prüfstand.

PRÜFSTANDSKOPPLUNG

Wenn Prüfstände gekoppelt werden sollen, müssen mindestens zwei Echtzeitsysteme (real-time, RT) miteinander kommunizieren. Je nach vorhandener Hard- und Software beinhaltet dies verschiedene Kommunikationsprotokolle. BILD 4 gibt einen Überblick über den Kommunikationsaufbau am KIT. Die Datenübertragung erfolgt über ein vir-

tuelles LAN (VLAN) und UDP/IP. Für RT-fähige Co-Simulationsszenarien wird das Distributed Co-Simulation Protocol (DCP) eingesetzt. Die Protokolle werden über C-Code und Stateflow in Simulink implementiert. An den Prüfständen werden Zustandsautomaten gemäß der Protokollspezifikation [5] (Slave, EM-Prüfstand) oder einer zusätzlichen Veröffentlichung zur Master-Implementierung (VKM-Prüfstand) [4] eingebunden.

Aufbauend auf dem DCP-Standard können mehrere vorteilhafte Eigenschaften umgesetzt werden, wie:

- automatisierte Konditionierung aller Prüfstände für den definierten Testfall
- automatisierte Anpassung der Betriebsgrenzen zur Gewährleistung der Sicherheit des gekoppelten Tests
- Fehlermanagement
- automatisierte Schätzung der Übertragungsverzögerung zur Ableitung der maximal möglichen Systemdynamik
- automatisierte Überwachung der Kommunikationssynchronisation und Abgleich im Fall einer Desynchronisation (Prüfstandssicherheit).

TESTFÄLLE UND ERGEBNISSE

Prüfszenarien zur Fahrzeugzulassung wie WLTP oder RDE-Fahrten eignen sich nicht zur Untersuchung von Grenztemperaturbereichen in Antriebssträngen. Aus diesem Grund wurden für thermische Untersuchungen verschiedene Bergpassfahrten bei erhöhter Starttemperatur durchgeführt. Durch die hohen Lastanforderungen aufgrund der Streckenprofilsteigung bei geringen Geschwindigkeiten, steigen Temperaturen stärker an. Aufgrund der erhöhten Viskosität von Öl gegenüber anderen Medien sowie der allgemeinen Trägheit von Temperaturen ist die Regelung dieser Temperaturen jedoch eine große Herausforderung. Wie in BILD 5 oben zu sehen, folgt die Temperatur $T_{\text{Öl, Ein, Ist}}$ des Öls am EM-Eingang nicht exakt der Vorgabegröße $T_{\text{Öl, Ein, Soll}}$. Dies hängt vor allem mit den technischen Grenzen des Konditionierungssystems zusammen, da diese in der Regel für den stationären und nicht für den dynamischen Betrieb ausgelegt sind und somit eine dynamische Temperaturregelung erschweren [3]. Die geringere maximale EM-Temperatur $T_{\text{EM, max, Ist}}$ im Vergleich zur EM-Öl-Eingangstemperatur $T_{\text{Öl, Ein, Ist}}$ resultiert aus dem Zusammenspiel von EM- und Getriebeölkühlung. Die daraus ersichtliche, schnellere Aufheizung des Getriebes hat aus diesem Grund einen schnelleren Temperaturanstieg der EM zur Folge. Beispielhaft für thermische Tests zeigt BILD 5 unten einen Fall von thermischem Derating der EM, bei dem eine Reduktion des maximalen Drehmoments aufgrund zu hoher EM-Temperaturen erfolgt. Hierbei startet das virtuelle Versuchsfahrzeug bei einer Umgebungstemperatur von circa 35 °C. Aufgrund der Lastanforderungen steigt

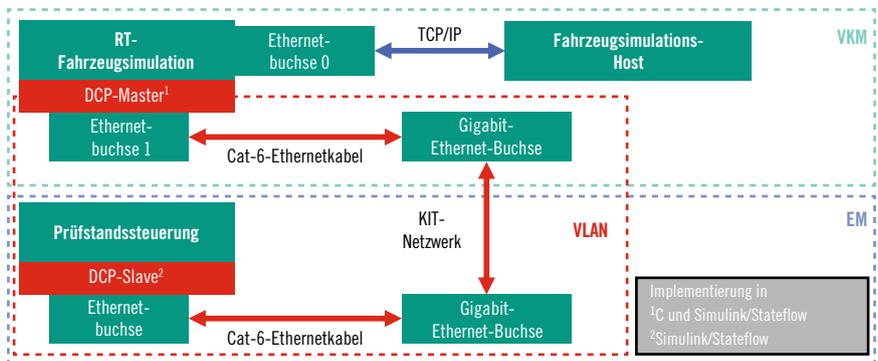


BILD 4 Kommunikationsaufbau der am KIT vernetzten Prüfstände (© KIT)

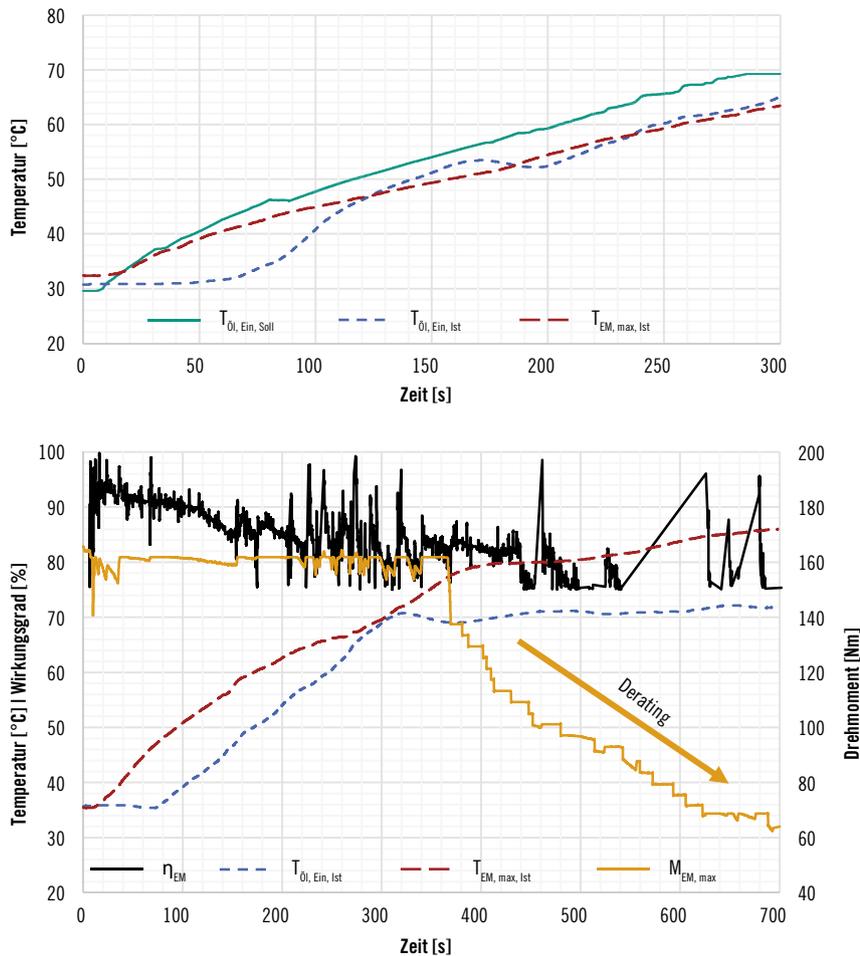


BILD 5 Exemplarische Verläufe für EM-Temperaturregelung (oben) und thermisches Derating der EM (unten) (© KIT)

die EM-Temperatur $T_{EM, max, Ist}$ stetig an, bis bei circa 360 s das thermische Derating einsetzt und das maximal zur Verfügung stehende Drehmoment der EM $M_{EM, max}$ reduziert wird. Dadurch wird eine Regulierung des Temperaturanstiegs des EM-Öls $T_{Öl, Ein, Ist}$ erreicht. Dies hat neben der Drehmomentreduzierung auch zur Folge, dass der Wirkungsgrad der EM η_{EM} sinkt, da dieser Schwachlastbereich für die EM hinsichtlich der Verluste unvorteilhaft ist.

ZUSAMMENFASSUNG

Das vorgestellte Projekt zeigt die virtuelle Kopplung zweier realer Antriebsmaschinen (VKM, EM), die auf jeweils einem Prüfstand installiert sind und im Hinblick auf ihr thermisches Verhalten untersucht werden. Mithilfe einer Fahrzeugsimulationsumgebung und detaillierter Simulationsmodelle wurden zusätzlich benötigte Komponenten oder

Steuergeräte simulativ abgebildet sowie der Austausch relevanter Parameter zwischen den Prüfständen und der Simulation gewährleistet. Die dafür notwendige Kommunikation wurde über UDP/IP mit dem DCP-Standard umgesetzt. Die Ergebnisse der thermischen Versuche belegen ein gutes Zusammenspiel aus realen und virtuellen Komponenten. Die so gekoppelten Prüfstände bieten insbesondere die Möglichkeit, neueste Regelstrategien unter Berücksichtigung thermischer Prozesse realistisch zu testen.

LITERATURHINWEISE

[1] Advisory Group on Vehicle Emission Standards: Additional technical issues for Euro 7 LDV. Online: https://circabc.europa.eu/webdav/CircaBC/GROW/AGVES/Library/10%20Meeting%202027%20April%202021/AGVES-2021-04-27-LDV_v7_final.pdf, aufgerufen: 28. Mai 2021

[2] Andert, J.; Huth, T.; Savelsberg, R.; Politsch, D.: Testen von Antriebssträngen mit der virtuellen Welle. In: ATZextra Prüfstände und Simulation für Antriebe 20 (2015), S. 30-35

[3] Beidl, C.; Hipp, J.; Hohenberg, G.; Geneder, S.: RDE-thermal management – From road to rig, Bd. 119. In: Bargende, M. et al. (Hrsg.): 19. Internationales Stuttgarter Symposium (Proceedings). Wiesbaden, 2019, S. 855–875

[4] Krammer, M.; Benedikt, M.: Master for Simulation Control using the Distributed Co-Simulation Protocol. In: Proceedings IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Porto, 2018, S. 329–334

[5] Modelica Association Project DCP: DCP Specification Document. Version 1.0. Linköping, Schweden, 2019. Online: https://dcp-standard.org/assets/specification/DCP_Specification_v1.0.pdf, aufgerufen: 28.05.2021

[6] Nickel, D.; Stelter, E.; Mittmann, W.; Heiduczek, T.: Vernetzte Test- und Simulationsumgebungen. In: MTZextra 23 (2018), S. 18–23

DANKE

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des von der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV) geförderten Projekts 1363 Methodik Hybriderprobung erarbeitet. Die Autoren bedanken sich ausdrücklich bei der FVV sowie bei Projekt-Obmann Dr.-Ing. Marcus Gohl (APL). Dank für die Unterstützung gilt außerdem Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer (ETI), Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauerin, Dr.-Ing. Martin Gießler (jeweils FAST), Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch und Dr.-Ing. Olaf Toedtler (jeweils IFKM).



DIESER BEITRAG IST IM E-MAGAZIN VERFÜGBAR UNTER:

www.emag.springerprofessional.de/atz