

AUTOREN



Dipl.-Ing. Wolfgang Gross

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität in Stuttgart.



Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende

ist Ordinarius für Fahrzeugantriebe am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität in Stuttgart.



Dipl.-Wirt.-Ing. Ahmad Rabanizada

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Antriebs- und Fahrzeugtechnik der Universität in Kassel.



Prof. Dr.-Ing. Adrian Rienäcker

ist geschäftsführender Direktor des Instituts für Antriebs- und Fahrzeugtechnik sowie Fachgebietsleiter des Lehrstuhls Maschinenelemente und Tribologie der Universität Kassel.

Körperschallfortpflanzung im Kurbeltrieb

Um bestehende Simulationstechniken in ihrer Aussagefähigkeit hinsichtlich des Geräuschverhaltens von Verbrennungsmotoren weiterzuentwickeln, bietet die Entstehung und die Weiterleitung von Körperschall innerhalb des Kurbeltriebs ein enormes Potenzial. Durch speziell entwickelte Messtechniken generiert das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart bisher nicht verfügbare Messgrößen am Vollmotor, die für eine verbesserte Abbildung von dynamischen Prozessen innerhalb hydrodynamischer Lagerungen eines thermoelastohydrodynamischen Simulationsmodells am Institut für Antriebs- und Fahrzeugtechnik der Universität Kassel genutzt werden.



© Universität Stuttgart

| | |
|---|--|
| 1 | MOTIVATION |
| 2 | MODALANALYSE |
| 3 | ERFASSUNG DER SCHWINGUNGEN AM BEFEUERTEN VOLLMOTOR |
| 4 | SIMULATIONSMODELL |
| 5 | KORRELATION ZWISCHEN SIMULATION UND MESSUNG |
| 6 | ZUSAMMENFASSUNG |

1 MOTIVATION

Trotz der steigenden Popularität von batterieelektrischen Fahrzeugen ist anzunehmen, dass der Verbrennungsmotor bei Pkw innerhalb der nächsten Jahrzehnte den größten Anteil der Antriebseinheiten ausmachen wird. Zur Verbesserung des Geräusch-, Vibrations- und Rauigkeits(Noise, Vibration and Harshness, NVH)-Verhaltens müssen Simulationsmodelle alle beteiligten Mechanismen innerhalb eines Motors abbilden. Im Speziellen stellt hierbei der Anteil des indirekten Verbrennungsgeräuschs, das über den inneren Körperschallleitweg einen wesentlichen Beitrag zum Gesamtgeräusch leistet, das größte Verbesserungspotenzial dar [1, 2].

Hohe Umsatzraten während der Verbrennung fungieren als Breitbandanregung und erzeugen Eigenschwingungen innerhalb der gekoppelten Kurbeltriebskomponenten Kolben, Pleuel und Kurbelwelle, die über die Hauptlager an Kurbelgehäuse und Ölwanne übertragen werden, um von dort als Luftschall abgestrahlt zu werden. In **BILD 1** ist der gemessene Luftschallpegel in 1 m Entfernung eines 1,5-l-Vierzylinder-Dieselmotors mit Direkteinspritzung (DI) auf dessen kalter Seite dargestellt. Ein erneuter Anstieg der Pegel zwischen 3,0 und 4,5 kHz ist charakteristisch für die Anteile des inneren Körperschallleitwegs. Aus vorherigen Untersuchungen ist bekannt, dass eine longitudinale Pleuelschwingung für dieses Verhalten verantwortlich ist [3, 4]. Eine Identifikation dieser Pleuel-

| MAC-Korrelation von EMA zu FEA | | |
|--------------------------------|-----------|---------|
| Mode-Nummer | fFEA [Hz] | MAC [-] |
| 1 | 192 | 0,96 |
| 2 | 246 | 0,99 |
| 3 | 364 | 0,85 |
| 4 | 736 | 0,9 |
| 5 | 1486 | 0,89 |
| 6 | 1854 | 0,97 |
| 7 | 2730 | 0,87 |
| 8 | 3387 | 0,88 |
| 9 | 4241 | 0,81 |
| 10 | 4538 | 0,98 |

TABELLE 1
Vergleich zwischen
EMA und FEA in der
Baugruppen Konfiguration
(© Universität Stuttgart)

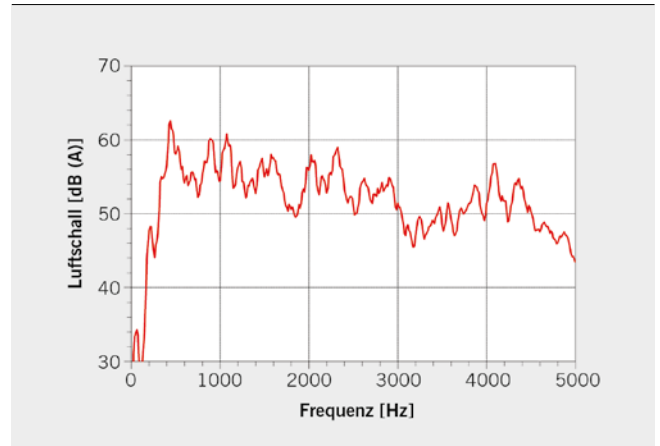


BILD 1 Luftschallspektrum in 1 m Abstand auf kalter Motorseite
(© Universität Stuttgart)

schwingungen in Verbindung mit einer verbesserten Beschreibung der dynamischen Vorgänge in den hydrodynamischen Koppelstellen ermöglicht die Optimierung aktueller Simulationsmethoden und damit die Entwicklung neuer Lösungsansätze bezüglich des NVH-Verhaltens von Mehrkörpersimulationen (MKS).

2 MODALANALYSE

Zu Beginn der Untersuchungen wird eine Modalanalyse aller Kurbeltriebskomponenten und einer Baugruppe aus Pleuel, Pleuelbolzen, Pleuel, Pleuelbolzen und Pleuelbolzen des dritten Zylinders in der Oberen-Tot(OT)-Position mittels experimenteller Modalanalyse (EMA) und Finite-Elemente-Analyse (FEA) durchgeführt. Durch die Implementierung der experimentell ermittelten Dämpfungswerte kann das Systemverhalten vollständig in der Simulation dargestellt werden. Mithilfe des Modal-Assurance-Criteria(MAC)-Werts wird die Korrelation zwischen EMA und FEA bewertet. In **TABELLE 1** sind alle globalen Moden mit Frequenzen und MAC-Werten aufgeführt. Den signifikanten Mode gemäß [2–4] repräsentiert Mode Nummer 10 mit einer Resonanzfrequenz von 4538 Hz und einem MAC-Wert von nahezu 1, **BILD 2**. Die Eigenschwingform zeigt eine Längsschwingung des Pleuels.

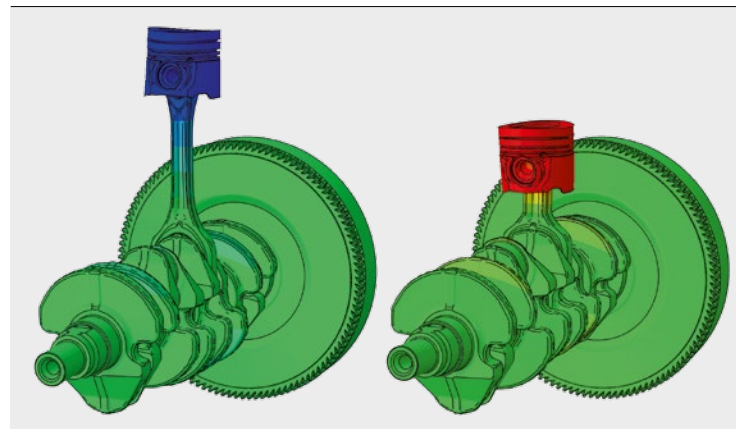


BILD 2 Längsschwingung des Pleuels aus der FEA (© Universität Kassel)

3 ERFASSUNG DER SCHWINGUNGEN AM BEFEUERTEN VOLLMOTOR

Zur Erfassung der Schwingungen am Pleuelschaft werden aufgrund der guten Signalbandbreite in Verbindung mit minimalem Sensorgewicht Halbleiter-Dehnungsmesstreifen (HL-DMS) verwendet. Vier solcher HL-DMS sind in longitudinaler Richtung am Pleuelschaft appliziert. Sie erlauben einen Vergleich der Pleuellängsschwingung mit der Beschleunigung am Hauptlager in Hubrichtung. Durch eine speziell entwickelte Temperaturdriftkompensation, die vorhandene Drifts der HL-DMS innerhalb der Gaswechselschleife beseitigt, ist eine Frequenzanalyse des Hochdruckteils ohne Einschränkung möglich. Die Signalübertragung ist über eine am großen Pleuelauge und am Kurbelgehäuse angebrachte Kabelschwinde realisiert. Eine Zylinderdruckindizierung vervollständigt die messtechnische Abbildung des inneren Körperschallleitwegs. Durch eine Einspritzzeitpunktvariation bei konstanten Betriebsbedingungen sowie einer mechanischen Schwächung des Pleuelschafts ist eine Validierung des Simulationsmodells hinsichtlich Anregungsstärke und Pleuelsteifigkeit erreicht worden. Eine Simulation des Vollmotors mit und ohne Kabelschwinde ergibt eine beschränkte Beeinflussung der Dehnungssignale auf Frequenzen unterhalb von 1600 Hz.

In **BILD 3** ist eine Wavelet-Analyse der beschriebenen Konfigurationen dargestellt. Da Wavelets nicht der Zeit-Frequenz-Unschärfe unterliegen, ist eine sehr hohe zeitliche Auslösung der

Signale möglich. Die oberste Reihe enthält den Zylinderdruckverlauf sowie dessen Ableitung nach der Zeit. Die nachfolgenden drei Reihen sind Morlet-Wavelet-Analysen des Zylinderdrucks, der Dehnung am Pleuelschaft sowie der Hauptlagerbeschleunigung in Hubrichtung. Die ersten beiden Spalten entsprechen dem Serienpleuel mit minimalem (1,7 bar/°KW, Grundkalibrierung) und maximalem Druckgradient (7 bar/°KW). Die rechte Spalte zeigt den maximalen Druckgradienten mit der mechanisch geschwächten Pleuelstange. Es ist ersichtlich, dass die Vibrationen am Pleuel und am Hauptlager zwar zeitlich direkt von der Verbrennung abhängen, jedoch eine unterschiedliche Frequenzcharakteristik im Vergleich zum Zylinderdruckspektrum aufweisen. Ausgehend vom minimalen Druckgradient (linke Spalte) ist ersichtlich, dass die Pegel bei maximalen Druckgradient (mittlere Spalte) in der Serienkonfiguration ebenfalls rapide ansteigen, während eine verringerte Steifigkeit (rechte Spalte im Vergleich zur mittleren Spalte) eine Verschiebung der Pleuellängsschwingungen hin zu niedrigeren Frequenzen hervorruft. Speziell die erhöhten Pegel um 4,5 kHz werden dadurch am Pleuel wie auch am Hauptlager deutlich beeinflusst.

4 SIMULATIONSMODELL

Um das Verhalten von elastischen und hydrodynamisch gelagerten Bauteilen des Vollmotors zu untersuchen, erfolgt hierfür der Auf-

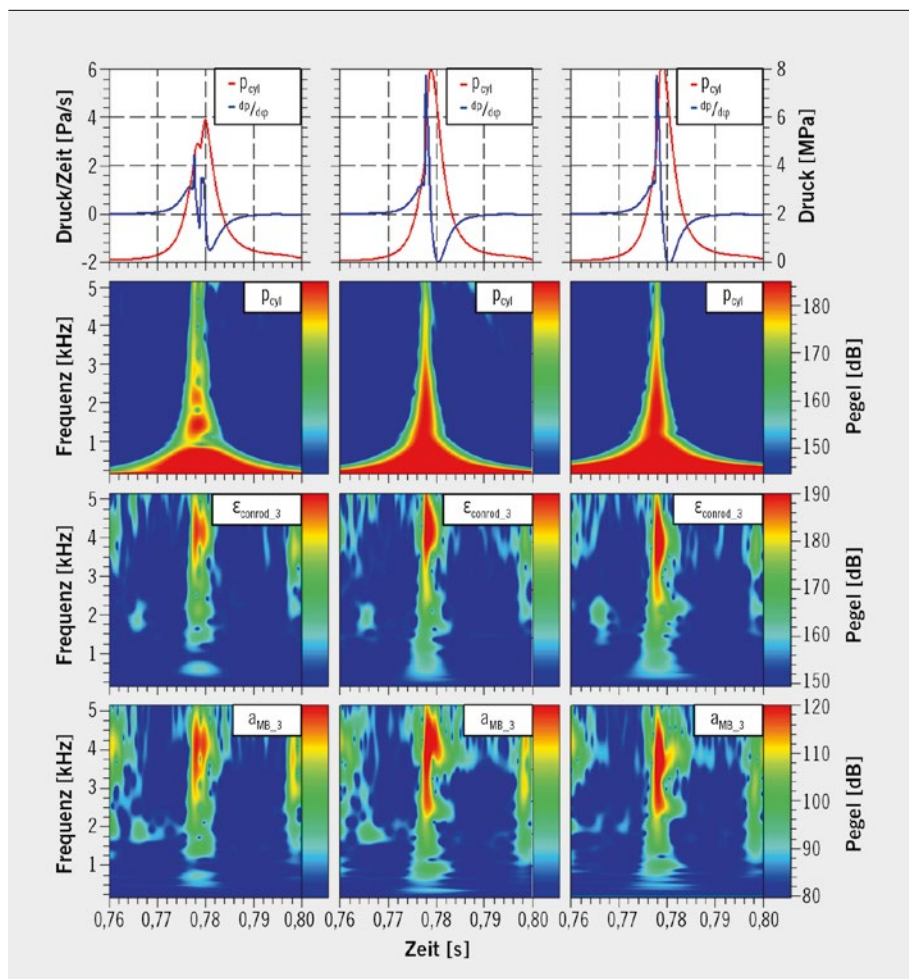


BILD 3 Wavelet-Analyse von Zylinderdruck (p_{cyl}), Pleueldehnung (zweifach nach der Zeit abgeleitet, $\epsilon_{control,3}$) und Hauptlagerbeschleunigung in Hubrichtung ($a_{MB,3}$) bei 1500/min und 7,2 bar mittlerer Effektivdruck (links: Serienpleuel und Druckgradient; Mitte: Serienpleuel mit maximalen Druckgradienten; rechts: geschwächtes Pleuel mit maximalen Druckgradienten) © Universität Stuttgart

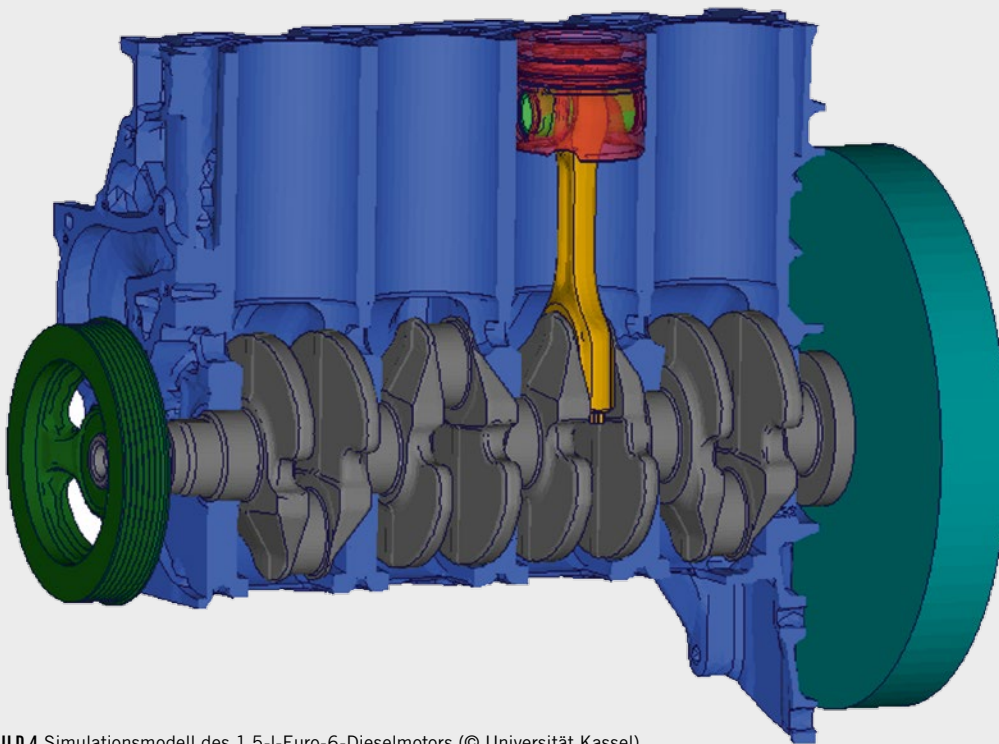


BILD 4 Simulationsmodell des 1,5-l-Euro-6-Dieselmotors (© Universität Kassel)

bau eines elastohydrodynamischen Mehrkörper-Simulationsmodells (EHS/MKS-Modells). Basierend auf der Integration der Newtonschen Bewegungsgleichung im Zeitbereich wird die Dynamik der Bauteile mittels der Finite-Elemente-Methode berechnet. Darüber hinaus ist es möglich, auch nichtlineare Effekte zu analysieren, die in hydrodynamischen Kontakten auftreten. Um akzeptable Berechnungszeiten zu generieren, ist eine Reduktion der Freiheitsgrade sämtlicher elastischer Kurbeltriebkomponenten erforderlich. Die Reduktion wird mittels der Craig-Bampton-Methode realisiert, womit alle relevanten Verformungseigenschaften der Strukturen erhalten bleiben. Im Simulationsmodell, **BILD 4**, sind das Kurbelgehäuse, die Kurbelwelle sowie alle Kurbeltriebkomponenten des dritten Zylinders als elastische Strukturen modelliert.

Um die Rechenzeit zu minimieren, werden Kolben, Kolbenbolzen und Pleuel der anderen Zylinder mit einem analytischen Kurbeltrieb (nicht angezeigt) abgebildet.

Um eine genauere Auslegung instationärer tribologischer Systeme zu ermöglichen, wird die neue thermoelastohydrodynamische (TEHD)-Funktionalität verwendet [5]. Hierbei werden die thermischen Effekte eines tribologischen Kontakts in das Simulationsmodell integriert. Angesichts der temperaturbedingten Änderung der Ölviskosität und der Spaltweite, die in starker Wechselwirkung mit dem hydrodynamischen Druck, der Reibleistung und der Fluidgeschwindigkeiten stehen und somit den tribologischen Zustand eines Systems beeinflussen, erfolgt die Erweiterung des EHD-Simulationsmodells auf ein TEHD-Modell. Hierbei wird

BRANCHEN- VERBUNDEN

Jetzt registrieren:

www.springerprofessional.de/mynewsletters



Der neue Newsletter
„Kleb- und Dichttechnik“
von **adhäsion**

Alle Top-News und Branchen-Highlights aus der Welt der Kleb- und Dichttechnik, regelmäßig in Ihrem Postfach: Bestellen Sie jetzt unseren kostenlosen Newsletter.

adhäsion KLEBEN+
DICHTEN

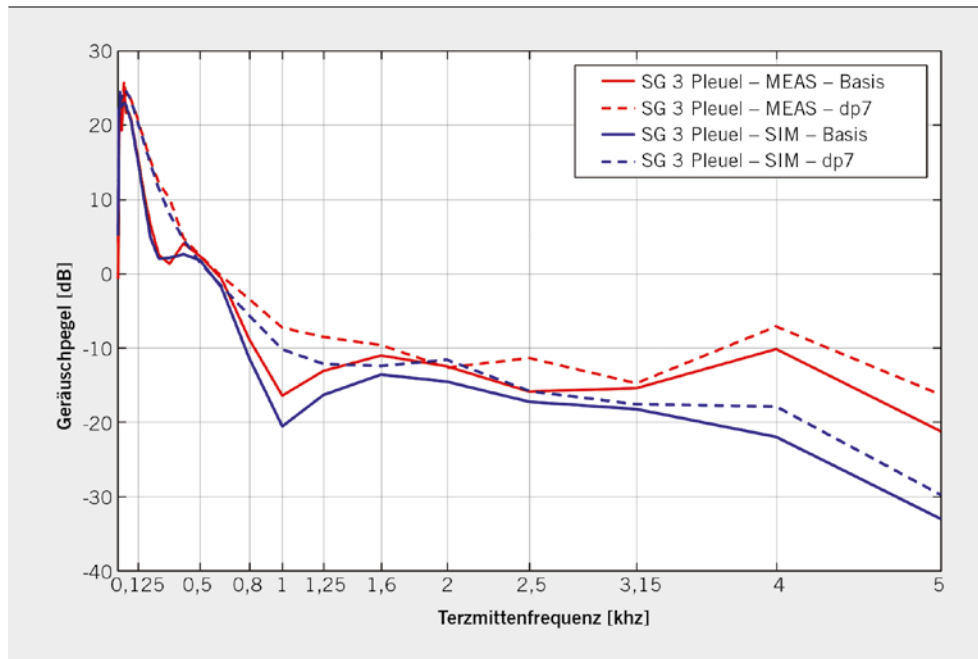


BILD 5 Vergleich von Messung und Simulation für zwei unterschiedliche Verbrennungsanregungen und dem Serienpleuel (© Universität Stuttgart)

die Temperaturverteilung im Schmierfilm innerhalb der Reynolds-Gleichung, die um die sogenannten Dowson-Integrale ergänzt wird, ebenso mitberücksichtigt wie die thermische Verformung der elastischen FE-Strukturen.

5 KORRELATION ZWISCHEN SIMULATION UND MESSUNG

Um eine exakte Vergleichsmöglichkeit mit den Messsignalen zu gewährleisten, werden die vier HL-DMS in der Simulation abgebildet und eine Dehnung berechnet. **BILD 5** zeigt die Terzspektren des dritten HL-DMS für den Serienpleuel in Rot und die Simulationsergebnisse in Blau für Serienpleuel und Grundkalibrierung (durchgezogen) und den maximalen Druckgradienten (gestrichelt). Leichte Abweichungen unterhalb von 1,6 kHz sind auf die nicht abgebildete Kabelschwinge in der Simulation zurückzuführen, die bei höheren Frequenzen vernachlässigt werden können. Die Simulationsergebnisse zeigen einen vergleichbaren Verlauf zu den Messungen bis 3,15 kHz. Über 4 kHz beginnen die Abweichung größer zu werden, bei anhaltenden qualitativen Verläufen.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass durch die Verbrennung angeregte Eigenschwingungen im Kurbeltrieb, im Speziellen im Pleuel, einen erheblichen Anteil am indirekten Verbrenungsgeräusch und damit am gesamten Motorgeräusch leisten. Für die numerische Berechnung wurde ein komplexes MKS-Modell erstellt und durch den modalen Abgleich mit den Messdaten aus der EMA validiert. Die Verwendung von HL-DMS am Pleuelschaft hat den erhofften Zugewinn an Signalbandbreite gebracht und ermöglicht eine optimale Erfassung der sich ausbildenden Eigenschwingungen im befeuerten Motorbetrieb und damit eine geeignete Validierungsgröße für die transiente Simulation. Die TEHD-Methodik hat gezeigt, dass die Berücksichtigung aller thermischen

Effekte und ihrer Wechselwirkungen, die im Mischreibungsbereich von tribologischen Kontakten auftreten, zu einer besseren Abbildgenauigkeit des Systems führen.

LITERATURHINWEISE

- [1] Finger, K.: Untersuchungen zur Kraftanregung durch die Verbrennung beim direktspritzenden Common-Rail-Dieselmotor unter Berücksichtigung des Körperschallverhaltens. Darmstadt, Technische Universität, Dissertation, 2001
- [2] Felbinger, F.: Körperschallanalyse von gekoppelten Kurbeltriebskomponenten aus Basis modernen EHD/MKS-Simulationstechniken. Kassel, Universität, Dissertation, 2014
- [3] Hrdina, D.: Untersuchungen des Schwingungs- und Geräuschverhaltens des Kurbeltriebs eines Verbrennungsmotors. Stuttgart, Universität, Dissertation, 2016
- [4] Kanda, Y.; Mori, T.: Diesel Combustion Noise Reduction by Controlling Piston Vibration. In: SAE International Journal of Engines (2015)
- [5] Jaitner, D.: Effiziente Finite Elemente Lösung der Energiegleichung zur thermischen Berechnung tribologischer Kontakte. Kassel, Universität, Dissertation, 2017

DANKE

Das Forschungsvorhaben Laufzeugdynamik II (FVV-Nr. 1174) wurde am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende und am Institut für Antriebs- und Fahrzeugtechnik der Universität Kassel unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Adrian Rienäcker durchgeführt. Es wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die AiF Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen Otto von Guericke e. V. (IGF-Fördernr. 17983 N/1) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestags finanziell gefördert und von einem FVV-Arbeitskreis unter der Leitung von Dr. H. Stoffels (Ford-Werke GmbH, Köln-Merkenich) begleitet. Die Autoren bedanken sich bei den Fördergebern, der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e. V. und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: www.mtz-worldwide.com