

AUTOREN



**Dipl.-Ing. Ömer Özdemir**  
ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Antriebs- und Fahrzeugtechnik, Lehrstuhl für Maschinenelemente und Tribologie (iaf-mt) der Universität Kassel.



**Kevin Huttinger, M. Sc.**  
ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Lehrstuhl für Fahrzeugantriebe (IVK) der Universität Stuttgart.



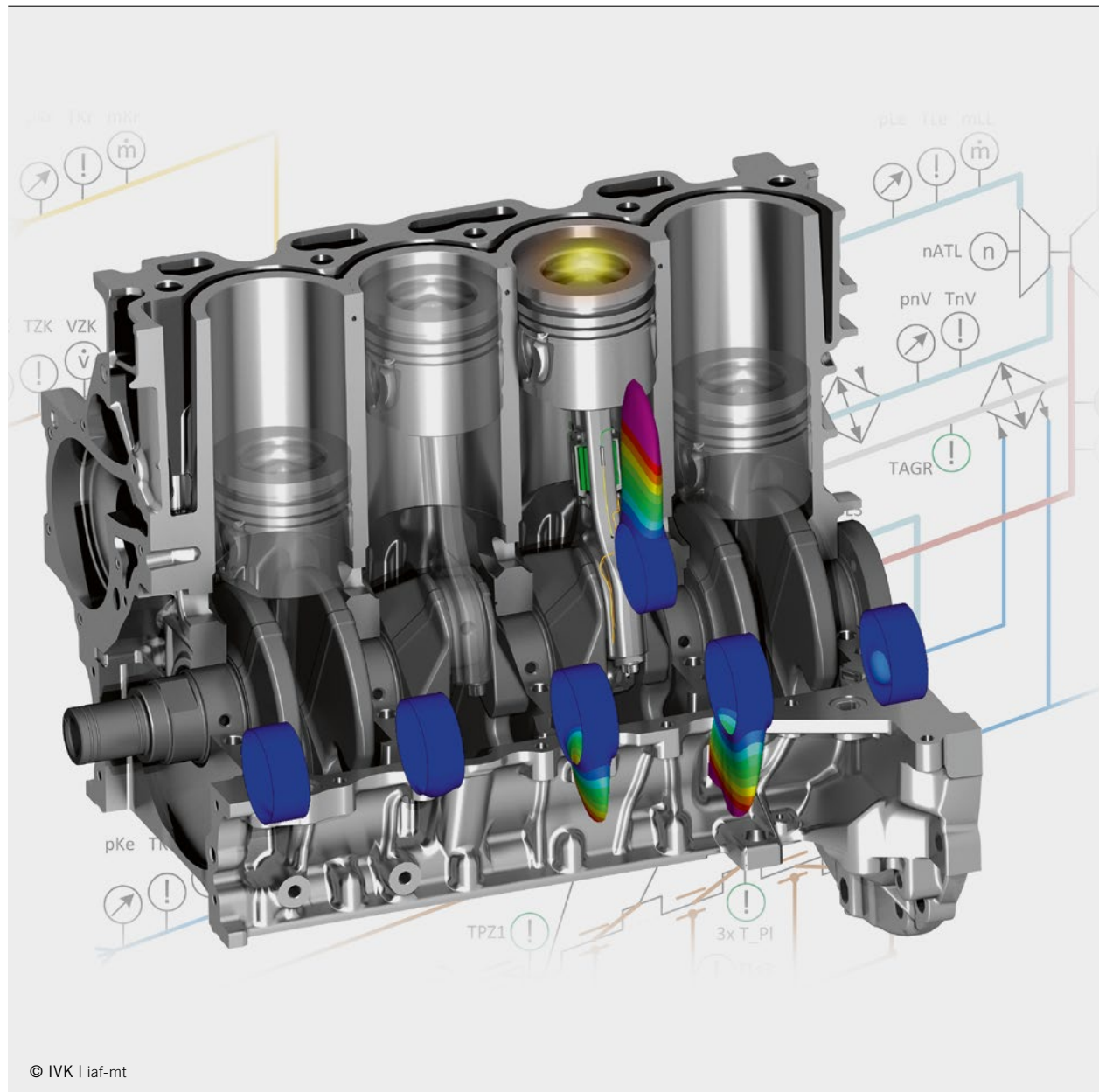
**Prof. Dr.-Ing. Adrian Rienäcker**  
ist Leiter des Instituts für Antriebs- und Fahrzeugtechnik, Lehrstuhl für Maschinenelemente und Tribologie (iaf-mt) der Universität Kassel.



**Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende**  
ist Leiter des Instituts für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Lehrstuhl für Fahrzeugantriebe (IVK) der Universität Stuttgart.

# Reibleistungsoptimierung durch lokales Öl-Thermomanagement

Das Schmersystem eines Verbrennungsmotors muss in der Entwicklungsphase auf die Betriebspunkte höchster Last und Drehzahl ausgelegt werden. Der kundenrelevante Fahrbetrieb findet jedoch häufig bei moderaten Lasten und Drehzahlen statt. Daraus lässt sich die Idee ableiten, durch Anhebung lokaler Schmieröltemperaturen in der Teillast die Reibungsverluste durch verringerte Ölviskositäten in hydrodynamisch geprägten Lagerstellen wie die der Kurbelwelle zu reduzieren. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass die Mischreibung bei Drehzahl- und/oder Lastanstiegen nicht im kritischen Maße ansteigt.



## 1 MOTIVATION

## 2 METHODIK

## 3 ERGEBNISSE SCHLEPPREIBUNGSABGLEICH

## 4 ERGEBNISSE DER SIMULATION

## 5 FAZIT

### 1 MOTIVATION

Im Rahmen der Bestrebungen, den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen von verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen zu reduzieren, gelten die Reduktion der Rohemissionen und die Erhöhung des Gesamtwirkungsgrads als fundamentale Ansätze. Konventionelle Pkw werden den Großteil ihrer Laufzeit im niederen Teillastbereich betrieben. Unter diesen Bedingungen stellen sich in den Gleitlagerstellen Öltemperaturen weit unterhalb des maximal zulässigen Temperaturniveaus ein. Ziel des FVV-Forschungsvorhabens „Reibleistungsminimierung durch lokales Öl-Thermomanagement“ war es daher, Potenziale der Reibungsreduktion durch eine Optimierung des Schmierölkreislaufs eines Verbrennungsmotors zu untersuchen. Dies bedeutet in diesem Fall die Versorgung der verschiedenen Gleitlager und der geschmierten Funktionsflächen des Rumpfmotors mit entsprechend konditioniertem Schmieröl. Beeinflussbare Randbedingungen sind hierbei neben der Viskositätsklasse die Öltemperaturen in den einzelnen Lagergruppen des Motors. Mit zunehmender Öltemperatur sinkt die Ölviskosität und damit verbunden auch die hydrodynamische Reibung. Gleichzeitig verringert sich jedoch auch die Tragfähigkeit des Schmierfilms, was zu einem starken Anstieg der Mischreibung führen kann. Daher muss die Betriebssicherheit nach spontanem Last- und Drehzahlanstieg in jedem Fall gewährleistet sein.

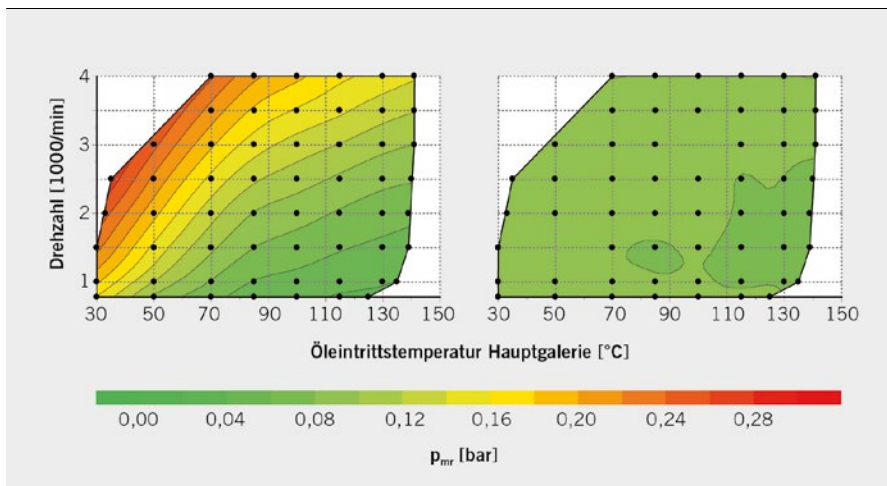
### 2 METHODIK

Als Versuchsträger und Simulationsgrundlage diente ein aktueller Reihenvierzylinder-Dieselmotor mit 1,5 l Hubraum und 80 kW Leistung. Zur direkten Bestimmung der Reibungsänderung durch Öltemperaturvariationen und zur komponentenbezogenen Validierung der erstellten Simulationsmodelle wurden experimentelle Messungen am befeuerten Vollmotor sowie Stripmessungen im Schleppbetrieb des Rumpfmotors durchgeführt. Des Weiteren wurde mit einem modifizierten Ölkreislauf zur externen Ölversorgung und -konditionierung der Einfluss der thermischen Randbedingungen auf die Reibung im befeuerten Betrieb untersucht.

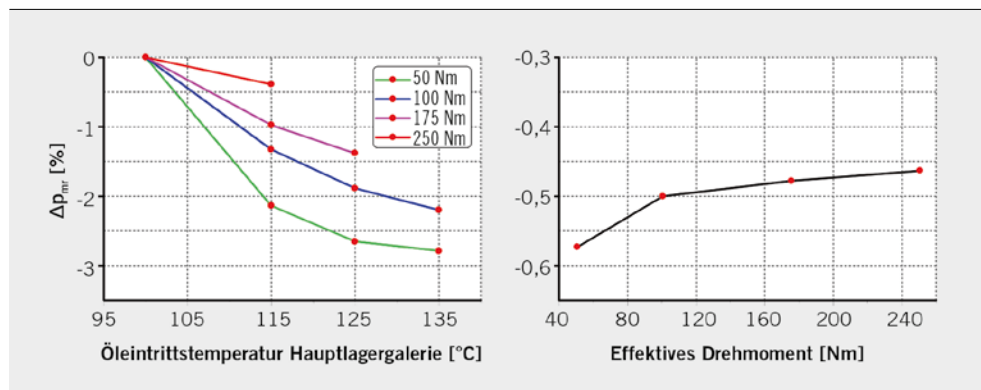
Zur simulativen Untersuchung der Reibungsverluste im Kurbeltrieb und in den geschmierten Kontakten der Nockenwelle wurden komponentenspezifische (T)EHD-MKS-Modelle aufgebaut, die eine orts- und zeitaufgelöste Berechnung der Reibungsgrößen ermöglichen [3]. Hierzu dienen neu entwickelte TEHD-Ansätze auf Basis der Energiegleichung für Fluid und Festkörper, die den Einfluss der Temperatur im Schmierfilm und in den Festkörpern berücksichtigen [1]. Ebenso kamen neue Ansätze zur Kopplung der Haupt- und Pleuellagerung in der Simulation zum Einsatz, die die Ölversorgung des Pleuellagers mit Fliehkrafteinfluss abbilden [2]. Neben den simulativen Untersuchungen des Motors stellen Versuche am Gleitlagerprüfstand die Betriebssicherheit des hochbelasteten Pleuellagers bei hohen kritischen Schmieröltemperaturen sicher. Hierzu erfassen Kontaktspannungsmessungen im Prüflager den Mischreibungsanteil qualitativ und quantitativ [4]. Zusätzlich sorgten detaillierte Vergleiche mit Simulationsergebnissen für ein besseres Verständnis von kritischen Zuständen des Lagers. Auf Basis der Simulationsergebnisse wurden komponentenspezifische Reibungskennfelder zur Implementierung in einer simulativen Fahrprofilauswertung aufgebaut, um den Einfluss einzelner Reibkontakte auf die Gesamtreibungsverluste bei verschiedenen lokalen Öltemperaturen und die möglichen Gesamtpotenziale zur Verbrauchsreduktion des Verbrennungsmotors abzuschätzen.

### 3 ERGEBNISSE SCHLEPPREIBUNGSABGLEICH

Im Rahmen der motorischen Untersuchungen wurden zunächst Schleppreibungs-messungen im Stripverfahren durchgeführt. Dabei wurden sieben Stripstufen bei acht Öltemperaturen und acht Dreh-



**BILD 1** Reibmitteldruck der Kurbelwelle (links) und des Ventiltriebs (rechts) im geschleppten Betrieb (© IVK)



**BILD 2** Relative Reibmitteldruckänderung des Vollmotors bei verschiedenen Lasten (links) und bei Änderung der Öltemperatur des Zylinderkopfs von 90 auf 110 °C (n = 2500/min) (© IVK)

zahlen vermessen. Hierbei zeigt sich in **BILD 1** die allgemein bekannte Abhängigkeit der Reibung von Öltemperatur und Drehzahl bei von Flüssigkeitsreibung dominierten Gleitlagerungen. Insbesondere die Reibung der Hauptlager lässt sich durch eine Erhöhung der Ölzufuhrtemperatur senken. Die Einsparpotenziale im Ventiltrieb des Versuchsträgers liegen hingegen weder relativ noch absolut in einer ähnlichen Größenordnung.

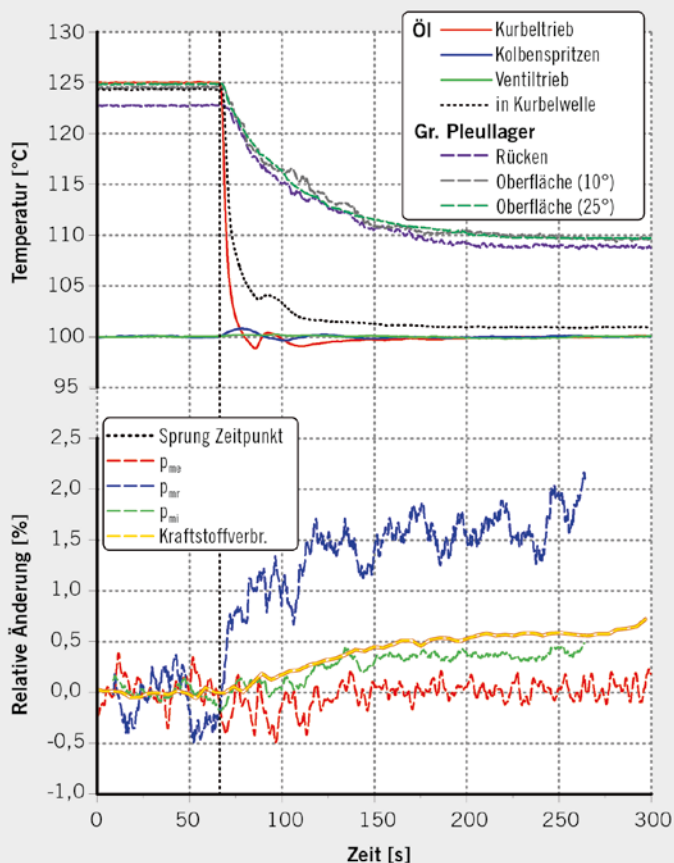
Zudem zeigt sich, dass eine Erhöhung der Öltemperatur im Zylinderkopf unter realistischen Randbedingungen nur in begrenztem Maße möglich ist. Grund hierfür ist, dass aufgrund des geringen Öldurchsatzes und des im Vergleich dazu großen Wasserstroms durch den Zylinderkopf eine starke Abkühlung des Öls stattfindet.

Im Anschluss ermöglichte ein modifizierter Ölkreislauf des Versuchsträgers drei separate Ölzuführungen für Haupt- und Pleuellager, Zylinderkopf sowie Kolbenspritzen und Turbolader. Zudem versorgte eine entsprechende externe Ölversorgungseinheit jeden Kreislauf individuell mit Öl verschiedener Drücke sowie Temperaturen und ermöglichte außerdem schnelle Änderungen dieser Größen für jeden Kreislauf. Um Laufzeiten des Ölstroms und Auswirkungen von Öltemperaturänderungen zu ermitteln, wurden Temperaturmessstellen in der Ölleitung zwischen Haupt- und Pleuellager der Kurbelwelle und unter der Oberfläche einer Pleuellagerschale appliziert. Anschließende Messungen bei stationären Betriebspunkten bestätigen die qualitative Schlussfolgerung der Stripmessungen.

Die absoluten Änderungen liegen bei den in **BILD 2** dargestellten Ergebnissen im Bereich zwischen 0,01 und 0,03 bar Reibmitteldruck ( $p_{mr}$ ) (links) sowie bei maximal 0,01 bar (rechts). Es zeigt sich sowohl im Zylinderkopf als auch bei den Haupt- und Pleuellagern, dass die relative Änderung des  $p_{mr}$  mit steigender Last sinkt, im Absolutvergleich jedoch steigt.

Der Betrieb der Gleitlager eines Verbrennungsmotors mit Öltemperaturen, die in der Teillast zu einer Reduktion der Reibleistung beitragen, in der Volllast jedoch zu einer Schädigung des Lagers führen können, erfordert es, die Öltemperatur entsprechend nachführen zu können. Laufzeiten des Ölstroms im Motor sowie die thermische Trägheit des Motorblocks begrenzen jedoch die Reaktionszeiten. Daher wurde die Reaktion des Gesamtsystems der Haupt- und Pleuellager auf definierte Temperatursprünge am Öleintritt in den Motor bei verschiedenen Drehzahlen und Lasten untersucht.

Eine signifikante Reduktion der Pleuellagertemperatur ( $\Delta T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) tritt bei der in **BILD 3** dargestellten Messung nach etwa 49 s ein. Parallel zur sinkenden Öl- und Lagertemperatur lässt sich der Anstieg des  $p_{mr}$  um 1,6 % und des Kraftstoffverbrauchs um 0,6 % erkennen. Die am Vollmotor erreichbaren Abkühlgradienten wurden bei Verschleiß- und Versagensuntersuchungen am Gleitlagerprüfstand reproduziert und sind als ausreichend hinsichtlich der Vermeidung von Lagerschäden und übermäßigem Verschleiß bei wiederholt auftretenden Lastsprüngen zu bewerten.



**BILD 3** Temperaturverläufe innerhalb des Ölkreislaufs der Hauptlager bei Temperatursprung ( $\Delta T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) und Verlauf der Reibungs- und Verbrauchskennwerte während des Sprungs ( $M_d = 54\text{ Nm}$ ,  $n = 2500/\text{min}$ ) (© IVK)



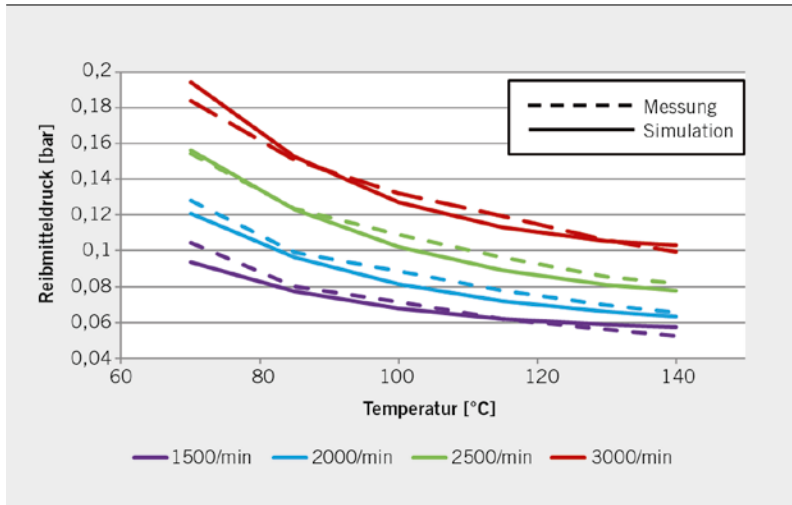


BILD 4 Schleppreibung der Kurbelwellenhauptlager (© iaf-mt)

#### 4 ERGEBNISSE DER SIMULATION

BILD 4 stellt den Vergleich des  $p_{mr}$  der Kurbelwellenhauptlager für verschiedene Drehzahlen in Abhängigkeit der Temperatur zwischen Messung und Simulation dar. Hierbei stimmen die Simulationsergebnisse sehr gut mit den Messergebnissen überein. Diese

Resultate verdeutlichen das Potenzial, die Reibung durch eine Verdoppelung der Schmieröltemperaturen in den Hauptlagern um den Faktor 2 zu senken.

Über die geschleppten Untersuchungen hinaus zeigen auch befeuerte Messungen beziehungsweise Simulationsrechnungen ähnliche Potenziale. Neben den Kurbelwellenhauptlagern wurden



© creative republic 2016 / Foto: © shutterstock



#### DIE MEDIEN DER ATZ/MTZ GROUP: ERFOLGREICHE KOMMUNIKATION FÜR DIE AUTOMOBILINDUSTRIE

Seit 118 Jahren steht die ATZ/MTZ Group für führende Kompetenz im Bereich Automobiltechnik. Aktuelle Informationen, fundierte Hintergrundberichte und professionelle Analysen gelten in der Branche als richtungweisend. In allen Titeln der ATZ Familie bereiten wir Ihren Content zielgruppen- und medienkanalgerecht auf. Unsere Fachzeitschriften und Sonderhefte erreichen gemeinsam mit unseren Newslettern, E-Magazinen und unserer Datenbank hunderttausende Leser. Unsere Websites Millionen Pis. Platzieren Sie Ihre Botschaft in einem exklusiven, redaktionellen Umfeld. Mehr unter: [www.best-ad-media.de/atz](http://www.best-ad-media.de/atz)

**ATZ**

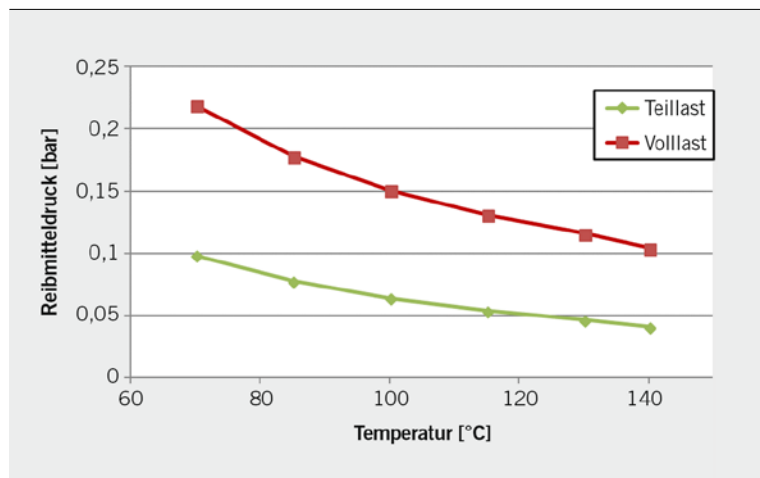


BILD 5 Reibmitteldruck der Pleuellager bei n = 1500/min (© iaf-mt)

auch die Pleuellager und die Nockenwellenlager untersucht. Auch diese Lagerstellen zeigen Reibungsvorteile bei höheren Schmierfilmtemperaturen. BILD 5 zeigt den  $p_{mr}$  der Pleuellager bei einer Drehzahl von 1500/min.

Auf Basis der Schleppreibungs- und Verbrauchskennfelder, den gemessenen Schluckkurven des Zylinderkopfs, der Haupt- und Pleuellager sowie den simulierten Reibkennfeldern des iaf-mt wurde abschließend am IVK eine Fahrprofilsimulation für einen aktuellen Mittelklasse-Pkw aufgebaut. Neben einem NEFZ- und einem WLTC-Fahrprofil wurde ebenfalls eine RDE-Fahrt simuliert und die durch ein lokales Öl-Thermomanagement der einzelnen Lagergruppen erreichbaren Verbrauchs- respektive CO<sub>2</sub>-Reduktionen ermittelt. Wegen des Wirkungsbereichs der untersuchten Maßnahmen wurden die Zyklen bei konstanten Öltemperaturen und betriebswarmem Motor untersucht.

In BILD 6 sind die Ergebnisse der Simulation über der Öltemperatur am Ölfilter des Motors aufgetragen. Bereits eine Anhebung der Ölzufuhrtemperatur der Hauptlager um 30 °C ergibt eine Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes um etwa 0,94 g/km bei einem dem WLTC entsprechenden Fahrprofil.

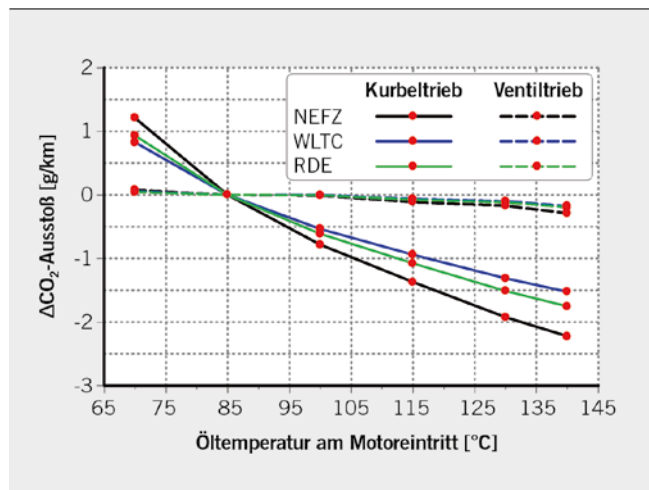


BILD 6 Änderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes für verschiedene Fahrzyklen bei Variation der Öltemperatur (ausgehend von 85 °C) (© IVK)

## 5 FAZIT

Das FVV-Projekt „Reibleistungsoptimierung durch lokales Öl-Thermomanagement“ zeigt, dass im Bereich der Teillast eine lokale Anhebung der Öltemperaturen in Haupt- und Pleuellagern merkliche Reibungsvorteile mit sich bringt, wohingegen die im Zylinderkopf erzielbaren Vorteile sehr gering ausfallen. Zudem erlauben detaillierte Simulationsmodelle eine simulative Abschätzung dieser Einsparpotenziale. Gleichzeitig zeigt sich, dass bei Lastsprüngen und rechtzeitiger Nachführung von Öl mit geringerer Temperatur keine Schädigung der Gleitlager zu erwarten ist.

## LITERATURHINWEISE

- [1] Jaitner, D.: Effiziente Finite-Elemente-Lösung der Energiegleichung zur thermischen Berechnung tribologischer Kontakte. Universität Kassel, Dissertation, 2017
- [2] Backhaus, K.: Low Friction Powertrain: Energetisch optimierte Ölversorgung von Tribosystemen im Verbrennungsmotor. FVV-Forschungsvorhaben Nr. 983, Abschlussbericht, 2013
- [3] Schönen, R.: Strukturdynamische Mehrkörper-Simulation des Verbrennungsmotors mit elasto-hydrodynamischer Grundlagerkopplung. Universität Kassel, Dissertation, 2001
- [4] Umbach, S.: Schmierstoffeinfluss auf Gleitlagermischreibung. Universität Kassel, Dissertation, 2009

## DANKE

Das Forschungsvorhaben „Reibleistungsoptimierung durch lokales Öl-Thermomanagement“ (Vorhaben Nr. 18419 N/1) wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. (AiF), (IGF-Nr. 18419 N) finanziell gefördert. Die Autoren bedanken sich für die Förderung und die Betreuung durch den projektbegleitenden Arbeitskreis innerhalb der FVV, der vom Obmann Dr. U. Lehmann (Federal-Mogul Wiesbaden GmbH) geleitet wurde.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

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