

VERFASST VON



**Michael Armbruster,
M. Sc.**

ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Versuch, Akustik und Modellierung des Forschungsinstituts für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS).



**Prof. Dr.-Ing.
André Casal Kulzer**

ist Leiter des Lehrstuhls für Fahrzeugantriebssysteme am Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS) der Universität Stuttgart.



Dipl.-Ing. Philip Markus

ist Systemingenieur bei der Kraus-Maffei Wegmann GmbH & Co KG in Kassel.

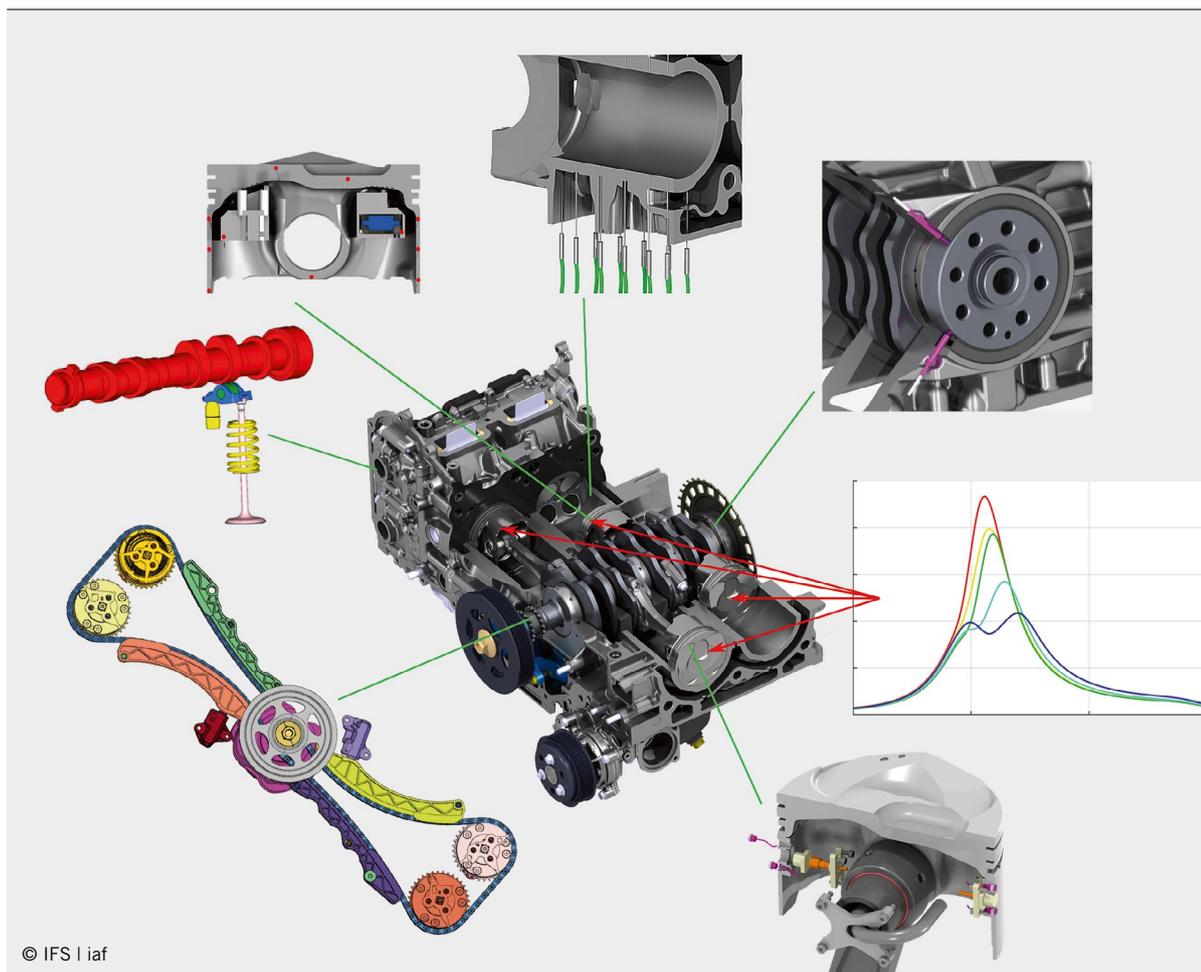


Dr.-Ing. Gerald Ochse

ist Oberingenieur am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Tribologie des Instituts für Antriebs- und Fahrzeugtechnik (iaf) der Universität Kassel.

Einfluss des Zylinderdruckverlaufs auf die Gesamtreibung in Verbrennungsmotoren – Technik und Methoden zur Messung und Simulation

Zur Reduzierung der Reibungsverluste und damit einer Erhöhung des Wirkungsgrads sind präzise Kenntnisse der Gesamtreibung eines Verbrennungsmotors wichtig. Daher haben die Universität Stuttgart und die Universität Kassel im FVV-Forschungsprojekt Nr. 1309 „Methodenentwicklung zur Messung der Lagerreibung unter dem Einfluss der Zylinder-Druckkurve“ Techniken und Methoden entwickelt und umgesetzt, mit denen der Einfluss des Druckverlaufs gemessen und in der Simulation abgebildet werden kann.



© IFS | iaf

1	UNTERSUCHUNGSSYSTEMATIK
2	EXPERIMENTELLE MESSUNGEN UND VALIDIERUNG DER SIMULATION
3	THERMISCHE VERFORMUNG
4	ÖLFÜLLUNGSGRAD
5	ERGEBNISSE
6	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

1 UNTERSUCHUNGSSYSTEMATIK

Die experimentellen Untersuchungen des Forschungsprojekts [1] erfolgten am Lehrstuhl für Fahrzeugantriebssysteme des Instituts für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS) der Universität Stuttgart. Die Simulationsaufgaben wurden vom Lehrstuhl Maschinenelemente und Tribologie des Instituts für Antriebs- und Fahrzeugtechnik (iaf) der Universität Kassel bearbeitet.

Zur experimentellen Ermittlung der Reibung wird das abgegebene Motordrehmoment gemessen, woraus sich der effektive Mitteldruck p_{me} mithilfe eines Drehmomentmessflanschs bestimmen lässt. Mit der kurbelwinkel aufgelösten Druckindizierung aller

vier Zylinder des im Projekt verwendeten Boxermotors wird der indizierte Mitteldruck p_{mi} ermittelt. Die Differenz des effektiven und indizierten Mitteldrucks entspricht dem Reibmitteldruck p_{mr} . Die zur Untersuchung notwendige Variation des Zylinderdruckverlaufs erfolgte durch die Änderung des Zündzeitpunkts und der Abgasrückführrate, während durch die Regelung der Fahrpedalvorgabe ein konstanter p_{mi} gehalten wurde. Zur systematischen Untersuchung des Motorkennfelds erfolgte die Definition von fünf Betriebspunkten (Operating Points, OP):

- OP 1: Betrieb mit Serienparametern (Serienbedatung des Motorsteuergeräts)
- OP 2: früher Zündzeitpunkt
- OP 3: Schwerpunktlage bei 12 °KW nach ZOT (50%-Massenumsatzpunkt, MFB50)
- OP 4: später Zündzeitpunkt
- OP 5: Schwerpunktlage mittig zwischen OP 3 und OP 4.

Diese fünf Druckverläufe sind als Beispiele für eine Drehzahl von 2000/min bei einem p_{mi} von 7,2 bar im Diagramm in **BILD 1** (links oben) dargestellt.

2 EXPERIMENTELLE MESSUNGEN UND VALIDIERUNG DER SIMULATION

Zur Validierung der Simulationsmodelle erfolgte die Durchführung von Stripmessungskampagnen in sieben verschiedenen Aufbau-

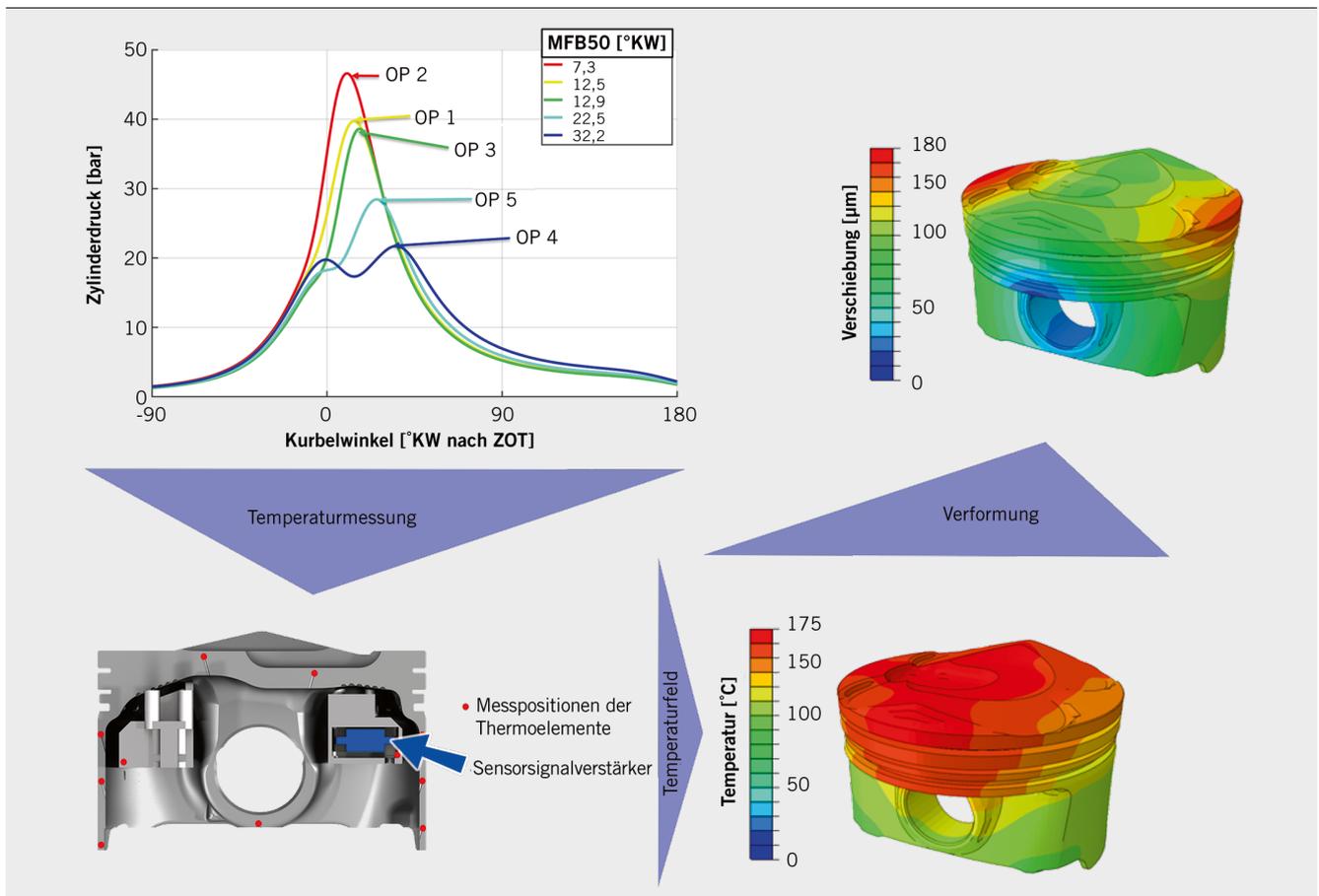


BILD 1 Bestimmung der thermisch bedingten Kolbenverformung bei verschiedenen Betriebspunkten auf Basis von Temperaturmessungen, inverser Temperaturfeldbestimmung und Finite-Elemente(FE)-Verformungsberechnung (© IFS | iaf)

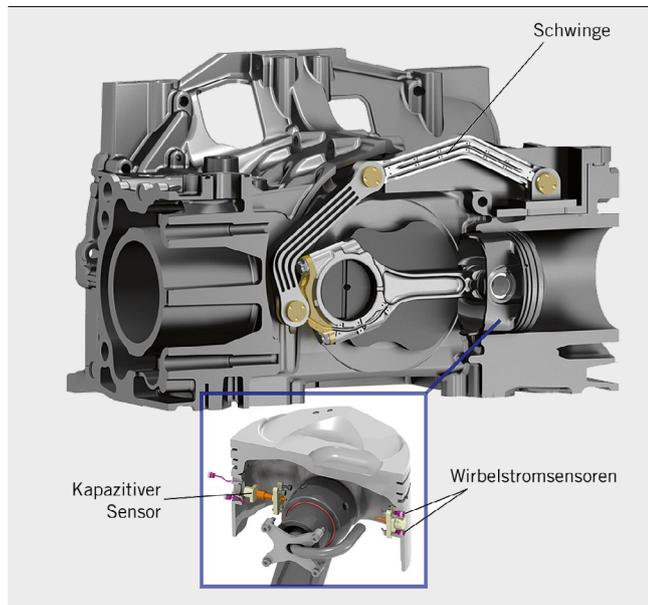


BILD 2 Schnittansicht des Motors mit Messschwinge und des Messkolbens zur Bestimmung des Spalts, der Verlagerungsbahn und des Ölfüllungsgrads (© IFS)

konfigurationen, bei denen die Reibung im geschleppten Betrieb untersucht wurde. In einem zweiten Schritt erfolgten die Messungen im gefeuerten Betrieb. Hierbei wurde in verschiedenen Messreihen auch der Einfluss des Zylinderdruckverlaufs auf die Temperaturen an den Hauptlagern und Liner sowie Kolben, auf die Kurbelwellenverlagerungsbahn nach dem fünften Hauptlager, auf das Drehmoment an der rechten Auslassnockenwelle sowie auf die Verlagerung des Kolbens und den Ölfüllungsgrad zwischen Kolben und Liner untersucht. Die Simulationsmodelle (zum Beispiel der Kurbeltrieb mit dem Simulationswerkzeug First) wurden in zunehmender Modelltiefe aufgebaut und auf Basis von Messungen – an Teilkomponenten und am Vollmotor – validiert. Die gezielte Bedatung und Auswertung von einzelnen Komponenten, Kontakt- und Reibstellen ist in der Simulation möglich.

3 THERMISCHE VERFORMUNG

Die experimentellen Untersuchungsergebnisse werden am Beispiel des Einflusses der Variationen des Druckverlaufs auf die Kolbentemperatur und die Kolbenverlagerungsbahn dargestellt. Zur Erfassung der Temperaturverteilung am Kolben wurde dieser mit zwölf Thermoelementen ausgestattet, **BILD 1** (links unten). Zur Übertragung der Temperaturdaten vom Kolben zum Messsystem wurde

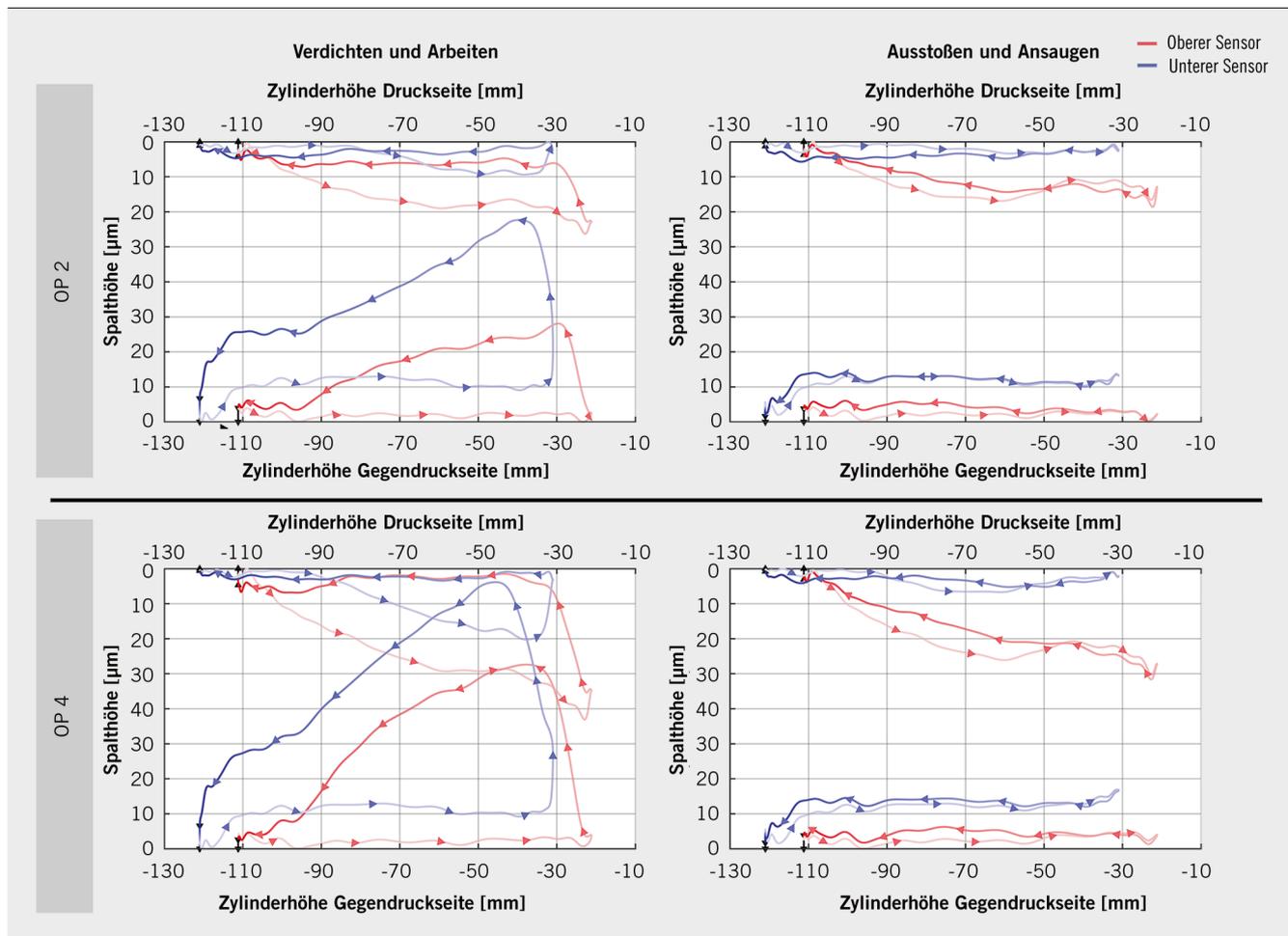


BILD 3 Gegenüberstellung der gemessenen Kolbenverlagerungsbahnen für OP 1 und OP 2 bei 2000/min und $p_{mi} = 7,2$ bar, während des Verdichtungs- und Arbeitstakts (links oben und unten) sowie beim Ladungswechsel (rechts oben und unten) (© IFS)

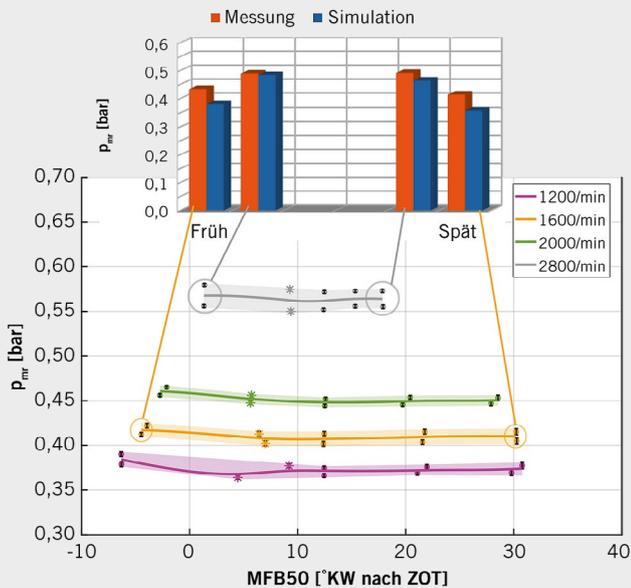


BILD 4 Gesamtreibung über die Druckverlaufsvariation bei $p_{mi} = 3,5$ bar für Drehzahlen zwischen 1200/min und 2800/min sowie der Vergleich zur Simulation bei frühem und spätem MFB50 für 1600/min und 2800/min (© IFS | iaf)

ein Telemetriesystem verwendet, das die Temperaturen in der Kurbelwinkelstellung unterer Totpunkt – bei Überdeckung der Sender- und Empfängerspulen – auswertet und überträgt. Aus diesen Temperaturdaten lassen sich mittels inverser Techniken die Temperaturverteilung über den gesamten Kolben bestimmen. Das Temperaturfeld ist die Basis für die Berechnung thermisch induzierter Verformungen am Kolben mittels Finite-Elemente-Methode (FEM). Die Berücksichtigung dieser Deformationsanteile für Kolben und Zylinderwand ist immanent für die Simulation der Kolbenbewegung und -reibung.

4 ÖLFÜLLUNGSGRAD

Mit der Bestimmung des Ölfüllungsgrads im Spalt zwischen Zylinder und Kolben kann die Simulation der Kontaktzone der Komponenten deutlich verbessert werden, da der Füllgrad erheblichen Einfluss auf Bewegung und Reibung hat. Hierzu erfolgte die Bestückung des Kolbens mit zwei kapazitiven und vier Wirbelstrom-Abstandssensoren, wie in **BILD 2** im blau eingekreisten Bereich dargestellt. Mit diesen Sensoren können Abstand und Ölfüllungsgrad bestimmt werden. Mit einer kabelgebundenen Übertragung konnten durch die Konstruktion und Applikation eines Schwingensystems am entsprechenden Zylinder, **BILD 2**, die notwendige hohe zeitliche Diskretisierung sowie die erforderliche Messwertauflösung erfolgreich umgesetzt werden.

5 ERGEBNISSE

Der Aufbau erlaubt die eingeschränkte Auswertung einer Kolbenbewegung, die genutzt werden kann, um das Simulationsmodell zu validieren. Ebenso können die Messdaten zum Ölfüllungsgrad als Eingangsgröße für die Simulation verwendet werden, um die realen Bedingungen möglichst genau abzubilden. So werden durch die

detaillierteren Informationen zum Kolben beziehungsweise zur Zylinderkontaktlaufbahn genauere Simulationsergebnisse erreicht.

BILD 3 zeigt eine Gegenüberstellung der Messergebnisse der Kolbenverlagerungsbahnen bei 2000/min und 7,2 bar p_{mi} der beiden Betriebspunkte OP 2 und OP 4 mit extremer MBF50-Lage in Richtung früh und spät. Die von den Wirbelstromsensoren erfassten Abstände über die Bewegung des Kolbens dargestellt. Hierbei repräsentieren die Diagramme den untersuchten liegenden Zylinder Nummer 2. Die Diagramme in **BILD 3** (rechts oben und unten) zeigen die Abstände für den Ladungswechsel –, hier treten nur geringe Änderungen der Signalamplitude auf. Der Verdichtungs- und Arbeitstakt ist in den Diagrammen in **BILD 3** (links oben und unten) dargestellt. Hier ist wie erwartet zu erkennen, dass besonders im Bereich nach dem oberen Totpunkt die Bewegung des Kolbens durch den veränderten Druckverlauf beeinflusst wird.

Die Messungen des Ölfüllungsgrads ergeben, dass auf der Unterseite des Kolbens (Gegendruckseite), bedingt durch das Boxerkonzept, in nahezu allen Betriebszuständen ein höherer Ölfüllungsgrad im Vergleich zur Oberseite (Druckseite) erreicht wird.

In **BILD 4** sind die Ergebnisse der Gesamtreibung für einen konstanten $p_{mi} = 3,5$ bar dargestellt, in **BILD 5** entsprechend für $p_{mi} = 7,2$ bar. Die Verschiebung der Schwerpunktlage entlang der x-Achse in beiden Diagrammen erfolgt durch die Variation des Druckverlaufs. Die Gesamtreibung wird auf der y-Achse abgetragen, Drehzahlen sind durch Farben gekennzeichnet. Das (schmale) Streuband der Messungen ist mittels Farbhinterlegung und diskreter Messpunkte dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass bei extremer Verbrennungslage – einer starken Verschiebung des MFB50 in Richtung früh und spät – die Reibung zunimmt. Bei niedrigen Drehzahlen und hohen Lasten kann der Effekt messtechnisch gut erfasst werden. Ein Vergleich zwischen Messung

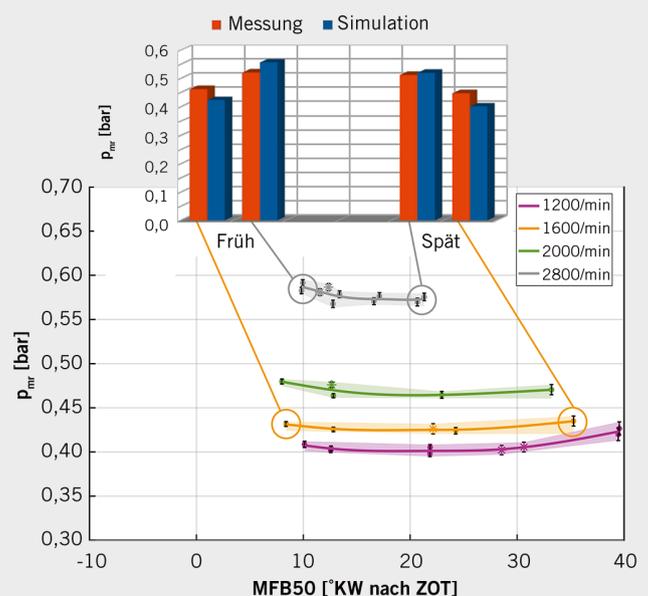


BILD 5 Gesamtreibung über die Druckverlaufsvariation bei $p_{mi} = 7,2$ bar für Drehzahlen zwischen 1200 und 2800/min sowie Vergleich zur Simulation bei frühem und spätem MFB50 für 1600 und 2800/min (© IFS | iaf)

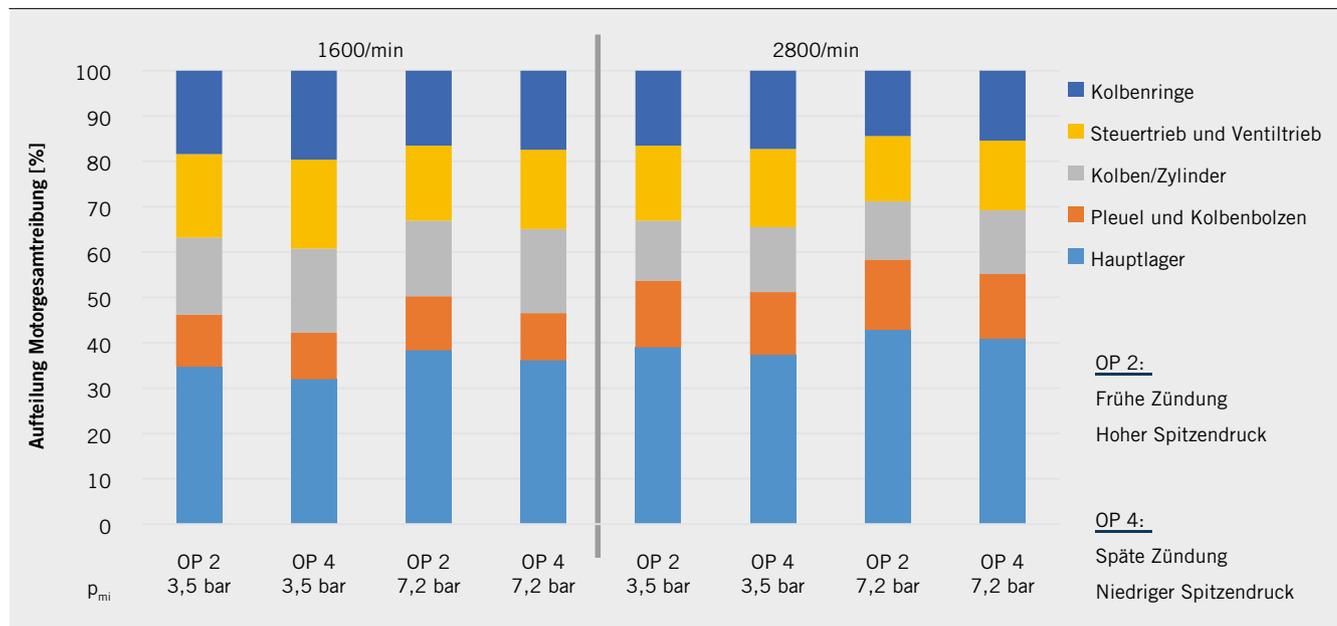


BILD 6 Komponentenweise Aufteilung der in der Simulation berechneten Reibung (© iaf)

und Simulation anhand der Reibverluste erfolgt in den Balkendiagramm im oberen Bereich von BILD 4 und BILD 5. Hier werden Punkte mit $p_{mi} = 3,5$ und $p_{mi} = 7,2$ bar bei den Drehzahlen 1600 und 2800/min betrachtet. Die Korrelation ist im Allgemeinen gut: mit einer Unterschätzung der Simulation von 9 bis 12 % bei der niedrigeren Drehzahl und einer Abweichung zwischen 2 und 7 % bei der höheren Drehzahl.

BILD 6 zeigt die Simulationsergebnisse von acht Betriebspunkten und die jeweilige prozentuale Verteilung der Reibung auf die Komponenten. Es ist ersichtlich, dass die Motorreibung von den Hauptlagern dominiert wird. Bei niedrigeren Drehzahlen ist der Beitrag der Kolbengruppe (Kolben/Zylinder und Kolbenringe) fast genauso hoch wie der Anteil der Hauptlager. Der Beitrag der Kolbenringe nimmt mit der Drehzahl ab, während der Anteil der Hauptlager und der Pleuellager (hier von Pleuel und Kolbenbolzen abgeleitet) mit der Drehzahl zunehmen.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Einfluss des Druckverlaufs auf die Reibung sowohl messtechnisch im Versuch ermittelt als auch in der Simulation abgebildet werden kann. Hierzu ist es erforderlich, im experimentellen Bereich hochgenaue Drehmoment- und Zylinderdruckmesstechnik zu verwenden sowie die gesamte Messkette zu kalibrieren.

In der Simulationstechnik hat sich gezeigt und bestätigt, dass für fundierte qualitative und belastbare quantitative Aussagen validierte Simulationsmodelle mit korrekter Bedatung notwendig sind und dabei zusätzliche physikalischer Effekte berücksichtigt werden müssen. Zu nennen sind hier: Realspiel statt nominelles Spiel; thermisch bedingte Spiel- und Konturänderungen; Viskositäts-Temperatur-Beziehungen für das Öl; individuelle Lagertemperaturen; Kontur- und Rauigkeitsänderungen durch Einlaufvorgänge und Berechnung höher belasteter Lagerstellen mit Thermo-Elasto-Hydrodynamik(TEHD)-Techniken.

LITERATURHINWEIS

[1] Armbruster, M.; Huttinger, K.; Markus, P.; Simukova, T.; Salih, Z. M.; Senge, M.; Golek, M.; Ochse, G.: Methodenentwicklung zur Messung der Lagerreibung unter dem Einfluss der Zylinder-Druckkurve. FVV Projekt-Nr.: 1309, Abschlussbericht Nr. R599, Frankfurt am Main, 2021

DANKE

Das Forschungsvorhaben (FVV-Projekt-Nr. 1309) wurde am Lehrstuhl Fahrzeugantriebe des Instituts für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS) der Universität Stuttgart unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende und Prof. Dr.-Ing. André Casal Kulzer sowie am Lehrstuhl Maschinenelemente und Tribologie des Instituts für Antriebs- und Fahrzeugtechnik (iaf) der Universität Kassel unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Adrian Rienacker durchgeführt. Es wurde mit Eigenmitteln des FVV e. V. finanziell gefördert und von einem Arbeitskreis unter der Leitung von Tai Ono (Subaru) begleitet. Die Autoren bedanken sich bei der FVV und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens. Des Weiteren danken sie Subaru für die Bereitstellung des Vollmotorversuchsträgers und der CAD-Daten sowie für die fortwährende kompetente Unterstützung. Weiterer Dank gilt Dr.-Ing. Frank Schlerege (Schaeffler Technologies) und Dr.-Ing. Kevin Huttinger (IFS), Dr.-Ing. Ulrich Philipp (IFS), Dr.-Ing. Benjamin Burger (IFS), Tatjana Simukova, M. Sc. (iaf), Dr.-Ing. Zaid M. Salih (iaf) sowie Dr.-Ing. Matthias Senge (iaf).



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

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