

AUTOREN



Prof. Dr.-Ing. Hubert Schwarze

ist Leiter des Instituts für Tribologie und Energiewandlungsmaschinen (ITR) an der Technischen Universität Clausthal.



Prof. Dr.-Ing. Gerhard Poll

ist Leiter des Instituts für Maschinenkonstruktion und Tribologie (IMKT) an der Leibniz Universität Hannover.

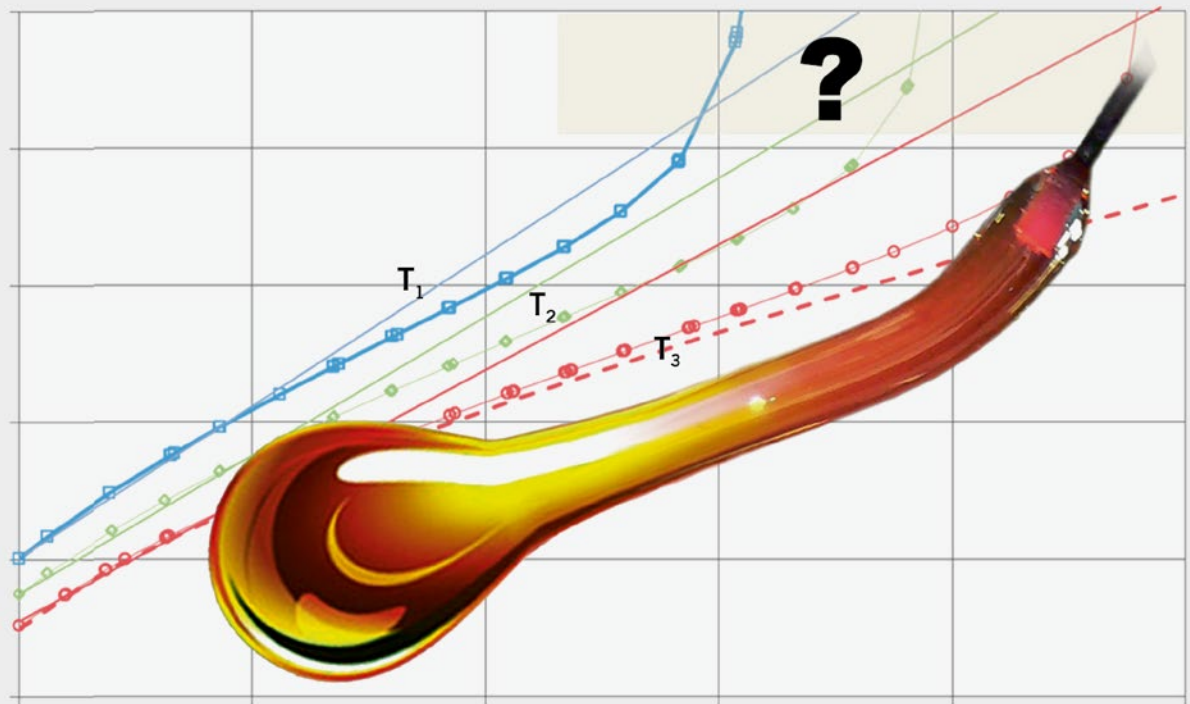


Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk Bartel

ist Leiter des Lehrstuhls für Maschinenelemente und Tribologie (IMK) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Tribologische Fluidmodelle für Nebenaggregate in Elektro- und Hybridfahrzeugen

In den Nebenaggregaten von Elektro- und Hybridfahrzeugen kommen zum Teil hochbelastete Tribokontakte vor, deren Reibungsverluste man reduzieren möchte, um den Wirkungsgrad zu erhöhen. Zur rechnerunterstützten Optimierung der einzelnen Komponenten werden im Allgemeinen Berechnungsprogramme eingesetzt, in denen das Maschinenelement Schmierstoff durch ein Fluidmodell repräsentiert werden muss. Unter den Bedingungen in hochbelasteten EHD-Kontakten zeigt der Schmierstoff meist kein Newtonsches Verhalten mehr und kann bei bestimmten Betriebsbedingungen (druck- und temperaturabhängig) auch in einen festkörper- oder glasartigen Zustand übergehen. Um den Schmierstoff unter diesen Extrembedingungen dennoch als Maschinenelement in Berechnungsprogramme implementieren zu können, werden spezielle Fluidmodelle benötigt, die sein Fließverhalten adäquat wiedergeben. Solche Fluidmodelle wurden in einer Kooperation des ITR, des IMKT und des IMK im Rahmen eines FVV-Forschungsvorhabens entwickelt und validiert.



© ITR

1	MOTIVATION
2	FLUIDMODELL
3	EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE
4	SIMULATION
5	ZUSAMMENFASSUNG

1 MOTIVATION

Zu einer verbesserten Berücksichtigung des Konstruktionselements Schmierstoff bei der Auslegung von Nebenaggregaten in Hybrid- und Elektrofahrzeugen wurden Fluidmodelle entwickelt, die es erlauben, die im Labor unter statischen Bedingungen gemessenen Fluideigenschaften unter Einbeziehung von Prüfstandversuchen in einer für Berechnungsprogramme geeigneten Form darzustellen. Dazu wurde von den drei genannten Instituten ein vom Arbeitskreis Tribologie und Betriebsstoffe der FVV initiiertes Forschungsvorhaben durchgeführt. Dieser Beitrag soll die Problematik aufzeigen, den Lösungsansatz erläutern und die wesentlichen Ergebnisse vorstellen.

2 FLUIDMODELL

Ein Fluidmodell soll das Verhalten eines Fluids unter den Einsatzbedingungen beschreiben [1], [2], [3] und [4]. In praktischen Anwendungen können im Kontakt Temperaturen zwischen 0 und 250 °C, Drücke bis zu 3300 MPa und nominelle Scherraten teilweise über 10^7 s^{-1} auftreten. **BILD 1** zeigt schematisch die Abhängigkeit der Schubspannung vom Fließverhalten des Fluids. Die Schubspannung steigt im Newtonschen Bereich linear an, geht über in einen nichtlinearen Bereich und nähert sich im Prinzip asymptotisch einer Grenzschubspannung. Da im Experiment bei hohen Scherraten die Temperatur nicht konstant gehalten werden kann, erreicht die Schubspannung ein Maximum und fällt dann ab. Das Fließverhalten wird im Newtonschen Bereich durch die Viskosität η_0 , im nichtlinearen Bereich durch die kritische Schubspannung τ_c sowie bei hohen Scherraten durch die Grenzschub-

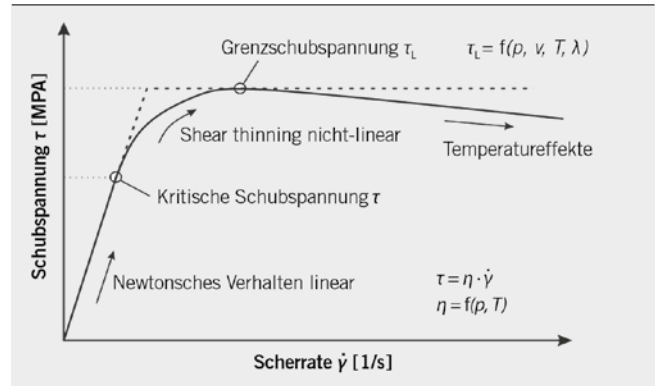


BILD 1 Schematische Darstellung des Schubspannungsverlaufs bei Scherbelastung (© ITR)

spannung τ_{lim} bestimmt, wobei diese Größen im Allgemeinen vom Druck und von der Temperatur abhängen.

Mit dem derzeitigen Stand der Technik sind Schmierstoffkenngrößen für extreme Betriebsbedingungen teilweise nicht messbar. Insbesondere sind Messungen bei gleichzeitig hohen Drücken und Scherraten noch nicht möglich. Für die messtechnisch nicht erfassbaren Zustände werden die Werte unter Berücksichtigung des Fließverhaltens extrapoliert. Die Scherratenabhängigkeit der Viskosität wird durch ein Fließmodell beschrieben, das zusammen mit den Modellen für Dichte, Viskosität, spezifischer Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit das Fluidmodell bildet [5]. Zur Beschreibung des Fließverhaltens oberhalb des nichtlinearen Bereichs wurden in die Modellierungsansätze von Eyring (EY) und Carreau (CAR) eine Grenzschubspannung implementiert. Beim Eyring-Modell wird dies durch eine Kombination mit einem vereinfachten Bair/Winer-Modell (EY/BW) realisiert. Im Carreau-Modell wird die Schubspannung durch einen aus Konsistenzgründen eingeführten Wandschlupf begrenzt (CAR+BW). Die resultierenden Fließmodelle sind in **BILD 2** dargestellt. Beide Modelle (EY/BW und CAR+BW) sind in der Lage, das nicht-Newton'sche Verhalten mithilfe der kritischen Schubspannung τ_c und der Grenzschubspannung τ_{lim} zu beschreiben.

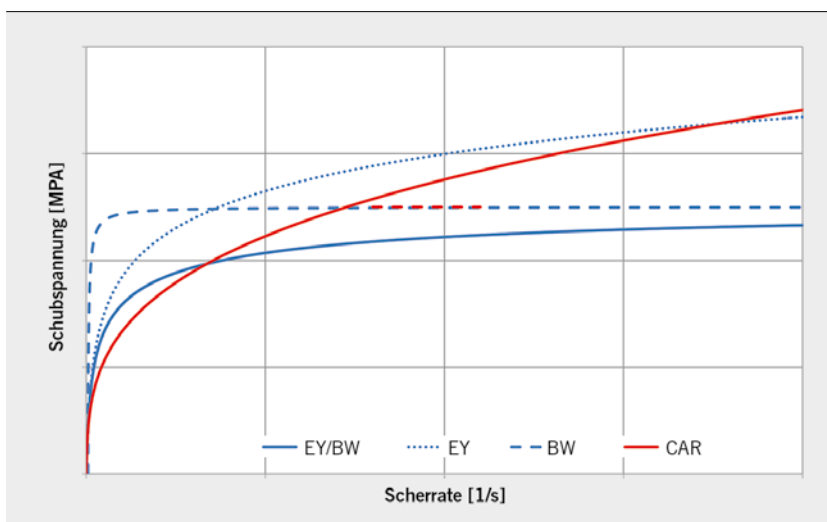


BILD 2 Fließmodelle (charakteristische Verläufe) (© ITR)

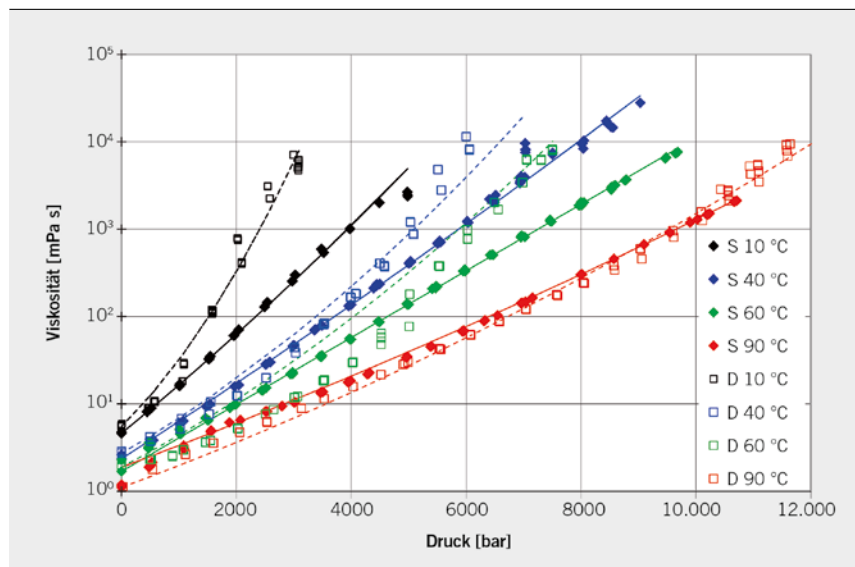


BILD 3 Druck- und Temperaturabhängigkeit von Dieselkraftstoffen (© ITR)

3 EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

Die thermophysikalischen Eigenschaften von Schmier- und Betriebsstoffen wurden in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und Scherrate bestimmt sowie deren Reibverhalten in einer Hochdruckkammer (HPC) bei Drücken untersucht, die den Pressungen an den Funktionsprüfständen entsprechen [6]. In **BILD 3** ist exemplarisch die Druckabhängigkeit der Viskosität von zwei Dieselkraftstoffen bei Temperaturen zwischen 10 °C und 90 °C dargestellt. Aus diesen Messungen wurden nach thermodynamischen Prinzipien Grenzscherbspannungen bei statischen Bedingungen abgeleitet [7].

Mithilfe von Traktionsmessungen an einem Zweiseibenprüfstand und an einem MTM-Tribometer wurde die Reibkraft als Funktion von Pressung und Schlupf gemessen, die zum einen zur Validierung der Simulation genutzt werden kann. Zum anderen wurden aus Traktionskurven, **BILD 4**, die fluidtypischen maximal durch das Fluid übertragbaren Schubspannungen in Abhängigkeit von der Pres-

sung ermittelt [8]. Alle Fluide bis auf ein Bremsfluid zeigten im Messbereich annähernd einen linearen Zusammenhang zwischen Pressung und maximaler Schubspannung. Die unter dynamischen Bedingungen für die Druck- und Temperaturverteilung im EHD-Kontakt bestimmten integralen Grenzscherbspannungen korrelieren sehr gut mit den unter stationären Bedingungen bei definiertem Druck und Temperatur gemessenen Werten, **BILD 5**. Die aus den Viskositätsmessungen für Drücke beziehungsweise Pressungen unterhalb von 500 MPa abgeleiteten Grenzscherbspannungen weisen darauf hin, dass sich der lineare Verlauf zu kleineren Drücken nicht fortsetzt. Die Grenzscherbspannung bleibt auch bei sehr kleinen Drücken positiv, wie es physikalisch sinnvoll ist. Im Fluidmodell wird die Druckabhängigkeit durch einen bilinearen Ansatz angenähert, **BILD 5**. Um die Fluidmodelle auch bei niedrigen Scherraten validieren zu können, wurden zusätzlich zu den Traktionsmessungen für alle Fluide an einem Kugel-Scheibe-Tribometer Schmierfilmhöhen in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Temperatur gemessen.

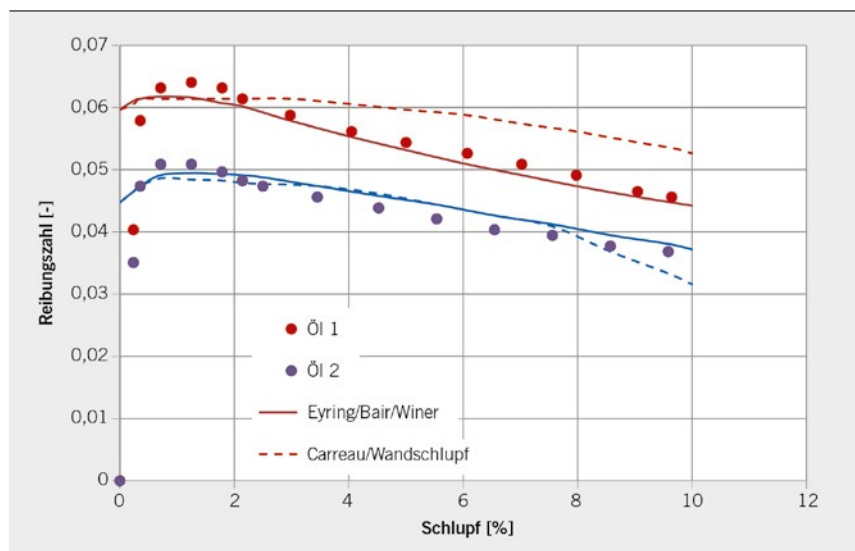


BILD 4 Vergleich Experiment und Simulation (Traktionskurven bei 60 °C, 10 m/s, 1420 MPa) (© ITR)

4 SIMULATION

Die mit dem Zweischeibenprüfstand und dem MTM-Tribometer aufgenommenen Traktionskurven sowie die Schmierfilmhöhenmessungen mit dem Kugel-Scheibe-Tribometer dienten als Basis für die Entwicklung eines für Simulationsrechnungen geeigneten Fluidmodells. Die tribologisch relevanten Komponenten wurden in eine numerische 3-D-TEHD-Simulationssoftware [9] implementiert. Die Berechnung des Traktionsverhaltens in den Zweischeiben-Versuchen erfolgte unter Berücksichtigung der realen Belastung, Drehzahlen, Makro- und Mikrogeometrie der Scheiben, Massentemperatur der Scheiben sowie der hochdruckrheometrisch vermessenen Schmierstoffeigenschaften. Durch zahlreiche Berechnungen wurden die Kriterien für ein geeignetes Fluidmodell ermittelt. Im Verlauf des Vorhabens wurden insgesamt acht Fließmodelle getestet, wovon aufgrund mangelhafter numerischer Handhabbarkeit drei Modelle nicht weiter verfolgt wurden.

Neben der druckabhängigen Viskosität aus den Messungen im Hochdruckviskosimeter wurden Fließmodelle mit einem sehr breiten nicht-Newton'schen Übergangsbereich integriert, um die Scherverdünnung einschließlich der Grenzschubspannung adäquat modellieren zu können. Um eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment zu erhalten, ist es erforderlich, dass bereits im Fließmodell die Schubspannung begrenzt ist. Deshalb führen die Modelle von Eyring und Carreau ebenso wenig zum Ziel wie das Bair/Winer-Modell, das den nichtlinearen Bereich nicht

korrekt beschreibt. Die Extrapolation der Druckabhängigkeit der Grenzschubspannung aus Messwerten bei hohen Drücken führt formal zu negativen Werten und somit zu numerischen Instabilitäten bei der Simulation. Deshalb wurde ein bilinearer Ansatz:

$$\text{Gl. 1} \quad \tau_{\max} = \tau_{\max,0} \text{ für } p \leq p_0$$

$$\text{Gl. 2} \quad \tau_{\max} = (p - p_0) \cdot \beta \text{ für } p > p_0$$

in das Fließmodell implementiert, **BILD 5**.

Für Mineralöle, PAO, Dieselkraftstoffe und ähnliche Kohlenwasserstoffe gilt $\tau_{\max,0} \approx 6 \text{ MPa}$, $\beta \approx 0,08$ und $p_0 \approx 400 \text{ MPa}$. Für Polyglykole wie die untersuchte Bremsflüssigkeit findet man abweichende Parameter.

BILD 4 zeigt, dass mit den beiden entwickelten Fließmodellen im Vergleich zwischen Experiment und Rechnung bei einer Variation von Last, Drehzahl, Schlupf und Temperatur über einen großen Bereich eine gute Genauigkeit erzielt wird. Berechnungen der Schmierfilmdicke zeigten ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit entsprechenden Experimenten, die bei Bedingungen durchgeführt werden (geringer Schlupf, moderater Druck), unter denen die Schmierfilmdicke hauptsächlich von der Druckabhängigkeit der Viskosität bestimmt wird. Aus den Traktionsmessungen gewonnene Zusammenhänge zwischen Pressung und Schubspannung



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 richtungsweisend. 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

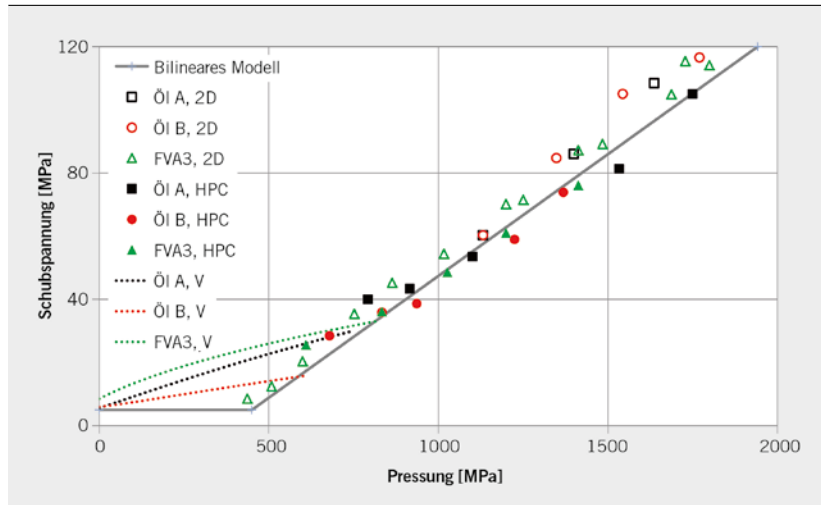


BILD 5 Druckabhängigkeit der Grenzscherungsspannung (© ITR)

für unterschiedliche Geometrien – Scheibe-Scheibe und Kugel-Scheibe – werden vergleichbar gut abgebildet.

Aus den Messungen konnte kein deutlicher Einfluss der Temperatur auf die maximale Schubspannung abgeleitet werden. Unter den nicht-isothermen Versuchsbedingungen ist die Abschätzung der Schmierfilmtemperatur aus den zur Verfügung stehenden Messwerten Öleinlasstemperatur und Außenringtemperatur nicht genau genug, um die relativ geringe Abhängigkeit zu erfassen. Die Untersuchung der Temperatureinflüsse stellt daher zukünftig eine zentrale Aufgabe dar.

Das ursprüngliche Eyring-Modell ist für die Beschreibung des Fließverhaltens realer Flüssigkeiten nicht optimal geeignet. Durch die Kombination mit dem vereinfachten Bair/Winer-Modell werden die wesentlichen Nachteile, die zu geringe Spreizung des nichtlinearen Bereichs und die fehlende Begrenzung der Schubspannung, behoben. In das Carreau-Modell wurde wie in der Literatur eine Begrenzung der Schubspannung eingeführt, um die Gültigkeit über den nichtlinearen Bereich hinaus zu erweitern. Die wesentlichen Parameter beider Modelle können aus den Traktionsmessungen und Reibmessungen in der Hochdruckkammer abgeleitet werden.

Die Fähigkeit der Fluide, Kräfte (Schubspannungen) zu übertragen, lässt sich in zwei Bereiche unterteilen. Bei niedrigen bis moderaten Drücken steigt die Viskosität degressiv exponentiell mit dem Druck und die maximale Schubspannung zeigt eine geringe Druckabhängigkeit. In diesem Bereich bestimmt im Wesentlichen die Druckabhängigkeit der Viskosität die Reibeigenschaften des Fluids. Bei sehr hohen Drücken steigt die Viskosität progressiv exponentiell. Die Druckabhängigkeit der Grenzscherungsspannung (Reibkoeffizient) nähert sich für die meisten Fluide mit 0,08 einem für konzentrierte Tribokontakte typischen Wert. In diesem Bereich werden die Reibeigenschaften von der Grenzscherungsspannung dominiert, sodass die extrem hohe Viskosität aus den Labormessungen nicht zum Tragen kommt.

Über nahezu alle Betriebspunkte hinweg waren mit beiden Fließmodellen im Bereich sehr kleinen Schlupfs die berechneten Reibungszahlen gegenüber den gemessenen zu hoch. Als Ursache für diese Abweichung werden elastische Eigenschaften oder eine Zeitabhängigkeit der Viskosität diskutiert. Beide Phänomene werden Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein.

DANKE

Besonderer Dank gebührt den drei wissenschaftlichen Mitarbeitern, die das Forschungsprojekt bearbeitet haben: Dr. Ludwig Brouwer (ITR, TU Clausthal), Dipl.-Ing. Ronny Beilicke (IMK, Uni Magdeburg) und Dipl.-Ing. Norbert Bader (IMKT, Uni Hannover). Die Forschungsergebnisse entstanden im Rahmen des Forschungsvorhabens Tribologische Fluidmodelle, das von der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V. (FVV, Frankfurt) gestellt wurde. Das Vorhaben wurde von einem projektbegleitenden Ausschuss der FVV unter der Leitung von Dipl.-Ing. Klaus Meyer (Bosch AG) begleitet. Diesem Ausschuss danken die Autoren für die große Unterstützung.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Insgesamt konnte nachgewiesen werden, dass das verwendete 3-D-TEHD-Simulationsmodell geeignet ist, um geschmierte konzentrierte Kontakte zu berechnen. Hinsichtlich der Schmierfilthöhe konnten sehr gute Übereinstimmungen mit Messwerten erzielt werden. Hinsichtlich des Traktionsverhaltens wurden unter Verwendung hochdruckrheometrischer Daten und durch einen Abgleich mit Traktionsversuchen gemäß dem entwickelten Workflow mit einigen Fließmodellen vorwiegend sehr gute Ergebnisse erzielt.

LITERATURHINWEISE

- [1] Bair, S.; Qureshi, F.: The Generalized Newtonian Fluid Model and Elastohydrodynamic Film Thickness. *Journal of Tribology* (2003), Band 125 1, S. 70-75
- [2] Bode, B.: Modell zur Beschreibung des Fließverhaltens von Flüssigkeiten unter hohem Druck. *Tribologie + Schmierungstechnik* (1989), Band 36, S. 182-189
- [3] Habchi, W.; Bair, S.; Vergne, P.: On friction regimes in quantitative elastohydrodynamics. *Tribology International* (2013), Band 58, S. 107-117
- [4] Wang, D.: Berechnung der Wälzlagerreibung aufgrund weiterentwickelter Rheologischer Fluidmodelle. Leibniz Universität Hannover, Dissertation, 2015
- [5] Beilicke, R.; et. al.: Tribologische Fluidmodelle zur Simulation der Reibung in geschmierten konzentrierten Kontakten. 56. Tribologie Fachtagung 2015, Göttingen, Band 1, 5/14
- [6] Jacobson, B.: High-pressure chamber measurements; Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J: *Journal of Engineering Tribology* (2006), Band 220, Nr. 3, S. 199-206
- [7] Schwarze, H.; Brouwer, L.: Bestimmung der Grenzscherungsspannung von Schmierstoffen aus Viskositätsmessungen. 54. Tribologie Fachtagung 2013, Göttingen, Band 1, 1/19
- [8] Poll, G.; Wang, D.: Fluid rheology, traction/creep relationship and friction in machine elements with rolling contacts, Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers. Part J: *Journal of Engineering Tribology* (2012), Nr. 6, S. 481-500
- [9] www.tribo-x.de



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

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

internationaler **motoren** **4. Kongress**

Treffpunkt der Verbrennungsmotoren-Community

mit begleitender Fachausstellung

21. und 22. Februar 2017 | Baden-Baden, Deutschland

**Parallele Vortragsessions
zu PKW- und NFZ-Motorentechnologie
sowie zu neuen und alternativen Kraftstoffen**

» SCHWERPUNKTTHEMEN

Gesamtsystem Verbrennungsmotor und Kraftstoffe | Motorenkonzepte |
Verbrennungsmotoren in elektrifizierten Antrieben | Methoden |
Ladungswechsel und Verbrennung | Abgasnachbehandlung

» PODIUMSDISKUSSION

„Globale Mobilität und Nachhaltigkeit – mit wie viel Verbrennungsmotor?“



JETZT ANMELDEN!

ATZ live

VDI Wissensforum

PROGRAMM UND ANMELDUNG: www.ATZlive.de