

# DEM MIKROKONTAKT AUF DER SPUR

Entwicklung eines neuartigen p- $\vartheta$ -h-Sensors zur synchronen Messung in EHD Gleit-Wälz-Kontakten

Von Hubert Schwarze und Ludwig Brouwer

**Z**ur Messung in höchstbelasteten elasto-hydrodynamischen (EHD) Kontakten, wie sie beispielsweise in Zahnradkontakten, Wälzlagern, Nocken-Stößel-Paarungen oder Reibgetrieben vorkommen, wurde ein neuartiger Sensor entwickelt, der die drei wesentlichen Parameter Druck p, Temperatur  $\vartheta$  und Spaltweite h im EHD-Kontakt synchron erfassen kann.

Bei diesem werden in einem speziellen Beschichtungsprozeß verschiedene Werkstoffe direkt auf die Bauteiloberfläche aufgebracht, die unterschiedliche Funktionen haben und in ihrem Zusammenwirken den eigentlichen Sensor bilden.

Bei der Druck- und Temperaturmessung kommt ein resistives, indirektes Meßverfahren zum Einsatz, wobei sich der spezifische elektrische Widerstand eines metallischen Leiters bei Veränderung

der Zustandsgrößen Druck und Temperatur ändert.

Da die Werkstoffe eine simultane Druck- und Temperaturmessung ermöglichen sollen, müssen die selektiven Eigenschaften, also als Druck- und Temperatursensor zu arbeiten, durch eine geeignete Werkstoffwahl vorgegeben werden.

Dabei sollte der Werkstoff für einen Drucksensor eine große Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstands vom Druck und eine möglichst geringe Abhängigkeit von der Temperatur zeigen. Für den Einsatz als Temperatursensor gelten genau die entgegengesetzten Werkstoffanforderungen.

Anhand von Werkstoffkennwerten zeigt sich, daß *Chrom* die beste Eignung als Material für derartige Drucksensoren aufweist. Dem höchsten Druck-Widerstands-Koeffizienten  $\alpha_p = -17,4 \cdot 10^{-6} \text{ bar}^{-1}$

steht der niedrigste Temperatur-Widerstandskoeffizient aller untersuchten Werkstoffe  $\alpha_T = 3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  gegenüber.

Für die Herstellung von Temperatursensoren zeigt *Titan* mit einem Temperatur-Widerstandskoeffizienten  $\alpha_T = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  und einem Druck-Widerstandskoeffizienten von  $\alpha_p = -1,1 \cdot 10^{-6} \text{ bar}^{-1}$  sehr günstige Werte.

Neben den genannten physikalischen Eigenschaften müssen sich die Werkstoffe durch gute mechanische Eigenschaften auszeichnen. Härte und Verschleißfestigkeit stehen hierbei im Vordergrund, um den Belastungen im EHD-Kontakt standhalten zu können. Hohe Schmelztemperaturen sind notwendig, um kurzzeitige lokale Überhitzungen im Kontakt ertragen zu können. Eine gute Schichthaftung ist erforderlich, um Ablösungen und somit ein Versagen der Sensoren zu vermeiden.

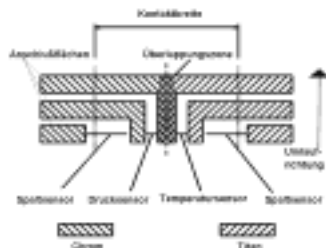
Die Spaltweitenmessung im EHD-Kontakt ist eine indirekte Messung und erfolgt nach dem kapazitiven Meßprinzip. Der Sensor auf der Oberfläche des einen Kontaktpartners bildet mit dem Gegenkörper und dem Schmierstoff als Dielektrikum (übernimmt die Funktion des Nichtleiters) einen Kondensator, dessen Kapazität der Schmier-spaltweite als proportional angesehen werden kann.

Die Anordnung des Sensorlayouts zeigt **Bild 1**. Durch eine Anordnung der Sensoren für Druck, Temperatur und Spalt nebeneinander ist eine Messung der 3 relevanten Kontaktgrößen gleichzeitig bei einem Kontaktdurchlauf möglich.

Das hier gezeigte Sensorlayout ist komplex, da eine gegenseitige Beeinflussung ausgeschlossen werden muß und zudem die verschiedenen Ge- ▶



Bild 1: Synchronmessung im EHD-Kontakt mit p-φ-h-Sensoren



chen Umfangskordinate wie die Druck- und Temperatursensoren ist erforderlich, um eine exakte Zuordnung der Signalverläufe sicherzustellen.

Die Anordnung von zwei Spaltsensoren symmetrisch zur Mittelebene bietet die Möglichkeit, durch unterschiedliche Verschaltung die Gebercharakteristik zu beeinflussen.

sen. Zum einen kann durch Parallelschaltung der Sensoren ein Geber mit einer hohen Gesamtkapazität hergestellt werden, der eine hohe Meßgenauigkeit aufweist. Zum anderen können die Sensoren einzeln verschaltet werden, womit eine eventuelle Schiefstellung oder ein Kantentragen der Bauteile überprüft werden kann.

Durch die Herstellung einer Überlappungszone zwischen der Chrom- und der Titanschicht kann schließlich eine gemeinsame Rückleitung für die beiden resistiven Sensoren realisiert werden. Damit ist eine zentrale Anordnung der Druck- und Temperatursensoren an der Mittelebene des Kontakts möglich.

Zur Aufbringung der verschiedenen Funktionsschichten auf der Bauteiloberfläche wird ein thermisches Widerstandsverdampfen, das im Hochvakuum arbeitet, eingesetzt. Der Vakuum-Rezipient hat ein Volumen von annähernd 200 Litern, um auch größere Substrate aufnehmen zu können. Die Aufdampfmateriale sind am Boden des Rezipienten angeordnet und als Verdampfungsquelle kommt Wolfram zum Einsatz.

Die Verdampfungsquelle wird mit einer Wechselspannung beaufschlagt, und durch die damit verbundene Erwärmung der Quelle verdampft Au und Ti bzw. sublimiert SiO und Cr deren Inhalt und kondensiert bzw. resublimiert an den kälteren

Einbauten des Rezipienten und des Substrates. Die Bedampfungstemperatur beträgt ca. 1500°C. Zur Grobevakuierung dient eine 2-stufige Drehschieberpumpe und zum Erzeugen des Feinvakuums (10<sup>-7</sup> mbar) eine moderne Turbomolekularpumpe. Zur zerstörungsfreien online-Messung der entstandenen Schichtdicken ist in der Anlage ein Schwingquarz-Meßsystem integriert, das die Schichtdicke bei wachsender Eigenfrequenz des Schwingquarzes kontinuierlich erfassen kann.

**Bild 2** zeigt eine Übersicht der aufgebauten PVD-Anlage.

Die Kalibrierung der Sensoren erfordert die Kenntnis des Druck- und Temperaturwiderstandsverhaltens des jeweiligen Sensors. Die Temperaturkalibrierung erfolgt an den vollständig strukturierten und kontaktierten Sensoren auf der Prüffrolle. Diese wird in einem Ölbad stufenweise erwärmt, und nach Erreichen einer stationären Temperatur kann der Widerstand ermittelt werden.

Die Druckkalibrierung erfolgt in einem temperierbaren Hochdruckautoklaven, in dessen Druckkammer über eine Hydraulikflüssigkeit Drücke von 14000 bar erzeugt werden können.

Da die Druckkammer nur sehr kleine Abmessungen aufweist, ist das Einbringen einer Prüffrolle nicht möglich. Daher werden bei jedem Beschichtungsvorgang gleichzeitig Kalibrierproben mitbeschichtet, die in unmittelbarer Nähe zur Prüffrolle angeordnet wurden. Dadurch ist sichergestellt, daß die Beschichtung der Proben unter den gleichen Randbedingungen erfolgt wie die Beschichtung der Prüffrolle selbst und daß Schichtdicke und Schichtbildungsmechanismen für alle Substrate eines Beschichtungsvorgangs identisch sind. So erreicht man, daß das Druck- und Temperaturwiderstandsverhalten der Schichten der Prüffrolle und der Kalibrierproben gleich sind.

Die Kalibrierproben werden in einer speziellen Spannvorrichtung in die Hochdruckkammer des Autoklaven eingesetzt.

Zur Erfassung der Kapazitätsänderung des Spaltweitensensors wird die Sensorkapazität mit einem parallelen Kalibrierkondensator zu einem Viertelzweig einer Übertrager-Meßbrücke verschaltet, die als Ausschlagbrücke im Trägerfrequenzmeßverfahren betrieben wird. Somit kann man eine bekannte Kapazitätsänderung einer Spannungsänderung zuordnen.

**Bild 3** zeigt den Aufbau und das Funktionsprinzip des Prüfstands.

Die Zentralrolle mit dem Dünnschichtsensor ist von drei um 120° versetzt angeordneten Lastrollen umgeben. Der Antrieb der Zentralrolle erfolgt über eine Zahnriemenübersetzung durch einen Gleichstrommotor. Damit ist die Drehzahl der Zentralrolle frei einstellbar.

Der Antrieb der drei Lastrollen erfolgt über ein Verteilergetriebe durch einen Asynchronmotor. Damit ist die Übereinstimmung der Drehzahlen der Lastrollen gewährleistet.

Durch die voneinander unabhängigen Antriebe von Zentralrolle und Lastrollen sind in weiten Bereichen definierte Schlupfverhältnisse einstell-

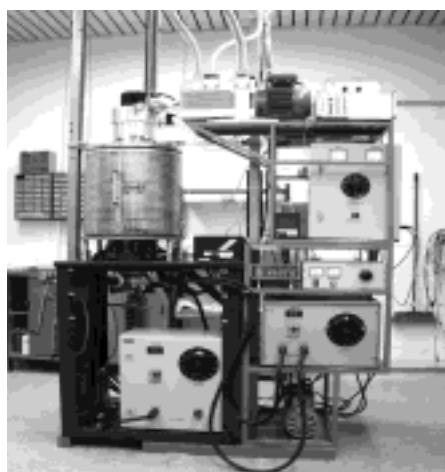
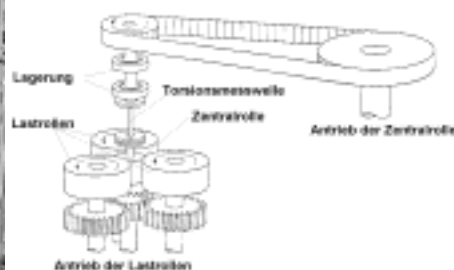


Bild 2: PVD-Anlage für thermisches Verdampfen

ber mit identischen Zustandsgrößen beaufschlagt werden müssen. Die Druck- und Temperatursensoren müssen daher spiegelbildlich zur radialen Mittelebene des Kontakts angeordnet sein. Die aktiven Geberbereiche müssen zentral zur Mittelebene liegen, um im Bereich der maximalen Kontaktbelastung Meßwerte aufnehmen zu können. Eine Anordnung des Spaltweitensensors auf der glei-



Bild 3: 4-Scheiben-Prüfstand für EHD-Messungen



bar. Damit ist eine Variabilität der hydrodynamisch wirksamen Geschwindigkeit möglich.

Die Lagerung der Lastrollen erfolgt über Hydrauliktaschen, über die die Lastaufbringung durch Drucköl erfolgt. Über Drosselsysteme ist eine symmetrische Belastung der Zentralrolle möglich.

Durch die symmetrische Lastaufbringung ist eine fliegende Lagerung der Zentralrolle möglich. Die Anordnung einer Torsionsmeßwelle unmittelbar vor der Zentralrolle macht somit eine direkte Messung des Reibmomentes in den EHD-Kontakten möglich, ohne daß ein Lagerreibungsmoment berücksichtigt werden muß.

Die Schmierstoffversorgung der Kontaktstellen erfolgt über Spritzdüsen, die radial zwischen den Lastrollen angeordnet sind und mit temperiertem Schmierstoff versorgt werden.

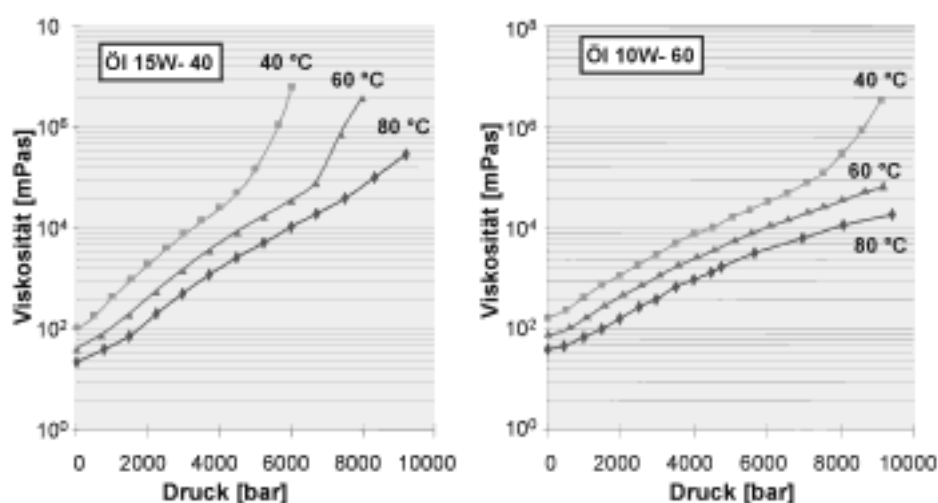
Die Schmierstoffversorgung ist mit einer Reihe von Feinfiltern versehen, die eine Reduzierung der im Ölstrom vorhandenen Verunreinigungen bis auf eine Partikelgröße von 1 µm sicherstellen.

Als Schmierstoff eingesetzt werden ein mineralölbasisches Mehrbereichsöl der Viskositätsklasse 15W40 mit relativ starker Druckabhängigkeit der Viskosität sowie ein vollsynthetisches Produkt 10W60 mit vergleichsweise höherer Ausgangsviskosität, die aber mit dem Druck weniger zunimmt. **Bild 4** zeigt die Viskositätskennfelder der beiden Öle.

Die **Bilder 5, 6 und 7** zeigen einige ausgewählte Synchronmessungen im EHD-Kontakt. Deutlich erkennbar ist der Temperaturanstieg bei Variation des Schlupfes in 5%-Schritten. Bei  $s = 5\%$  erreicht die Temperatur eine Steigerung um  $\Delta\vartheta = 6^\circ\text{C}$ , bei  $s = 10\%$  ergibt sich ein  $\Delta\vartheta = 15^\circ\text{C}$  und schließlich bei  $s = 15\%$  ein maximales  $\Delta\vartheta = 22^\circ\text{C}$ . Der hier ermittelte Maximaldruck im Kontakt lag bei ca. 7000 bar.

Bei den im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten Messungen wurden folgende Parameter variiert bzw. nachfolgende Ergebnisse ermittelt:

Aus den Synchronmessungen erhält man de-



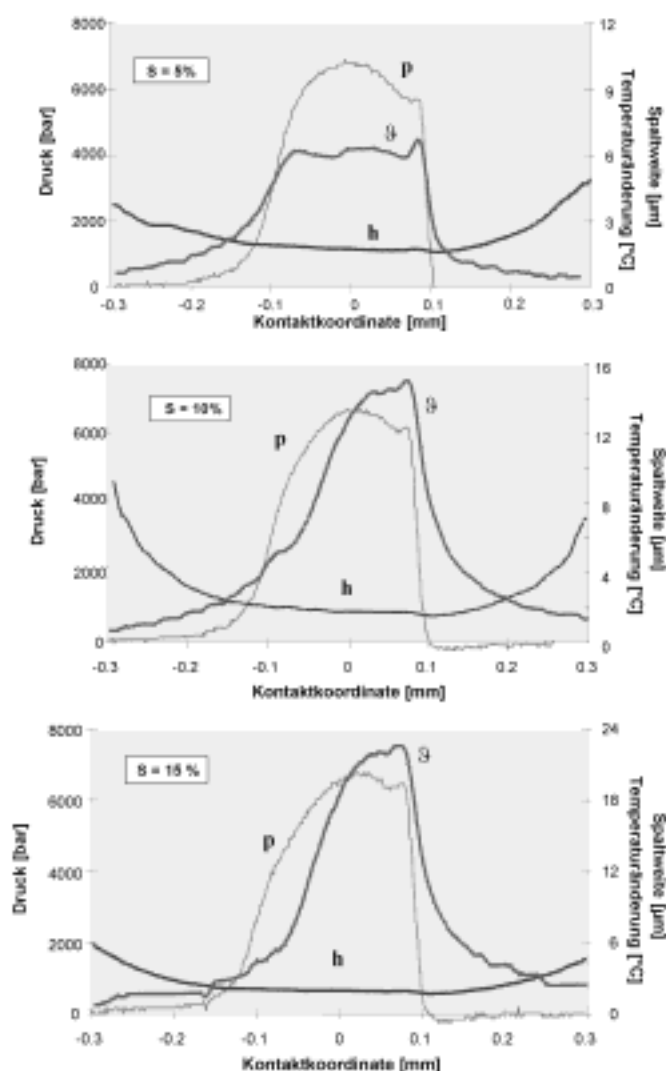
**Bild 4: Viskositätskennfelder der Öle 15W-40 und 10W-60**

taillierte Aussagen über die Auswirkungen der Einflußgrößen Druck, Temperatur, Schlupf und Last sowie der Schmierstoffeigenschaften auf die Ausbildung des Spalts im EHD-Kontakt.

**Bild 8** zeigt die Temperaturerhöhung gegenüber der Rolltemperatur während des Kontaktdurchlaufs für unterschiedliche Belastungen über der Kontaktkoordinate. Deutlich erkennbar ist ein früher, steiler Anstieg der Temperatur, der auf eine Rückströmung des Schmierstoffs aus dem Kontaktbereich heraus zurückzuführen ist. Mit zunehmender Belastung tritt er früher auf. Das Maximum der

Temperaturerhöhung im Einlaufbereich liegt unmittelbar nach dem Wendepunkt des Druckanstiegs.

Danach sinkt der Druckgradient schnell ab, ►



**Bild 5 - 7: Synchronmessung Öl 15W-40 bei unterschiedlichem Schlupf**

<b>Eingabedaten:</b>	
Öltemperatur	25 °C ..... 45 °C
Schlupf	0 ..... 15 %
Belastung	1.020 N ... 2.450 N
Mittlerer Rollendurchmesser	22 mm
Untersuchte Öle	15 W 40 und 10 W 60
Ergebnisse:	
Maximaler Kontaktdruck	12.200 bar
Max. Temperaturerhöhung	48 °C
Minimale Spaltweite	0,5 µm

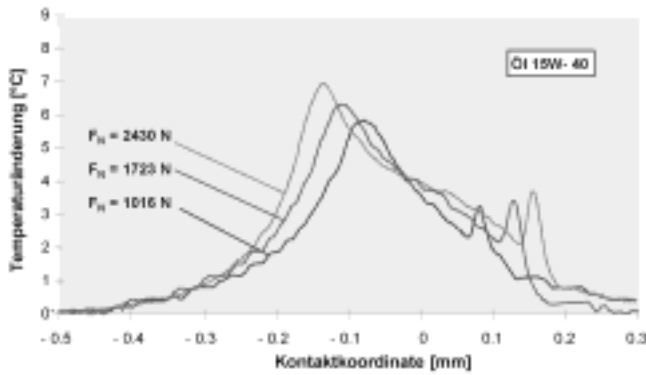


Bild 8: Einfluß der Belastung auf den Temperaturverlauf

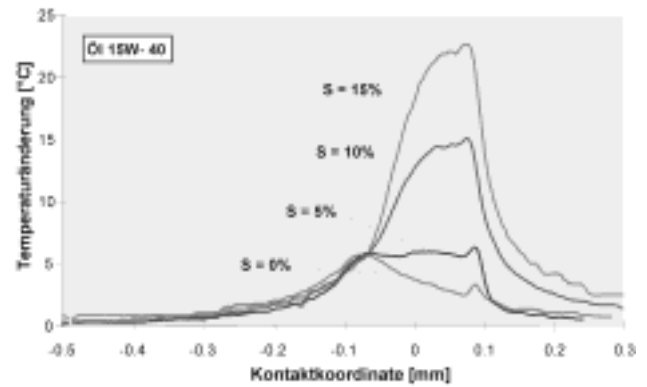


Bild 9: Temperaturverlauf bei niedriger Last und Schlupfvariation

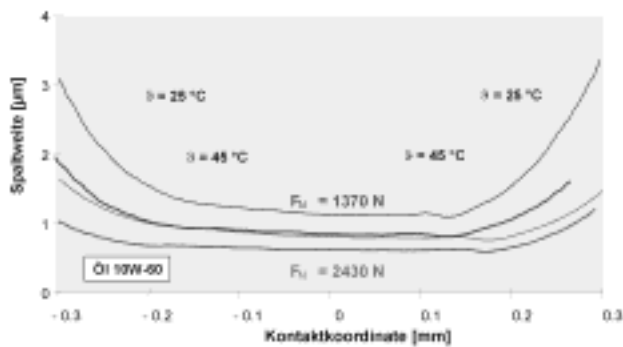


Bild 10: Spaltweite als Funktion von J und F

und das treibende Druckgefälle der Rückströmung reduziert sich. Die Scherung des Schmierstoffs und der damit verbundene Energieumsatz sinkt schnell ab, und es kommt zu keiner weiteren Erwärmung des Öls.

Im anschließenden Parallelschlepp kommt es infolge des schlupffreien Laufs der Rollen lediglich zu einem niedrigen Energieumsatz durch Rollreibung und einem sehr geringen Anteil an Kompressionswärme. Die nahezu parallele Spaltkontur und der Gleichlauf der Rollen erzeugen ein rechteckförmiges Geschwindigkeitsprofil, das keine weitere Scherung des Öls erzeugt. Das führt zu einer Abkühlung des Öls durch Wärmeleitung in die Kontaktpartner.

Am Ende des Parallelschleppes kommt es zu einer Spalteinschnürung, die aus Kontinuitätsgründen zu einer starken Erhöhung des Schergefälles führt. Damit verbunden ist ein erneuter rascher Temperaturanstieg. Nach diesem zweiten Temperaturanstieg kommt es zu einem steilen Abfall des Drucks. Durch diese starke Expansion sinkt die Temperatur sehr schnell auf das ursprüngliche Niveau der Rolltemperatur ab.

Bei Einsatz des vollsynthetischen Schmierstoffes ist der Temperaturverlauf qualitativ ähnlich, jedoch treten in der Einlaufzone höhere Temperaturen auf als beim mineralischen Schmierstoff. Dies kann auf die höhere Grundviskosität des synthetischen Schmierstoffes zurückgeführt werden, da im Einlaufbereich noch kein Druckeinfluß auf die Schmiermittelviskosität vorliegt. Der Temperaturabfall im Bereich des Parallelschleppes ist weniger stark ausgeprägt; somit ist der Temperaturgradient hier kleiner.

Folgende thermische Effekte können die Temperaturverteilung im Schmierpalt überlagernd beeinflussen:

- Wärmeeintrag durch Scherung des viskosen Mediums
- Wärmeleitung in die umgebenden Bauteile
- Wärmeeintrag durch Kompression des Fluids
- Wärmeabfuhr durch Expansion des Fluids

Kompression und Expansion sind von geringerem Einfluß. Entfällt jedoch, wie im Bereich des Parallelschleppes bei schlupffreiem Lauf, der Anteil der Scherung des Fluids, so gewinnen die übrigen Anteile der Wärmebilanz an Bedeutung. Der Temperaturabfall wird somit bestimmt von der Wärmeleitung in die umgebenden Bauteile sowie durch den kleineren Anteil der Kompression des Öls.

Entsprechend der Energiegleichung für den EHD-Kontakt ist die Kompressionswärme abhängig vom Druckgradienten, der lokalen Dichte und dem Temperatur-Dichte-Verhalten des Öls. Sie ist proportional zum Kehrwert der Dichteänderung über der Temperatur, wodurch ein Fluid mit einer geringen Dichteabhängigkeit von der Temperatur bei sonst gleichen Druckbedingungen einen größeren Wärmeeintrag durch Kompression erfährt.

Bei den hier durchgeführten Messungen zeigt das vollsynthetische Öl eine größere Temperaturstabilität, so daß der Wärmeeintrag durch Kompression hier größer ist und damit der Temperaturabfall im Bereich des Parallelschleppes nicht so ausgeprägt.

Bild 9 zeigt Temperaturverläufe unter variablen Schlupfbedingungen. Deutlich erkennbar ist die Temperaturerhöhung im Bereich des Parallelschleppes, hervorgerufen durch geringe Spaltweiten und ein hohes Schergefälle. In Verbindung mit hohen Viskositäten führt dies zu einer nennenswerten Temperaturerhöhung.

Bei Verwendung des synthetischen Schmierstoffes fällt der Temperaturanstieg im Bereich des Parallelschleppes durch Scherung des Öls vergleichsweise gering aus. Die Maximaltemperaturen bleiben deutlich unter den Werten der Messungen mit dem mineralischen Öl. Auch hier zeigt sich der Einfluß der lokalen Viskosität im Kontakt. Der Viskositätsanstieg infolge des vorherrschenden Drucks ist beim synthetischen Schmierstoff

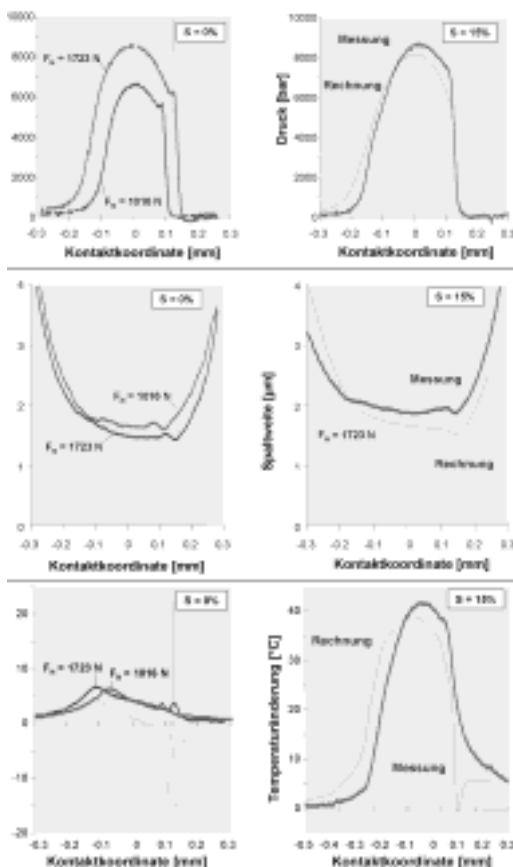


Bild 11: Analogie EHD Messung – EHD Rechnung

geringer, wodurch niedrigere Schubspannungen im Kontakt entstehen und somit ein geringerer Temperaturanstieg stattfindet. Der Temperaturanstieg im Bereich der Spalteinschnürung verschwindet mit steigendem Schlupf zunehmend. Die nur geringe Viskositätsveränderung durch den Druck und die Absenkung der Viskosität infolge des Temperaturanstiegs scheinen den Einfluß der Einschnürung aufzuheben.

**Bild 10** zeigt den Spaltweitenverlauf bei schlupffreier Messung und Last- sowie Temperaturvariation. Mit steigender Temperatur kommt es erwartungsgemäß zu geringeren Spaltweiten. Beim synthetischen Schmierstoff verringert sich die Spaltweite aufgrund der größeren Viskositäts-Temperaturstabilität um ca. 30%, beim mineralischen Öl (hier nicht dargestellt) hingegen um ca. 40 bis 50%.

**Bild 11** zeigt einen Vergleich von durchgeführ-

ten Messungen am Vierscheiben-Prüfstand und ausgeführten Berechnungen (Druck-, Spalt- und Temperaturverlauf).

Das zum Einsatz gekommene EHD-Simulationsprogramm dient zur numerischen Berechnung hoch- und höchstbelasteter Gleit-Wälzkontakte unter Berücksichtigung der Temperaturentwicklung in der Kontaktzone. Es basiert auf der Lösung der Reynolds-DGL in Kombination mit der Elastizitätsgleichung. Das Programm rechnet nicht-isotherm und berücksichtigt die Wärmeerzeugung durch Scherung sowie den Einfluß der Kompressionswärme im Fluid. Als Ergebnis erhält man Druck-, Temperatur- und Spaltverlauf über der Kontaktlänge.

Das EHD-Simulationsprogramm kann auf eine Datenbank mit den rheologischen Eigenschaften (dynamische Viskosität  $\eta = f(\vartheta, p)$ , Dichte  $\rho = f(\vartheta, p)$ , absolute und relative Dielek-

trizitätskonstante  $\epsilon_o, \epsilon_r = f(\vartheta, p)$  im Temperaturbereich bis  $\vartheta = 130^\circ\text{C}$  und im Druckbereich bis  $p = 14000\text{ bar}$ ) von derzeit 58 Schmierstoffen zugreifen.

*Prof. Dr.-Ing. Hubert Schwarze*

*Dr. rer.nat. Ludwig Brouwer*

*Institut für Tribologie und  
Energiewandlungsmaschinen*

*Leibnizstraße 32*

*38678 Clausthal-Zellerfeld*

*Tel.: 0 53 23/72-24 64 (Schwarze)*

*0 53 23/72-26 76 (Brouwer)*

*Fax: 0 53 23/72-26 17*