Berger/Kiefer (Hrsg.)

DICHTUNGS TECHNIK

JAHRBUCH 2015

ISGATEC

PTFE-Dichtungen – Untersuchungen bei außergewöhnlichen Betriebsbedingungen

Zur drucklosen Abdichtung von Wellen werden in allen Bereichen des Maschinenbaus Elastomer-Radialwellendichtringe (RWDR) eingesetzt. Durch ihren aktiven Rückfördermechanismus funktionieren sie zuverlässig [1, 2]. Dem Einsatz sind jedoch hauptsächlich aufgrund thermischer oder chemischer Schädigung Grenzen gesetzt. In der Praxis werden dann oftmals sehr teure und platzaufwändige Sonderkonstruktionen eingesetzt. Da das dazu nötige Wissen besonders bei kleinen und mittelständischen Unternehmen selten ausreichend vorhanden ist, ist eine einfach zu beherrschende Dichtlösung notwendig. Hier können PTFE-Dichtungen Abhilfe schaffen. Ein großer Vorteil des Werkstoffs PTFE ist seine nahezu universelle chemische Beständigkeit und die hohe thermische Belastbarkeit bis über 200 °C.

Vorhandenes Wissen über PTFE-Dichtungen ist jedoch meist nicht frei zugänglich und beruht auf Erfahrungswerten. Eine breite, frei zugängliche, wissenschaftlich erarbeitete Wissensbasis über am Markt erhältliche PTFE-Dichtelemente muss erst geschaffen werden. Aus diesem Grund wird das Forschungsprojekt „PTFE-Dichtungen“ durchgeführt. In diesem Forschungsprojekt werden unterschiedliche Varianten von PTFE-Wellendichtungen untersucht. Die Referenzbedingungen sind dabei an den Einsatzgrenzen von RWDR aus Fluorkautschuk (FKM) orientiert. Diese Bedingungen werden im Forschungsprojekt durch die Steigerung der Umfangsgeschwindigkeit und der Temperatur nach oben verschoben.

Ziel des Forschungsprojektes ist es PTFE-Dichtungen zu erforschen, wenn die Einsatzgrenzen von Elastomer-RWDR überschritten werden. Mit dem erarbeiteten Wissen können Dichtsysteme mit PTFE-Dichtungen sicherer eingesetzt und die Lücke im Anwendungsbereich zwischen Elastomer-RWDR und Gleitringdichtungen geschlossen werden. In diesem Bereich sind PTFE-Dichtungen eine einfach einzusetzende, platzsparende und günstige Dichtlösung.

Von Dipl.-Ing. Jan Gölz, Dr.-Ing. Frank Bauer, Professor Dr.-Ing. habil. Werner Haas
Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart (IMA), www.ima.uni-stuttgart.de

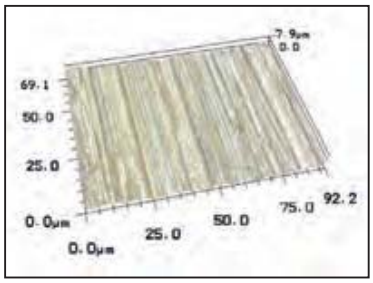
>>1: Dichtring A

>>2: Dichtring B

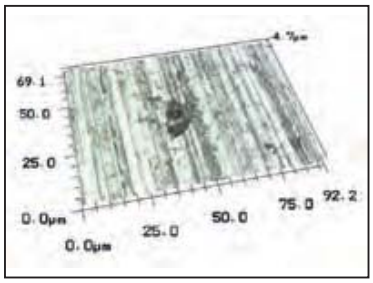
>>3: Dichtring C

Untersuchungsobjekte und Untersuchungsbedingungen

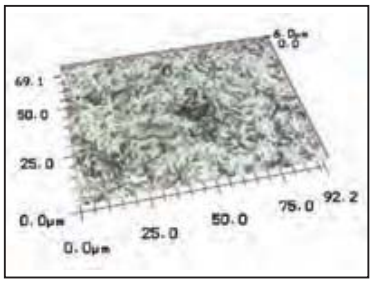
Im Fokus des Forschungsprojektes stehen drei Varianten von PTFE-Manschettendichtungen. Sie sind mit A, B und C bezeichnet. Querschnittsbilder der Dichtringe sind in **>>1, 2, 3** zu sehen. Diese Dichtringe werden in Kombination mit sieben verschiedenen Gegenlaufflächen untersucht – eine gehärtete Stahlwelle als Referenzgegenlauffläche, eine Edelstahlwelle und fünf Wellen mit thermischen Spritzschichten. In Anwendungsbereichen in denen PTFE-Manschetten eingesetzt werden, muss oftmals auch die Gegenlauffläche besondere Anforderungen erfüllen. So muss sie in der chemischen Industrie korrosions- und chemikalienresistent oder bei der Abdichtung schlecht schmierender Fluide besonders abriebfest sein. Hier werden oftmals thermische Spritzschichten eingesetzt, da ihre Eigenschaften je nach Zusammensetzung einer Vielzahl an Anforderungen angepasst werden können. In **>>4, 5, 6** sind Lasermikroskop-Aufnahmen von drei charakteristischen Wellenoberflächen zu sehen. Die typische Schleifstruktur von Stahlwellen in **>>4**, die Schleifstruktur mit Poren einer Chromkarbid-Oberfläche **>>5** und die poröse Struktur einer Chromoxid-Oberfläche ohne sichtbare Schleifriefen **>>6**. Die Einflüsse der unterschiedlichen Gegenlaufflächen auf Reibmoment, Leckrate und Verschleiß werden im Projekt untersucht.



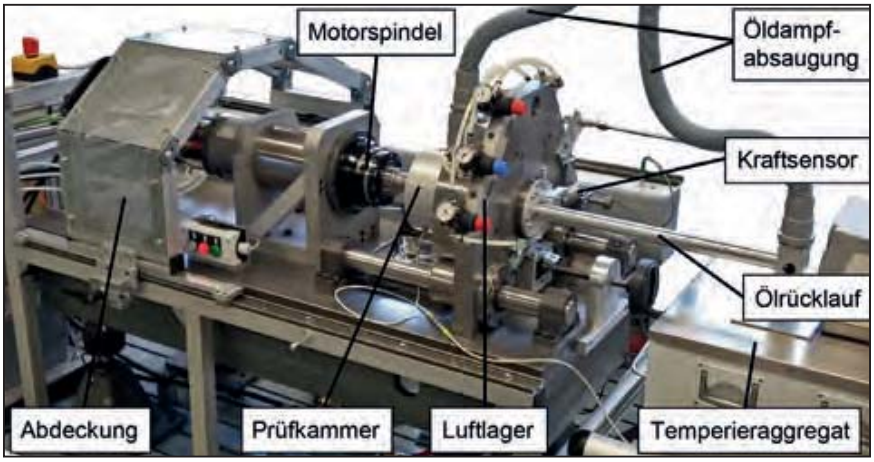
>>4: Welle IR



>>5: Welle RCC



>>6: Welle RCO



>>7: Hoch-geschwindigkeits-Universalprüfstand

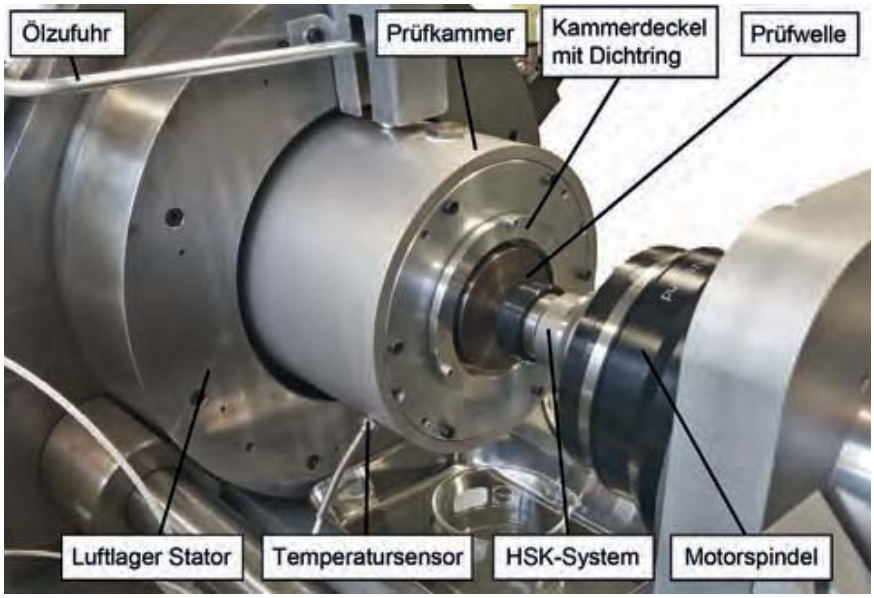
Im Forschungsprojekt werden Dauerläufe über 240 h und Reibmomentmessungen über 6 h Versuchsdauer durchgeführt. Ausgehend von Referenzbedingungen werden Temperatur und Drehzahl gesteigert. Die Referenzbedingungen sind eine Umfangsgeschwindigkeit von 20 m/s und eine Ölsumpftemperatur von 120 °C. Diese Versuchsbedingungen wurden gewählt, da sie die Einsatzgrenze von hochwertigen RWDR aus Fluorkautschuk (FKM) darstellen.

Um die Funktion der Dichtungen bei hohen Geschwindigkeiten zu untersuchen, wird die Umfangsgeschwindigkeit auf 30 m/s, 40 m/s und 50 m/s gesteigert. Um die Funktion im Hochtemperaturbereich zu untersuchen, werden Versuche bei 130 °C, 150 °C und 170 °C Ölsumpftemperatur durchgeführt. PTFE als Grundwerkstoff ist bei diesen Bedingungen problemlos einsetzbar. Jedoch kann die Veränderung der Werkstoffeigenschaften Einfluss auf die Funktion der Dichtungen haben. Dieser Einfluss wird in den Versuchen ermittelt. Gerade bei hohen Temperaturen werden häufig PTFE-Dichtungen anstelle von Elastomer-RWDR eingesetzt.

Ergebnisse der Versuchsläufe bei Referenzbedingungen und Einflüsse der unterschiedlichen Gegenlaufflächen auf Reibmoment, Leckrate und Verschleiß wurden in [3] vorgestellt.

Hochgeschwindigkeits-Universalprüfstand

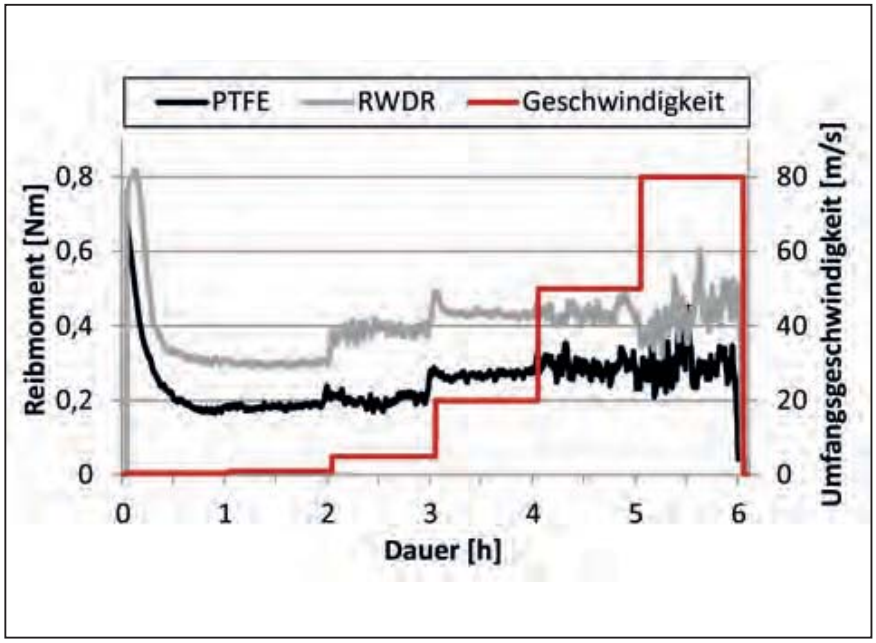
Um Reibmomentmessungen bei den im Forschungsprojekt geforderten Betriebsbedingungen durchführen zu können, wird ein besonders leistungsfähiger Prüfstand benötigt. Aus diesem Grund wurde der Hochgeschwindigkeits-Universalprüfstand konstruiert und aufgebaut **>>7** . An diesem Prüfstand sind Reibmomentmessungen mit Drehzahlen bis zu 24.000 min^{-1} und Ölsumpftemperaturen



>>8: Prüfkammer des Hochgeschwindigkeits-Universalprüfstands

über 170 °C möglich. Das Herzstück des Prüfstandes ist die Werkzeugmaschinenspindel, die die geforderten hohen Drehzahlen leistet. Die Prüfkammer ist in einem Luftlager reibungsfrei drehbar. Die Reibung im Dichtkontakt erzeugt ein Moment, das sich über die Prüfkammer an einem Kraftsensor abstützt. Über die gemessene Kraft wird das Reibmoment des Dichtsystems ermittelt. Die Temperierung des Öls erfolgt über ein externes Temperieraggregat in einem offenen Kreislauf. Dadurch sind keine Anschlussleitungen für Heizpatronen an der Prüfkammer nötig, die das Reibmoment beeinflussen würden. Das temperierte Öl wird am obersten Punkt in die Prüfkammer eingeleitet und fließt auf Höhe der Wellenmitte wieder aus der Prüfkammer zurück in das Temperieraggregat. Da insbesondere bei hohen Temperaturen Öldämpfe entstehen, wurde eine Absaugung vorgesehen. Dabei ist nicht der komplette Prüfstand gekapselt, sondern es wird direkt an Ölzufuhr und Ölrücklauf abgesaugt. Die verschiebbare Abdeckung schützt im Betrieb vor abspritzendem Öl. Die Prüfkammer und das Luftlager sind auf Führungsstangen gelagert und werden zum Rüsten und Abrüsten des Prüfstandes axial verschoben.

Die Prüfkammer mit montierter Welle wird in **>>8** gezeigt. Die Prüfwellen werden mit einer Spannzange in einem Hohlschaftkegel- (HSK-) System mit der Motorspindel verbunden. Diese Schnittstelle aus dem Werkzeugmaschinenbereich ermöglicht Wiederholgenauigkeiten im Mikrometerbereich für die Positionierung der Welle. Das HSK-System wird hydraulisch gespannt. Der Temperatursensor erfasst die Temperatur direkt im Ölsumpf. Der Prüfstand setzt durch die hohen erreichbaren Drehzahlen und Ölsumpftemperaturen bei gleichzeitiger Reibmo-



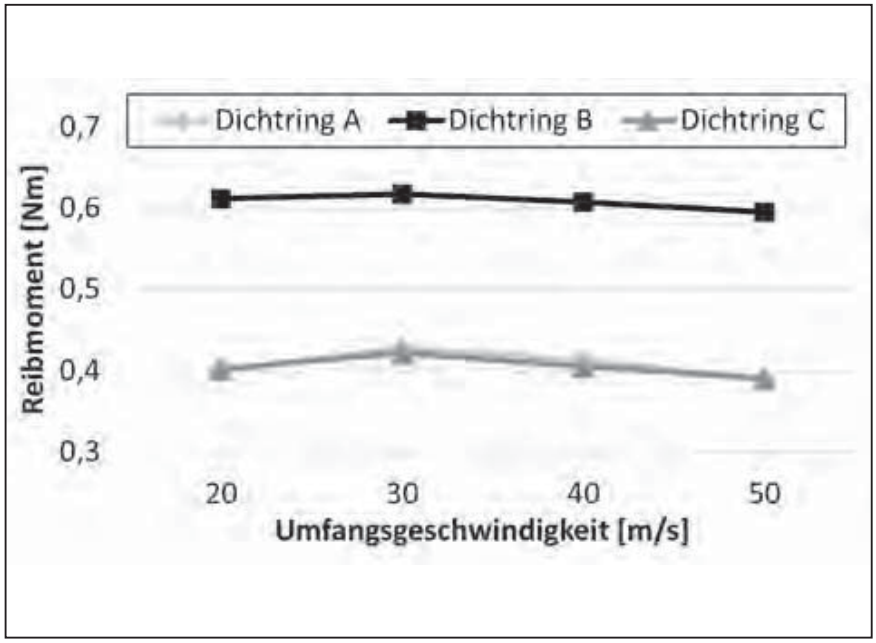
>>9: Vergleich der Reibmomente von Elastomer-RWDR und PTFE-Manschette

mentmessung Maßstäbe. Beim Betrieb von Luftlagern sind hohe Temperaturen, insbesondere hohe Temperaturgradienten kritisch. Dies liegt an den engen axialen und radialen Spalten in denen sich das stabilisierende Luftpolster bildet. Diese Spalte können sich aufgrund von Wärmedehnung schließen, was dazu führt, dass das Luftlager klemmt. Durch die Anordnung von Prüfkammer und Ölkreislauf ist das Luftlager beim Hochgeschwindigkeits-Universalprüfstand auch bei Temperaturen über 170 °C frei drehbar. Darum kann auch unter diesen Bedingungen das Reibmoment gemessen werden.

Reibmoment

Die Reibmomentmessschriebe in **>>9** stammen von einem RWDR aus Fluorkautschuk (FKM) und einer PTFE-Manschette (Dichtringvariante A). Die Umfangsgeschwindigkeit wurde während des Versuches schrittweise von 0,1 m/s bis auf 80 m/s gesteigert. Dies entspricht bei einem Wellendurchmesser von 80 mm Drehzahlen von 119 min^{-1} bis 19.100 min^{-1} . Die Temperatur im Ölsumpf lag bei 170 °C. Während der ersten Stunde wird das Öl von Raumtemperatur aufgeheizt. In dieser Aufheizphase nimmt das Reibmoment aufgrund der Erweichung der Dichtringwerkstoffe und der Verringerung der Ölviskosität ab.

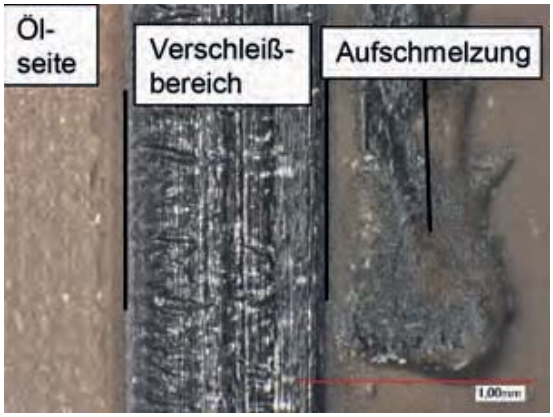
Bei der Ölsumpftemperatur von 170 °C sind Elastomer-RWDR nicht dauerhaft einsetzbar. Das Reibmoment der PTFE-Manschette ist bei diesen Temperaturen niedriger als das des Elastomer-RWDR. Dies liegt an der mit steigender Temperatur weicher werdenden PTFE-Lippe. Dieser Erweichung wirkt der Plastic-Me-



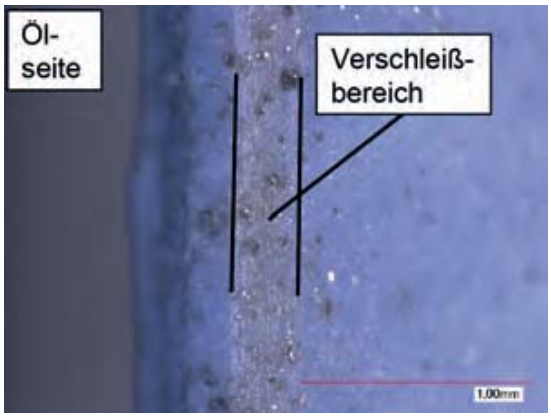
>>10: Reibmomentmessungen bei unterschiedlichen Umfangsgeschwindigkeiten

mory-Effekt entgegen, weshalb die Anpressung der PTFE-Lippe an die Welle auch bei hohen Temperaturen erhalten bleibt [4]. Die Anpressung des RWDR wird durch das Elastomer und eine Spiralfeder erzeugt. Die von der Feder erzeugte Kraft ändert sich bei hohen Temperaturen kaum. Ab 20 m/s Umfangsgeschwindigkeit nimmt das Reibmoment für beide Dichtringe kaum mehr zu.

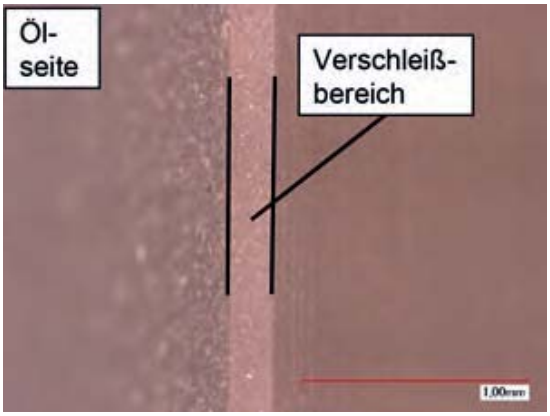
Dieses Verhalten bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten wurde auch in anderen Versuchen im Projekt „PTFE-Dichtungen“ beobachtet. Die Reibmomente der drei Dichtringvarianten A, B und C auf Stahl-Gegenlaufflächen sind in **>>10** zu sehen. Die Ölsumpftemperatur bei diesen Versuchen betrug 120 °C. Das höhere Reibmoment der Dichtringvariante B liegt zum Großteil an der mit durchschnittlich 253 N vergleichsweise hohen Radialkraft. Die Dichtringvarianten A und C haben Radialkräfte von im Schnitt 72 N und 114 N. Ihr Reibmoment ist beinahe identisch. Beim Verlauf der Reibmomente fällt das oben beschriebene Verhalten auf. Das Reibmoment steigt bei Steigerung der Umfangsgeschwindigkeit von 20 m/s auf 30 m/s an, nimmt jedoch bei weiteren Geschwindigkeitssteigerungen wieder ab. Der Effekt der leichten Abnahme oder Stagnation des Reibmomentes ab einer gewissen Geschwindigkeit wurde schon von Bauer [5] und Hoffmann [6] beobachtet. Ein Grund dafür ist die mit steigender Drehzahl höhere Dichtspalttemperatur. Diese führt zu Erweichung der PTFE-Lippe und zur Verringerung der Ölviskosität im Dichtspalt.



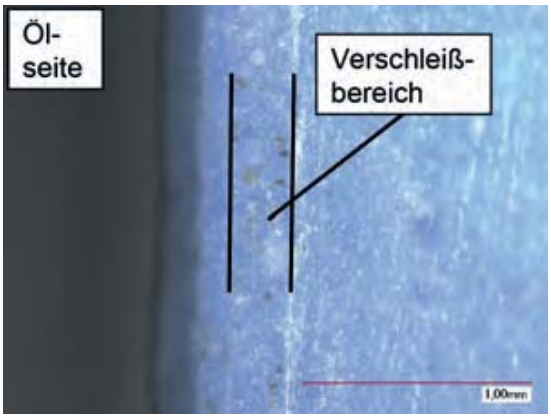
>>11: RWDR bis 80m/s – 170°C – 6h



>>12: PTFE bis 80m/s – 170°C – 6h



>>13: RWDR 20 m/s – 120 °C – 6 h

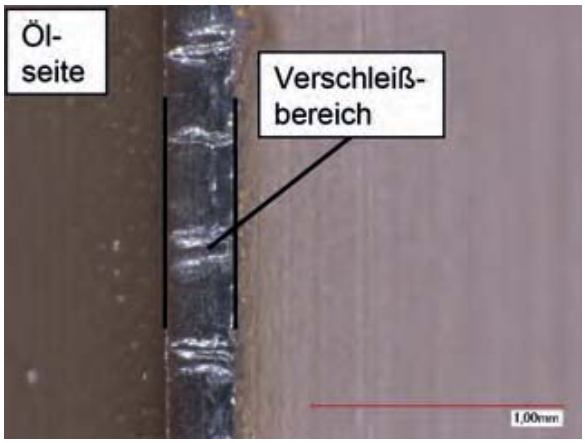


>>14: PTFE 20 m/s – 120 °C – 6 h

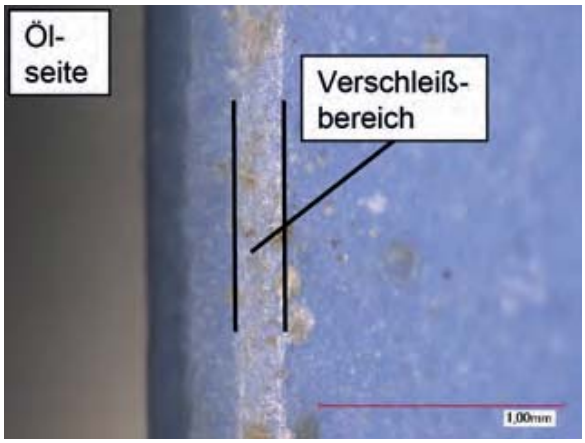
Verschleiß

>>11, 12 zeigen den Verschleiß der Dichtringe aus den in **>>9** gezeigten Reibmomentmessläufen. Der Elastomer-RWDR wurde bei den Versuchsbedingungen stark geschädigt, es kam sogar zu partiellen Aufschmelzungen des Werkstoffes. Die aufgeschmolzenen Elastomer-Partikel haben sich an der Luftseite der Dichtkante abgelagert **>>11**. Der in **>>12** dargestellte Verschleiß der PTFE-Manschette ist selbst bei diesen Bedingungen gering.

In **>>13, 14** sind die Verschleißbereiche der Dichtringe aus den Referenzläufen des Forschungsprojektes zu sehen. Die Umfangsgeschwindigkeit betrug 20 m/s, die Ölsumpftemperatur 120 °C, die Laufzeit war mit 6 h identisch mit den zuvor gezeigten Versuchen. Bei diesen Bedingungen und der kurzen Laufzeit ist der Elastomer-RWDR kaum verschlissen und zeigt keine Schädigung. Die PTFE-Manschette ist ebenfalls nur gering verschlissen.



>>15: RWDR 20 m/s – 120 °C – 240 h



>>16: PTFE 20 m/s – 120 °C – 240 h
(Bilder: Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart (IMA))

>>15, 16 zeigen die Verschleißbreiten nach Versuchsläufen bei identischen Versuchsbedingungen wie zuvor (20 m/s, 120°C), jedoch längerer Laufzeit von 240 h. Bei dieser Versuchsdauer wurde der Elastomer-RWDR stark angegriffen und auf der verhärteten Dichtkante treten axiale Risse auf. Die PTFE-Manschette ist auch bei dieser Laufzeit nur gering verschlissen.

Der Vergleich der Verschleißbilder zeigt, dass für Dichtringe aus Elastomer chemisch-thermische Schädigung im Grenzbereich nicht schlagartig geschieht, sondern eine gewisse „Einwirkzeit“ benötigt. Damit wird der Nachteil dieses Werkstoffes deutlich. Es besteht die Gefahr, dass Elastomer-RWDR nach einer gewissen Zeit spontan ausfallen, wenn das Material zu stark geschädigt ist und die Rückförderwirkung nicht mehr funktioniert. Dieser Fall kann bei verhärteten Dichtkanten wie in **>>15** eintreten. PTFE-Dichtungen hingegen haben einen kontinuierlichen, vorhersehbaren Verschleiß über der Laufzeit. Es kommt aufgrund der herausragenden Materialeigenschaften auch bei extremen Temperaturen und Geschwindigkeiten nicht zu chemisch-thermischer Schädigung wie bei Elastomeren. Dadurch kommt es nicht zu unvorhersehbaren Spontanausfällen aufgrund von zeit- und belastungsabhängiger Materialschädigung. Aus diesen Gründen müssen Dichtringe aus Elastomer auf ihre Eignung mit den jeweiligen Fluiden getestet werden. Dies ist besonders in Kombination mit modernen, hochadditivierten Ölen notwendig, um chemische Inkompatibilität auszuschließen. Bei PTFE-Dichtungen kann eine chemische Inkompatibilität aufgrund der Materialeigenschaften nahezu ausgeschlossen werden.

Fazit und Ausblick

Im aktuellen Forschungsprojekt „PTFE-Dichtungen“ wird eine Vielzahl an Dichtsystemen bei außergewöhnlichen Betriebsbedingungen untersucht. Im Gegensatz zu Elastomer-RWDR ist über PTFE-Dichtungen nur wenig frei verfügbares Wissen vorhanden. Mit Kenntnis der Einsatzgrenzen können PTFE-Dichtungen jedoch als Bindeglied im Grenzbereich zwischen Elastomer-RWDR und Gleitringdichtungen fungieren. Ein speziell für diese Anforderungen ausgelegter Prüfstand wurde aufgebaut und vorgestellt. Es wurden Reibmomentmessungen bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass das Reibmoment bei Umfangsgeschwindigkeiten höher als 30 m/s wieder leicht abfällt. Exemplarisch wurden PTFE-Dichtungen und Elastomer-RWDR hinsichtlich der Schädigung bei unterschiedlichen, hohen Beanspruchungen verglichen. Hier traten die Vorteile der sehr guten chemischen und thermischen Beständigkeit von PTFE hervor.

Im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes „PTFE-Dichtungen“ werden 14 weitere Varianten von Dichtringen untersucht. Davon sind zwölf PTFE-Dichtungen und zwei RWDR aus Elastomer. Die PTFE-Dichtungen haben zum Großteil andere Geometrien als die drei zuvor gezeigten PTFE-Manschetten. Die Elastomer-RWDR dienen als Referenz-Dichtringe. Die Versuche mit diesen 14 Dichtringvarianten werden auf den Stahl-Referenzwellen durchgeführt.

Das IGF-Vorhaben 17574 N/1 des Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie auf-grund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

[1] Müller, H.K.: Abdichtung bewegter Maschinenteile, Waiblingen: Medienverlag Ursula Müller, 1990, ISBN: 392048400

[2] Kammüller, M.: Zum Abdichtverhalten von Radialwellendichtringen. Dissertation, Universität Stuttgart, 1986, ISBN: 3921920191

[3] Gölz, J.; M., Bauer, F.; Haas, W.: Wear and Friction of PTFE Seals, 19th International Colloquium Tribology, Ostfildern-Nellingen, 21.-23. Januar 2014, Book of Synopses 2014, W. J. Bartz (Hrsg.) – TAE Esslingen, S. 182, ISBN: 9783943563108

[4] Wüstenhagen, G., Müller, H. K: Plastic-Memory-Effekt contra Wärmedehnung bei Dichtungen, Antriebstechnik 32 (1993) Nr. 6, S. 61 – 63

[5] Bauer, F.: PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille - Analyse, Funktionsweise und Erweiterung der Einsatzgrenzen, Dissertation Universität Stuttgart, 2008, ISBN: 3939100276

[6] Hoffmann, C.: Untersuchungen an PTFE-Wellendichtungen, Dissertation Universität Stuttgart, 1995, ISBN: 3921920612