

Berger/Kiefer (Hrsg.)

DICHTUNGS TECHNIK

JAHRBUCH 2017

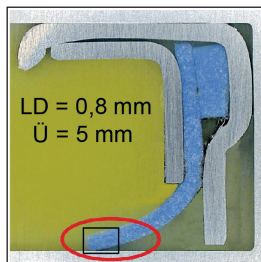
ISGATEC®

Wellendichtringe aus PTFE-Compound – ein Werkstoff mit besonderem Betriebsverhalten

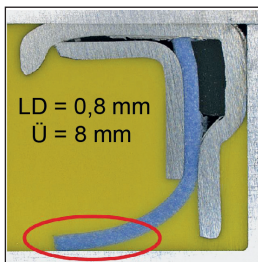
In der industriellen Praxis werden zum Abdichten von Wellen überwiegend Elastomer-Radialwellendichtringe (RWDR) eingesetzt. Ihr großer Vorteil ist, dass sich ein aktiver Rückfördermechanismus ausbildet, wodurch sie zuverlässig funktionieren [1, 2]. Der Trend geht allerdings zu immer höheren Anforderungen. Diese können oft nicht mehr durch gängige Dichtlösungen beherrscht werden. Die Einsatzgrenzen von Elastomeren werden häufig aufgrund von thermischen oder chemischen Beanspruchungen überschritten. Individuelle Sonderkonstruktionen sind konstruktiv sowie finanziell aufwändig, weshalb eine einfache Dichtlösung notwendig ist. Eine Alternative bietet der Hochleistungskunststoff Polytetrafluorethylen, kurz PTFE, was aktuelle Untersuchungen zeigen.

PTFE besticht durch seine ausgezeichnete chemische Beständigkeit, sein günstiges Reibverhalten und durch seine hohe thermische Belastbarkeit bis über 200 °C [3]. Dichtelemente aus PTFE-Compound, hier einfach als PTFE-Dichtringe bezeichnet, können somit die Lösung sein, wenn der Einsatz von gängigen RWDR nicht mehr möglich ist. Von der Chemie- und Lebensmittelindustrie bis hin zum Fahrzeug- und Maschinenbau gibt es eine Vielzahl von Einsatzbereichen. Aktuell kann im Vergleich zu Dichtungen aus Elastomerwerkstoffen aber nur auf wenig publiziertes Fachwissen zurückgegriffen werden. Das Potenzial und die Notwendigkeit in der industriellen Praxis für einfach anzuwendende, günstige und platzsparende Dichtungskonzepte ist beträchtlich, weshalb über PTFE-Dichtringe geforscht wird. Das PTFE-Compound zeigt dabei besondere Eigenschaften, welche für eine zuverlässige Auslegung zu berücksichtigen sind. Hierzu werden Untersuchungsergebnisse zum Verlauf der Radialkraft und des Reibmomentes sowie zur kritischen Geschwindigkeit von PTFE-Dichtringen vorgestellt.

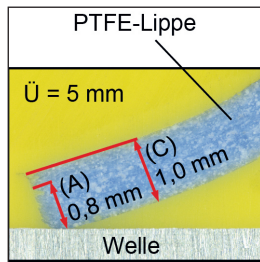
Von M. Sc. Felix Schiefer, Dipl.-Ing. Jan Götz, Dr.-Ing. Frank Bauer,
Professor Dr.-Ing. habil. Werner Haas
Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart | www.ima.uni-stuttgart.de



>>1: Dichtring A



>>2: Dichtring B

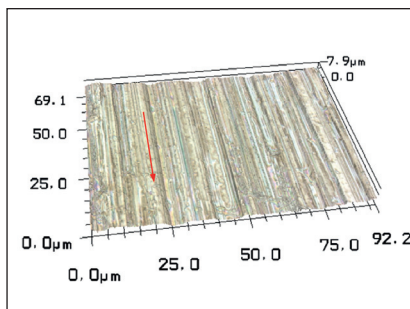


>>3: Dichtring A und C

Untersuchungsobjekte und -bedingungen

Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchungen sind drei Varianten von PTFE-Dichtringen gleichen Compounds, die sich allerdings in ihren geometrischen Ausführungen unterscheiden. Nachfolgend werden die Varianten als A, B und C bezeichnet. Querschnittsbilder im montierten Zustand sind in >>1, 2

und 3 dargestellt. Dabei wird die PTFE-Lippe zwischen zwei Ringen aus Edelstahl fixiert. Im Vergleich zu Dichtringvariante A hat B die gleiche Lippendicke (LD) von 0,8 mm, allerdings eine größere Überdeckung (Ü), siehe rot umkreisten Bereich. Die Überdeckung ist dabei definiert als Wellendurchmesser minus Innendurchmesser der unbelasteten PTFE-Lippe (\varnothing der glatten Ringscheibe). Somit liegt Dichtring B deutlich flacher und mit einem größeren Berührbereich an der Welle an. Dichtring C hat eine identische Überdeckung wie A, jedoch mit 1 mm eine größere Lippendicke, was zur Verdeutlichung in >>3 vergrößert dargestellt ist.



>>4: Wellenoberfläche

Die Dichtringe laufen in den Versuchen jeweils auf Stahlwellen mit 80 mm Außendurchmesser, welche drallfrei im Einstich geschliffen wurden und die Normen DIN 3760 und DIN 3761 für Radialwellendichtringe erfüllen. Für jeden Versuchslauf wird eine neue Laufspur auf der Welle verwendet. In >>4 ist eine Lasermikroskop-Aufnahme der Stahlwelle dargestellt, die typische Schleifstruktur ist erkennbar. Der rote Pfeil zeigt die Umfangsrichtung der Welle an. Die durchschnittlichen Rauheitskennwerte betragen $R_z = 2,19 \mu\text{m}$, $R_a = 0,28 \mu\text{m}$ und $R_t = 2,74 \mu\text{m}$.

Öleigenschaften	Öl mit niedriger Viskosität	Öl mit hoher Viskosität
Dichte ρ bei 15 °C	-	1.060 kg/m ³
Dichte ρ bei 40 °C	828 kg/m ³	-
kinematische Viskosität ν bei 40 °C	67,6 mm ² /s	220,0 mm ² /s
kinematische Viskosität ν bei 100 °C	11,9 mm ² /s	40,0 mm ² /s

>>5: Ölkennwerte

Für die Untersuchungen wurden zwei unterschiedliche Öle, eins mit niedriger und eins mit hoher Viskosität verwendet >>5.

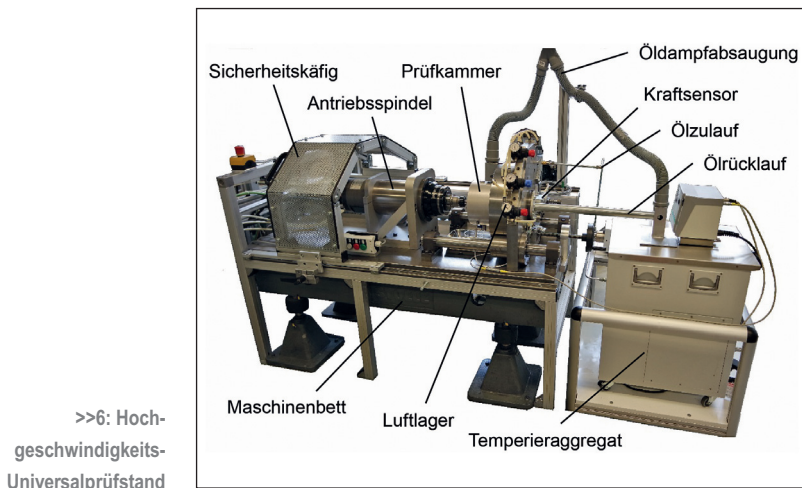
Die Reibmomentmessungen lassen sich in Referenz-, Exzentrizitäts- und Sonderversuche einteilen. Dabei unterscheiden sich die Versuchsparameter bezüglich der Ölsumpftemperatur, Ölviskosität, Exzentrizität und Umfangsgeschwindigkeit. Die Lastkollektive können je nach durchgeführtem Versuch variieren. Die Dauer der Referenzversuche erstreckt sich über 8 h und 6 min bei 120 °C Ölsumpftemperatur, mit einer stündlich steigenden Umfangsgeschwindigkeit. Der Bereich der Umfangsgeschwindigkeit erstreckt sich von 4 bis 33 m/s. Das Lastkollektiv der Exzentrizitätsversuche ist identisch mit denen der Referenzversuche, allerdings mit einer dynamischen Exzentrizität der Welle von 0,1 mm und 0,3 mm.

Für eine größere Aussagefähigkeit der Ergebnisse werden bei den Sonderversuchen gezielt Parameter stichprobenartig variiert. So werden z.B. Reibmomentmessungen bei erweiterten Umfangsgeschwindigkeiten von 0,1 bis 63 m/s und mit einer niedrigeren Ölsumpftemperatur von 70 °C durchgeführt. Bei den hier vorgestellten Ergebnissen liegt der Schwerpunkt auf den Referenz- und Sonderversuchen.

Das PTFE-Compound kann bei den untersuchten Temperaturen und den durch die Reibung zusätzlich entstehenden Wärmeeintrag problemlos eingesetzt werden.

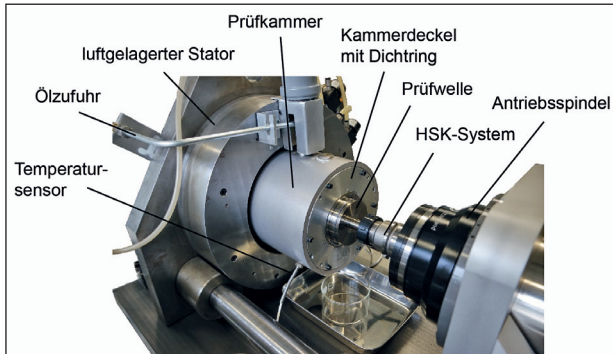
Hochgeschwindigkeits-Universalprüfstand

Zur Reibmoment- und Leckagemessung von Dichtungen steht ein eigens konstruierter Hochgeschwindigkeits-Universalprüfstand zur Verfügung. Der Prüfstand ist in >>6 zu sehen und besteht im Wesentlichen aus einer leistungsstarken Antriebsspindel, einer Prüfkammer, einem Kraftsensor, einem externen Temperieraggregat sowie einer Ölförderpumpe. Hiermit sind Reibmomentmessungen mit

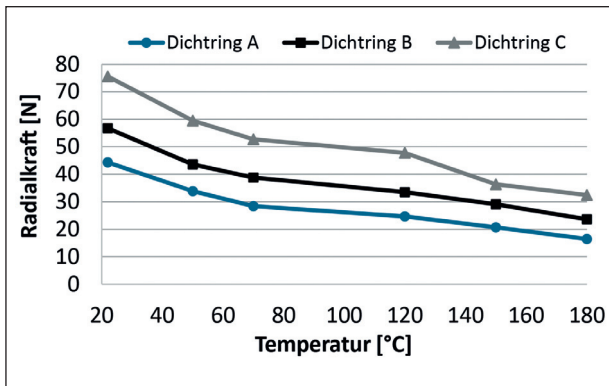


Drehzahlen bis zu 24.000 min^{-1} und Ölsumpftemperaturen von -20 bis $180 \text{ }^\circ\text{C}$ möglich. Der Prüfstand ist durch seinen Aufbau und den großen Messbereichen universell einsetzbar. Das temperierte Öl wird über einen offenen Kreislauf berührungsfrei von oben in die Prüfkammer gepumpt. Durch den offenen Kreislauf sind keine Anschlussleitungen an der Prüfkammer notwendig. Das Reibmoment kann somit unbeeinflusst exakt gemessen werden. Erreicht der Ölpegel die Wellenmitte, fließt das Öl wieder zurück in das Temperieraggregat. Die im dynamischen Betrieb entstehende Reibung im Dichtkontakt bewirkt ein Moment, das sich über die luftgelagerte Prüfkammer an einem Kraftsensor abstützt. Aus Abstützkraft und Hebelarm wird das Reibmoment des Dichtsystems ermittelt und aufgezeichnet. Die bei hohen Öltemperaturen entstehenden Öldämpfe werden über eine Absaugung am Einlauf der Prüfkammer und an der Mündung des Rücklaufs zum Temperieraggregat abgesaugt. Zur Minimierung von Störeinflüssen, steht das schwere Maschinenbett auf vibrationsdämpfenden Füßen.

Den montierten Zustand mit eingepresstem Dichtring im Kammerdeckel sowie der Welle zeigt >>7. Hierbei ist die Welle mit der Spindel über eine Spannzange mit Hohlchaftkegel (HSK) verbunden. Der kegelförmige Verlauf mit axialer Anschlagfläche der HSK-Schnittstelle garantiert ausgezeichneten Rundlauf und wird üblicherweise in Werkzeugmaschinen verwendet. Das Fixieren und Auswerfen des HSK-Systems geschieht hydraulisch. Die Ölsumpftemperatur wird über zwei in die Prüfkammer hineinragende Temperatursensoren gemessen.



>>7: Prüfkammer im montierten Zustand



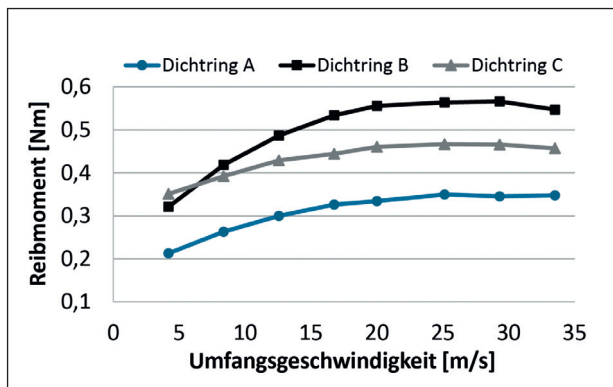
>>8: Gemittelte Radialkraft bei 22 °C bis 180 °C

Radialkraft

Die Radialkraft der Dichtringe wurde sowohl bei Raumtemperatur (ca. 22 °C) als auch bei 50 °C, 70 °C, 120 °C, 150 °C und 180 °C gemessen. Der Dichtring wird dazu auf einer Welle mit Nenndurchmesser bei Raumtemperatur 48 h und anschließend im Ofen jeweils 2 h pro Temperaturstufe ausgelagert. Für die Radialkraft werden bei jedem Dichtring am Umfang verteilt vier Messungen durchgeführt und gemittelt >>8. Dichtring A hat mit einer geringen Überdeckung und kleiner Lippendicke die niedrigste Radialkraft. Mit steigender Überdeckung nimmt die Radialkraft zu, was sich bei Dichtring B zeigt. Besonders großen Einfluss auf die Radialkraft hat die Lippendicke, siehe Dichtring C.

Um die Dichtfunktion sicherzustellen, ist eine ausreichend hohe Radialkraft notwendig. Wird diese nicht erreicht, ist Leckage möglich. Die drastische Abnahme der

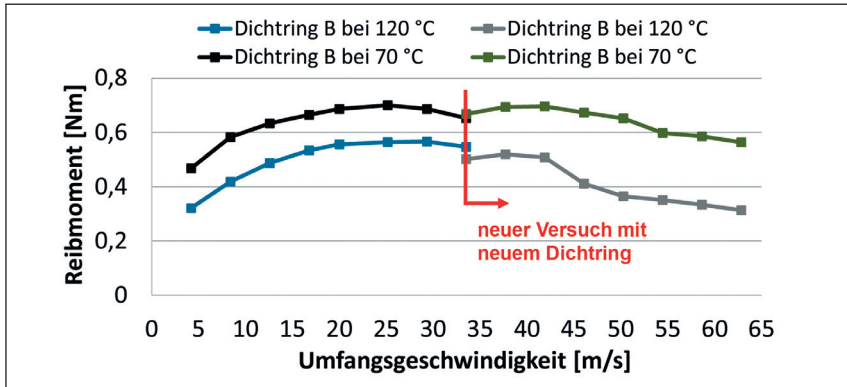
>>9: Reibmomente der Referenzversuche



Radialkraft mit steigender Temperatur einerseits und die temperaturbedingte Abnahme der Ölviskosität andererseits begünstigen Leakage. Der Plastic-Memory-Effekt kann diesem Verhalten, der mit zunehmender Temperatur weicher werdenden PTFE-Lippe, teilweise entgegenwirken [4]. Für eine praxisnahe Auslegung ist deshalb die stark temperaturbedingte Radialkraftabnahme zu berücksichtigen.

Reibmoment

Die jeweils aus zwei Referenzversuchsläufen gemittelten Reibmomente von Dichtring A, Dichtring B und Dichtring C sind in >>9 dargestellt. Die Untersuchungen zeigen, dass zu Beginn das Reibmoment mit steigender Umfangsgeschwindigkeit zunimmt. Durch weitere Steigerung der Umfangsgeschwindigkeit ergeben sich ein Reibmomenthochpunkt und darauffolgend sogar eine Reibmomentabnahme. Bereits von Bauer [5] und Hoffmann [6] wurden die Stagnation oder Verringerung des Reibmomentes bei bestimmten Umfangsgeschwindigkeiten festgestellt. Dichtring A hat das geringste Reibmoment, Grund hierfür ist die niedrigste Radialkraft. Die Reibmomentverläufe von Dichtring A und Dichtring C sind etwa parallel. Dies kann auf die gleiche Überdeckung und damit sehr ähnliche Anlage an die Welle zurückgeführt werden. Allerdings führt die größere Lippendicke und somit höhere Radialkraft von Dichtring C zu einem größeren Reibmoment. Neben der Radialkraft hat auch die Überdeckung Auswirkungen auf das Reibmoment, was sich bei Dichtring B zeigt. Die größere Überdeckung ergibt eine breitere Anlage der Dichtlippe an die Welle und einen längeren sowie engeren Keilspalt, wodurch mehr Fluid im Dichtbereich gesichert wird. Ab einer Umfangsgeschwindigkeit von ca. 8 m/s ist das Reibmoment von Dichtring B trotz deutlich geringerer Radialkraft höher als bei Dichtring C. Der Einfluss der Scher-

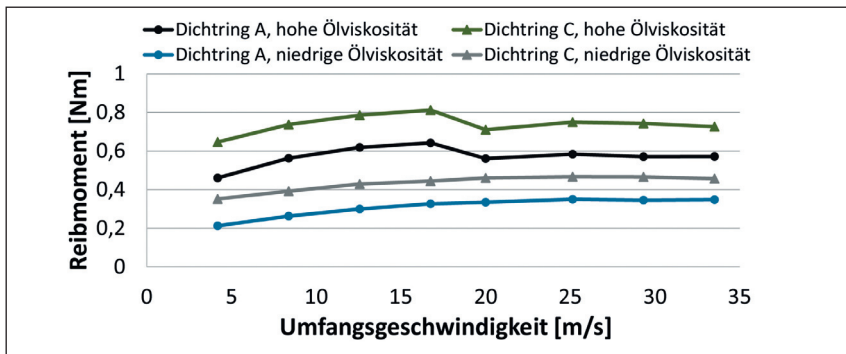


>>10: Reibmomente der Sonderversuche

kraft auf das Reibmoment ist linear von der Umfangsgeschwindigkeit abhängig. Bei niedrigen Umfangsgeschwindigkeiten ergibt sich ein geringer, bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten ein größerer Einfluss auf das Reibmoment. Der Anstieg der Reibmomentkurve ist demzufolge steiler.

Die Ergebnisse der Sonderversuche mit höheren Umfangsgeschwindigkeiten und einer Ölsumpftemperatur von 120 °C sowie 70 °C sind von Dichtring B in >>10 dargestellt. Eine niedrigere Ölsumpftemperatur führt zu einem höheren Reibmoment, da einerseits eine höhere Ölviskosität und andererseits eine größere Radialkraft der Dichtringe vorliegen. Bei etwa 34 m/s ist der Reibmomentverlauf unstetig. Dies ist versuchsbedingt. Für die Versuchsläufe von 34 m/s bis 63 m/s wurden neue Dichtringe verwendet. Diese sind natürlich nicht genau gleich wie die bereits gelaufenen, was zu unterschiedlichen Reibmomenten führt. Grundsätzlich kann sich das Reibmoment zu Beginn (Einlaufphase) noch vergleichsweise stark ändern. Das Reibmoment nimmt für höhere Umfangsgeschwindigkeiten immer weiter ab. Das Reibmoment nimmt dabei so weit ab, dass für die Versuchsläufe mit 120 °C Ölsumpftemperatur das Endreibmoment (bei 63 m/s) vergleichbar mit dem Anfangsreibmoment (bei 4 m/s) ist. Allerdings mit dem entscheidenden Unterschied, dass es bei 63 m/s deutlich Leakage gibt und bei 4 m/s kaum oder keine Leakage vorhanden ist. Die Gründe dafür sind der dickere Ölfilm infolge „guter“ Hydrodynamik und das dünnflüssigere Öl infolge höherer Temperatur.

Die Ergebnisse der Reibmomentversuche mit zwei unterschiedlichen Ölen sind in >>11 dargestellt. Mit höherer Ölviskosität ist der Reibmenthochpunkt stärker

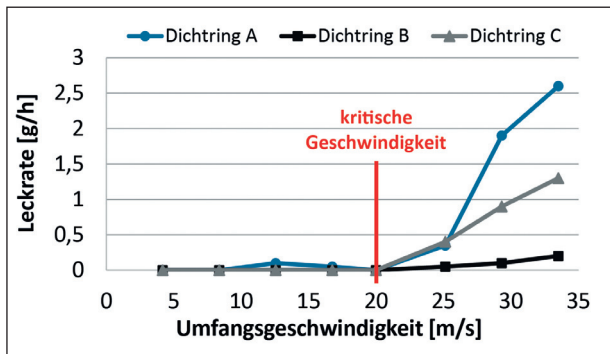


>>11: Reibmomente der Sonderversuche mit hoher Ölviskosität

ausgeprägt und tritt bei niedrigeren Umfangsgeschwindigkeiten auf. Versuchsläufe, bei welchen die Umfangsgeschwindigkeit erst gesteigert und darauffolgend wieder reduziert wurde, bestätigten, dass der Reibmomenthochpunkt reversibel ist. Ebenso wie bei den Referenzversuchen >>9 verläuft das Reibmoment von Dichtring A und Dichtring C bei hoher Ölviskosität parallel. Das Niveau des Reibmomentes hängt folglich von der Radialkraft ab.

Leckage

Die Leckraten in Gramm pro Stunde zeigt >>12 in Abhängigkeit der Umfangsgeschwindigkeit. Für alle Dichtringvarianten gilt, dass ab einer kritischen Umfangsgeschwindigkeit von ungefähr 20 m/s mit einem deutlichen Anstieg der Leckrate zu rechnen ist [7]. Wird hierzu das Reibmoment betrachtet, so zeigt sich, dass ab dieser Umfangsgeschwindigkeit nicht mehr mit einem signifikanten Anstieg des Reibmoments zu rechnen ist. Die Referenzversuchsläufe haben gezeigt, dass der Reibmomenthochpunkt etwa bei 25 m/s (siehe >>9) liegt. In diesem Bereich nimmt die Leckage signifikant zu. Die Dichtring- und Wellenoberfläche ist nie völlig glatt, sondern zeichnet sich durch viele Rauheitserhebungen aus. Im dynamischen Betrieb bildet sich durch die Schlepplösung an den jeweiligen Flanken einer Rauheitserhebung ein Druckfeld aus. Mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit verstärken sich die vielen Druckfelder, der Dichtkontakt wird entlastet und die Dichtlippe kann abheben. Ab einer kritischen Umfangsgeschwindigkeit nimmt die Spalthöhe zu, wodurch es verstärkt zu Leckage kommt und das Reibmoment abnimmt. Dabei zeigt Dichtring A mit der geringsten Radialkraft und einem kurzen Berührungsbereich auch die größten Leckraten. Interessant sind die vergleichsweise geringen Leckraten von Dichtring B. Dieser Sachverhalt hat sich auch bei weiterführenden



>>12: Leckraten der Referenzversuche

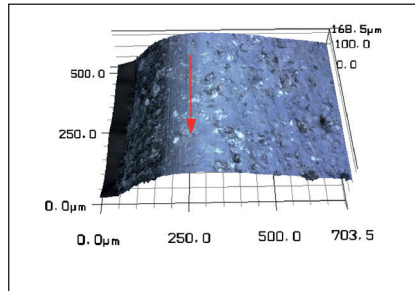
Versuchen gezeigt. Hierbei wirkt sich der breitere Berührungsbereich infolge größerer Überdeckung positiv auf die Dichtfunktion aus. Ein längerer Spalt hat eine größere Drosselwirkung als ein kurzer. Versuche mit erhöhter Ölviskosität (siehe >>11) oder einer dynamischen Exzentrizität der Welle führten zu geringerer kritischer Geschwindigkeit und zu größeren Leckraten. Unter diesen Bedingungen erhöht sich die Spalthöhe früher und wird größer. Da die mittlere Spalthöhe sehr gering ist (um 1 μm) und sich mit dritter Potenz auf die Leckrate auswirkt, bewirken selbst äußerst geringe Spalthöhenänderungen große Leckratenänderungen.

Verschleiß

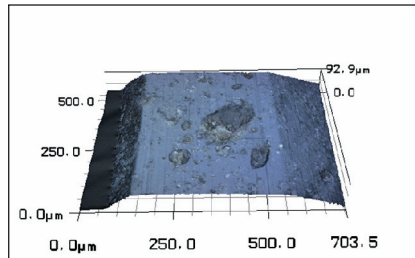
Die Oberflächenstruktur der PTFE-Dichtringe wurde durch ein Lasermikroskop mit großer Auflösung und Tiefenschärfe betrachtet und charakterisiert. >>13 bis >>15 zeigen die Dichtkante des Dichtrings A im Neuzustand sowie nach den Reibmomentuntersuchungen. Der rote Pfeil zeigt die Umfangsrichtung an. Die durch die Reibmomentuntersuchungen entstehende Verschleißbreite der Dichtlippe ist deutlich erkennbar. Zur Verbesserung der Verschleißbeständigkeit sind im verwendeten PTFE-Compound Mikroglasskugeln eingebracht. Die sichtbaren kreisförmigen Ausbrüche können durch Abtragungen der Mikroglasskugeln entstehen. Ausgelöste und zwischen der Dichtlippe und Wellenoberfläche mitgeschleppte Partikel fördern den Verschleiß von Dichtring und Welle. Messungen ergaben maximale Kratertiefen im PTFE-Compound von über 38 μm . Besonders negativ für die Dichtfunktion sind wie in >>15 ersichtlich, rissähnliche Oberflächenstrukturen senkrecht zur Drehrichtung. Die in den Spalten wirkenden Kapillarkräfte erhöhen die Leckage. Im dynamischen Betrieb können solche Strukturen auch makroskopisch eine Förderwirkung ausbilden.

Zusammenfassung

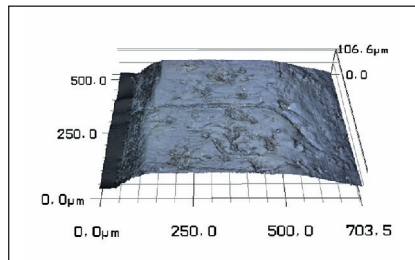
Im Vergleich zu Elastomer-RWDR kann bei PTFE-Dichtringen auf wenig publiziertes Fachwissen zurückgegriffen werden. Fundiertes Wissen über das Einsatzverhalten ist für eine sichere praxisrelevante Auslegung aber essentiell. Bei den hier vorgestellten Reibmomentuntersuchungen wurden drei unterschiedliche PTFE-Dichtringe mit verschiedenen Lastkollektiven und Betriebsbedingungen untersucht. Verwendet wurde ein leistungsstarker Hochgeschwindigkeits-Universalprüfstand. Die Umfangsgeschwindigkeit wurde von 4 m/s bis 63 m/s variiert. Dabei zeigt sich bei allen Dichtringvarianten ein ähnlicher Verlauf des Reibmoments mit einem Reibmomenthochpunkt und nachfolgender Reibmomentabnahme trotz steigender Umfangsgeschwindigkeit. Bei Untersuchungen mit erhöhter Ölviskosität oder dynamischer Exzentrizität wandert der Reibmomenthochpunkt zu niedrigeren Umfangsgeschwindigkeiten. Bei gleicher Überdeckung der Dichtringe ist das Reibmoment umso höher, je größer die Radialkraft der Dichtringe ist. Dabei ist die Radialkraft wiederum stark temperaturabhängig und wird mit steigender Temperatur geringer. Durch eine größere Überdeckung ergibt sich eine breitere Anlage der Dichtlippe an die Welle sowie einen längeren und engeren Keilspalt, wodurch mehr Fluid im Dichtbereich gesichert wird. Hierdurch steigt ebenfalls das Reibmoment. Ab einer kritischen Umfangsgeschwindigkeit, die im Bereich des Reibmomenthochpunktes liegt, steigt die Leckrate deutlich an. Für Auslegungen in der Praxis ist der Bereich ab der kritischen Umfangs-



>>13: Dichtring A, Neuzustand



>>14: Dichtring A mit Ausbrüchen, gelaufen



>>15: Dichtring A mit rissähnlichen Strukturen, gelaufen (Bilder: Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart)

geschwindigkeit, aufgrund der hohen Leckraten, zu vermeiden. Weiterführende Untersuchungen zeigten, dass bei sehr großen Umfangsgeschwindigkeiten eine Abnahme der Leckrate auf einen vergleichsweise niedrigen Wert vorkommen kann. Grund hierfür könnten sich bildende Ölverwirbelungen sein, die drosselnd wirken. Dieser Sachverhalt bedarf weiterer Untersuchungen.

Exemplarisch wurden Lasermikroskopaufnahmen der untersuchten PTFE-Dichtlippen mit Schädigungen dargestellt. Axiale Strukturen/Risse können die Dichtwirkung negativ beeinflussen. Die vorgestellten Untersuchungen ermöglichen ein besseres Verständnis der Funktion von PTFE-Dichtringen. Weitere wesentliche Erkenntnisse zur Funktion und zum Verhalten von Dichtsystemen mit Dichtelementen aus PTFE-Compound wurden im Forschungsprojekt „PTFE-Dichtungen“ erarbeitet [8].

Literatur

- [1] Müller, H. K.: Abdichtung bewegter Maschinenteile, Medienverlag Ursula Müller, Waiblingen, 1990, ISBN: 392048400
- [2] Kammüller, M.: Zum Abdichtverhalten von Radialwellendichtringen, Dissertation, Universität Stuttgart, 1986, ISBN: 3921920191
- [3] Baur, E.; Brinkmann, S.; Osswald, T.; Schmachtenberg, E.: Saechtling Kunststoff, Taschenbuch, 30. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2007, ISBN: 9783446403529
- [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
- [7] Schiefer, F.: Experimentelle Untersuchung des Reibmomentes von PTFE-Manschettendichtungen bei Variation von Temperatur, Exzentrizität und Ölviskosität, Masterarbeit, Universität Stuttgart, 2015, unveröffentlicht
- [8] Götz, J.: PTFE-Dichtungen – Wellendichtungen aus PTFE-Compounds für außergewöhnliche Betriebsanforderungen, FKM-Abschlussbericht, Universität Stuttgart, 2016