

Berger/Kiefer (Hrsg.)

DICHTUNGS TECHNIK

JAHRBUCH 2016

ISGATEC®

Be- und Verarbeitung



>> Exakt nach Ihren Bedürfnissen – Das STM Baukastensystem ermöglicht es Ihre Wasserschneidanlage genau an Ihre Wünsche und Anforderungen anzupassen.

Energieeinsparung durch plasmapolymere Beschichtung auf Wellendichtungen

Die Energieeinsparung im Antriebsstrang ist von bedeutendem Interesse, um die laufende Reduzierung der CO₂-Grenzwerte in Pkw zu erreichen. Zusätzlich werden auch in anderen Industriebereichen wie Windenergie, hydraulischen und pneumatischen Anwendungen ein verbesserter Verschleißschutz und eine reduzierte Reibung benötigt. Plasmapolymere Beschichtungen reduzieren bei FKM-Radialwellendichtungen das Drehmoment sowohl im geschmierten als auch im trockenen Kontakt und tragen damit zu Energieeinsparungen bei. Die tribologische Verbesserung von Dichtungen ist zu geringen Gesteuerungskosten unter Verwendung der plasmaunterstützten chemischen Gasphasenabscheidung (PECVD) verfügbar. Damit ist die Beschichtung von komplexen 3D-Geometrien möglich. Einfach handhabbare Warenträger wurden entwickelt, sodass geringe Produktionskosten sowie homogene Schichteigenschaften auch hinsichtlich Qualitätsmanagement erzielt werden.

Die tribologischen Eigenschaften von Elastomeren sind von entscheidendem Interesse für verschiedene industrielle Produkte wie Dichtringe oder andere elastomere Bauteile. Die reduzierte Reibung von Dichtringen in automobilen Anwendungen führt zur Reduzierung von CO₂-Emissionen aufgrund der Energieeinsparung. Ebenfalls ist es für manche Anwendungen aufgrund der Reinheit wünschenswert, auf Fett- oder Ölschmierung zu verzichten. Ein anderer Grund kann die Wirtschaftlichkeit sein. Die untersuchten plasmapolymere Beschichtungen sind geeignet, alle diese Anforderungen zu erfüllen. Die aufgetragenen Schichten realisieren geringe Reibung in Kombination mit einer erhöhten Verschleißbeständigkeit bei geringen Kosten. Untersuchungen bezüglich trockener und geschmierter Reibung auf flachen Elastomersubstraten sowie Radialwellendichtungen mit plasmapolymere Beschichtung wurden durch die Autoren in der Vergangenheit veröffentlicht [1, 2, 3, 4, 5]. Für die entwickelte chemische Zusammensetzung der plasma-

Von Dr. Dominik Paulkowski, Dr. Klaus Vissing, M.Sc. Stefanie Karpinski
Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Bremen |
www.ifam.fraunhofer.de

Der Beitrag wurde erstmals auf der 18th ISC 2014 veröffentlicht.

Name	Anmerkung	Basisöl	Kinematische Viskosität @ 40 °C [mm ² /s]	Kinematische Viskosität @ 100 °C [mm ² /s]
Modellöl 02	Basisöl, polar	PG	51,8	10,7
Modellöl 03	Basisöl, unpolar	PAO	55,5	9,0
Modellöl 04	Modellöl 03 mit Friction Modifier GMO	PAO	54,9	8,9
Getriebeöl 2	Serienachsgetriebeöl, voll additiviert	PAO	86,2	12,3
Getriebeöl 21	Getriebeöl 2 mit geringerer Viskosität	PAO	54,5	9,0
Getriebeöl 22	Getriebeöl 2 mit weiter verringerter Viskosität	PAO	40,8	7,2

>>1: Verwendete Schmierstoffe

polymeren Beschichtung zur Reibungsreduzierung von Kunststoff und elastomeren Materialien wurde ein Patent erteilt [6].

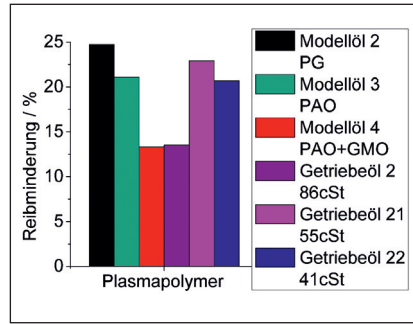
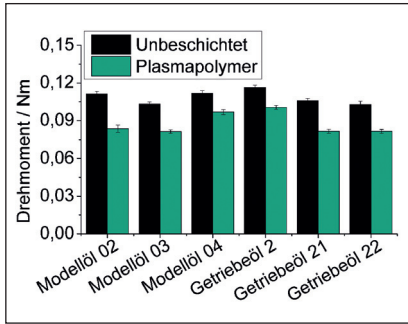
Experimentelle Beschreibung

Substrat Vorbereitung

Als Substrate wurden Radialwellendichtringe aus Fluorkautschuk (FKM) sowie Plattenmaterial aus Acrylatkautschuk (ACM) mit jeweils einer 75-Shore-A Härte verwendet. Die Radialwellendichtringe wurden für eine Antriebswelle mit einem Durchmesser von 35 mm hergestellt. Um Unterschiede im Einlaufverhalten zu vermeiden, wurden die Dichtkanten als erste Maßnahme per Drehmeißel auf einen Dichtkantenradius von 150 µm gebracht. Das Plattenmaterial hatte eine Dicke von 2 mm. Die Proben wurden vor der Beschichtung in einer nass-chemischen Lösung in einem Ultraschallbad bei 60 °C gereinigt.

Schichtherstellung

Die so bearbeiteten Radialwellendichtringe wurden mit einer ungefähr 1 µm dünnen plasmapolymere Beschichtung ($\text{SiO}_x\text{C}_y\text{H}_z$) versehen. Das Plattenmaterial wurde 2,1 µm dick beschichtet. Die Schicht wurde mit Hilfe der plasmaunterstützten chemischen Gasphasenabscheidung (PECVD) unter Verwendung von Sauerstoff (O_2) und Hexamethyldisiloxan (HMDSO) abgeschieden. Das Mischungsverhältnis der Prozessgase betrug 1:3,7 (HMDSO: O_2). Die Substrattemperatur während des Depositionsprozesses betrug unter 37 °C. Speziell konstruierte Warenträger wurden verwendet, um produktionsnahe Bedingungen wie in der Serienbeschichtung abzubilden.



>>2: Variation der Schmierstoffe: links – Drehmoment von unbeschichteten und beschichteten FKM Radialwellendichtringen, rechts – prozentuale Verbesserung der Reibung durch plasmapolymer Beschichtung, 2.000 min⁻¹, Schmieröle siehe >>1

Experimenteller Aufbau

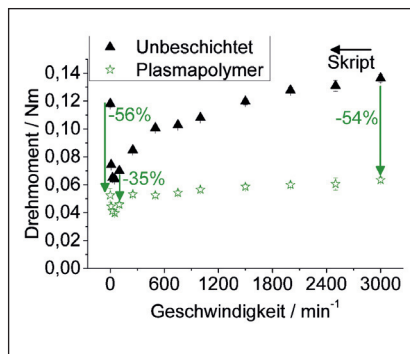
Die tribologischen Tests wurden mit Hilfe eines Universal Material Tester (UMT3) Systems [7] durchgeführt. Das Drehmoment der Radialwellendichtringe wurde in Verwendung eines vertikal angeordneten, rotierenden Antriebs ermittelt. Untersucht wurden FKM Radialwellendichtringe auf einer 35 mm Welle. Die Tests wurden unter Umgebungsbedingungen bei Handschmierung durchgeführt. Zum einen wurde eine Variation von Schmierstoffen mit einer konstanten Drehzahl von 2.000 min⁻¹ getestet. Zum anderen wurde die Geschwindigkeit bei festgelegter Schmierung zwischen 0,1 und 3.000 min⁻¹ variiert. Die verwendeten Schmierstoffe sind in >>1 aufgelistet.

Neben geschmierten Versuchen wurde auch der trockene Reibkontakt an Radialwellendichtringen untersucht, um die Verbesserung des Verschleißwiderstands der plasmapolymeren Beschichtung zu demonstrieren. Zur Quantifizierung der Verschleißrate hinsichtlich Lebensdauer wurden oszillierende Messungen mit einer 100Cr6-Kugel (Ø 10 mm) gegen unbeschichtetes bzw. plasmapolymer beschichtetes ACM-Plattenmaterial durchgeführt. Dieser Modelltest wurde gewählt, um schnellen Verschleiß zu erzeugen. Der Hub betrug 11 mm und die Geschwindigkeit 200 mm/s. Es wurde eine Normalkraft von 4,7 N eingesetzt, die einer initialen Hertzchen Flächenpressung von 1,6 MPa entspricht. Die Verschleißmessungen erfolgten im trockenen Kontakt.

Ergebnisse und Diskussion

Variation der Schmierstoffe

Die Versuche bei einer Variation der Schmierstoffe wurden bei 2.000 min^{-1} für eine Stunde durchgeführt und jeweils die letzten 10 s ausgewertet. Es zeigte sich, dass das Drehmoment durch die plasmapolymere Beschichtung signifikant reduziert werden konnte >>2.



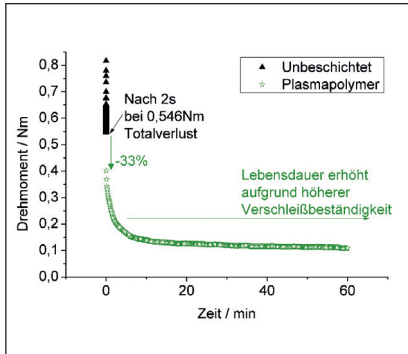
Ein Vergleich der Modellöle 02 und 03 zeigt, dass es keinen Unterschied bei der Verwendung von PG und PAO in Kombination mit der plasmapolymere Beschichtung gibt. Das Drehmoment der beschichteten Radialwellendichtungen war auf gleichem Niveau, wohingegen sich bei den unbeschichteten Dichtungen eine leichte Verbesserung bei der Verwendung von PAO anstelle von PG zeigte.

>>3: Drehmoment von unbeschichteten und beschichteten FKM-Radialwellendichtungen gegen Geschwindigkeit. Modellöl 03. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung des Messsignals dar

Unter Verwendung des Friction Modifiers GMO in PAO (Modellöl 04) ergibt sich ein Anstieg des Drehmomentes. Die plasmapolymere Beschichtung führt weiterhin zu einer Verbesserung der Reibung, allerdings reduziert sich die Verbesserung bei Friction Modifiern oder anderen Additiven (Getriebeöl 2). Es war zu erwarten, dass die Additive die Oberfläche bedecken und die nützliche Wechselwirkung zwischen plasmapolymere beschichtetem Radialwellendichting und Welle stören. Ein zusätzlicher reibungsmindernder Effekt durch die plasmapolymere Beschichtung konnte dennoch festgestellt werden.

Bei Verringerung der Viskosität des vollformulierten Getriebeöles 2 (Getriebeöl 21, Getriebeöl 22) ergab sich eine reduzierte Reibung sowohl bei den unbeschichteten als auch bei den plasmapolymere beschichteten Radialwellendichtungen. Trotz der Verwendung von Additiven führt die plasmapolymere Beschichtung zu einer reduzierten Reibung auf dem niedrigen Niveau von Basisölen.

Angesichts der fortwährend abnehmenden Viskosität der kommerziellen Getriebeöle in Pkw aufgrund von verschleißbeständigen Beschichtungen sowie der



>>4: Drehmoment von unbeschichteten und beschichteten FKM-Radialwellendichtringen im trockenen Kontakt. 2.000 min^{-1}

positiven Wechselwirkung mit anderen Schmierstoffen ist die plasmapolymere Beschichtung eine nützliche Erweiterung zur Verbesserung der Reibung von Radialwellendichtringen oder anderen dynamischen Dichtungen.

Variation der Geschwindigkeit

Die Variation der Geschwindigkeit wurde an unbeschichteten und beschichteten Radialwellendichtringen bei festgelegter Schmierung durchgeführt. Als Schmiermittel wurde das Modellöl 03 verwendet. Die Ergebnisse sind in >>3 dargestellt.

Es wurde gezeigt, dass das Drehmoment durch die plasmapolymere Beschichtung signifikant reduziert wird. In Abhängigkeit von der Geschwindigkeit kommt es zu einer unterschiedlich starken Verbesserung. Bei einer Geschwindigkeit von 100 min^{-1} kann immerhin eine Reduzierung um 34,6% festgestellt werden. Die Verbesserung steigt bei höheren Geschwindigkeiten auf bis zu 53,5% bei 3.000 min^{-1} an. Auch bei sehr kleinen Geschwindigkeiten steigt die Verbesserung an. Eine Reduzierung um 55,6% wurde bei $0,1 \text{ min}^{-1}$ erzielt.

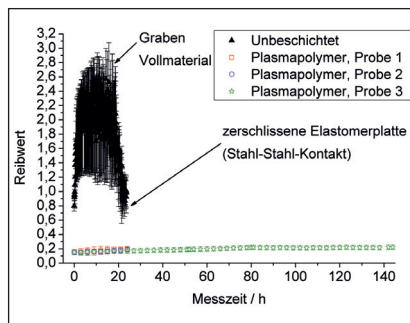
Die Ergebnisse der Geschwindigkeitsvariation reproduzieren eine Stribeck-Kurve [8]. Bei sehr kleinen Geschwindigkeiten von $0,1 \text{ min}^{-1}$ liegt möglicherweise Grenzreibung vor. Ein Erhöhen der Geschwindigkeit führt zu einer Mischreibung. Das geringste Reibmoment tritt bei 50 min^{-1} auf. Bei höherer Geschwindigkeit liegt hydrodynamische Reibung vor.

Die auftretende Temperatur infolge der Reibung wurde unter dem rotierenden Antrieb aufgezeichnet. Es zeigte sich eine reduzierte Systemtemperatur aufgrund der geringeren Reibung durch die plasmapolymere Beschichtung.

Trockene Reibung

Im trockenen Kontakt führte die plasmapolymere Beschichtung zu einer reduzierten Reibung des FKM-Radialwellendichtrings auf dem geringen Niveau von geschmierten Dichtungen >>4.

Die Lebensdauer der unbeschichteten Probe bei 2.000 min^{-1} im trockenen Kontakt betrug nur 2 s. Der plasmapolymere beschichtete Radialwellendichtring zeigte keinen Ausfall nach 1 h Laufzeit bei 2.000 min^{-1} . Das Reibmoment erreicht $0,109 \text{ Nm}$ bei Anwendung einer plasmapolymere Beschichtung. Dieses Ergebnis im trockenen Kontakt demonstriert eine deutliche Verbesserung der Notlaufeigenschaft. Für spezielle Anwendungen kann dadurch auf Schmiermittel verzichtet werden.



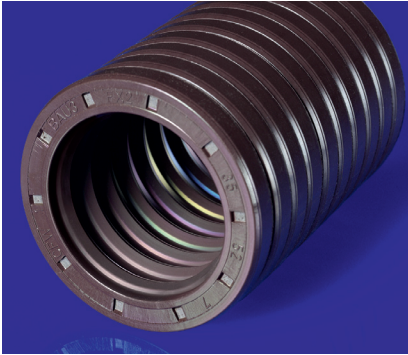
>>5: Reibwertentwicklung von unbeschichtetem sowie plasmapolymere beschichteten ACM-Elastomerplattenmaterial gegen die Messzeit. $4,7 \text{ N}$ (initiale Hertzsche Flächenpressung $1,6 \text{ MPa}$), Schichtdicke $2,1 \text{ }\mu\text{m}$

Verschleißrate

Aufgrund der sehr guten Verschleißbeständigkeit im trockenen Kontakt >>4 wurden Untersuchungen auf ACM-Elastomerplatten zur Quantifizierung der Verschleißrate durchgeführt. Bei diesen Lebensdauerermessungen zeigte die unbeschichtete Probe bereits nach kurzer Zeit einen steilen Anstieg der Reibwerte >>5 aufgrund hohen Verschleißes. Der Reibwert nimmt mit fortlaufender Zeit wieder ab, bis die 2 mm dicke Elastomerplatte bis zum Stahl-Stahl-Kontakt mit der Halterplatte durchgerieben war. Es ergibt sich im unbeschichteten Fall eine lineare Verschleißrate von $111,79 \text{ }\mu\text{m/km}$. Dieser Wert wurde ermittelt durch die durchgeriebene Materialdicke der Elastomerplatte (2 mm) und dem unter den vorliegenden Testbedingungen gelaufenen Weg.

Die plasmapolymere beschichteten ACM-Elastomerplatten zeigten dagegen über den gesamten terminierten Testzeitraum von bis zu 144 h keinen nennenswerten Anstieg in der Reibung. Die lineare Verschleißrate wurde über die nach der Messzeit verbliebene Schichtdicke und dem im Test gelaufenen Weg ermittelt.

Zur Begutachtung der nach dem Lebensdauererprobung verbliebenen Schichtdicke wurde ein mit fokussiertem Ionenstrahl (FIB) geschaffener Querschnitt im Rasterelektronenmikroskop (REM) vermessen. Die lineare Verschleißrate der plasmapolymere Schicht auf ACM wurde mit $0,4(3) \cdot 10^{-3} \text{ }\mu\text{m/km}$ bestimmt. Bei weiteren Untersuchungen wurde deutlich, dass zu Beginn der Messungen der meiste Verschleiß durch das Einlaufverhalten auftritt. Damit ist die Angabe einer linearen



>>6: 35er Radialwellendichtringe mit plasma-polymerer Beschichtung auf der Dichtkante

sind aufgrund des Abscheideverfahrens der plasmagestützten Gasphasenabscheidung (PECVD) auch für geringe Gestehungskosten verfügbar. Das Beschichtungsverfahren ermöglicht die Beschichtung von 3D-Geometrien. Für die Beschichtung von möglichst vielen Radialwellendichtringen >>6 in einem Batch wurden spezielle Warenträger entwickelt.

Für die Entwicklungsarbeiten wurde eine bestehende Technikumsanlage von ca. 2 m³ Größe genutzt, die so oder in abgewandelter Form auch als Produktionsanlage dienen könnte. Selbst in dieser Anlage können über 3.000 Stück der 35er Radialwellendichtringe gleichzeitig beschichtet werden. Durch eine kurze Beschichtungszeit können Gestehungskosten für die Beschichtung von kleiner als 5 Cent/Bauteil realisiert werden.

Die Radialwellendichtringe werden dazu in Stapeln im Warenträger gehalten und beschichtet. Die Schichtabscheidung wurde als Merkmal zur Qualitätssicherung sehr homogen über die hintereinander gestaffelten Dichtkanten eingestellt >>7. Die Wiederholgenauigkeit ist sehr hoch. Es entstehen zwischen den verschiedenen Beschichtungsprozessen max. 5% Abweichung. Innerhalb eines Beschichtungsprozesses ist die Abweichung der Schichtdicken auf verschiedenen Dichtkanten unter 6%.

Die Großserienfähigkeit des plasmapolymere Beschichtungsprozesses konnte belegt werden. Bei der Auslegung und Fertigung des Warenaufnahmesystems wurden nicht nur Aspekte der Schichthomogenität, sondern auch der Handha-

Verschleißrate nur bedingt zulässig. Der Vergleich der linearen Verschleißraten von unbeschichtetem und plasmapolymere beschichtetem ACM verdeutlicht allerdings die signifikante Verbesserung der Verschleißbeständigkeit. Die linearen Verschleißraten weisen einen Unterschied von sechs Größenordnungen auf.

Wirtschaftlichkeit

Die Verbesserungen der Dichtungen hinsichtlich Reibung und Verschleiß durch die plasmapolymere Beschichtung

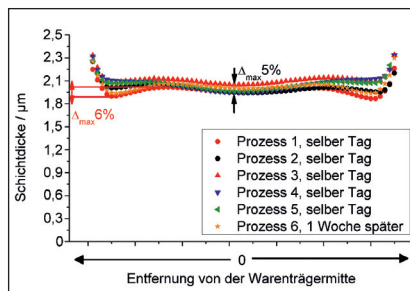
bung berücksichtigt. Die Warenaufnahmen sind unkompliziert zu bedienen, sodass die Dichtringe bei einem Chargenwechsel leicht ausgetauscht werden können. Die Arbeitssicherheit wurde zusätzlich durch Kippsicherungen gewährleistet. Die Warenaufnahmesysteme können einfach gereinigt werden.

Fazit

Durch die plasmapolymere Beschichtung konnte die Reibung und der Verschleiß eines Radialwellendichtrings erheblich reduziert werden. Das Drehmoment bei 2.000 min^{-1} konnte bei Verwendung von vollformuliertem Serienachsgetriebeöl um 13% von 0,116 auf 0,101 Nm reduziert werden. Bei reinem Basisöl wurde dabei eine Reduzierung um 24% von 0,111 auf 0,084 Nm festgestellt. Eine Untersuchung über einen breiten Geschwindigkeitsbereich zeigte bis zu 56% weniger Drehmoment. Im trockenen Lauf zeigte sich die signifikante Verbesserung in der Notlaufeigenschaft. Der plasmapolymere beschichtete Radialwellendichtring zeigte kein Versagen nach 1 h bei 2.000 min^{-1} . Das Drehmoment erreichte mit 0,109 Nm sogar einen Wert ähnlich von geschmierten Systemen. Der unbeschichtete Radialwellendichtring überlebte im trockenen Lauf lediglich 2 s. Lebensdauertests auf Elastomerplattenmaterial zeigten die hohe Verschleißresistenz der plasmapolymere Beschichtung. Die unbeschichtete Referenz wies eine lineare Verschleißrate von $111,79 \text{ } \mu\text{m}/\text{km}$ auf. Trotz Schnelltest im oszillierenden Modelltest konnte eine lineare Verschleißrate von lediglich $0,4(3) \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{m}/\text{km}$ der plasmapolymere Schicht auf ACM erreicht werden. Dies ist eine Verbesserung um sechs Größenordnungen.

Die Wirtschaftlichkeit des Beschichtungsverfahrens im Niederdruck konnte ebenfalls erfolgreich belegt werden. Die Beschichtung ist für einen Bruchteil der Bauteilkosten applizierbar. Das gewonnene Wissen kann für andere Geometrien und Bauteilgrößen leicht adaptiert werden.

Die Forschung wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) sowie anderen Unternehmen unterstützt. Das Förderkennzeichen lautet 03ET1187 B.



>>7: Wiederholgenauigkeit und Abscheidehomogenität quer über die Dichtkanten mehrerer Radialwellendichtringe (Dichtkanten senkrecht zur Papierebene)

(Bilder: Fraunhofer IFAM, Bremen)

Literatur

- [1] Paulkowski, D., Vissing, K., „Tribological improvement of elastomers using plasmapolymeric coatings“, Tagungsband der Tribologie Fachtagung 2011, Göttingen, Deutschland (2011), S. 15/1-15/14
- [2] Paulkowski, D., Vissing, K., „Reduction of elastomeric friction in lubricated contact using plasmapolymeric coatings“, Tagungsband der Tribologie Fachtagung 2012, Göttingen, Deutschland (2012), S. 52/1-52/9
- [3] Paulkowski, D., Vissing, K., Wilken, R., „Composition of plasmapolymeric coatings using O₂/HMDSO gas mixtures and application on elastomers for tribological improvement“, OR1007 (extended abstract), Tagungsband der PSE 2012, Garmisch-Partenkirchen, Deutschland (2012)
- [4] Paulkowski, D., Vissing, K., „Plasmapolymeric coatings improve radial shaft sealing on application“, Tagungsband der Tribologie Fachtagung 2013, Göttingen, Deutschland (2013), S. 87/1-87/11
- [5] Paulkowski, D., Karpinski, S., Vissing, K., „Friction and wear resistance of plasmapolymeric coatings applied on elastomers“, NordTrib 2014, Aarhus, Dänemark; wird veröffentlicht im Journal of Tribology
- [6] Patent “Dichtungsartikel”: DE 10 2008 002 515 A1
- [7] Universal Material Tester (UMT3), Bruker ehemals Center for Tribology Inc., 1717 Dell Ave., Campbell, CA 95008
- [8] Stribeck, R., „Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager“, Z. Verein. Deut. Ing., Vol. 46, S. 38ff., 1341-1348 (1902)