

## Reibungsreduzierung durch Schmierfilmerhöhung bei beschichteten, mikrostrukturierten Elastomeren

### Vortragender:

Dr. Dominik Paulkowski  
Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik  
und Angewandte Materialforschung IFAM



### Weitere Autoren:

Stefanie Karpinski, Dr. Klaus Vissing  
Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik  
und Angewandte Materialforschung IFAM

### Zusammenfassung:

Maschinen und Aggregate in sich bewegenden Anwendungen sind heutzutage immer im Hinblick auf die Energieeffizienz zu entwickeln. Dies trifft insbesondere für Personenkraftwagen, vor dem Hintergrund der laufenden Reduktion der CO<sub>2</sub>-Grenzwerte, zu. Aber auch in anderen Industriebereichen wie Windenergie, hydraulischen und pneumatischen Anwendungen werden ein verbesserter Verschleißschutz und eine reduzierte Reibung benötigt.

Es konnte gezeigt werden, dass die Reibung von Elastomeren im geschmierten Kontakt unter Nutzung von Mikrostrukturen und einer plasmapolymere Schutzbeschichtung signifikant reduziert wird. Dabei wurden definierte Mikrostrukturen über gelaserte und entformungsfreundlich beschichtete Werkzeuge in der Elastomeroberfläche hergestellt. Zudem wurde die Oberfläche des Dichtungswerkstoffes mit einer reibungs- und verschleißreduzierenden plasmapolymere Beschichtung versehen. Aufgrund des Substratmaterials und der Größe der Mikrostrukturen ist eine Verschleißschutzbeschichtung essentiell.

Die Reibexperimente wurden in einem rotierenden Ring-Scheibe-Kontakt durchgeführt. Zur Auswertung der nützlichen Mikrostrukturen wurden Drehmoment, Temperatur und Aufschwimmhöhe betrachtet. Als Schmierstoff wurden voll additivierte Serienachsgetriebeöle auf PAO-Basis mit unterschiedlicher Viskosität verwendet. Durch Erhebungen im Oberflächenprofil der Elastomere ließ sich ein hydrodynamischer Spaltdruck ausbilden, der zum Aufschwimmen des Gegenkörpers führte. Es lag dadurch eine geringere Reibung aufgrund leichter Scherung im Schmierstoff vor. Die Reibung wurde während einer Geschwindigkeitsvariation aufgezeichnet. Als Referenz diente eine bereits reibungsreduzierend plasmapolymere beschichtete, als glatt definierte, Elastomeroberfläche. Durch die Verwendung von plasmapolymere beschichteten Mikrostrukturen konnte die Reibung im Vergleich nochmal deutlich vermindert werden. Die aufgezeichneten Drehmomente sanken durch die verwendeten Mikrostrukturen im Mischreibungsbereich um bis zu 82 % und im Bereich der Hydrodynamik um bis zu 42 %.

### 1 Einleitung

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 CO<sub>2</sub> Emissionen aufgrund der Energieeinsparung. Die aufgetragenen Schichten realisieren geringe Reibung in Kombination mit einer erhöhten Verschleißbeständigkeit bei geringen Herstellungskosten. Untersuchungen bezüglich trockener und geschmierter Reibung auf flachen Elastomersubstraten sowie Radialwellendichtringen mit plasmapolymere Beschichtung wurden durch die Autoren in der Vergangenheit veröffentlicht [1]-[6]. Für die entwickelte chemische Zusammensetzung der plasmapolymere Beschichtung zur Reibungsreduzierung elastomere Materialien wurde ein Patent erteilt [7]. Als Markenname wurde Friction<sup>PLAS®</sup> gewählt.

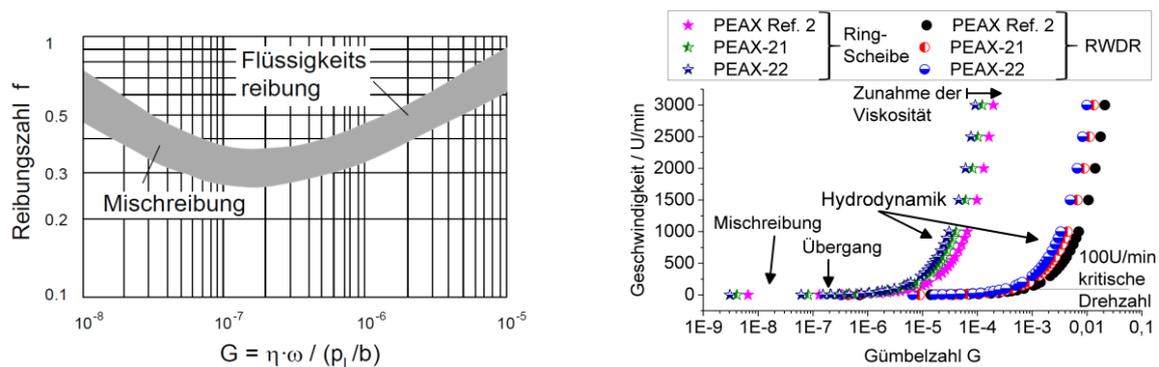
## 2 Theorie

Ziel bei der Verwendung von Mikrostrukturen ist die Verstärkung des Aufschwimmens der Gegenkörper. Eine Reibungsreduzierung kann erreicht werden, wenn das System deutlich in der Hydrodynamik und dadurch im Wesentlichen nur noch durch die leichte Scherwirkung des verwendeten Öls beschränkt wird. Um jedem System kostengünstig diese Energieeinsparung möglich zu machen, können die dynamischen Elastomerdichtungen strukturiert werden. Eine Strukturierung von größeren Maschinenelementen und für die Strukturierung evtl. unzugänglichen Stellen entfällt. Die elastomeren Strukturen müssen durch die plasma-polymere Beschichtung gegen Verschleiß geschützt werden.

Gümbel hat zur Einordnung der Einflussfaktoren die sogenannte Gümbelzahl  $G$  eingeführt [8]. Ihre Berechnung erfolgt über dynamische Viskosität  $\eta$ , Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  sowie bei einem Radialwellendichtring (RWDR) mit Linienpressung  $p_L$  und Berührbreite  $b$  (Abbildung 1a). Bei einer Ring-Scheibe-Kontaktsituation (Abschnitt 3.4) wie bei den vorliegenden Untersuchungen muss Bezug auf die verwendete Normalkraft und die nominelle Auflagefläche (ohne Fasenrand) des Gegenkörpers genommen werden. RWDR-Bauteil sowie Ring-Scheibe-Versuch lassen sich bei den gewählten Testbedingungen deutlich im Bereich der Hydrodynamik betreiben (Abbildung 1b).

Bei einer Variation der Getriebeöle hinsichtlich ihrer Viskosität wurde diese in der Reihenfolge PEAX Ref. 2, PEAX-21, PEAX-22 abgesenkt. Zur Berechnung wurden die dynamischen Viskositäten bei 40 °C herangezogen (Tabelle 2 in Abschnitt 3.5). Die Berechnung der Gümbelzahlen für einen RWDR mit 35 mm Wellendurchmesser erfolgte mit einer Radialkraft von 18 N sowie einer Berührbreite von 150  $\mu\text{m}$ . Die Werte für die Kontaktsituation Ring-Scheibe sind dem Abschnitt 3.4 zu entnehmen. Es wurde eine Normalkraft von 81 N zur Versuchsdurchführung und Berechnung der Gümbelzahlen verwendet.

Bei einem dickeren Öl ist eine Verstärkung des Aufschwimmens zu erwarten, da die Gümbelzahl des Systems dadurch größer wird und tiefer im Bereich der Hydrodynamik liegt. Im Vergleich der Gümbelzahlen von Abbildung 1a mit Abbildung 1b ist zu erkennen, dass ein Ring-Scheibe-Versuch im Bereich der Hydrodynamik betrieben werden kann. Für die spätere Umsetzung auf einen RWDR ergeben sich höhere Gümbelzahlen. Die Hydrodynamik ist damit dort stärker ausgeprägt. Kann demnach im Ring-Scheibe-Kontakt eine Erhöhung der Schmierfilmdicke durch eine Strukturierung nachgewiesen werden, dann ist eine spätere Umsetzung auf RWDRs vielversprechend.



a) b)  
Abbildung 1: Einteilung der verschiedenen Reibbereiche: a) Klassische Einteilung [9], b) Berechnung Geschwindigkeit vs. Gümbelzahl.

## 3 Experimentelle Beschreibung

### 3.1 Entformungsplatten strukturieren per Laser

Ziel ist die Mikrostrukturierung von Elastomeroberflächen. Diese Strukturierungen sollen durch die reibungsmindernde, plasmapolymere Beschichtung gegen Verschleiß geschützt werden. Als Grundlagenuntersuchung wurden auf Elastomerplatten Strukturierungen getes-

tet. Später wird die Übertragung zum Bauteil, einem Radialwellendichtring, stattfinden. Aus Kostengründen wurden Vertiefungen in Entformungswerkzeuge gelasert, so dass Erhebungen auf dem Elastomer entstanden.

Spiegelpolierte Stahlplatten dienten als Entformungsplatten, auf denen verschiedene Strukturen mittels Laser erzeugt wurden. Die Entformungsplatten wurden nach der Laserstrukturierung mit einer plasmapolymere Trennschicht, Release<sup>PLAS</sup>®, beschichtet, um trockene und rückstandsfreie Entformungen zu ermöglichen. Elastomerplatten wurden mit den strukturierten Entformungsplatten aus mineralhaltigem Nitrilkautschuk (NBR) gefertigt. Danach erfolgte die Abscheidung der plasmapolymere Beschichtung auf die strukturierten Elastomerplatten. Eine Skizze der Herstellungskette ist in Abbildung 2a dargestellt.

Es wurde eine Vielzahl an Strukturen erstellt. Beispielhaft zeigt Abbildung 2b Skizzen von produzierten Mikrostrukturen, wobei diese nicht maßstabsgetreu dargestellt sind, sondern sich eine Vielzahl von Strukturen im  $\mu\text{m}$ -Bereich auf den Platten befindet. Eine Untersuchung der Qualität des Herstellungsprozesses und Abweichungen von der Soll-Größe ist Stand aktueller Arbeiten.

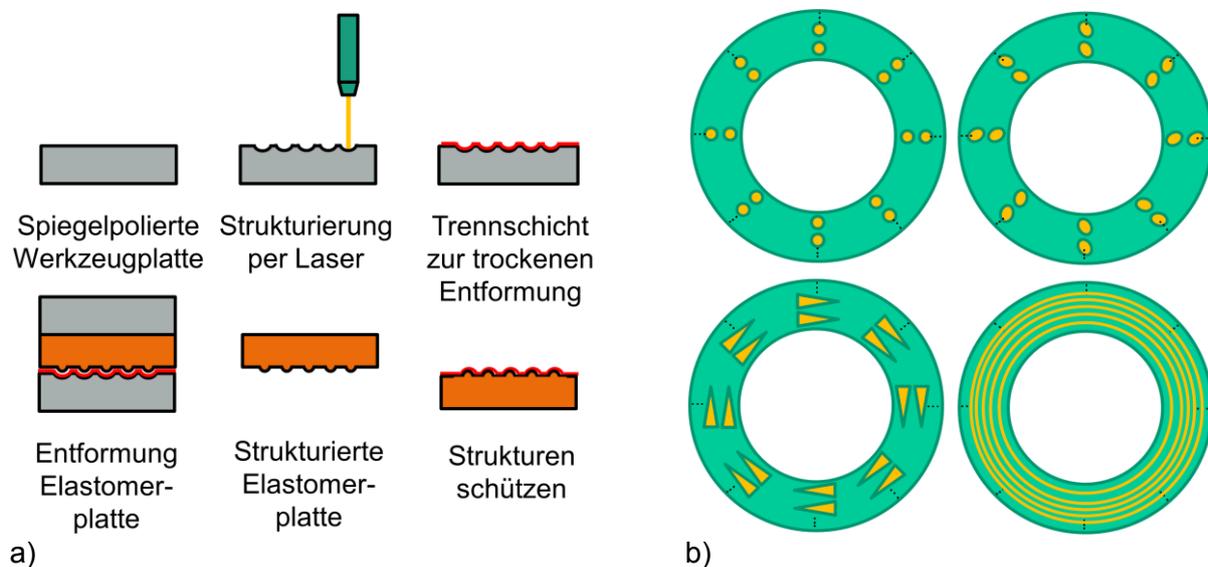


Abbildung 2: Skizze a) der Herstellungskette der strukturierten Elastomerplatten und b) einer Auswahl an gefertigten Strukturen (nicht maßstabsgetreu).

### 3.2 Substratvorbereitung

Als Substrate wurden strukturierte Elastomerplatten aus mineralhaltigem Nitrilkautschuk (NBR) mit einer 75-Shore-A Härte verwendet (Abschnitt 3.1). Mithilfe einer Stanze wurden Ringe aus den strukturierten Elastomerplatten gestochen. Das Plattenmaterial hatte eine Dicke von 3 mm. Die Proben wurden vor der Beschichtung in einer nasschemischen Lösung in einem Ultraschallbad bei 60 °C gereinigt. Nach Abspülen mit demineralisiertem Wasser und Trocknen durch Druckluft wurden die ausgestanzten Elastomerscheiben mittels Cyanacrylat (Sekundenklebstoff) auf planparallelen, ebenen Stahlscheiben zentriert fixiert.

### 3.3 Schichtherstellung

Die so vorbereiteten Proben wurden mit einer ungefähr 1  $\mu\text{m}$  dünnen plasmapolymere Beschichtung ( $\text{SiO}_x\text{C}_y\text{H}_z$ ) versehen. Die Schicht wurde mit Hilfe der Plasma unterstützten chemischen Gasphasenabscheidung (PECVD) unter Verwendung von Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) und Hexamethyldisiloxan (HMDSO) abgeschieden. Das Mischungsverhältnis der Prozessgase und die verwendete Leistung wurden so eingestellt, dass ein Elastizitätsmodul der Schicht von 38,4 GPa erreicht wurde. Ermittelt wurde das Elastizitätsmodul der Beschichtung durch Nanoindentierung und Auswertung nach dem Verfahren von Oliver & Pharr [10]. Die Substrattemperatur während des Depositionsprozesses betrug unter 37 °C. Der verwendete PECVD-Beschichtungsprozess kann wirtschaftlich auch für Radialwellendichtringe genutzt werden [11]-[12].

### 3.4 Experimenteller Aufbau

Die tribologischen Tests erfolgten mit Hilfe eines rotierenden Modellprüfstands [13]. Die Kontaktsituation ist in Abbildung 3 skizziert. Die Probenhalter waren planparallele Scheiben. Die ringförmigen Elastomerscheibenproben hatten einen Durchmesser von außen 55 mm und innen 23 mm. Der Gegenkörper wies einen Durchmesser von außen 45 mm und innen 33 mm auf. Die Auflagebreite ergab sich inkl. Fase zu 6 mm. Die Gegenkörper hatten eine geringe Fase an den Kanten mit Radius 0,4 mm. Für die Berechnung der Gümbelzahl in Kapitel 2 wurde hier innen wie außen der Radius für die nominelle Kontaktfläche abgezogen werden. Es ergibt sich eine nominelle Kontaktfläche ohne Fasenränder von ca. 686 mm<sup>2</sup>. Die nominelle Kontaktfläche über den gesamten Querschnitt (mit Fasenränderbreite) ist ca. 735 mm<sup>2</sup>. Probenscheiben sowie Gegenkörper bestanden aus 100Cr6. Die Oberflächenhärte betrug 55+2 HRC. Die Oberflächen wurden geschliffen.

Die Proben waren wie in Abschnitt 3.2 beschrieben auf Stahlscheiben aufgeklebt. Diese wurden in einen Öltopf mit rotierendem Antrieb montiert. Der jeweilige Gegenkörper war über eine Taumelscheibe sowie eine Federplatte an einem Drehmomentsensor befestigt. Das maximale Drehmoment des Sensors liegt bei 5,7 Nm. Die Auflösung von 0,114 mNm lieferte verlässliche Werte auch im Bereich deutlich unter 1 Nm. Die Taumelscheibe sollte etwaige Unebenheiten ausgleichen. Die Federplatte war zur zusätzlichen Kompensation eingesetzt. Bei der Messung der Eindringtiefe bzw. des Aufschwimmens floss deren Deformation als mittlerer aber konstanter Offset mit ins Messsignal.

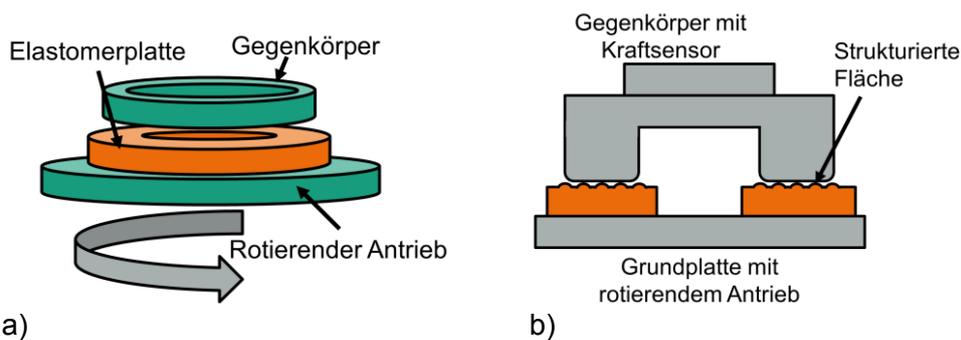


Abbildung 3: Aufbau des rotierenden Modellprüfstands für die Reibungsmessungen an mikrostrukturierten Elastomerplatten a) Skizze und b) Querschnitt.

Die Prüfbedingungen wurden im Verlauf der Untersuchungen variiert. Es wurden sowohl Geschwindigkeit, Ölviskosität als auch Normalkraft verändert. Die Geschwindigkeitsvariation erfolgte stufenweise. Abhängig von der zu untersuchenden Systemeigenschaft wurde entweder bei 0,1 U/min gestartet und bis 3000 U/min nach jeweils drei Minuten stufenweise erhöht oder von 1000 U/min sukzessive verlangsamt. Die jeweilige Auswertung erfolgte in den jeweils letzten zehn Sekunden, um Einreibvorgänge auszuklammern.

Die Versuche zur Variation der Ölviskosität und Normalkraft wurden auf als glatt definierten, beschichteten Proben durchgeführt. Es wurden drei verschiedene Normalkräfte im maximal möglichen Bereich des Sensors (200 N) getestet (Tabelle 1). Als nominelle Kontaktfläche der Strukturen wurden Querschnitte von real vermessenen Pin-Strukturen verwendet. Die nominelle Kontaktfläche ergab sich bei regelmäßiger Verteilung der Pins über die Reibspur zu ca. 364 mm<sup>2</sup> ohne Fasenrand und ca. 390 mm<sup>2</sup> mit Fasenrand des Gegenkörpers.

Tabelle 1: Normalkräfte und nominelle Flächenpressungen im Ring-Scheibe-Versuch

Normalkraft [N]	Nominelle Flächenpressung [kPa]			
	ohne Struktur		mit Pin-Strukturen	
	Mit Fasenrand	Ohne Fasenrand	Mit Fasenrand	Ohne Fasenrand
10	14	15	26	28
81	110	118	208	222
150	204	219	385	412

### 3.5 Schmierstoffe

Als Schmierstoffe wurden voll additivierte Serienachsgetriebeöle mit PAO als Grundöl verwendet. Die dynamischen Viskositäten wurden hierbei aus den kinematischen Viskositäten berechnet. In dieser Betrachtung ist der Einfluss des Drucks und der Scherung auf die Viskosität nicht berücksichtigt. Die Bezeichnung PEAX setzt sich aus PE für das Projekt Pegasus sowie AX für Achsgetriebeöl zusammen.

Tabelle 2: Schmierstoffeigenschaften

	PEAX Ref. 2	PEAX-21	PEAX-22
Viskositätsklasse	12 cSt	9 cSt	7 cSt
Kinemat. Viskosität @40 °C [mm <sup>2</sup> /s]	86,2	54,5	40,8
Kinemat. Viskosität @100 °C [mm <sup>2</sup> /s]	12,3	9,0	7,2
Dichte @15 °C [g/cm <sup>3</sup> ]	0,868	0,860	0,856
Dyn. Viskosität @40 °C [mPas]	73,6	46,1	34,4
Dyn. Viskosität @50 °C [mPas]	47,8	30,9	23,4
Dyn. Viskosität @100 °C [mPas]	10,1	7,3	5,8

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Reibungsreduzierung durch plasmapolymere Beschichtung

Es zeigte sich, dass das Drehmoment durch die plasmapolymere Beschichtung signifikant reduziert werden konnte. Die Reduzierung des Drehmomentes durch allein die plasmapolymere Beschichtung auf der als glatt definierten Elastomerplatte betrug 95 % (Abbildung 4). Es zeigt sich zudem die sehr gute Reproduzierbarkeit anhand der zwei plasmapolymere beschichteten Proben mit identischem Verlauf und Drehmomentniveau.

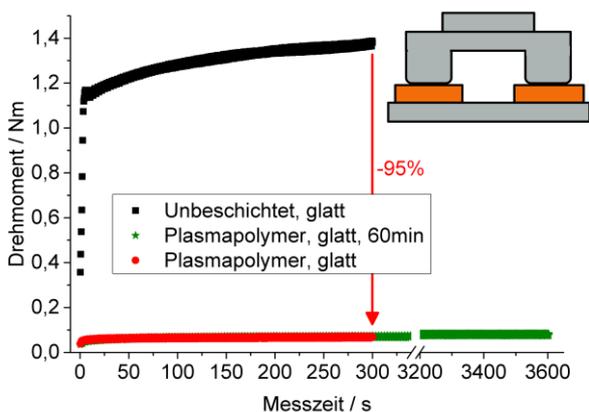


Abbildung 4: Reduzierung des Drehmoments durch die plasmapolymere Beschichtung der Elastomerplatte. PEAX-22; 81 N; konstant 100 U/min.

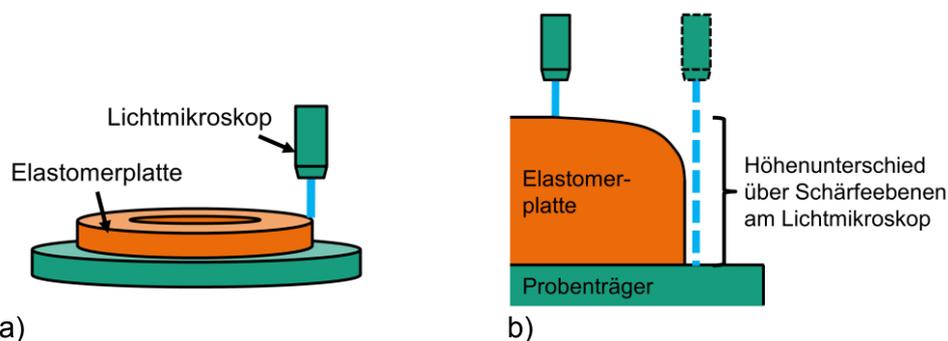
### 4.2 Verschleißreduzierung durch plasmapolymere Beschichtung

Im Vergleich zu unbeschichteten Elastomersubstraten konnte durch die Verwendung der plasmapolymere Beschichtung bereits eine um bis zu sechs Größenordnungen niedrigere Verschleißrate im oszillierenden Schnellverschleißtest gezeigt werden [5], [15]. Bei dem Schnellverschleißtest wird das unbeschichtete sowie das beschichtete Elastomerplattenmaterial gegen eine 10 mm Kugel aus 100Cr6 getestet. Verwendet wurde eine Normalkraft von 4,7 N; entsprechend einer initialen Hertz'schen Pressung von 1,6 MPa. Diese Ball-on-plate Geometrie führt mit den Umkehrpunkten der Oszillationsbewegung innerhalb kurzer Zeit zu Materialverschleiß. Dies konnte gut bei der unbeschichteten Elastomerprobe beobachtet werden. Innerhalb von Minuten wurde ein Graben im Vollmaterial erzeugt, wodurch die Reibung anstieg. Ein Gleitlack, der serienmäßig auf Fenster- und Türdichtungen im

Automobil eingesetzt wird, zeigte eine Standzeit von drei Stunden vor dem vollständigen Versagen. Die plasmapolymere Beschichtung hingegen lief bis zum programmierten Testende sechs Tage lang ohne Versagen und nennenswertem Verschleiß durch.

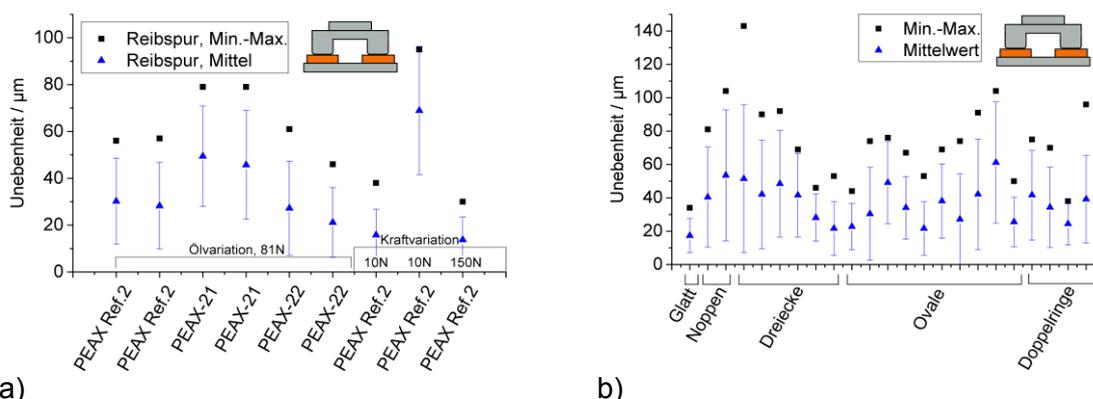
### 4.3 Ebenheit

Abweichungen bezüglich des Drehmomentniveaus gleich strukturierter Proben werden nach derzeitigem Stand auf die Unebenheit der Elastomerplatten zurückgeführt. Es sind aber gewisse statistische Unterschiede nicht auszuschließen. Die Ebenheitsmessung wurde an den Innen- und Außenrändern sowie der Position der Reibspur der aufgeklebten Elastomerscheiben durchgeführt. Dabei wurde die Elastomerscheibe an den Positionen 1 Uhr, 2 Uhr, 3 Uhr, 4 Uhr, usw. gemessen. Die Dicke ergibt sich aus dem Höhenunterschied der betreffenden Schärfeebenen eines Lichtmikroskops bei Draufsicht oben auf der Elastomerscheibe sowie unten auf dem Probenträger aus Stahl (Abbildung 5).



a) b)  
Abbildung 5: Skizze der Ebenheitsmessung an den Rändern der Elastomerplatten:  
a) Grobansicht, b) Zoom auf die Kante.

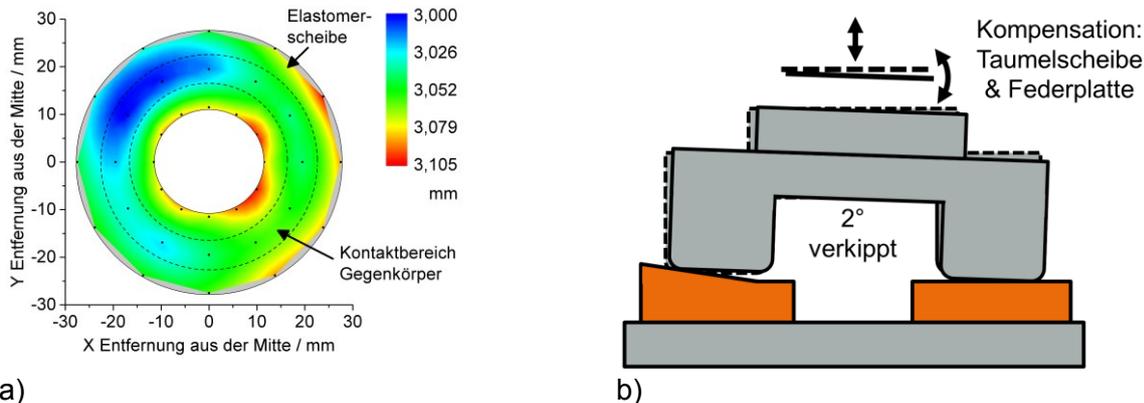
Es ergaben sich Werte in der Unebenheit von 30 bis 140  $\mu\text{m}$  bei Betrachtung der Differenz des maximal und minimal gemessenen Wertes aller gemessenen Proben, Strukturformen und Versuchsreihen (Abbildung 6). Die Mittelwerte liegen im Bereich zwischen 20  $\mu\text{m}$  und 70  $\mu\text{m}$ . Die gefertigten, geschliffenen Gegenkörper wiesen eine maximale Differenz von 95  $\mu\text{m}$  über die gesamte Kontaktfläche und im Mittel eine Unebenheit von ca. 50  $\mu\text{m}$  auf. Die Rauheit der Gegenkörper wurde mit einem Rasterkraftmikroskop (AFM) ermittelt und war im Mittel  $R_z = 0,769 \mu\text{m} \pm 0,233 \mu\text{m}$ . Damit sind die Gegenkörper hinsichtlich ähnlicher Versuchsgeometrien eines Ring-Scheibe-Kontakts (Abbildung 3) bei Hochdruckwellendichtungen aus Kunststoff [14] im Bereich der Toleranzen ( $R_z \sim 1 \mu\text{m}$ ).



a) b)  
Abbildung 6: Unebenheiten der Elastomerplatten in der Reibspur: a) glatte Elastomerplatten ohne Strukturierung bei Variation der Viskositäten & der Normalkraft, b) strukturierte Elastomerplatten. Fehlerbalken zeigen Standardabweichungen.

Abbildung 7 verdeutlicht die Kontaktsituation der Ring-Scheibe-Versuche. Abbildung 7a zeigt eine repräsentative Probenunebenheit mit mittlerer Unebenheit der Reibspur von  $30 \pm 18 \mu\text{m}$ . Es handelt sich um die Probe aus Abbildung 6a ganz links (Ölvariation, PEAX Ref. 2, 81 N). Das Farbschema ist eine Interpolation zwischen den Messpositionen

(schwarze Punkte), um das Auge zu führen. Abbildung 7b skizziert die Verkippung des Gegenkörpers durch eine maximale Unebenheit der Probe. Verkippungswinkel zur Visualisierung auf  $2^\circ$  vergrößert. Bei einer maximalen Unebenheit von  $56\ \mu\text{m}$  (Abbildung 7a) auf  $39\ \text{mm}$  mittlerem Reibspurdurchmesser ergibt sich eine Verkippung von  $0,08^\circ$ . Bei einer maximalen Unebenheit von ca.  $100\ \mu\text{m}$  auf dem mittleren Reibspurdurchmesser ergibt sich eine Verkippung von  $0,15^\circ$ . Taumelscheibe wie Federplatte zwischen Gegenkörper und Kraftsensoren kompensieren die geringe Verkippung. Auch das Elastomer hilft mit seinen eigenen Dämpfungseigenschaften. Im Ölfilm kann es Druckschwankungen geben.

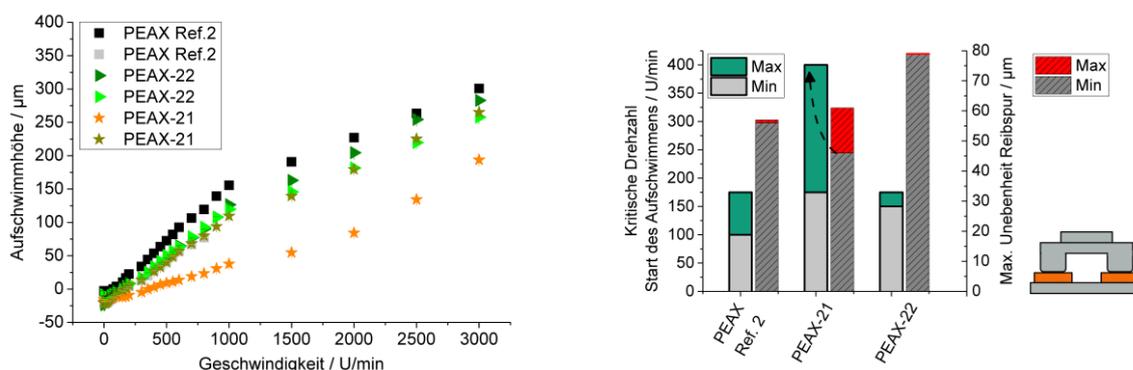


a) Repräsentative Probenunebenheit mit mittlerer Unebenheit der Reibspur von  $30\pm 18\ \mu\text{m}$  (vgl. Abbildung 6a ganz linke Probe). Schwarze Punkte Messpositionen; Farbschema interpoliert. b) Skizze der Verkippung des Gegenkörpers durch maximale Unebenheit der Probe. Verkippungswinkel vergrößert.

#### 4.4 Variation der Ölviskositäten

Die Messreihen starteten bei  $0,1\ \text{U/min}$ . In diesem Bereich kommt es aufgrund der Pressung noch zu einem Eindrücken ins Elastomer (negative Aufschwimmhöhe Abbildung 8a). Bei Steigerung der Drehzahl kommt es zu einem Aufschwimmen. Das Achsgetriebeöl PEAX Ref. 2 mit höchster Viskosität zeigt zum einen das stärkste Aufschwimmen im Versuch sowie die geringste Umdrehungszahl, bei der das Aufschwimmen startete (Abbildung 8b). Damit ist die gewünschte Hydrodynamik mit PEAX Ref. 2 wie erwartet am einfachsten zu erreichen (vgl. Gümbelzahl, Abbildung 1).

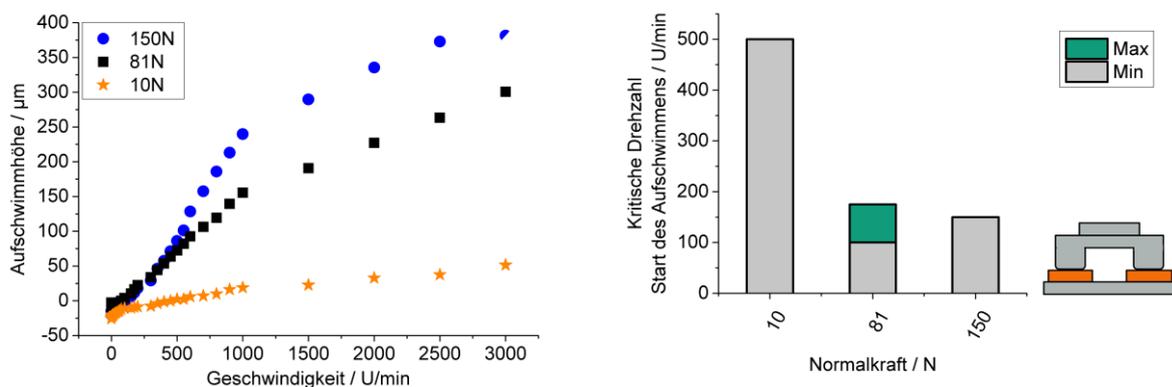
In Abbildung 8b sind ebenfalls die maximalen Unebenheiten der jeweiligen Proben dargestellt. Sie korrelieren nicht mit den kritischen Drehzahlen fürs Aufschwimmen. Weder die absolute Höhe noch die Zuordnung Minimum kritische Drehzahl zu Minimum der maximalen Unebenheit passen zusammen. Die geringste Unebenheit gehört nur bei einem Versuch zur höchsten kritischen Drehzahl (gestrichelter Pfeil). Damit ist insgesamt die kritische Drehzahl zum Aufschwimmen des Gegenkörpers unabhängig von der Unebenheit.



a) Geschwindigkeitsabhängigkeit, b) Kritische Drehzahl des Aufschwimmens und maximale Unebenheiten der Proben in der Reibspur. Glatte, plasmapolymers beschichtete Elastomerplatten; 81 N.

#### 4.5 Variation der Normalkräfte

Abbildung 9a zeigt das Aufschwimmen bei Variation der Normalkraft. Bei 10 N und geringer Geschwindigkeit dreht der Drehmomentsensor noch nicht mit, so dass die Werte unterhalb von 150 U/min nicht echt sind. Die maximale Aufschwimmhöhe war bei 10 N unter 50  $\mu\text{m}$ , also geringer als die maximal mögliche Unebenheit der Elastomerplatten. Mit Blick auf die schlechte Mitnahme des Drehmomentsensors bei 10 N sowie die geringe Aufschwimmhöhe sind Messungen mit 10 N auszuschließen. Es werden höhere Normalkräfte benötigt. Bei 81 N läuft die Messung stabil mit hinreichender Flächenpressung (Tabelle 1) und damit gut auflösbarer Drehmomentmessung und ausreichender Aufschwimmhöhe. Die Messungen bei 150 N zeigen noch stärkeres Aufschwimmen und eine gute Drehmomentmessung. Allerdings wird der Gegenkörper bei 3000 U/min zu heiß (Abbildung 10). Die kritische Drehzahl bei der die Kontaktflächen aufgrund der Hydrodynamik voneinander abheben sinkt bei steigender Normalkraft (Abbildung 9b). Bei ausreichender Normalkraft stagniert die Reduzierung der kritischen Drehzahl.

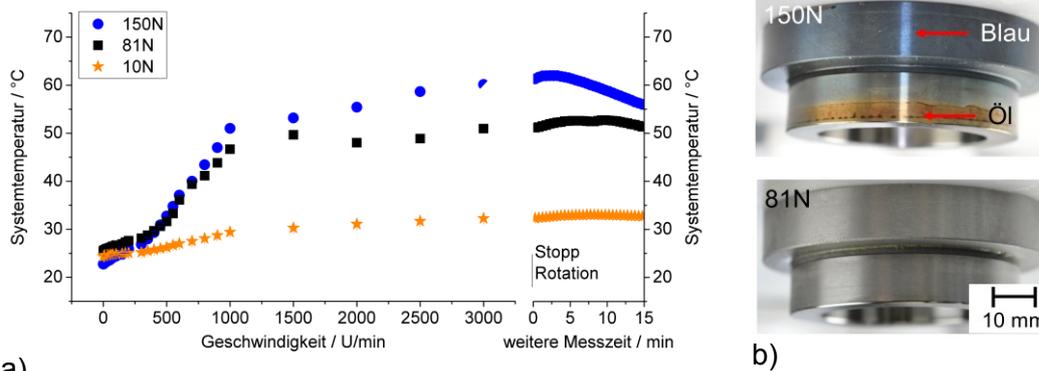


a) b)  
Abbildung 9: Aufschwimmhöhe bei Variation der Normalkraft: a) Entwicklung des Aufschwimmens gegen die Geschwindigkeit, b) kritische Drehzahl zum Start des Aufschwimmens gegen die Normalkraft. Glatte, plasmapolymere beschichtete Elastomerplatten; PEAX Ref. 2. Wert bei 150 N & 3000 U/min nur nach einer Minute (Versuchsabbruch).

#### 4.6 Temperatur

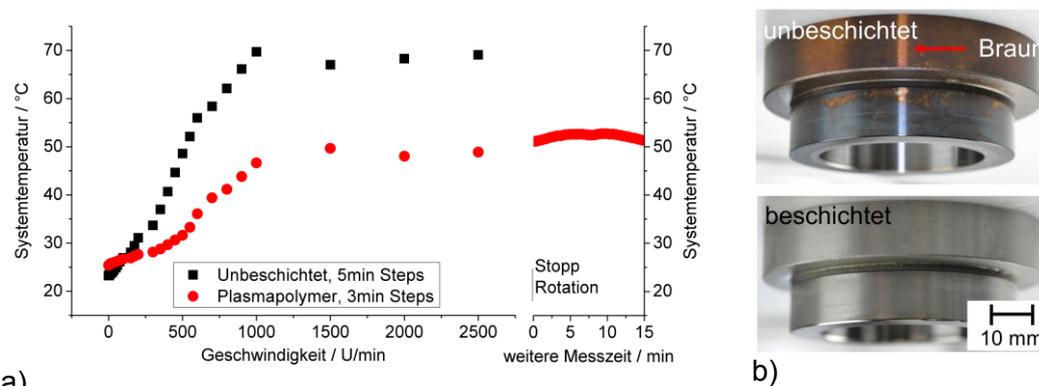
Es zeigt sich, dass die Messung der Systemtemperatur nicht der Temperatur an der Reibkontaktstelle entspricht, da die Temperaturkurve mehrere Minuten nach Stillstand des Rotationsantriebs immer noch ansteigt und eine Abkühlung erst später eintritt (Abbildung 10). Dies ist auf die räumliche Entfernung zwischen Reibkontaktstelle und Temperatursensor für die Messung der Systemtemperatur zurückzuführen. Die Temperatur in der Kontaktfläche des Experiments war definitiv höher als die angezeigten Maxima der Systemtemperatur. Bei der Messung mit 150 N waren es 61,9 °C als Systemtemperatur im Maximum. Der vor dem Test bereits temperaturogehärtete Gegenkörper verfärbte sich im tribologischen Test. Das ist ein klares Indiz, dass die Temperatur in der Reibkontaktstelle wesentlich höher lag.

Um keine Risiken wie Veränderungen des Öls bei zu hoher Temperatur in der Kontaktfläche einzugehen, wurde 81 N als Normalkraft für die Untersuchungen mit den Strukturen gewählt. Bei dieser Kraft zeigten sich keine Veränderungen am Gegenkörper (Abbildung 10b). Das Drehmoment konnte gut aufgezeichnet werden. Die Aufschwimmhöhe war ausreichend.



a) Abbildung 10: Temperaturentwicklung zu Abbildung 9: a) Temperaturkurven, b) Fotos der (temperaturgehärteten) Gegenkörper nach Nutzung mit 150 N (oben) bzw. 81 N (unten).

Es zeigte sich eine deutliche Reduzierung der Temperatur durch reduzierte Reibung aufgrund der plasmapolymerten Beschichtung der Elastomerplatten (Abbildung 11). Aufgrund der starken Verfärbung des Gegenkörpers im Test gegen eine unbeschichtete Elastomerplatte (Abbildung 11b), muss davon ausgegangen werden, dass die tatsächliche Temperatur im Reibkontakt wesentlich höher gewesen sein muss.



a) Abbildung 11: Temperaturentwicklung des Systems: a) Temperaturkurven, b) Fotos benutzter Gegenkörper bei un- sowie beschichteten Elastomerplatten. PEAX Ref2; 81 N.

Da die Starttemperatur in den Vorversuchen um wenige Grad Celsius schwankte (vgl. Abbildung 10) wurde eine thermische Isolierung um das kurz zuvor neu gefertigte Gehäuse am neuen Standort des Messgerätes aufgebaut und zudem die Starttemperatur für alle Strukturierungsversuche konstant auf 30 °C vorgeheizt.

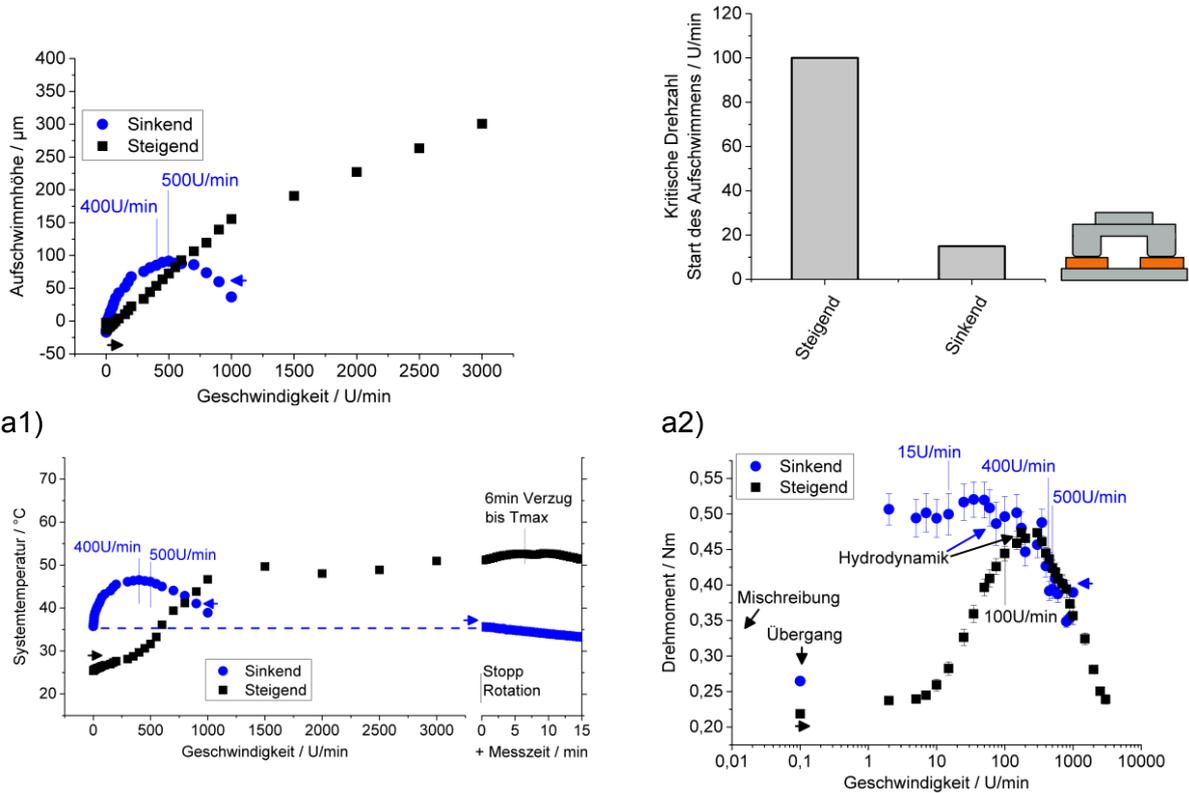
#### 4.7 Einlaufverhalten vs. Variation der Geschwindigkeiten

Die Vorversuche wurden alle mit steigender Geschwindigkeit durchgeführt. Der Start erfolgte bei den Untersuchungen der Strukturierungen bei 1000 U/min. Die Geschwindigkeit wurde alle drei Minuten heruntergefahren. Durch die höheren Geschwindigkeiten zu Beginn kann ein schnellerer Einlauf der Reibpartner erfolgen. Bei 1000 U/min war durch das Aufschwimmen bereits das Maximum der Unebenheit der Elastomerplatten innerhalb der Reibspur (vgl. Abbildung 6) ausgeglichen. Höhere Geschwindigkeiten hatten daher für die Untersuchung keine Relevanz, da sich das System schon im Bereich der Hydrodynamik befand.

Abbildung 12 zeigt das Systemverhalten, wenn die Geschwindigkeitsänderung steigend oder sinkend war. Auffallend ist die starke Erwärmung beim Einlauf bei 1000 U/min. Innerhalb von drei Minuten hat sich die Systemtemperatur von den zu Beginn herrschenden 30,6 auf 38,9 °C erhöht. Eine Temperaturerhöhung erfolgte bis zur Drehzahl von 400 U/min. Bei langsameren Geschwindigkeiten konnte das System wieder abkühlen und die Temperatur sank, wodurch sich der gekrümmte Verlauf der Messwerte ergibt. Das Maximum der Temperatur bei 400 U/min ergab sich nur durch einen Zeitverzug bis der Messfühler die Systemtemperatur detektieren konnte. Unter Ausschluss von Erwärmung durch Reibung

betrug der Zeitverzug sechs Minuten. Dies entspricht im Test zwei Geschwindigkeitsstufen (Länge jeweils drei Minuten). Das Maximum in der Temperatur wurde also bei 500 U/min erreicht. Die maximale Aufschwimmhöhe wurde im Test mit sinkender Geschwindigkeit ebenfalls bei 500 U/min erreicht.

Die entstehende Temperatur veränderte die Viskosität im Bereich der Reibstelle. Im Vergleich mit Tabelle 2 ist ersichtlich, dass sich eine Änderung der Temperatur signifikant auf die Viskosität der Öle auswirkt. Das gesamte System wurde durch die Reibung aufgeheizt. Nichtsdestotrotz wurde mit der Testkonzeption der Bereich der Hydrodynamik erreicht und ein Aufschwimmen erzielt. Durch die sinkende Geschwindigkeit konnte die Aufschwimmphase hin zu geringeren Geschwindigkeiten ausgedehnt werden. Dies spiegelt sich auch insbesondere beim Maximum des Drehmomentes wider.



b) c) Abbildung 12: Systemverhalten bei unterschiedlichem Einlauf kommend von geringen zu steigenden bzw. von hohen zu sinkenden Geschwindigkeiten: a1) Aufschwimmhöhe, a2) kritische Drehzahl zum Start des Aufschwimmens, b) Temperaturkurven und c) Drehmomente. Glatte, plasmapolymere beschichtete Elastomerplatten; PEAX Ref. 2; 81 N.

#### 4.8 Variation der Strukturen

Wie im vorigen Abschnitt 4.7 beschrieben, erfolgten die Untersuchungen der Strukturierungen mit sinkenden Geschwindigkeiten. Dabei wurde die Drehzahl auf maximal 1000 U/min begrenzt. Zur Schmierung wurde das volladditivierte Serienachsgetriebeöl PEAX Ref. 2 sowie eine Normalkraft von 81 N verwendet. Die Starttemperatur betrug  $30^{\circ}\text{C}$ .

Abbildung 13 zeigt beispielhaft die maximale Steigerung der Aufschwimmhöhe durch eine Mikrostrukturierung der Oberfläche. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Ebenheiten konnte bspw. mittels radial ausgerichteter, gleichschenkliger Dreiecke die Aufschwimmhöhe verbessert werden.

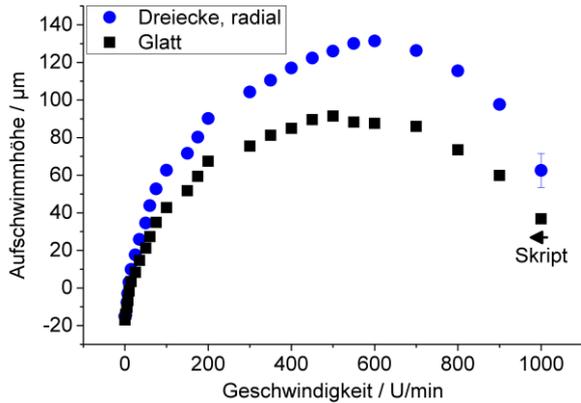


Abbildung 13: Steigerung der Aufschwimmhöhe durch Mikrostrukturierung der Oberfläche.

Zur Übersicht der Ergebnisse bezüglich Aufschwimmen, Temperatur und Drehmoment wird die Verbesserung gegenüber einer als glatt definierten, plasmapolymere beschichteten Elastomerplatte gezeigt (Abbildung 14 bis Abbildung 16). Die plasmapolymere Beschichtung auf der glatten Elastomerplatte brachte bereits selbst schon Verbesserungen (vgl. Abbildung 4 sowie Abbildung 11). Die beschichtete, als glatt definierte Referenz ist die Probe mit sinkender Geschwindigkeit aus Abbildung 12.

Durch den Einsatz der Strukturierungen mitsamt plasmapolymere Beschichtung konnte die Temperatur im Vergleich zur Referenz dieser um wenige Grad Celsius weiter abgesenkt werden (Abbildung 15). Grund ist das signifikant reduzierte Drehmoment sowohl durch Mikrostrukturierung als auch plasmapolymere Beschichtung (Abbildung 16).

Zur Auswahl von günstig auf das Drehmoment wirkenden Strukturen muss das gesamte Systemverhalten (Abbildung 14 bis Abbildung 16) betrachtet werden. Ganz allgemein zeigten sich Strukturen, die einen Staudruck des Schmieröls verursachen als vorteilhaft. Dies war aufgrund des verbesserten Aufschwimmens auch zu erwarten. Bei diesen zeigten sich insbesondere die Ovale mit möglichst großem Anstellwinkel zur Drehrichtung sowie eng beieinander stehende, gleichschenklige Dreiecke mit Spitze in sowie gegen Umlaufrichtung als geeignet.

Ganz allgemein konnte eine größere Drehmomentreduzierung bei geringeren Geschwindigkeiten beobachtet werden. Entweder kommt hier eine stärkere Mischreibung durch Schmierstoffmangel zum Tragen oder die gesamte Kurve konnte wie beabsichtigt hin zu kleineren Umdrehungszahlen verschoben werden.

Verbesserung Aufschwimmen von		0,1U/min	2U/min	5U/min	7U/min	10U/min	15U/min	25U/min	35U/min	50U/min	60U/min	75U/min	100U/min	150U/min	175U/min	200U/min	300U/min	350U/min	400U/min	450U/min	500U/min	550U/min	600U/min	700U/min	800U/min	900U/min	1000U/min
Glatt, Referenz	µm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Noppen, H5-11µm	µm	-10,9	-3,61	-8,25	-7,1	-7,38	-6,33	-6,25	-5,42	-4,23	-1,49	-1,14	-0,3	0,015	0,628	0,404	1,928	1,577	2,647	1,441	2,019	6,122	5,837	5,724	11,28	14,05	17,32
Noppen, H5-11µm	µm	-2,5	2,527	1,368	3,15	3,328	5,045	6,682	7,806	9,178	11,07	12,81	15,02	15,66	16,23	16,42	19,27	25,7	37,44	26,26	35,75	41,25	41,39	37,83	38,23	31,84	20,9
Dreiecke, Spitzen gegen Umlaufrt	µm	4,381	10,49	6,495	7,386	5,863	6,223	5,94	5,307	4,596	4	3	2,589	1,14	-6,53	2,536	6,547	9,686	13,07	13,8	16,41	23,13	26,32	26,4	31,01	31,23	26,57
Dreiecke, Spitzen gegen Umlaufrt	µm	5,183	2,656	3,812	2,895	1,161	-0,99	-1,15	-2,68	-4,22	-4,2	-6,36	-7,64	-9,68	-11,4	-13,1	-12,9	-14,3	-13,1	-13,4	-11,6	-6,13	-3,92	-1,86	7,158	11,21	12,15
Dreiecke, Spitzen in Umlaufrt	µm	6,635	13,97	8,99	10,05	8,403	9,482	9,386	8,881	8,997	9,427	9,364	9,303	8,213	8,2	8,54	11,63	12,62	15,7	15,8	18,28	24,28	26,86	27,26	32,88	31,78	26,33
Dreiecke, Spitzen in Umlaufrt	µm	-2,9	-0,78	-2,28	-3,06	-5,21	-5,69	-6,5	-7,45	-8,55	-9,32	-11,5	-12	-12,3	-11,3	-10,4	-6,17	-4,93	-2,85	-2,33	-1	5,489	6,1	5,169	9,11	9,803	7,638
Oval, 70°, Fluss nach innen	µm	-4,21	1,479	0,014	0,467	-1,75	-1,7	-1,68	-2,13	-2,51	-2,95	-5,26	-6,18	-7,8	-9,53	-10,9	-9,84	-9,91	-8,61	-9,2	-8,02	-2,93	-3,27	-3,35	3,503	6,508	8,948
Oval, 70°, Fluss nach innen	µm	0,541	-3,58	-1,52	-3,07	-4,55	-6,55	-7,5	-9,59	-11,7	-12,9	-15	-17,4	-20,9	-28,5	-27,5	-23,4	-23,3	-24,1	-21,8	-19,2	-12,8	-11,4	-11,5	-5,99	-1,99	-2,06
Oval, 70°, Fluss nach außen	µm	-3,35	0,118	-1,2	-1,27	-1,69	-2,35	-2,57	-2,16	-1,38	-0,51	-1,38	-1,47	-2,28	-2,65	-2,23	-0,67	0,252	2,264	2,45	4,549	10,06	10,64	9,924	15,48	17,63	16,68
Oval, 70°, Fluss nach außen	µm	-5,34	-5,37	-5,72	-6,35	-7,42	-7,75	-7,12	-7,29	-5,85	-6,02	-5,62	-4,67	-5,36	-5,54	-4,96	-2,34	-0,64	2,711	3,728	5,99	13,68	12,78	10,25	11,91	11,91	11,43
Dreiecke, radial	µm	1,951	-0,48	2,641	3,765	4,689	6,441	9,25	11,27	13,34	16,43	17,81	19,86	19,93	20,86	22,76	28,82	29,26	32,02	32,75	34,61	41,77	43,8	40,33	41,98	37,77	25,74
Dreiecke, radial	µm	-3,95	0,273	-1,34	0,194	0,774	1,449	2,337	3,136	3,894	4,449	5,473	6,818	6,522	7,684	8,736	13,88	16,02	19,39	20,25	22,5	27,82	28,28	26,68	32,59	32,37	25,88
Oval, 0°	µm	1,978	4,85	2,199	2,874	1,095	0,542	0,278	-0,53	-1,34	-2,72	-4,24	-4,92	-6,97	-7,01	-7,26	-1,58	0,755	2,998	5,932	8,348	15,67	18,57	17,73	18,55	9,605	6,11
Oval, 0°	µm	0,641	6,483	4,075	5,032	3,713	4,14	5,444	5,291	5,587	6,636	6,506	6,963	6,725	7,179	7,096	9,405	11,16	14,32	15,69	18,17	22,72	24,2	24,06	29,11	30,85	17,29
Oval, 30°, Fluss nach innen	µm	-0,19	-7,05	-4,01	-6,11	-7,54	-10,5	4,734	4,625	5,066	3,819	3,148	1,793	-0,3	-0,16	-0,39	2,604	4,373	6,888	7,407	9,987	16,02	16,99	14,84	19,23	20,29	17,88
Oval, 30°, Fluss nach innen	µm	6,14	8,335	6,655	6,904	6,542	6,514	5,967	5,989	5,854	5,904	4,674	2,365	-4,29	-4,13	-4,75	-0,89	1,277	2,864	2,132	5,22	9,447	10,52	5,639	9,391	8,83	6,691
Oval, 30°, Fluss nach außen	µm	0,647	3,757	2,642	3,471	3,032	3,657	4,047	4,013	4,546	4,761	4,63	4,765	4,365	4,858	5,914	8,353	8,905	8,457	3,007	0,634	4,988	5,083	4,608	9,726	10,54	9,971
Oval, 30°, Fluss nach außen	µm	-0,06	0,716	0,499	0,215	-2,02	-1,34	-1,02	-2,1	-3,27	-1,41	-3,47	-0,39	-2,79	-3,5	-3,82	-0,77	2,618	5,596	5,98	7,669	13,38	13,55	11,95	14,6	14,65	10,06
5 Doppelringe	µm	-1,33	-10,3	-4,78	-5,84	-6,34	-7,85	-6,03	-5,89	-5,43	-4,9	-4,79	-5,29	-8,36	-9,34	-9,91	-5,27	-3,3	0,209	0,629	3,469	6,373	6,315	5,361	6,781	2,145	-1,8
5 Doppelringe	µm	-6,81	-0,86	-2,35	-1,68	-3,56	-3,17	-1,53	-1,73	-0,36	0,563	1,144	1,188	1,474	1,954	2,721	7,19	9,227	11,03	11,67	13,26	16,09	15,72	12,5	17,55	17,18	13,98
3 Doppelringe	µm	5,084	3,411	7,702	8,318	8,909	10,27	13,35	15,16	17,39	19,17	20,14	20,69	16,96	18,15	19,78	27,72	28,5	32,03	30,24	32,34	35,37	33,31	30,93	28,72	15,88	2,252
3 Doppelringe	µm	-6,71	-0,92	-4,21	-4,93	-7,32	-7,83	-9,21	-11	-12,9	-13,6	-17,3	-18,9	-21,8	-22,1	-23,5	-24	-24,1	-21,3	-19,8	-16	-7,73	-3,94	-0,17	8,508	13,8	13,69

Abbildung 14: Verbesserung Aufschwimmen (positive Werte; gelb bis grün).

Reduzierung Temperatur von	0,1U/min	2U/min	5U/min	7U/min	10U/min	15U/min	25U/min	35U/min	50U/min	60U/min	75U/min	100U/min	150U/min	175U/min	200U/min	300U/min	350U/min	400U/min	450U/min	500U/min	550U/min	600U/min	700U/min	800U/min	900U/min	1000U/min
Glatt, Referenz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Noppen, H5-11µm	2,655	2,724	3,027	3,262	3,515	3,605	3,834	4,139	4,432	4,807	5,478	5,9	6,498	7,317	8,061	8,865	9,431	10	10,47	10,95	11,18	11,45	11,48	11,3	10,06	8,385
Noppen, H5-11µm	-0,89	-1	-1,12	-1,2	-1,21	-1,27	-1,4	-1,56	-1,53	-1,78	-1,77	-2,08	-2,12	-2,13	-2,13	-2,37	-2,39	-2,19	-2,4	-2,21	-2,06	-2,02	-1,74	-1,23	-0,92	-0,33
Dreiecke, Spitzen gegen Umlauftrgt	0,243	0,419	0,359	0,441	0,508	0,632	0,715	0,705	0,723	0,719	0,893	0,772	0,787	0,915	0,981	0,984	0,772	0,953	0,736	0,811	0,796	0,972	1,174	1,389	1,622	2,034
Dreiecke, Spitzen gegen Umlauftrgt	0,864	0,928	1,073	1,087	1,211	1,16	1,404	1,276	1,373	1,296	1,494	1,488	1,419	1,577	1,544	1,383	1,138	1,029	0,725	0,539	0,392	0,331	0,183	0,376	0,606	1,406
Dreiecke, Spitzen in Umlauftrgt	2,501	2,565	2,487	2,537	2,407	2,42	2,421	2,292	2,338	2,043	2,253	1,81	1,758	1,809	1,655	1,825	1,655	1,525	1,323	1,096	0,845	0,786	0,396	0,562	0,951	1,61
Dreiecke, Spitzen in Umlauftrgt	4,365	4,314	4,28	4,301	4,293	4,321	4,21	4,07	4,087	3,803	3,845	3,641	3,571	3,501	3,391	3,477	3,284	3,141	2,763	2,577	2,289	1,975	1,579	1,495	1,544	1,763
Oval, 70°, Fluss nach innen	2,598	2,735	2,847	2,945	2,956	2,93	3,109	3,104	3,145	3,054	3,259	3,229	3,128	3,324	3,143	2,924	2,771	2,689	2,396	2,205	1,958	1,616	1,171	0,889	0,556	0,563
Oval, 70°, Fluss nach innen	2,401	2,395	2,503	2,668	2,727	2,701	2,863	2,881	2,864	2,694	2,895	2,799	2,648	2,605	2,479	2,38	2,107	1,872	1,473	1,133	0,843	0,363	0,025	-0,17	-0,06	0,557
Oval, 70°, Fluss nach außen	3,504	3,662	3,713	3,949	3,915	3,848	3,869	3,682	3,828	3,623	3,871	3,592	3,632	3,696	3,659	3,463	3,294	3,098	2,704	2,544	2,32	2,106	1,875	1,822	0,696	1,162
Oval, 70°, Fluss nach außen	2,538	2,693	2,767	2,845	2,922	2,888	2,941	2,89	2,998	2,839	3,062	2,843	2,683	2,932	2,815	2,735	2,618	2,539	2,392	2,251	2,158	2,103	1,775	1,75	1,916	2,398
Dreiecke, radial	-1,72	-1,8	-2	-1,99	-2,02	-2,23	-2,21	-2,35	-2,47	-2,7	-2,46	-2,63	-2,79	-2,55	-2,46	-2,51	-2,35	-2,06	-2,18	-1,87	-2,01	-1,66	-1,13	-0,49	0,042	1,117
Dreiecke, radial	1,287	1,309	1,303	1,22	1,107	1,03	0,931	0,814	0,749	0,665	0,604	0,382	0,052	0,063	-0,29	-0,38	-0,5	-0,55	-0,94	-0,93	-1,08	-1,19	-1,2	-1,06	-0,94	-0,43
Oval, 0°	0,545	0,571	0,665	0,691	0,682	0,593	0,775	0,625	0,843	0,642	0,782	0,622	0,563	0,618	0,549	0,348	0,261	-0,03	-0,22	-0,18	-0,28	-0,08	0,053	0,528	0,731	1,304
Oval, 0°	0,536	0,623	0,595	0,66	0,623	0,601	0,574	0,42	0,47	0,244	0,335	0,233	0,02	-0,03	-0,28	-0,37	-0,53	-0,66	-0,93	-1,06	-1,22	-1,16	-1,38	-1,22	-1,12	-0,88
Oval, 30°, Fluss nach innen	3,08	3,272	3,424	3,728	3,902	3,952	1,896	1,901	2,12	1,839	1,985	1,935	1,894	1,934	1,955	1,637	1,601	1,611	1,475	1,32	1,086	1,156	1,12	1,088	1,198	1,671
Oval, 30°, Fluss nach innen	1,371	1,417	1,445	1,504	1,446	1,572	1,72	1,485	1,495	1,449	1,628	1,553	1,464	1,319	1,177	1,202	1,037	0,949	0,548	0,53	0,383	0,353	0,155	0,168	0,357	1,299
Oval, 30°, Fluss nach außen	2,18	2,164	2,26	2,387	2,419	2,417	2,326	2,329	2,403	2,282	2,466	2,335	2,423	2,598	2,653	2,887	2,874	2,805	2,626	2,69	2,477	2,548	2,233	2,413	2,581	3,015
Oval, 30°, Fluss nach außen	2,756	2,764	2,722	2,956	2,936	3,064	3,031	3,115	3,107	2,969	3,261	3,265	3,35	3,545	3,466	3,473	3,216	3,251	3,167	3,273	3,404	3,377	3,158	3,254	3,145	3,378
5 Doppelringe	0,07	0,045	0,097	0,151	0,125	0,205	0,205	0,207	0,23	0,111	0,325	0,267	0,222	0,254	0,113	0,055	-0,03	0,077	0,044	0,119	0,22	0,438	0,521	0,71	1,053	1,558
5 Doppelringe	4	3,881	3,894	4,017	3,967	3,847	3,804	3,553	3,727	3,356	3,451	3,241	3,006	2,836	2,752	2,617	2,458	2,433	1,983	2,139	1,937	1,684	1,303	1,085	0,991	1,23
3 Doppelringe	-1,02	-1,14	-1,28	-1,31	-1,48	-1,55	-1,62	-1,89	-1,85	-2,07	-1,95	-2,04	-2,16	-1,98	-1,92	-1,97	-1,91	-1,56	-1,63	-1,25	-1,12	-0,82	-0,36	0,41	0,837	1,593
3 Doppelringe	4,488	4,611	4,808	4,847	4,989	5,063	5,125	5,062	5,078	4,946	4,928	4,866	4,636	4,614	4,41	4,242	3,688	3,428	2,671	2,19	1,661	1,31	0,795	0,654	0,458	1,099

Abbildung 15: Temperaturreduzierung (positive Werte; gelb bis grün).

Reduzierung Drehmoment von	0,1U/min	2U/min	5U/min	7U/min	10U/min	15U/min	25U/min	35U/min	50U/min	60U/min	75U/min	100U/min	150U/min	175U/min	200U/min	300U/min	350U/min	400U/min	450U/min	500U/min	550U/min	600U/min	700U/min	800U/min	900U/min	1000U/min
Glatt, Referenz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Noppen, H5-11µm	-3,94	51,26	52,87	56,45	56,89	59,45	60,4	61,32	62,2	-2,12	-5,19	-0,95	0,707	-3,55	-10,4	-3,18	8,021	8,694	6,219	9,842	-3,99	5,28	-11,9	-21,2	-24	
Noppen, H5-11µm	-223	-44,1	-28,5	-20,9	-11	-14,8	-1,82	-0,93	-1,3	-5,8	-9,93	-7,65	-8,19	-10,9	-19,3	-15,5	-4,04	-16,4	-23,2	-19,1	-15,7	-23,7	-17,3	-39,2	-47,2	-42,5
Dreiecke, Spitzen gegen Umlauftrgt	32,12	49,92	38,08	39,01	28,6	22,57	15,65	11,03	5,117	1,666	35,88	37,42	37,62	35,04	27,03	27,22	23,16	5,835	0,778	5,088	7,755	3,168	2,855	-18,4	-21,2	-24
Dreiecke, Spitzen gegen Umlauftrgt	34,69	70,37	75,57	79,8	81,03	81,64	80,57	79,28	77,28	77,29	40,49	42,14	42,52	39,88	35,51	32,14	41,68	35,24	31,19	32,97	37,1	34,91	38,6	21,5	12,3	6,194
Dreiecke, Spitzen in Umlauftrgt	-1,53	38,52	26,4	25,2	19,78	16,73	11,88	9,95	8,829	11,64	4,83	7,21	7,06	4,274	-0,07	-0,29	7,555	-3,7	-10,6	-6,22	-0,56	-5,35	-2,52	-22,7	-31,7	-33,4
Dreiecke, Spitzen in Umlauftrgt	8,571	50,01	42,59	42,02	38,81	37,12	35,55	33,65	31,36	31,06	22,81	25,09	26,65	23,72	14,22	18,4	23,24	13,4	5,328	6,851	10,12	5,669	11,24	-9,18	-10,8	0,38
Oval, 70°, Fluss nach innen	21,13	77,57	81,31	82,89	84,01	85,37	86,41	86,8	86,73	78,58	30,71	33,28	34,99	32,75	28,62	32,28	37,37	29,47	24,36	26,18	29,65	25,76	29,31	18,95	17,64	17,34
Oval, 70°, Fluss nach innen	19,35	62,06	68,91	71,41	73,13	74,48	75,72	75,7	74,9	74,19	57,35	57,11	53,58	50,1	45,61	46,83	50,09	41,48	38,46	39,03	41,78	38,13	38,02	23,24	11,49	8,908
Oval, 70°, Fluss nach außen	-2,03	59,59	58,4	59,43	56,98	56,66	55,59	54,13	51,99	16,2	10,49	12,79	16,96	16,07	9,94	12,52	17,91	6,493	-1,92	3,886	5,676	2,161	7,773	6,64	-9,44	-8,78
Oval, 70°, Fluss nach außen	0,223	75,36	73,32	73,22	71,7	69,78	66,92	64,66	60,7	26,38	22,92	24,68	25,23	19,26	16,44	20,81	26,56	15,36	2,467	9,701	4,648	-7,25	4,427	-7,08	-6,09	-2,62
Dreiecke, radial	-17,4	2,207	-10,5	-10,4	-13,4	-10,1	-8,99	-7,34	-8,88	-37,4	-40,2	-38,1	-28,7	-31,7	-41,1	-32,4	-12,9	-21,5	-25	-19,1	-8,2	-20,4	-16,9	-36,6	-37,7	-31,5
Dreiecke, radial	11,13	15,34	1,318	-1,69	-6,62	-11,3	-14	-15,6	-17,7	2,216	-1,81	0,586	-0,15	-4,75	-10,7	-7,45	0,724	-12,2	-20,3	-17,7	-10,9	-14,4	-6,67	-23	-28,7	-39,7
Oval, 0°	-3,77	35,54	26,18	25,23	22,05	19,45	17,05	14,97	11,79	10,39	22,86	24,54	25,83	23,05	17,55	23,3	29,04	18,81	13,41	13,49	17,02	13,13	9,638	-26,9	-21	-9,09
Oval, 0°	-4,12	37,84	29,75	27,73	22,46	16,28	9,026	5,681	1,547	6,808	-4,01	-1,03	10,4	6,251	0,398	5,753	12,59	2,208	-5,91	-5,46	5,553	0,305	3,027	-14,7	-44,7	-22
Oval, 30°, Fluss nach innen	16,04	71,78	82,43	83,98	84,6	85,34	89,51	89,94	89,95	18,43	15,57	17,24	18,15	15,44	9,224	13,35	21,02	11,28	1,06	3,428	7,667	4,815	8,352	-6,2	-6,92	-9,79
Oval, 30°, Fluss nach innen	24,78	58,21	63,58	65,82	68,62	72,14	76,83	78,53	79,71	28,66	27,13	27,89	23,48	21,15	16,4	20,37	29,07	19,71	16,21	18,07	23,36	18,64	18,98	3,67	-1,19	-0,49
Oval, 30°, Fluss nach außen	-5,01	67,21	68,84	68,89	66,69	69,35	68,26	63,7	58,06	17,36	12,41	16,43	10,74	10,87	-0,69	1,119	3,18	-19,5	-13,1	4,39	10,56	8,423	12,9	-2,84	-3,68	-7,42
Oval, 30°, Fluss nach außen	2,72	49,89	54,16	56,14	55,28	54,16	52,54	52,15	53,4	16,02	21,48	21,28	16,99	12,48	2,352	14,46	19,81	8,434	0,567	2,809	6,794	1,913	6,288	-8,49	-10,1	-7,17
5 Doppelringe	-19,9	25,89	19,64	21,42	18,6	18,75	20,68	24,54	18,92	17,56	14,12	15,57	12,8	7,678	1,715	2,883	10,84	-0,64	-8,76	-5,74	-3,92	-9,56	-6,25	-22,9	-21,2	-15,4
5 Doppelringe	-20,5	27,8	24,8	25,25	23,74	25																				

## 7 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 O<sub>2</sub>/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; veröffentlicht in TRIBOLOGIA - Finnish Journal of Tribology No. 2, Vol. 32, 12-19 (2014).
- [6] Paulkowski, D., Vissing, K., Karpinski, S., „Energieeinsparung durch plasmapolymere Beschichtung auf Wellendichtungen“ (engl.: „Energy saving with plasmapolymeric coating applied to rotary shaft sealings“), International Sealing Conference, Stuttgart, A18, 289-298 (2014); veröffentlicht in Dichtungstechnik Jahrbuch 2016, 446-454
- [7] Patent „Dichtungsartikel“: DE 10 2008 002 515 A1.
- [8] Gümbel, L., „Das Problem der Lagerreibung“, Mbl. Berlin. Bez.-Ver. dtsh. Ing. 5, 87-104 und 109-120 (1914). Hersey, M. D., „The Laws of Lubrication of Horizontal Journal Bearings“, J. Washington Acad. Sci. 4, 542-552 (1914).
- [9] Kunstfeld, T., „Einfluss der Wellenoberfläche auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtungen“, Dissertation 2005, ISBN 3936100160
- [10] Oliver, W. C., Pharr, G. M., „An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments“, J. Material Res. (1992) Vol. 7, No. 6, 1564-1583
- [11] Paulkowski, D., Vissing, K., Santos, M. I., „Kostengünstige plasmapolymere Beschichtung von Radialwellendichtungen zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß“, ZVO Oberflächentage 2015, Berlin; wird veröffentlicht in Galvanotechnik 2016
- [12] Paulkowski, D., Vissing, K., Santos, M. I., „Cost-efficient production of plasma-polymeric coatings on rotary shaft sealings“, Fluid Sealing 2016, Manchester, UK
- [13] Universal Material Tester (UMT3), Bruker ehemals Center for Tribology Inc., 1717 Dell Ave., Campbell, CA 95008.
- [14] Pflüger, C.; Haas, W., „Hochdruck-Wellendichtring I, Entwicklung eines kleinbauenden Wellen-Dichtungssystems für hohe Relativgeschwindigkeiten und gleichzeitig hohen Drücken“, VDMA FVA Fvh Nr. 471/I, Heft 839, 2007
- [15] Paulkowski, D., Vissing, K., „Plasmapolymeric coatings – A clean alternative to sliding lacquers on elastomers“, Proceedings of International Rubber Conference, Nürnberg, 2015; GAK – Gummi Fasern Kunststoffe 2016