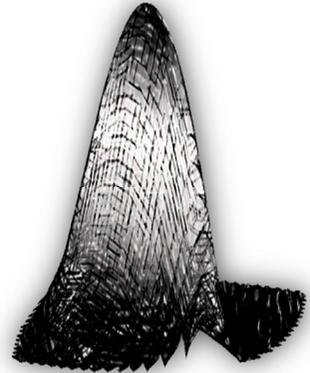


Der Vollschrrierung auf der Spur

Heß, M.

Der Übergang in die Vollschrrierung ist ein besonders wichtiger Betriebspunkt für die erfolgreiche Dimensionierung von Druckkammagerungen. Am IMW werden daher Druckkammgestaltungen untersucht, die eine frühzeitige Trennung der Kontaktpartner gewährleisten – eine messtechnische Aufrüstung des Druckkammprüfstandes gestattet die experimentelle Erfassung des Kontaktabhebens.



The transition into full film lubrication is a very important operating point for a successful dimensioning of thrust cone bearings. Hence, different thrust cone designs are examined at the IMW, to assure an early separation of the contacting surfaces – an upgrade of the measurement instrumentation applied to the thrust cone test bench allows the experimental detection of contact lifting.

1 Der Druckkammprüfstand am IMW

Druckkämme sind verzahnungsnahe Axiallager, die in schrägverzahnten Getriebestufen entstehende Axialkräfte direkt zwischen den Getriebewellen kurzschließen, ohne Lasten in stehende Bauteile abzuführen. Seit 2009 existiert am Institut für Maschinenwesen ein Prüfstand zur Untersuchung von Druckkämmen, der bisher vor allem für Untersuchungen zum Versagen von Laufflächen im Mangelschmierbereich eingesetzt worden ist. Durch eine Ertüchtigung dieses Prüfstandes ist es nun möglich, auch den Übergang in die Vollschrrierung zu bestimmen. Der generelle Aufbau des Zweischeibenprüfstandes wurde bereits von /1/ beschrieben, weshalb hier nur eine kurze Vorstellung der Prüfstandsarchitektur gegeben werden soll, bevor genauer auf die Erweiterung des Messkonzeptes eingegangen wird.

1.1 Allgemeiner Aufbau

Der Druckkammprüfstand am IMW besteht aus zwei separat angetriebenen, parallelen Prüfwellen, von denen eine axial verschiebbar gelagert ist.

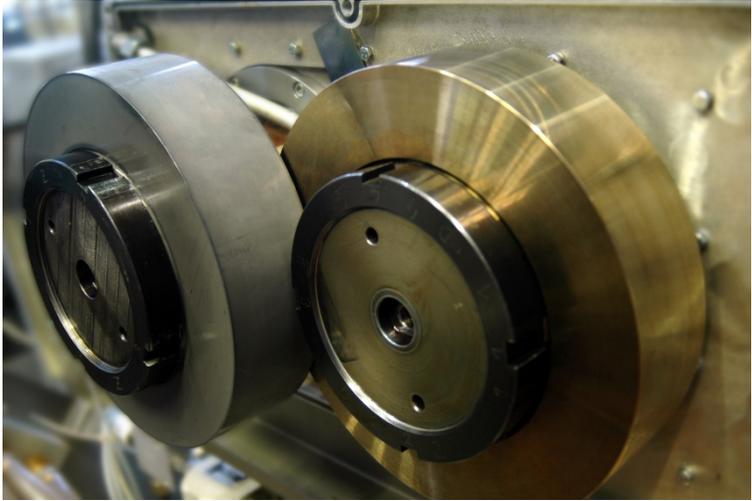


Abbildung 1: Sich leicht überlappende Prüflinge auf dem Druckkammprüfstand des IMW

Auf diesen Wellen werden die Druckkammprüflinge montiert, sodass sich diese stirnseitig leicht überdecken, wie in Abbildung 1 dargestellt.

Über eine Hydraulikmutter kann eine Axialkraft von bis zu 120 kN auf den Kontaktbereich zwischen den Prüflingen aufgebracht werden, durch den separaten Antrieb der Wellen kann ein beliebiges Schlupfverhältnis zwischen den Prüflingen eingestellt werden. Über DMS-Messbrücken auf der Zugwelle (in Abbildung 1 hinten) werden sowohl die den Kontakt belastende Axialkraft, als auch das zwischen den Prüflingen auftretende Reibmoment erfasst.

1.2 Kontaktwiderstandsmessung

Bei hydrodynamischen Gleitlagern definiert man den Übergang vom Mischreibungsbereich zur Vollschmierung als den Betriebspunkt, bei dem die hydrodynamisch wirksame Geschwindigkeit ausreichend viel Schmierstoff in den Schmierpalt zwingt, um eine vollständige Trennung der Kontaktpartner zu erreichen.

Da ab diesem Betriebspunkt theoretisch keine Festkörperberührung mehr auftritt und die elektrische Leitfähigkeit des Schmierstoffs deutlich höher als die der Festkörper ist, steigt mit Erreichen der Vollschmierung der Übergangswiderstand zwischen den Prüflingen nahezu sprunghaft an.

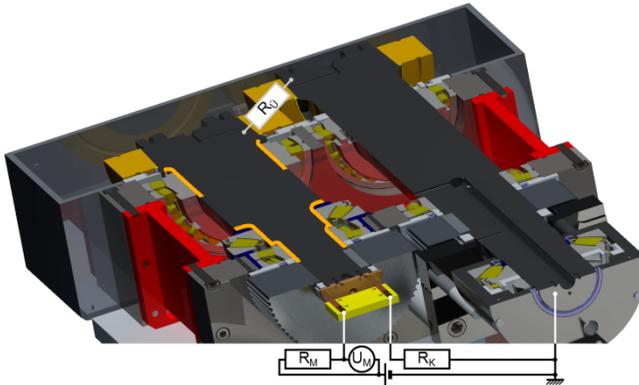


Abbildung 2: Konzept zur Kontaktwiderstandsmessung am Druckkammprüfstand

Um die Änderung des Übergangswiderstandes R_U messtechnisch erfassbar zu machen, wurde die druckseitige Versuchswelle gegenüber dem Rest des Prüfstandes elektrisch isoliert. Hierfür wurden die in Abbildung 2 orange hervorgehobenen Bereiche der Druckwelle mit einer keramischen Isolationsschicht überzogen. Abbildung 3 zeigt ein auf die ausgebaute Druckwelle montiertes Kegelrollenlager, unter dem die weiße „plasdia“-Aluminiumoxidbeschichtung der Fima LWK-Plasmaceramic GmbH zu erkennen ist.

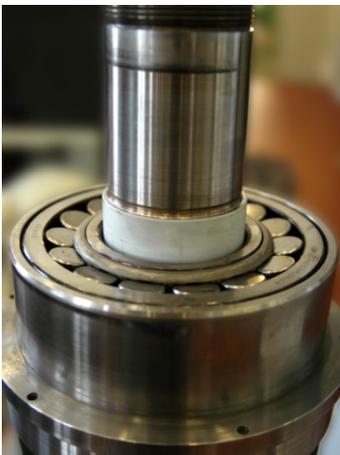


Abbildung 3: Druckwellenlager mit keramisch isoliertem Lagersitz

Mit Hilfe einer Gleichspannungsquelle wird an die isolierte Druckwelle ein elektrisches Potential gegenüber dem geerdeten Prüfstand angelegt. Die Spannungsübertragung auf die drehende Welle erfolgt mittels eines Schleifübertragers, dessen Sinterbronzekontaktpaar federbelastet auf eine an der rückwärtigen Stirnseite der Druckwelle montierte Kupferscheibe drückt. Zwischen Spannungsquelle und Schleifübertrager ist ein bekannter Messwiderstand R_M eingefügt, über dem die Messspannung U_M abgegriffen wird. An ein zusätzliches um 90° versetzt angeordnetes Sinterbronzepaar wird ein ebenfalls bekannter Kontrollwiderstand R_K angeschlossen, der mit der Masseleitung verbunden wird. Werden die Leitungswiderstände vernachlässigt, lässt sich für die Messspannung in Abhängigkeit von der Versorgungsspannung U_V folgender Zusammenhang formulieren:

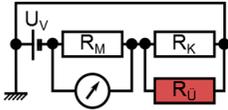
$$U_M = U_V \cdot \frac{R_M}{R_M + \left(\frac{1}{R_U} + \frac{1}{R_K} \right)^{-1}} \quad 1.1$$

Idealisiert ergeben sich somit drei mögliche Signalsituationen, die mit der Messspannung identifiziert werden können (Abbildung 4 zeigt entsprechende idealisierte Ersatzschaltbilder):

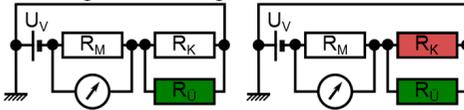
1. Eine vollständige Trennung der Prüflinge durch einen voll entwickelten Schmierfilm lässt den Übergangswiderstand gegen Unendlich ansteigen. In diesem Fall ergibt sich quasi eine Reihenschaltung von Mess- und Kontrollwiderstand. Durch geeignete Wahl der Widerstandsgrößen lässt sich die Messspannung über den Spannungsteiler einstellen.
2. Bei der Berührung der Prüflinge (Mischreibung) geht der Übergangswiderstand zwischen ihnen gegen Null. Wegen dessen Parallelschaltung zum Kontrollwiderstand wird dieser quasi unbedeutend und fast die gesamte Versorgungsspannung fällt über dem Messwiderstand ab. Für diesen Fall ist der Messwiderstand so groß zu wählen, dass er den sich durch die Versorgungsspannung ergebenden Stromfluss ausreichend begrenzt, um eventuelle Beschädigungen der Prüflinge durch den Stromdurchgang zu vermeiden.
3. Eine Störung der Schleifübertragung zwischen Messwiderstand und Druckwelle oder zwischen Druckwelle und Kontrollwiderstand bei gleichzeitiger Vollschmierung unterbrechen den Stromfluss vollständig, weshalb die am Messwiderstand abgreifbare Spannung zu Null wird. Dieser Zustand dient der Selbstüberwachung des Messsystems (speziell der Schleifübertragung). In der praktischen Anwendung zeigte

sich, dass nur ein verschwindend geringer Anteil der Messsignale wegen Störungen der Schleifübertragung dieses Messsignal erzeugten.

Fall 1: Vollständige Trennung der Prüflinge



Fall 2: Berührung der Prüflinge



Fall 3: Abgehobener Schleifkontakt

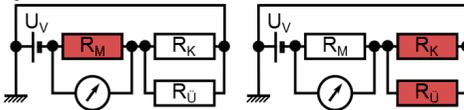


Abbildung 4: Idealierte Ersatzschaltbilder für die Messung des Kontaktzustandes

2 Signalauswertung

Die am Messwiderstand erfasste Spannung wird mit einer Frequenz von 2 kHz aufgezeichnet. Im linken Bereich von Abbildung 5 sind exemplarisch drei gemessene Spannungsverläufe für drei Betriebsituationen aufgezeichnet. In allen drei Situationen wurde dasselbe Prüflingspaar mit derselben Axiallast bei gleichem Schlupfverhältnis belastet. Lediglich die Rotationsgeschwindigkeit der Prüfwellen und damit die für den Schmierfilmaufbau bedeutende hydrodynamisch wirksame Geschwindigkeit wurde variiert. Die Diagramme auf der rechten Seite der Abbildung zeigen das in die drei Fälle klassierte Signal.

Die Zeitverläufe der Messspannung zeigen, dass sich das reale System nicht ganz ideal verhält. Einerseits ergeben sich infolge von Leitungswiderständen, dem Übergangswiderstand des Schleifübertragers und einem nicht völlig sprunghaft ansteigendem Übergangswiderstand zwischen den Prüflingen auch Spannungen, die von den theoretisch berechneten Niveaus abweichen, andererseits zeigt insbesondere die mittlere Messung, dass der reale Kontakt in einigen Belastungssituationen zwischen dem abgehobenen und dem berührenden Zustand pendelt.

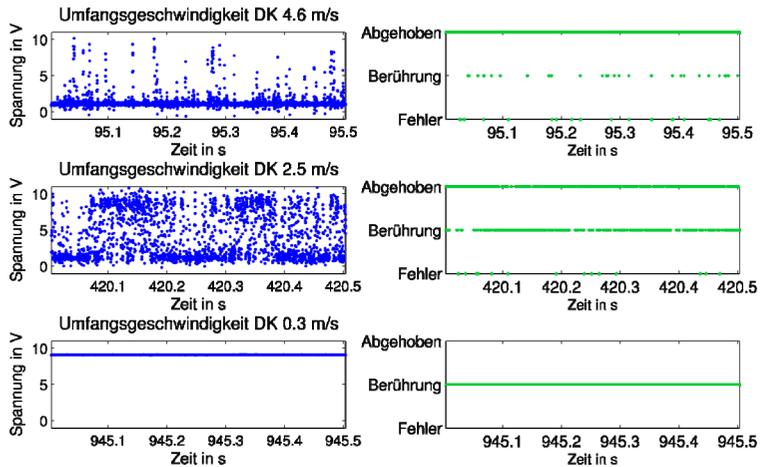


Abbildung 5: Zeitsignal der gemessenen Spannung (links) und klassiertes Signal (rechts) für drei unterschiedliche Lastfälle

Durch eine Klassierung des Spannungssignals über festgelegte Spannungsbereiche lassen sich die Messwerte des realen Signals als Kontaktsituationen interpretieren, wie im rechten Bereich der Abbildung 5 dargestellt. Eine Analyse der Häufigkeit der jeweils in einem Zeitintervall aufgetretenen Kontaktzustände erleichtert die globale Einordnung des Betriebszustandes in die überwiegend aufgetretene Schmierungsituation. Die in Abbildung 6 dargestellten Histogramme zeigen die Häufigkeitsverteilung der Schmierungszustände für die drei Beispielmessungen. Während für den oberen und für den unteren Lastfall schon zuvor sehr eindeutige Interpretationen möglich waren, zeigt sich für den mittleren Lastfall, dass sich dieser bereits die überwiegende Zeit des Versuchs im abgehobenen Schmierungszustand befand.

Um diese Beobachtung in einem quantitativen Kennwert zusammen zu fassen, lässt sich ein Kontaktkoeffizient c^* als Quotient der Anzahl der im Messzeitraum berührend gewerteten Messpunkte bezogen auf die gültigen Messpunkte (berührend oder abgehoben) definieren:

$$c^* = \frac{N_{\text{berührend}}}{N_{\text{berührend}} + N_{\text{abgehoben}}} \quad 2.1$$

Für die drei Lastfälle ergeben sich entsprechend folgende Kontaktkoeffizienten: $c^*(4,6 \text{ m/s}) = 0,035$; $c^*(2,5 \text{ m/s}) = 0,365$; $c^*(0,3 \text{ m/s}) = 1,000$.

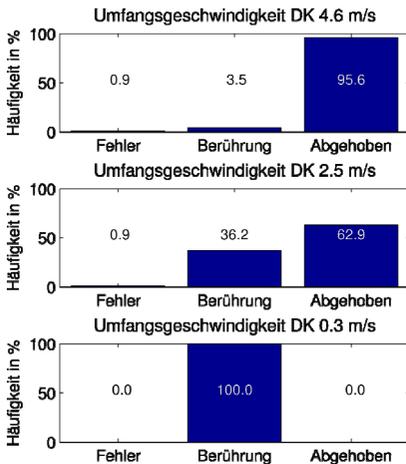


Abbildung 6: Häufigkeitsverteilung der Schmierzustände für die drei Lastfälle aus Abbildung 5

Über den Vergleich dieses Kontaktkoeffizienten lassen sich unterschiedliche Lastzustände am Prüfstand hinsichtlich des aufgebauten Schmierfilmes einordnen. Legt man beispielsweise einen Grenzwert fest, kann dieser als Unterscheidungsmerkmal für die Schmierungsreiche Vollschmierung und Mischreibung angesehen werden. Für die folgenden Betrachtungen wurde der Wert 0,5 festgelegt, das bedeutet, Lastfälle bei denen ein Kontaktkoeffizient unter 0,5 ermittelt wurde, gelten als abgehoben, Betriebszustände mit höheren Kontaktkoeffizienten werden als mischreibungsbehaftet angesehen.

Es ist zwar davon auszugehen, dass die Wahl eines abweichenden Zahlenwertes zu einer Verschiebung der Grenzlinie zwischen diesen Betriebsbereichen führen würde, beachtet man aber, dass es Ziel der Untersuchungen ist, verschiedene Einflussparameter hinsichtlich des Erreichens der Vollschmierung zu bewerten, wird deutlich, dass die genaue Lage der Grenzlinie von untergeordneter Bedeutung ist, solange für den Vergleich aller Untersuchungsparameter dieselbe Grenzlinie als Referenz herangezogen wird.

3 Reibungsminima

Trägt man für ein Gleitlager die Reibkraft über der Reibgeschwindigkeit auf so ergibt sich die sogenannte Stribeckkurve. Für hydrodynamische Lager besitzt diese Kurve typischerweise ein Minimum an der Stelle, bei der eine vollständige Trennung der Kontaktpartner durch den Schmierfilm erfolgt.

Mit den im Druckkammprüfstand integrierten Messbrücken für Axialkraft und Reibmoment lassen sich Verläufe des Reibkoeffizienten über der Rotationsgeschwindigkeit aufzeichnen. Abbildung 7 zeigt exemplarisch für verschiedene Untersuchungs geschwindigkeiten bei gleicher Axiallast an einem Prüflingspaar ermittelte Reibwerte. Den Messwerten ist ein idealisierter Verlauf einer Stribeckkurve unterlegt. Die Lage des Minimums kann als zweites Kriterium zur Beschreibung des Vollschrnerungsbeginns herangezogen werden.

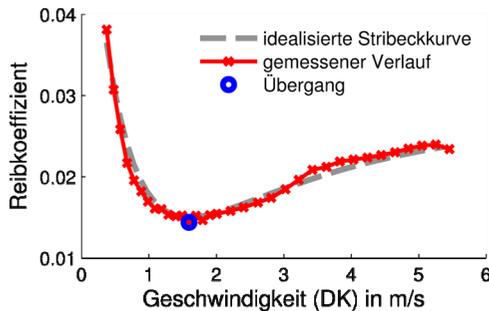


Abbildung 7: Gemessene Reibwerte über der Druckkammgeschwindigkeit

4 Übergangsverhalten

Für ein Prüflingspaar mit einem Kegelwinkel von $0,75^\circ$ wurde bei einem Schlupfverhältnis von 10% das Übergangsverhalten vom Mischreibungsbereich in die Vollschrnerung experimentell bestimmt. Hierfür wurden auf 15 Axiallaststufen zwischen 2 kN und 30 kN jeweils 35 Drehzahlstufen zwischen 0,4 m/s und 5,6 m/s (Umfangsgeschwindigkeit am mittleren Laufflächendurchmesser des Druckkamms) angefahren. Für jede Axiallaststufe wurden jeweils die Geschwindigkeiten ermittelt, bei denen die gemessene Reibung ihren Minimalwert erreichte und bei der der Kontaktkoeffizient am dichtesten an den Wert $c^* = 0,5$ heran kam. In Abbildung 8 sind die beiden sich hieraus ergebenden Kennlinien für den Übergang von der Mischreibung zur Vollschrnerung dargestellt. Beide Linien steigen miteinander übereinstimmend mit zunehmender Axiallast an, was bedeutet, dass zum Erreichen der Vollschrnerung bei höheren Kontaktbelastungen größere hydrodynamische Geschwindigkeiten erforderlich sind.

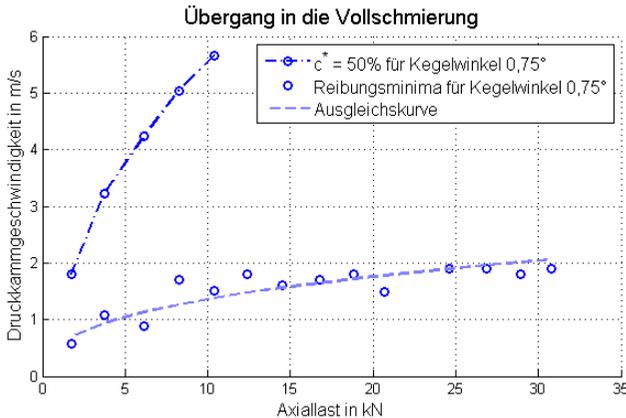


Abbildung 8: Experimentell ermittelte Grenzlinien für den Übergang von Mischreibung und Vollschnierung anhand der Übergangskriterien „minimale Reibung“ und „Kontaktwiderstandskoeffizient“

Die anhand des Kontaktkoeffizienten ermittelte Grenzlinie liegt allerdings bei deutlich höheren Geschwindigkeiten als die über den minimalen Reibkoeffizienten ermittelte und zeigt eine größere Steigung. Das neue Übergangskriterium Kontaktwiderstand kann also als deutlich schärfer hinsichtlich des Erreichens eines ausreichenden Schmierfilms angesehen werden.

Als Ursache hierfür kann das in Abbildung 9 schematisiert dargestellte Phänomen des Kantentragens angesehen werden. In Belastungssituationen, in denen sich bereits weitestgehend ein trennender Schmierfilm entwickelt hat, kommt es nur noch in schmalen Randbereichen der Laufbahn zur Festkörperberührung. Begünstigt wird dieser Effekt durch eine elastische Deformation der Laufflächen infolge des hydrodynamischen Druckbergs. Die über die gesamte Lauffläche gemittelte Reibung erscheint bereits für Vollschnierung charakteristisch, die Festkörperkontakte im Randbereich der Laufbahn sorgen jedoch für einen niedrigen elektrischen Übergangswiderstand zwischen den Kontaktpartnern.

In einer solchen Belastungssituation würden die beiden Kriterien unterschiedliche Ergebnisse liefern. Wegen der geringeren Streuung der Messpunkte und dem Ziel des verschleißfreien Betriebs von Druckkamm-lagerungen scheint das Kontaktwiderstandskriterium eine wertvolle Ergänzung zur Beurteilung von Druckkammversuchen zu sein.

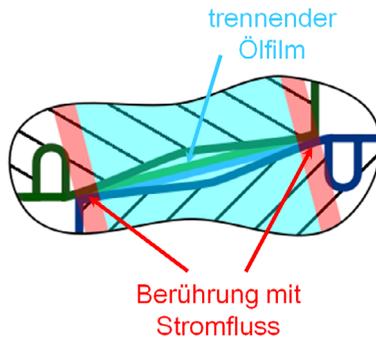


Abbildung 9: Schematisierter Kontaktbereich mit Kantentragen

5 Erste Experimente zum Vollschrnerungsbeginn

Basierend auf Simulationsrechnungen wurden verschiedene Einflussparameter untersucht, die den Schmierfilmaufbau in Druckkamm-lagerungen beeinflussen. Ziel der Untersuchungen war es, Parameter zu identifizieren, durch deren geeignete Konfiguration sich eine Druckkamm-lagerung entwerfen lässt, die möglichst frühzeitig, dass bedeutet bereits bei niedrigen Oberflächengeschwindigkeiten, einen ausreichend starken Schmierfilm entwickelt, um die beteiligten Kontaktflächen vollständig zu trennen. Neben den in /2/ beschriebenen Laufflächengeometrieparametern und dem Schlupf zwischen den Kontaktpartnern, ist ein betrachteter Parameter der Kegelwinkel der Laufflächen. In den Simulationsrechnungen zeigte sich, dass sich bei gleicher Axiallast und Rotationsgeschwindigkeit eine Erhöhung des Kegelwinkels negativ auf die zu erwartende Spaltweite auswirkt. Exemplarisch sind in Abbildung 10 die errechneten Spaltweiten für zwei Druckkammgeometrien (Kegelwinkel $0,75^\circ$ und $1,00^\circ$) in Abhängigkeit von Belastung und Druckkamm-drehzahl dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass für alle Belastungspunkte mit dem geringeren Kegelwinkel eine etwas höhere Spaltweite erreicht wurde – die grünliche Fläche liegt etwas über der roten.

Es ließe sich somit aus der Simulation die Schlussfolgerung ableiten, dass ein möglichst geringer Kegelwinkel anzustreben ist. In der praktischen Anwendung stößt man jedoch auf ein Grenzwertproblem: der Kegelwinkel sollte zwar möglichst gering sein, darf jedoch nicht Null werden, da sonst kein Schmierfilmaufbau mehr möglich ist.

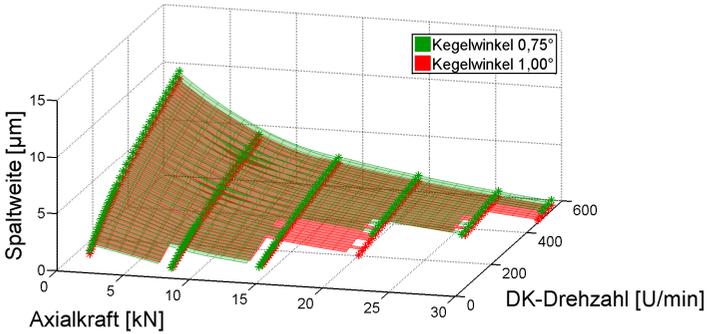


Abbildung 10: Spaltweiten für unterschiedliche Kegelwinkel (Simulationsergebnis)

Für die experimentelle Untersuchung wurde deshalb neben dem „Referenzprüflingspaar“ mit einem Kegelwinkel von 0,75° ein weiteres Prüflingspaar mit einem größeren Kegelwinkel von 1,00° gefertigt. Auf dem Prüfstand wurden auch für dieses Prüflingspaar Grenzlinien für den Übergang in die Vollschmierung ermittelt, in Abbildung 11 sind diese den zuvor für den flacheren Kegelwinkel ermittelten Kennlinien gegenübergestellt.

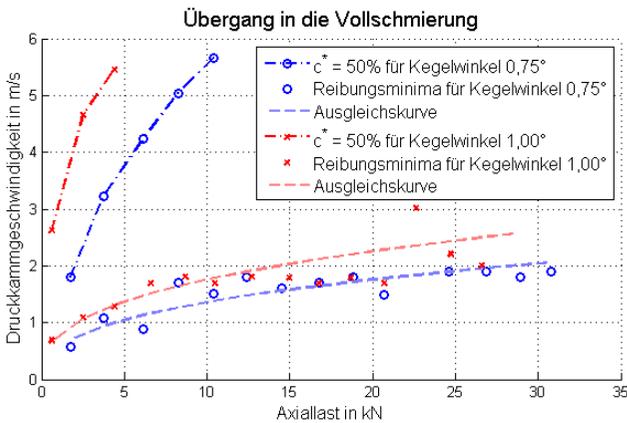


Abbildung 11: Einfluss einer Kegelwinkelvariation auf den Übergang in die Vollschmierung

Es ist deutlich erkennbar, dass für beide Kriterien der Übergang des Prüflingspaares mit größerem Kegelwinkel bei gleicher Axiallast erst bei höheren Geschwindigkeiten erfolgt. Die aus der Simulation entwickelte These des besseren Schmierfilmaufbaus für flachere Kegelwinkel konnte somit für diesen Anwendungsfall experimentell bestätigt werden. In nächster Zeit sind weitere Untersuchungen für die übrigen Parameter vorgesehen, um auch über diese Aussagen treffen zu können.

6 Zusammenfassung

Durch eine keramische Beschichtung der Druckwellenlagersitze konnte der Druckkammprüfstand des IMW um ein elektrisches Messverfahren zur Beurteilung des Schmierungszustandes ergänzt werden. Der Übergangswiderstand zwischen den Prüflingen wird verwendet um ein Abheben der Kontaktpartner zu detektieren. Mittels Simulationsuntersuchungen wurden Gestaltungsparameter ausgewählt, die den Schmierfilmaufbau in Druckkamm Lagerungen begünstigen sollen. In ersten experimentellen Untersuchungen konnten aus der Simulationsrechnung abgeleitete Trends am Prüfstand bestätigt werden.

7 Literatur

- /1/ Thoden, D.; Neuer Prüfstand für Verschleißuntersuchungen an Druckkämmen. In: Lohrengel, Armin (Hrsg.): Institutsmitteilung 34 (Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen). Clausthal-Zellerfeld, 2009, S. 115-118
- /2/ Lohrengel, A.; Heß, M.; Verbesserung des Tragfilmaufbaus in Druckkamm Lagerungen durch Anpassung der Laufflächengeometrie; In: Gleit- und Wälzlagerungen : Gestaltung, Berechnung, Einsatz mit Fachausstellung ; Schweinfurt, 23. und 24. April 2013. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2013 (VDI-Berichte, 2202). ISBN 978-3-18-092202-7, S. 367-370