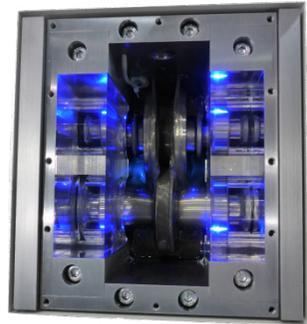


DFG SPP 1551: Der Druckkamm als „Ressourceneffizientes Konstruktionselement“

Heß, M.

Im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1551 „Ressourceneffiziente Konstruktionselemente“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) wird am IMW der Einsatz von Druckkammagern zur Effizienzsteigerung schrägverzahnter Getriebe untersucht. Nach erfolgreichem Abschluss des ersten Projektzeitraumes gibt dieser Artikel einen Einblick in gewonnene Erkenntnisse und einen Ausblick auf anstehende Arbeiten in der zweiten Förderungsperiode.



Within the priority program “Ressourceneffiziente Kontruktionselemente” (SPP 1551) of the German Research Foundation (DFG) the use of thrust cone bearings to increase the efficiency of helical gears is investigated. After successful completion of the first project period, this article shall give an insight into gained results and offer a brief preview on the work ahead in the second period.

Frühzeitige Vollschrmerung

Druckkammager gestatten die direkte Übertragung axialer Kräfte zwischen Getriebewellen, ohne diese in Gehäusekomponenten abzuführen. Eine klassische Anwendung ist der Einsatz in Turboverdichtergetrieben, bei denen ein am Verdichterrad entstehender Axialschub über das Druckkammager in die Radwelle übertragen wird, um eine schwimmende Lagerung der Ritzelwelle zu ermöglichen. Druckkammager bieten auch die Möglichkeit, die in schrägverzahnten Getriebestufen bei der Drehmomentübertragung generierte axiale Kraftkomponente auf kurzem Weg zu kompensieren. Die in einer Ritzelflanke entstehende Axialkraft wird hierbei durch Druckkamm und Anlauftring in das gegenüberliegende Rad geleitet, wo sie auf die entgegengesetzte Kraftkomponente aus der Radflanke trifft.

Die Axialkraftübertragung zwischen Rad- und Ritzelwelle erfolgt bei der Druckkammagerung über ein hydrodynamisches Schmierstoffkissen, welches sich zwischen den beiden kegeligen Kontaktflächen (bezeichnet als Druckkamm auf der Ritzelwelle und Anlauftring an der Stirnseite des Rades) ausbildet. Kritisch sind daher, wie bei allen hydrodynamischen Lagern, vor allem jene Betriebs-situationen, in denen die hydrodynamisch wirksame Geschwindigkeit nicht

genügend Fluid in den Spalt fördert, um eine vollständige Trennung der Laufflächen durch den Schmierstoff trotz der anliegenden Axiallast zu gewährleisten. Gerade zu Beginn der hier vorgestellten Arbeiten lag der Fokus der Betrachtungen daher auf der Fragestellung, durch welche konstruktiven Maßnahmen Druckkammlager so gestaltet werden können, dass Sie bei einer gegebenen axialen Belastung möglichst frühzeitig, also bereits bei möglichst geringen Drehzahlen, das sogenannte Vollschmierungsgebiet erreichen.

Simulationsrechnungen

Die grundsätzliche Beschreibung hydrodynamischer Schmierfilme gelingt mit der REYNOLDS'schen Differentialgleichung /1/. Basierend auf der Arbeit von BARAGAN DE LING /2/ wurde eine Methodik zur Berechnung des Druckaufbaus in Druckkammagern erstellt und im Berechnungsprogramm MATLAB umgesetzt /3/ /4/. Mit Hilfe dieser Umsetzung ist es möglich, für eine gegebene Betriebs- und Gestaltungssituation eine Verteilung des zu erwartenden Öldrucks im Lager, die druckinduzierte elastische Deformation der Spaltgeometrie sowie eine minimale Schmierpalthe zu berechnen.

Mittels einer Variation der Betriebsparameter Last und Drehzahl lässt sich für einen Lagerentwurf ein charakteristisches Spaltweitenkennfeld erstellen. Zur Illustration dieses Vorgehens sind in Abbildung 1 die errechneten Spaltweiten für zwei Druckkammlager aufgetragen.

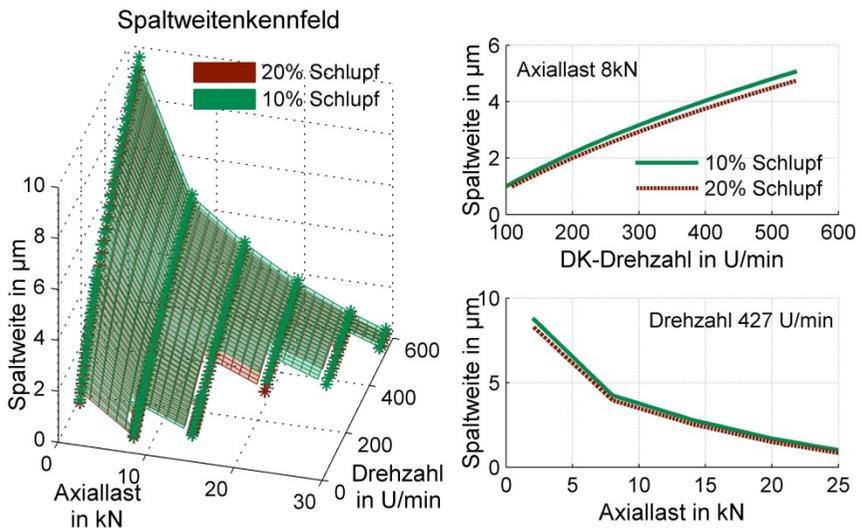


Abbildung 1: Spaltweitenvergleichsrechnung für ein Druckkammlager bei unterschiedlichem Schlupfverhältnis /5/

Die dem Beispiel zugrunde liegenden Lagermodelle unterscheiden sich lediglich durch den mittleren Schlupf, alle sonstigen Bedingungen (Geometrie, Schmierstoff etc.) sind identisch. Über den Vergleich dieser Kennfelder lässt sich die Eignung unterschiedlicher Lagerentwürfe hinsichtlich eines möglichst frühzeitigen Vollschmierungsbeginns beurteilen. Es wird deutlich, dass sich an jedem Betriebspunkt für das Lager mit dem geringeren Schlupfverhältnis eine etwas größere Spaltweite ergibt. Nimmt man eine kritische Spaltweite für den Übergang in die Vollschmierung an, so folgt aus diesen Rechnungen, dass das Lager bei geringerem Schlupf eher in den sicheren Betriebsbereich wechseln wird. Im Rahmen des Projektes wurde neben dem auftretenden Schlupf auch der Kegelwinkel sowie die Formgebung der Lauffläche als Variationsparameter betrachtet.

Experimentelle Beurteilung des Übergangsverhaltens

Die experimentelle Überprüfung der gewonnenen Prognosen erfolgte auf dem Zweiseibendruckkammprüfstand /6/ des IMW. Für die untersuchten Prüflingsgeometrien wurde das Übergangsverhalten bestimmt, indem für 15 Axiallastniveaus auf jeweils 35 Geschwindigkeitsstufen die Schmierungsituation erfasst und beurteilt wurde. Die Auftragung des gemessenen Reibkoeffizienten über der hydrodynamisch wirksamen Geschwindigkeit dient hierfür als eines der Auswertungskriterien. Da die fluidische Reibung etwa quadratisch mit der Differenzgeschwindigkeit ansteigt, führt die Absenkung der Untersuchungsgeschwindigkeit für ein Prüflingspaar, welches sich zu Beginn eines Testlaufes im Vollschmierungsgebiet befindet, zu einem abnehmenden Reibkoeffizienten. Im Verlauf des Experimentes ist allerdings nach einer gewissen Geschwindigkeitsreduktion ein Anstieg der gemessenen Reibwerte zu beobachten – dieser kann durch eine zusätzliche Festkörperreibungskomponente erklärt werden, die auftritt und zunimmt, wenn die in Folge der Geschwindigkeitsabsenkung eintretende Spaltweitenreduktion zum vermehrten Auftreten von Festkörperberührungen führt. Trägt man die Geschwindigkeiten der Reibungsminima dieser „STRIBECK-Kurven“ über den Axiallasten auf, ergibt sich für das jeweilige Prüflingspaar eine Grenzlinie, unterhalb derer die Festkörperreibung als dominierender Reibmechanismus angesehen werden kann (siehe untere Linie in Abbildung 2). Mit dem Ziel eines sicheren (nahezu verschleißfreien) Betriebs, erscheint der dauerhafter Einsatz eines entsprechenden Druckkamm-lagers oberhalb dieser Grenzlinie als notwendiges, jedoch nicht als hinreichendes Kriterium. Auch oberhalb des Reibungsminimums kann es zur Berührung von Rauheitsspitzen und damit zum Verschleiß der Kontaktflächen kommen. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit eines weiteren, sensitiveren Kriteriums zur Beschreibung der Schmierungsituation, welches durch die in /7/ beschriebene Erweiterung der Prüfstandsmesstechnik gewonnen wurde. Unter Ausnutzung der Isolationsfähigkeit des Schmierstoffes kann die Messung des Übergangswiderstandes zur Identifikation von Festkörperkontakten zwischen den leitfähigen Prüflingen

herangezogen werden. Der Verlauf der oberen Linie in Abbildung 2 kennzeichnet die Geschwindigkeit, bei der in Abhängigkeit von der axialen Belastung für etwa 50 % der Messpunkte kein Festkörperkontakt aufgezeichnet wurde und wird im Folgenden als Grenze für den Übergang in einen vollentwickelten Schmierfilm herangezogen.

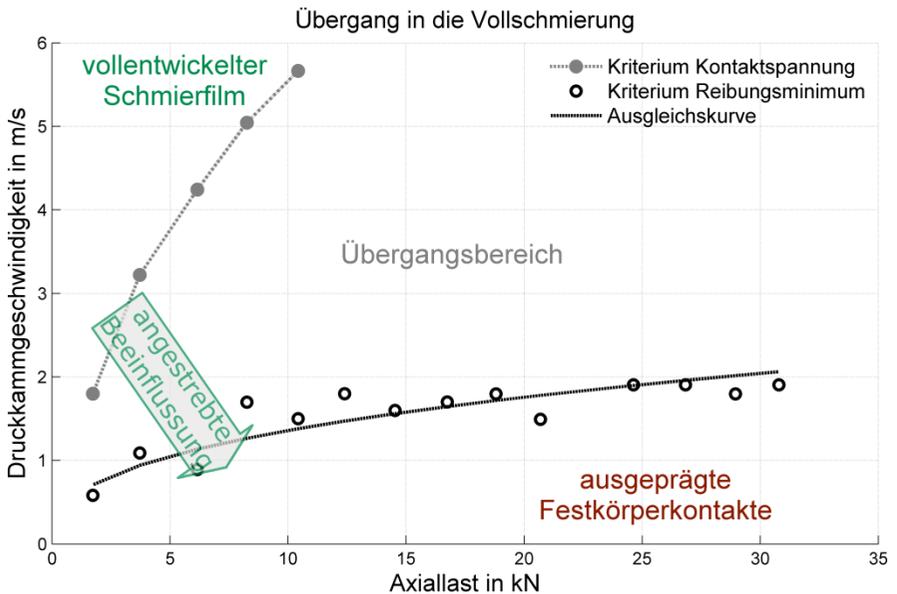


Abbildung 2: Experimentell ermittelte Grenzlinien für ein Prüflingspaar: unter der schwarzen Linie dominiert die Festkörperreibung, über der grauen Linie wird der elektrische Übergangswiderstand durch den Schmierfilm signifikant beeinflusst /5/

Entsprechende Grenzlinien wurden für neun unterschiedliche Laufbahngestaltungen auf jeweils zwei Schlupfstufen ermittelt, um den Einfluss der jeweiligen Modifikation auf das Übergangsverhalten zu bestimmen. Als zielführend werden hierbei möglichst niedrige Grenzlinien angesehen, da diese auf ein frühzeitiges Erreichen der Vollschnierung hindeuten. Bei Wiederholungsläufen mit bereits gefahrenen Prüflingen konnte übereinstimmend für alle Versuchspaare eine Verbesserung des Übergangsverhaltens beobachtet werden. Dieser positive Einlaufeffekt lässt sich auf eine gewisse Glättung der Kontaktflächen zurückführen. Für die Bewertung der Ergebnisse ist jedoch zu beachten, dass nur Grenzlinien derselben Wiederholungsstufe sinnvoll miteinander verglichen werden können. Die gewonnene Reihenfolge hinsichtlich der Eignung der Kontaktgeometrien erwies sich für alle Wiederholungsstufen weitestgehend konsistent.

In den Untersuchungen erwiesen sich Prüflinge mit kleineren Kegelwinkeln und geringem Schlupf als besonders geeignet. Diese Beobachtung deckt sich mit den Spaltweitenberechnungen der Simulation. Die vielversprechenden Spaltweitensteigerungen der Simulation für Kanten- und Laufbahnverrundungen konnten im Experiment nicht bestätigt werden. Erste Berechnungen mit einem modifizierten Simulationsmodell, welches eine maximale Filmdicke beim Eintritt in den konvergierenden Spalt berücksichtigt, scheinen diese Abweichung jedoch wirkungsvoll zu korrigieren. Als wesentliches Ergebnis der Untersuchungen zeigt sich, dass das Übergangsverhalten von Druckkammagern durch kleine Gestaltungsmodifikationen nennenswert beeinflusst werden kann. Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 3 die mit dem Kontaktspannungskriterium bestimmten Grenzlinien zweier Geometrievarianten.

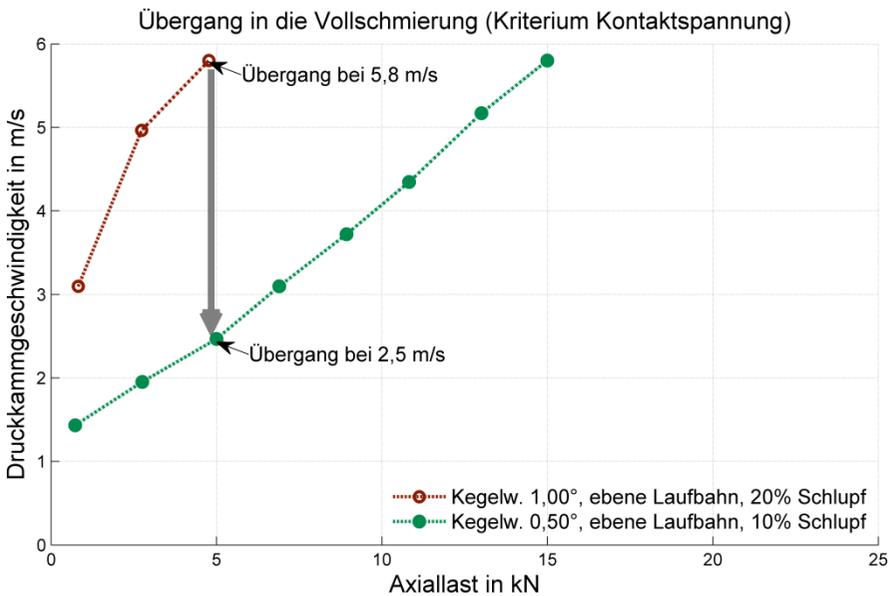


Abbildung 3: Vergleich der für zwei unterschiedliche Prüflingspaare experimentell ermittelten Grenzlinien für den Vollschrimerungsbeginn /5/

Bei einer Axiallast von 5 kN sinkt die Übergangsgeschwindigkeit von ursprünglich 5,8 m/s für ein Prüflingspaar mit einem Kegelwinkel von 1,0° bei 20 % Schlupf auf 2,5 m/s, indem der Kegelwinkel auf 0,5° reduziert und der Schlupf (beispielsweise durch eine wälzkreisnähere Positionierung des Lagers) auf 10 % gesenkt wird. Diese Reduktion der Übergangsgeschwindigkeit um etwa 57 % eröffnet möglicherweise viele neue Anwendungen, da beispielsweise bei einem Anlaufvorgang mit konstanter Beschleunigung nur noch ein Viertel der Wegstrecke im kritischen Mischreibungsbereich verbracht werden muss.

Einfluss auf die Getriebeeffizienz

Wurden Druckkamm-Lager bisher weitgehend in relativ hochtourigen, gleitgelagerten Anwendungen eingesetzt, ermutigen die vorgestellten Ergebnisse auch den vermehrten Einsatz in etwas langsamer betriebenen, wälzgelagerten Getrieben. In /8/ wurde anhand eines Rechenbeispiels der Einfluss der Druckkamm-Lagerung auf die Effizienz von wälzgelagerten Getrieben diskutiert. Es zeigte sich, dass durch die direkte Axialkraftkompensation eine Umstellung der Lagerbauarten möglich wird, in deren Folge trotz der zusätzlichen Reibstelle im Druckkamm-Lager die Gesamtriebungsverluste reduziert werden.

Im Rahmen der Arbeiten im SPP1551, wurde auf Basis des fünften Ganges eines PKW-Getriebes ein Demonstrationsgetriebe entworfen, welches sowohl durch angestellte Kegelrollenlager als auch durch eine Kombination von Druckkamm- und Rillenkugellager gelagert werden kann. Bei letzterer, als „Blue Bearing Concept“ bezeichneten Lagerungsvariante, dienen die Wälzlager lediglich der Übertragung von radialen Lasten in das Gehäuse. Die beiden Lagerungskonzepte sind in Abbildung 4 einander gegenübergestellt.

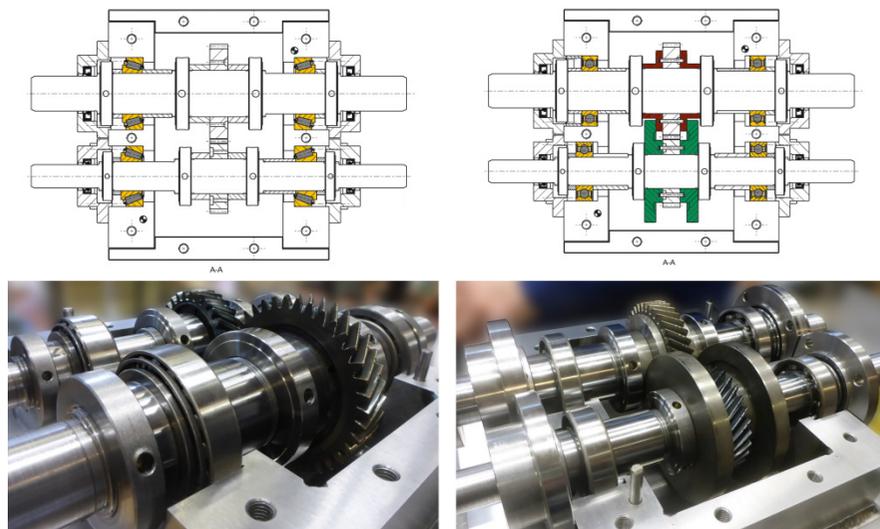


Abbildung 4: Lagerungsvarianten des Demonstrationsgetriebes: mit angestellter Kegelrollenlagerung (links) und „Blue Bearing Concept“ (rechts) /5/

Das Lagerspiel der Kegelrollenlager muss während der Montage mit Hilfe der Wellenmuttern eingestellt werden, die Druckkamm-Lagerung hingegen ist selbst-einstellend. Beim „Blue Bearing Concept“ müssen keine Axiallasten in das Gehäuse übertragen werden, weshalb nur ein Axiallager als Führungslager

erforderlich ist. In diesem Getriebeentwurf konnte die Ritzelwelle daher schwimmend im Gehäuse gelagert werden. Als Kompromiss an die Umrüstbarkeit des Getriebes mussten Druckkämme und Anlaufringe demontierbar gestaltet und dementsprechend durch Wellenmutter axial fixiert werden. Hierdurch ergibt sich für dieses Getriebe ein höherer axialer Raumbedarf, als dieser beim Einsatz fest montierter Druckkammhalter nötig wäre.

Durch die Erfassung des in das Getriebe eingeleiteten und des abgenommenen Drehmomentes lässt sich bei bekannten Drehzahlen der Gesamtwirkungsgrad des Getriebes bestimmen. Mit dem in Abbildung 5 dargestellten Versuchsaufbau wurden für beide Lagerungsvarianten Wirkungsgradkennfelder aufgezeichnet.

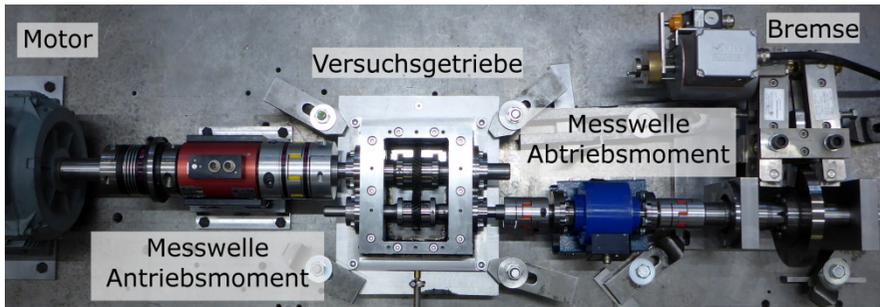


Abbildung 5: *Aufbau zur Wirkungsgraderfassung des Versuchsgetriebes (hier konventionell durch Kegelrollenlager gelagert) /5/*

Die Gegenüberstellung der aufgezeichneten Kennfelder in Abbildung 6 gestattet einen Vergleich der Getriebeeffizienz in Abhängigkeit von der Betriebsituation. Für beide Kennfelder ist ein Anstieg des Wirkungsgrades mit dem Lastmoment erkennbar, dies ist darauf zurückzuführen, dass konstante Verlustanteile im Teillastbereich einen höheren relativen Einfluss besitzen. In allen Betriebspunkten liegt der Wirkungsgrad des druckkammgelagerten Getriebeaufbaus deutlich über dem des Getriebeaufbaus mit Kegelrollenlagern. Da bei der Umrüstung des Getriebes nur Lagerungskomponenten getauscht werden, der übrige Versuchsaufbau (Zahnräder, Wellen, Dichtungen, Ölstand etc.) aber unverändert bleibt, sind diese Unterschiede auf die Lagerungsart zurückzuführen. Im dargestellten Versuch ergaben sich Wirkungsgradunterschiede von 1,5 % bis 9 %, im Mittel etwa 4 %.

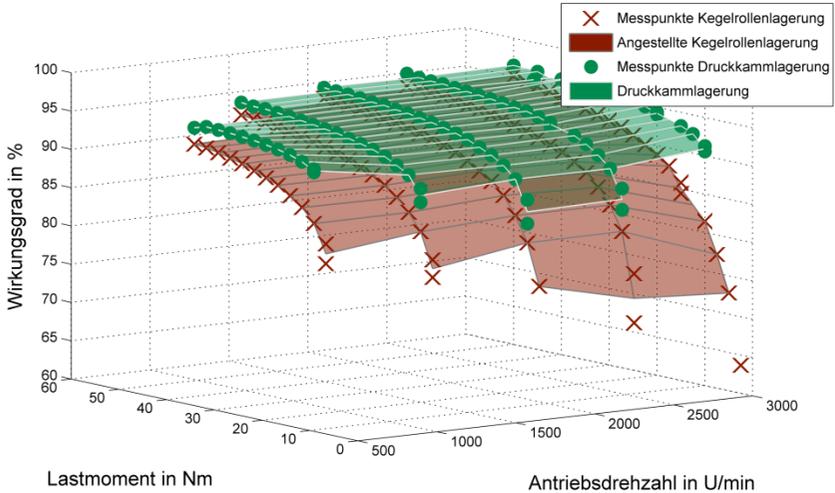


Abbildung 6: Im Versuch ermittelte Wirkungsgradkennfelder /5/

Ausblick & Zusammenfassung

Die in der ersten Phase des DFG-Schwerpunktprogramms 1551 durchgeführten Arbeiten haben gezeigt, dass durch eine geeignete Gestaltung der Laufflächen der Vollschmierungsbereich und damit das Anwendungsgebiet von Druckkammlagern in geringere Drehzahlbereiche verschoben werden kann. Diese Erkenntnisse erhöhen die Zuverlässigkeit von Druckkammlagerungen in klassischen, schnelllaufenden und gleitgelagerten Getriebeanwendungen. Mit dem vorgestellten Testgetriebe wurde darüber hinaus demonstriert, dass sich durch die als „Blue Bearing Concept“ bezeichnete Kombination von Druckkamm- und Gehäuseradiallagern Effizienzsteigerungen auch in wälzgelagerten, schrägverzahnten Getriebestufen erreichen lassen.

Für Druckkammlagerungen fehlen allerdings bisher allgemeinverfügbare Auslegungsvorschriften. Die Forschungsarbeiten am IMW zielen daher darauf ab, durch die Bereitstellung relevanter Erkenntnisse eine zielgerichtete Auslegung für den Anwender zu ermöglichen. Die Arbeiten der zweiten Phase des SPP werden sich daher vor allem den nachfolgenden Zielrichtungen widmen.

Herausforderung Mischreibung/resistenz

Zum einen ist es trotz der erfolgreichen Reduktion der Übergangsgeschwindigkeiten nicht möglich, den vollkommen mischreibungsfreien Betrieb von Druckkammlagern in einer Getriebeanwendung zu realisieren, da zumindest

während der Anfahr- und Bremsvorgänge immer Mischreibungsbereiche durchquert werden müssen. Ein Ziel der Arbeiten wird daher darin bestehen, den Verschleiß unterschiedlicher Druckkammgestaltungen in diesem Bereich zu beobachten, um Auslegungshinweise für einen möglichst hohen Verschleißwiderstand erarbeiten zu können.

Maschinendynamischer Systemeinfluss

Die andere Zielstellung für den zweiten Projektzeitraum liegt in der Beschreibung des maschinendynamischen Einflusses der Druckkamm Lagerung auf das System Getriebe und den Antriebsstrang. Der hydrodynamische Schmierfilm stellt eine zusätzliche Feder-Dämpfungs-Komponente dar, die etwa die axiale Anregung infolge von Drehmomentstößen beeinflussen kann. Diese Effekte sollen basierend auf erweiterten Schmierberechnungen mit Berücksichtigung von Festkörperkontakten im Mischreibungsgebiet in einer Modellvorstellung abgebildet werden, die Eingang in eine Mehrkörpersimulationen finden soll. Zudem ist der Aufbau eines größeren und umfangreicheren Testgetriebes vorgesehen, mit dem maschinendynamische Erfahrungen auch experimentell gewonnen und abgesichert werden sollen.

Literatur

- /1/ Reynolds, O.: On the theory of lubrication and its application to Mr. Beauchamp Tower's experiments. In Experimental Determination of the Viscosity of Olive Oil. Phil. Trans. Roy. Soc., 177 (1886), 157-234
- /2/ Barragan de Ling, F. d. M.: Lubrication of thrust cones. Cardiff, University of Wales, Diss., 1993
- /3/ Thoden, D.: Genaue Schmierfilmberechnung als Hilfsmittel zur Druckkamm-Auslegung. In: Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal 36 (2011), 63-68.
- /4/ Lohrengel, A.; Heß, M.; Druckkamm Lagerungen zum Einsatz in effizienten schrägverzahnten Getrieben. TU Clausthal, Technical Report Faculty 3, ISSN 1869-8018, Fac3-14-01
- /5/ Lohrengel, A.; Schäfer, G.; Heß, M.: Druckkamm Lagerungen: Gesteigerte Effizienz für schrägverzahnte Getriebe; In: Gleit- und Wälzlagerungen 2015: Gestaltung, Berechnung, Einsatz mit Fachausstellung; Schweinfurt, 06. und 07. Mai 2015. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2015 (VDI-Berichte, 2257). ISBN 978-3-18-092257-7, S. 221-233
- /6/ Thoden, D.: Neuer Prüfstand für Verschleißuntersuchungen an Druckkammern. In: Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal 34 (2009), 115-118

- /7/ Heß, M.: Der Vollschrnerung auf der Spur. In: Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal 38 (2013), 121-138
- /8/ Heß, M.: Beeinflussung der Reibungsverluste in schrägverzahrten Getrieben durch Druckkammerlager. In: Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal 39 (2014), 33-44