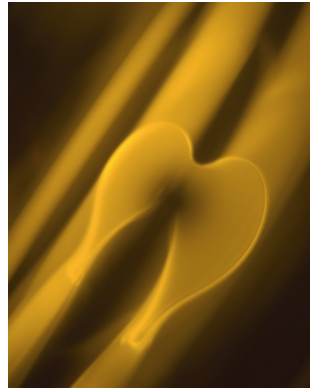


Spalthöhenmessung mittels LIF und Turbulenzmessungen mittels PIV an einem Tribometer

Hanse, M.; Heinrich, C.; Ballmann, A.; Lohrengel, A.

In Zukunft sollen Schmier-spalthöhen und Turbulenzen an Druckkämme vermessen werden, um das IMW-eigene Simulationsprogramm für Druckkämme zu validieren. Die Spalthöhenmessung mithilfe von LIF (Laser-induzierte Fluoreszenz) und Turbulenzmessung mittels PIV (Particle Image Velocimetry) wurde hierfür zunächst an einem Interferometer erprobt.



In the future, lubrication gap heights and turbulence at thrust cones should be measured in order to validate the IMW's simulation core. Gap height measurement using LIF (laser-induced fluorescence) and turbulence measurement using PIV (particle image velocimetry) were initially tested on an interferometer for this purpose.

Spalthöhenmessung

Interferometrie ist das traditionelle und verbreitetste Verfahren zur Spalthöhenmessung an elastohydrodynamischen (EHD) Kontakten. Bei der Interferometrie wird der EHD-Kontakt mit Licht beschienen. Um den Kontakt zu beleuchten, muss ein Kontaktpartner transparent sein, beim Tribometer ist dies die Glasplatte (3) welche auf der Stahlkugel (7) läuft, siehe Abbildung 1. Das Licht wird sowohl an der Unterseite des durchsichtigen Körpers, als auch an der Stahloberseite des anderen Kontaktpartners reflektiert. Der Abstand zwischen diesen Reflektionsflächen ist die zu vermessende Schmier-spalthöhe. Trifft das Licht nun auf den Kamerasensor, ergeben sich je nach Schmier-spalthöhe (also je nach Wellenlängenunterschied des reflektierten Lichts) farbige Interferenzringe. Vom Interferenzmuster kann auf die Spalthöhe geschlossen werden.

In Cardiff wurden zum Abgleich von Simulationen bei niedrigen Geschwindigkeiten (höhere Geschwindigkeiten mit stärkeren Vibrationen konnten bei der damaligen Kameratechnik nicht realisiert werden) Spalthöhenmessungen mithilfe Interferometrie durchgeführt (siehe Abbildung 2), /1/.

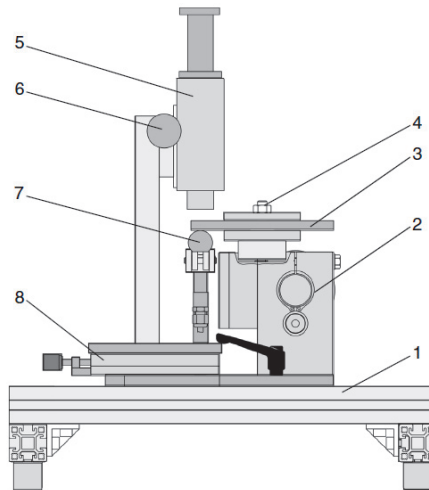


Abbildung 1: Aufbau des Tribometers, /2/

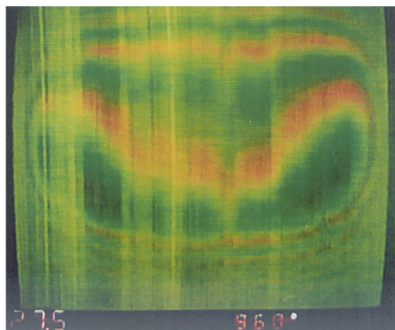


Abbildung 2: Mit Interferometrie gemessene Druckkamm-Spalthöhe /1/

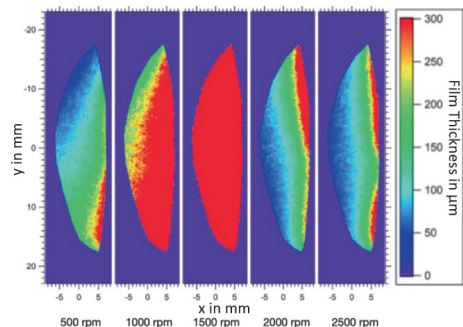


Abbildung 3: Mit LIF gemessene Druckkamm-Spalthöhe /3/

Wird weißes Licht verwendet, können mittels Interferometrie Schmierspalthöhen bis zu 1 μm gemessen werden, bei duochromatischem (zweifarbigen) Licht kann der Bereich auf bis zu 2 μm erhöht werden. Im Stand der Technik werden jedoch Druckkämme mit Spalthöhen im Bereich von 1,5 μm bis 20 μm verwendet. Bei größeren Schmierspalt überlagern sich die Lichtwellen bei der Interferometrie so stark, dass keine Interferenzringe mehr sichtbar sind /4/. Eine Alternative bietet die laserinduzierte Fluoreszenz (LIF). Diese wird in der Druckkammtechnik von /3/,/5/ zur Spalthöhenmessung auf dem von /6/,/7/ entwickelten Prüfstand verwendet; Ergebnisse mit vergleichsweise hohen Schmierspalt (bis zu 300 μm) sind in Abbildung 3 dargestellt.

Dem Schmiermittel werden zur LIF fluoreszierende Farbstoffe beigemischt. Diese Farbstoffe nehmen das einfallende Laserlicht (in Abbildung 4 blau) auf und geben Licht größerer Wellenlänge (grün) ab. Die Intensität des rückgestrahlten Lichts hängt von den Farbstoffeigenschaften, der Farbstoffmenge und der Anregungsintensität des Lasers ab. Die Farbstoffeigenschaften und die Anregungsintensität sind über den Versuchen konstant. Die Farbstoffmenge im Schmierpalthängt von dessen Höhe ab. Über diesen Zusammenhang kann die Schmierpalthöhe aus einer Lichtintensitätskarte vermessen werden. Der Prüfaufbau (Abbildung 4) ähnelt dem der Interferometrie, als Lichtquelle wird jedoch ein Laser verwendet, dessen Wellenlänge dem Absorptionspeak des Farbstoffs entspricht. Ein dichroitischer Spiegel wird verwendet, um das Licht auf die Probe zu reflektieren und das vom Farbstoff emittierte Licht zur Kamera durchzulassen. Der dichroitische Spiegel wird somit genutzt, um das Licht selektiv nach der Wellenlänge zu trennen. Exciter-Filter und Barrier-Filter sind dafür zuständig, das Laserlicht zur Probe bzw. nur langwelliges Licht oberhalb der Laser-Wellenlänge zur Kamera durchzulassen, also das Licht, welches von dem fluoreszierenden Stoff emittiert wird /8/.

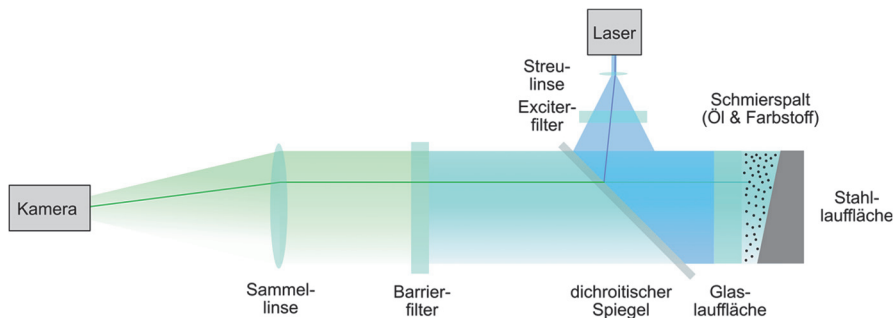


Abbildung 4: Schematischer Versuchsaufbau zur Schmierpalthöhenmessung mittels LIF

Vorteil dieser Prüftechnik ist die vergleichsweise einfache Kalibrierung und Umrechnung der aufgenommenen Lichtintensitätskarten zu Schmierpalthöhenverteilungen. In /9/ wurden bspw. Spalthöhen von 200 nm bis hin zu 25 µm gemessen, was den messbaren Bereich der Interferometrie deutlich übersteigt; die hohe Robustheit gegenüber optischen Eigenschaften wird hervorgehoben.

Turbulenzmessung

Bei Reynoldszahlen $Re = \rho V h / \eta$ (Dichte ρ , Geschwindigkeit V , charakteristische Länge h (Schmierpalthöhe), dynamische Viskosität η) über einer Grenzz Reynoldszahl kommt es zu Turbulenz. Diese äußert sich durch eine leichte Erhöhung der Tragfähigkeit und einen starken Anstieg der Reibung (~80% höher als bei laminarer Strömung /10/).

Kerr /6/,/11/ führte CFD- und experimentelle Turbulenzuntersuchungen an Druckkämmen bis zu Umfangsgeschwindigkeiten von 47 m/s durch. Der Versuchsaufbau mit einer Hochgeschwindigkeitskamera ist in Abbildung 5 zu sehen.

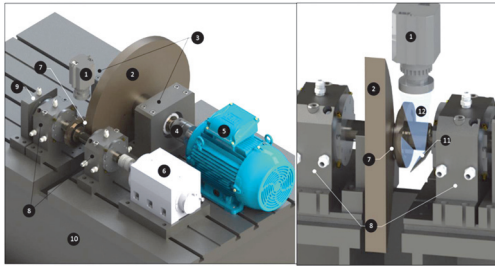


Abbildung 5: Versuchsaufbau zur Untersuchung von Turbulenz und Kavitation, (1) High-Speed-Kamera; (2) Anlaufring und (7) Druckkamm mit Acrylglas-Fenstern, /6/

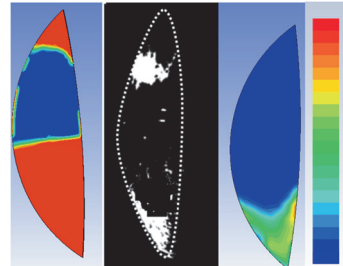


Abbildung 6: Links: Kavitation im blauen Bereich; Rechts: dimensionslose Turbulenzintensität, Turbulenz im Einlaufbereich (grün, unten); Mitte: aufbereitetes binäres Foto mit Kavitationsbereich (oben) und Turbulenzbereich (unten) in weiß dargestellt, /6/

Die Untersuchungen /6/,/11/ zeigen, dass Kavitation im Auslaufbereich des Druckkamms auftritt, während sich Turbulenzen vor allem im Einlaufbereich des Kontakts befinden, siehe Abbildung 6. Mit steigender Drehgeschwindigkeit vergrößert sich das von Turbulenzen betroffene Gebiet. Die CFD-Untersuchungen zeigen, dass der Einfluss der Turbulenz im Einlaufbereich bei den betrachteten Geschwindigkeiten und Lasten auf die Tragfähigkeit des Druckkamms gering ist /6/,/11/.

Zur experimentellen Untersuchung von Turbulenzwirbeln können verschiedene bspw. in /12/ beschriebene Techniken zur Sichtbarmachung von Strömungen verwendet werden. Eine effektive Methode zur Darstellung von Wirbeln ist das Einstreuen von Partikeln in das Fluid. Die zugegebenen Tracer-Partikel werden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet. Hierbei werden zwei Bilder kurz hintereinander aufgenommen. Beide Bilder zeigen dieselben Partikel an unterschiedlichen Orten. Über die Abstände, die die Partikel zwischen den Aufnahmen aufweisen, kann auf das Strömungsfeld (Richtung und Geschwindigkeit) geschlossen werden. Diese Technik wird als Particle Image Velocimetry (PIV) bezeichnet.

Umsetzung am Tribometer

Am Institut für Maschinenwesen wurden in Vorarbeit auf einem Tribometer (Umfangsgeschwindigkeit von 0,5 m/s) die Machbarkeit von PIV Messungen gezeigt, indem durch eine Gummilippe eine turbulente Strömung erzeugt und durch eingestreute Partikel sichtbar gemacht wurde. Zwei kurz hintereinander aufgenommene Bilder (Frame 1 und Frame 2) zeigen dieselben Partikel an zwei verschiedenen Positionen. Durch eine Auswertung der Partikel-Abstände zwischen den beiden Frames kann auf das Strömungsfeld geschlossen werden, siehe Abbildung 7.

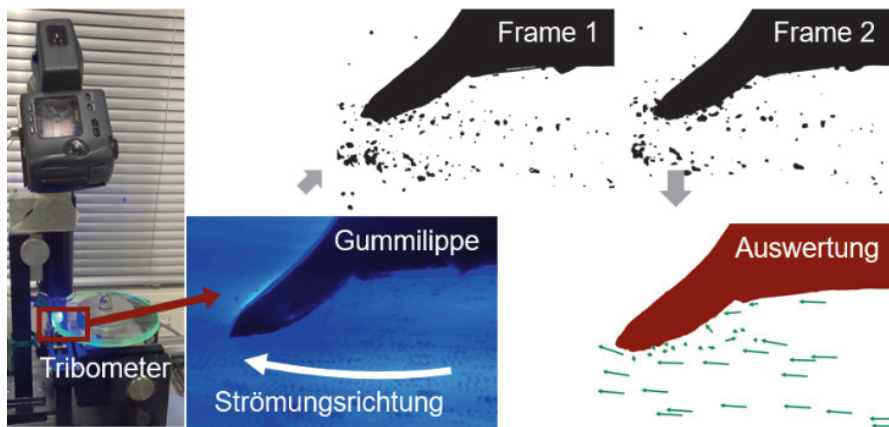


Abbildung 7: PIV am Tribometer des IMWs

In Abbildung 8 ist eine beispielhafte Messung der Schmierpalthöhe am Kugel-Platte-Kontakt des institutseigenen Tribometers dargestellt. Hierfür wurde zunächst ein Bild im Stillstand aufgenommen, über welches die Verknüpfung von Lichtintensität zu Schmierpalthöhe (Spalthöhe über Kugelgeometrie berechenbar, in-situ Kalibrierung, siehe /9/) ermöglicht. Anschließend wurde in Bewegung und unter Last das Foto in der Mitte von Abbildung 8 aufgenommen. In dunkel ist der Bereich zu sehen, in dem das Schmiermittel vom Öl verdrängt wurde (Laufspur). In der Mitte ist der Kugel-Platte-Kontakt zu sehen, gekennzeichnet durch einen Übergang von dunkel (geringer Schmierpalt) zu hell (hoher Schmierpalt). Die Schmierpalthöhe (rechte Abbildung) wird über den Zusammenhang aus Lichtintensität und Spalthöhe berechnet. Die Machbarkeit von Schmierpalthöhenmessungen (im für Druckkämme relevanten Bereich von 0 bis 100 μm) konnte somit gezeigt werden.

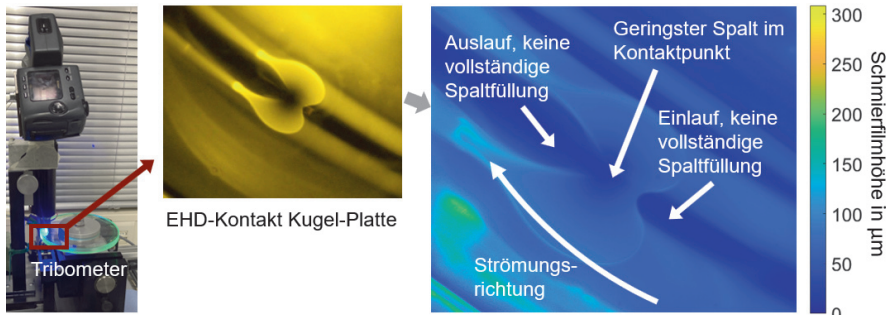


Abbildung 8: LIF Messung am Tribometer des IMWs

Als fluoreszierender Farbstoff wurde Lumilux® Yellow CD 345 nach Vorbild von /13/,/14/,/15/ gewählt. In Abbildung 9 sind die Transmissionsgrade für Borosilikat (Dicke: 10 mm und 20 mm) eingetragen. In hellblau ist das Absorptionsspektrum des Farbstoffes nach /14/ und in grün das Emissionsspektrum nach /13/,/14/,/15/ eingetragen. Beide Bereiche liegen im Transmissionsbereich des Glases. Die unterschiedlichen Emissionsspektren begründen sich in den Unterschieden im verwendeten Öl, der Konzentration des Farbstoffs und der Öl-Temperatur, es wird jedoch ersichtlich, dass der Wellenlängenbereich identisch bleibt. Laser-Spektren sind in dunkelblau gekennzeichnet. Zudem sind, wie oben beschrieben, ein Exciter-Filter, ein Barrier-Filter und ein dichroitischer Spiegel notwendig. Mögliche Transmissionsbereiche der Filter und des Spiegels sind schwarz gefärbt.

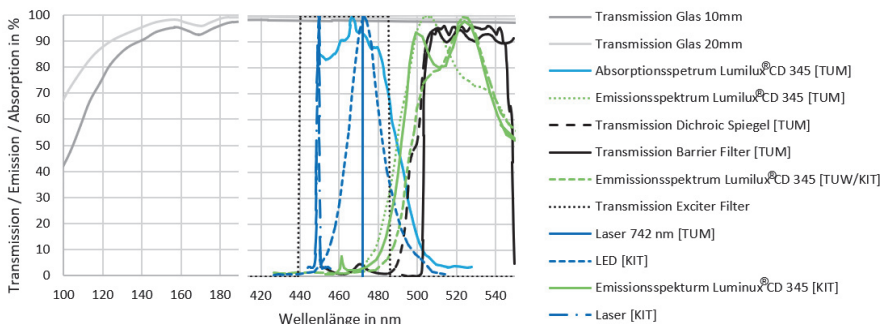


Abbildung 9: Transmission Glas-Druckkamm, Absorptions- und Emissionsspektrum von Lumilux® Yellow CD 345, Filter und Dichroic Spiegel, Laser / LED, nach KIT /13/, TUM /14/ und TUW / KIT /15/

Übertragung auf einen Druckkammprüfstand

Zur Anwendung der Verfahren PIV und LIF auf die Druckkammtechnik muss einer der Druckkämme aus Glas gefertigt werden. Die transparenten Druckkämme aus Glas werden auf der institutseigenen Schleifvorrichtung geschliffen und anschließend analog zu optischen Linsen mit verschiedenen ungebundenen Körnungen und Filzschleifstiften feingeschliffen. In Abbildung 10 ist die Schleifvorrichtung und ein erster grob geschliffener Glas-Druckkamm. In Abbildung 11 das am Glas-Druckkamm erzeugte Profil zu sehen. Hier konnte ein Schrägungswinkel der Lauffläche von 1° erzielt werden.

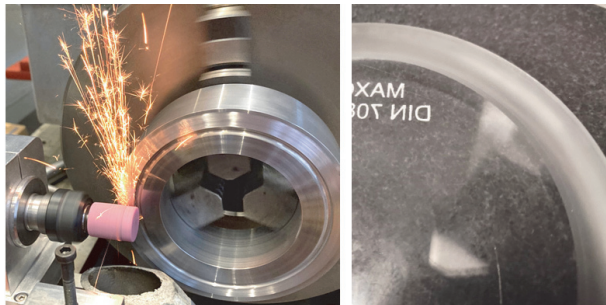


Abbildung 10: Schleifvorrichtung mit Stahlprüfling und geschliffener Glasrohling

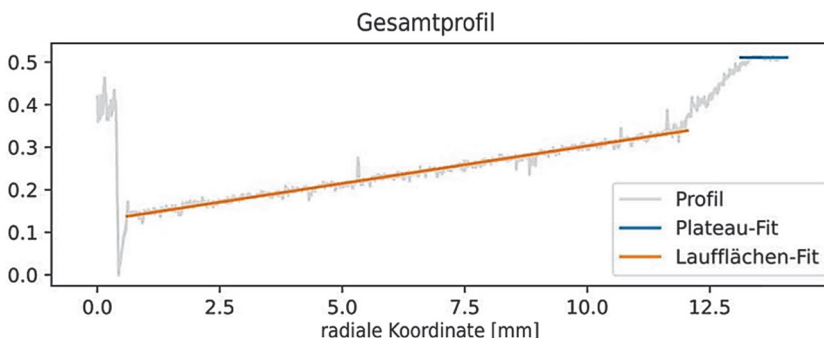


Abbildung 11: Profilmessung Glas-Druckkamm

Zusammenfassung

Durch Voruntersuchung am institutseigenen Tribometer konnte die LIF und PIV für den zukünftigen Einsatz in der Druckkammtechnik erprobt werden. Es konnte gezeigt werden, dass mittels LIF der für Druckkämme relevante Spalthöhenbereich zwischen 0 und $100\ \mu\text{m}$ vermessen werden kann. Zudem konnte mithilfe von PIV eine erste Auswertung von turbulenten Strömungen erfolgen.

Literatur

- /1/ Rudd, L.: Aspects of tribology in thrust cone bearings, Dissertation: University of Wales Cardiff, 1996.
- /2/ Mittasch, P.: Versuchsanleitung TM 260.02 Elasto-Hydrodynamisches Verhalten, Barsbüttel: G.U.N.T. Gerätebau, 2019.
- /3/ Gorman, A.: Laser-Induced-Fluorescence (LIF) Imaging Studies of the Oil-Film Thickness in a Thrust Collar, Masterthesis: Texas A&M University, 2022.
- /4/ Liu, H.; Guo, F.; Guo, L. und Wong, P.: A Dichromatic Interference Intensity Modulation Approach to Measurement of Lubricating Film Thickness, Tribol Lett, pp. 1-11, 2015.
- /5/ Kulatilaka, W.; und Delgado, A.: Laser-Induced Fluorescence (LIF) Imaging Studies of the Oil-Film Thickness in a Thrust Collar; Continuation Proposal, 06 2022.
- /6/ Kerr, T.: Experimental and Numerical Study of Oil Lubrication on a Thrust Collar for Use in an Integrally Geared Compressor, Dissertation: A&M University, 2020.
- /7/ Kerr, T.; Delgado, A. und Childs, D.: Static Stiffness Measurements for a Thrust Collar Used in an Integrally Geared Compressor, ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 11 2019.
- /8/ Sugimura, J.; Hashimoto, M. und Yamamoto, Y.: Study of elastohydrodynamic contacts with fluorescence microscope, Tribology Series, Bd. 38, pp. 609 - 617, 2000.
- /9/ Myant, C. und Reddyhoff, T.: Laser-induced fluorescence for film thickness mapping in pure sliding lubricated, compliant, contacts, Tribology International 43, pp. 1960 - 1969, 2010.
- /10/ Stachowiak, G. und Batchelor, A.: Engineering Tribology, Elsevier, 2013.
- /11/ Kerr, T. und Delgado A.: Novel Approach for Optical Characterization of Thrust Collar Lubricated Area: Experimental and Numerical Results, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 01 2021.
- /12/ Nietzsche, W.: Strömungsmesstechnik, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1994.
- /13/ Schweizer, T.; Kubach, H. und Koch, T.: Investigations to characterize the interactions of light radiation, engine operating media and fluorescence tracers for the use of qualitative light-induced fluorescence in engine systems, Automotive and Engine Technology, pp. 275-287, 12 2021.
- /14/ Kirner, C.; Halbhuber, J.; Olivia, A. und Graf, S.: Experimental and simulative research advances in the piston assembly of an internal combustion engine, Tribology International, band 99, pp. 159-168, 07 2016.
- /15/ Zöbinger, N.; Schweizer, T.; Lauer, T.; Kubach, H.; und Koch, T.: Experimental and Numerical Analysis on Two-Phase Induced Low-Speed Pre-Ignition, Energies, 08 2021.