

Triboakustischer Pin: ein neuer Sensor für die *in-situ* Schmierfilmüberwachung in tribologischen Kontakten

Schirru Michele¹, Tatzgern Fabio¹, Varga Markus¹

¹AC2T research GmbH, Viktor-Kaplan-Straße 2/C 2700 Wiener Neustadt, Österreich

Michele.schirru@ac2t.at, Fabio.tatzgern@ac2t.at, Markus.varga@ac2t.at

Zusammenfassung

Diese Arbeit präsentiert einen neuartigen Ultraschallsensor zur *In-situ*-Messung der Schmierfilmdicke in tribologischen Kontakten, mit besonderem Fokus auf Anwendungen in Tribometern und Prüfständen. Der Ansatz basiert auf der Transformation eines konventionellen Pins in ein aktives Sensorelement durch Integration miniaturisierter piezoelektrischer Wandler. Dadurch wird eine Echtzeitüberwachung von Schmierstoffeigenschaften wie Filmdicke, Viskosität und Schmierregime mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung ermöglicht. Validierungsexperimente zeigen eine hohe Übereinstimmung zwischen Ultraschallmessungen, optischen Referenzmethoden und theoretischen Modellen. Darüber hinaus erlaubt der Sensor die Beobachtung der Bildung und Degradation von Tribofilmen während des Betriebs. Der präsentierte triboakustische Pin lässt sich einfach in bestehende Messaufbauten integrieren und liefert wertvolle zusätzliche Einblicke in das Verhalten von Schmierstoffen unter realitätsnahen Betriebsbedingungen.

Keywords: Ultraschall, Sensorik, Schmierstoffprüfung, Akustik, Piezoelektrik.

Einleitung

Moderne mechanische Systeme wie Fahrzeugantriebe, Lager und industrielle Maschinen arbeiten unter zunehmend anspruchsvollen Bedingungen, darunter hohe Lasten, Temperaturen und Geschwindigkeiten. Unter diesen Bedingungen werden Leistung und Zuverlässigkeit der Komponenten maßgeblich durch das Verhalten der Schmierstoffe in stark eingegengten tribologischen Kontakten bestimmt. Häufig reduzieren sich die Schmierfilme auf Nanometerskalen, wo ihre Eigenschaften erheblich vom makroskopischen Verhalten abweichen.

Trotz der großen Bedeutung dieser Effekte stellt die direkte Messung von Schmierfilmeigenschaften unter realistischen Betriebsbedingungen eine erhebliche Herausforderung dar – sowohl in der Forschung als auch in industriellen Anwendungen.

Aktuelle experimentelle Ansätze, typischerweise basierend auf konventionellen Tribometern, ermöglichen zwar die Reproduktion von Kontaktbedingungen, liefern jedoch nur begrenzte Informationen über die *In-situ*-Entwicklung von Schmierfilmen. Ein Tribometer ist ein Laborgerät zur Untersuchung von Reibung, Verschleiß und Schmierung zwischen zwei Kontaktflächen. In

seiner einfachsten Form wird eine definierte Probengeometrie, beispielsweise eine Kugel oder ein Pin, unter kontrollierten Last-, Bewegungs- und Umgebungsbedingungen gegen eine Gegenfläche gedrückt. Durch Variation von Parametern wie Geschwindigkeit, Temperatur und Kontaktkraft lassen sich realistische Betriebsbedingungen technischer Komponenten simulieren.

In der Industrie werden Tribometer eingesetzt, um Schmierstoffe und Materialien zu bewerten und zu vergleichen, Bauteildesigns zu optimieren sowie Leistungsfähigkeit und Lebensdauer vor dem Einsatz im realen System sicherzustellen. Diese Ansätze basieren jedoch häufig auf indirekten Messungen oder Nachuntersuchungen und erfassen keine transienten Effekte oder Echtzeitänderungen der Schmierregime.

Zur Überwindung dieser Einschränkungen wurde ein neuartiger Ultraschallsensor entwickelt, der eine Echtzeit- und *In-situ*-Charakterisierung von Schmierfilmen direkt im tribologischen Kontakt ermöglicht. Anstatt vollständig neue Prüfgeräte zu entwickeln, folgt der Ansatz dem aktuellen Trend in der Tribologie, bestehende, etablierte Systeme um zusätzliche Sensorik zu erweitern. Dies entspricht der industriellen Praxis, in der standardisierte Tribometer und Prüfverfahren

über viele Jahre hinweg entwickelt und validiert wurden.

Durch die Integration ultraschallbasierter Sensorelemente in eine standardisierte Pin-Geometrie ermöglicht der vorgestellte Ansatz eine einfache Implementierung in bestehende Tribometer, ohne etablierte Prüfmethoden zu verändern. Dadurch können konventionelle Messungen durch direkte Echtzeitinformationen über das Verhalten von Schmierfilmen ergänzt werden. Die Entwicklung stellt somit ein praxisnahes und skalierbares Werkzeug dar, das das Verständnis von Schmiermechanismen verbessert und zur Optimierung von Schmierstoffen, Komponenten sowie zur Steigerung von Effizienz, Zuverlässigkeit und Lebensdauer mechanischer Systeme beiträgt.

Materialien: Der Triboakustische Pin

Das zentrale Element dieser Arbeit ist ein modifizierter tribologischer Pin, der als Triboakustischer Pin (TaP) bezeichnet wird und ultraschallbasierte Sensoreigenschaften in eine standardisierte Geometrie integriert.

Abbildung 1 zeigt schematisch die Anpassung eines konventionellen kugelförmigen Pins zur Aufnahme von zwei miniaturisierten piezoelektrischen Wandlern, die im Frequenzbereich von 5 bis 20 MHz arbeiten. Diese Wandler sind unter einem definierten Winkel im Pin-Körper eingebettet und ermöglichen die Aussendung und den Empfang von Ultraschallwellen durch die Kontaktzone.

Ein Wandler fungiert als Sender und erzeugt Ultraschallwellen, die sich durch den Pin in den geschmierten Kontakt ausbreiten. Der zweite Wandler dient als Empfänger und erfasst die an der Grenzfläche reflektierten Signale. Aufgrund der schrägen Anordnung werden sowohl longitudinale als auch transversale Wellenanteile detektiert, wodurch verschiedene Schmierstoffeigenschaften, einschließlich Filmdicke und scherabhängigem Verhalten, charakterisiert werden können.

Der Pin ist in einer speziellen Halterung montiert, die über federbelastete elektrische Kontakte verfügt. Diese gewährleisten eine zuverlässige Signalübertragung und ermöglichen gleichzeitig einen schnellen Austausch des Pins zwischen verschiedenen Experimenten. Die äußere Geometrie und die mechanischen Eigenschaften standardisierter Pins bleiben erhalten, sodass eine Integration

in bestehende Tribometer ohne Anpassung des Prüfaufbaus möglich ist.

Abbildung 2 zeigt die Integration des Pins in ein Tribometer. Der Triboakustische Pin kann in unterschiedlichen Tribometerkonfigurationen eingesetzt werden, darunter Systeme mit kontinuierlicher Gleitbewegung sowie oszillierende Systeme mit hin- und hergehender Bewegung. Diese Flexibilität gewährleistet die Kompatibilität mit etablierten Prüfverfahren und ermöglicht den Einsatz in einer Vielzahl tribologischer Untersuchungen.

Abbildung 3 zeigt die Messkette. Der Triboakustische Pin ist mit dem Pinhalter verbunden, der die elektrische Verbindung zu einer Sende-/Empfangeinheit herstellt. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Experimente wurde ein Ultraschall-Puls-Empfangssystem (UPR) vom Typ Picoscope 5000 verwendet. Ein Vorverstärker verstärkt das Anregungssignal auf bis zu 20 Vpp. Eine Python-basierte grafische Benutzeroberfläche steuert die Messkette von einem Steuerrechner aus, insbesondere die Pulsparameter des Ultraschallbursts (Frequenz, Zyklenzahl) sowie die Erfassung des reflektierten Signals.

Die Einheit ermöglicht eine schnelle Datenerfassung mit bis zu 100 kS/s innerhalb eines hochauflösenden Signalpakets alle 15 Sekunden. Dadurch können sowohl zeitliche Trends der Filmdickenentwicklung als auch orts aufgelöste Messungen entlang der Oszillationsbewegung durchgeführt werden.

Datenanalyse, Validierung und Nachverarbeitung

Das Signal in Abbildung 4 ist durch eine Reihe von Reflexionen gekennzeichnet, die auf eine Modenkombination der einfallenden longitudinalen Welle in sowohl longitudinale als auch transversale Komponenten zurückzuführen sind [1]. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der hervorgehobenen ersten longitudinalen Reflexion, die mit der Dicke der Zwischenschicht zwischen dem TaP und dem Gegenkörper in Zusammenhang steht. Es ist jedoch ebenfalls möglich, durch eine entsprechende Analyse der transversalen Reflexionskomponente die Schersteifigkeit und damit die viskoelastischen Eigenschaften der Zwischenschicht zu bestimmen [2].

Die Dicke der Zwischenschicht wird wie folgt berechnet: Zunächst wird der Reflexionskoeffizient bestimmt. Dieser entspricht dem Verhältnis der Amplitude der

während des Versuchs gemessenen longitudinalen Reflexion zu einem Referenzwert. In der Regel handelt es sich dabei um eine Messung derselben Amplitude unter Referenzbedingungen (z. B. in Luft) [3]. Für den TaP ist das Referenzverfahren durch eine Patentanmeldung geschützt und umfasst mehrere Schritte, darunter die Standardmessung in Luft sowie definierte Belastungsschritte des Pins gegen den Gegenkörper zur Bestimmung der Nullschichtdickenantwort.

$$R = \frac{A_m}{A_r}$$

Gleichung 1

Wobei A_m die während des dynamischen Versuchs gemessene reflektierte Amplitude und A_r die gemäß Referenzverfahren bestimmte Referenzamplitude ist. Anschließend wird der Reflexionskoeffizient mit der Steifigkeit der Zwischenschicht korreliert [4]. Die Steifigkeit kann direkt aus dem Reflexionskoeffizienten berechnet werden:

$$K = \frac{Z_s}{2\omega} \left(\frac{1}{R} - 1 \right)$$

Gleichung 2

Wobei K die Schichtsteifigkeit, Z_s die akustische Impedanz des Triboakustischen Pins und ω die Kreisfrequenz der Ultraschallwelle ist.

Im Allgemeinen ist die absolute Steifigkeit der Schicht direkt mit ihren mechanischen Eigenschaften verknüpft [1]. Aufgrund der kugelförmigen Geometrie und der kleinen Kontaktfläche hat sich jedoch gezeigt, dass zur Maximierung der Sensitivität des Algorithmus gegenüber sehr dünnen Schichten die Bestimmung der Schichtdicke aus der Differenz zwischen der Steifigkeit im Nullschichtzustand und der während dynamischer Bedingungen gemessenen Steifigkeit geeigneter ist. Diese Steifigkeitsänderung wird anschließend mit der Gesamtabhebung des TaP vom Gegenkörper korreliert.

Der Algorithmus zur Bestimmung der Schichtdicke aus der Schichtsteifigkeit lautet somit:

$$h = ST \left(\frac{1}{K_0} - \frac{1}{K} \right) \cos(\theta) B$$

Gleichung 3

Wobei h die Schichtdicke, K_0 die Referenzsteifigkeit, K die während der dynamischen Messung bestimmte Steifigkeit, θ der Einfallswinkel der Ultraschallwelle und, und ST ein Koeffizient ist, der von der Größe der Kontaktfläche und der Frequenz des Wandlers abhängt. Dieser Koeffizient stellt eine fundamentale Größe dar, die im Zuge der Sensorentwicklung identifiziert wurde. Es ist zu beachten, dass ein solcher Faktor in der klassischen Ultraschall-Reflektometrie zur Schichtdickenmessung keine Rolle spielt. Es wurde jedoch festgestellt, dass die kugelförmige Grenzfläche einen Fokussierungseffekt hervorruft, der proportional zum Faktor ST ist. Diese sphärische Geometrie ermöglicht eine erhöhte Sensitivität im Vergleich zu anderen reflektometrischen Verfahren und erlaubt die Messung von Schichtdicken bis hinunter zu etwa 20 nm.

Der Algorithmus wurde durch Messungen an einem MTM-Tribometer in einem sogenannten Pin-on-Disc-Aufbau validiert, wie schematisch in Abbildung 5 dargestellt. In dieser Konfiguration ist der TaP fixiert, während sich der Gegenkörper dreht. Als Gegenkörper wurde eine Glasscheibe gewählt, sodass die Schmierfilmdicke gleichzeitig mittels interferometrischer Messung mit einer Genauigkeit von ± 1 nm bestimmt werden konnte. Der Versuch wurde mit vier kalibrierten PAO-Ölen im Viskositätsbereich von 10 cSt bis 1000 cSt durchgeführt. Jedes Öl wurde bei Drücken von bis zu 500 MPa und bei Scheibengeschwindigkeiten zwischen 50 mm/s und 1000 mm/s getestet. Ziel war es, einen breiten Bereich von Filmdicken mit unterschiedlichen Ölen abzudecken. Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse der Validierung. Die experimentellen Ultraschall- und optischen Ergebnisse werden zudem mit der Hamrock-Dowson-Gleichung für die Filmdicke verglichen. Diese stellt ein etabliertes Verfahren in der Tribologie dar und beschreibt die Filmdicke im hydrodynamischen Schmierregime als Funktion von Drehzahl, Last, Temperatur und Mitnahmeviskosität des Öls. Die Validierung zeigt eine hohe Übereinstimmung zwischen optischen und ultraschallbasierten Ergebnissen: Über 75 % der Ultraschallmessungen liegen innerhalb von 10 % der optischen Messwerte, und über 90 % der Ergebnisse liegen zwischen der Hamrock-

Dowson-Vorhersage und der optischen Messung.

Ergebnisse in einem oszillierenden Prüfstandtribometer

Die Validierung des Algorithmus wurde zunächst in einem hydrodynamischen Kontakt durchgeführt (typisch beispielsweise für Gleit- oder Radiallager), bei dem eine vollständige Trennung zwischen TaP und Gegenkörper vorliegt. In realen Anwendungen treten jedoch häufig Grenz- oder Mischreibungszustände auf, insbesondere bei oszillierenden Komponenten wie Zahnrädern, Kolbenringen oder verschiedenen Lagerarten.

Zur Simulation solcher Bedingungen wird häufig ein oszillierendes Tribometer eingesetzt. In diesem bewegt sich der Pin zwischen zwei Endpunkten hin und her, während er gegen den Gegenkörper gedrückt wird (vgl. Abbildung 7). Unter diesen Bedingungen ist es schwieriger, eine vollständige hydrodynamische Trennung zu erreichen, sodass entweder Rauheitsspitzen (Asperities) in Kontakt treten oder sich ein Tribofilm bildet. Dieser Tribofilm ist eine viskoelastische Schicht, die durch den Verbrauch von Additiven im Schmierstoff infolge der Relativbewegung entsteht. Er kann gezielt ausgelegt werden, um die Trennung der Kontaktflächen zu verbessern, und seine Entwicklung ist entscheidend für die Bewertung der Schmierstoffleistung.

In diesem Abschnitt wird ein beispielhafter Datensatz von Messungen mit dem TaP vorgestellt, um die Leistungsfähigkeit des Sensors zu demonstrieren.

Abbildung 8 zeigt den Verlauf der Tribofilmdicken-Degradation über mehrere Wiederholungen für ein OW-5-Schmieröl. Die Messungen des triboakustischen Pins werden mit *ex-situ* Elektronenmikroskopie-Messungen der Tribofilmdicke nach einem FIB-Schnitt verglichen. Der Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung sowie einen korrekten Trendverlauf über alle Wiederholungen hinweg.

Es ist zu beachten, dass jeder Datenpunkt in Abbildung 8 ein Mittelwert aus über 100.000 Einzelwellenformen ist, entsprechend etwa 50 Hüb. Jeder Hub von 2 mm wird dabei mit etwa 2000 Messpunkten rekonstruiert. Abbildung 9 zeigt die hubaufgelöste Filmdicke für einen ausgewählten Punkt der Kurve aus Abbildung 8. Die Tribofilmdicke kann insbesondere an den Umkehrpunkten

bestimmt werden, da dort keine Relativbewegung zwischen Pin und Gegenkörper vorliegt und der flüssige Schmierstoff entweder aus dem Kontakt verdrängt wird oder keinen Beitrag zur Kontaktsteifigkeit leistet. Die Messung entspricht daher einem Mittelwert aus Tribofilm und festen Rauheitskontakten.

Sobald die Bewegung wieder einsetzt, nimmt die Filmdicke zu, was den Beitrag des flüssigen Schmierstoffs zur effektiven Kontakttrennung widerspiegelt. Da im Misch- bzw. Grenzreibungsregime nicht ausschließlich das Öl zur Trennung beiträgt, muss der Algorithmus aus Gleichung (3) angepasst werden, um mittlere Kontakteigenschaften zu berücksichtigen (z. B. den Kompressionsmodul der Stahlasperitäten statt der Öleigenschaften bei hohem Druck). Die Messung wird daher als effektiver oder äquivalenter Abstand zwischen TaP und Gegenkörper interpretiert.

Schlussfolgerung

Es wurde ein neuartiger ultraschallbasierter Triboakustischer Pin zur *In-situ*- und Echtzeitcharakterisierung von Schmierfilmen in tribologischen Kontakten vorgestellt. Durch die Integration miniaturisierter piezoelektrischer Wandler in eine standardisierte Pin-Geometrie ermöglicht der Sensor die direkte Messung der Filmdicke und weiterer schmierungsrelevanter Eigenschaften unter realistischen Betriebsbedingungen. Der Ansatz folgt dem aktuellen Trend, bestehende Tribometer durch zusätzliche Sensorik zu erweitern, anstatt neue Prüfsysteme zu entwickeln, und gewährleistet somit die Kompatibilität mit etablierten industriellen Verfahren.

Der Sensor wurde erfolgreich in verschiedenen Tribometerkonfigurationen implementiert und demonstriert eine hohe Vielseitigkeit sowie einfache Integration. Die Validierung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit optischen Messmethoden und theoretischen Modellen und bestätigt die Zuverlässigkeit des Ansatzes. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass der TaP aufgrund seiner Geometrie eine erhöhte Sensitivität gegenüber sehr dünnen Filmen (bis hinunter zu 20 nm) im Vergleich zu klassischen Reflektometrieverfahren aufweist. Zusätzlich ermöglicht die Fähigkeit zur Erfassung transienter Effekte wie Tribofilmbildung und -abbau wertvolle Einblicke, die mit konventionellen Methoden nicht zugänglich sind.

Insgesamt stellt der triboakustische Pin eine praxisnahe und skalierbare Lösung für die

fortgeschrittene Schmierstoffcharakterisierung dar und unterstützt die Entwicklung effizienterer, zuverlässigerer und langlebiger mechanischer Systeme.

Abbildungen

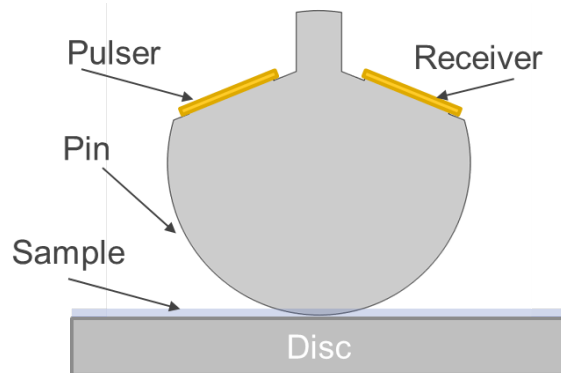


Figure 1: Schematische Darstellung des Triboakustischen Pins.

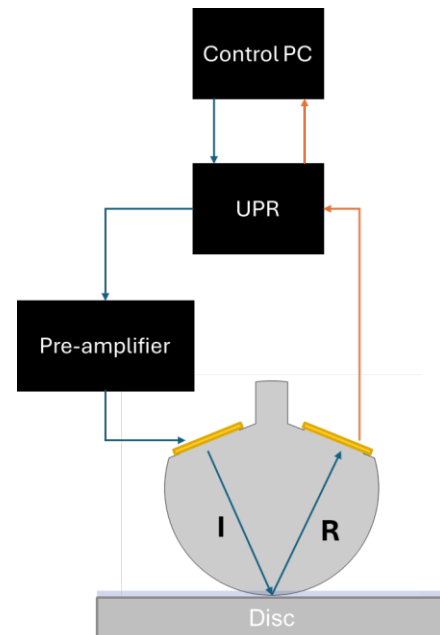


Figure 3: Messkette zur Datenerfassung.

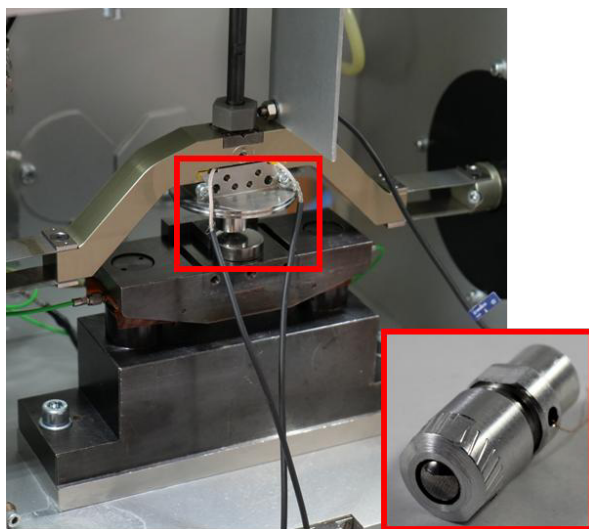


Figure 2: Der Triboakustische Pin eingebaut in einem Tribometer.

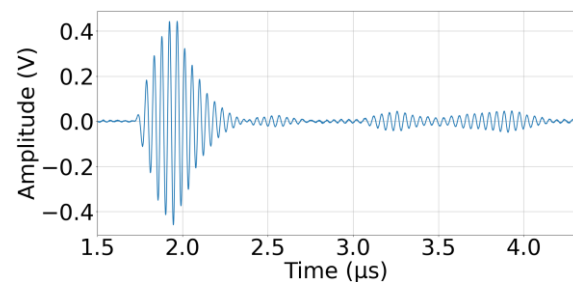


Figure 4: Beispiel Reflexion für den Triboakustischen Pin in Luft.

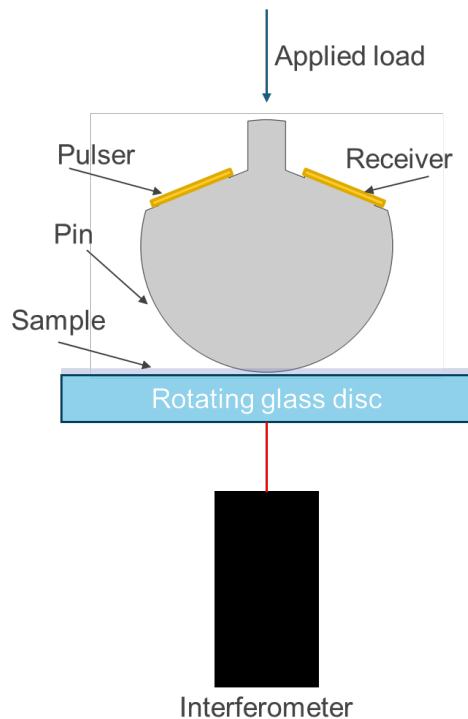


Figure 5: Schematische Darstellung des aufbaus zur Validierung des Triboakustischen Pins.

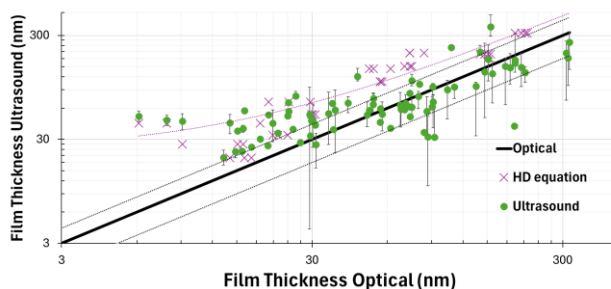


Figure 6: Validierung des Triboakustischen Pins mittels optischer Interferometrie.

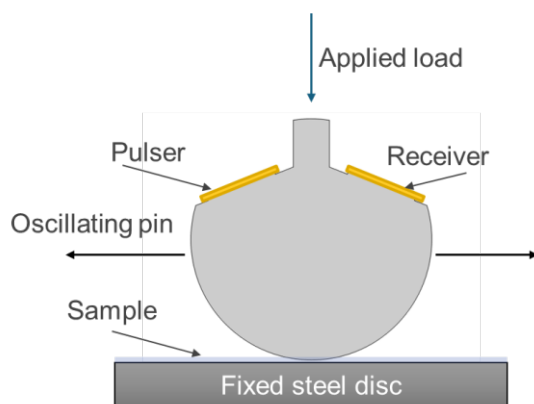


Figure 7: Schematische Darstellung des Triboakustischen Pins in einem oszillierenden System.

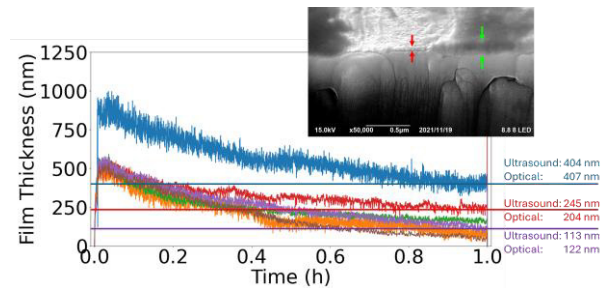


Figure 8: Tribofilm Bildung und Abbau gemessen mit dem Triboakustischen Pin in einem Oszillierenden Aufbau.

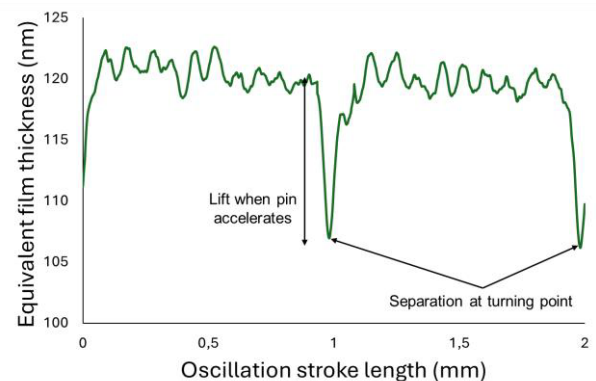


Figure 9: Orts- und hubaufgelöste Filmdicken messung, gemittelt über 40 Hübe.

Aknowledgment

Diese Arbeit wurde im Rahmen des COMET Zentrums InTribology (FFG-Nr. 906860), einem Projekt des „Kompetenzzentrums für Tribologie“ (AC2T research GmbH), durchgeführt. InTribology wird durch das COMET – Competence Centers for Excellent Technologies Programm von den Bundesministerien BMIMI und BMWETals auch den Bundesländern Niederösterreich und Vorarlberg auf Basis der finanziellen Unterstützung durch die beteiligten Projektpartner gefördert. COMET wird durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) abgewickelt.

Literaturnachweis

- [1] Schirru, M., and M. Varga. "A review of ultrasonic reflectometry for the physical characterization of lubricated tribological contacts: history, methods, devices, and technological trends." *Tribology Letters* 70.4 (2022): 129..
- [2] Schirru, Michele, and Michael Adler. "An ultrasonic rheometer to measure gas absorption in ionic liquids: design, calibration and testing." *Sensors* 20.12 (2020): 3544.
- [3] Gray, William, and Robert Sean Dwyer-Joyce. "Ultrasonic resonance approach to measure rolling element bearing raceway films in-situ: A

- practical approach." Tribology International (2025): 111141.
- [4] Dwyer-Joyce, R. S., T. Reddyhoff, and J. Zhu. "Ultrasonic measurement for film thickness and solid contact in elastohydrodynamic lubrication." (2011): 031501.