

Ein neuartiger Sensor für Öl-Condition Monitoring in extremen Umgebungsbedingungen

Michele Schirru¹

¹AC2T research GmbH, Viktor-Kaplan-Straße 2/C 2700 Wiener Neustadt, Österreich
Michele.schirru@ac2t.at

Zusammenfassung

Die Zustandsüberwachung von Schmierstoffen in kritischen mechanischen Systemen ist von entscheidender Bedeutung für die Gewährleistung von Zuverlässigkeit, Effizienz und Sicherheit. Unter den Schmierstoffeigenschaften stellt die Viskosität einen zentralen Indikator für Alterungsprozesse wie Oxidation, Kontamination und Gasabsorption dar. In dieser Arbeit wird ein neuartiges Ultraschallviskosimeter vorgestellt, das Echtzeit- und *In-situ*-Viskositätsmessungen unter extremen Bedingungen, einschließlich hoher Drücke und Temperaturen, ermöglicht. Der Sensor nutzt hochfrequente transversale Ultraschallwellen (Scherwellen) sowie eine innovative polymere Anpassungsschicht zur Erhöhung der Sensitivität durch Reduktion von akustischen Impedanzunterschieden. Der vorgestellte Ansatz ermöglicht eine präzise Überwachung über einen breiten Viskositätsbereich und zeigt eine hohe Robustheit in anspruchsvollen Umgebungen, was durch Messungen von Gasabsorptionsprozessen in unter Druck stehenden ionischen Flüssigkeiten validiert wurde.

Keywords: Viskosität, Rheologie, Hochdruck, Zustandsüberwachung

Einleitung

Die Schmierung spielt eine fundamentale Rolle im Betrieb industrieller Systeme wie Getriebe, Verdichter, Turbinen und hydraulische Anlagen. Die Leistungsfähigkeit und Lebensdauer dieser Systeme hängen maßgeblich vom Zustand des Schmierstoffs ab, der verschiedenen Degradationsmechanismen wie Oxidation, thermischer Zersetzung, Kontamination und Gasabsorption unterliegt.

Unter den physikochemischen Eigenschaften von Schmierstoffen gilt die Viskosität als einer der wichtigsten Indikatoren für den Schmierstoffzustand, da sie direkt die Schmierfilmbildung, Reibung und Verschleiß beeinflusst.

Änderungen der Viskosität können als Frühindikatoren für Systemstörungen dienen. Beispielsweise führt Oxidation typischerweise zu einer Erhöhung der Viskosität, während Kontamination oder Kraftstoffverdünnung eine Verringerung bewirken können. Auch die Gasabsorption, insbesondere unter Hochdruckbedingungen, kann die Viskosität erheblich beeinflussen und somit die Schmierleistung in Anwendungen wie Verdichtern oder Druckreaktoren verändern.

Trotz ihrer großen Bedeutung stellt die zuverlässige *In-situ*-Messung der Viskosität unter anspruchsvollen Umgebungsbedingungen mit hohen Drücken und Temperaturen eine erhebliche Herausforderung dar. Konventionelle Laborviskosimeter liefern zwar präzise Ergebnisse, sind jedoch für die kontinuierliche Überwachung ungeeignet. Bestehende Inline-Sensortechnologien, wie kapazitive oder induktive Sensoren, weisen häufig eine begrenzte Empfindlichkeit auf, insbesondere bei Medien mit niedriger Permittivität oder bei geringen Änderungen der Schmierstoffzusammensetzung. Zudem sind diese Sensoren in der Regel nicht für den Betrieb unter extremen Bedingungen wie hohem Druck, hohen Temperaturen oder chemisch aggressiven Medien ausgelegt [1].

Ultraschallbasierte Verfahren haben sich als vielversprechende Alternativen zur Charakterisierung von Fluideigenschaften etabliert [2]. Allerdings sind klassische Ultraschall-Reflexionsmethoden häufig durch starke akustische Impedanzunterschiede zwischen festen Sensormaterialien (z. B. Metallen) und Flüssigkeiten limitiert [3]. Diese führt zu schwachen Transmissions- und Reflexionssignalen und somit zu einer reduzierten Messgenauigkeit und Sensitivität.

Zur Überwindung dieser Herausforderungen wird in dieser Arbeit ein neuartiges, auf Ultraschallreflexion basierendes Viskosimeter vorgestellt, das Scherwellen sowie eine gezielt ausgelegte Anpassungsschicht nutzt, um die Messsensitivität und Robustheit signifikant zu verbessern [4]. Der vorgeschlagene Sensor ist speziell für den Einsatz in anspruchsvollen Umgebungen konzipiert und ermöglicht eine präzise Echtzeitüberwachung der Viskosität in Anwendungen, in denen konventionelle Sensoren versagen.

Materialien

Der entwickelte Sensor basiert auf einem aktiven Ultraschall-Reflexionsmessprinzip und ist speziell für den Einsatz in anspruchsvollen industriellen Umgebungen ausgelegt. Die Hauptkomponenten und die Funktionsweise sind schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

Die Sensorarchitektur umfasst folgende wesentliche Komponenten: einen piezoelektrischen Scherwandler, eine Verzögerungsstrecke (Delay Line) sowie eine maßgeschneiderte polymere Anpassungsschicht.

Der piezoelektrische Wandler arbeitet im Schermodus in einem Frequenzbereich von etwa 1 bis 20 MHz. Scherwellen sind besonders geeignet für Viskositätsmessungen, da ihre Wechselwirkung mit Flüssigkeiten direkt mit den viskosen Eigenschaften des Fluids verknüpft ist. Der Wandler erzeugt hochfrequente Ultraschallwellen, die sich durch die Sensorstruktur bis zur Grenzfläche mit der Prüfflüssigkeit ausbreiten.

Zum Schutz des Wandlers vor direkter Exposition gegenüber der anspruchsvollen Betriebsumgebung ist dieser mit einer Verzögerungsstrecke verbunden. Diese erfüllt mehrere Funktionen: mechanischer Schutz, kontrollierte Wellenausbreitung sowie die Definition einer klar abgegrenzten Wechselwirkungszone zwischen Ultraschallsignal und Messmedium. Darüber hinaus ist die Verzögerungsstrecke typischerweise mit einem Gewinde versehen, um eine direkte Integration in mechanische Systeme wie Ölsümpfe oder Druckbehälter zu ermöglichen.

Eine zentrale Innovation des Sensors ist die Einführung einer polymerbasierten Anpassungsschicht zwischen Verzögerungsstrecke und Prüffluid [5]. Diese Schicht reduziert gezielt die akustische Impedanzfehlانpassung zwischen der festen

Sensorstruktur und der Flüssigkeit. Durch eine geeignete Wahl der Materialeigenschaften und eine Schichtdicke von einem Viertel der Ultraschallwellenlänge wird eine Resonanzbedingung zwischen einfallenden und reflektierten Scherwellen erzeugt [6].

Diese Resonanz führt zu einer signifikanten Erhöhung der Sensitivität gegenüber Änderungen der mechanischen Eigenschaften des Fluids, insbesondere der Viskosität. Im Gegensatz zu konventionellen Ultraschallsensoren ermöglicht dieses Design eine starke Kopplung zwischen Ultraschallwelle und Flüssigkeit, selbst bei niedrigviskosen oder niedrigpermittiven Medien.

Die polymere Anpassungsschicht ist zudem für den Einsatz unter extremen Bedingungen wie erhöhten Temperaturen und hohen Drücken ausgelegt und gewährleistet eine stabile Langzeitperformance.

Der Sensor ist in einem industrietauglichen Gehäuse mit entsprechendem Schutzgrad integriert und kann in realen Anwendungen wie Getrieben, Verdichtern und Druckreaktoren eingesetzt werden. Eine elektronische Steuereinheit übernimmt die Ansteuerung des Wandlers, die Signalerfassung sowie die Echtzeit-Datenverarbeitung.

Datenanalyse und Sensorkalibrierung

Das Messprinzip des vorgeschlagenen Sensors basiert auf der Analyse des Ultraschall-Reflexionskoeffizienten an der Grenzfläche zwischen Anpassungsschicht und Prüffluid. Trifft eine transversale Ultraschallwelle auf diese Grenzfläche, wird ein Teil der Welle reflektiert, während ein anderer Teil im Fluid gedämpft wird.

Die Elektronik wandelt das vom piezoelektrischen Wandler empfangene Zeitsignal in den Frequenzbereich um. Anschließend wird die Amplitude bei der Resonanzfrequenz der resonanten Anpassungsschicht zur Berechnung des Reflexionskoeffizienten herangezogen [5].

Der Reflexionskoeffizient ist die zentrale Messgröße des Ultraschallsensors und hängt von dem akustischen Impedanzunterschied zwischen Anpassungsschicht und Fluid ab. Da die akustische Impedanz einer Flüssigkeit durch deren Dichte und Viskosität bestimmt wird, führen Änderungen der Viskosität zu messbaren Variationen des reflektierten Signals.

Der Reflexionskoeffizient lässt sich experimentell wie folgt bestimmen:

$$R = \frac{A_m}{A_r} \quad (1)$$

wobei R den Reflexionskoeffizienten, A_r die Referenzamplitude und A_m die im Betrieb gemessene Amplitude des reflektierten Signals bezeichnet.

Der Referenzwert A_r wird im Rahmen eines Kalibrierverfahrens bestimmt, bei dem die Signalamplitude über den relevanten Temperaturbereich hinweg gegen Luft gemessen wird (vgl. Abbildung 2) [7].

Da ein Betrieb unter thermischen Lastwechseln zu erwarten ist, stellt die Auswahl eines geeigneten Wandlermaterials einen kritischen Aspekt des Sensordesigns dar. Insbesondere muss ein piezoelektrisches Material mit geringer temperaturabhängiger Drift der dielektrischen Eigenschaften gewählt werden, um die Langzeitstabilität der Referenzfunktion auch unter thermischer Zyklierung sicherzustellen.

Nach Etablierung der Referenzfunktion kann der Reflexionskoeffizient *in-situ* bestimmt und mittels eines geeigneten rheologischen Modells, beispielsweise eines Newton- oder Maxwell-Modells, in eine Viskosität überführt werden [5,8].

Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch ein praxisorientierter Ansatz verfolgt: Es konnte gezeigt werden, dass die Beziehung zwischen Reflexionskoeffizient und Viskosität für Kalibrieröle sowohl durch ein Maxwell-Modell als auch durch eine Exponentialfunktion beschrieben werden kann [2]. Dadurch ist es möglich, den Reflexionskoeffizienten direkt mit der unbekannten Viskosität zu korrelieren, indem der Sensor mit Referenzölen bekannter Viskosität kalibriert wird.

Ein entsprechendes Beispiel ist in Abbildung 3 dargestellt, in der der Reflexionskoeffizient in Abhängigkeit von der Viskosität bekannter Proben aufgetragen ist. Hierzu werden standardisierte Kalibrieröle (z. B. Canon-Normöle für Viskosimeterkalibrierung) verwendet. Es zeigt sich, dass die Messpunkte verschiedener Öle auf derselben Exponentialfunktion liegen.

Das Ergebnis dieser Kalibrierung ist somit eine direkte Zuordnung zwischen Reflexionskoeffizient und Viskosität, ohne dass

zusätzliche physikalische Eigenschaften der untersuchten Probe bekannt sein müssen.

Nach erfolgter Kalibrierung kann der Sensor Echtzeitmessungen des Reflexionskoeffizienten direkt in Viskositätswerte umrechnen. Der Einsatz hochfrequenter Scherwellen gewährleistet dabei eine hohe Sensitivität gegenüber den Basisfluideigenschaften und ermöglicht die Detektion subtiler Veränderungen, etwa durch Oxidation oder Gasabsorption.

Zur Verbesserung der Messgenauigkeit und Robustheit werden Signalverarbeitungsverfahren wie Rauschunterdrückung, Frequenzbereichsanalyse und Temperaturkompensation eingesetzt. Dadurch wird eine zuverlässige und reproduzierbare Viskositätsmessung unter variierenden Betriebsbedingungen ermöglicht.

Experimentelle Ergebnisse: Messung der Gasabsorption.

Zur Demonstration der Leistungsfähigkeit des vorgeschlagenen Sensors unter extremen Bedingungen wurden Experimente zur Erfassung von Viskositätsänderungen infolge von Gasabsorption in einer ionischen Flüssigkeit unter Hochdruckbedingungen durchgeführt (vgl. Abbildung 4).

Der Versuchsaufbau besteht aus einem Druckreaktor, in den der Sensor direkt integriert ist. Der Reaktor arbeitet bei Drücken von bis zu 80 bar und Temperaturen um 50 °C, was typischen Bedingungen industrieller Anwendungen mit Gas-Flüssig-Wechselwirkungen entspricht. Die Messergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt.

Die in den Experimenten verwendete ionische Flüssigkeit ist speziell so ausgelegt, dass sie eine minimale Wasserstoffabsorption aufweist. Dies wird durch Messungen bestätigt, die bei Wasserstoffbeaufschlagung konstante Viskositätswerte über die Zeit zeigen. Der Sensor detektiert zuverlässig das Ausbleiben signifikanter Viskositätsänderungen und demonstriert damit seine Stabilität unter konstanten Bedingungen.

Im Gegensatz dazu führt die Einleitung von Stickstoff in das System zu einer Absorption des Gases durch die ionische Flüssigkeit, was zu messbaren Änderungen der Viskosität führt. Der Sensor erfasst diese Veränderungen in Echtzeit und zeigt eine klare Variation des

reflektierten Ultraschallsignals, die dem Absorptionsprozess entspricht.

Die Ergebnisse verdeutlichen die hohe Sensitivität des Sensors gegenüber gasinduzierten Viskositätsänderungen, selbst unter Hochdruckbedingungen. Diese Eigenschaft ist insbesondere für Anwendungen in Verdichtern, chemischen Reaktoren und Energiesystemen von großer Relevanz, bei denen Gasverunreinigungen oder -absorption die Schmierstoffleistung erheblich beeinflussen können.

Die Möglichkeit, diese Messungen *in-situ* und ohne Probenentnahme oder externe Analytik durchzuführen, stellt einen wesentlichen Vorteil gegenüber konventionellen Methoden dar. Darüber hinaus gewährleistet die robuste Auslegung des Sensors einen zuverlässigen Betrieb in Umgebungen, in denen herkömmliche Sensoren versagen würden.

Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit wurde ein neuartiges Ultraschallviskosimeter zur *In-situ*-Zustandsüberwachung von Schmierstoffen unter extremen Umgebungsbedingungen vorgestellt. Der Sensor kombiniert hochfrequente Scherwellenmessungen mit einer innovativen polymeren Anpassungsschicht, um die Einschränkungen konventioneller Ultraschall- und elektrischer Messverfahren zu überwinden.

Ein wesentlicher Vorteil des Sensors besteht darin, dass nach geeigneter Kalibrierung eine quantitative Bestimmung der Viskosität unabhängig von detaillierten physikalischen Eigenschaften des Prüffluids möglich ist.

Die zentrale Innovation liegt in der Verwendung der Anpassungsschicht zur Verbesserung der akustischen Kopplung und zur Erzeugung eines Resonanzeffekts, wodurch die Sensitivität gegenüber Viskositätsänderungen signifikant erhöht wird. Dieser Ansatz ermöglicht präzise Messungen über einen breiten Bereich von Fluidtypen, einschließlich niedrigviskoser Öle und komplexer Schmierstoffe.

Der Sensor zeigt eine robuste Leistungsfähigkeit unter rauen Bedingungen, insbesondere bei hohen Drücken und Temperaturen, und ist somit für anspruchsvolle industrielle Anwendungen geeignet. Die experimentellen Ergebnisse bestätigen die Fähigkeit des Sensors, Viskositätsänderungen infolge von Gasabsorption in Echtzeit zu

detektieren und unterstreichen sein Potenzial für fortschrittliche Zustandsüberwachungssysteme.

Insgesamt stellt der vorgestellte Sensor einen bedeutenden Fortschritt im Bereich der Schmierstoffüberwachung dar und bietet eine vielseitige sowie zuverlässige Lösung für Anwendungen, in denen konventionelle Messverfahren nicht einsetzbar sind.

Abbildungen

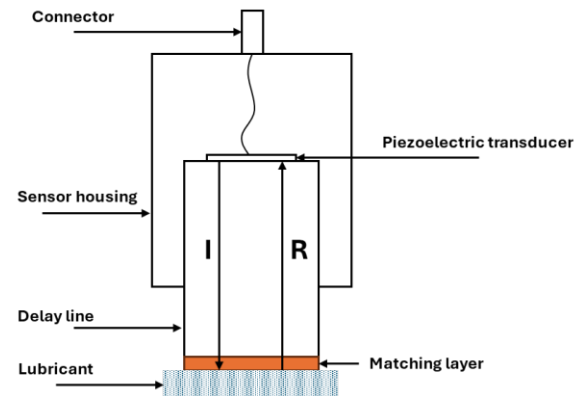


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Hauptkomponenten des Sensors und seiner Funktionsweise

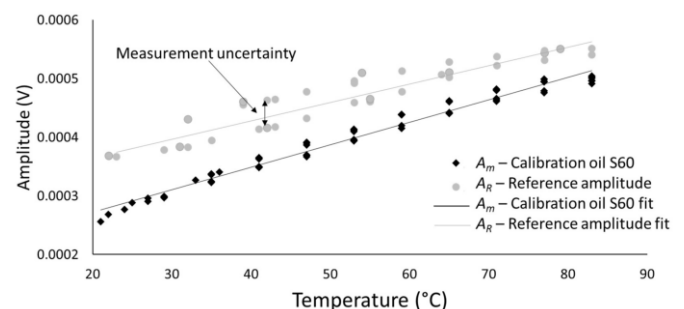


Abbildung 2: Referenzamplitude, gemessen über einen Temperaturbereich, und Messamplitude, ermittelt anhand eines Kalibrierungsstandards (Viskositätsmineralöl) [7]

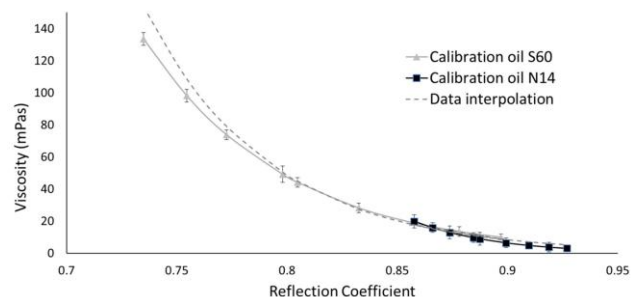


Abbildung 3: Reflexionskoeffizienten-Viskositätskurve für zwei Mineralöle mit Kalibrierviskosität

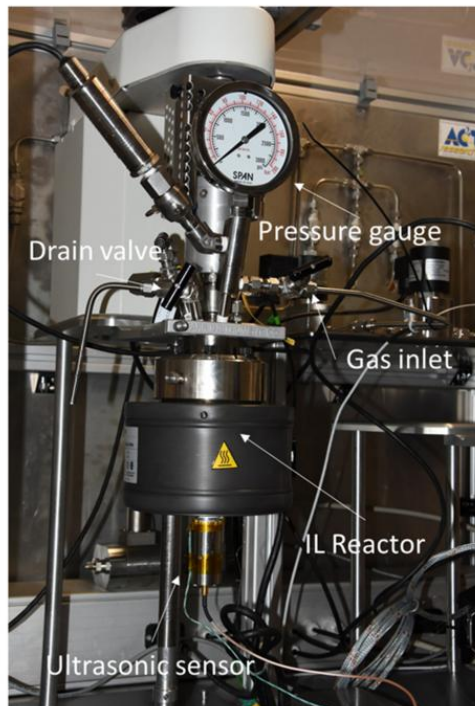


Abbildung 4: Versuchsaufbau zur Messung der Viskosität von Ölen unter Druck und bei Gassättigung [7].

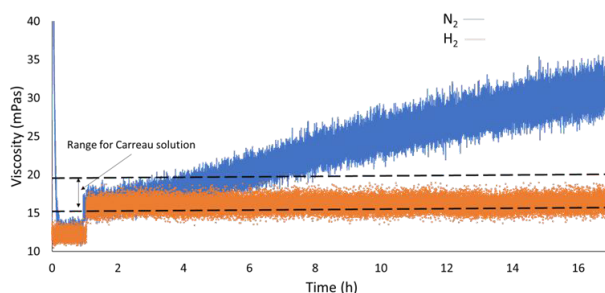


Abbildung 5: Viskositätsänderung aufgrund der Gasaufnahme von Stickstoff und Wasserstoff in einer ionischen Flüssigkeit in einem Reaktor bei 50 °C und 80 bar [7].

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 BMWET als 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] Shah, Raj, Rui Chen, and Vasu Bala. "Viscosity measurement at High Temperature and Varying Shear Rates for Engine Lubricants." *Petro Industry News* (2020).
- [2] 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.
- [3] Franco, Ediguer E., and Flávio Buiocchi. "Ultrasonic measurement of viscosity: Signal processing methodologies." *Ultrasonics* 91 (2019): 213-219.
- [4] Schirru, M., Li, X., Cadeddu, M., & Dwyer-Joyce, R. S. (2019). Development of a shear ultrasonic spectroscopy technique for the evaluation of viscoelastic fluid properties: Theory and experimental validation. *Ultrasonics*, 94, 364-375.
- [5] Schirru, M., Mills, R., Dwyer-Joyce, R., Smith, O., & Sutton, M. (2015). Viscosity measurement in a lubricant film using an ultrasonically resonating matching layer. *Tribology Letters*, 60(3), 42.
- [6] Fei, C., Ma, J., Chiu, C. T., Williams, J. A., Fong, W., Chen, Z., ... & Zhou, Q. (2015). Design of matching layers for high-frequency ultrasonic transducers. *Applied physics letters*, 107(12).
- [7] Schirru, Michele, and Michael Adler. "An ultrasonic rheometer to measure gas absorption in ionic liquids: design, calibration and testing." *Sensors* 20.12 (2020): 3544.
- [8] Franco, Ediguer E., et al. "Viscosity measurement of Newtonian liquids using the complex reflection coefficient." *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 55.10 (2008): 2247-2253.