

Neuartiger Sensor zur Messung der Schmierfilm-Eigenschaften im Zahnradkontakt

Christoph Schneidhofer¹, Michele Schirru¹, Nico Bernegger¹

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

Zusammenfassung

Die Kenntnis des Schmierungszustands eines Zahnradkontaktes ist entscheidend für die Auslegung von Getrieben. In dieser Studie wird ein neuartiger Sensor mit zugehöriger Steuerelektronik vorgestellt, der die in-situ- und Echtzeitmessung der Schmierfilmdicke in rotierenden Kontaktsituationen ermöglicht. Hier ist in Getriebenanwendungen der Zweischeibenversuch eine Modellmethode zur Charakterisierung von Schmierstoffen, da er entscheidende Einblicke in Reibung, Verschleiß und den Schmierzustand liefert. Um dies zu beobachten wurde das neuartige Sensorsystem direkt in eine der Scheiben integriert, sodass bei jeder Umdrehung Informationen über den Schmierungszustand im Kontaktpunkt gewonnen werden können. Dieser Durchbruch in der Messtechnik ermöglicht eine bisher unerreichte Auflösung bei der dynamischen Erfassung der Schmierungszustände unter realistischen Belastungs- und Drehzahlbedingungen, wie sie in Getriebekontakten auftreten. Durch die direkte Verknüpfung tribologischer Leistungsmerkmale mit der momentanen Filmdicke bietet diese Technologie ein leistungsstarkes Werkzeug zur Optimierung von Schmierstoffformulierungen und zur Getriebeauslegung und überbrückt die Lücke zwischen Laborversuchen und realem Getriebebetrieb.

Diese Arbeit beschreibt die neuartige Messelektronik, die mittels der aktiven ultraschallbasierten Reflexionsmethode die Filmdicke im Kontaktpunkt des Sensors zugänglich macht. Darüber hinaus nutzt die Elektronik Energy-Harvesting, um sich selbst mit Energie zu versorgen, sowie eine kabellose Datenübertragung über WLAN. Die gesamte Messkette wird anhand von Messungen am Zweischeiben-tribometer demonstriert.

Keywords: Filmdickenmessung, Ultraschall- Reflexionsmethode, Tribologie, Energy Harvesting, Getriebeanwendung

Einleitung

Die Schmierung von Zahnradkontakten stellt einen entscheidenden Einflussfaktor für die Effizienz, Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Getrieben dar. Insbesondere die Schmierfilmdicke bestimmt maßgeblich den Betriebszustand im Kontakt und erlaubt die Unterscheidung zwischen Grenz-, Misch- und Vollschmierung. Eine präzise Kenntnis dieser Größe ist daher von zentraler Bedeutung für die Auslegung von Getrieben sowie für die Entwicklung und Bewertung von Schmierstoffen. [1], [2], [3]

Zur experimentellen Untersuchung tribologischer Systeme mit hochbelasteten Kontakten hat sich der Zweischeibenversuch als etablierte Modellmethode bewährt. Er ermöglicht die gezielte Analyse von Reibung, Verschleiß und Schmierungszuständen unter definierten Belastungs- und Geschwindigkeitsbedingungen. [4] Die Bestimmung der aktuellen Schmierfilmdicke ist in der Realität sehr schwierig und kann mittels optischer,

elektrischer oder akustischer Messverfahren erfolgen. [2], [5], [6] Diese Ansätze sind jedoch häufig auf stationäre oder vereinfachte Randbedingungen beschränkt und erlauben nur eine begrenzte zeitliche und örtliche Auflösung. Insbesondere die direkte, *in-situ* Messung der Filmdicke in einem realitätsnah rotierenden Kontakt stellt weiterhin eine messtechnische Herausforderung dar. [3]

Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegenden Arbeit ein neuartiges Sensorsystem vorgestellt, das die Echtzeitmessung der Schmierfilmdicke direkt im Kontaktpunkt eines Zweischeibentribometers ermöglicht. Hierzu wird ein Sensor in eine rotierende Scheibe integriert, wodurch bei jeder Umdrehung Messdaten aus dem Kontakt gewonnen werden können. Die Bestimmung der Filmdicke erfolgt mittels einer aktiven ultraschallbasierten Methode [1], [7], [8]. Ergänzend ist das System mit einer energieautarken Versorgung durch Energy Harvesting sowie einer kabellosen Datenübertragung ausgestattet.

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung und experimentelle Validierung dieser Messkette unter realistischen Betriebsbedingungen. Durch die Kombination aus integrierter Sensorik, energieautarker Elektronik und drahtloser Kommunikation wird ein neuer Ansatz zur hochaufgelösten Erfassung dynamischer Schmierzustände geschaffen, der die Lücke zwischen Laboruntersuchungen und realem Getriebebetrieb schließt.

Zunächst wird das Konzept des Energy Harvestings vorgestellt, gefolgt von der Beschreibung der entwickelten Messelektronik. Anschließend werden der Aufbau und die Versuchsanordnung des Zweischeibentribometers erläutert sowie die experimentellen Ergebnisse der Filmdickenmessung diskutiert.

Energy-Harvesting

Bei der vorliegenden Fragestellung zur Messung der Filmdicke beim Zweischeibentribometer befinden sich beide Kontaktpartner des Tribokontaktes in Bewegung, wodurch keine direkte elektrische Verbindung des Ultraschallsensors zu einer stationären Messelektronik möglich ist. Demnach ist die Überführung der Messelektronik auf einen rotierenden Teil zielführend.

In den vergangenen Jahren haben sich Energy-Harvesting Technologien, insbesondere im Bereich der Mechatronik und Sensorik, schnell weiterentwickelt [9]. Dabei rückt die Fähigkeit, Energie direkt aus der Umgebung zu gewinnen und für den Betrieb autonomer Systeme nutzbar zu machen, zunehmend in den Fokus, vor allem in Szenarien, in denen konventionelle Energiequellen schwer zugänglich oder unpraktisch sind. In Abb. 1 werden verschiedene Technologien und ihre Anwendungen verglichen.

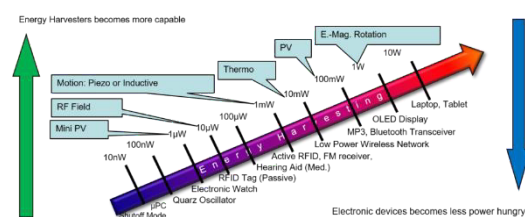


Abb. 1: Vergleich von Energy-Harvesting Technologien und Anwendungen [10]

Für die vorliegende Messanordnung wurde für das Energy-Harvesting ein elektromagnetisches Prinzip gewählt. Elektromagnetisches

Energy-Harvesting basiert auf dem Prinzip der Induktion. Das Generatorprinzip basiert auf der Bewegung von Magnetfeldern relativ zu einer Spule. Bewegt sich eine Spule durch ein Magnetfeld, oder auch umgekehrt, wird in der Spule eine elektrische Spannung induziert. Ein praktisches Beispiel ist ein rotierender Sensor, neben dem ein Magnet angebracht ist. Durch die Drehbewegung wird in der Spule auf dem Sensor elektrische Energie erzeugt. Dieser Ansatz bietet sich beispielsweise in Maschinen oder Fahrzeugen an, in denen mechanische Bewegung ohnehin vorhanden ist, wie es in der vorliegenden Aufgabenstellung beim Zweischeibentribometer der Fall ist. [11], [12]

Bei dem hier angewendeten elektromagnetischen Energy-Harvesting-System wird aus der Rotationsbewegung der Maschine die elektrische Energie für die Spannungsversorgung zuverlässig sichergestellt. Dabei sind eine definierte Anzahl an Spulen ringförmig auf der Messplatine angeordnet, die sich bei der Rotationsbewegung an feststehenden Magneten vorbeibewegen und somit durch Induktion eine Spannung induziert wird, die nachfolgend für die Power Supply aufbereitet wird.

Messelektronik

Abb. 2 zeigt das Blockschaftbild der entwickelten Messelektronik zur Bestimmung der Schmierfilmdicke bei der rotierenden Kontaktstelle im Zweischeibentribometer. Die Energieversorgung der Messelektronik wird mit dem zuvor beschriebenen Energy-Harvester auf elektromagnetischem Prinzip bewerkstelligt.

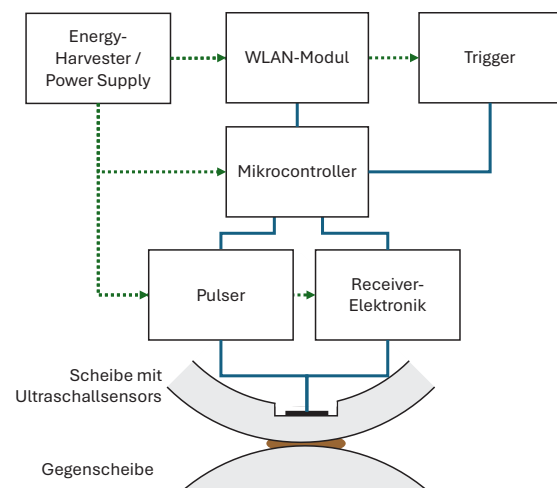


Abb. 2: Blockschaftbild der Messelektronik

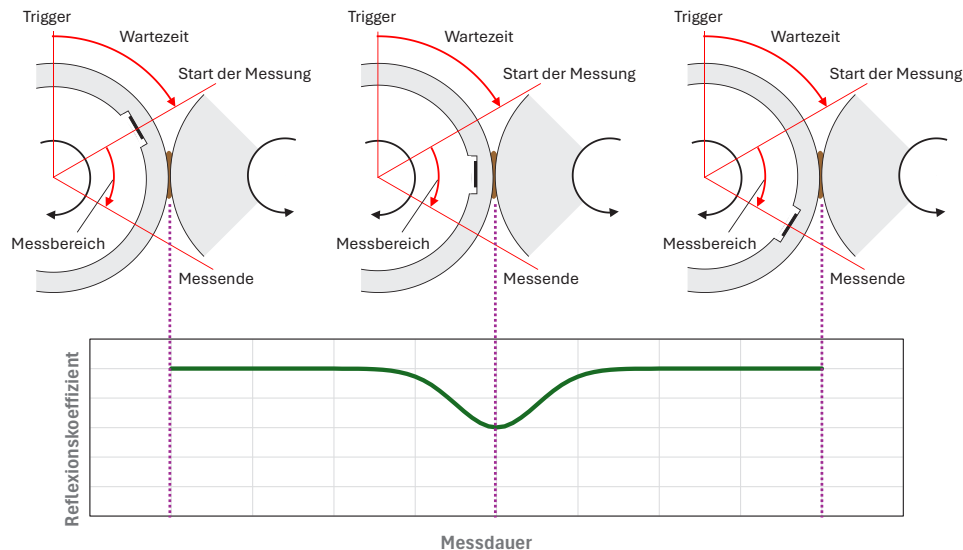


Abb. 3: Schematische Darstellung des Messablaufs und des resultierenden Messsignals anhand des Reflexionskoeffizienten

Für die Ablaufsteuerung wird ein Mikrocontroller verwendet, der die Anregung des Ultraschallsensors durch den Sender ansteuert. Die Reflexion des Ultraschallpulses, welche die Information der Schmierfilmdicke enthält, wird von der Empfänger-Elektronik verarbeitet und die nötige Amplituden-Information der Ultraschallreflexion extrahiert und an den Mikrocontroller zurückgesendet.

Bei jeder Umdrehung wird ein Triggersignal ausgelöst, um die Position der Scheibe in Bezug zur Kontaktstelle zu erkennen. Basierend auf dem Triggersignal wird der zeitliche Ablauf der Messung gesteuert. In Abb. 3 ist der Messablauf und das dazu resultierende Messsignal anhand des Reflexionskoeffizienten dargestellt. Befindet sich der Sensor vor der Kontaktstelle, wie in Abb. 3 links dargestellt, so wird sämtliche Energie des Ultraschallpulses an der Scheibenoberfläche reflektiert, wodurch der Reflexionskoeffizient 1 als Referenz gemessen wird. Bewegt sich der Ultraschallsensor in die Kontaktzone (Abb. 3 Mitte), wird die Ultraschallreflexion entsprechend der Kontaktsteifigkeit, welche unter anderem die Information der Schmierfilmdicke beinhaltet, abgeschwächt. Verlässt der Ultraschallsensor wieder die Kontaktzone (Abb. 3 rechts), geht der gemessene Reflexionskoeffizient zum Referenzwert 1 zurück.

Die Amplitudeninformation zur Bestimmung des Reflexionskoeffizienten wird während des gesamten Messablaufs vom Mikrocontroller aufgezeichnet. Nach abgeschlossener Messung werden die Messdaten über das WLAN-Modul zu einem PC zur Messdatenspeicherung und nachfolgenden Auswertung übermittelt.

Zweischeibentribometer – Aufbau und Versuchsanordnung

Ein Zweischeibentribometer ist eine spezielle Bauform eines Tribometers zur Untersuchung von Reibung und Verschleiß zwischen zwei rotierenden Scheiben. Diese Konfiguration ermöglicht die Nachbildung von hochbelasteten Roll- und Gleitkontakten unter realistischen Bedingungen, wie sie beispielsweise bei Lagern und Getrieben vorkommen. Durch die Relativbewegung und (leicht) unterschiedliche Drehzahlen entstehen definierte Schlupfbedingungen in der Kontaktzone. Der Anpressdruck, die Relativgeschwindigkeit und die Schmierbedingungen können dabei eingestellt und variiert werden. Mit einem Zweischeibentribometer lassen sich Verschleißraten, Reibkoeffizienten sowie Materialübertragungen unter unterschiedlichen Betriebsbedingungen experimentell ermitteln. Je nach Scheibengeometrie und Anordnung lassen sich Punkt- bzw. Linienkontakte nachstellen. [13], [14], [15]

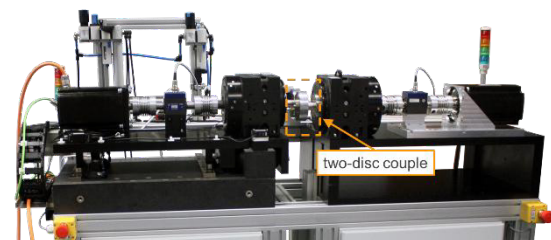


Abb. 4: Zweischeibentribometer bei AC2T research GmbH

Abb. 4 zeigt den Zweiseibentribometer, der für diese Arbeit herangezogen wurde. Er besteht aus zwei unabhängig voneinander angetriebenen Achsen 1 und 2, die jeweils Scheiben mit unterschiedlichen Durchmessern aufnehmen können. In der vorliegenden Arbeit wurde beide Scheiben aus Edelstahl 1.4301 gefertigt. Die Scheibe 1 mit einem Durchmesser von 140 mm und eine Breite von 35 mm hat im Inneren eine Ausnehmung zur Aufnahme der Messelektronik. Abb. 5 zeigt die Scheibe mit montierter Messelektronik. Die Scheibe hat 4 innenliegende Nuten auf dem Umfang verteilt zur Montage der Ultraschallsensoren, wobei für diese Arbeit nur ein Sensor montiert und verwendet wurde. Die Gegenscheibe (Scheibe 2) (nicht dargestellt) hat einen Durchmesser von 100 mm und eine Breite von 4 mm an der Kontaktstelle, wobei diese mit einem Radius von 10 mm versehen ist, um eine punktförmige Kontaktsituation zu erreichen.



Abb. 5: Prototyp der Messelektronik montiert auf Scheibe 1 für die Versuche im Zweiseibentribometer

Für die Evaluierung der Filmdickenmessung wurde die Scheibe 1 mit einer Drehzahl von 700 U/min angetrieben und mit einer Kraft von 700 N gegen die Scheibe 2 gepresst. Dadurch entsteht eine Hertzsche Kontaktpressung von 1,8 GPa. Als Schmierung wurde ein Schmierfett der Konsistenzklasse NLGI 2 mit Lithiumverdicker und mineralischem Basisöl mit einer Viskosität von 100 mm²/s bei 40°C verwendet. Eine definierte Menge des Schmierfettes wurde initial aufgebracht und während dem Versuch wurde nicht nachgeschmiert.

In dieser Konfiguration wurde das Experiment für eine Dauer von 6 Minuten durchgeführt, wobei jede Minute eine Messung der Schmierfilmdicke für ein Dauer von 4 Umdrehungen durchgeführt wurde.

Ergebnisse

Abb. 6 zeigt exemplarisch den gemessenen Trend des Reflexionskoeffizient während einer kompletten Messung bestehend aus dem Startimpuls gefolgt von 200 Messwerten des Referenzwertes. An diesen angeschlossen ist die Messung des Reflexionskoeffizienten während vier aufeinanderfolgenden Kontaktzyklen wie in Abb. 6 ersichtlich ist. Jeder Kontaktzyklus besteht aus 400 Messwerten. In der Mitte jedes Zyklus ist der charakteristische Einbruch im Reflexionskoeffizient zu erkennen da sich hier der Sensor genau an der Kontaktzone befindet.

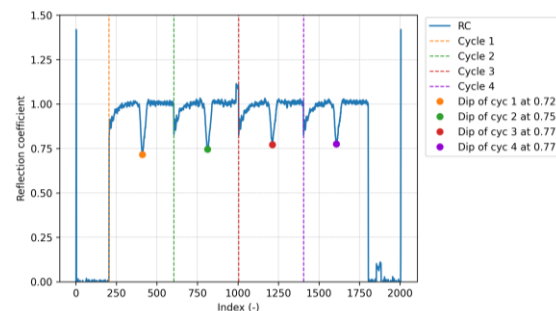


Abb. 6: Entwicklung des Reflexionskoeffizienten während einer Messung mit 4 Zyklen

Der Reflexionskoeffizient in der Kontaktzone liefert die Information der Steifigkeit des Kontaktes, woraus die Schmierfilmdicke errechnet werden kann. Anschließend an die vier Messzyklen wird erneut der Referenzwert bestehend aus 200 Messwerten gemessen und mit dem Stoppimpuls die Messung beendet. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, zeigen die vier aufeinanderfolgenden Zyklen lediglich eine geringe Variation im gemessenen Reflexionskoeffizient.

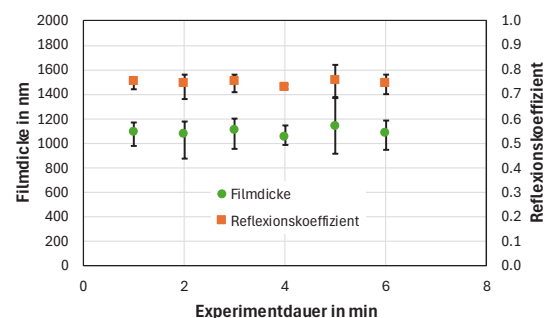


Abb. 7: Trend der berechneten Schmierfilmdicke sowie des gemessenen Reflexionskoeffizient während des Experiments

Abb. 7 zeigt den Trend der berechneten Schmierfilmdicke sowie des gemessenen Reflexionskoeffizient während des Experiments. Die Messung zeigt, dass über den Zeitraum des Experimentes eine stabile Messung des Reflexionskoeffizienten durchgeführt werden kann und hieraus ein stabiler Wert für die Schmierfilmdicke berechnet werden kann.

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Ein neuartiger Sensor mit zugehöriger Steuer-elektronik zur *in-situ* und Echtzeitmessung der Schmierfilmdicke in rotierenden Kontakt-situationen wurde entwickelt und aufgebaut. Hierbei wird die Reflexionsmethode eines Ultraschallimpulses genutzt, um die Filmdicke im Kontaktpunkt des Sensors zugänglich zu machen. Ein Energy-Harvester zur Spannungsversorgung sowie eine Datenübertragung über WLAN ermöglichen die autarke Messung der Schmierfilmdicke bei rotierenden Probenkörpern. Die gesamte Messkette wurde anhand von Messungen am Zweischeiben-tribometer demonstriert. Hierbei wurden über die Experimentdauer stabile Signale beobachtet, die eine Bestimmung der Filmdicke in der Kontaktzone ermöglichen.

Die durchgeführten Experimente zeigen detaillierte Einblicke in den Schmierungs-zustand im Kontaktpunkt. Dadurch ist die dynamische *in-situ* Erfassung des Schmierungs-zustandes unter realistischen Belastungs- und Drehzahlbedingungen, wie sie in Getriebekontakten auftreten, möglich.

Danksagung

Die präsentierten Forschungsergebnisse wurden im Rahmen des COMET-Zentrums InTribology (FFG-Nr. 906860), einem Projekt des „Kompetenzzentrums für Tribologie“ (AC2T research GmbH), erarbeitet. 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.** Die Entwicklung der Messmethode wurde durch das Interreg-Projekt IPMAI - Interpretierbare präskriptive Instandhaltung mit künstlicher Intelligenz (ATCZ00060) unterstützt.

Literaturnachweis

- [1] M. Schirru und M. Varga, „A Review of Ultrasonic Reflectometry for the Physical Characterization of Lubricated Tribological Contacts: History, Methods, Devices, and Technological Trends“, 1. Dezember 2022, *Springer*. doi: 10.1007/s11249-022-01670-8.
- [2] P. Dou u. a., „A finite-element-aided ultrasonic method for measuring central oil-film thickness in a roller-raceway tribo-pair“, *Friction*, Bd. 10, Nr. 6, S. 944–962, Juni 2022, doi: 10.1007/s40544-021-0544-y.
- [3] P. Dou u. a., „Review of ultrasonic-based technology for oil film thickness measurement in lubrication“, *Tribol. Int.*, Bd. 165, S. 107290, Jän. 2022, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2021.107290.
- [4] G. Amine, N. Fillot, D. Philippon, N. Devaux, J. Dufils, und E. Macron, „Dual experimental-numerical study of oil film thickness and friction in a wide elliptical TEHL contact: From pure rolling to opposite sliding“, *Tribol. Int.*, Bd. 184, S. 108466, Juni 2023, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2023.108466.
- [5] O. Marklund und L. Gustafsson, „Interferometry-based measurements of oil-film thickness“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Bd. 215, Nr. 3, S. 243–259, März 2001, doi: 10.1243/1350650011543510.
- [6] N. Marx, J. Guegan, und H. A. Spikes, „Elastohydrodynamic film thickness of soft EHL contacts using optical interferometry“, *Tribol. Int.*, Bd. 99, S. 267–277, Juli 2016, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2016.03.020.
- [7] W. A. Gray und R. S. Dwyer-Joyce, „Ultrasonic resonance approach to measure rolling element bearing raceway films in-situ: A practical approach“, *Tribol. Int.*, Bd. 214, S. 111141, Feb. 2026, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2025.111141.
- [8] R. S. Dwyer-Joyce, T. Reddyhoff, und J. Zhu, „Ultrasonic Measurement for Film Thickness and Solid Contact in Elastohydrodynamic Lubrication“, *J. Tribol.*, Bd. 133, Nr. 3, Juni 2011, doi: 10.1115/1.4004105.
- [9] M. Chetto und A. Queudet, „3 - Harnessing Ambient Energy for Embedded Systems“, in *Energy Autonomy of Real-Time Systems*, M. Chetto und A. Queudet, Hrsg., Elsevier, 2016, S. 57–83. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-125-3.50003-8>.
- [10] M. Hayes, „Synergies between Energy Harvesting and Power Electronics“, in *IEEE PELS Young Professionals Webinar*, IEEE Power Electronics Society, Okt. 2016, S. 33.
- [11] H. Fu u. a., „Rotational energy harvesting for self-powered sensing“, *Joule*, Bd. 5, Nr. 5, S. 1074–1118, Mai 2021, doi: 10.1016/J.JOULE.2021.03.006.

- [12] D. Dinulovic, M. Brooks, M. Haug, und T. Petrovic, „Rotational Electromagnetic Energy Harvesting System“, *Phys. Procedia*, Bd. 75, S. 1244–1251, Jän. 2015, doi: 10.1016/J.PHPRO.2015.12.137.
- [13] S. K. Peesapati, J. Prost, G. Vorlaufer, M. Varga, und C. Gachot, „Chatter Detection and Identification Based on Mode Decompositions“, *Adv. Eng. Mater.*, Bd. 27, Nr. 23, Dez. 2025, doi: 10.1002/adem.202500382.
- [14] A. M. Puhwein, A. Biederbeck, B. Jakab, und M. Varga, „Experimental Modal Analysis of a Twin-disc Tribometer using a 3D-scanning Laser Doppler Vibrometer“, in *Computer Vision & Laser Vibrometry, Vol. 6*, Denmark: River Publishers, 2025, S. 103–110. doi: 10.13052/97887-438-0151-1_12.
- [15] G. Brunbauer u. a., „Finite element modal analysis of a twin-disc tribometer: Sensitivity analysis and experimental validation using vibrometry“, *Tribol. Int.*, Bd. 219, S. 111778, Juli 2026, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2026.111778.