

Verschleißfreie Impedanzspektroskopie von Wälzlagern

David Riehl¹, Timo Oster¹, Sebastian Zisch¹, Ferdinand Keil¹, Klaus Hofmann¹

Tobias Schirra², Georg Martin²

¹TU Darmstadt, Integrierte Elektronische Systeme, Merckstr. 25, 64283 Darmstadt

²HCP Sense GmbH, Robert-Bosch-Str. 7, 64293 Darmstadt

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein verschleißfreies Messverfahren zur Bestimmung der elektrischen Schmierfilmimpedanz in Wälzlagern vorgestellt. Die nach dem derzeitigen Stand der Technik verwendeten Schleifkontakte werden durch eine induktive Kopplung ersetzt. Unter Einsatz von zwei Ferritkernen wird eine Messung der Spannung und des Stroms direkt am Schmierfilm ermöglicht. Über eine breitbandige Charakterisierung der Übertragungsstrecke und den Einsatz von Deembedding-Verfahren aus der Hochfrequenzmesstechnik können Fehlereinflüsse reduziert werden. Die Messung der Lagerimpedanz wird sowohl monofrequent als auch über eine multifrequente Spektroskopie durchgeführt. Hierfür werden entweder eine digitale IQ-Demodulation oder das orthogonale Frequenzmultiplexverfahren verwendet. Die erfolgreiche Anwendung und Validierung des Messprinzips wird anhand von zwei Prototypen unter verschiedenen Betriebsbedingungen demonstriert.

Keywords: Wälzlager, Schmierfilmimpedanz, Impedanzspektroskopie, Predictive Maintenance

Problemstellung

Anhand der elektrischen Schmierfilmimpedanz von Wälzlagern können Rückschlüsse auf den jeweiligen Verschleiß- und Belastungszustand des Lagers gezogen werden [1, 2, 3]. Wie in Abb. 1 dargestellt zeigt die Schmierfilmimpedanz je nach Dicke, bestimmt unter anderem durch Drehzahl und Belastung, ein resistives bis kapazitives Verhalten. Im Stillstand besteht ein direkter galvanischer Kontakt zwischen Lagerschalen und Wälzkörpern, welcher elektrisch näherungsweise als Kurzschluss betrachtet werden kann. Bei niedrigen Drehzahlen beginnen die Wälzkörper auf dem Schmierfilm aufzuschwimmen. Einzelne Rauigkeitsspitzen in der Metalloberfläche führen zu kurzzeitigen galvanischen Kontakten. Dieser Zustand der Mischreibung kann elektrisch als kapazitiv-resistive Parallelschaltung betrachtet werden. Bei höheren Drehzahlen schwimmen die Wälzkörper schließlich vollständig auf, und es zeigt sich ein kapazitives Verhalten. Belastungen des Lagers modulieren, wie in Abb. 2 dargestellt, die Schmierfilmdicke. Dies ist auch als Modulation der elektrischen Kapazität messbar [1, 2, 3].

Nach dem derzeitigen Stand der Technik wird zur Kontaktierung des drehenden Elementes meist ein Schleifkontakt genutzt [4]. Dieser Schleifkontakt ist allerdings prinzipbedingt verschleißbehaftet. Zudem besteht die Möglichkeit, dass durch Verschmutzung oder bei hohen Drehzahlen die Kontaktierung nicht mehr ideal ist, und somit eine nicht mehr zu vernachlässigende Impedanz aufweist [4]. Weiter wird durch die Kontaktierung eine Leiterschleife mit parasitärer Induktivität aufgebaut. Diese verringert die Bandbreite des Messaufbaus, wodurch hochdynamische Änderungen der Lagerimpedanz nur begrenzt aufgelöst werden können [3, 2].

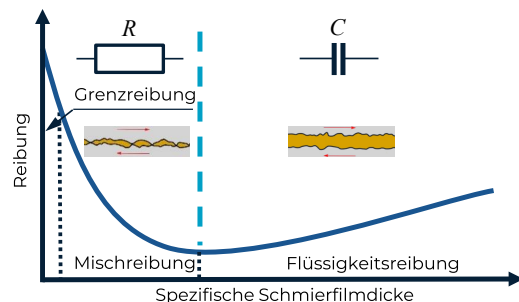


Abb. 1: Elektrische Eigenschaften von Wälzlagern, abhängig von der Schmierfilmdicke, bedingt durch Drehzahl und Last [1].

Dieses Projekt (HA-Projekt-Nr.: 1481/23-34) wird im Rahmen von Hessen Modell Projekte aus Mitteln der LOEWE – Landes-Offensive zur Entwicklung Wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz, Förderlinie 3: KMU-Verbundvorhaben gefördert.

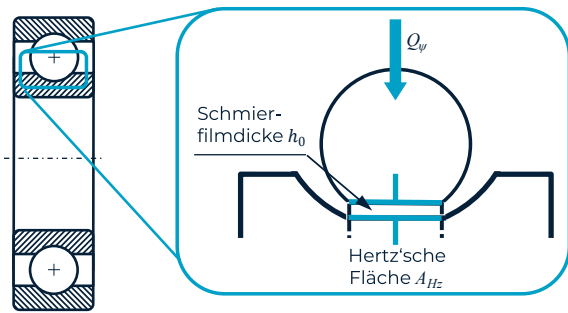


Abb. 2: Veränderung der Schmierfilmdicke und der Hertz'schen Fläche durch Belastung des Lagers [1].

Lösungsvorschlag

Zur Lösung dieser Probleme wurde ein Messaufbau für Doppellager entwickelt, der die Messspannung zur Wälzlagerimpedanzbestimmung induktiv einprägt und gleichzeitig eine induktive Spannungs- und Strommessung direkt am Schmierfilm ermöglicht. Hierzu wird der in Abb. 3 und 4 gezeigte Aufbau verwendet. Zwischen zwei Wälzlagern werden zwei Ferritkerne angebracht, die jeweils als Transformator T_1 und T_2 arbeiten. Die Wicklung N_1 dient hierbei als Erregerwicklung in die ein Wechselspannungssignal eingespeist wird. Die Achse selbst bildet eine Sekundärwicklung mit einer Windung. An den Wicklungen N_2 und N_3 kann ein Spannungs- und ein Stromsignal proportional zu der an den Lagerimpedanzen Z_a und Z_b anliegenden Gesamtspannung und dem durch sie fließenden Strom gemessen werden.

Grundsätzlich ist auch die Messung der Lagerimpedanzen mittels nur eines Ferritkernes und der Primärwicklung N_1 möglich [5]. Hierbei muss die Lagerimpedanz aus der Primärimpedanz von N_1 abgeschätzt werden. Der für die Messung parasitäre Magnetisierungsstrom, bestimmt durch die temperaturabhängige Hauptinduktivität von T_1 , beeinflusst damit allerdings das Messergebnis. Er erhöht den gemessenen Strom, und führt zusätzlich zu einem veränderlichen Spannungsabfall an der Primärwicklung. Mittels der Hilfswicklung N_2 auf T_1 kann nun die induzierte Spannung an den Schmierfilmimpedanzen weitestgehend unabhängig vom Magnetisierungsstrom bestimmt werden. Übertrager T_2 dient der direkten Strommessung im Lager. Die angeschlossene Systemimpedanz $Z_0 = 50 \Omega$ wird über das Windungsverhältnis von T_2 nach

$$Z_{shunt} = \left(\frac{1}{N_3} \right)^2 Z_0 \quad (1)$$

zu einem Strommessshunt zwischen die beiden Lager transformiert. Hierbei ist es wichtig zu be-

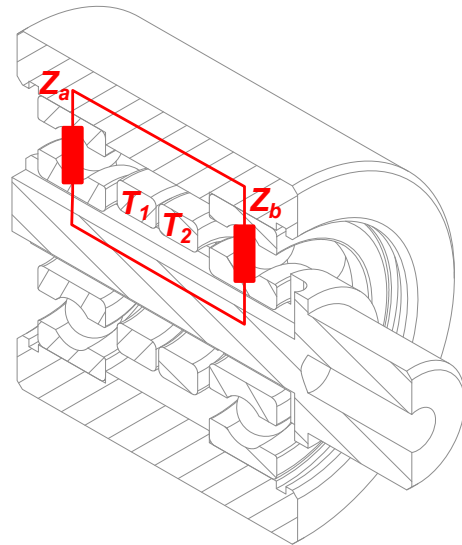


Abb. 3: Querschnitt der Lageranordnung, mit der aus den Lagern und der Schmierfilmimpedanz gebildeten Sekundärinduktivität.

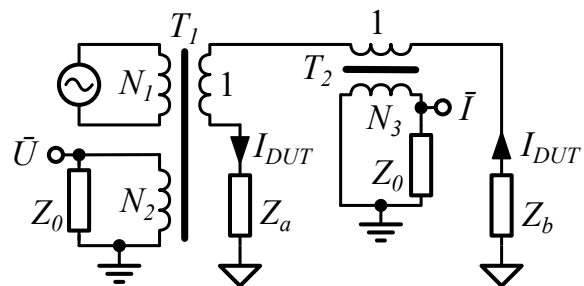


Abb. 4: Ersatzschaltbild des Messaufbaues, mit den aus zwei Ferritkernen gebildeten Transformatoren T_1 und T_2 .

achten, dass dieser im Verhältnis zur gemessenen Impedanz nicht zu groß wird und die Spannungsmessung über N_2 verfälscht.

Charakterisierung der Übertragungsstrecke

Um die Messgenauigkeit zu erhöhen, kann für den Frequenzbereich eine Fehlermatrix des Messsystems in Form von komplexen ABCD-Übertragungsparametern

$$\begin{pmatrix} \bar{U} \\ \bar{I} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_{DUT} \\ I_{DUT} \end{pmatrix} \quad (2)$$

aufgestellt werden. Diese kann mittels einer - in der Hochfrequenzmesstechnik gängigen - Short, Open, Load, Through (SOLT)-Kalibrierung ermittelt und durch einen Deembedding-Prozess aus den Messwerten herausgerechnet werden [6]. Die Charakterisierung kann sowohl im Frequenzbereich mit einem Frequenzsweep, als auch im Zeitbereich mit Anlegen eines breitbandigen Testsignals durchgeführt werden. In Abb. 5 werden ex-

empiarisch die ermittelten Übertragungsparameter von Strom I und Spannung U an den Lagern in Relation zu Messspannung \bar{U} und Messstrom \bar{I} dargestellt. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit muss die Temperaturabhängigkeit dieser Parameter berücksichtigt werden.

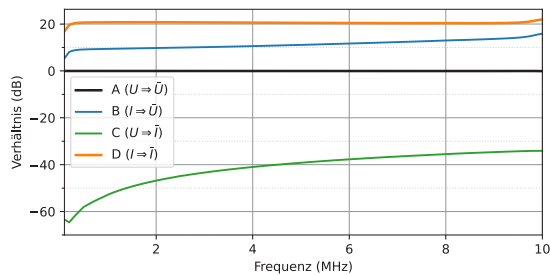


Abb. 5: Gemessene ABCD-Parameter der Übertragungstrecke zum Deembedden der Messwerte.

Messaufbau

Zum Test des Messprinzips wurden zwei Lagerprototypen entwickelt. Zum einen ein Rollendoppellager (Abb. 3), welches durch das Austauschen der Lager mit definierten Impedanz-Dummys eine Evaluierung der Übertragungstrecke bei verschiedenen Impedanzen in einem Temperaturbad ermöglicht (Abb. 6). Und zum anderen, wie in Abb. 7 gezeigt, ein Wellendoppellager, mit welchem bekannte Lager in einem Prüfstand unter realen Bedingungen belastet und vermessen werden können. Zur Signalgenerierung wurde ein 33250A Arbitrary Waveform Generator (Keysight Technologies, Santa Rosa, USA) verwendet. Die Messungen wurden mit einem 5444D MSO Oszilloskop (Pico Technology, Cambridgeshire, UK) bei einer Abtastrate von 62.5 MS/s und einer eingestellten Auflösung von 14 Bit durchgeführt. Die Eingänge des 5444D MSO wurden mit $Z_0 = 50 \Omega$ terminiert und die Referenz-PLLs beider Geräte synchronisiert. Die Temperaturabhängigkeit der Übertragungstrecke wurde mithilfe eines Fluke 7320 Kalibrierbades im Bereich von 0 bis 100 °C untersucht.

Monofrequente Messung (IQ-Demodulation)

Die Messung der Lagerimpedanz ist sowohl bei einer Anregungsfrequenz als auch bei mehreren Anregungsfrequenzen gleichzeitig möglich. Gängige Verfahren zur Impedanzbestimmung aus einem Strom- und Spannungssignal sind direkte Messung von Amplitude und Phase über einen Gain-Phase-Detector oder eine IQ-Demodulation [7]. Beide Verfahren können sowohl analog als auch digital durchgeführt werden. Aufgrund der

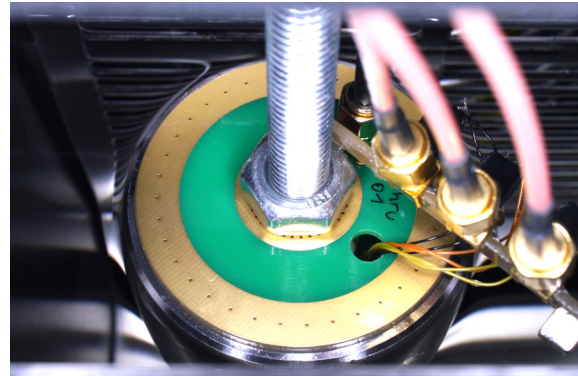


Abb. 6: Rollendoppellager mit Impedanz-Dummys im Temperatur-Kalibrationsbad.

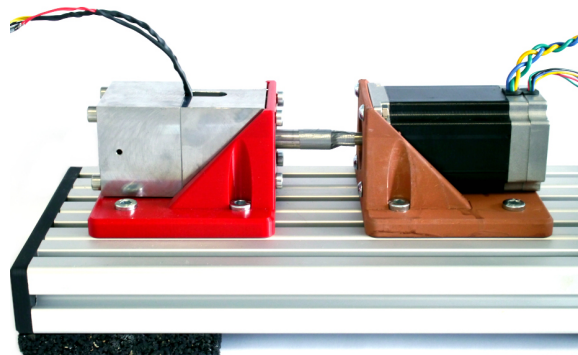


Abb. 7: Wellendoppellager an Lagerprüfstand zur Validierung des Messprinzipes im Betrieb.

höheren Flexibilität und Vergleichbarkeit haben wir uns für eine schnelle Datenaufnahme mit einem Speicheroszilloskop und digitaler Nachverarbeitung mittels einer IQ-Demodulation entschieden. In Abb. 8 ist die Signalverarbeitungskette dargestellt. Die Messsignale $\bar{U}(t)$ sowie $\bar{I}(t)$ werden zunächst digitalisiert und jeweils mit einem Sinus bei der Anregungsfrequenz f_c und einer dagegen um 90° phasenverschobenen Sinus multipliziert. Mittels eines Tiefpasses werden die Produkte bei $2 \cdot f_c$ herausgefiltert, um den demodulierten I- und Q-Anteil des Signales zu erhalten [8]. Die hiermit erhaltenen komplexen Messwerte für $\bar{U}(n)$ und $\bar{I}(n)$ werden nun mit der invertierten Fehlermatrix $S^{-1}(f_c)$ multipliziert um die tatsächliche Spannung $U(n)$ und den Strom $I(n)$ am Lager zu bestimmen, woraus dann die Lagerimpedanz $Z(n)$ berechnet wird. Die monofrequente Messung bietet den Vorteil einer sehr hohen erreichbaren zeitlichen Auflösung von bis zu $f_c/2$, sowie einer auch auf Mikrocontrollern in Echtzeit implementierbaren Signalverarbeitung. Nachteil ist eine Empfindlichkeit gegen eventuelle Störgrößen, wie z.B. Lagerströme verursacht durch Inverter.

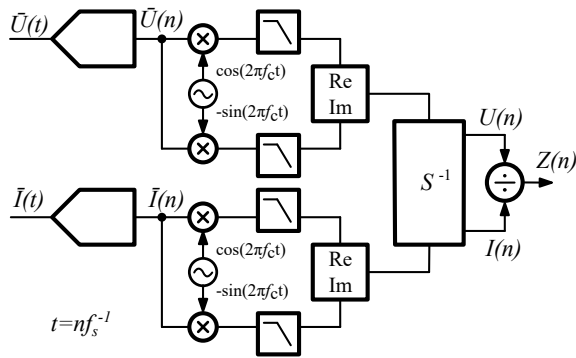


Abb. 8: Signalverarbeitungskette zur Impedanzbestimmung mittels digitaler IQ-Demodulation und Deembedding bei monofrequenter Messung.

Multifrequente Spektroskopie (OFDM)

Um Impedanzen breitbandig zu bestimmen und zusätzlich die Einhaltung von EMV-Richtlinien zu vereinfachen, kann das Erregerspektrum aus mehreren Grundfrequenzen zusammengesetzt werden. Das resultierende Spektrum kann je nach Anwendung angepasst werden [9, 10], im Vergleich zur IQ-Demodulation benötigt es allerdings aufwendigere Hardware zur Verarbeitung der Signale.

In dieser Arbeit wird das Spektrum mit dem in der Kommunikationstechnik weit verbreiteten Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren (OFDM) erzeugt [11]. Das Erregerspektrum wird dazu zunächst aus separaten Sub-Trägerfrequenzen mit gleichbleibenden Abständen zusammengesetzt (Abb. 10a). Dabei werden die einzelnen orthogonalen Träger mit einer pseudo-zufälligen Phase versehen und eine Crestfaktor-Reduzierung durchgeführt, um hohen Extremwerten vorzubeugen. Diese könnten ansonsten die Messgenauigkeit beeinträchtigen. Abbildung 10b zeigt ein Beispiel für ein im Zeitbereich resultierendes OFDM-Signal. Es besteht dabei auch die Möglichkeit, einzelne Frequenzen, zum Beispiel im Fall von starken Störquellen, adaptiv von der Auswertung auszuschließen.

Die vorliegende Lagerimpedanz moduliert den Strom der Sub-Trägerfrequenzen nun in Betrag und Phase. Die Auswertung erfolgt mittels einer Transformation der Strom- und Spannungsmesswerte in den Frequenzbereich. Bei jeder verwendeten Trägerfrequenz wird der Quotient aus komplexer Spannung und komplexem Strom gebildet, wodurch sich ein komplexes Spektrum der Lagerimpedanz ergibt. Durch Aufteilung der gemessenen Impedanz in Real- und Imaginärteil kann schließlich der Widerstands- und Kapazitätswert errechnet werden.

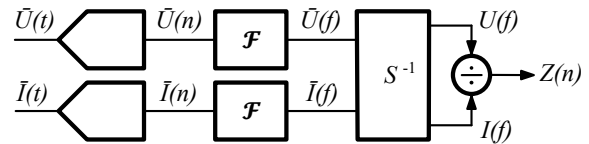


Abb. 9: Signalpfad für breitbandige Impedanzspektroskopie mittels OFDM Modulation.

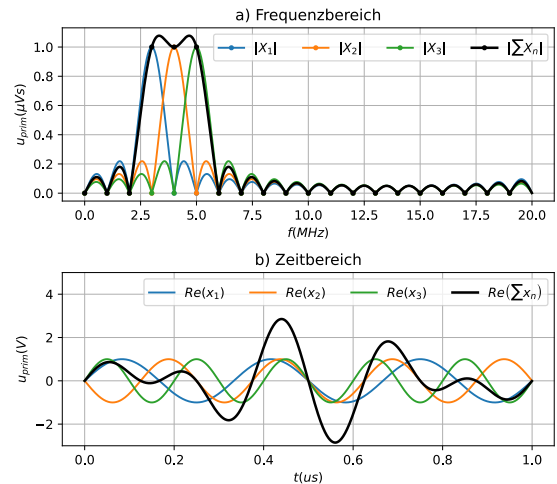


Abb. 10: OFDM-Signalkpaket im Frequenz- und Zeitbereich, exemplarisch für 20 Samples und 3 Subcarrier. Die Signalamplituden lassen sich im Frequenzbereich gezielt einstellen, resultieren ohne Reduzierung des Crestfactors allerdings in hohen Spitzenspannungen.

Zur Reduzierung der abgestrahlten Out-Of-Band-Leistung kann das OFDM-Signalkpaket zudem gefenstert werden. Tukey-Fenster ermöglichen hierbei einen guten Kompromiss zwischen Signalenergie und Bandbreite der unerwünschten Störprodukte.

Ergebnisse

Das neue Messverfahren liefert zu dem bisherigen, auf Schleifkontakten basierenden, Messprinzip vergleichbare Messungen. So kann, wie in Abb. 11 gezeigt, die Schmierfilmpkapazität zwischen den einzelnen Umläufen auf unter 100 fF genau wiederholbar bestimmt werden, und mechanische Größen wie die Käfigdrehzahl und die Überrollfrequenz sind messbar. Die Mittelwert der Kapazität ist wie erwartet drehzahlabhängig (Abb. 12), was zeigt, dass die Abhängigkeit der Kapazität von der Schmierfilmdicke gut messbar ist und somit auch Kraftmessungen möglich sind. Das neue Messverfahren ermöglicht durch die geringeren parasitären Leiterschleifen eine breit-

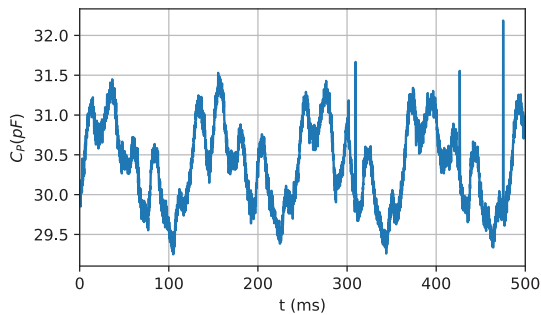


Abb. 11: Deembeddedes Kapazitätssignal bei 500 min^{-1} . Sowohl die Käfigdrehzahl als auch die Überrollfrequenzen sind messbar.

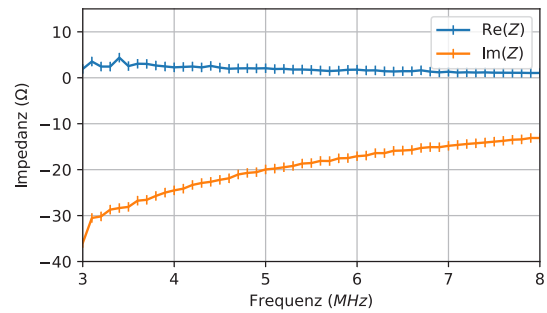


Abb. 13: Spektrum der Lagerimpedanz im Bereich von 3 MHz – 8 MHz; berechnet aus einem $10 \mu\text{s}$ langen, mit OFDM modulierten Sample.

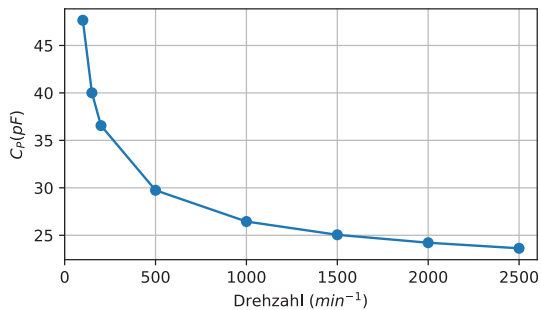


Abb. 12: Mittelwert der gemessenen Schmierfilmpazität, aufgetragen über der Drehzahl. Die erwartete Drehzahlabhängigkeit der Schmierfilmpazität ist sichtbar.

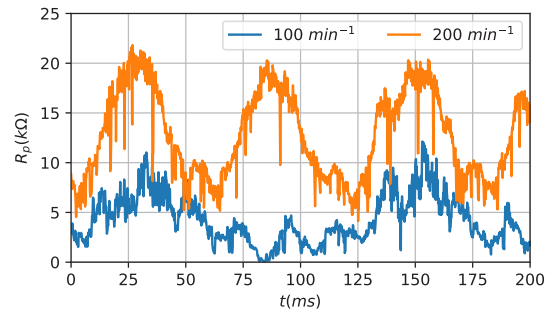


Abb. 14: Gemessener Parallelwiderstand des Schmierfilms. Bei 100 min^{-1} fällt der Widerstand auf bis zu 0Ω ab (Mischreibung). Bei 200 min^{-1} ist der Schmierfilm vollausgebildet mit periodischen kurzen Einbrüchen.

bandigere Messung der Lagerimpedanz, als mit Schleifkontakten bisher möglich ist. Somit kann die zeitliche Auflösung der Impedanzmessung deutlich gesteigert werden, um dynamische Änderungen der Lagereigenschaften besser aufzulösen. Abbildung 14 zeigt den gemessenen Parallelwiderstand bei Mischreibung und vollständig ausgebildetem Schmierfilm, selbst sehr kurze Einbrüche können gemessen werden. Auch ist eine Impedanzspektroskopie des Lagers, wie in Abbildung 13 gezeigt, möglich. Das erlaubt eine zeitlich hoch aufgelöste breitbandige Charakterisierung des Schmierfilms. Zudem können eventuelle elektromagnetische Störungen erkannt und aus dem Messsignal ausgeblendet werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Der nach derzeitigem Stand der Technik benutzte Schleifkontakt wurde mit einer induktiven Kopplung ersetzt, die eine getrennte Spannungs- und Strommessung direkt im Lager ermöglicht. Über die Nutzung von Deembedding-Verfahren können Fehlereinflüsse reduziert werden. Der Einsatz

von Methoden aus der Kommunikationstechnik ermöglicht es, das Lager als Übertragungssystem zu betrachten, beim dem die Lagerimpedanz die Trägerfrequenz in Amplitude und Phase moduliert. Es können sowohl zeitlich hochaufgelöste Messungen bei einer Messfrequenz durchgeführt werden, als auch störungsunempfindliche, breitbandige Messungen unter Nutzung von mehreren orthogonalen Trägerfrequenzen. Das Messprinzip wurde an zwei Prototypen unter verschiedenen Betriebsbedingungen evaluiert. Es ermöglicht eine genaue Messung der Lagerimpedanzen und somit wichtiger Betriebsparameter. Durch die Verschleißfreiheit des vorgestellten Messprinzips kann eine Lagerüberwachung nun auch in schwer zugängliche Anwendungen integriert werden, die eine möglichst große Wartungsfreiheit benötigen.

Literatur

- [1] T. Schirra u. a. „Electric impedance of rolling bearings - Consideration of unloaded rolling elements“. In: *Tribology International* 158 (2021), S. 106927. ISSN: 0301679X. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.106927.
- [2] Georg Martin. „Die Wälzlagerimpedanz als Werkzeug zur Untersuchung von Oberflächenabweichungen in Wälzlagern“. Dissertation. TU Darmstadt, 2021. DOI: 10.26083/TUPRINTS-00019712.
- [3] Tobias Schirra. „Phänomenologische Betrachtung der sensorisch nutzbaren Effekte am Wälzlager – Einfluss unbelasteter Wälzkörper auf die elektrische Impedanz“. Dissertation. TU Darmstadt, 2021. DOI: 10.26083/TUPRINTS-00017957.
- [4] Maximilian Hausmann, Tobias Schirra und Eckhard Kirchner. „Analysis of the Electrical Impedance of Graphite and Silver Graphite Carbon Brushes for Use in the Impedance Measurement of Sensory Utilizable Machine Elements“. In: *Machines* 11.11 (2023), S. 1009. DOI: 10.3390/machines11111009.
- [5] Dominik Großkurth. „Modellierung und kontaktlose Messung des elektrischen Widerstandes von Zugträgern zur Lebensdauerüberwachung von Riementrieben“. Dissertation. Darmstadt: TU Darmstadt, 2024. DOI: 10.26083/tuprints-00026548.
- [6] F. Caspers. „RF engineering basic concepts: S-parameters“. In: (2012). DOI: 10.48550/arXiv.1201.2346.
- [7] Bilel Ben Atitallah u. a. „Comparative Study of Measurement Methods for Embedded Bioimpedance Spectroscopy Systems“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 22.15 (2022). DOI: 10.3390/s22155801.
- [8] Zurich Instruments. *Principles of lock-in detection and the state of the art*. URL: https://www.zhinst.com/sites/default/files/li_primer/zi_whitepaper_principles_of_lock-in_detection.pdf (besucht am 10.04.2024).
- [9] Ahmed Yahia Kallel und Olfa Kanoun. „Crest Factor Optimization for Multisine Excitation Signals with Logarithmic Frequency Distribution Based on a Hybrid Stochastic-Deterministic Optimization Algorithm“. In: *Batteries* 8.10 (2022), S. 176. DOI: 10.3390/batteries8100176.
- [10] Marcel Palet Brandi. „Design, implementation and test of a fast impedance spectroscopy measurement system for biomedical applications“. Diss. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2022-02-08. URL: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/365799> (besucht am 10.04.2024).
- [11] Molisch. *Wireless Communications, Second Edition*. Wiley-IEEE Press, 2011. ISBN: 9780470666692.