

Untersuchungen der Schmierfettverteilung in Labyrinthdichtungen durch Kapazitätsmessung

Andreas Bürger, M.Eng., BTU Cottbus-Senftenberg, Senftenberg, Deutschland, andreas.buerger@b-tu.de
 Prof. Dr.-Ing. habil. Sylvio Simon, BTU Cottbus-Senftenberg, Senftenberg, Deutschland, sylvio.simon@b-tu.de

Kurzfassung

Die Anwesenheit von Schmiermittel ist essentiell für einen dauerhaften verschleißarmen Betrieb von z.B. Getrieben, Lagern und Dichtungen. Während Qualitätssensoren zur in-situ Messung für Öl und Fließfett weit verbreitet sind, existiert kein vergleichbares Verfahren zur Erfassung der Anwesenheit und des Zustands von Schmierfett.

Bei der Untersuchung von Dichtungen und Lagern im Labor wurde bisher neben optischen Untersuchungen das benötigte Drehmoment als Indikator für die Anwesenheit und den Zustand des Schmierfetts benutzt. Durch die Messung der elektrischen Kapazität von Labyrinthdichtungen ist es möglich, weit mehr Informationen über die Schmierfettqualität und -verteilung und -bewegung in der Labyrinthdichtung zu erhalten als es z.B. mit einer Drehmomentmessung möglich ist.

Abstract

The presence of lubricant is essential for the long-term, low-wear operation of gearboxes, bearings and seals, for example. While quality sensors for in-situ measurement of oil and fluid grease are widely used, there is no comparable method for detecting the presence and condition of grease. In laboratory tests on seals and bearings, optical examinations have been used to detect the presence and condition of grease, along with the required torque. By measuring the electrical capacity of labyrinth seals, it is possible to obtain far more information about the grease quality and distribution in the labyrinth seal than is possible with torque measurement, for example.

1 Motivation

Zur Abdichtung von Wellendurchführungen durch Gehäuseöffnungen oder in Tragrollen von Gurtförderern kommen meist Labyrinthdichtungen in der Bauform senkrecht zur Achse zum Einsatz. Der Raum zwischen den Elementen der Labyrinthdichtung ist, zumindest im Neuzustand, vollständig mit Schmierfett gefüllt. Messungen zum Wirkprinzip und zum Verhalten des Schmierfetts erfolgten bisher im Labormaßstab durch Drehmomentmessung und durch optische Untersuchungen. Bei eigenen Untersuchungen an Labyrinthdichtungen zeigte sich, dass Messverfahren gefunden werden müssen, die es erlauben, das Verhalten des Schmierfetts in Labyrinthdichtungen auch im Realbetrieb zu untersuchen.

2 Untersuchungen in Labyrinthdichtungen

Von 2011 - 2018 erfolgten an der Universität Stuttgart umfangreiche Untersuchungen zur Wirkungsweise von Labyrinthdichtungen in der Bauform senkrecht zur Achse (fettgefüllte berührungsfreie Wellendichtungen, FBWD) [1][2][3]. Dabei wurde nachgewiesen, dass sich entgegen vorheriger Annahmen in der Labyrinthdichtung beim Betrieb ein Luftspalt öffnet, welcher die eigentliche Barriere für das Eindringen von Verschmutzungen in das zu schützende Lager darstellt. Der Nachweis erfolgte durch Kameraaufnahmen sowie durch Messung des Drehmoments. Es wurde gezeigt, dass das Absinken des Drehmoments auf nahe Null durch die Öffnung des Luftspaltes im Schmierfett, d.h. durch eine Änderung des Schmierfett-Luft-Gemisches, der Labyrinthdichtung verursacht wird. Das Drehmoment ist also ein direktes Indiz zur Öffnung des Luftspaltes.

Mit Drehmomentmessungen kann die Ursache der Drehmomentänderung in der Labyrinthdichtung jedoch nicht lokalisiert werden. Optische Untersuchungen wiederum bieten eine hohe Aussagekraft über die Vorgänge im Schmierfett, erfordern aber gute Lichtverhältnisse und ausreichend Platz für die Kamera.

Von den Autoren wurde an diese Arbeiten angeknüpft und weitere Untersuchungen an Labyrinthdichtungen durchgeführt [4]. Um die Vorgänge in der Labyrinthdichtung besser untersuchen und verstehen zu können, wurde der vertikale Teil der Labyrinthdichtung als Scheibe-Scheibe-System nachgebildet (Bild 1). Eine modifizierte Drehmaschine mit den Drehzahlen ab ca. 1 s^{-1} gefahren werden können, dient dazu, die Rotation des Scheibe-Scheibe-Systems realitätsnah nachzubilden.



Bild 1 Scheibe-Scheibe-System

Der Raum zwischen beiden Ringen der Labyrinthdichtung d.h. zwischen den Teilen des Scheibe-Scheibe-Systems ist gewöhnlich vollständig mit Schmierfett gefüllt. Die üblicherweise für diese Anwendungen genutzten Schmierfette sind elektrisch nichtleitend. Damit liegt die Analogie zu einem elektrischen Kondensator nahe.

Untersuchungen der Dielektrizitätskonstanten von Schmierfetten ergaben Werte, die sich deutlich von der Dielektrizitätskonstante von Luft unterscheiden (Tabelle 1). Demnach sollte sich ein Eindringen von Luft in das Schmierfett durch ein Absinken der Kapazität bemerkbar machen.

Medium	ϵ_R
Luft (eigene Messung)	0,93
Schmierfett NLGI 2 (eigene Messung)	1,41
Schmierfett NLGI 3/4 (eigene Messung)	1,69
Luft [5]	1,00059
Wasser [5]	80,3

Tabelle 1 ausgewählte relative Dielektrizitätskonstanten

Damit die Teile des Scheibe-Scheibe-Systems als Kondensatorplatten genutzt werden können, mussten die aus Polyacryl bzw. Polyamid gefertigten Teile mit einer elektrisch leitenden Beschichtung versehen werden. Von der Vielzahl möglicher Technologien (z.B. Galvanisieren, Sputtern, Bedampfen, Bekleben mit einer Metallfolie) ergab lediglich der Auftrag mit einer eigentlich für elektromagnetische Abschirmzwecke bestimmten Farbe zufriedenstellende Ergebnisse bzgl. Haftung, Oberflächengüte und Reproduzierbarkeit.

Erste Messungen der Kapazität an einem einfachen Scheibe-Scheibe-System (Bild 1) erfolgten zunächst durch Messung der Entladezeit mit einem Arduino Nano 33. Diese Messungen ergaben reproduzierbar gute Ergebnisse und eine sehr gute Korrelation zwischen der Kapazitätsänderung und dem Absinken des Drehmoments. Letzteres wurde durch die Veränderung des Schmierfett-Luft-Gemischs durch Scherung verursacht (Bild 2).

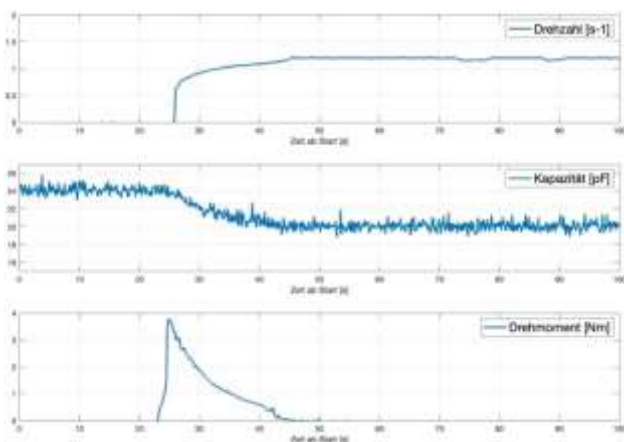


Bild 2 Messwerte für Drehmoment, Drehzahl und Kapazität am Scheibe-Scheibe-System (Bild 1)

Um die Anordnung als rotierendes System einsetzen zu können, wurde die rotierende Scheibe vollflächig, die stationäre Scheibe mit 6 Halbkreisringflächen beschichtet (Bild 3). Damit ergeben sich drei Kondensatoren, was eine Lokalisierung der Änderung der Schmierfetteigenschaften ermöglicht.



Bild 3 mit segmentierten Kondensatorflächen beschichtetes Scheibe-Scheibe-System

Die Nutzung des zur Kapazitätsmessung vorgesehenen IC FDC 1004 macht eine einfache und hochauflösende Messung der Kapazität bis in den Femto-Farad-Bereich möglich [6].

Bild 4 zeigt beispielhaft den Verlauf der Messwerte des Drehmomentes und der Kapazitäten C_{Innen} (innerer Ringkondensator), C_{Mitte} (mittlerer Ringkondensator) und $C_{\text{Außen}}$ (äußerer Ringkondensator) am Scheibe-Scheibe-System bei einer annähernd sprungförmigen Drehzahländerung von 0 s^{-1} auf ca. 26 s^{-1} .

Die Änderungen der Kapazitäten C_{Innen} , C_{Mitte} und $C_{\text{Außen}}$ die durch das Eindringen von Luft in das Schmierfett aufgrund drehzahlinduzierter Scherbewegungen verursacht wurden korrelieren deutlich mit Änderungen des Drehmoments. Markant sind auch periodische Änderungen der Kapazität - insbesondere im Bereich von C_{Innen} - welche durch Schmierfettbewegungen verursacht wurden. Diese Schmierfettbewegungen waren auch optisch erkennbar. Ein Teil des Schmierfettes wird durch Fliehkräfte nach außen befördert. Es verbleibt jedoch immer ein Schmierfilm auf den Scheiben. Bei kleinen Drehzahlen ist der Einfluss der Fliehkräfte gering und der Großteil des Schmierfettes verbleibt zwischen den Scheiben und wird wulstartig zwischen den Scheiben bewegt.

Das Absinken des Drehmomentes ist zum Teil auf die Verringerung der Schmierfettmenge zwischen den Scheiben aufgrund der o.g. Wirkung der Fliehkräfte zurückzuführen. Bei kleinen Drehzahlen jedoch ist der Einfluss der Fliehkräfte gering und das Absinken des Drehmoments ist auf das Aufreißen der Lithiumbänder im Schmierfett zurückzuführen. Dieser Vorgang ist in der Literatur häufig beschrieben und durch z.B. REM-Aufnahmen belegt [7].

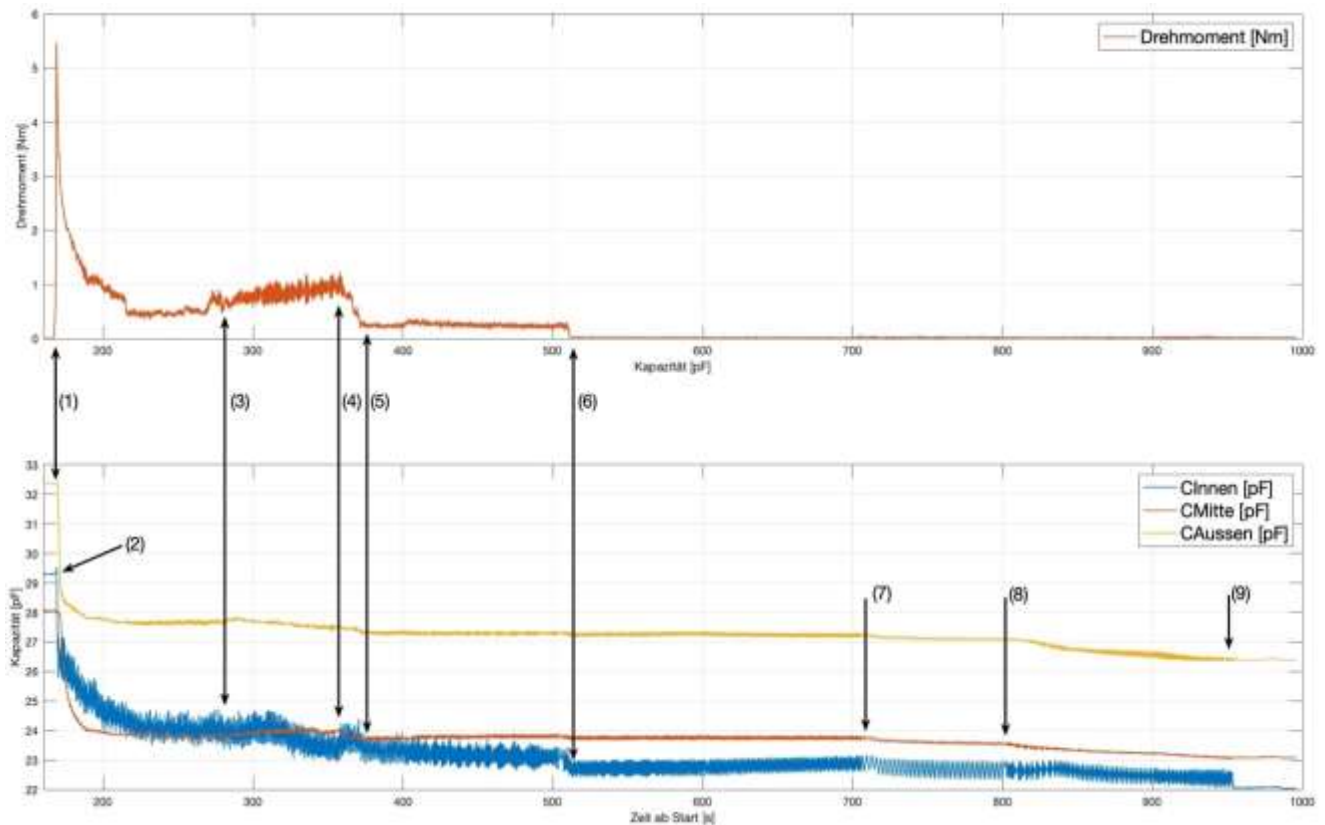


Bild 4 Messwerte für Drehmoment und Kapazitäten

Besonders markant sind folgende Vorgänge:

- (1) Start des Versuchs, Anstieg des Drehmomentes
- (2) steiles Sinken der Kapazität vermutlich infolge des Aufreißens der Schmierfettschicht und Eindringen von Luft
- (3), (4), (5) Drehmomentänderungen, synchrone Änderungen der Kapazitäten
- (6) Drehmomentänderung auf annähernd Null, weitere Kapazitätsänderungen
- (7), (8) periodische Änderungen der Kapazitäten ohne messbare Drehmomentänderung
- (9) Drehzahl 0 s^{-1} , Ende des Versuchs

3 Ausblick

Weitere Untersuchungen sollen an einer Nachbildung des waagerechten Teils der Labyrinthdichtung und an einer Kombination des waagerechten und senkrechten Teils erfolgen. Messungen mit unterschiedlichen Schmierfetten, unterschiedlichen Drehzahlen und Laufzeiten werden folgen.

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS wird derzeit eine Messvorrichtung entwickelt, mit der sich die Vorgänge im Schmierfett der Labyrinthdichtungen einer Tragrolle eines Gurtförderers während des Betriebes durch Messung der Kapazitäten untersuchen lassen. Parallel dazu werden mit dieser Messvorrichtung Dehnungsmessungen am Tragrollenmantel sowie Temperaturmessungen an verschiedenen Elementen der Tragrolle durchgeführt werden können. Die Messvorrichtung wird direkt an der Tragrolle montiert sein und während des Betriebes Messwerte in Echtzeit drahtlos übertragen.

4 Literatur

- [1] Kümmel, J.U.: FKM-Vorhaben 287 „Fettgefüllte berührungsfreie Wellendichtungen mit Fettfüllung“, FKM-Forschungsberichte / Forschungskuratorium Maschinenbau; H. 311, Frankfurt/Main: 2011
- [2] Kümmel, J.U.: Dissertation „Schmutzabdichtung mittels fettgefüllter berührungsfreier Wellendichtungen“, Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente; Heft 171, Stuttgart: 2017, ISBN 978-3-936100-72-3
- [3] Bosch, F.: Dissertation „Abdichtung trockener Stäube mit fettgefüllten berührungsfreien Wellendichtungen“, Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente; Heft 177, Stuttgart: 2018, ISBN 978-3-936100-78-5
- [4] Bürger, A., Simon, S., Henschler, S., Moosburg, K.: „Untersuchungen an fettgefüllten, berührungsfreien Labyrinthdichtungen in Tragrollen“, 29. Fachtagung Schüttgutförderertechnik 2025, Magdeburg: Universitätsbibliothek Otto-von-Guericke-Universität, 2025, S.73, ISBN: 978-3-948749-55-2, <http://dx.doi.org/10.25673/118679>
- [5] Dielektrizitätszahl-Liste, [Zugriff am 26. Mai 2025]. verfügbar unter https://www.vega.com/-/media/pdf-files/dielektrizitaetszahl-liste_de.pdf?rev=be01d5f43f94437c9de2b12c283e43e8
- [6] Datasheet „FDC1004 4-channel 16-bit capacitance-to-digital converter with active shield driver for EMC protection“, [Zugriff am: 26. Mai 2025]. verfügbar unter: <https://www.ti.com/de/lit/gpn/fdc1004>
- [7] Acar, N., Franco, J., Kuhn, E.: „On the shear-induced structural degradation of lubricating greases and associated activation energy: An experimental rheological study“, Tribology International 144, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106105>