

Erkennen von flüssigen Verunreinigungen in Wälzlagern

M. Eng., Dipl.-Ing (FH) Christoph Brückner

Dipl.-Ing. (FH) Jens Miedl

M. Eng., Dipl.-Ing (FH) Wolfgang Diller

BestSens AG

1 Einleitung

In vielen industriellen Anlagen sind Prozessflüssigkeiten zur Bearbeitung oder Verarbeitung von Materialien und Produkten nötig. Das Einsatzgebiet solcher Flüssigkeiten reicht vom einfachen Reinigen der entstandenen Produkte oder Rohmaterialien, über das Kühlen und Schmieren des Bearbeitungsprozesses, bis hin zu bearbeitenden Schritten selbst, wie Oberflächenbehandlungen oder das Ätzen von Halbleitern. Neben den Produkten treten auch Maschinenbauteile, wie Pumpen oder Antriebseinheiten, mit den Flüssigkeiten in Kontakt und müssen vor dem Eindringen selbiger geschützt werden. Besondere Auswirkungen haben die Prozessflüssigkeiten, aber auch sonstige von außen eingetragene Flüssigkeiten, im Wälzlager. Hier führen sie zum Versagen der Schmierung und des Schmierfilms. Damit erhöht sich der Verschleiß im Wälzlager, was zu einem vorzeitigen Lagerschaden und Lagerausfall führt.

Besonders in kritischen Anwendungen kann daher eine Überwachung der flüssigen Verunreinigung helfen, einen plötzlichen Ausfall der Anlage zu verhindern oder frühzeitig zu erkennen. In den meisten Fällen führt die flüssige Kontamination des Wälzlagers nicht sofort zum Ausfall des Lagers, sondern über einen Zeitraum von mehreren Tagen bis Wochen. Es ist daher möglich, bei einer frühzeitigen Erkennung der flüssigen Verunreinigungen ggf. durch vermehrte Zugabe von Schmiermittel, das Lager von der flüssigen Kontamination zu befreien oder den Tausch des Lagers oder der Baugruppe in den Wartungsplan vorzusehen und so einen plötzlichen Stillstand zu vermeiden.

2 Grundlagen

2.1 Wälzlagertechnik

In einem Wälzlager wird während des Betriebes die Elasto-Hydrodynamische Schmierung (EHD) angestrebt. Hierbei sind die beiden Wälzpartner durch einen Schmierfilm voneinander getrennt und treten nicht mehr direkt in Kontakt. [1]

Durch die Rotation der Wälzpartner wird der Schmierstoff in den Spalt zwischen Wälzkörper und Laufbahn gepresst. Dies führt zu einer starken Druckerhöhung und damit, durch die Druck-Viskositätsbeziehung, zu einer starken Erhöhung der Viskosität des Schmiermediums. Neben dem Anstieg der Viskosität werden die beteiligten Kontaktpartner elastisch verformt und es kommt zu einer der Hertzschen Pressung ähnlichen Druckverteilung, siehe Abbildung 1. Die sich hierbei ausbildende Schmierfilmdicke ist von der Geschwindigkeit der Oberflächen, der Viskosität und der Viskositätsbeziehung des Schmiermediums, der Geometrie des Schmierspalt und der Belastung des Kontaktes abhängig. [2,3]

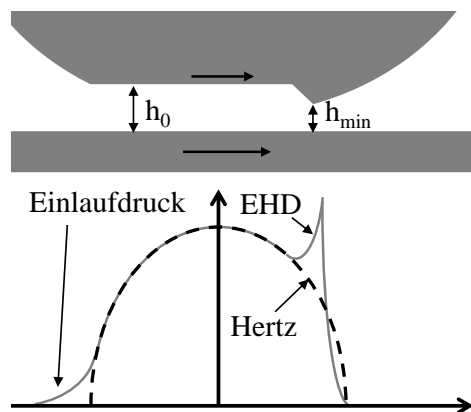


Abbildung 1: Druckverteilung und Schmierspaltgeometrie in einem EHD-Linienkontakt

Bei flüssigen Verunreinigungen treten verschiedene Schädigungsmechanismen auf, die zu einem vorzeitigen Ausfall des Wälzlagers führen. Das eintretende Fluid verändert den Aufbau des Schmierfilms je nach Art des Fluides in unterschiedlicher Weise. Mit dem Schmiermittel nicht mischbare Flüssigkeiten, wie zum Beispiel Wasser, bilden durch die ständige Überrollung eine Emulsion. Die kleinen Wassertropfen in dem Schmiermedium werden vom Wälzkörper überrollt und führen zu Druckspitzen im Schmierspalt. Daneben kann hierbei Kavitation auftreten, was die Oberflächen der beteiligten Wälzpartner schädigt. Mit dem Schmiermedium mischbare Flüssigkeiten verändern das Fließverhalten des Schmiermediums. Das Schmiermedium wird verflüssigt oder verfestigt und kann dadurch keinen tragfähigen Schmierfilm mehr aufbauen und es wird vermehrt aus der Kontaktstelle ausgetragen. All diese Verunreinigungen führen zu einem instabilen Schmierfilm mit veränderter Schmierspaltgeometrie und Druckverteilung.

2.2 Akustische Oberflächenwellen

BeMoS® (Bearing Monitoring System der BestSens AG) setzt akustische Oberflächenwellen zur Wälzlagerdiagnostik ein. Hierbei handelt es sich im speziellen um Lamb-Wellen oder Rayleigh-Lamb-Wellen (LW), welche sich in einem Substrat begrenzter Dicke, wie in einer Platte oder dem Außenring eines Wälzlagers, ausbreiten. LW sind eine Überlagerung zwischen longitudinalen und transversalen Schallwellen, welche an den Grenzflächen reflektiert und transformiert werden [4]. Dadurch entstehen verschiedene ausbreitungsfähige Moden im Substrat, dessen Geschwindigkeit vom Frequenz-Plattendicke-Produkt abhängt, siehe Abbildung 2. Daneben unterscheiden sich die verschiedenen Moden in ihrer Auslenkung an der Oberfläche in antisymmetrische und symmetrische Moden.

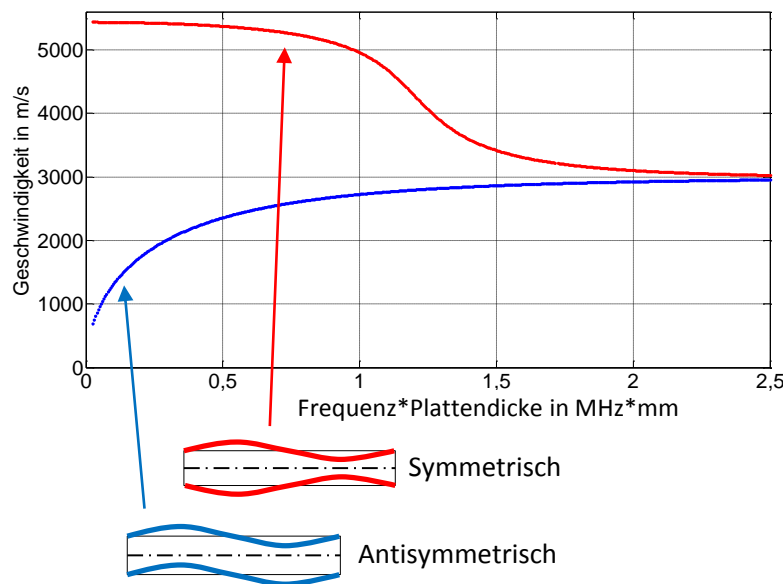


Abbildung 2: Phasengeschwindigkeit der symmetrischen und Antisymmetrischen Grundmode von Stahl

Steht eine Seite des Substrates mit einer Flüssigkeit in Kontakt, gehen Teile der Wellenenergie in die Flüssigkeit über. Es entsteht ein Mehrschichtsystem, in dem die Schallwellen jeder Schicht über die Grenzflächen miteinander wechselwirken.

Simulationen und Untersuchungen zeigen, dass eine Flüssigkeitsschicht auf der Oberfläche eines Substrats die Ausbreitung der Welle verändert. Dabei ändern sich neben den modalen Geschwindigkeiten auch die modalen Dämpfungen. Diese Veränderungen sind von vielen Parametern abhängig, wie Viskosität, Dichte, Schallgeschwindigkeit und Schichtdicke des Fluides und den elastischen und geometrischen Eigenschaften des Substrates[5].

Wird das Substrat durch eine äußere Kraft verformt, treten im Material Spannungen auf. Diese Spannungs-Dehnungs-Beziehung wird für geringe Dehnungen durch einen linearen Zusammenhang beschrieben, dem Hook'schen Gesetz. Für größer werdende Dehnungen

verliert diese Beziehung ihre Gültigkeit. Es treten nicht lineare Terme mit Elastizitätskonstanten höherer Ordnung auf.

Durch die Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung ändert sich ebenfalls die Ausbreitung der akustischen Welle im Substrat. Sie führt zu einer Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit je nach Betrag der Spannung und Richtung der Spannung zur Ausbreitungsrichtung des Schalls. Es werden die longitudinalen und transversalen Schallwellenanteile unterschiedlich beeinflusst. Damit ändern sich das gesamte Dispersionsdiagramm und die modalen Geschwindigkeiten der LW [6]. Neben den Geschwindigkeiten werden durch Spannungsübergänge noch Brechungseffekte hervorgerufen, welche die Wellenenergie dissipieren lassen.

2.3 Messen am Wälzlager

Mit dem BeMoS® werden im Außenring, durch spezielle Sender, LW erzeugt. Diese breiten sich im Außenring aus und werden vom Empfänger wieder aufgenommen, siehe Abbildung 3. Die Übertragung der akustischen Welle von Sender zu Empfänger ist abhängig von den Randbedingungen und den elastischen und geometrischen Eigenschaften des Ausbreitungssubstrates.

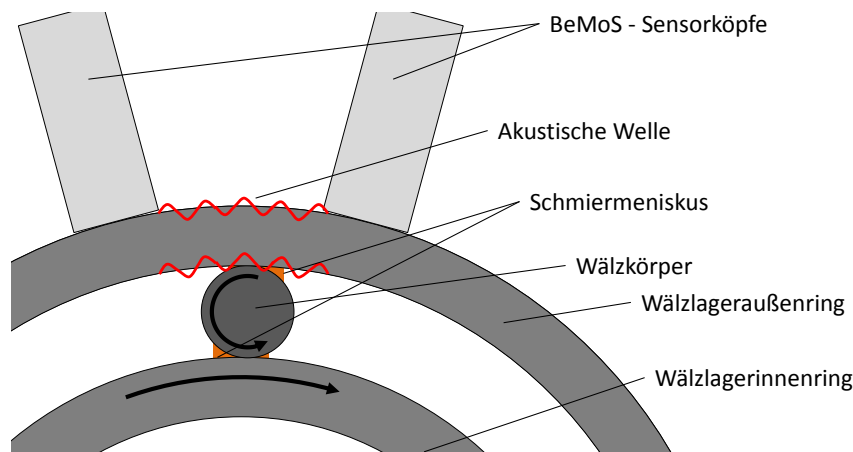


Abbildung 3: Aufbau der Übertragungstrecke und Anbringung der Sensorik am Lager

Durch die Bewegung der Wälzkörper über die Übertragungstrecke verändern sich die Randbedingungen und die akustischen Eigenschaften der Übertragungstrecke. Dabei wird durch den Wälzkörper die Flüssigkeitsschicht und Spannung im Außenring moduliert und verändert. Dies führt während der Bewegung des Wälzlagers zu einer kontinuierlichen Modulation des empfangenen Signals. Aus diesen Signalen können die Überrollfrequenz und damit die Käfigdrehzahl des Wälzlagers ermittelt werden [7,8]. Es wurde auch gezeigt, dass sich aus der Modulation Schmiermittelmenge und Belastungen am Wälzlager ableiten lassen [8,9]. Es bildet sich daneben auch bei einer kontinuierlichen Drehung und konstanter Schmierung ein Beharrungszustand aus, so dass die Modulation an allen Wälzkörpern identisch ist.

In einem Beharrungszustand entsteht ein Gleichgewichtszustand zwischen verdrängtem und zurückfließendem Öl an einem Wälzkörper. Damit befindet sich an allen Wälzkörpern die gleiche Menge an Schmiermittel und Sie rufen die gleichen Spannungen im Außenring hervor. Das Lager befindet sich in einem stabilen Schmierzustand. Diese stabile und gleichförmige Modulation macht sich auch im Frequenzspektrum bemerkbar. Es treten nur einzelne Frequenzen in Erscheinung, die mit der Überrollfrequenz in Beziehung stehen, siehe Abbildung 4a.

Tritt Wasser in das Lager ein, verhalten sich die Wälzkörper nicht mehr identisch und die Modulation unterscheidet sich von Wälzkörper zu Wälzkörper. Das Wasser verändert die Ausbildung der Kontaktzone und die Menge an Öl, welche sich an einem Wälzkörper befindet. Daneben befindet sich an jedem Wälzkörper auch eine unterschiedliche Menge Wasser, was ebenfalls die Modulation beeinflusst. Diese Veränderungen machen sich nicht nur im Zeitsignal sondern auch im entsprechenden Frequenzspektrum bemerkbar. Es treten weitere Frequenzanteile in Erscheinung, die nicht direkt mit der Überrollfrequenz in Beziehung stehen, und das Rauschniveau steigt in bestimmten Frequenzabschnitten an, siehe Abbildung 4b. Diese Variationen lassen sich in einem Parameter zusammenfassen und werden im Folgenden als Wasserparameter bezeichnet.

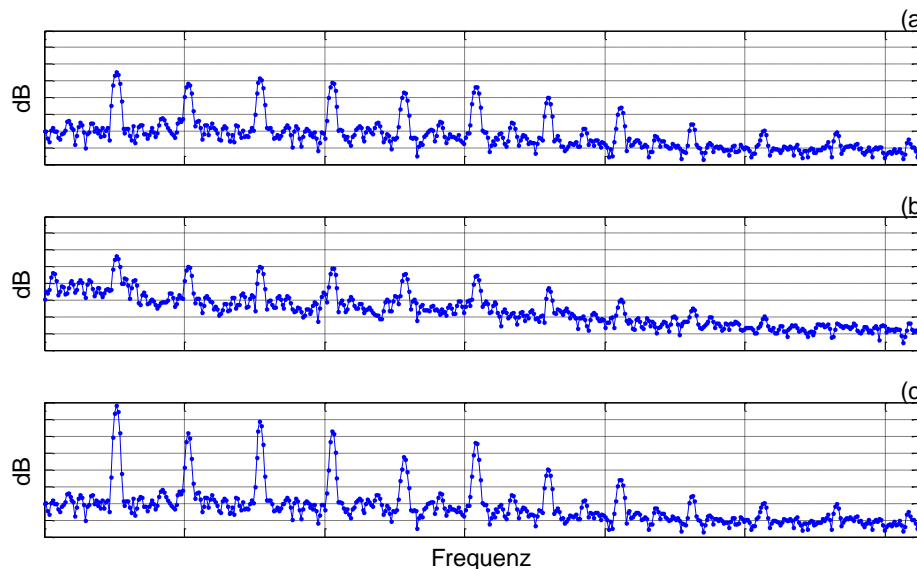


Abbildung 4: Einfluss der Verunreinigung auf die Frequenzspektren; (a) Wälzlager ohne Verunreinigung; (b) Wälzlager mit Wasser-Verunreinigung; (c) Wälzlager mit Fremdöl-Verunreinigung

Beim Eindringen von Fremdölen in die Lagerstelle ist das Verhalten ein anderes als das beim Eindringen von Wasser. Die beiden Flüssigkeiten sind mischbar. Damit werden die Eigenschaften, wie Viskosität und Dichte, des Schmiermittels geändert und es besitzt ein anderes Fließverhalten als das ursprüngliche Schmiermittel. Die Gleichgewichtslage, mit der Kontaktzone, Pressungen und dem umgebenden Schmiermedium, verschiebt sich, was die Modulation der Schallwelle beeinflusst. Hierbei treten die Veränderungen bei einzelnen

Frequenzen, die in Beziehung zur Überrollfrequenz stehen, auf, siehe Abbildung 4c. Diese Veränderung schlägt sich auf den Schmierungszustand nieder und kann damit erfasst werden.

3 Flüssige Verunreinigung im Wälzlager

3.1. Eindringen von Wasser ins Wälzlager

3.1.1. Eindringen von Wasser in ein 6306 Rillenkugellager

Es wurde ein 6306-2R2R FAG-Rillenkugellager mit einem Lithiumseifenfett untersucht. Hierbei wurden durch eine Öffnung in einer der Dichtscheiben Wasser in das Lager gegeben. Auf das Lager wirkte eine radiale Kraft von 200N. Der Versuch wurde bei einer Innenringdrehzahl von 2000 min^{-1} durchgeführt. Am Außenring des Lagers ist BeMoS® angebracht, welches die Schmierungsbedingungen im Inneren des Lagers überwacht. In Abbildung 5 ist ein schematischer Aufbau des Prüfstands abgebildet.

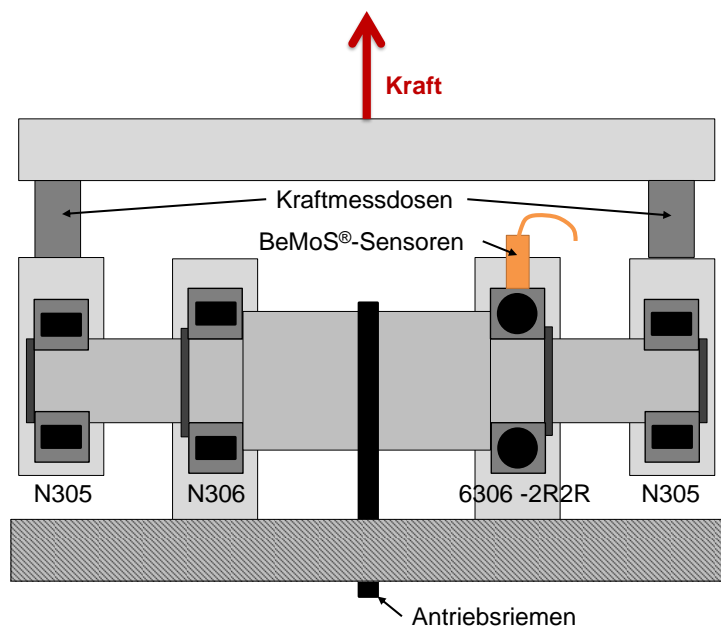


Abbildung 5: Schematischer Aufbau des Prüfstands

Zu Beginn der Messung wurde das Lager bei konstanter Drehzahl 30 Minuten in einen Beharrungszustand gebracht. Im Anschluss wurden im Abstand von ca. 15 Minuten verschiedene Mengen Wasser in das Lager eingebracht, angefangen von 0,2 ml, 0,5 ml über 1 ml bis hin zu 2,5 ml. Der zeitliche Verlauf der Messung ist in Abbildung 6 dargestellt.

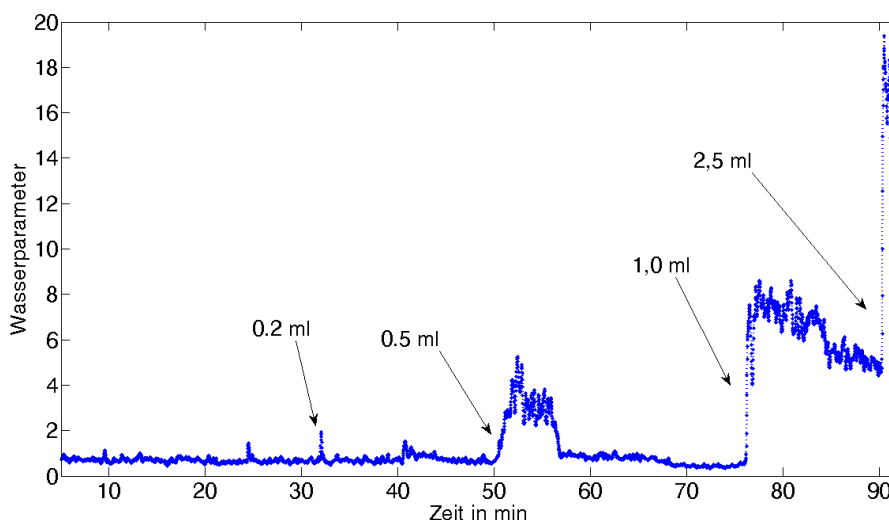


Abbildung 6: Zeitlicher Verlauf des Wassereintrags in die Lagerstelle

Es ist zu erkennen, dass mit steigender Wassermenge die Veränderung gegenüber dem Grundniveau zunimmt und damit die Kontamination mit Wasser einen stärkeren messtechnischen Einfluss auf die akustische Welle nimmt. Zudem werden die Wassermengen 0,2 ml und 0,5 ml vom Lithiumfett absorbiert und treten nach einiger Zeit nicht mehr in Erscheinung. Der messtechnische Zusammenhang für dieses Setup ist in Abbildung 7 verdeutlicht. Hierbei wurden die Anstiege für jede Wassermenge vom Grundniveau betrachtet und eine Auflösungsgrenze festgelegt, welche die maximale Schwankungsbreite ($3 \cdot \sigma$) des Grundniveaus angibt.

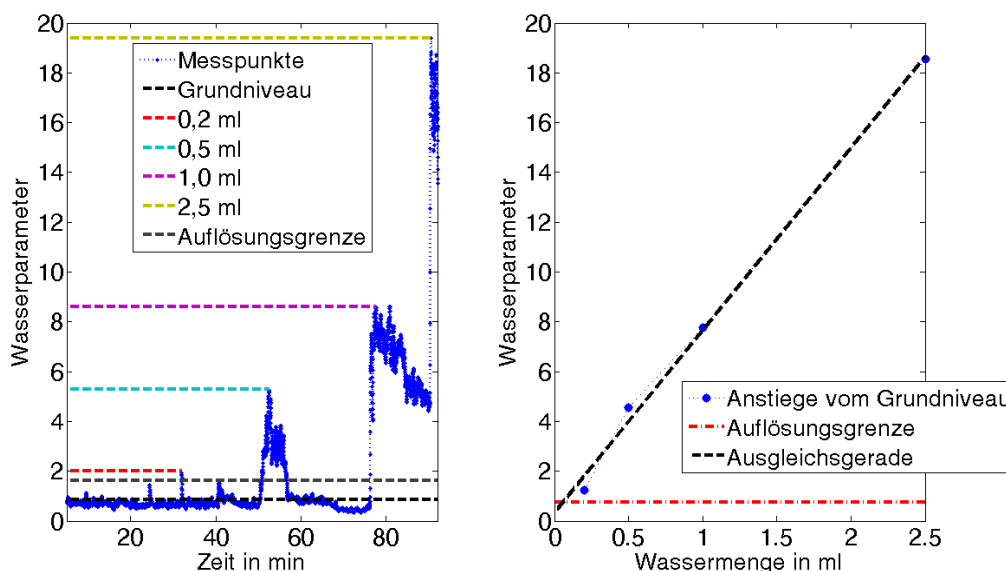


Abbildung 7: Abhängigkeit des Parameters von der Wassermenge

Es bildet sich bei diesem Setup ein linearer Zusammenhang zwischen der Wassermenge und dem Signalanstieg heraus. Damit kann nicht nur das Eindringen von Wasser festgestellt werden, sondern auch welche Menge an Wasser in das Wälzlager eingedrungen ist.

Die errechnete Auflösungsgrenze aus der Ausgleichsgeraden liegt bei diesem Setup etwa bei 0,1 ml Wasser, was ca. 1% der im Lager enthaltenen Fettmenge entspricht.

3.1.2. Eindringen von Wasser in ein Wasserpumpenlager

In Zusammenarbeit mit der Schaeffler Technologies GmbH & Co KG wurde bei einem Wasserpumpenlager WB11074 das Eindringen von Wasser auf einem Prüfstand gemessen und die Sensitivität des BeMoS® untersucht. Die Versuche wurden bei einer konstanten Wellendrehzahl von 5000 U/min durchgeführt. Auf das fettgeschmierte Prüflager wirkte eine Radialkraft von ca. 350 N ein. In Abbildung 8 ist der Messaufbau dargestellt. Die BeMoS®-Sensoren sind in die Lageraufnahme geschraubt und haben direkten Kontakt zum Lageraußenring.

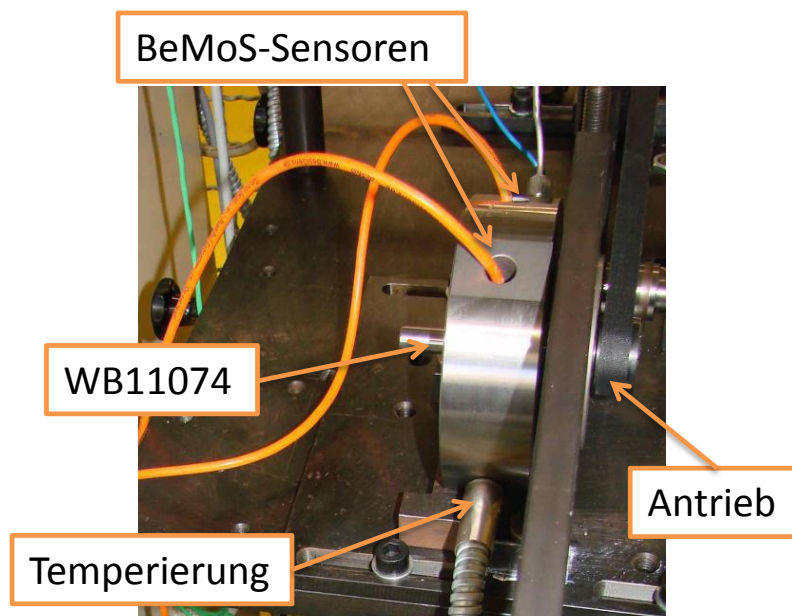


Abbildung 8: Aufbau Messsetup - Wasserpumpenlager

Ins Lager wurden, nach einer Einlaufphase, 0,1 ml Wasser eingebracht. Hierzu wurde der Motor kurz gestoppt, die Menge an Wasser ins Lager gegeben und das Prüfsetup wieder gestartet. Nach dem erneuten Anlauf des Prüflagers ist ein deutlicher Sprung und ein instabilerer Verlauf zu erkennen, siehe Abbildung 9. Dieser pendelt sich nach ca. 30 Minuten auf den Wert vor dem Wassereintrag ein. Zu diesem Zeitpunkt scheint das Wasser verteilt und vom Fett absorbiert worden zu sein.

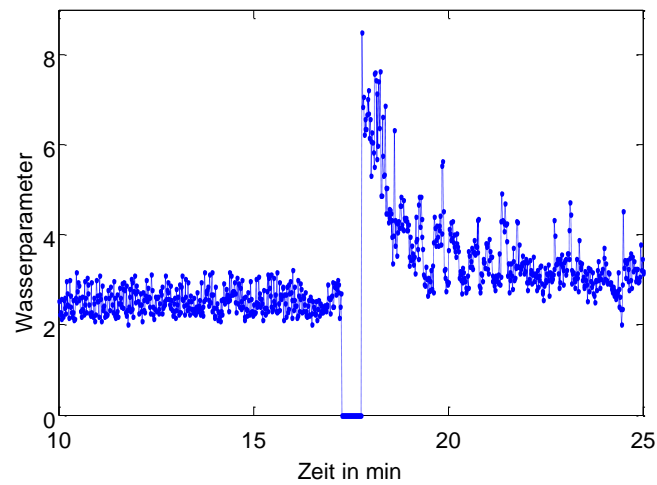


Abbildung 9: Wassereintrag von 0,1ml ins WB11074

In einem weiteren Schritt wurden verschiedene Prüfzenarien durchgeführt. So wurde der Prüfstand gestoppt, ohne Wasser ins Lager einzubringen und erneut gestartet. Dies ist in Abbildung 10 zu erkennen. In diesem Fall verändert sich im Verlauf nichts und der Graph befindet sich vor und nach dem Stopp auf dem gleichen Niveau. Erst ein erneuter Wassereintrag verändert den Verlauf sprunghaft und erzeugt einen instabilen, stark schwankenden Verlauf.

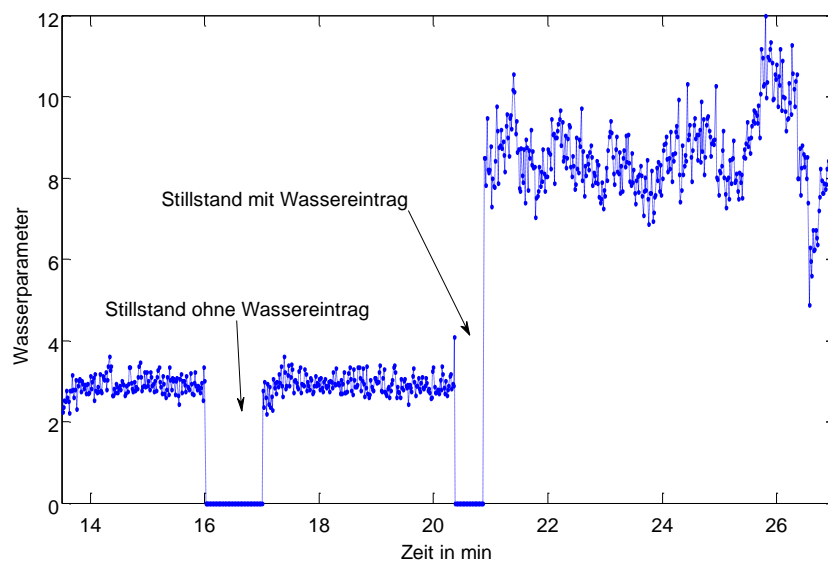


Abbildung 10: Untersuchung mit Wassereintrag und ohne Wassereintrag

Damit wurde die gewünschte Auflösungsgrenze erreicht und die Reproduzierbarkeit gezeigt. Bei der starken Änderung, wie sie durch diese geringe Wassermenge von 0,1 ml

hervorgerufen wurde, ist eine gute Trennung zwischen Wassereintrag und keinem Wassereintrag erreicht worden.

3.2. Eindringen von Fremdöl ins Wälzlager

In diesem Feldanwendungsfall handelt es sich um ein 6309-2RSD Rillenkugellager mit spezieller Hochtemperaturfettfüllung. Während des Betriebs ist es zu Ausfällen des Lagers gekommen, welche auf die Kontamination des Lagers mit einem kriechfreudigen Hochtemperaturöl zurückzuführen sind. Aufgrund dieser Problematik wurde das BeMoS® eingesetzt, um Rückschlüsse auf die Schmierung des Lagers und die Kontamination zu gewinnen.

Es wurde die in Kapitel 2.3 beschriebenen Modulationen des akustischen Signals zur Vermessung der Schmierungszustände herangezogen. Bei dem in Abbildung 11 dargestellten Indikator handelt es sich um einen gleitenden Mittelwert, der die Modulationswerte über 8 Tage mittelt. Damit stellt dieser Graf einen Langzeittrend dar.

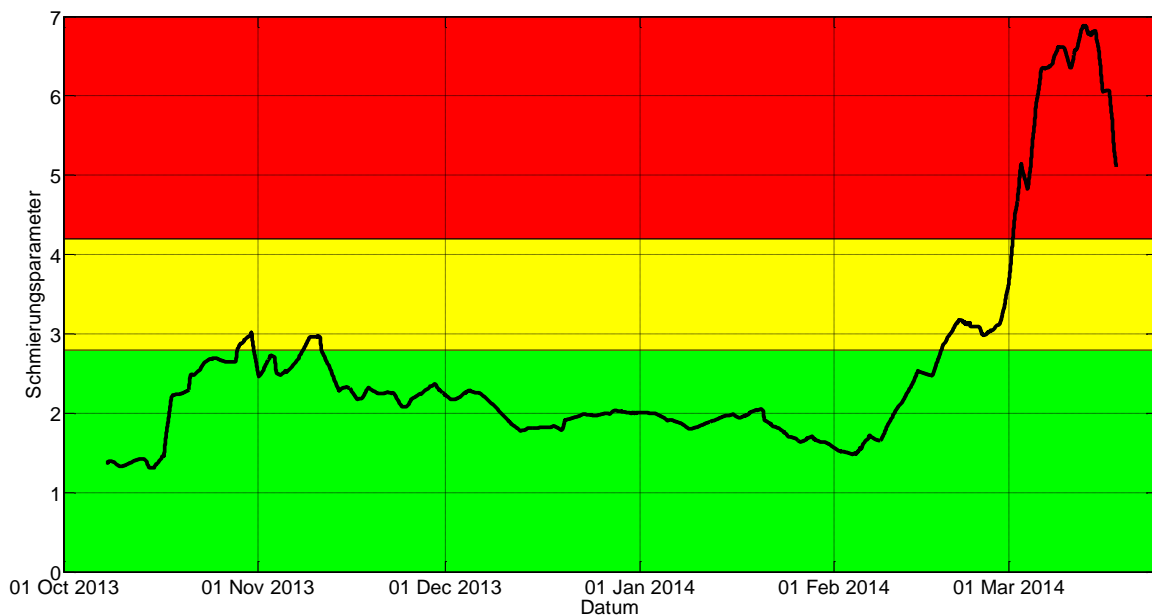


Abbildung 11: Änderung des Schmierungswertes durch Fremdöl

Es ist zu erkennen, dass der Parameter zu Beginn bei einem Wert von 1,5 startet. Im Oktober 2013 tritt zum ersten Mal eine deutliche Menge an Fremdstoff in das Lager ein, was den Parameter auf etwa 3 anhebt. Im weiteren Verlauf sinkt der Parameter kontinuierlich bis zum Februar 2014 auf das Ausgangsniveau ab. Zu diesem Zeitpunkt tritt wieder vermehrt Fremdöl in die Lagerstelle ein und der Parameterwert steigt wieder auf etwa 3 an. Anfang März steigt der Parameter deutlich auf einen Wert von 7 an, was auf einen starken Fremddöleintrag schließen lässt. Der Ausfall der Anlage fand Ende März statt. Nach Ausbau des Lagers und entfernen der Dichtscheiben, wurde festgestellt, dass das komplette Lager von dem Fremdöl

kontaminiert war. Das Fett, welches zu Beginn in die Lagerung eingebracht wurde, war nicht mehr vorhanden oder hatte sich mit dem Öl vermischt, siehe Abbildung 12.



Abbildung 12: Ausgebautes, mit Fremddöl kontaminiertes, Lager

Somit wurde das vermehrte Austreten des Fremdmediums und das Eindringen in die Lagerung bereits 3 Wochen vor dem kompletten Versagen der Anlage festgestellt.

4 Zusammenfassung

Flüssige Verunreinigungen stellen einen weitverbreiteten Schadensmechanismus in industriellen Anwendungen dar. Mit dem BeMoS® ist ein frühzeitiges Erkennen der Verunreinigung während des Prozesses realisierbar. In den hier angeführten Beispielanwendungen konnte gezeigt werden, dass der Eintrag von Wasser bei unterschiedlichsten Lagerungen deutlich zu vermessen ist und bereits kleine Mengen an Wasser in einem Wälzlager durch das System ermittelt werden können. So konnten beim Wasserpumpenlager WB11074 und beim Rillenkugellager 6306 eine Menge von 0,1 ml erkannt werden. Bei einem Eintrag von Fremddöl in die Lagerung konnte bereits 3 Wochen vor dem totalen Ausfall ein kritischer Betriebszustand erkannt werden. Diese messtechnischen Möglichkeiten bieten dem Anwender eine erhöhte Frühwarnzeit und eine Möglichkeit seinen Wartungsplan nach den aktuellen Problemstellungen auszurichten.

5 Literatur

- [1] Brändlein, Eschmann, Hasbargenm, Weigand: Die Wälzlagerpraxis, 2. Auflage, Mainz: Vereinigte Fachverlage, 2009
- [2] Wiśniewski, M.: Elsatohydrodynamische Schmierung, Renningen: expertverlag, 2000
- [3] Ramsey, G.: Elastohydrodynamics, second edition, London: Imperial College Press, 2001
- [4] Auld, B.A.: Acoustic Fields and Waves in Solids Volume I+ Volume II, second edition, Malabar: Krieger Publishing Company, 1990
- [5] Bause, F.; Brückner, C.; Miedl, J.; Henning, B.; Model based sensitivity analysis of Leaky-Lamb wave propagation to the variation of viscous lubricant properties. In: Sensor und Messsysteme, Nürnberg. 2014.
- [6] Gandhi, N.; Michaels, J.E.; Lee, S.J.: Acoustoelastic Lamb Wave Propagation in a Homogeneous, Isotropic Aluminum Plate. In: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation Volume 30; AIP Conf. Proc. 2011, S. 161-168
- [7] Brecher, C.; Fey, M.; Brückner, C.; Falker, J.: Überwachung des Betriebszustandes von Wälzlagern mittels akustischer Oberflächenwellen. In: Sensor und Messsysteme, Nürnberg. 2014.
- [8] Lindner, G.; Brückner, C.; Schmitt, M.: Online bearing lubricant sensing by mode conversion of surface acoustic waves. In: SENSOR Proc. 2011, S.55-60.
- [9] Meisenbach, L.: Blick ins Lager – Schmierungs Zustände und Lasten von Wälzlager online vermessen. In: Antriebstechnik. 2013, Nr. 11, S. 120