

Nachweis des Reibzustandes in Gleitlagern mit Hilfe der Schallemission

Burkhard ZIEGLER, Hans-Joachim SCHWALBE, FH Gießen-Friedberg, Gießen
Andrzej MISZCZAK, Maritime University, Gdynia, Polen

Kurzfassung. Die Schallemission ist ein Indikator der Lagerreibung in hydrodynamischen Gleitlagern. In Gleitlagerprüfständen werden hauptsächlich die Parameter Last, Drehzahl, Reibkraft, Öltemperatur sowie die Verlagerung der Lagerschale gemessen. Die an der Lagerbuchse gemessene und durch die Lasteinleitungsbedingungen beeinflusste Reibkraft kann im realen Einsatz ungleichförmig sein und ist üblicherweise nicht direkt messbar. Es wird mittels der Schallemissionsanalyse untersucht, welche Nachweisgrenzen zur Beschreibung des Reibzustandes bestehen. Dazu werden die Ergebnisse an verschiedenen Lagerprüfständen in Abhängigkeit der Betriebszustände bewertet.

1. Einführung

Dieser Artikel beschreibt den Einsatz der Schallemissionsanalyse als Indikator der Reibkraft in hydrodynamischen Radialgleitlagern. Die Untersuchungen wurden jeweils an den Gleitlagerprüfständen der Maritime University Gdynia (Polen) und der Fachhochschule Gießen-Friedberg durchgeführt. Das Schallemissionsequipment stellte das Tribologie – Labor der FH Gießen-Friedberg zur Verfügung. Die Kooperation wurde im Rahmen des EU TOK-FP6, MTKD-CT-2004-517228 Biobearing ausgeführt. Das Anpassen der Schallemissionsmesskette an den Gleitlagerprüfstand in Gdynia wird dargestellt. Die Experimente der beiden Lagerprüfstände werden beschrieben und deren Ergebnisse bewertet.

2. Kurze Einführung in die Schallemissionsanalyse

Schallemission (SE) ist definiert als die Erzeugung elastischer Wellen durch plötzlich freiwerdende, elastisch gespeicherte Energie, z.B. aufgrund von Materialdeformationen oder -schädigungen. Die elastischen Wellen können innerhalb des Materials oder auf dessen Oberfläche weitergeleitet werden [2,5]. Im Gegensatz zur Ultraschallprüfung, bei der Ultraschallwellen aktiv in eine Probe eingeschallt werden, empfängt die Schallemissionsanalyse (SEA) ausschließlich, die von der Schallemissionsquelle (Probe oder Bauteil) selbst generierten elastischen Wellen. Durch die Analyse der empfangenen elastischen Wellen erhält man Informationen über die Schallemissionsquelle und kann aus diesen auf deren Zustand/Qualität schließen. Der Frequenzbereich der elastischen Wellen erstreckt sich vom Infraschall- bis in den Ultraschallbereich und ist abhängig vom angeregten Volumen und von der Art der Anregung. Typischerweise wird in der SEA der Frequenzbereich zwischen 30 kHz und 2 MHz benutzt, da in diesem das Verhältnis zwischen den Nutzsignalen und den Störsignalen am günstigsten ist. Um die elastischen Wellen auf der Probenoberfläche in ein verarbeitbares elektrisches Signal zu transformieren, werden Schallemissionssensoren (SE-Sensoren) eingesetzt. In diesen SE-Sensoren wandelt eine piezoelektrische Keramik, die ankommenden mechanischen Wellen in ein korrespondierendes elektrisches Signal, entsprechend ihrer jeweiligen Übertragungs-

charakteristik, um. Die elektrischen Signale werden verstärkt und gefiltert, dann können sie erfasst und verarbeitet werden. Bei einer quantitativen Analyse werden nur die charakteristischen Kennwerte des Signals (Signalanstiegs-/ abfallzeit, die Peak-to-Peak Amplitude, die Signaldauer, die Impulsrate, die Impulssumme oder die Signalenergie) gespeichert. Die qualitative Analyse erfordert die Aufzeichnung der gesamten Signalinformationen zur späteren Analyse.

3. Flüssigkeitsreibung als Schallemissionsquelle

Die Flüssigkeitsreibung zwischen den Ölschichten innerhalb des Schmierspalt des untersuchten hydrodynamischen Radialgleitlagers ist die Energiequelle für die Erzeugung der Schallemission. In hydrodynamischen Gleitlagern rotiert die Welle exzentrisch innerhalb der Lagerbuchse. Die Pumpwirkung der rotierenden Welle befördert das Schmieröl in den Schmierspalt. Durch die Scherspannung im Öl, infolge des konvergierenden Lagerspaltes, wird der nötige Öldruck erzeugt, der die gleitenden Oberflächen vollständig voneinander trennt. Eine Drucksteigerung im Ölfilm ist nur dann möglich, wenn eine starke Haftung der ersten Molekülschichten des Öles an der ersten Kristallschicht der Welle sowie an der Buchse besteht. Die Stärke der Haftung und die Dicke dieser sogenannten Grenzschichten hängt u.a. von der Rauigkeit der jeweiligen Oberflächen (Material, R_z) sowie von den physikalischen und chemischen Eigenschaften des Öles (Viskosität, Oberflächenspannung) ab [1]. Die Welle rotiert mit $\omega > 0$, die Buchse steht still ($\omega = 0$), dadurch entsteht ein Geschwindigkeitsgefälle im Öl. Die Geschwindigkeit (u) steigt vom äußeren zum inneren Radius des Schmierspalt. Das bedeutet, dass verschiedene Ölschichten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten im Schmierspalt gleichzeitig existieren. Je größer die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen zwei Schichten ist, desto schneller stoßen die Ölmoleküle bei ihrer Passage gegeneinander. Dabei werden im Durchschnitt die Moleküle in der schnelleren Ölschicht abgebremst und die in der langsameren beschleunigt. Je kleiner die Schmierspalthöhe (h), um so häufiger stoßen die Ölmoleküle gegeneinander. Dieser Zusammenhang wird durch das Schergefälle (D) Gl. (1) ausgedrückt. Durch die Grenzschicht der Buchse ($h_{Gr, Buchse}$) sowie der Welle ($h_{Gr, Welle}$) wird die Schmierspalthöhe auf die effektive Schmierspalthöhe (h_{eff}) reduziert, siehe Gl. (2).

Schergefälle

$$D = \frac{u}{h_{eff}} \quad \begin{array}{l} u = \text{Geschwindigkeit [m/s]} \\ h_{eff} = \text{Effektive Schmierspalthöhe [m]} \\ D = \text{Schergefälle [s}^{-1}\text{]} \end{array} \quad (1)$$

Effektive Schmierspalthöhe

$$h_{eff} = h - (h_{Gr, Buchse} - h_{Gr, Welle}) \quad \begin{array}{l} h = \text{Schmierspalthöhe [m]} \\ h_{Gr, Buchse} = \text{Grenzschichthöhe der Buchse [m]} \\ h_{Gr, Welle} = \text{Grenzschichthöhe der Welle [m]} \end{array} \quad (2)$$

Durch das Anstoßen der Ölmoleküle geraten diese in Schwingung und erhöhen dadurch die innere Energie des Öles, was zu dessen Temperaturanstieg führt [4]. Gleichzeitig werden Flüssigkeitswellen angeregt, die durch das Ölvolumen wandern. Ein Teil dieser Flüssigkeitswellen wird an den Grenzflächen Öl/Buchse und Öl/Welle in mechanische Wellen umgewandelt und dort weitergeleitet. Die transformierte Wärmemenge steigt mit zunehmender Lagerbreite aufgrund der Zunahme des gescherten Ölvolumens sowie mit der Zunahme der dynamischen Viskosität (η) des Öles.

4. Eingesetzte Prüfstände

Es wurden zwei unterschiedlich konzipierte Prüfstände eingesetzt. Der Eine in Giessen zur Ermittlung der Mischreibung und zur Durchführung von Eingangsuntersuchungen und der Zweite in Gdynia zur Ermittlung der Schallemission bei unterschiedlichen Schergefällen im Schmier-spalt. Die Schallemission wurde in beiden Fällen über Welleleiter ausgekoppelt. In den Ver-suchen wurden neben der Lagertemperatur in Abhängigkeit der Betriebszustände auch die Kräfte der Belastung und die der Lagerreaktion gemessen.

4.1 Prüfstand zur Ermittlung der Mischreibung

Die Vorversuche in Giessen dienten dem Nachweis der Lagerreibung im Mischreibungsgebiet, um in weiteren Versuchen - zunächst in Gdynia durchgeführt - die zur Beschreibung des hydro-dynamischen Reibzustandes als Störung zu deklarierenden Schallemission zu identifizieren.

4.1.1 Aufbau des Prüfstandes

Der Gleitlagerprüfstand in Gießen ist modular aufgebaut, es können gleichzeitig zwei Gleitlager geprüft werden. Bild 1. zeigt ein Prüfmodul mit der zu prüfenden Lagerbuchse, die Aufhängung für die Lasteinleitung, die Dehnungsmessstreifen (DMS) zur Messung des Drehmoments, den Bohrungen zur Aufnahme des Wellenleiters für die SE-Messung sowie dem Anschluss der Schmierölversorgung. Die Temperatur wird mittels eines Pyrometers im Auslaufbereich der Welle bestimmt. Die einzelnen Module sind durch den Einsatz von Pertinax® -Streifen akustisch vom restlichen Prüfstand isoliert.

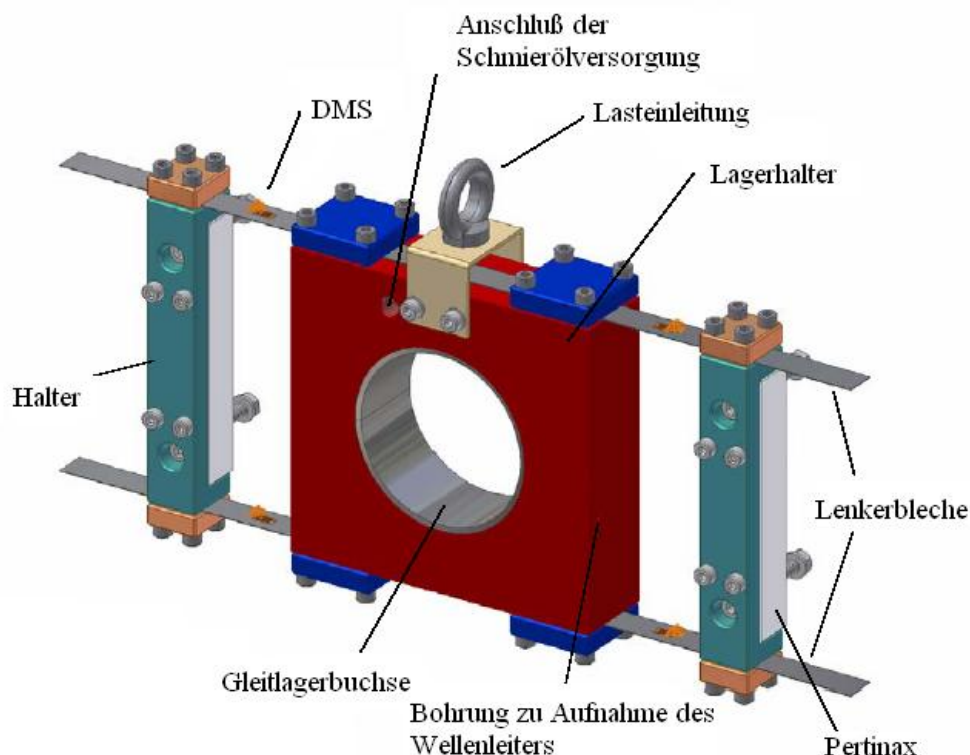


Bild 1. Ein Prüfmodul des Gleitlagerprüfstandes der FH Giessen-Friedberg.

4.1.2 Durchführung der Vorversuche

Zur Voruntersuchung der Materialeigenschaften der Reibpartner wurden die Beanspruchungen des Tribosystems hinsichtlich Lastabtrag, Schmierfilmaufbau (Lagerspiel = 5mm) und Schmierölversorgung (Mangelschmierung) verschärft. Die Gleitgeschwindigkeit betrug $1,73 \text{ m/s}$ ($n=700 \text{ min}^{-1}$). Die Temperatur betrug zu Prüfbeginn 30°C und stieg während des Versuchs innerhalb einer Stunde auf 50°C . Zur Bewertung des Verschleißablaufs wurde der RMS-Wert der SE, wie Bild 2 verdeutlicht, ermittelt. Bei der Mangelschmierung treten Schädigungen der Lauffläche bereits vor Versuchsende auf (Kantenträger im Randbereich Bild 3a, Abrasion Bild 3b links, und Pittingbildung Bild 3 b rechts).

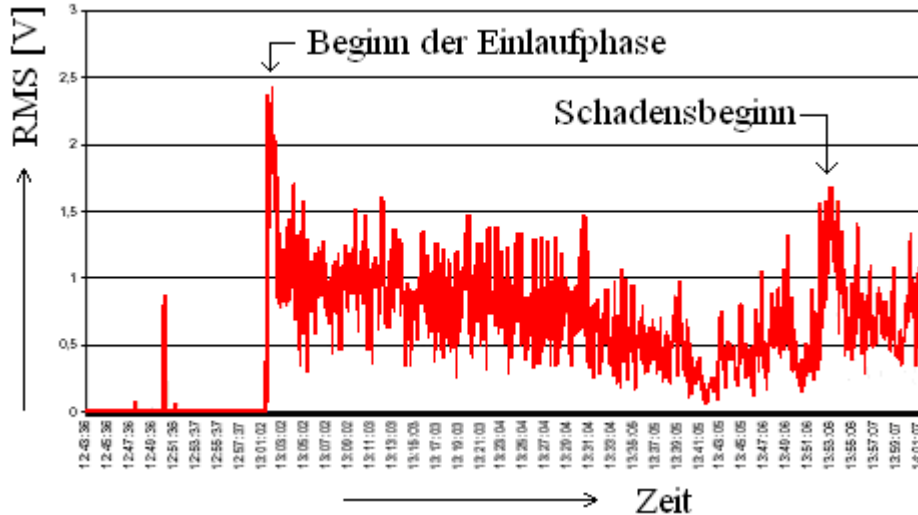


Bild 2. RMS-Wert der SE über einer Versuchszeit von einer Stunde



Bild 3a. Lagerschale mit Kantenträger

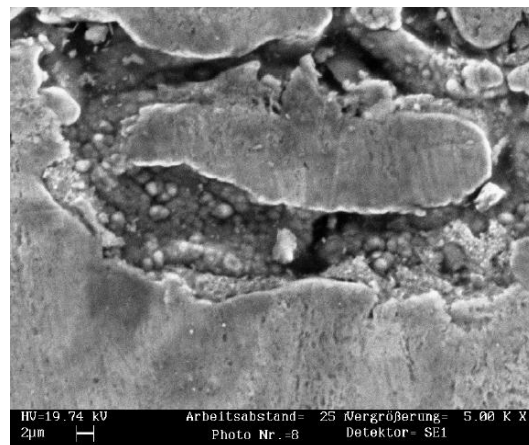
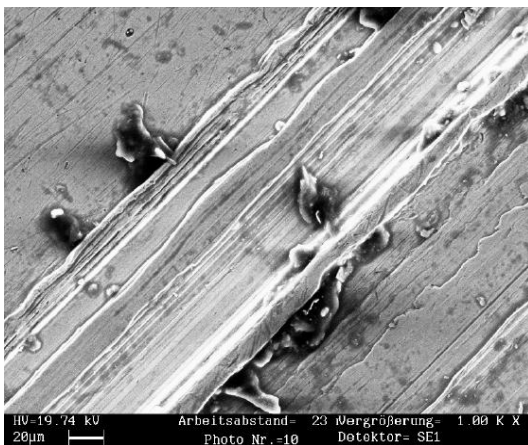


Bild 3b. Lagerschale mit Abrasion (Bild li.) sowie Pittingbildung (Bild re.) infolge Mischreibung

4.1.3. Ergebnis der Untersuchung

Eine Korrelation zwischen dem RMS-Wert der SE und den Betriebsbedingungen des Gleitlagers sind unter Mischreibungsbedingungen nicht zu erkennen. Diese Versuche sind jedoch notwendig zur Erkennung der Störgeräusche bei der Untersuchung der hydrodynamischen Betriebszustände mittels der Schallemissionsanalyse.

4.2 Prüfstand zur Ermittlung der hydrodynamischen Reibung

Dient zur Untersuchung der Schallemission in Abhängigkeit des Schergefälles.

4.2.1 Aufbau des Prüfstandes

Die Welle (Messing MO 58, Durchmesser = 99,93 mm) des Prüfstandes in Gdynia lief in einer Mehrschicht - Buchse mit einem Innendurchmesser von 100.21 mm und einer Breite von 80 mm, die ihrerseits in einem Lagergehäuse abgestützt war. Die einstellbare Lagerlast beeinflusst neben der Drehzahl die horizontale und vertikale Verlagerung der Buchse, die durch Wegsensoren gemessen wird. Die Reibkraft wird über die Rückstellkraft der Buchse mittels eines Kraftsensors aufgenommen. Die Temperatur des Lagerrückens sowie die Temperatur des zugeführten Schmieröls wurde jeweils durch einen PT 100 Sensor gemessen. Ein Vielstellenmessgerät diente zur Auswertung und Spannungsversorgung der vorgenannten Sensoren. Das Schmieröl wurde im Kreislauf über ein Vorratsbecken mit Temperaturkonditionierung durch das Schmierloch in den Lagerspalt gepumpt. Der Öldruck konnte per Hand auf einen konstanten Überdruck von 1 bar eingestellt werden. Es wurde das Motoröl „ LOTOS Mineralny SAE 15W-40“ verwendet.

4.2.2 Beschreibung der Anpassungen für die Schallemissionsmessung

Der Wellenleiter wurde auf der Lagerbuchse im Bereich des engsten Lagerspaltes verklebt. Er hat keine weitere Berührung zum Prüfstand und zum, aus dem Lagerspalt austretenden, Öl. Die Resonanzfrequenz des SE-Sensors betrug 150kHz. Die elektrischen Signale des SE-Sensors wurden in einen SE-Messverstärker mit kombiniertem Bandpass 50 bis 300kHz geleitet, um sie zu verstärken und um Störsignale herauszufiltern. Der RMS-Wert des verstärkten und gefilterten SE-Signals wurde mit einem Root-Mean-Square Chip erfasst. Das Messwerterfassungssystem wurde elektrisch abgeschirmt. Das Oszilloskop sowie das Vielstellenmessgerät wurden über ihre seriellen Schnittstellen mit einem PC verbunden, der mittels einer speziell entwickelten Software, die Messdatenverarbeitung und -speicherung steuerte. Bild 4 zeigt den Signalfluss von der Schallquelle bis zur Signalverarbeitung.

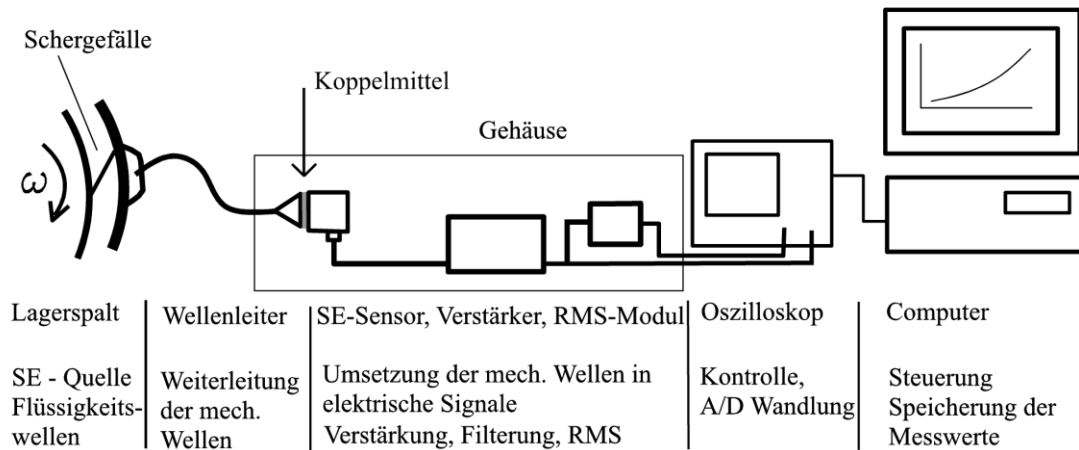


Bild 4. Schema des Signalflusses der Schallemission

4.2.3 Beschreibung des Versuchsablaufes

Zur Inbetriebnahme des Prüfstandes wurde zuerst das Schmieröl im Vorratsbecken aufgewärmt und anschließend in den Prüfstand gepumpt. Bei mittlerer Drehzahl und Belastung wurde der Prüfstand auf eine konstante Betriebstemperatur gebracht. Drei unterschiedliche Lagerlasten (1000,6 N; 804,5 N; 608,2 N) bei denen die Wellendrehzahl von 2590 min^{-1} in 10 Stufen auf 268 min^{-1} reduziert wurden, ergaben insgesamt 30 Betriebspunkte. Die Lagerrückentemperatur lag bei $\pm 80^\circ\text{C}$ und die Öltemperatur bei $\pm 69^\circ\text{C}$.

4.2.4. Ergebnis der Untersuchung

Physikalisch stellt der gemessene RMS-Wert eine Leistung und die Reibkraft eine Kraft dar. Um beide vergleichen zu können, wurde die Reibkraft mit dem entsprechenden Hebelarm sowie der jeweiligen Winkelgeschwindigkeit der Welle multipliziert, so dass sich die Reibleistung ergab. Die Bilder 5a bis 5c zeigen den Verlauf der RMS-Werte und der Reibleistung bei den jeweils konstanten Lagerbelastungen aufgetragen über den Winkelgeschwindigkeiten der gefahrenen Messreihen. Die Reibleistungskurven zeigen einen stetigeren Verlauf als die Kurven der RMS-Werte. Dies ist erklärbar durch die Trägheit der Massen und der Art der Lasteinleitung. Die Kurven beider Messmethoden zeigen identische tendenzielle Verläufe. Eine deutliche Abweichung zwischen den RMS-Werten und der Reibleistung ist im Bild 5c bei den beiden höchsten Messpunkten zu erkennen, dort ist ein Abfall der Schallemission trotz Zunahme der Lagerdrehzahl festzustellen.

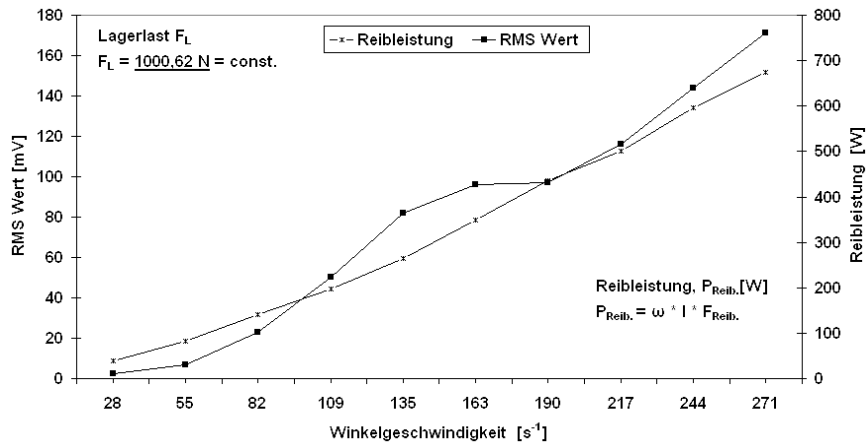


Bild 5a. Vergleich des RMS-Wertes und der Reibleistung bei einer Lagerlast von 1000,62 N

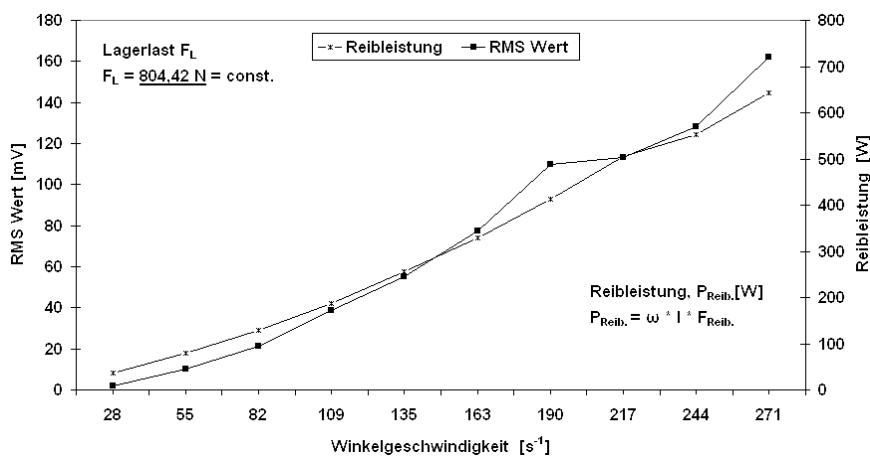


Bild 5b. Vergleich des RMS-Wertes und der Reibleistung bei einer Lagerlast von 804,42 N

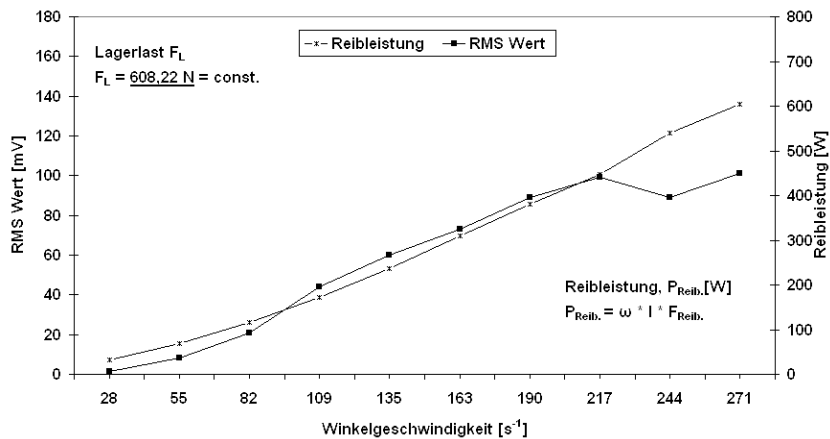


Bild 5c. Vergleich des RMS-Wertes und der Reibleistung bei einer Lagerlast von 608,22 N

Um die Ergebnisse der Messreihen mit verschiedenen Lagerbelastungen vergleichen zu können, ist es sinnvoll, sie auf gleiche hydrodynamische Belastungen im Gleitlager zu beziehen. Die Sommerfeldzahl (So) Gl. (3) repräsentiert diese hydrodynamische Lagerbelastung [3,6].

Sommerfeldzahl

$$So = \frac{\bar{p} * \psi^2}{\eta * \omega} \quad (3)$$

p = mittlerer Lagerdruck [Pa]
 ψ = relativer Lagerdurchmesser [-]
 η = dynamische Viskosität [Pa s]
 ω = Winkelgeschwindigkeit [s⁻¹]

Die in die Sommerfeldzahl eingehende dynamische Viskosität (η) des Öls ist stark abhängig von dessen Temperatur. Aus der gemessenen Lagerrückentemperatur kann nicht direkt auf die Öltemperatur geschlossen werden, somit erhält man keine genauen Viskositätswerte. Da aber die Messungen in jedem Betriebspunkt mit der gleichen Lagerrückentemperatur und der gleichen Öltemperatur durchgeführt wurden, ist davon auszugehen, dass auch die Viskosität des Schmieröls jeweils gleich ist. Betrachtet man das Produkt aus Sommerfeldzahl und dynamischer Viskosität, die beliebig mit eins festgelegt wird, erkennt man, wie in Bild 6 ersichtlich, unterschiedliche Betriebsbereiche. Durch die dadurch gegebene Vergleichbarkeit der Messreihen ist zu erkennen, dass es drei unterschiedliche Betriebsbereiche des Gleitlagers gab.

Im Bereich A) tritt nur Flüssigkeitsreibung auf (mittlere bis maximale hydrodynamische Lagerbelastung, mittlere bis minimale Winkelgeschwindigkeit).

Der Bereich B) zeichnet sich durch Flüssigkeitsreibung und überlagerter Festkörperreibung hervorgerufen durch das Anstreifen der Buchse an der Welle (mittlere bis kleine hydrodynamische Lagerbelastung , hohe Winkelgeschwindigkeit) aus. Durch das Anstreifen erhöht sich die Reibung im Lager, was zu einem zusätzlichen Anstieg der Schallemission führt.

Der Bereich C) weist die geringste hydrodynamische Lagerbelastung und höchste Winkelgeschwindigkeit auf. Hier ist die hydrodynamische Belastung so gering, dass die Buchse eine sehr kleine Exzentrizität gegenüber der Welle aufweist. Dies führt zu einem großen effektiven Lagerspalt mit niedrigem Schergefälle und damit letztlich zu geringerer Schallemission.

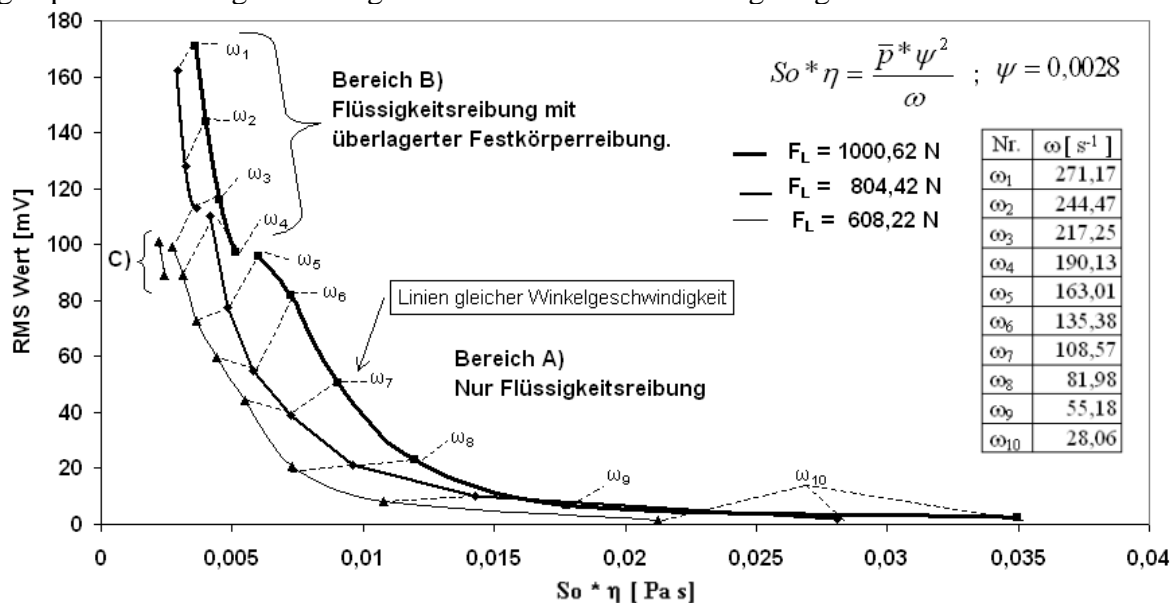


Bild 6. Vergleich der RMS-Werte der Messreihen mit den unterschiedlichen Lagerlasten (F_L) aufgetragen über den jeweils gleichen relativen hydrodynamischen Lagerbelastungen ($So * \eta$). Im Bereich A) besteht ausschließlich Flüssigkeitsreibung, der RMS-Wert der SE entspricht dem sich einstellenden Schergefälle im Lagerspalt. Im Bereich B) besteht Flüssigkeitsreibung mit überlagerter Festkörperreibung, die zu zusätzlicher Schallemission führt. Im Bereich C) besteht Flüssigkeitsreibung, dort ist aufgrund der hohen Winkelgeschwindigkeit und der geringsten hydrodynamischen Lagerbelastung, die Exzentrizität der Buchse im Bezug auf die Welle am geringsten. Dies führt zu einem großen effektiven Lagerspalt mit niedrigem Schergefälle und damit letztlich zu geringerer Schallemission

5. Zusammenfassung

An zwei konstruktiv unterschiedlichen Gleitlagerprüfständen wurde der Nachweis erbracht, dass sowohl Mischreibung, als auch der Reibzustand in Abhängigkeit der Schmierpalthe, eindeutig mit Hilfe der SEA beschrieben werden kann. Die SE des Festkörperkontakts bei Mischreibung unterscheidet sich prinzipiell von der der Flüssigkeitsreibung. Es ist keine eindeutige

Abhängigkeit vom Schmierstoff und Oberflächenzustand zu erkennen. Bei alleiniger hydrodynamischer Reibung hingegen sind eindeutige Abhängigkeiten vom Schergefälle (Funktion von Gleitgeschwindigkeit und effektiver Spalthöhe) beschreibbar.

Referenzen

- [1] Czichos, H., Habig, K.-H., *Tribologie - Handbuch Reibung und Verschleiß*, ISBN 3-528-16354-2, Auflage 2003, Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden.
- [2] Eisenblätter, Schwalbe et al., *Einführung in die Schallemissionsanalyse*, Battelle Institut Ffm
- [3] Grothe, K. H., Feldhusen, J., *DUBBEL Taschenbuch für den Maschinenbau*, ISBN 3-540-22142-521. Auflage, 2005, Springer Berlin Heidelberg New York.
- [4] <http://galileo.phys.virginia.edu/classes/152.mf1i.spring02/Viscosity.pdf>
- [5] Krautkrämer, J., Krautkrämer, H., *Ultrasonic Testing of Materials*, ISBN 3-540-51231-4, translation of the 5th Revised German Edition. Auflage 1990, Springer Berlin, Heidelberg.
- [6] Muhs, D., Wittel, H, Jannasch, D., Voßiek, J., *Roloff / Matek Maschinenelemente*, ISBN 3-528-17028, Auflage Mai 2005, Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden.