

# Korrelation der über das Schmieröl ausgekoppelten Schallemission mit der Lagerbelastung in einem hydrodynamischen Gleitlager

Burkhard ZIEGLER  
THM Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen  
Wiesenstr. 14, 35390 Gießen  
Burkhard.Ziegler@me.thm.de

**Kurzfassung.** Hydrodynamische Gleitlager bauen den Druck im Schmieröl, der zur Trennung der Oberflächen von Welle und Buchse nötig ist, selbstständig auf. Während des Betriebs stellt sich eine charakteristische Druckverteilung im Schmierspalt ein, die von verschiedenen Parametern abhängig ist. Integral gemessene Schallemission (SE) ist ein Indikator für die hydrodynamische Lagerbelastung und die verschiedenen Betriebsmodi der Gleitlager. Der SE-Sensor wird dazu entweder direkt oder über einen Festkörper-Wellenleiter (z.B. Draht) an die Buchse gekoppelt.

In dieser Untersuchung wird die Schallemission über eine Fluid (Schmieröl) zum SE-Sensor geleitet.

Dazu kommt ein Gleitlager, dessen Buchse mit Druckmessbohrungen an den für dessen Funktion signifikanten Positionen versehen ist, zum Einsatz. Die statischen Drücke im Schmieröl werden über Schläuche zu einem Röhrenmanometer geleitet und sind dort als Druckhöhenverteilung sichtbar.

Für die Messungen wird ein handelsüblicher SE-Sensor verwendet, der dazu in einem speziell konstruierten Gehäuse positioniert wird. Das mittels Rapid-Prototyping gefertigte Gehäuse ermöglicht es, die SE-Wellen zum Sensor zu leiten und gleichzeitig die Druckmessfunktion zu erhalten.

Die Ergebnisse der Korrelation von Schallemission und den unterschiedlichen Betriebszuständen des Gleitlagers werden vorgestellt.

## 1. Einleitung

Motivation für diese Untersuchung war der Wunsch, Studierenden des Maschinenbaus im Rahmen einer Projektarbeit die Schallemissionsmesstechnik näher zu bringen. Ein vorhandener hydrodynamischer Gleitlagerprüfstand sollte dazu mit Standard SE-Messketten instrumentiert werden, um die durch Flüssigkeitsreibung im Schmieröl generierte SE zu erfassen. Die verwendeten Geräte durften dabei ihre Funktionalität nicht verlieren, da sie weiterhin für Praktika zur Verfügung stehen sollten. Die Auskoppelung der SE-Wellen aus dem Schmieröl durch das Anbringen eines SE-Sensors auf der Buchsenoberfläche scheiterte wegen Platzmangels. Das Einsetzen von Festkörperwellenleitern hätte wiederum eine nicht zulässige Veränderung der Gleitlagerbuchse nach sich gezogen. Speziell konstruierte Gehäuse zur Aufnahme der SE-Sensoren und zur Auskoppelung der Reibungssignale aus dem Schmieröl waren die Lösung.



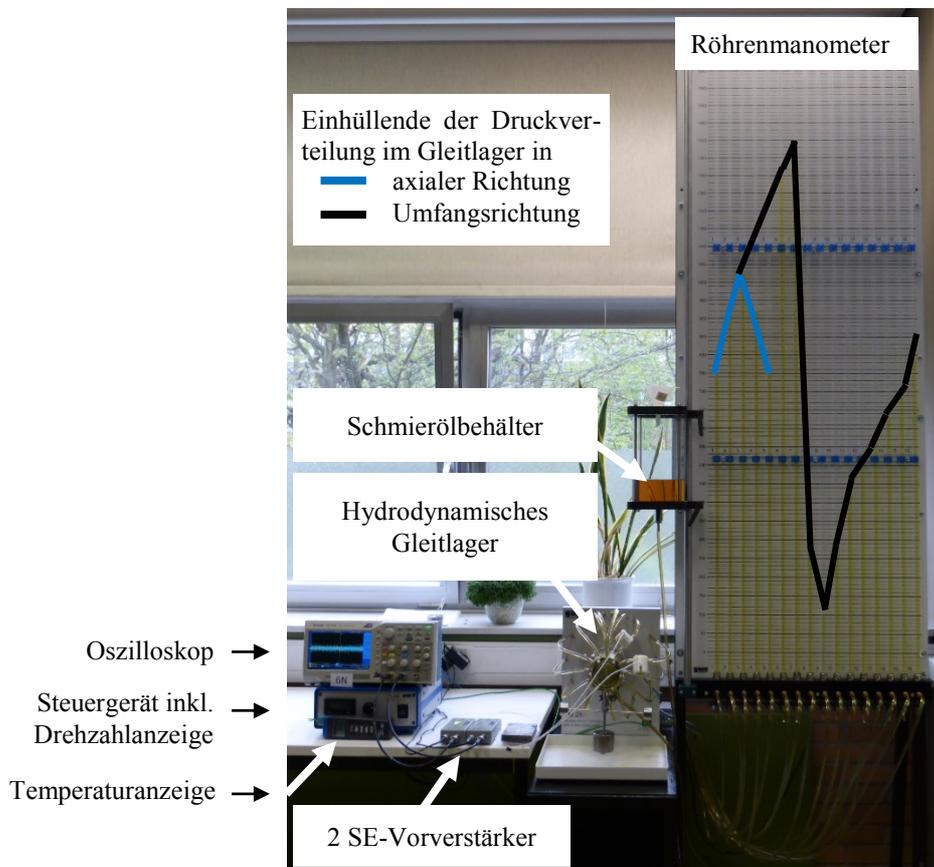
## 2. Experimentelles

### 2.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau lässt sich in die drei Teilbereiche Gleitlagerprüfstand, Schallemissions-equipment und Adaptergehäuse gliedern, die nachfolgend beschrieben werden.

#### 2.1.1 Hydrodynamischer Gleitlagerprüfstand

Verwendet wurde ein hydrodynamischer Gleitlagerprüfstand (Fa. GUNT, Typ: TM280d). Dieser Prüfstand wurde speziell für die Lehre entwickelt und verfügt daher über ein Röhrenmanometer zur Darstellung der Schmieröldruckverteilung, die sich in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Betriebsbedingungen einstellt, siehe Abb. 1.



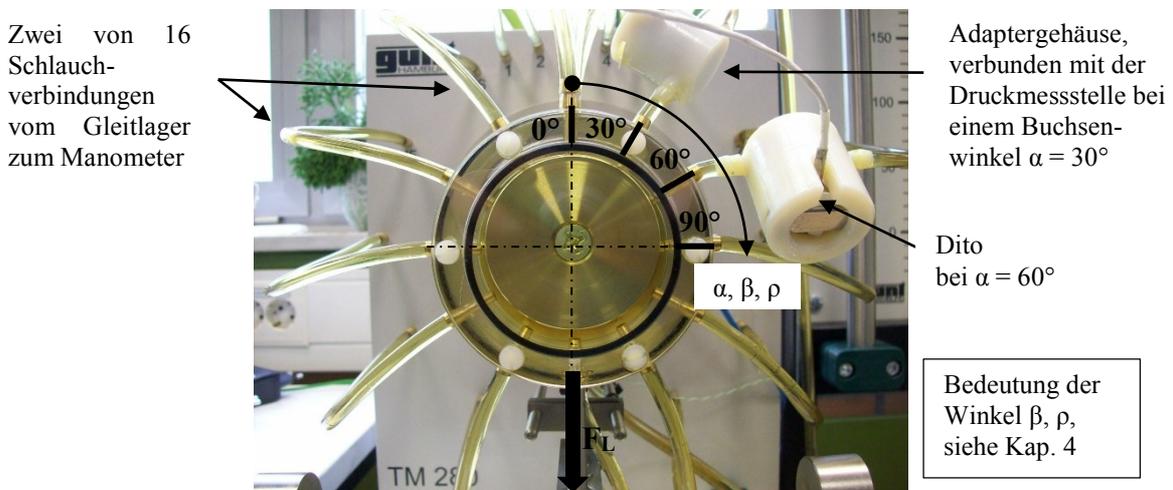
**Abb. 1.** Verwendeter Prüfstands-aufbau und eingezeichnete Einhüllende einer Druckverteilung

Das vollumfassende Gleitlager besteht aus einer, direkt durch einen Elektromotor angetriebenen, Welle ( $d_w = 51\text{mm}$ ) sowie einer Buchse aus transparentem Kunststoff ( $d_B = 55\text{mm}$ , Breite  $B = 75\text{mm}$ ). Die Maße sind aus der Bedienungsanleitung entnommen [1]. Über die Genauigkeit der Maße und ob diese im betriebswarmen Zustand aufgenommen wurden, liegen keine Angaben vor. Im Stillstand des Lagers kommt es zu einer idealisierten Linienberührung zwischen der Innenseite der Buchse und der Wellenoberfläche, dort hat der Buchsenwinkel  $\alpha$  seinen Nullpunkt (Wirkungslinie der Lagerlast  $F_L$ ), siehe Abb. 2. In halber Breite der Gleitlagerbuchse sind, über den Umfang gleichmäßig verteilt, 12 Bohrungen angebracht, mit denen der jeweilige statische Druck im Schmieröl über den Umfang des Lagers gemessen werden kann. Bei  $\alpha = 0^\circ$  befinden sich ebenfalls Bohrungen in axialer Richtung, mit diesen

lässt sich die Druckverteilung über die Breite des Lagers messen, siehe Abb.1 und Abb.2. Die Buchse ist, innerhalb der durch den Lagerspalt festgesetzten Grenzen, achsparallel frei beweglich. Die Lagerlast kann durch „Gewichte“ zwischen ( $11,7\text{N} \leq F_L \leq 16,7\text{N}$ ) variiert werden. Die aufgrund der Fluidreibung auftretende Verdrehung der Lagerbuchse kann durch verschiebbare Gewichte kompensiert werden. Die insgesamt 16 Druckmessstellen sind durch Schläuche jeweils mit einer Messröhre des Röhrenmanometers verbunden, die den Druck in der Einheit mmÖl anzeigen. Der Vorratsbehälter für das Schmieröl ist vertikal verschiebbar, die Auswirkungen auf den statischen Druck im Gleitlager sind zu beachten. Die Schmieröltemperatur wird über ein Thermoelement gemessen und digital angezeigt. Als Schmiermittel dient ein Hydrauliköl der Viskositätsklasse HLP 32. Der Elektromotor wird durch ein Steuergerät mit elektrischer Energie versorgt, der mögliche Drehzahlbereich liegt zwischen 0 und  $3000\text{min}^{-1}$ , es ist sowohl „Links-“ als auch „Rechtslauf“ der Gleitlagerwelle möglich. Im Steuergerät integriert ist auch die digitale Anzeige für die Wellendrehzahl.

### 2.1.2 Schallemissionsequipment

Es kamen zwei identische Messketten der Firma Mistras zu Einsatz. Jede Messkette bestand jeweils aus einem SE-Sensor (Typ R6D), der in einem Adaptergehäuse positioniert war, siehe Abb. 2 und 3. Elektrisch waren sie mit den Vorverstärkern (Typ 2/4/6 C, 60dB, 30-700kHz) verbunden. Die Signale der Verstärker wurden in einem zweikanaligen, digitalen Oszilloskop (Fa. Tektronics TBS 1072B, vertikal 50mV/Div., horizontal 50ms/Div.) angezeigt und verarbeitet. Die vom Oszilloskop berechneten RMS-Werte wurden in jedem Betriebspunkt über eine Messdauer von 10s gemittelt und ihre Standardabweichung bestimmt.

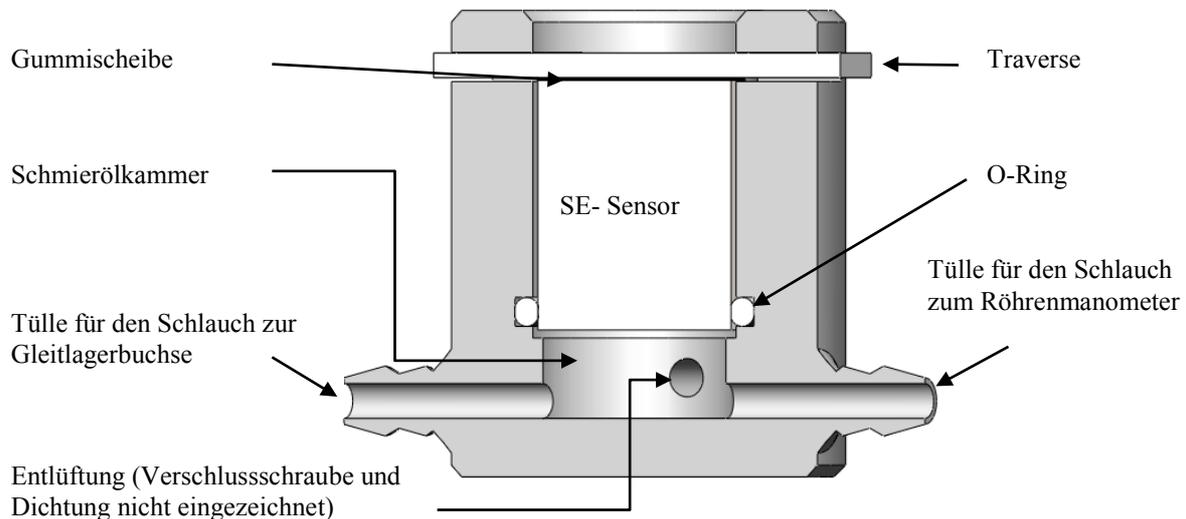


**Abb. 2.** Gleitlager (Stillstand), Ausleitung der SE-Wellen und Lage der buchsenfesten Winkel  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\rho$

### 2.1.3 Adaptergehäuse

Die Ausleitung der SE-Wellen aus dem Schmieröl zu den SE-Sensoren wurde durch speziell konstruierte Adaptergehäuse vorgenommen, siehe Abb. 3. Die mittels Rapid-Prototyping gedruckten Gehäuse bestehen aus dem Material VeroWhite der Fa. Stratosys. Nach dem einmaligen Auftrennen der originalen Schlauchverbindung in der Nähe der Gleitlagerbuchse, siehe Abb. 2, werden die beiden Teilstücke über die angeformten Schlauchtüllen des Adaptergehäuses geschoben. Aufgrund der Konstruktion des Adaptergehäuses kommt nur die sensitive Fläche des SE-Sensors mit dem Schmieröl in Verbindung. Der in der umlaufenden Nut des Gehäuses positionierte O-Ring sorgt sowohl für die Abdichtung

zwischen Sensor und Gehäuse als auch für die konzentrische Positionierung des SE-Sensors. Der Überdruck im Schmieröl generiert auf der Stirnfläche des SE-Sensors eine Kraft, die von der Traverse kompensiert wird und damit ein Herausdrücken des Sensors verhindert. Zwischen der Traverse und dem SE-Sensor ist eine dünne Scheibe aus Gummi positioniert, sie dient der Reduzierung evtl. auftretender Reibung aufgrund von Relativbewegungen zwischen Sensor und Adaptergehäuse.



**Abb. 3.** Schnitt durch ein Adaptergehäuse inkl. eingebautem SE-Sensor, aus [2] mit Ergänzungen

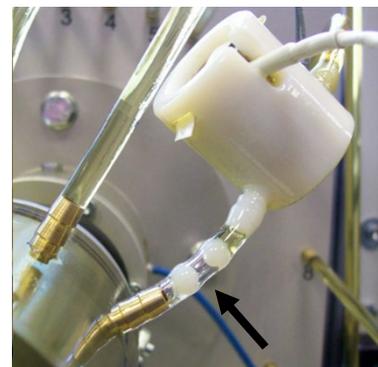
Luftblasen in der Schmierölkammer würden die Weiterleitung der SE-Wellen zum Sensor erheblich verschlechtern. Durch das teilweise Herausdrehen der Entlüftungsschraube können evtl. vorhandene Luftblasen entweichen.

## 2.2 Versuchsdurchführung

### 2.2.1 Optimale Messposition und Störungseingrenzung

Aus vorangegangenen Untersuchungen [5] hat sich der Winkelbereich in dem sich der maximale Schmieröldruck aufbaut als der herauskristallisiert, in dem auch die stärkste SE gemessen werden kann. Diese und die Rasterung der Druckmessstellen in Umfangsrichtung führte zwangsläufig zu den Messpositionen bei  $\alpha = 30^\circ$  und  $\alpha = 60^\circ$ .

Der Nachweis, dass die im Gleitlager generierten SE-Wellen ausschließlich durch das Schmieröl zum SE-Sensor geleitet werden, wurde nach Meinung des Verfassers durch folgenden Versuch erbracht. Die Verbindung zwischen Gleitlagerbuchse und Adaptergehäuse wurde durch einen Schlauch hergestellt, in dem durch zwei Kunststoffkugeln der Ölfaden im Schlauch unterbrochen wurde. Der durch die Kugeln abgetrennte Zwischenraum beinhaltete demzufolge nur Luft, siehe Pfeil in Abb. 4. Die mit diesem Versuchsaufbau gemessenen RMS-Werte lagen bei allen Betriebspunkte nur im Bereich des Grundrauschens von ca. 5mV.



**Abb. 4.** Unterbrochener Ölfaden

Die Positionen der Adaptergehäuse in der Schlauchleitungen ergaben sich aus dem Anspruch, die generierten SE-Wellen durch das Schmieröl zu den SE-Sensoren zu leiten. Die Adaptergehäuse sollten nicht direkt mit den Druckmessanschlüssen der Buchse verbunden werden, um die Weitergabe evtl. mechanischer Schwingungen zu vermeiden. Andererseits vergrößert sich mit zunehmendem Abstand die Dämpfung der SE-Wellen im Ölfaden. Für diese Untersuchung wurde ein Abstand von 30mm gewählt.

Desweiteren wurde untersucht, ob evtl. mechanische Schwingungen, die vom Prüfstand erzeugt werden, sich trotz der Dämpfung durch die Schlauchleitung auf den RMS-Wert auswirken. Dazu wurde das Adaptergehäuse zusätzlich durch ein stabiles, externes Stativ schwingungsfrei fixiert. Es konnten bei diesem Test keine Veränderungen der RMS-Werte relativ zu der freien Aufhängung (nur durch die Schläuche) des Adaptergehäuses festgestellt werden. Um die Beweglichkeit der Gleitlagerbuchse nicht einzuschränken, wurden die Untersuchungen ohne die zusätzliche Fixierung der Adaptergehäuse durchgeführt.

### 2.2.2 Versuchsvorbereitung

Das hydrodynamische Gleitlager ist für eine Schmieröltemperatur von ca.  $40,5^{\circ}\text{C}$  ausgelegt, für die Versuche wird der Bereich der zulässige Öltemperatur mit  $40,0^{\circ}\text{C} \leq t_{\text{öl}} \leq 41,0^{\circ}\text{C}$  festgelegt. Da der Prüfstand keine Öltemperierung besitzt, muss die zur Temperaturerhöhung des Öls notwendige Wärme durch Flüssigkeitsreibung im Gleitlager selbst generiert werden. Dazu wird bei maximaler Lagerlast die Drehzahl in Stufen bis zu deren Maximum erhöht. Vor den Messungen muss außerdem sichergestellt werden, dass sich keine Luftblasen in der Schmierölkammer des Adaptergehäuses befinden.

### 2.2.3 Messreihen

Beginnend mit einer Lagerlast von  $10,7\text{N}$ , einer Drehzahl von  $3000\text{min}^{-1}$  und einer Schmieröltemperatur im zulässigen Bereich wurden die RMS-Werte und die jeweilige Druckverteilung im Gleitlager registriert. Anschließend erfolgte eine Reduzierung der Drehzahl um ca.  $50\text{min}^{-1}$  und wiederum die Registrierung der Parameter. Die Drehzahl wurde soweit verringert bis der Schmieröldruck die maximale Druckhöhe der Röhrenmanometer erreichte. Bei den Messreihen mit den geringeren Lagerlasten  $14,7\text{N}$  und  $12,7\text{N}$  wurden die maximal möglichen Drehzahlen durch Instabilitäten (Oil-Whip) begrenzt, die aufgrund der geringen hydrodynamischen Lagerbelastungen auftraten. Die Minimaldrehzahlen wurden auch hier durch den Messbereich des Röhrenmanometers limitiert.

Die Öltemperatur konnte durch Anwärmen, siehe Kap.2.2.1, oder Abkühlen (im Stillstand des Lagers zuwarten) im zulässigen Toleranzbereich gehalten werden.

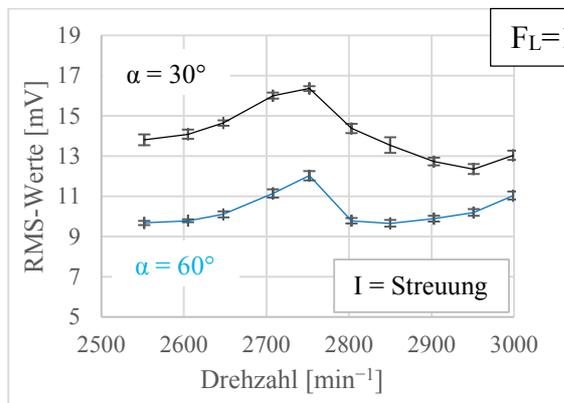
Beim Anfahren eines neuen Betriebspunktes stellt sich nur langsam jeweils eine andere Druckverteilung im Gleitlager ein. Dieser Ausgleichsvorgang kann aufgrund von Trägheit und Reibung in den Schläuchen und dem Röhrenmanometer bis zu zwei Minuten andauern. Erst wenn die Druckverteilung sich nicht mehr merklich ändert, arbeitet auch das Gleitlager quasistationär und die Messungen sind reproduzierbar. Die Gleitlagerwelle wurde im „Rechtslauf“ betrieben, d.h. in Richtung des zunehmenden Buchsenwinkels  $\alpha$ .

## 3. Ergebnisse

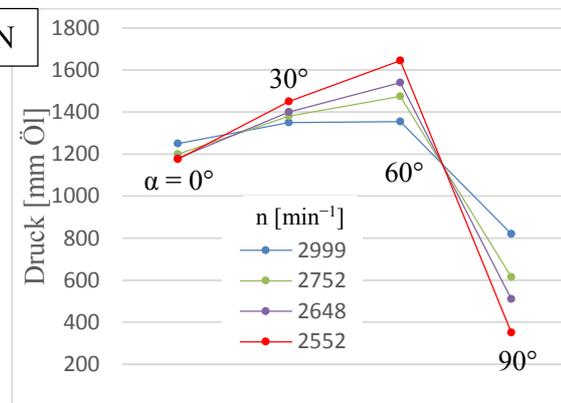
Die, bei den Buchsenwinkeln  $\alpha = 30^{\circ}$  und  $\alpha = 60^{\circ}$  synchron gemessenen, RMS-Werte sind sortiert nach abnehmender jeweiliger Lagerlast, über den gefahrenen Wellendrehzahlen in den Abb. 5, 7 und 9 dargestellt. Die an den einzelnen RMS-Werten angebrachten vertikalen Markierungen geben die Streuung der über 10s gemittelten RMS-Werte an. Die Druckver-

läufe, die für das Ziel dieser Untersuchung von Relevanz sind, sind aus den Abb. 6, 8, und 10 ersichtlich. Erkennbar sind dort die Änderung der statischen Schmieröldrücke in Umfangsrichtung bei  $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$  und  $90^\circ$  bei der jeweiligen Lagerlast und den dort gefahrenen Wellendrehzahlen.

In Abb. 5. ist zu erkennen, dass die Verläufe der RMS-Werte in Abhängigkeit von der Messposition sehr große Ähnlichkeiten aufweisen. Beide haben ihr Maximum bei einer Drehzahl von  $2752 \text{ min}^{-1}$ . An der Messposition  $\alpha = 60^\circ$  wurden über den gesamten Drehzahlbereich die kleineren RMS-Werte gemessen. Die Druckverteilung in Abb.6. lässt sich mittels der hydrodynamischen Schmierungstheorie erklären, siehe [3, 6, 7 und 8]. Bei konstanter Lagerlast und nahezu konstanter Viskosität des Schmieröls vergrößert sich der Druck bei  $\alpha = 30^\circ$  und  $\alpha = 60^\circ$  mit abnehmender Wellendrehzahl. Außerdem vergrößern sich die Druckdifferenzen zwischen den Druckmesspunkten mit abnehmender Drehzahl. Der maximale Druck beträgt  $1645 \text{ mmÖl}$ .

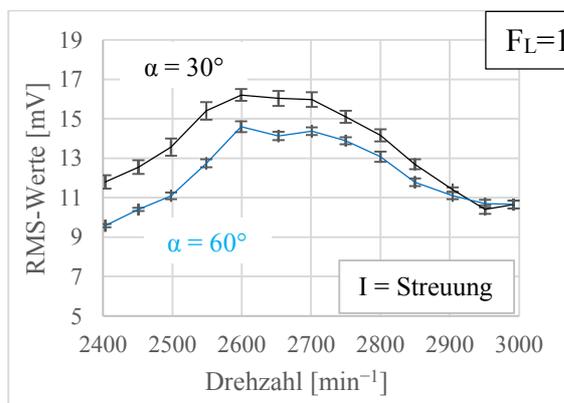


**Abb. 5.** RMS-Werte vs. Wellendrehzahl bei einer Lagerlast von 16,7N

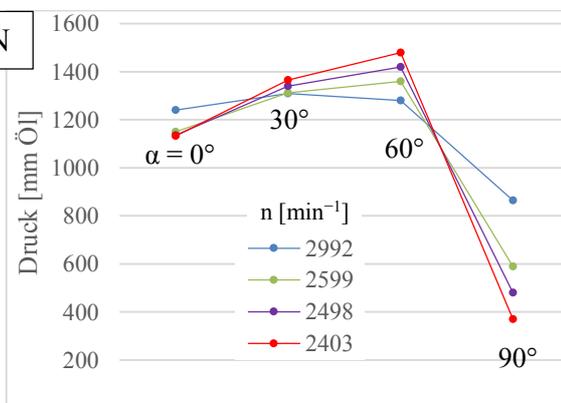


**Abb. 6.** Druckverteilung vs. Wellendrehzahl bei einer Lagerlast von 16,7N

Der Verlauf der RMS-Werte in Abb. 7 zeigt eine ähnliche Charakteristik wie der in Abb. 5, sie unterscheiden sich jedoch durch die geringere Drehzahl bei der die größten SE-Werte auftreten und die geringeren Differenzen zwischen den beiden RMS-Verläufen. Die Druckverläufe in Abb.8. verhalten sich ähnlich wie die bei der größeren Lagerlast, wobei hier sowohl ein geringerer maximaler Druck =  $1480 \text{ mmÖl}$  als auch geringere Druckdifferenzen bei den einzelnen Messpositionen zu erkennen sind.



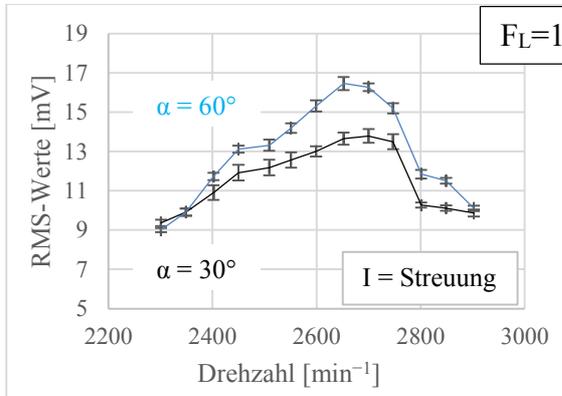
**Abb. 7.** RMS-Werte vs. Wellendrehzahl bei einer Lagerlast von 14,7N



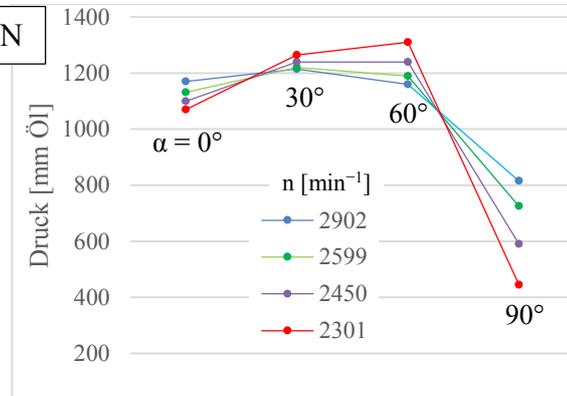
**Abb. 8.** Druckverteilung vs. Wellendrehzahl bei einer Lagerlast von 14,7N

Der Verlauf der RMS-Werte unterscheidet sich in Abb. 9 stark von den in Abb. 7 und Abb. 6 gezeigten. Bei dieser geringsten Lagerlast ist nicht die an Position  $\alpha = 30^\circ$  gemessene

Schallemission die Stärkere sondern die an Position  $\alpha = 60^\circ$  zeigt den Verlauf mit den höheren RMS-Werten. Ansonsten sind die Verläufe der Kurven zueinander sehr ähnlich. Bei der in Abb. 8 wiedergegebenen Druckverteilung setzt sich der aus den Abb. 6 und Abb. 8 zu erkennende Trend fort: Sowohl der maximale Druck = 1310mmÖl sinkt mit abnehmender Lagerlast als auch die gemessenen Druckdifferenzen bei den einzelnen Messpunkten.

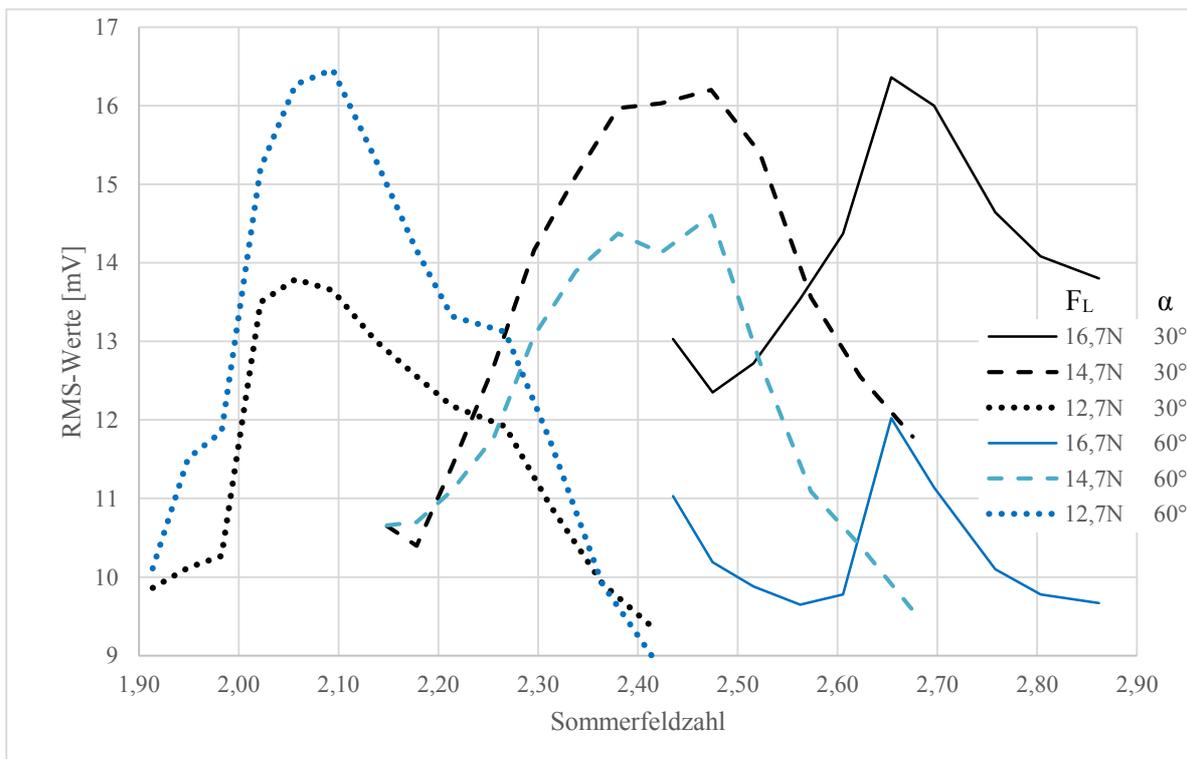


**Abb. 9.** RMS-Werte vs. Wellendrehzahl bei einer Lagerlast von 12,7N



**Abb. 10.** Druckverteilung vs. Wellendrehzahl bei einer Lagerlast von 12,7N

Aus den Abb. 5 bis Abb.10 lässt sich eine starke Abhängigkeit der Messwerte von der jeweiligen Lagerlast und der Wellendrehzahl feststellen. Bei konstanter Gleitlagergeometrie und in erster Näherung konstanter Ölviskosität werden diese 4 Parameter nachfolgend unter der bekannten Sommerfeldzahl zusammengefasst [6]. Die gemessene Schallemission über den berechneten Sommerfeldzahlen wird in Abb. 11 präsentiert.



**Abb. 11.** RMS-Werte vs. errechneten Sommerfeldzahlen bei verschiedenen Lagerlasten gemessen an den Buchsenwinkel  $\alpha = 30^\circ$  und  $60^\circ$ . Berechnete Nullviskosität des Schmieröls = 0,028Pas.

## 4. Diskussion

In Abb. 11 sind deutlich die unterschiedlichen hydrodynamischen Belastungsbereiche zu erkennen, in denen das Gleitlager betrieben wurde.

In [4, 5] wird beschrieben, dass in hydrodynamischen Gleitlagern SE-Wellen durch Flüssigkeitsreibung generiert werden. Dabei hängt deren Intensität direkt von der Stärke der Reibung im Öl ab, die annähernd proportional zu den örtlichen Schubspannungen  $\tau = (\eta \cdot u) / h$  im Schmieröl ist (2-Plattenmodell). Bei konstanter Wellendrehzahl und Schmieröltemperatur sind auch die wirksame Geschwindigkeit  $u$  und die dynamische Viskosität  $\eta$  konstant. Geometrisch bedingt stellt sich im Gleitlager ein Gleitraum mit sichelförmigem Querschnitt ein, dessen geringste Höhe mit  $h_0$  bezeichnet wird. Es ist bekannt, dass sich mit zunehmender Lagerbelastung (So-zahl) die minimale Schmier-spalthöhe und deren Verlagerungswinkel  $\beta$  verringern, vice versa. Dadurch ändert sich sowohl das Volumen in dem die Schubspannungen wirken als auch die lokale Stärke der Schubspannungen selbst. Setzt man in erster Näherung die generierten SE-Wellen mit den Schubspannungen im Öl gleich und berechnet den gedachten Schwerpunkt der gesamten SE-Wellen-Generierung, so ändert sich dieser mit der So-zahl. Je größer die So-zahl umso kleiner würde die Winkellage  $\rho$  dieses Schwerpunktes werden (Lage der Winkel  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\rho$ , siehe Abb. 3). Dies legt nahe, dass die Verläufe der dargestellten RMS-Werte durch die festen Messpositionen bedingt sind. Die Winkeldifferenzen zwischen dem jeweiligen Schwerpunkt der Generierung der Schallemission und den Messpositionen ändert sich je nach hydrodynamischer Lagerbelastung. Je geringer der Abstand zum Schwerpunkt desto größer der gemessene RMS-Wert.

Die geometrischen Veränderungen des Gleitraumes wirken sich auch auf die Druckverteilung aus. Mit zunehmender So-zahl konzentriert sich das „Druckgebirge“ mehr und mehr und verschiebt sich insgesamt zu einem kleineren Buchsenwinkel.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Mittels des entwickelten Adaptergehäuses konnten die im Gleitlager generierten SE-Wellen durch das Ausleiten über das Schmieröl detektiert werden. Im Unterschied zu einer metallischen Gleitlagerbuchse über die sich die gesamte generierte Schallemission dämpfungsarm erfassen lässt, ließ der verwendete Prüfaufbau nur eine punktuelle Erfassung zu. Die Verläufe der RMS-Werte sind durch den Versuchsaufbau und die jeweilige hydrodynamische Lagerbelastung erklärbar. Zur Absicherung der Ergebnisse ist die berührungsfreie Messung der Verlagerungsbahn, die Bestimmung der Ölviskosität in Abhängigkeit von Temperatur und Scherrate, die Messung des Warmspiels und zusätzliche SE-Messpositionen geplant.

## Referenzen

- [1] Fa. GUNT, Hamburg, TM280, *Versuchsanleitung, Druckverteilung in Gleitlagern*, 2013.
- [2] THM, Fb 03, *Projektarbeit "Adaptergehäuse"*, Albayrak,D., Albayrak,H., Franz,P., Janzer, R., 2015.
- [3] Wierzecholski, K., *Teoria niekonwencjonalnego smarowania łożysk ślizgowych*, Monograph, Wydawnictwo Naukowe, Politechniki Szczecińskiej, ISBN 83-86359-13-7, 1995.
- [4] Ziegler,B., Schwalbe,H.-J., Miszczak,A., *Nachweis des Reibzustandes in Gleitlager mit Hilfe der Schallemission*, DGZfP- Berichtsband BB 105 – D, Vortrag 17, ISBN 978-3-940283-01-6, Puchberg 2007.
- [5] Ziegler,B., Wierzecholski,K., Miszczak,A., Friction Forces Measurements for slide bearing test stand in maritime university gdynia using the acoustic emission methode, KONES 2008, Journal of Kones, Vol.15, Nr. 2, Pages 571 – 577, ISSN 1231 – 4005, Permanent Committee of KONES, Warsaw 2008.
- [6] Steinhilper,W., Sauer,B., *Konstruktionselemente des Maschinenbaus* 2, 6. Auflage, ISBN 978-3-540-76653-7, Springer-Verlag Berlin, 2008.
- [7] Lang,O.R., Steinhilper,W., *Gleitlager*, ISBN 3-540-08678-1, Springer Verlag, Springer , 1978.
- [8] Wittel,H., et al., *Roloff/Matek Maschinenelemente*, ISBN-978-3-658-02326-3, Springer, 2013.