

Schadensfrüherkennung an geschmierten Gleitkontakten mittels Schallemissionsanalyse

M. Fritz, W. Burger, A. Albers

Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

1 Einleitung

Geschmierte Gleitkontakte in Gleitlagern, Zylinderlaufflächen oder Nockentrieben haben einen wesentlichen Einfluss auf Verfügbarkeit und Sicherheit von Maschinensystemen wie Verbrennungsmotoren oder Turbinen. Ein Ausfall beispielsweise eines Gleitlagers kann neben der Gefährdung von Mensch, Umwelt und Maschine auch beträchtliche Kosten für Instandsetzung und Ausfallzeiten mit sich bringen.

Neben diesen Gesichtspunkten der Sicherheit wird auch immer öfter die Forderung nach einer zustandabhängigen Instandhaltung laut. Man erhofft sich hiervon eine Verlängerung der Maschinenlaufzeiten und eine damit einhergehende deutliche Kostenreduzierung. Grundlage für eine solche zustandsabhängige Instandhaltung ist jedoch ein kontinuierlich und zuverlässig arbeitendes Überwachungs- und Diagnoseverfahren.

Bisher bekannte, kontinuierlich arbeitende Überwachungsverfahren wie die Messung des Übergangswiderstands zwischen Welle und Lager [1, 2], Schmiermittelanalyse oder Lagertemperaturüberwachung sind in der Praxis meist nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand durchführbar und zeigen oft eine zu große Unsicherheit bei der frühzeitigen Schadenserkenkung.

Ein bereits bekanntes, am Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau der Universität Karlsruhe unter Leitung von Prof. Dr. A. Albers nun weiter untersuchtes Verfahren ist die Schallemissionsanalyse. Hierbei wird der bei einem Anstreifvorgang zwischen den Reibpartnern entstehende Körperschall mit Sensoren erfasst und mittels Spektralanalyse ausgewertet. Die Messung des Körperschalls kann weit entfernt von den Reibkontakten z.B. außen am Gehäuse erfolgen und erfordert daher keinen Eingriff in das Innere eines Maschinenraums.

2 Schallemissionsanalyse

Die Beurteilung des Zustands einer Maschine auf der Basis des im hörbaren Bereich emittierten Schalls ist eine alltäglich angewandte Methode. Zahlreiche Schäden sind an einem erhöhten Geräuschpegel oder typischen Frequenzen erkennbar. Erste Untersuchungen zur Anwendung der Schallemissionsanalyse bei Gleitlagern finden sich in [3]. Es wurde ein Zusammenhang zwischen dem Schallpegel und dem Reibungszustand in einem Gleitlager beschrieben. Ähnliche Messungen wurden im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchungen an einem Gleitlagerprüfstand durchgeführt. In Bild 1 ist der Mittelwert der Signalamplitude des Körperschallsensors als Maß für den emittierten Schallpegel in Abhängigkeit von der Drehzahl beispielhaft für eine Belastung des Gleitlagers von 10 kN aufgetragen. Man kann einen charakteristischen, anfangs bis zu einem Minimum abfallenden und dann wieder ansteigenden Verlauf erkennen. Qualitativ entspricht ein derartiger Verlauf der Stribeck-Kurve [4], die den Zusammenhang zwischen Gleitgeschwindigkeit und Reibkoeffizient in geschmierten Kontakten beschreibt. Der Bereich vor dem Minimum der Stribeck-Kurve ist durch Festkörper- und Mischreibungszustände im Gleitlager bestimmt, im betrachteten Diagramm an einem erhöhten Schallpegel erkennbar. Das Minimum der Stribeck-Kurve kennzeichnet den sogenannten Ausklinkpunkt, ab dem eine vollständige Trennung der beiden Reibpartner vorliegt, die Reibung und damit der Schallpegel sind minimal. Der anschließende

ansteigende Verlauf der Stribeck-Kurve resultiert aus einer zunehmenden Flüssigkeitsreibung im Lager gemäß der aus der rein hydrodynamischen Theorie gegebenen Reynolds-Sommerfeld-Kurve. Im Diagramm spiegelt sich dies am steigenden Schallpegel wieder. Diese Ergebnisse lassen bereits den Schluss zu, dass auf Grund des Zusammenhangs zwischen Reibungszustand im Gleitlager und mittlerem Schallpegel die Schallemissionsanalyse als Überwachungsverfahren für Gleitlager eingesetzt werden kann.

Die Ursache der gemessenen Schallemission liegt in der spontanen Freisetzung der in einem Körper gespeicherten elastischen Energie bei Belastung [3]. Dies kann wie beschrieben durch Festkörper-, Misch- oder Flüssigkeitsreibung sowie durch Rissbildung und Rissfortschritt, Bruchvorgänge, Kavitationserscheinungen, Phasenumwandlungen [5] oder durch plastische Verformungen [6] verursacht werden.

Der Frequenzbereich der Schallemission erstreckt sich vom hörbaren bis in den Ultraschallbereich. Im hörbaren Schallbereich sind meist die Störgeräusche aus der Umgebung so groß, dass das Messsignal nicht mehr nutzbar ist. Dies ist auch bei der bisherigen Betrachtung des Schallpegels der Fall. Maschinen- und Anlagengeräusche können diese Messungen stark verfälschen, so dass keine nutzbare Aussage mehr möglich ist. Daher geht man zu Messungen im Ultraschallbereich um ca. 100 kHz über, in dem Maschinen- und Anlagengeräusche keinen Einfluss mehr haben.

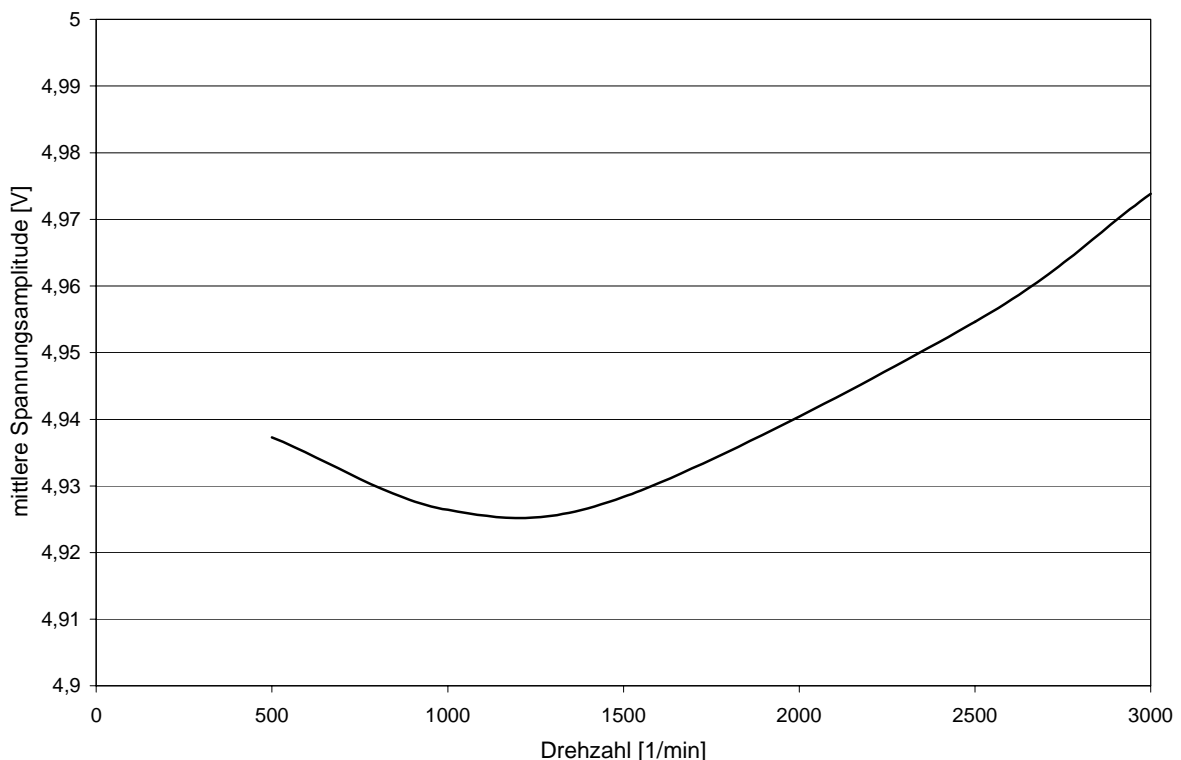


Bild 1: Mittlere Amplitude des Körperschallsensors in Abhängigkeit der Drehzahl, Belastung : 10 kN

Erste Untersuchungen zur Erkennung von Mischreibungszuständen, d.h. einem Anstreifen von Welle und Lager, mittels Körperschallsignalen im Ultraschallbereich finden sich in [7] bis [13]. Bei Untersuchungen an Axial- und Radialgleitlagern wurde der hochfrequente Anteil der Körperschallsignale mittels einer Impulsdichtemessung ausgewertet. Jedem Schallereignis, das einen zuvor definierten Diskriminatorpegel überschritt, wurde hierbei ein Einheitsimpuls zugeordnet. Die Impulsdichte ergab sich aus dem Bezug der Summe der gezählten Impulse zur Messzeit. Aus der spektralen Analyse des Schwankungsanteils der

Impulsdichte konnten Rückschlüsse auf das Vorliegen eines Lagerschadens gezogen werden. Eine zentrale Rolle bei diesem Verfahren spielt der eingestellte Diskriminatorpegel. Aus einer zu hohen oder zu niedrigen Einstellung können falsche Aussagen resultieren.

Ein weiterer Ansatz zur Nutzung des Körperschallsignals zur Gleitlagerüberwachung findet sich daher in [7] und [13]. An Stelle der Impulsdichte wird der sogenannte Kurzzeiteffektivwert der Schallemission genutzt. Hierunter ist ein Effektivwert zu verstehen, dessen Integrationszeit um ein Vielfaches kleiner als die Zeit für eine Rotorumdrehung ist. Eine frequenzselektive Auswertung dieses Kurzzeiteffektivwertes erlaubt Aussagen zum Zustand eines Gleitlagers und zur Art eines gegebenenfalls vorliegenden Schadens, wie beispielsweise Lagerverkantung, Schmierstoffmangel oder Rotorunwucht.

Alle beschriebenen Verfahren nutzen allerdings nur einen Teil der Informationen, die im Körperschallsignal enthalten sind. Entweder wird wie bei der Impulsdichtemessung nur die Frequenz oder wie beim Kurzzeiteffektivwert die Amplitude des Zeitsignals verwendet. Bei den hier beschriebenen Arbeiten wurden hingegen sowohl die Frequenzinformation als auch die Amplitudeninformation des Spektrums des Körperschallsignals zur Schadensfrüherkennung ausgewertet.

3 Prüfstand und Messtechnik

Die Untersuchungen wurden am kleinen Gleitlagerprüfstand (Bild 2 und Bild 3) des Instituts durchgeführt. Der Prüfstand besteht aus einer in zwei Stützlagern geführten Welle. Zwischen den beiden Stützlagern befindet sich das Prüflager, das mittels eines Hydraulikzylinders mit einer Kraft von bis zu 60 kN belastet werden kann. Der Prüfstand ermöglicht sowohl Untersuchungen mit Gleitlagerhalbschalen als auch mit Gleitlagervollschalen. Die Drehzahl kann zwischen 150 und 3000 1/min variiert werden.

Am Prüfstand ist auch die Möglichkeit gegeben, das Schmieröl für das Prüflager auf 40 bis 60°C vorzuwärmen. Dies ermöglicht auf Grund der mit der Temperatur veränderlichen Viskosität des Schmieröls den Betrieb des Prüflagers in verschiedenen hydrodynamischen Zuständen sowie die Untersuchung der damit verbundenen Auswirkungen auf das Körperschallsignal.

Für die Versuche wurden Blei-Kupfer-Zinn-Dreischichtgleitlager vom Typ Glyco 40 und Bronze-Gleitlager mit einem Durchmesser von 61,5 mm und einer Breite von 9,5 mm eingesetzt.

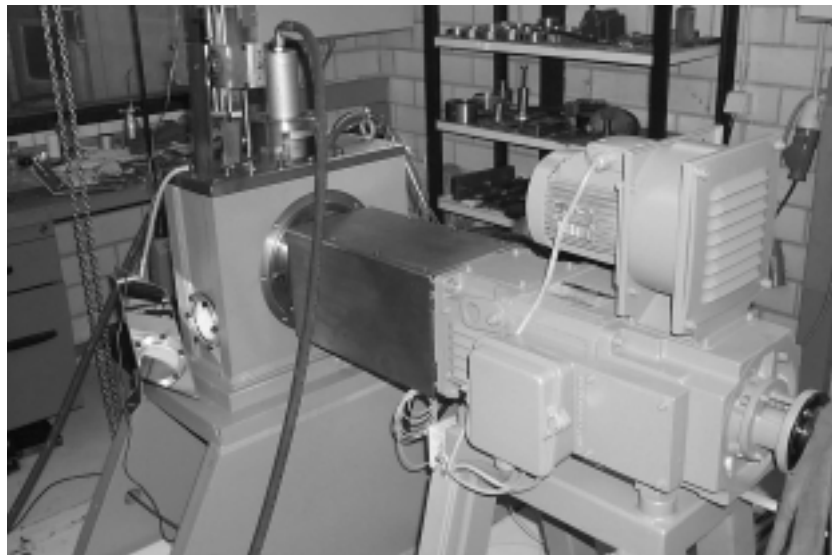


Bild 2: Kleiner Gleitlagerprüfstand

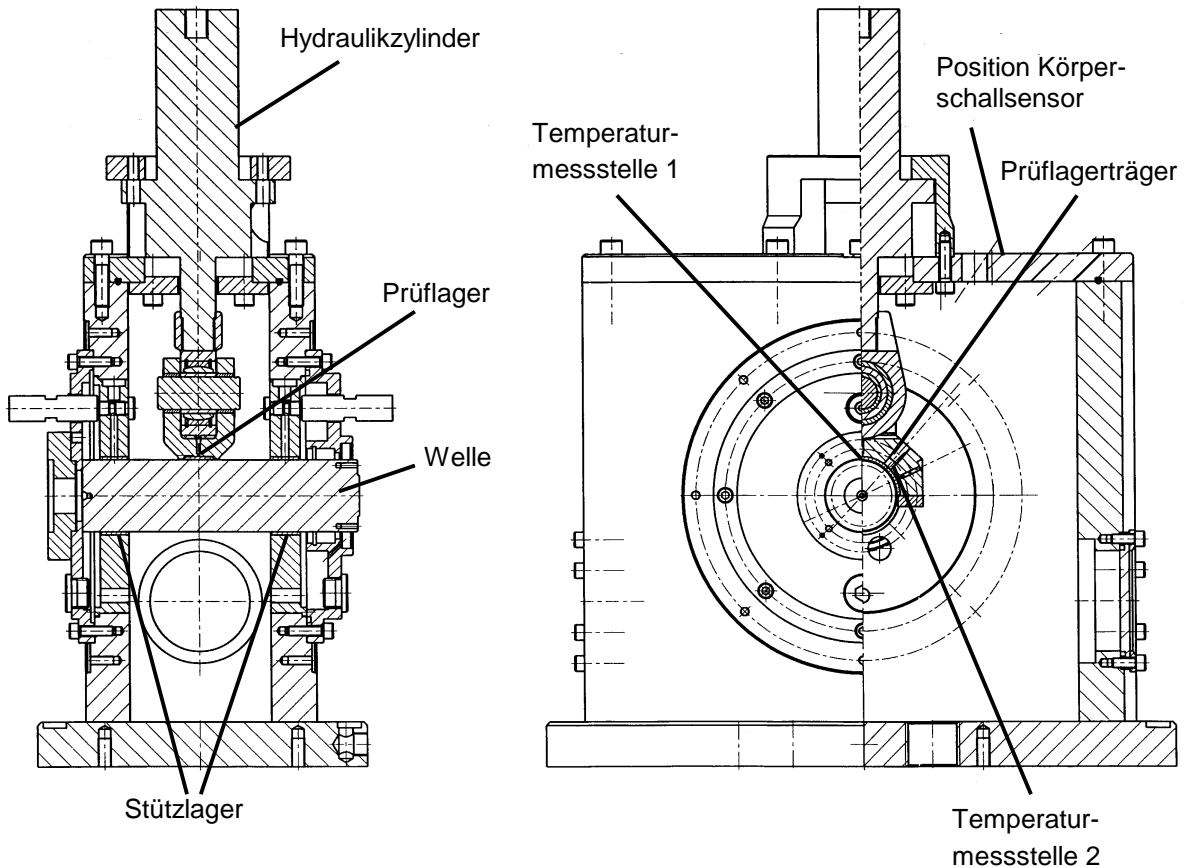


Bild 3: Komponenten des kleinen Gleitlagerprüfstands und Messtechnik

Zur Charakterisierung des Betriebszustands des Prüfstands wurden Drehzahl, Antriebsmoment, Lagerbelastung, Lagerrückentemperaturen und Öleinlauftemperatur bestimmt. Das Körperschallsignal wurde mit dem piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer Piezotron Acoustic Emission Sensor 8152B1 der Firma Kistler gemessen. Der nutzbare Messbereich des Sensors liegt zwischen 50 und 400 kHz. Der Sensor wurde auf dem Deckel des Prüfstandsgehäuses angebracht. Eine Montage direkt am Prüflagerträger war aus thermischen Gründen nicht möglich.

Aus dem gemessenen Körperschallsignal wurde nach Hochpassfilterung und Verstärkung mittels einer FFT (Fast Fourier Transformation) das Amplitudenspektrum ermittelt (Bild 4, [14]).

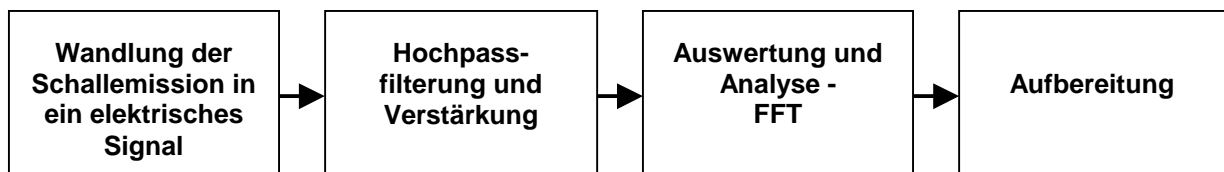


Bild 4: Verfahrensschritte der Auswertung

4 Versuchsergebnisse

Zur Untersuchung des Verfahrens wurden am Prüfstand Gleitlagerschäden simuliert. Hierzu war eine Störung des Zustands der hydrodynamischen Vollschröierung zu realisieren. Dies wurde über eine Reduzierung der Schmierölversorgung bis zur Mangelschröierung oder durch eine gezielte Überlastung des Prüfagers provoziert. Die Kraft wurde hierzu so weit erhöht, bis es zu einem beginnenden Fressen durch Anstreifen von Lager und Welle kam. Die Möglichkeit zur Erwärmung des Schmieröls bot hier weitere Möglichkeiten, da durch die mit steigender Temperatur sinkende Viskosität die Tragfähigkeit des Lagers reduziert werden konnte. Ein Lagerschaden konnte dadurch bereits bei geringeren Lagerlasten erzeugt werden.

In Bild 5 ist das Amplitudenspektrum für ein ungeschädigtes, verschleißfrei laufendes Gleitlager unter geringer Belastung einem Amplitudenspektrum im Schadensfall gegenübergestellt. Deutlich ist die Erhöhung der Amplitude im Bereich zwischen ungefähr 80 und 140 kHz zu erkennen. Dieser Verlauf ist charakteristisch für alle durchgeführten Versuche und konnte stets bei der Erzeugung eines Lagerschadens beobachtet werden. Auch die geringe Erhöhung der Amplitude zwischen 100 und 120 kHz im Falle des intakten Lagers ist charakteristisch für die durchgeführten Versuche.

Die trotz der starken Dämpfung des Sensors unterhalb von 50 kHz deutlich erhöhten Amplitudenwerte im Frequenzbereich bis 20 kHz sind wie bereits im vorhergehenden Abschnitt beschrieben auf die Geräuschentwicklung des Prüfstandsantriebs zurückzuführen und werden daher für eine Auswertung nicht herangezogen.

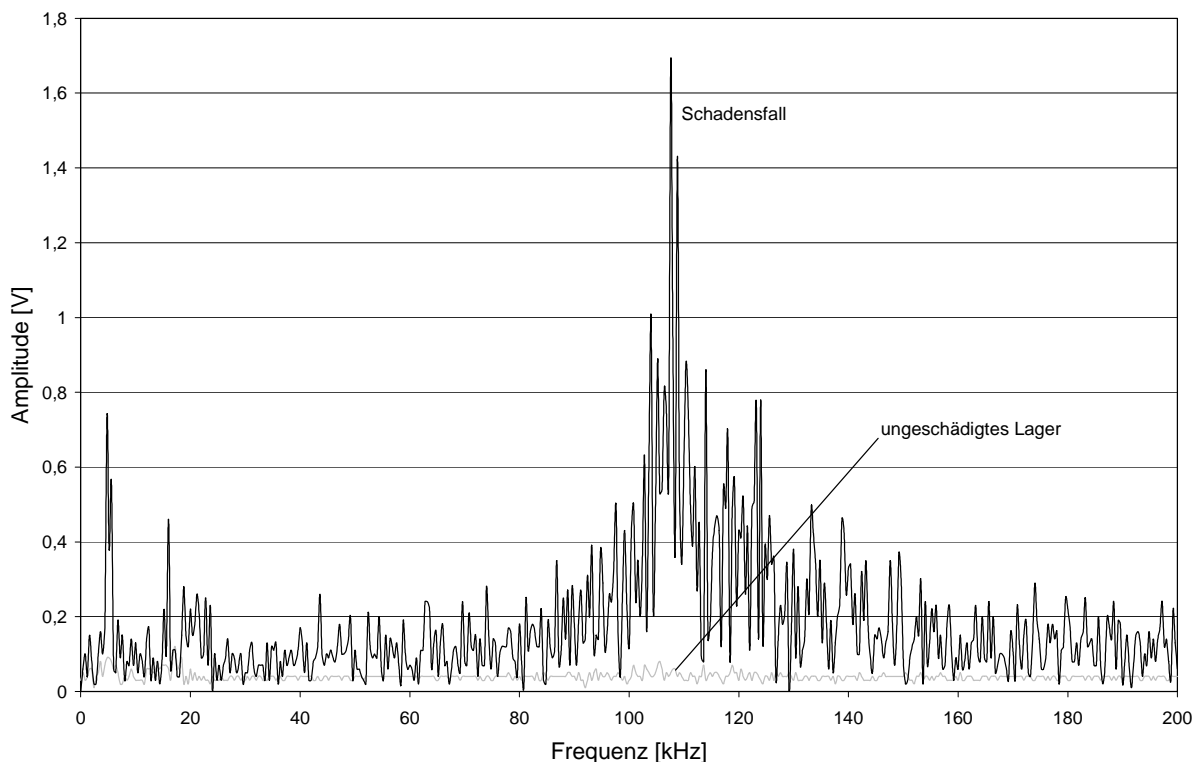


Bild 5: Amplitudenspektrum bei ungeschädigtem Lager und im Schadensfall

Um den Verlauf eines entstehenden Lagerschadens zu dokumentieren, wurde das Körperschallsignal während eines Versuches kontinuierlich im Abstand von 1 s gemessen und ausgewertet. Bild 6 gibt das Ergebnis einer Messung mit einer Glyco 40-Gleitlagerhalbschale unter langsam ansteigender, statischer Belastung bei einer Drehzahl von 3000 min^{-1} wieder. Das Schmieröl für das Prüflager wurde auf 53°C vorgewärmt. Im Diagramm sind die einzelnen Amplitudenspektren zeitlich hintereinander angeordnet. Deutlich ist die Entwicklung des Lagerschadens mit der Zeit zu beobachten. Zu Beginn der Messungen ist ein Verlauf des Amplitudenspektrums wie er bereits aus Bild 5 für das intakte Lager bekannt ist zu erkennen. Ab der 16. Messreihe ist die Amplitude im Bereich zwischen 80 und 140 kHz deutlich erhöht. Es kommt zu Anstreifvorgängen zwischen Welle und Lager und schließlich zu einem Lagerfresser.

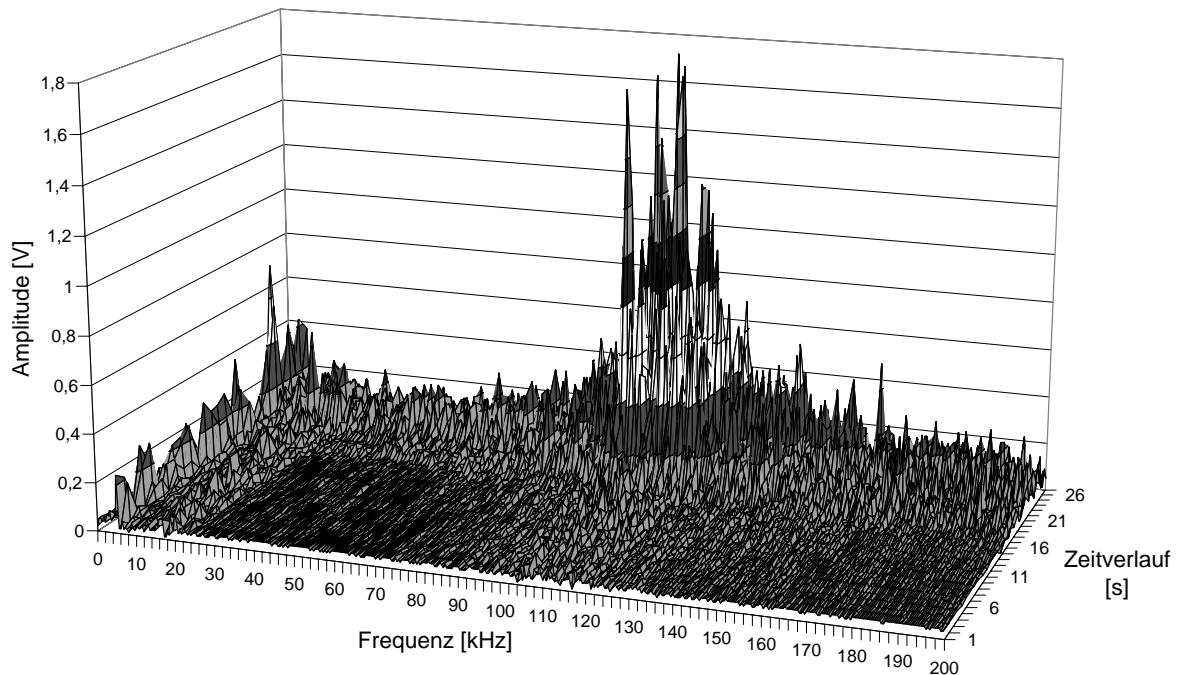


Bild 6: Wasserfalldiagramm des Amplitudenspektrums zum Versuch aus Bild 7

Um diese Messergebnisse mit den weiteren am Prüfstand gemessenen Größen in Relation zu bringen, wurde das Integral des Amplitudenspektrums zwischen 80 und 140 kHz als der das Körperschallsignal charakterisierende Kennwert ausgewählt. In Bild 7 ist der Wert dieses Integrals neben den Verläufen von Belastung, Drehmoment und Lagerrückentemperatur aufgetragen. Die Lagerbelastung wurde in Stufen auf $4,5 \text{ kN}$ erhöht. Am sprunghaften Anstieg des Drehmoments ist deutlich das Einsetzen des Lagerfressers zu erkennen. Mit geringer Verzögerung steigt auch die Lagerrückentemperatur stark an. Sie erreicht einen Maximalwert von 215°C . Der Integralwert der Schallemission zeigt bereits vor dem Eintreten des Fressers deutlich erhöhte Werte an, die den bevorstehenden Schaden ankündigen. Dies bedeutet, dass es bereits vor dem Eintreten des Fressers zu Anstreifvorgängen zwischen Lager und Welle gekommen ist. Die Messung verdeutlicht, dass mit dem Körperschallsignal ein Lagerschaden in Form eines Fressers bereits wertvolle Sekunden vor dem eigentlichen Auftreten erkannt werden kann und somit Zeit vorhanden ist, um entsprechende Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Bei der Beurteilung nach dem Versuch wurde das Gleitlager als defekt eingestuft.

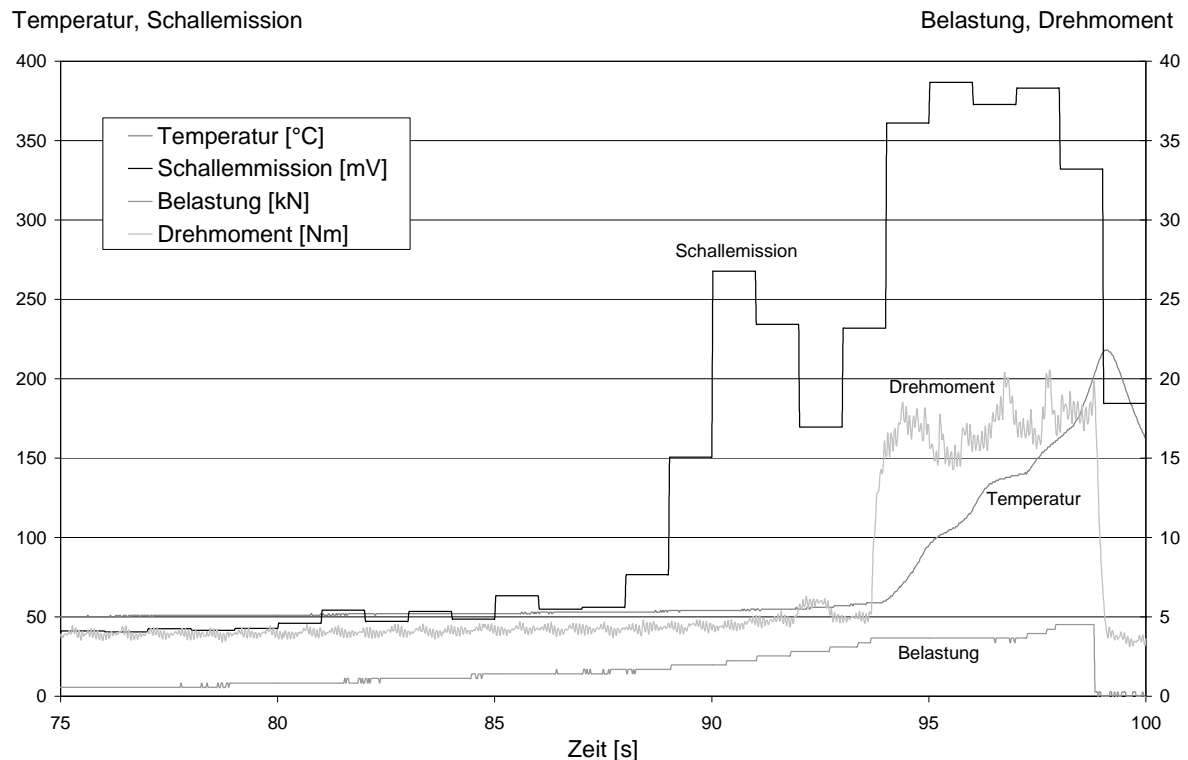


Bild 7: Messung mit einer Glyco 40-Gleitlagerhalbschale unter statischer Belastung

Bei der Bewertung der Ergebnisse stellt sich die Frage, welche Größen Einfluss auf das gemessene Amplitudenspektrum haben. Hierbei sind vor allem Lagermaterial, Drehzahl und Temperatur bzw. Viskosität des Öls von Interesse. Im Rahmen weiterer Untersuchungen [14, 15] konnte beim Vergleich von Glyco 40-Lagern, Aluminiumlagern vom Typ Glyco 74 sowie Bronzelagern keine Differenz im Frequenzbereich, in dem erhöhte Amplituden auftreten, festgestellt werden. In Bild 8 ist ein Wasserfalldiagramm einer Messung mit einem Gleitlager aus Bronze dargestellt. Aus dem Vergleich des Diagramms aus Bild 6 sind keine signifikanten Abweichungen des Frequenzbereichs zu erkennen.

In [15] wurden analoge Untersuchungen zur Variation der Drehzahl und der Öltemperatur durchgeführt. In beiden Fällen konnte kein Einfluss auf die Lage des Frequenzbereichs beobachtet werden. Im Falle der Drehzahlvariation war eine mit der Drehzahl steigende Amplitude zu beobachten. Der Grund hierfür liegt im größeren Reibleistungseintrag in die Kontaktstelle zwischen Lager und Welle bei höherer Drehzahl. Hierbei wird offensichtlich auch mehr Leistung in Körperschallemission umgesetzt mit der Folge größerer Amplituden.

Im Rahmen von Untersuchungen zu neuen Werk- und Schmierstoffkonzepten für Gleitlager [16], bei denen sowohl metallische als auch keramische Gleitlager verwendet wurden, kam die Schallemissionsanalyse zur Früherkennung eines Schadens des Prüflagers zum Einsatz. Die Versuche wurden am großen Lagerprüfstand des Instituts durchgeführt, der eine deutlich vom bisher betrachteten Prüfstand (Bild 2 und Bild 3) abweichende Geometrie und einen anderen Wellendurchmesser aufweist. Die Messstelle des Körperschallsensors befand sich an der Ölzuführung für das Prüflager und damit an einem nicht mit den Gegebenheiten am kleinen Prüfstand vergleichbaren Ort. Trotz dieser unterschiedlichen Randbedingungen und Lagermaterialien lieferte die Schallemissionsanalyse vergleichbare Ergebnisse und ermöglichte es, frühzeitig einen Lagerschaden zu erkennen.

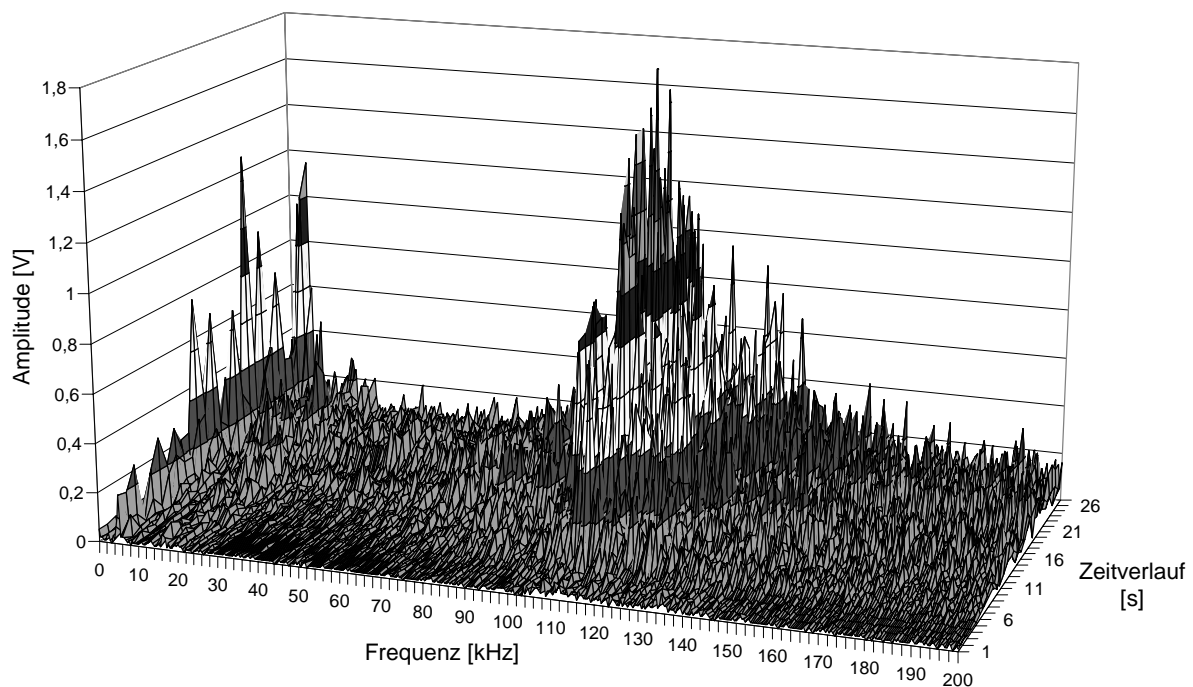


Bild 8: Wasserfalldiagramm einer Messung mit einem Bronzelager

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Schallemissionsanalyse als Verfahren zur Früherkennung von Schäden an Gleitlagern geeignet ist. Der Frequenzbereich, in dem ein Schaden an einer signifikanten Erhöhung der Amplitude erkennbar ist, liegt unabhängig von Drehzahl, eingesetztem Lagermaterial oder Schmieröltemperatur stets in einem Bereich um 100 kHz.

Ein Lagerschaden konnte stets deutlich vor dem Eintreten eines Lagerfressers, der sich in einem sprunghaft ansteigenden Drehmoment äußert, erkannt werden. Die Lagerrückentemperatur, die in der Praxis oftmals zur Lagerüberwachung herangezogen wird, reagierte auf einen Lagerfresser erst deutlich später als das Körperschallsignal.

Auf Grund dieser Stärken zeigt das Verfahrens ein großes Potenzial zur praktischen Anwendung bei der Früherkennung von Lagerschäden. Ein weiterer wesentlicher Vorteil liegt in der Möglichkeit, den Sensor weit entfernt vom zu überwachenden Lager und somit auch außen am Gehäuse zu montieren. Es ist kein Eingriff in den Innenraum einer Maschine, kein Verlegen von Sensorkabeln und keine Gehäuse-durchführung erforderlich.

Die bisherigen Ergebnisse wurden an statisch belasteten Gleitlagern gewonnen. Eine Anwendung des Verfahrens beispielsweise für Turbinen und Pumpen ist damit möglich und wurde in ähnlicher Form auch bereits schon durchgeführt ([7] - [13]).

Ein praktisch anwendbares Überwachungssystem muss Intelligenz in Form von Lernfunktionen aufweisen, um sich an die Gegebenheiten der jeweiligen Maschine bzw. Anlage adaptieren zu können. Für eine kontinuierliche Überwachung ist auf Grund der großen Datenmenge und der zeitaufwändigen Auswertalgorithmen eine entsprechend hohe Rechenleistung erforderlich.

Ein Ziel weiterer Arbeiten ist die Untersuchung der Übertragbarkeit der bisherigen Ergebnisse auf instationär belastete Gleitlager wie beispielsweise in Verbrennungsmotoren. Ebenso ist zu klären, ob mit deutlich kostengünstigeren Sensoren ähnlich gute und zuverlässige Ergebnisse zu erzielen sind. Es könnte beispielsweise an den Einsatz von teilweise ohnehin vorhandenen Klopfensoren in Verbrennungsmotoren für die Schallemissionsanalyse gedacht werden.

Literatur

- [1] Haller, R.; Burger, W.; Wohlfahrt, M.: Detektierung und Lokalisierung von Ermüdungsrissen in Gleitlagern mittels der elektrischen Widerstandsmessung. Antriebstechnisches Kolloquium 1993, Verlag TÜV Rheinland, 1993, S. 153-167.
- [2] Burger, W.: Beiträge zur Messtechnik an geschmierten Gleit- und Wälzkontakten. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1993
- [3] Schwalbe, H.-J.: Schallemissionsmessung an Gleitlagern zur Schadensfrüherkennung. Fachtagung Instandhaltung '78, Wiesbaden, Deutsches Komitee Instandhaltung, 1978
- [4] Lang, O.; Steinhilper, W.: Gleitlager. Springer, Berlin, 1978
- [5] Eisenblätter, J.; Faninger, G.: Zur Anwendung der Schallemissionsanalyse in Forschung und Technik. Metall 31 Heft 1, 1977
- [6] Teßmar, H.: Untersuchung der kontinuierlichen Schallemission bei der plastischen Deformation von ausgewählten Stählen. Dissertation, TH Zittau, 1984
- [7] Förster, R.; Thalinger, G.; Ellmer, G.: Diagnose gefährlicher Gleitlagerzustände. Wissenschaftliche Berichte THZ 1254, 1990
- [8] Sturm, A.; Uhlemann, S.: Diagnostik an Gleitpaarungen durch Schallemissionsanalyse. Maschinenbautechnik 34 Heft 3, Berlin, 1985
- [10] Sturm, A.; Rosch, D.; Uhlemann, S.: Ein Impulsbewertungsverfahren zur Diagnose an Maschinenelementen. Maschinenbautechnik 35, Berlin, 1986
- [11] Uhlemann, S.: Diagnose von Reibungszustandsänderungen in ölgeschmierten Gleitpaarungen. Dissertation, TH Zittau, 1986
- [12] Lerche, H.: Diagnose von Gleitringdichtungen mittels Schallemissionsanalyse. Dissertation, TH Zittau, 1989
- [13] Ellmer, G.: Anwendung des Kurzzeiteffektivwertes der Schallemission bei der Gleitlagerdiagnose. Dissertation, TH Zittau, 1991
- [14] Hunzinger, M.: Überprüfung der Eignung der Schallemission zur Detektierung von Schäden an Gleitlagern. Studienarbeit, Universität Karlsruhe, 2000
- [15] Langner, C.: Schadensfrüherkennung an Gleitlagern mittels Schallemissionsanalyse. Studienarbeit, Universität Karlsruhe, 2001, in Vorbereitung
- [16] Czermin, C.; Albers, A. (Hrsg.): Neue Werk- und Schmierstoffkonzepte für Radialgleitlager - Experimentelle Ermittlung des Potenzials und der Anwendungsgrenzen. Dissertation, Forschungsberichte des Instituts für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Band 3, Karlsruhe, 2000