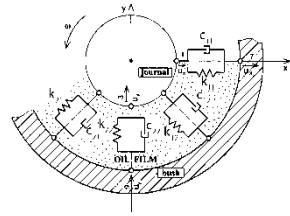


Eine Messstrategie für die Ermittlung von frequenzabhängigen Parametern der Gleitlager



Kruk, R.

Die akustischen Simulationen von modernen Maschinen und Anlagen werden in der früheren Phase des Entwurfes eingesetzt. Dazu werden genaue Informationen und Modellen zu den simulierten Maschinenelementen notwendig. Die unbeweglichen Teile lassen sich gut modellieren. Für die rotierenden, gelagerten Teile wird die Simulation der Körperschallübertragung kompliziert und dafür entsprechende Parametern benötigt. Ein Forschungsvorhaben wurde im Institut für Maschinenwesen durchgeführt, wo Parametern für akustische Simulation von Maschinen mit Gleitlagern ermittelt wurden.

The knowledge of the performance of structure-borne noise of bearings is essential for the acoustical simulation of machinery and equipment. In order to get the needed characteristics suitable theoretical models have to be developed and verified by experimental tests. Therefore, a test suite was designed and built up to measure the acoustical performance under different operating parameters.

1 Einleitung

Bei der Schallflussanalyse von Maschinen und Anlagen darf die Rolle von Wälz- und Gleitlagern als dynamische Übertragungselemente nicht unterschätzt werden. Um hierfür präzise Kennwerte zu ermitteln, wurde am Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal im Rahmen eines FVA-Forschungsvorhabens (FVA 404, AiF 13077N) eine neuartige Messstrategie zur Bestimmung des dynamischen Übertragungsverhaltens von Wälz- und Gleitlagern entwickelt. Dieses wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) gefördert. Dafür wurde ein Prüfstand aufgebaut, mit dem ein weites Parameterfeld abgedeckt werden kann, und ein Auswerteverfahren entwickelt, mit dem die frequenzabhängigen Steifigkeiten und Dämpfungen be-

stimmt werden können. In diesem Bericht werden die Gleitlagerver-
suche erläutert.

2 Theoretische Arbeiten

Die Ergebnisse aus der Theorie und den Experimenten liefern Parame-
tern, die Schwingungsverhalten des Schmierfilms abbilden. Diese Pa-
rameter sind aus der Reynoldsgleichung ermittelt und hängen bei
kleineren Schwinggeschwindigkeit von

- der Spaltgeometrie $\bar{H}(\varphi)$
- der statischen Exzentrizität (ε, γ)
- dem Breitenverhältnis B/D
- der Ölzuführungsgeometrie
- dem Drosselwiderstand der Taschen
- dem dimensionslosen Zuführdruck Π
- der seitlichen Dichtung
- der Breite B
- der dynamischen Viskosität η
- der Schwingungsfrequenz ω_s
- und der relativen Spalthöhe ψ

ab.

Die unten stehenden Gleichungen (1-4) beschreiben das Berech-
nungsmodell für die Steifigkeit- und Dämpfungskoeffizienten, die in
dem Programm ALP3T berechnet werden können /3/.

$$k_{ik} = \frac{2B\eta\omega_s}{\psi^3} \gamma_{ik}^* \quad (1)$$

$$c_{ik} = \frac{2B\eta\omega_s}{\psi^3} \frac{1}{\omega_s} \beta_{ik}^* \quad (2)$$

$$\gamma_{ik}^* = \frac{1}{4} \frac{2\pi}{B} \int_0^{B/D} \int_{-B/D}^{B/D} \left(\frac{\partial \Pi}{\partial \mathbf{q}_k} \right) ((i-1)\cos\varphi - (i-2)\sin\varphi) d\bar{z} d\varphi \quad (3)$$

$$\beta_{ik}^* = \frac{1}{4} \frac{B}{D} \int_0^{2\pi} \int_{-B/D}^{B/D} \left(\frac{\partial \Pi}{\partial q_{k+2}} \right) ((i-1)\cos \varphi - (i-2)\sin \varphi) d\bar{z} d\varphi \quad (4)$$

Mit $i, k = 1, 2$ und $q_n = X, Y, X', y'$ für $n = 1$ bis 4.

Bild 1 stellt das Ersatzmodell grafisch dar. In der Mitte ist die mit der Drehfrequenz ω drehende Welle zu sehen. Die Schwingungseigenschaften des Schmierfilms sind mit Federelementen (Koeffizienten k) und Dämpferelementen (Koeffizienten c) in zwei Hauptrichtungen ($x-1, y-2$) und zusätzlich in weitere zwei Richtungen 12 und 21 definiert. Diese Definition stellt nichtlineares Verhalten des Lagers dar.

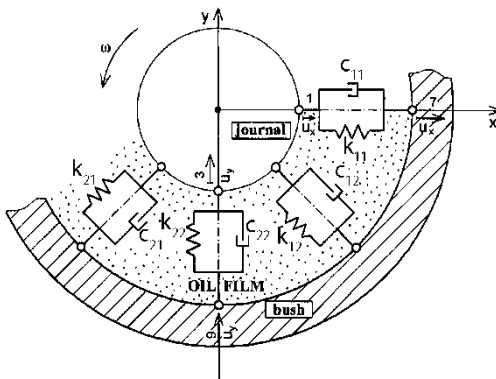
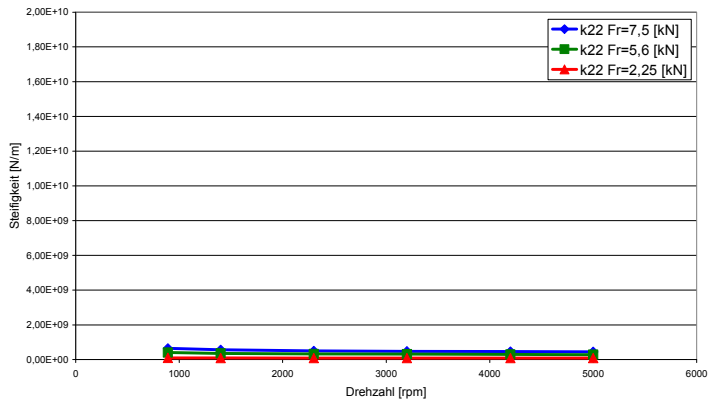
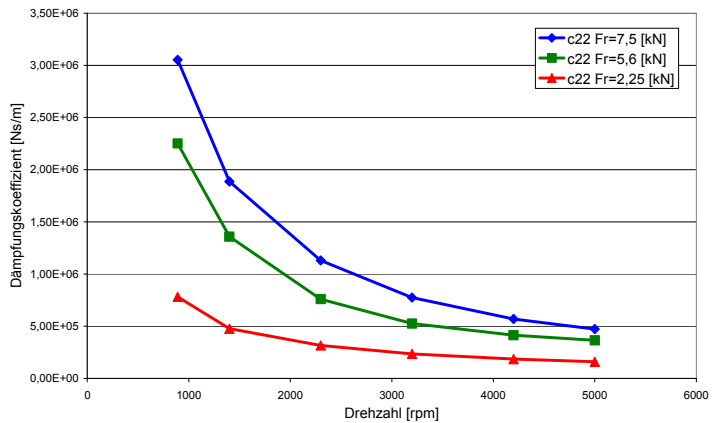


Bild 1: Theoretisches Ersatzmodell der Gesamtlagerung /5/

Mit Hilfe vom Programm ALP3T wurden Koeffizienten für verschiedene Belastungsfälle (drei Drehzahlen und drei statische Lasten) berechnet. Die iterativ berechneten Ergebnisse (**Bild 2** und **Bild 3**) stellen die Koeffizienten nur in der Richtung y (k_{22}, c_{22}) dar.

Steifigkeitskoeffizienten k_{22} nach ALP3T**Bild 2:** Steifigkeitskoeffizienten berechneten mit Hilfe von ALP3TDämpfungskoeffizienten c_{22} nach ALP3T**Bild 3:** Dämpfungskoeffizienten berechneten mit Hilfe von ALP3T

Die rechnerisch ermittelten Koeffizienten für Dämpfung und Steifigkeit des Schmierfilms weisen eine Abhängigkeit von der Drehzahl und Last auf. Mit steigender Drehzahl nehmen die Werte sowohl für die Steifigkeits- als auch für die Dämpfungskoeffizienten ab. Für größere Lasten nehmen die Werte zu.

Die nach ALP3T berechneten Koeffizienten sind für Schwingungen angesetzt, die in einem tieferen Frequenzbereich (unter 100 Hz) als die in dem Experiment untersuchten Frequenzen liegen. Diese diskrete Anregungsart (insgesamt nur 30 Linien über ein relativ breites Spektrum) hat auch Bedeutung auf das Endergebnis. Dieser diskrete frequenzabhängige Verlauf bildet nun sehr grobe Übertragungsfunktion, in der einige Informationen (wie z.B. Eigenfrequenzen) verloren gehen.

3 Experimentelle Arbeiten

Hier wurden Versuche zum Schwingungsübertragungsverhalten von Lagern durchgeführt. In den Versuchen wurde die Übertragungsfunktion für den stationären Betriebszustand des Versuchslagers bei bestimmten Betriebsparametern ermittelt. Es wurden Versuche mit Wälzlagern und mit Gleitlagern durchgeführt. Die Messergebnisse werden als Steifigkeit und Dämpfung in betriebsparameterabhängige Funktionen umgerechnet. Das gesamte Verfahren ist in /2/ beschrieben.

3.1 Prüfstand

Der für die Messungen eingesetzte Lagerprüfstand besteht aus zwei Hauptbaugruppen, dem Antriebsmodul mit der gleitgelagerten Hauptwelle und dem Prüfmodul mit Messobjekt, Messtechnik und Belastungseinrichtungen.

Das Antriebsmodul ist durch eine Membrankupplung geteilt, damit Motor und Getriebe biegeweich von der Hauptwelle entkoppelt sind und der Körperschallübergang vom Antrieb zum Versuchsobjekt am anderen Ende der Hauptwelle vermieden wird.

Das Prüfmodul ist so konzipiert, das je nach Lagerbauart statische radiale und axiale Belastungen aufgebracht werden können. Die Körperschallanregung erfolgt über einen elektrodynamischen Schwingerreger (Shaker) in radialer Richtung und wird der statischen Belastung überlagert (**Bild 4**). Neben den Lasten lassen sich die Schmier-

bedingungen in Form von Lagerbetriebstemperatur und Öldurchflussmenge einstellen.

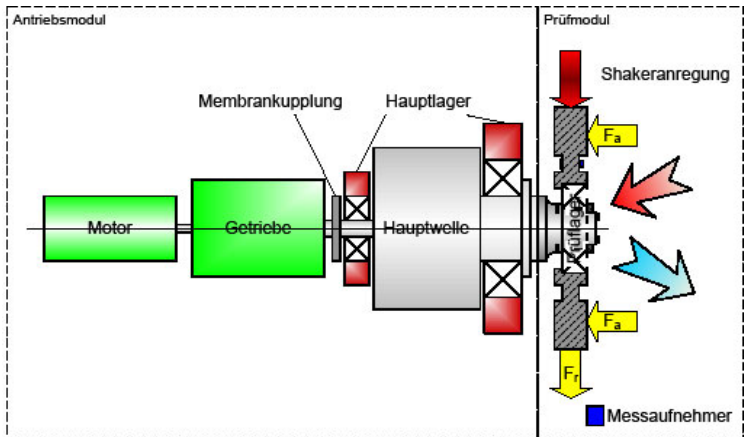


Bild 4: Schematische Darstellung des Prüfstands

Die ermittelten Werte aus den Versuchen wurden nach dem Verfahren aus /7/ berechnet. Während der Messung wurde das System von außen (Schalleitungsweg: Gehäuse – Lager - Welle) mittels eines elektrodynamischen Schwingungserregers mit einem Multisinussignal angeregt. Dabei werden zeitgleich mehrere Sinusanregungsfunktionen mit diskreten Frequenzen (in diesem Fall zwischen 100 und 3000 Hz, je 100 Hz) in das Versuchsobjekt eingeleitet.

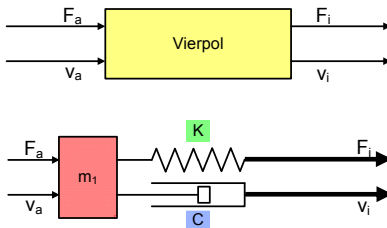
3.2 Messtrategie

Um das Prüflager als isoliertes Übertragungselement zu betrachten, wird die Vierpoltheorie verwendet. Ihr besonderer Vorteil liegt darin, dass der gesamte untersuchte Übertragungsweg zwischen den Beschleunigungs- und Dehnungssensoren in der Platte (ε_p , a_p) bis zu den entsprechenden Wellensensoren (ε_w , a_w) als Reihenschaltung von Vierpolen angesehen werden kann (Bild 1).



Bild 5: Schematische Darstellung des Prüfstands

Als Vorbereitung für die Auswertung werden die Referenzvierpole von Gehäuseplatte und Wellenadapter bestimmt. Hierzu werden die eingangs erwähnten Sensoren verwendet. Zusätzlich wird am Lagersitz der Platte über einen Kraftsensor ein mit Beschleunigungsaufnehmer versehenes Gewicht angebracht. Durch diese Konfiguration findet neben dem Ausschluss des Platteneinflusses auch eine Umwandlung der Plattendehnung in die Eingangsgröße Kraft für den Lagervierpol statt. Für die Referenzbestimmung am Wellenadapter wird ein Hammerschlagwerk verwendet, das mit Kraft- und Beschleunigungssensoren ausgerüstet ist.



$$-\omega^2 \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} C & -C \\ -C & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & -K \\ -K & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}$$

Bild 5: Schema zur Ermittlung von Steifigkeit und Dämpfung aus einem mechanischen Vierpol für Gleitlager

Die Umwandlung der Beschleunigung in Schnelle erfolgt durch Integration im Frequenzbereich während der Messauswertung. Alle Vierpolparameter werden über ein modifiziertes Zwei-Massen-Verfahren bestimmt. Die gewonnenen Vierpol-Matrizen beschreiben das isolierte Übertragungsverhalten des geprüften Lagers unter den eingestellten Betriebsbedingungen. Sie können zum Beispiel bei der Akustikanalyse nach der Netzwerkmethod direkt eingesetzt werden.

Darüber hinaus wurde eine Methode entwickelt, mit der die gewonnenen Messwerte auch in Simulationsprogrammen verwendet werden können, die das Übertragungsverhalten über frequenzabhängige Steifigkeiten und Dämpfungen abbilden. Dieses geschieht über die Bewegungsdifferentialgleichungen eines Kelvin-Voigt-Modells mit zwei Massen, Feder und Dämpfer. Die Massen werden durch den Lagerinnen- und -außenring bzw. für Gleitlager nur durch die Lager- schale und eine fiktive, sehr kleine Masse repräsentiert, Feder und Dämpfer stellen das System der Schmierpalte und Passfugen sowie gegebenenfalls der Wälzkörper dar. Durch Gleichsetzen der Differentialgleichungen mit der Kettenform der Vierpoldarstellung werden die frequenzabhängigen Steifigkeiten und Dämpfungen bestimmt. Das hier angewandte Modell für Gleitlager ist in dem **Bild 5** zu sehen. Hier wird nun ein Einmassenschwinger für die Berechnung der Steifigkeit und Dämpfung angewendet.

3.3 Versuchsprogramm

Folgende Parameter können auf dem vorhandenen Prüfstand untersucht werden.

- Drehzahl
- Statische Last
- Schmierung (verschieden Schmierstoffe, verschieden Öltemperaturen)
- Einbauspiel (Presspassung, Übergangspassung)
- Lagerspiel
- Lagertyp (verschiedene Bohrungen, verschiedene Durchmesser)

Neben Gleitlager ist es auch möglich Übertragungsverhalten von Wälzlager zu untersuchen.

3.4 Versuchsprogramm

Die aufgezeichneten Signale wurden für jede Messung in Frequenzbereich analysiert und zur Ermittlung von Durchgangsdämmmaß für Beschleunigung und Dehnung bzw. Übertragungsfunktion angewendet. Diese gewonnenen Kenngrößen können bei der Simulation von neu entwickelten Maschinen eingesetzt werden.

4 Zusammenfassung

Das abgeschlossene Vorhaben liefert umfangreiche experimentell ermittelte Ergebnisse, die für die Auslegung lärmarmen Maschinen genutzt werden können. Es ist denkbar den Prüfstand für genauere Verifikation von theoretischen Modellen für weitere Forschungsvorhaben einzusetzen, um die Berechnungswerkzeuge weiter zu verbessern. Dafür benötigt der Prüfstand gezielte Umbauarbeiten, wie andere Sensorpositionen, eine veränderte Messstrecke bzw. zusätzliche Anregungsquellen und ein angepasstes Versuchsprogramm.

Es ist auch möglich weitere Lagertypen (Form, Größe) und auch andere Schmierstoffe (Öltemperaturen, Viskositätsklassen, Ölaufbau und Additivierung) zu untersuchen.

5 Literatur

- /1/ Dietz, P., Kruk, R., Lohrengel, A.: Körperschallübertragung Wälzlager / Gleitlager. Dynamisches Übertragungsverhalten von Lagern im akustisch relevanten Frequenzbereich. Forschungsvorhaben Nr. 404 I. Heft 945, FVA 2010
- /2/ Backhaus, S.-G., Eine Messstrategie zur Bestimmung des dynamischen Übertragungsverhaltens von Wälzlagern, in Institut für Maschinenwesen. 2007, TU Clausthal: Clausthal
- /3/ Fuchs, A.: Schnelllaufende Radialgleitlagerungen im instationären Betrieb, 2002, TU Braunschweig: Braunschweig.
- /4/ Sell, H.: Charakterisierung des dynamischen Verhaltens von elastischen Bauteilen im Einbauzustand. Vibracoustic GmbH&Co. KG, Weinheim 2005
- /5/ Kicinski, J.: Rotor dynamics, Institute of Fluid-Fluid Machinery, Wydawnictwo IMP PAN, Gdansk 2006
- /6/ Kruk, R., Lohrengel, A., Schäfer, G., Schmelter, R., Thoden, D.: Körperschallübertragung von Gleitlagern