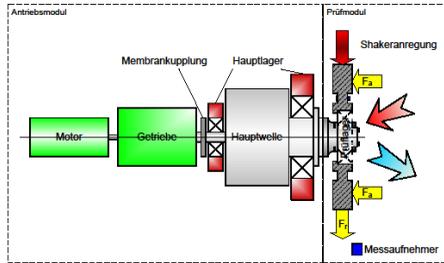


# Körperschallübertragung von Wälz- und Gleitlagern

Kruk, R.; Thoden, D.



Die Ermittlung des Körperschallübertragungsverhaltens von Lagerungen spielt für die akustische Simulation von Maschinen und Anlagen eine entscheidende Rolle. Um die dafür nötigen Kenndaten zu ermitteln, ist es nötig, passende theoretische Modelle zu entwickeln und anhand von Versuchen zu verifizieren. Dazu wurden experimentelle Versuche auf dem dafür erstellten Prüfstand durchgeführt und ausgewertet. Ein Auszug aus den ermittelten Ergebnissen wird hier präsentiert.

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 site 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 bestimmt werden können.

Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden Versuche zum Schwingungsübertragungsverhalten von Lagern durchgeführt. In den Versu-

chen wurde die Übertragungsfunktion für den stationären Betriebszustand des Versuchslagers bei bestimmten Betriebsparametern ermittelt. Es wurden Versuche mit Wälzlager und mit Gleitlagern durchgeführt. Die Messergebnisse werden als Steifigkeit und Dämpfung in betriebsparameterabhängige Funktionen umgerechnet und mit theoretischen Modellen verglichen. Das gesamte Verfahren ist in /4/ beschrieben.

## 2 Ergebnisse des Forschungsvorhabens

Im Folgenden wird das Messverfahren und ein Auszug aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens vorgestellt. Die vollständigen Ergebnisse des Vorhabens sind im Abschlussbericht bei der FVA dargestellt.

### 2.2. Messstrategie

Um das Prüflager als isoliertes Übertragungselement zu betrachten, wird die Vierpoltheorie verwendet /7/. Ihr besonderer Vorteil liegt darin, dass der gesamte untersuchte Übertragungsweg zwischen den Beschleunigungs- und Dehnungssensoren in der Platte ( $\varepsilon_p$ ,  $a_p$ ) bis zu den entsprechenden Wellensensoren ( $\varepsilon_w$ ,  $a_w$ ) als Reihenschaltung von Vierpolen angesehen werden kann (**Bild 1**).

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 eine Kraftmessdose ein mit Beschleunigungsaufnehmern 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.

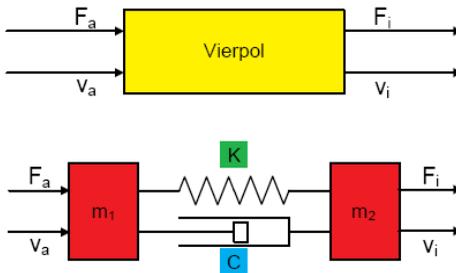
Die Umwandlung der Beschleunigung in Schnelle erfolgt durch Integration im Frequenzbereich während der Messauswertung. Alle Vierpolparameter werden über ein modifiziertes Zwei-Massen-Verfahren bestimmt. Die gewonnenen Vierpol-Matrizen beschreiben das isolierte Übertragungsverhalten des geprüften Lagers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



**Bild 1:** Reihenschaltung von Platten-, Lager- und Wellenvierpol zur Isolierung der Übertragungseigenschaften des Prüflings

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 Lagerschale 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 (**Bild 2**).



$$-\omega^2 \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} C & -C \\ -C & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & -K \\ -K & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}$$

**Bild 2:** Schema zur Ermittlung von Steifigkeit und Dämpfung aus einem mechanischen Vierpol

### **2.3. Versuchsprogramm**

Das Ziel des Forschungsvorhabens „Lagergeräusch“ ist die Bestimmung der Übertragungsfunktion von Wälz- und Gleitlagern, die als Verbindungselement zwischen den rotierenden Elementen (z.B. Antriebswellen) und Gehäusen bezeichnet werden können. Die Kenntnis der Übertragungsfunktionen dieser Elemente erlaubt eine erweiterte Beschreibung des dynamischen Verhaltens solcher Systeme und kann sowohl bei theoretischen als auch praktischen Arbeiten die Lärmminimierung unterstützen. Das dynamische Verhalten wird anhand der Parameter Steifigkeit und Dämpfung beschrieben.

#### **Wälzlager**

Die umfangreichen Wälzlagerversuche werden hier stark komprimiert dargestellt. In diesem Bericht werden die zum Vergleich mit den Gleitlagern charakteristischen Punkte herausgegriffen.

In den Forschungsarbeiten wurden folgende Parametern der Wälzlager untersucht:

- Drehzahl (6 Stufen)
- Statische Last (6 Stufen)
- Schmierung (2 Schmierstoffe, 2 Temperaturen)
- Einspannsteifigkeit/Gehäusemasse (Massive Platte, Geschweißte Platte – Leichtbau Konstruktion)
- Lagereinbauspiel (Presspassung, Übergangspassung)
- Herstellereinfluss (3 Hersteller, Rillenkugellager 6212)
- Verkippung zwischen Lagerinnen- und -außenring (ohne Verkippung, mit 5' Verkippung)

Das Hauptversuchslager ist das Rillenkugellager 6212. Es wurden auch Versuche mit anderen Lagern durchgeführt, um Einflüsse auf die Körperschallübertragung bei anderer Größe und Art der Lager zu untersuchen. Dazu wurden folgende Lager untersucht:

- Zylinderrollenlager N212
- Rillenkugellager 6218
- Zylinderrollenlager N218

#### **Gleitlager**

Insgesamt wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens folgende Einflüsse auf die Körperschallübertragung von Gleitlagern geprüft:

- Drehzahl (6 Stufen)
- Statische Last (5 Stufen)

- Schmierung (2 Schmierstoffe, 2 Temperaturen)
- Einbauspiel (Presspassung, Übergangspassung)
- Lagerspiel (1,32‰ und 1,9‰)

Folgende Radialgleitlager wurden für die Untersuchungen eingesetzt:

- Kreiszyylinder- ,
- Vierkeil- und
- Offset-Lager

mit jeweils 100 mm Durchmesser und einem Breitenverhältnis von 0,75.

Das Radial-Axialgleitlager besteht aus:

- einem Kreiszyylinder-Radiallager und
- einem Festsegment-Axiallager.

Der Radialteil hat einen Durchmesser von 100mm und ein Breitenverhältnis von 0,735. Der Axialteil hat einen Außendurchmesser von 160mm.

Die aufgenommenen Signale wurden analysiert und ausgewertet. Die Signale werden mit Hilfe des in Abschnitt 2.2 beschriebenen Verfahren ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Auswertung stellen frequenzabhängige Größen dar.

Durch die Menge der Einflussparameter ist eine Darstellung aller Einzelergebnisse nicht mehr überschaubar und die Auswertung sehr aufwendig. Aus diesem Grund wurden die Daten aus jedem Versuch über der Frequenz gemittelt und mit Hilfe der Varianzanalyse für die Identifizierung der größten Einflüsse ausgewertet.

Die nächsten Unterkapitel enthält eine Zusammenfassung der statistisch aufbereiteten Daten.

## **2.4. Auswertung der Messdaten**

### **2.4.1. Statistische Varianzanalyse ANOVA**

Ein Vergleich von ermittelten Daten aus mehreren unterschiedlichen Versuchen liefert die Anwendung von statistischen Werkzeugen. Damit können bestimmte Aussagen aus den Experimenten über die Einflussparameter identifiziert werden. Ein solches Werkzeug ist Varianzanalyse - ANOVA, die sich für solche Auswertungen eignet. Anhand des der zu untersuchenden Messergebnisse muss entschieden werden, ob sich eine einfache oder mehrfache ANOVA besser eignet. In dem Forschungsvorhaben wurde ein breites Parameterfeld abgearbeitet, bei dem einige Parameter mehr als zwei Stufen besitzen. Aus diesem Grund wurde die mehrfache ANOVA-Methode für die Auswer-

tung gewählt. Hierbei wird die Streuung der beobachteten Messwerte entsprechend den im Modell betrachteten Faktoren in einzelne Komponenten zerlegt.

Für solche Auswertungen wird vorausgesetzt, dass die untersuchten Parameter normalverteilt sind. Diese Methode ist mit der folgenden Formel zu beschreiben:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij}, \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n,$$

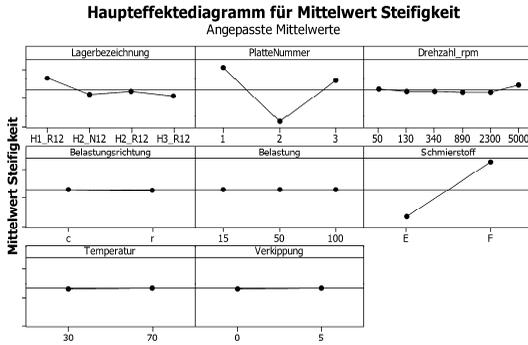
Die Werte  $Y_{ij}$  stellen Realisierungen der beobachtbaren Zufallsvariablen der Messergebnisse  $y_{ij}$  vor. Aus  $y_{ij}$  wird der Gesamtmittelwert  $\mu$  des Experiments ermittelt. Der Wert  $\alpha_i$  stellt den additiven Einfluss der Stufe  $i$  des betrachteten Parameters dar und der Wert  $\varepsilon_{ij}$  wird als additiver Zufallanteil berücksichtigt [9].

Die Analyse wurde für den gesamten Datensatz mit Hilfe des Programms MINITAB durchgeführt. Die Auswertungen werden in den nächsten Kapiteln erläutert.

#### 2.4.2. Auswertung der Wälzlagerergebnisse

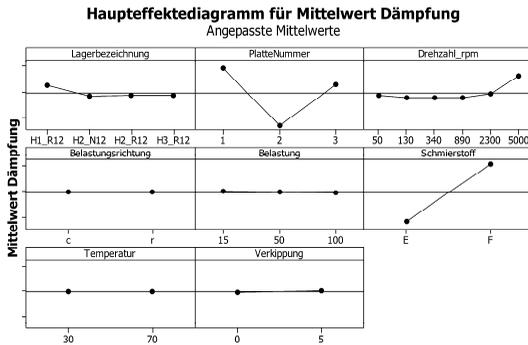
Nach Anwendung der ANOVA auf die über die Frequenz gemittelten Wälzlagerergebnisse kann der Einfluss der unterschiedlichen Parameter auf die Versuchsergebnisse ermittelt und dargestellt werden. Die Größenordnung der Ergebnisse liegt für die untersuchten Wälzlager bei einer Steifigkeit bei  $3 \cdot 10^8 \frac{N}{m}$  und einer Dämpfung bei  $1 \cdot 10^4 \frac{Ns}{m}$ .

In **Bild 3** und **Bild 4** sind die gesamten Auswertungen der Wälzlagerversuche für die Steifigkeit und Dämpfung in einem Diagramm zusammengefasst. In dem Diagramm lassen sich die größten Einflüsse ablesen. Als erster Einfluss der untersuchten Betriebsparameter kann die Schmierstoffart genannt werden. Beide Diagramme zeigen große Unterschiede zwischen den beiden untersuchten Schmierstoffen und es ist gut ablesbar, dass das mit E bezeichnete Esteröl kleinere Werte aufweist als das mit F bezeichnete FVA-Referenzöl. Die Temperatur in den Versuchen zeigt keinen großen Einfluss auf die Körperschallübertragung. Die Last und Drehzahl weisen nur einen geringen Einfluss auf die Steifigkeit und Dämpfung auf. Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden auch Einflüsse von Belastung und Belastungsrichtung untersucht, sie zeigen im Vergleich zur Schmierstoffart einen geringeren Einfluss auf die Körperschallübertragung. Durch die Einbaubedingungen (Platte Nummer: 1 – Massive Platte mit Presspassung im Lagersitz; 2 – massive Platte mit Spielpassung; 3 – Leichtbaukonstruktion, also geschweißte, gerippte Platte mit Presspassung) lassen sich die beide Größen stark beeinflussen. Die Spielpassung im



**Bild 3:** Gesamte Auswertung der Lagersteifigkeit für alle durchgeführten Wälzlagerversuche

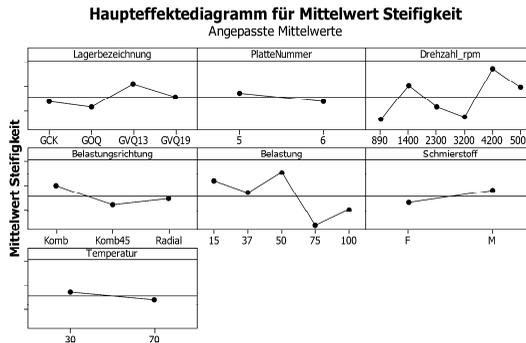
Lagersitz (Platte Nummer 2) hat zur Folge, dass die Körperschallübertragung verringert wird. Das Gleiche gilt für die Gehäuseplatte (P3), die als Leichtbauform eingeschweißte Rippen enthält. Der Unterschied zwischen P1 und P3 ist jedoch geringer.



**Bild 4:** Gesamte Auswertung der Lagerdämpfung für alle durchgeführten Wälzlagerversuche

Großen Einfluss hat auch die Lagerart. Das Lager 6212 (gekennzeichnet in den Bildern mit H1\_R12) wurde hier als Standardversuchslager gewählt und mit seiner Steifigkeit und Dämpfung lassen sich andere Lagertypen vergleichen. Das Zylinderrollenlager N212 (H2\_N12) zeigt ein unterschiedliches Verhalten zum Standardlager. Sowohl Steifigkeit

als auch Dämpfung nehmen in Vergleich zum 6212 ab. Es wurden auch Lager von unterschiedlichen Herstellern untersucht, die Ergebnisse sind in dem Diagramm ebenso enthalten. Es wurden Lager von drei Herstellern (H1\_R12, H2\_R12 und H3\_R12) untersucht. Es lässt sich erkennen, dass der Fertigungsprozess und die unterschiedlichen Geometrien (Laufbahnkrümmungsradien, Wälzelementabmaße, usw.) der Wälzlager auch einen Einfluss auf die Körperschallübertragung haben.



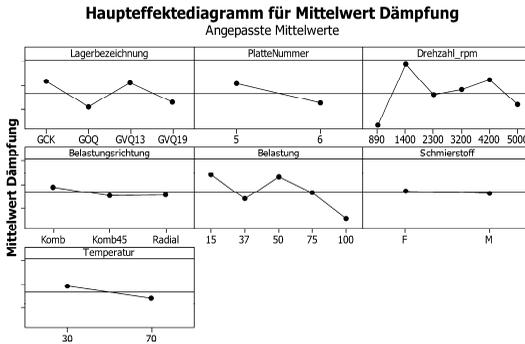
**Bild 5:** Gesamte Auswertung der Lagersteifigkeit für alle durchgeführten Gleitlagerversuche

### 2.4.3. Auswertung der Gleitlagerergebnisse

Die Varianzanalyse wurde genauso für Ermittlungen aus Gleitlagerversuchen angewendet und diese Gesamtauswertung ist in den **Bild 5** und **Bild 6** dargestellt. Die Größenordnung bei den untersuchten Gleitlagern liegen für die Steifigkeit bei  $1 \cdot 10^{10} \frac{N}{m}$  und für die Dämpfung bei  $1 \cdot 10^6 \frac{Ns}{m}$ . In dem Diagramm lassen sich die geordneten Einflüsse ablesen. Als ersten Einfluss der untersuchten Betriebsparameter kann die Lagerbauart genannt werden. In den Diagrammen sind diese Werte für alle untersuchten Lagerschalen (GCK – kombinierte Lager mit Kreiszyylinderbohrung, GOQ – Offset-Lagerschale, GVQ13 – 1,32‰ und GVQ19 – 1,9‰ Vierkeillagerschale mit unterschiedlichen Lagerspielen) aufgeführt, die Bauarten zeigen generell ein unterschiedliches Übertragungsverhalten, durch das größere Lagerspiel nehmen Steifigkeit und Dämpfung ab. Als nächsten Einfluss lassen sich die Einbaubedingungen (siehe Diagramm Platte Nummer: 5 –

Presspassung im Lagersitz, 6 – Spielpassung im Lagersitz) identifizieren, auch hier mindert ein lockerer Sitz die Übertragungseigenschaften. Der nächststehende Drehzahleinfluss hat bei den beiden Parametern ähnlichen Verlauf und eine klare Tendenz ist hier nicht.

Die Belastungsrichtung und Belastung weisen ebenfalls einen Einfluss auf die Steifigkeit und Dämpfung auf. Der Parameter „Komb“ bildet die kombinierte Belastung ab, wobei hier beide Lasten absolut zu beiden Richtungen (z.B.: radial und axial 50% = 1N/mm<sup>2</sup>) gleich sind. Der Parameter „Komb45“ ist so gewählt, dass der Lastwinkel 45° (radiale Lasten kleiner als bei „Komb“) beträgt. Die Belastungsrichtung und der statische Belastungseinfluss auf die Körperschallübertragung zeigen abfallende Tendenz für beide Parameter. In der nächsten Position ist der Schmierstoffeinfluss aufgelistet. Beide Diagramme zeigen geringe Unterschiede zwischen den beiden untersuchten Schmierstoffen (Öle: F – FVA-Referenzöl 2 und M – ein HVI-Öl). Die Steifigkeit



**Bild 6:** Gesamte Auswertung der Lagerdämpfung für alle durchgeführten Gleitlagerversuche

nimmt vom FVA- zum HVI-Öl leicht zu, während die Dämpfung sehr leicht abfällt. Die Temperatur in den Versuchen zeigt ähnlich wie der Schmierstoff relativ geringen Einfluss auf die Körperschallübertragung. Sowohl für die Steifigkeit als auch für Dämpfung fallen die Werte mit steigender Temperatur ab.

### 3 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 (z.B. ALP3T) 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.

Für derartige Anregungen ist das Institut für Maschinenwesen offen.

#### **4 Literaturhinweise**

- /1/ Richter, H.-P., Theoretische und Experimentelle Untersuchungen zur Körperschalleitung von Wälzlagern in Maschinen, in Fachbereich Maschinenbau. 1989, TU Darmstadt: Darmstadt.
- /2/ Klumpers, K., Experimentelle und theoretische Bestimmung der Dämpfungskennwerte von Wälzlagern und Wälzlagersystemen, in FVA-Forschungsheft. 1979, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V.: Frankfurt.
- /3/ Ophey, L., Dämpfungs- und Steifigkeitseigenschaften vorgespannter Schrägkugellager. Als Ms. gedr ed. Fortschrittberichte VDI 1. 1986, Düsseldorf: VDI-Verl. V, 128 S.
- /4/ Backhaus, S.-G., Eine Messstrategie zur Bestimmung des dynamischen Übertragungsverhaltens von Wälzlagern, in Institut für Maschinenwesen. 2007, TU Clausthal: Clausthal.
- /5/ Fuchs, A., Schnelllaufende Radialgleitlagerungen im instationären Betrieb, 2002, TU Braunschweig: Braunschweig.
- /6/ Dietz, P., Lohrengel, A., Thoden, D., Kruk, R., Arbeitstischvorlage AK Geräusche in Frankfurt, Vorhaben FVA-Nr.: 404, Körperschallübertragung Wälzlager / Gleitlager. 2008, Frankfurt,
- /7/ Seidel, E, Wirksamkeit von Konstruktionen zur Schwingungs- und Körperschalldämmung in Maschinen und Geräten: Grundlagen, Messverfahren, Zusammenstellung typischer Bauelemente. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin Forschung; Fb. 1999, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven.
- /8/ Cremer, L. und Heckl, M.: Körperschall: physikalische Grundlagen und technische Anwendungen, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1996.
- /9/ Dietrich, E.; Schulze, A.: Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation, Hanser, 2003.