

## Laborpraktikum

### Messtechnik und Messtechnik/Sensorik

### Versuch

# **Wälzlagerdiagnose mit Beschleunigungssensoren**

## **SS1**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. VERSUCHSZIEL .....</b>	<b>3</b>
<b>2. GRUNDLAGEN ZU BESCHLEUNIGUNGSSENSOREN.....</b>	<b>3</b>
2.1. DIE SYSTEMANALYSE VON BESCHLEUNIGUNGSSENSOREN .....	3
2.2. DER BESCHLEUNIGUNGSSENSOR.....	4
<b>3. GRUNDLAGEN DER WÄLZLAGERDIAGNOSE .....</b>	<b>6</b>
<b>4. VERSUCHSANORDNUNG FÜR DEN BESCHLEUNIGUNGSSENSOR .....</b>	<b>8</b>
<b>5. VERSUCHSAUFBAU ZUR WÄLZLAGERDIAGNOSE.....</b>	<b>9</b>
<b>6. VORBEREITUNG .....</b>	<b>10</b>
<b>7. AUFGABEN .....</b>	<b>11</b>
7.1. AUFNAHME DES BODE-DIAGRAMMES.....	11
7.2. APPROXIMATION DER ÜBERTRAGUNGSFUNKTION .....	11
7.3. WÄLZLAGERDIAGNOSE .....	11
<b>8. LITERATUR.....</b>	<b>12</b>

Betreuer: **Dipl.-Ing. S. Adler**

Stand vom 20.09.2019

## 1. Versuchsziel

Der Praktikumsversuch dient zunächst einer Vertiefung von Kenntnissen zu Eigenschaften von Beschleunigungssensoren. Schwerpunkte sind die Aufnahme der Übertragungsfunktion durch Anregung mit sinusförmigen Beschleunigungen sowie die Modellierung des beobachteten Übertragungsverhaltens. Unter Verwendung der hierbei gewonnenen Ergebnisse ist der Sensor zur Körperschallmessung an rotierenden Wellen anzuwenden. Ziel des zweiten Versuchsteiles ist es, die Wälzlagerdiagnose mit Beschleunigungssensoren als praktischen Anwendungsfall kennenzulernen. Mit den aufgenommenen Schallspektren und nachfolgender Signalverarbeitung sind Lagerschäden zu erkennen und zu lokalisieren.

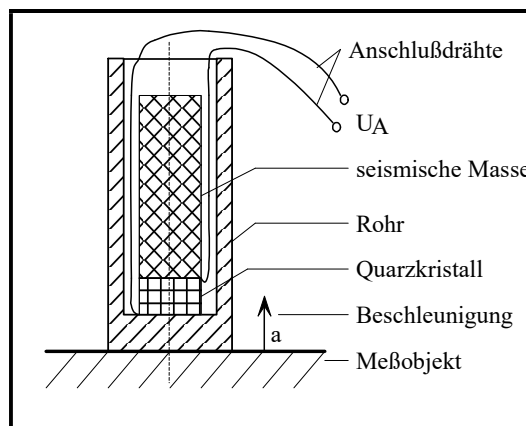
## 2. Grundlagen zu Beschleunigungssensoren

### 2.1. Die Systemanalyse von Beschleunigungssensoren

Für die Lösung von Messproblemen ist eine genaue Kenntnis der statischen und dynamischen Eigenschaften der Messkette erforderlich. Bei bekannten Eigenschaften der Messkette lassen sich Aussagen über den zu erwartenden Messfehler treffen. Die Analyse des Verhaltens des Messsystems wird als Systemanalyse bezeichnet. Ergebnis der Systemanalyse ist ein Modell. Von der hinreichend genauen Beschreibung des Modells hängt die Güte der Aussagen über zu erwartende Fehler oder die Güte einer Fehlerkorrektur ab. Für die Beschreibung von Messsystemen und Sensoren eignen sich Differentialgleichungen oder Übertragungsfunktionen. Beides sind **parametrische Modelle**. Parameter dieser Modelle sind Zeitkonstanten, Verstärkungen usw.. Diese Modelle entstehen unter Anwendung der **theoretischen Systemanalyse**; Struktur und Parameter dieser Modelle sind qualitativ und teilweise auch quantitativ bekannt. Unbekannte Parameter werden experimentell bestimmt. Bei der **experimentellen Systemanalyse** liegt das Verhalten des Systems z.B. als Übergangsfunktion oder in Form zugeordneter Zahlenwerte (z.B. im Bode-Diagramm) vor. Dies sind **nichtparametrische Modelle**. Zunächst sind Struktur und Parameter dieser Modelle nicht bekannt und werden später ermittelt. Beide Verfahren können kombiniert angewendet werden, so dass experimentelle Methoden auf theoretische Vorüberlegungen gestützt werden. Im Versuch soll das Bode Diagramm eines Beschleunigungssensors aufgenommen werden und daraus die Übertragungsfunktion des Sensors qualitativ und quantitativ bestimmt werden. Die einzelnen Grundglieder, aus denen sich die Gesamtübertragungsfunktion zusammensetzt, lassen sich aus der Form des Amplituden- und Frequenzganges ermitteln. Die Parameter der Übertragungsfunktion - die Zeitkonstanten und statischen Übertragungsfaktoren - ergeben sich aus den charakteristischen Knickfrequenzen.

## 2.2. Der Beschleunigungssensor

Das am häufigsten angewandte Funktionsprinzip für Beschleunigungssensoren beruht auf dem Newtonschen Bewegungsgesetz  $F = m \cdot a$ . Die Massenträgheitskraft führt zur Verformung eines elastischen Körpers. Die Größe der Verformung ist ein Maß für die Beschleunigung des Sensors. Piezoelektrische, piezoresistive und optische Verfahren sind zur Messung der Verformung verbreitet. Im **Bild 1** ist der Aufbau eines piezoelektrischen Beschleunigungssensors dargestellt.



**Bild 1:** Der prinzipielle Aufbau des im Versuch verwendeten Beschleunigungsaufnehmers.

Folgendes Funktionsprinzip liegt der dargestellten Anordnung zugrunde: Der Beschleunigungssensor wird in der dargestellten Weise am Meßobjekt befestigt. Bei Beschleunigung des Körpers reagiert die seismische Masse träge. Das führt entsprechend der vorliegenden Beschleunigung zu einer Stauchung bzw. Streckung des Quarzes. Aufgrund des piezoelektrischen Effektes ist am Quarzkristall eine polarisierte Spannung messbar, die vereinfacht als proportional zur Deformation des Quarzes angesehen werden kann.

$$U_A = k \cdot \Delta x \quad (1)$$

mit:  $U_A$  : Ausgangsspannung

$k$  : Koppelfaktor zwischen Deformation und elektrischer Spannung

$\Delta x$  : Längenänderung des Quarzes

Die Deformation des Quarzes ergibt sich aus der Beschleunigung:

$$\Delta x = -\frac{m \cdot a}{c} \quad (2)$$

mit:  $m$  : Masse des seismischen Körpers

$c$  : Federkonstante des Quarzes

$a$  : Beschleunigung

Somit ergibt sich das statische Übertragungsverhalten des Beschleunigungssensors nach der Funktion

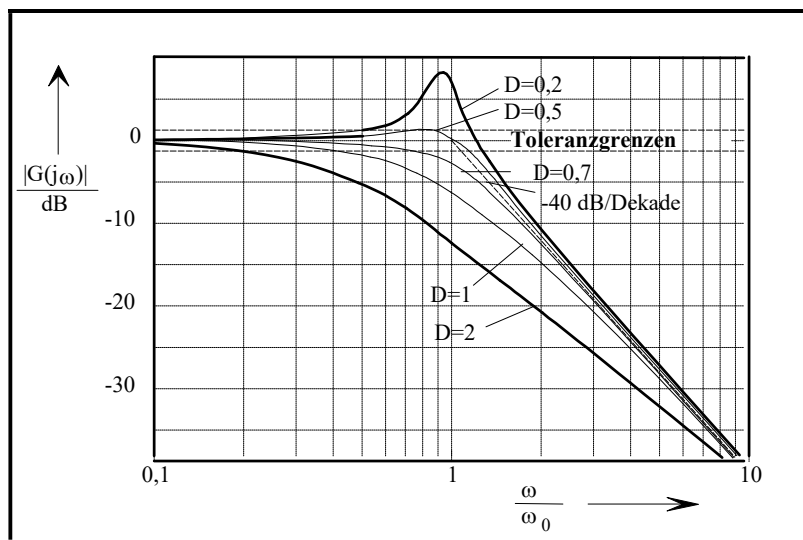
$$U_A = -\frac{k \cdot m}{c} \cdot a. \quad (3)$$

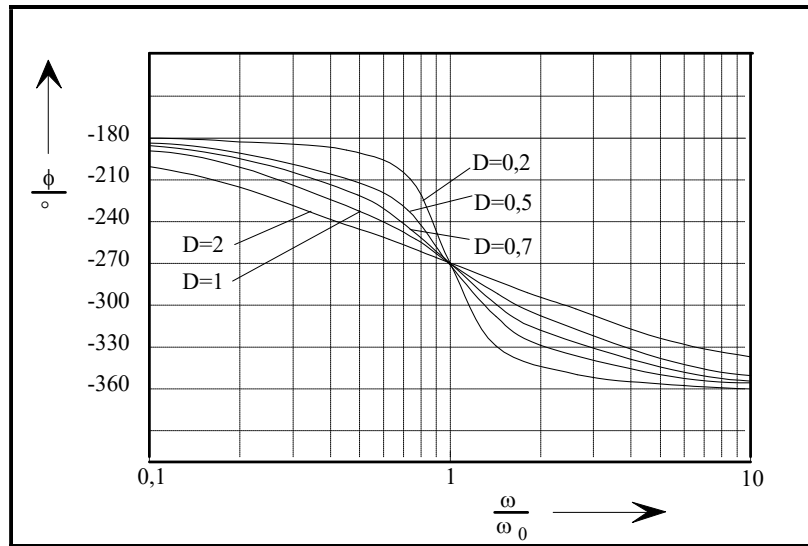
Der Beschleunigungssensor kann allgemein durch ein Feder-Masse-Dämpfungssystem beschrieben werden. Für ein solches System gilt der normierte Frequenzgang

$$G(j\omega) = -\frac{1}{1 - T_0^2 \cdot \omega^2 + 2 \cdot D \cdot T_0 \cdot j\omega},$$

mit  $D$  als Dämpfungskonstante des Dämpfungsgliedes und

$T$  als Zeitkonstante ( $T_0 = \frac{1}{\omega_0} = \sqrt{\frac{m}{c}}$ ).





**Bild 2:** Amplituden- und Phasenfrequenzgang des Beschleunigungsaufnehmers

Die Dämpfungskonstante  $D$  bestimmt neben der Zeitkonstanten  $T_0$  die Fehlergrenzen und den Messbereich (Arbeitsbereich) des Sensors. Sein Arbeitsbereich wird durch eine untere und eine obere Frequenz festgelegt, bei der der Amplitudengang vorgegebene Fehlergrenzen (Toleranzgrenze im **Bild 2**) verlässt. Wie aus dem im **Bild 2** dargestellten Amplitudengang ersichtlich ist, liegt beispielsweise bei einer vorgegebenen Fehlergrenze von  $\pm 5\%$  und einem  $D = 1$  die Grenzfrequenz bei  $\omega_g = 0,4\omega_0$  und bei  $D = 0,2$  ist sie  $\omega_g = 0,5\omega_0$ . Wird  $D = 0,5$  gewählt, ergibt sich eine Grenzfrequenz von  $\omega_g = 1,1\omega_0$ . Je nach Breite der Fehlergrenze ergibt sich eine andere optimale Dämpfungskonstante, um den Frequenzbereich des Sensors so groß wie möglich zu gestalten.

### 3. Grundlagen der Wälzlagerdiagnose

Eine wichtige prozessmesstechnische Aufgabe ist die Überwachung von Anlagen und Apparaten mit dem Ziel, unerwünschte Betriebszustände zu erkennen. Mit der Körperschalldiagnostik steht ein anerkanntes Analyseverfahren zur Verfügung. Gegenwärtig werden zur Körperschallmessung Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungssensoren eingesetzt. Piezoelektrische Beschleunigungssensoren nehmen aufgrund ihres messtechnischen Verhaltens eine besondere Stellung ein. Durch kleine Bauform, große Bandbreite und einen großen Dynamikbereich besitzen sie gewisse Vorteile vor anderen Sensoren. Ein wesentlicher Nachteil von Beschleunigungssensoren ist die prinzipbedingte Abnahme der Empfindlichkeit im Frequenzbereich unter 100Hz. Der Wälzlagerverschleiß äußert sich anhand periodischer bzw. quasi periodischer Signale. Die Schadensfrequenzen

sind analytisch berechenbar. Sie entstehen beim Überrollen der Wälzkörper von Defekten auf den Laufflächen. Dadurch wird eine periodische Impulsfolge erzeugt. Durch die Lagergeometrie, die Lagerdrehzahl sowie den Belastungszustand werden die Überrollfrequenzen bestimmt.

$$f_A = \frac{1}{2} f_n \cdot z \cdot \left( 1 - \frac{D_W}{D_T} \cdot \cos \alpha_B \right) \quad (4)$$

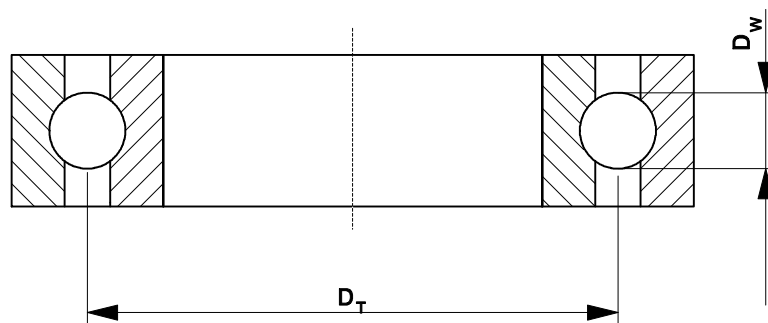
$$f_I = \frac{1}{2} f_n \cdot z \cdot \left( 1 + \frac{D_W}{D_T} \cdot \cos \alpha_B \right) \quad (5)$$

$$f_W = f_n \cdot \frac{D_W}{D_T} \cdot \left( 1 - \left( \frac{D_W}{D_T} \cdot \cos \alpha_B \right)^2 \right) \quad (6)$$

(4) Überrollfrequenz des Außenringes, (5) Überrollfrequenz des Innenringes, (6) Überrollfrequenz auf beiden Wälzbahnen

$D_T$  Teilkreisdurchmesser,  $D_W$  Wälzkörperdurchmesser,  $z$  Anzahl der Wälzkörper,  $f_n$

Drehfrequenz und  $\alpha_B$  Druckwinkel



**Bild 3:** Geschnittenes Wälzlager

Die wichtigsten Schadensfrequenzen sind die Innen- und Außenringfrequenzen. Die oben angegebenen Formeln beziehen sich auf einen feststehenden Außenring. Eine übliche Methode zur Auswertung der Messsignale ist das Hüllkurvenverfahren. Bei Anwendung von piezoelektrischen Beschleunigungssensoren erfolgt der Nachweis von niederfrequenten Schadensfrequenzen indirekt über ihre Oberwellen. Dadurch kann der Einfluss von niederfrequenten Störsignalen unterdrückt werden. Zur Ermittlung der Hüllkurve werden die Messsignale bandpassgefiltert, um sowohl störende niederfrequente Anteile als auch hochfrequentes Rauschen zu eliminieren. Da die Messsignale auch hochfrequente Anteile besitzen, bleibt ihre Periodizität im bandpassgefilterten Signal erhalten. Dies bewirkt, dass der hochfrequente Anteil als Trägerfrequenz wirkt und amplitudenmoduliert mit den

Überrollfrequenzen ist. Durch Gleichrichtung und anschließende Tiefpassfilterung des Signals  $s(t)$  (Demodulation) wird die Hüllkurve  $h(t)$  ermittelt. Das Spektrum dieser Hüllkurve enthält dann die gesuchte Überrollfrequenz des Lagerschadens. Mit der Hilbert-Transformierten lässt sich der Demodulationsvorgang mathematisch beschreiben

$$H\{s(t)\} = s(t) \cdot \frac{1}{\pi t} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(t')}{\pi(t-t')} dt \quad (7)$$

mit der Einhüllenden

$$h[s(t)] = |w(t)| = \sqrt{[s(t)]^2 + [H\{s(t)\}]^2} \quad (8)$$

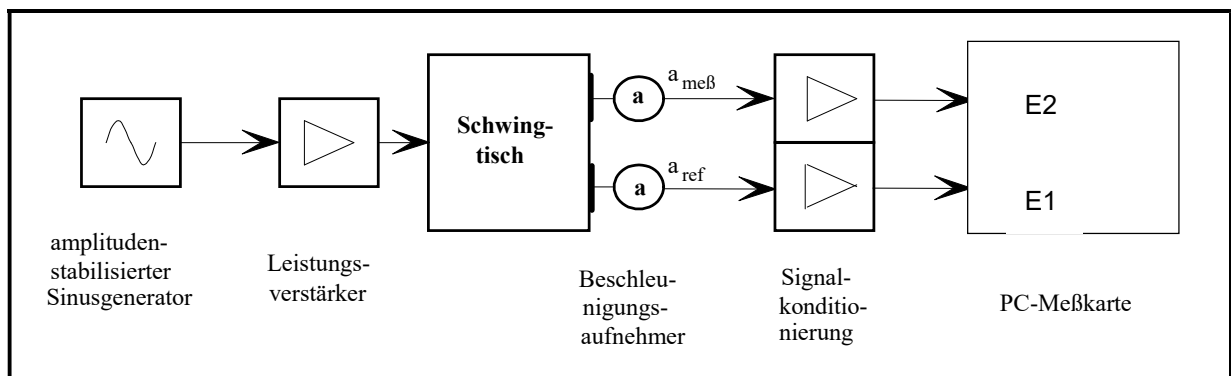
und der Phase

$$\phi[s(t)] = \arctan\left[\frac{H\{s(t)\}}{s(t)}\right] \quad (9)$$

Die Einhüllende kann dabei als der Betrag eines komplexen Signals  $w(t)$  aufgefasst werden. Der Realteil  $s(t)$  entspricht dabei dem bandpassgefilterten Rohsignal, und dessen Hilberttransformierte  $H\{s(t)\}$  bildet den Imaginärteil.

#### 4. Versuchsanordnung für den Beschleunigungssensor

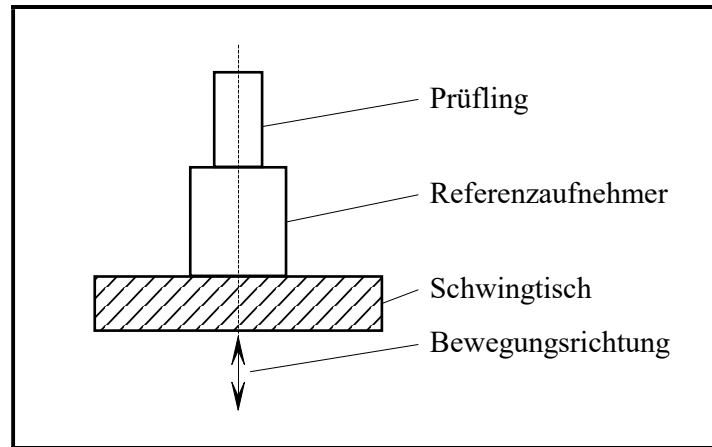
Das Blockschaltbild des Versuchsaufbaus zeigt das **Bild 3**.



**Bild 3:** Der Prinzipaufbau der Versuchsanordnung.

Das Signal des einstellbaren amplitudenstabilisierten Sinusgenerators regt in Verbindung mit einem 120 W-Leistungsverstärker den angeschlossenen Schwingtisch an. Auf der Platte des Schwingtisches sind, wie in **Bild 4** schematisch dargestellt, zwei Beschleunigungsaufnehmer angebracht.



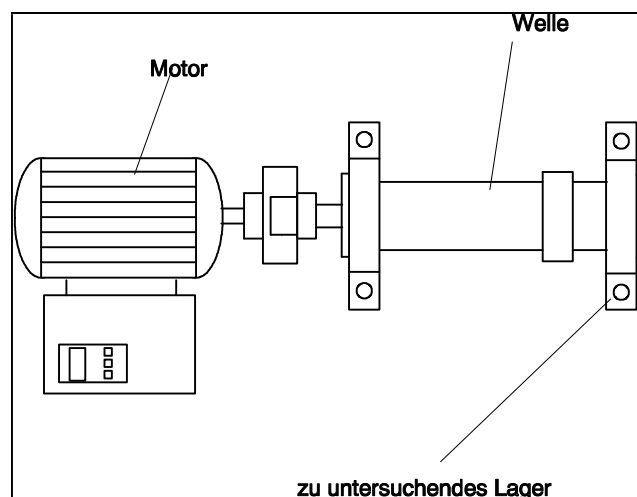


**Bild 4:** Die Anordnung der Beschleunigungsaufnehmer auf dem Schwingtisch.

Der Referenzempfänger besitzt einen größeren Arbeitsbereich als der Prüfling. Er nimmt das Referenzsignal  $a_{ref}$  auf. Dieses Signal entspricht innerhalb des Frequenzbereiches der Beschleunigung der Platte des Schwingtisches. Das am Prüfling gemessene Ausgangssignal  $a_{meß}$  weicht entsprechend der Übertragungsfunktion des Aufnehmers von der Beschleunigung der Platte des Schwingtisches ab. Die Signale beider Beschleunigungsaufnehmer werden von einer Signalkonditionierung in Spannungssignale umgewandelt. Diese Spannungen werden an die Eingänge 0 und 1 einer PC-Messkarte geführt.

## 5. Versuchsaufbau zur Wälzlagerdiagnose

Die Messapparatur besteht im Wesentlichen aus einer beidseitig gelagerten Welle, welche über einen Drehstrommotor angetrieben wird (**Bild 5**). Die Drehzahl des Motors lässt sich stufenlos über einen Wechselrichter von 0 - 1500 Upm einstellen. Zu untersuchen sind die Radial-Rillen-Kugellager zweier Wellen, wobei eines intakt und das andere schadhaft ist. Zur Vergleichsmessung sind die Wellen im Versuchsaufbau auswechselbar.



**Bild 5:** Versuchsaufbau

Die Befestigung des Beschleunigungssensors erfolgt durch einen magnetischen Fuß auf dem Lagerbock. Zur Drehzahlmessung dient ein optischer Reflexsensor. Die Drehzahl kann mit einem Oszilloskop und einem Zähler bestimmt werden. Die Körperschallmessung erfolgt mit einem Beschleunigungssensor, der an eine Messwerterfassungskarte angeschlossen wird

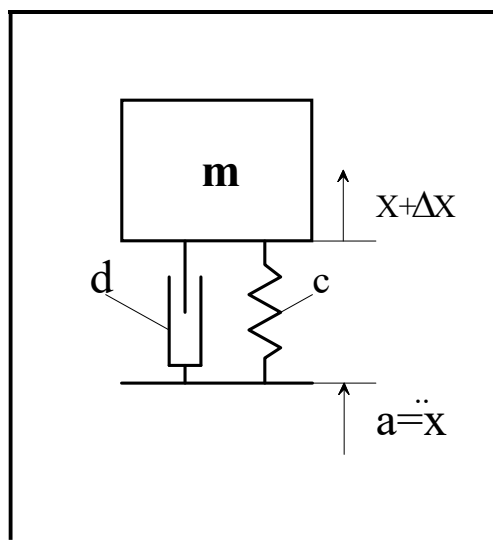
## 6. Vorbereitung

Die folgenden Aufgaben dienen der Vorbereitung auf den Versuch. Aufgabe 3 ist schriftlich zu lösen.

1. Informieren Sie sich über die Methoden der experimentellen Systemanalyse.
2. Informieren Sie sich über verschiedene Sensoren zur Beschleunigungsmessung.
3. Berechnen Sie allgemein die Übertragungsfunktionen  $G_a(s) = \frac{U_A(s)}{a(s)}$  (als

Beschleunigungssensor) und  $G_x(s) = \frac{U_A(s)}{X(s)}$  (als Wegsensor) des im Versuch verwendeten

Beschleunigungsaufnehmers. Der mechanische Teil des Beschleunigungsaufnehmers kann vereinfacht durch folgendes Feder-Masse-Dämpfungssystem (**Bild 6**) beschrieben werden.



**Bild 6:** Die abstrakten Elemente des Beschleunigungssensors als Feder-Masse-Dämpfungssystem

4. Das bei der Wälzlagerdiagnose verwendete Hüllkurvenverfahren entspricht der Demodulation eines amplitudenmodulierten Signals. Skizzieren Sie ein AM-Spektrum.

5. Die Wälzlagerdiagnose bedient sich mehrfach der diskreten Fouriertransformation DFT. Welche Informationen liefert die DFT eines abgetasteten Signals? Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Abtastfrequenz  $f_s$ , der Anzahl der Messpunkte  $N$  und dem Abstand  $\Delta f$  der Spektrallinien?

## 7. Aufgaben

### 7.1. Aufnahme des Bode-Diagrammes

Nehmen Sie das Bode-Diagramm des Prüflings in einem Frequenzbereich von **20 Hz** bis **20 kHz** auf. Eingangsgröße für den Prüfling ist die Beschleunigung des Schwingtisches, deren Wert am Referenzempfänger abgenommen wird. Benutzen Sie dazu die Module „Filter“, „Verstärker“, „Gleichrichter“. Beachten Sie dabei, dass die Abtastfrequenz der Messkarte unter der größten Signalfrequenz liegt. Benutzen Sie die Kanäle 0 und 1 der Messkarte. Bauen Sie sich selbständig ein Messprogramm auf.

### 7.2. Approximation der Übertragungsfunktion

Aus dem unter 5.2.1 aufgenommenen Bode-Diagramm ist die Übertragungsfunktion

$G(s) = \frac{U_A(s)}{a(s)}$  zu bestimmen. Ermitteln Sie hierfür die Resonanzfrequenz  $f_{res}$  und die

Dämpfungskonstante  $D_0$  eines angenommenen Schwingungsgliedes.

Vergleichen Sie die experimentell ermittelte Übertragungsfunktion mit der (unter 6.3) durch theoretische Überlegungen gewonnenen Übertragungsfunktionen eines Beschleunigungs- bzw. Wegsensors.

### 7.3. Wälzlagerdiagnose

Befestigen Sie den Beschleunigungssensor zur Körperschallmessung mit einem Magnetfuß auf dem Lagerbock. Die Messwerterfassung erfolgt über Modulkanal „Wälzlager“ und Kanal 0 der Messkarte. Benutzen Sie das Messprogramm „Welle“. Messen Sie den Körperschall der Rillen-Kugellager beider Wellen nacheinander bei Drehzahlen von ca. 500 und 1000  $\text{min}^{-1}$ . Ändern Sie die Drehzahl systematisch in kleinen Schritten und beobachten dabei die

Linienbewegung im Spektrum. Stellen Sie entsprechend Gleichung (4) und (5) fest, ob sich der Schaden im Innen-oder Außenring befindet:  $D_T = 6,5 \text{ cm}$ ;  $D_W = 1,19 \text{ cm}$ ,  $z = 9$ ,  $\alpha_B = 0^\circ$ .

## 8. Literatur

Hauptmann, P.: Sensoren. Prinzipien und Anwendungen. - Carl Hanser Verlag; München, Wien; 1991.

Herold, H.: Sensortechnik. - Hüthig Verlag Heidelberg 1993

Schoppnies, E.: Lexikon der Sensortechnik. - VDE-Verlag; Berlin, Offenbach; 1992.

Töpfer, H.: Grundlagen der Automatisierungstechnik. - Verlag Technik; Berlin 1989.

Bachman, W.: Signalanalyse. Vieweg Verlagsgesellschaft. Braunschweig/Wiesbaden (1992), S. 158ff.

Kolerus, J.: Zustandsüberwachung von Maschinen. expert Verlag. Renningen (1995).