

Allgemeines Messtechnisches Labor

Experimentelle Schwingungsanalyse

Name:

Matrikelnummer:

Gruppennummer:

Versuch am:

Version 2.6/ 16. April 2014/ TL / HW

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	4
2	Theoretische Grundlagen	4
2.1	Einmassen-Schwinger (starrer Balken)	4
2.1.1	Differentialgleichung des fremderregten Schwingers	5
2.1.2	Eigenverhalten des Systems	6
2.1.3	Vergrößerungsfunktionen V_1 und V_3	7
2.2	Kontinuumsschwinger (elastischer Balken)	8
3	Versuchsanordnungen	10
3.1	Einmassen-Schwinger	10
3.1.1	Versuchsaufbau	10
3.1.2	Wegaufnehmer	11
3.1.3	Messgeräte	11
3.1.4	Elektrodynamischer Krafterreger (Shaker)	11
3.2	Kontinuumsschwinger	11
3.2.1	Versuchsaufbau	11
4	Versuchsdurchführung	12
4.1	Einmassen-Schwinger	12
4.1.1	Ausschwingversuch	12
4.1.2	Unwuchterregter Schwinger	12
4.1.3	Krafterregter Schwinger	12
4.2	Elastischer Balken	13
4.2.1	Visualisierung von Eigenformen	13
5	Versuchsauswertung	13
5.1	Einmassen-Schwinger	13
5.2	Elastischer Balken	13
6	Allgemeine Hinweise	14
6.1	Versuchsvorbereitung	14
6.2	Ort der Versuche	14
6.3	Ausarbeitung	14

Verwendete Formelzeichen

α	Winkelkoordinate
F_D	Dämpferkraft
F_E	Erregerkraft (allgemein)
F_F	Federkraft
$J^{(A)}$	Trägheitsmoment des Balkens um das Gelenk A
b	Dämpfungskoeffizient
c	Federkonstante
m	Unwuchtmasse
r	Unwuchtradius
κr	Normierte Unwuchterregeramplitude
\hat{F}	Erregerkraftamplitude
\hat{u}	Normierte Krafterregeramplitude
x	gemessene Auslenkung
D	Dämpfungsgrad (Lehrsches Dämpfungsmaß)
ψ	Phasenwinkel
f	Frequenz
f_0	Eigenfrequenz
ω	Kreisfrequenz
ω_0	Eigenkreisfrequenz
ω_d	Gedämpfte Eigenkreisfrequenz
Ω	Erregerkreisfrequenz
η	Frequenzverhältnis $\eta = \frac{\Omega}{\omega_0}$
Λ	logarithmisches Dekrement
t	Zeit
T_a	Periodendauer der freien, gedämpften Schwingung
V_1, V_3	Amplitudenfrequenzgang (Vergrößerungsfunktion)
Ψ	Phasenfrequenzgang
k	Wellenzahl
w	Durchsenkung
μ	Massenverteilung ($\frac{kg}{m}$)
EI	Biegesteifigkeit

1 Vorwort

In nahezu allen Bereichen des Maschinenbaus treten Schwingungen auf. Meistens handelt es sich dabei um unerwünschte Effekte, die die Funktion einer Maschine oder einer Anlage beeinträchtigen. Beispiele sind Schwingungen von Werkzeugmaschinen, welche Rattereffekte zur Folge haben oder die Schwingungen von Bauwerken, wie z.B. Brücken oder Hochhäuser, deren Struktur geschädigt werden kann. In allen diesen Fällen müssen Maßnahmen ergriffen werden, um diese Schwingungen zu reduzieren.

Man kann sich aber auch schwingende – insbesondere stark gedämpfte Systeme – zu Nutze machen. Hier sei als Beispiel die Radaufhängung eines PKW genannt, welche zum Fahrkomfort beiträgt.

In der Praxis sind im Wesentlichen zwei Erregungsmechanismen für Schwingungen wichtig:

- Schwingungen, die durch eine von außen angreifende Kraft erzeugt werden (krafterregte Schwingungen),
- Schwingungen, die durch eine bewegte Masse bzw. eine Unwucht erzeugt werden (unwuchterregte Schwingungen).

In diesem Laborversuch sollen an dem Beispiel eines schwingungsfähigen Balkens, welcher vom Prinzip her einer PKW-Radaufhängung entspricht, beide Erregungsprinzipien experimentell untersucht werden. Ziel ist es dabei, ein grundlegendes Verständnis für das Verhalten eines einfachen Einmassenschwingers bei Kraft- bzw. Unwuchterregung zu erreichen.

Der weiterführende Teil des Versuchs soll einen Einblick in die experimentelle Schwingungsanalyse an realen Systemen geben. Hierzu sollen für die ersten Eigenformen eines eingespannten Balkens die zugehörigen Eigenfrequenzen und Dämpfungswerte bestimmt werden. Diese Werte werden experimentell anhand des Versuchsaufbaus überprüft

Bitte bearbeiten Sie vor Versuchsbeginn die Aufgabe auf Seite 10.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Einmassen-Schwinger (starrer Balken)

Im Mittelpunkt des ersten Teils dieses Laborversuches steht ein starrer Balken (Abb. 1), welcher Drehschwingungen um einen festen Auflagerpunkt A ausführen kann. Wendet man auf den Balken den Drallsatz mit A als Momentenbezugspunkt an, so erhält man

$$J^{(A)}\ddot{\alpha} = -F_D\ell_D - F_F\ell_F + F_E(t)\ell_E. \quad (1)$$

Hierbei sind F_F die Feder- und F_D die Dämpferkraft, die beide der Bewegung entgegengerichtet sind. Für kleine Winkel α kann man F_D durch $b\ell_D\dot{\alpha}$ ersetzen, F_F durch $c\ell_F\alpha$. $F_E(t)$ ist die zeitlich veränderliche Erregerkraft. Betrachtet man zunächst den Balken ohne Erregung, so gilt $F_E(t) = 0$. Man erhält die *homogene Differentialgleichung* des Einmassen-Drehschwingers

$$J^{(A)}\ddot{\alpha} + b\ell_D^2\dot{\alpha} + c\ell_F^2\alpha = 0. \quad (2)$$

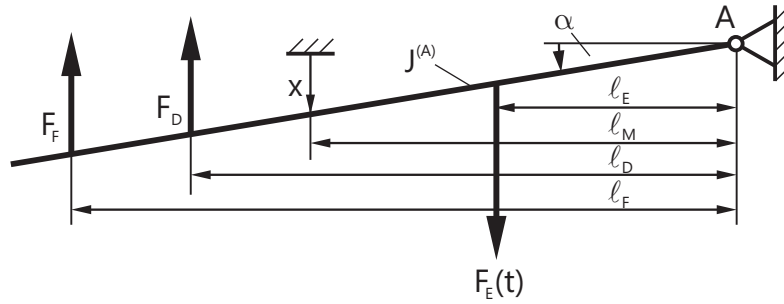


Abb. 1: Freigeschnittener Balken

2.1.1 Differentialgleichung des fremderregten Schwingers

Wie bereits erwähnt, stehen zwei Erregungsmechanismen zur Verfügung: Unwucht- und Krafterregung. Bei einer Unwucht erregen die Trägheitskräfte der Unwuchtmasse das System. Entsprechend gilt

$$F_E(t) = m\ddot{u} = mr\Omega^2 \cos(\Omega t) \quad (3)$$

mit der Unwuchtbeschleunigung \ddot{u} , der Unwuchtmasse m und dem Unwuchtradius r . Bei Krafterregung ist

$$F_E(t) = \hat{F} \cos(\Omega t) \quad (4)$$

mit der Erregerkraftamplitude \hat{F} . Der Hebelarm ℓ_E ist für beide Erregungsarten gleich. Die Auslenkung des Balkens wird durch einen Wegtaster an der Stelle ℓ_M ermittelt. Aus diesem Grund soll die Auslenkung x an dieser Stelle als Bezugsvariable der DGL dienen. Es gilt der Zusammenhang

$$x = \ell_M \alpha \quad \text{für } \alpha \ll 1. \quad (5)$$

Eingesetzt und umsortiert ergibt sich somit für Unwuchterregung

$$J^{(A)} \ddot{x} + b \ell_D^2 \dot{x} + c \ell_F^2 x = \ell_M \ell_E m \Omega^2 r \cos(\Omega t) \quad (6)$$

und für Krafterregung

$$J^{(A)} \ddot{x} + b \ell_D^2 \dot{x} + c \ell_F^2 x = \ell_M \ell_E \hat{F} \cos(\Omega t). \quad (7)$$

Dividiert man Gl. (6) bzw. Gl. (7) durch $J^{(A)}$ und führt die Abkürzungen

$$\begin{aligned} \omega_0^2 &= \frac{c \ell_F^2}{J^{(A)}} \\ D &= \frac{b \ell_D^2}{2J^{(A)} \omega_0} \\ \kappa &= \frac{m \ell_E \ell_M}{J^{(A)}} \\ \hat{u} &= \frac{\hat{F} \ell_E \ell_M}{J^{(A)}} \end{aligned}$$

ein, so erhält man die allgemeine Schwingungs-Differentialgleichung

$$\ddot{x} + 2D\omega_0 \dot{x} + \omega_0^2 x = \kappa r \Omega^2 \cos(\Omega t) \quad (8)$$

für Unwuchterregung bzw.

$$\ddot{x} + 2D\omega_0 \dot{x} + \omega_0^2 x = \hat{u} \cos(\Omega t) \quad (9)$$

für Krafterregung. ω_0 ist die Eigenkreisfrequenz, D der Dämpfungsgrad, κr die normierte Unwuchtamplitude und \hat{u} die Kraftamplitude. Manchmal findet noch eine Normierung die-

ser Differentialgleichungen statt, bei der die Zeit t durch die Eigenzeit $\tau = \omega_0 t$ ersetzt wird. Hierauf soll in diesem Versuch nicht weiter eingegangen werden.

Aus dieser Normierung der DGL stammt das oft verwendete Verhältnis

$$\eta = \frac{\Omega}{\omega} \quad (10)$$

der Erregerkreisfrequenz zur Eigenkreisfrequenz des Systems.

Der Weg zur Lösung der Differentialgleichungen (8) und (9) soll an dieser Stelle nicht weiter beschrieben werden. Für die weiteren Betrachtungen wird vom fertigen Endergebnis ausgegangen. Es gilt

$$x(t)_{gesamt} = x(t)_{hom} + x(t)_{part}, \quad (11)$$

d. h. die Gesamtlösung setzt sich aus der homogenen Lösung $x(t)_{hom}$ und der partikulären Lösung $x(t)_{part}$ zusammen. Diese Anteile sollen im Weiteren analysiert werden.

2.1.2 Eigenverhalten des Systems

Die homogene Lösung

$$\begin{aligned} x(t)_{hom} &= e^{-D\omega_0 t} [\hat{q}_1 \cos(\omega_d t) + \hat{q}_2 \sin(\omega_d t)] \\ &= \hat{q} e^{-D\omega_0 t} \cos(\omega_d t - \psi) \end{aligned} \quad (12)$$

mit

$$\hat{q} = \sqrt{\hat{q}_1^2 + \hat{q}_2^2}, \quad \omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - D^2} \quad \text{und} \quad \psi = \arctan\left(\frac{\hat{q}_2}{\hat{q}_1}\right) \quad (13)$$

beschreibt die gedämpfte Eigenschwingung, die ohne Erregung (bzw. bei konstanter Erregerkraft) auftritt. In Gl. (12) sind zwei häufig verwendete Schreibweisen aufgeführt. Im Weiteren wird nur noch die Letztere mit der Amplitude \hat{q} und dem Phasenwinkel ψ betrachtet.

Bei der Untersuchung des Ausschwingverhaltens liegt die homogene Lösung vor; der Partikuläranteil entfällt. Das Verhältnis zwischen einem beliebigen Maximum x_n und dem nach k vollen Perioden folgenden Maximum x_{n+k} lautet

$$\ln \frac{x_n}{x_{n+k}} = k \frac{2\pi D}{\sqrt{1 - D^2}} = k\Lambda. \quad (14)$$

Λ wird als *logarithmisches Dekrement* bezeichnet. Der zeitliche Abstand zwischen dem Maximum x_n und dem Maximum x_{n+k} beträgt dabei

$$kT_a = k \frac{2\pi}{\omega_0 \sqrt{1 - D^2}}. \quad (15)$$

Der Dämpfungsgrad eines Systems läßt sich aus einem Ausschwingversuch auch ohne Kenntnis der Zeitachse ermitteln, da er bereits aus dem Amplitudenverhältnis zweier aufeinanderfolgender Maxima berechnet werden kann.

Die Maxima der gedämpften Schwingung sind im Übrigen gegenüber der ungedämpften um den Winkel

$$\delta = \arctan\left(\frac{D}{\sqrt{1 - D^2}}\right) \quad (16)$$

vorverschoben.

2.1.3 Vergrößerungsfunktionen V_1 und V_3

Die partikuläre Lösung der DGL ist abhängig von der Erregung. Es ergibt sich für Unwuchterregung

$$x(t)_{part} = (\kappa r) V_1(\eta) \cos(\Omega t - \Psi) \quad (17)$$

bzw. für Krafterregung

$$x(t)_{part} = \hat{u} V_3(\eta) \cos(\Omega t - \Psi) \quad (18)$$

V_1 und V_3 geben somit die Amplitude der Systemantwort in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz der Erregung (bezogen auf die Eigenkreisfrequenz des Systems) an. Sie werden deshalb als Vergrößerungsfunktionen bezeichnet. Sie sind die Beträge der Übertragungsfunktion von der (normierten) Erregung zur Systemantwort und lauten

$$V_1(\eta) = \frac{\eta^2}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2}} \quad (19)$$

bzw.

$$V_3(\eta) = \frac{1}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2}}. \quad (20)$$

Für den Phasenwinkel Ψ gilt in *beiden* Fällen

$$\tan \Psi(\eta) = \frac{2D\eta}{1 - \eta^2}. \quad (21)$$

Abb. 2 zeigt die allgemein übliche Darstellung von Betrag und Phase der Vergrößerungsfunktionen.

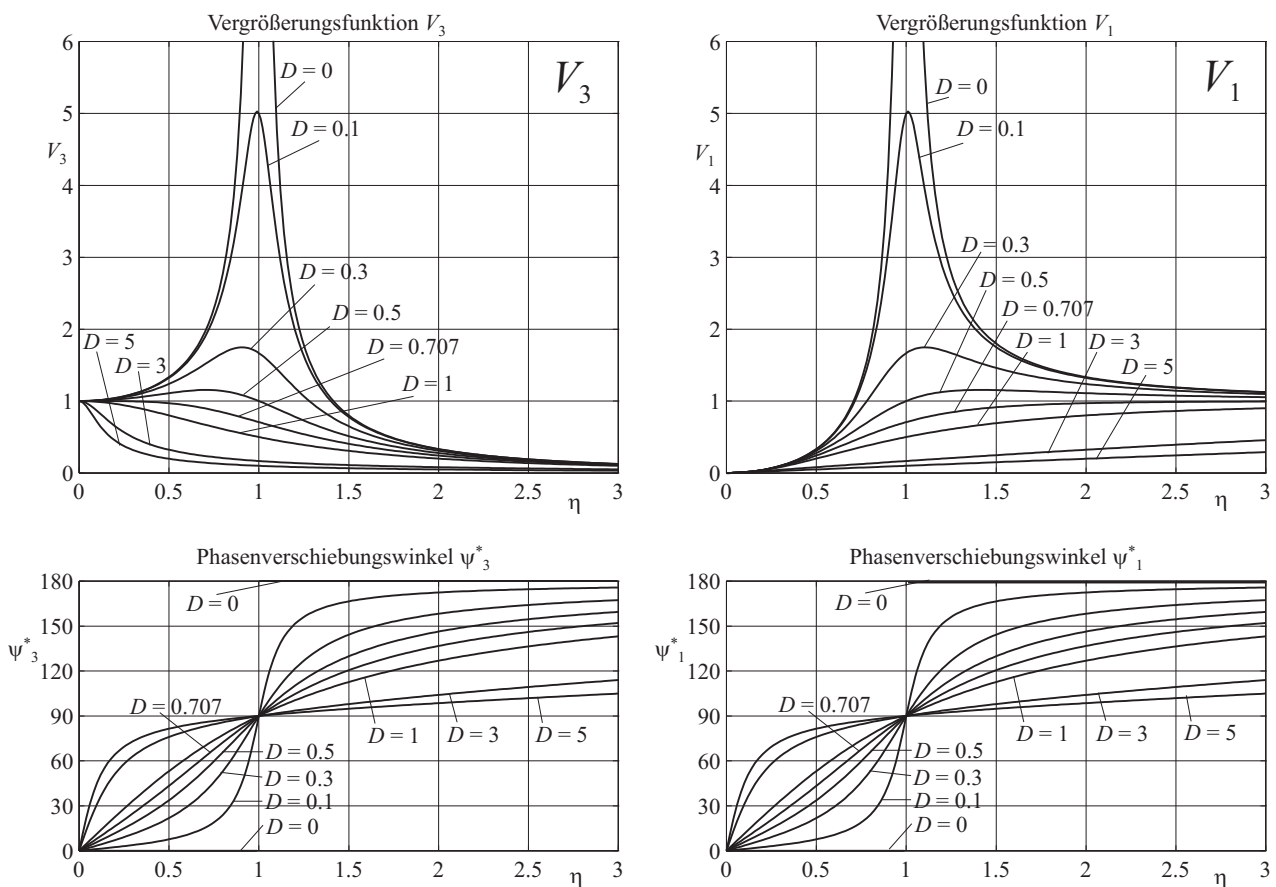


Abb. 2: Vergrößerungsfunktionen und Phasenverschiebungswinkel

Steht – wie in diesem Versuch – nur ein schmales gemessenes Frequenzband zur Verfügung, so lässt sich der Dämpfungsgrad D nicht nach Gl. (19) bzw. Gl. (20) bestimmen. Gl. (21) ist ebenfalls nicht anwendbar, da sich hier die Messungenauigkeiten zu stark bemerkbar machen. Statt dessen gilt für *schwach gedämpfte* Systeme eine Näherungslösung.

$x_0 = x(f_0)$ sei die Amplitude der Schwingung bei der Resonanzfrequenz. Man sucht nun im Amplitudendiagramm die Frequenzen f_1 und f_2 , für die

$$x(f_1) = x(f_2) = \frac{1}{\sqrt{2}}x_0 \quad (22)$$

gilt (vgl. Abb. 3). Dann lässt sich der Dämpfungsgrad näherungsweise zu

$$D = \frac{f_2 - f_1}{2f_0} \quad (23)$$

angeben. Außerdem gilt

$$x_0 \approx x_{max}. \quad (24)$$

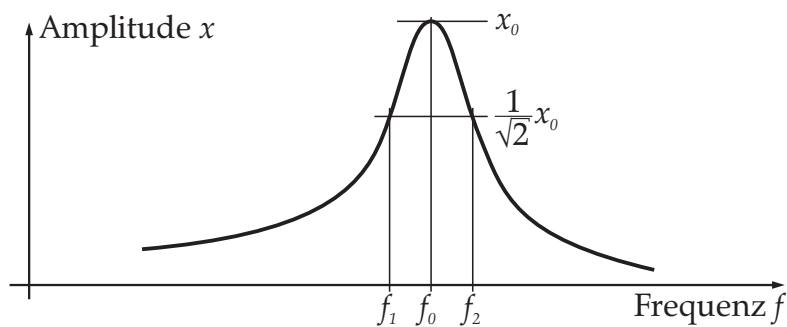


Abb. 3: Näherungsweise Bestimmung von D

2.2 Kontinuumsschwinger (elastischer Balken)

In der Praxis hat man es oft nicht mit einfachen Einmassen-Schwingern zu tun, wie sie im ersten Versuchsteil untersucht werden. In realen Bauteilen sind die Massen und Federn (Steifigkeiten) kontinuierlich verteilt, wodurch sie theoretisch unendlich viele Freiheitsgrade besitzen. Man spricht dann von Kontinuumsschwingern.

Man kann einen Kontinuumsschwinger als den Grenzfall eines Mehrmassenschwingers betrachten. Durch eine Approximation mit einer endlichen Anzahl von Freiheitsgraden lässt sich das Schwingverhalten in der Praxis zufriedenstellend annähern. Hierzu wird meist die Methode der Finiten Elemente verwendet. Hierauf soll aber in diesem Versuch nicht eingegangen werden.

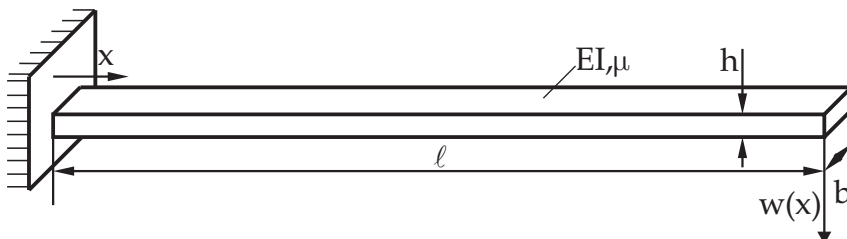


Abb. 4: Modell des elastischen Balkens

Einen einfachen Fall eines Kontinuumsschwingers stellt ein einseitig eingespannter, rechteckiger Balken mit konstanter Biegesteifigkeit EI und konstanter Massenverteilung $\mu = \rho A$

(Abb. 4) dar. Für diesen sind die Eigenformen analytisch herleitbar.

Aus der Biegelinie eines Balkens lässt sich die Bewegungs-Differentialgleichung eines schwingenden Balkens (unabhängig von der Lagerung) zu

$$w''''(x, t) = -\frac{\mu}{EI} \ddot{w}(x, t) \quad (25)$$

bestimmen. w bezeichnet die Balkendurchsenkung, $()'$ die Ableitung nach dem Weg und $(\dot{\ })$ die Ableitung nach der Zeit.

Zur Lösung dieser DGL wählt man einen Produktansatz gemäß

$$w(x, t) = W(x) \cos \omega t, \quad (26)$$

d.h. man geht davon aus, daß sich die Auslenkung über die Balkenlänge und die Zeit mit zwei getrennten Funktionen beschreiben lässt. Als Zeitfunktion wird eine harmonische Funktion (wie beim Einmassenschwinger) angenommen. Nach Einsetzen in Gl. (25) und Umformen erhält man die Gleichung

$$W''''(x) - \frac{\mu \omega^2}{EI} W(x) = 0. \quad (27)$$

Zur Lösung von Gl. (27) führt man zur Abkürzung die Wellenzahl k mit

$$k^4 = \frac{\mu \omega^2}{EI} \quad (28)$$

ein, wodurch sich Gl. (27) zu

$$W''''(x) - k^4 W(x) = 0 \quad (29)$$

vereinfacht. Diese DGL besitzt unendliche viele Lösungen, welche durch die Wellenzahlen $k_n = 1, 2, \dots$ charakterisiert werden. Der allgemeine Lösungsansatz zu dieser DGL lautet

$$W_n(x) = a_{1,n} \sin k_n x + a_{2,n} \cos k_n x + a_{3,n} \sinh k_n x + a_{4,n} \cosh k_n x, \quad (30)$$

wobei sich die Konstanten $a_{1,n} \dots a_{4,n}$ durch Anpassung an die jeweiligen Randbedingungen ergeben. Die zugehörigen Lösungen $W_n(x)$ werden *Eigenformen* genannt.

Um die zugehörigen *Eigenfrequenzen* zu berechnen, stellt man mit den Randbedingungen die Frequenzgleichung auf. Für den einseitig eingespannten Balken ergibt sich (nach etwas Umformung)

$$1 + \cos \lambda \cosh \lambda = 0. \quad (31)$$

mit $\lambda = k \cdot \ell$. Diese Gleichung hat ebenfalls unendlich viele Lösungen λ_n mit den zugehörigen Eigenfrequenzen ω_n , welche sich aus Gl. (28) berechnen lassen.

Die Lösungen dieser Gleichungen müssen nicht jedesmal von Hand berechnet werden, sondern sind in Tabellen nachschlagbar. Aus praktischen Gründen werden meist die Werte für $\frac{\lambda_n^2}{2\pi}$ angegeben. Für unseren Balken lauten sie für die ersten 3 Eigenfrequenzen:

n	1	2	3	>3
$\frac{\lambda_n^2}{2\pi}$	0,560	3,507	9,819	$\approx \frac{\pi}{8} (2n - 1)^2$

Über den Zusammenhang

$$f_n = \frac{\lambda_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\mu \ell^4}} \quad (32)$$

ergeben sich hieraus unmittelbar die Eigenfrequenzen f_n .

Aufgabe:

Berechnen Sie für folgende Balken aus Stahl bzw. Aluminium die Massenverteilung und die Biegesteifigkeit. Bestimmen Sie hieraus dann die ersten 3 Eigenfrequenzen.

Mat.	ℓ [m]	$h \times b$ [mm ²]	EI [Nm ²]	μ [kg/m]	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_3 [Hz]
St	0,94	3×40					
St	0,4	5×40					
St	0,4	10×20					
Al	0,4	10×20					

$$(E_{St} = 210000 \frac{N}{mm^2}, \rho_{St} = 7800 \frac{kg}{m^3}, E_{Al} = 70000 \frac{N}{mm^2}, \rho_{Al} = 2700 \frac{kg}{m^3})$$

3 Versuchsanordnungen

3.1 Einmassen-Schwinger

3.1.1 Versuchsaufbau

Abb. 5 zeigt schematisch den Versuchsaufbau, an dem der erste Teil des Versuchs durchgeführt wird. Der Aufbau entspricht dem Modell aus Abb. 1. Der Balken wird als starr betrachtet. Im Abstand ℓ_F vom Gelenk ist er federnd aufgehängt. Bei ℓ_E ist ein Unwuchterreger befestigt, direkt darunter ein elektrodynamischer Krafterreger, der alternativ zur Unwuchterregung verwendet werden kann. Ein geschwindigkeitsproportionaler Dämpfer befindet sich bei ℓ_D .

Die Auslenkung des Balkens wird unmittelbar über einen induktiven Wegsensor aufgenommen, der im Abstand ℓ_M vom Gelenk angebracht ist. Die ausgegebene Spannung des Sensors ist proportional zur Amplitude der Auslenkung. Das Amplitudensignal und die Winkellage, bzw. Rotationsgeschwindigkeit der Unwuchtmasse wird am Oszilloskop ermittelt.

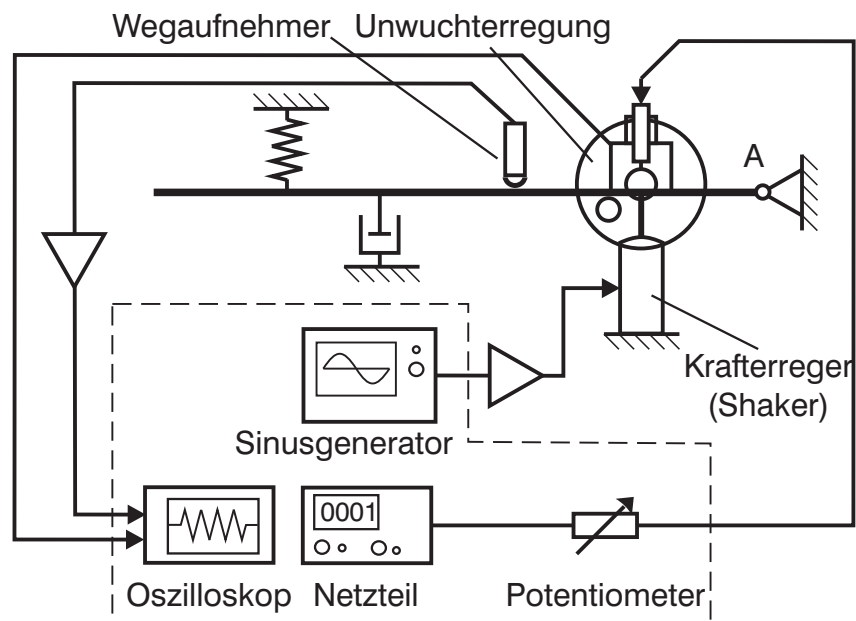


Abb. 5: Versuchsaufbau

Der Motor gibt hierfür ein Rechtecksignal mit sechs Pulsen pro Umdrehung aus. Das Übersetzungsverhalten von Motordrehzahl zur rotierenden Unwuchtmasse beträgt 1 zu 2. Somit entsprechen zwölf Pulsen einer Umdrehung der Unwuchtscheiben.

$$f_{Unwucht} = \frac{f_{Drehzahlmonitor}}{12} \quad (33)$$

3.1.2 Wegaufnehmer

Die Schwingungsamplitude des Balkens wird mit einem Wegaufnehmer ermittelt. Dieser basiert auf dem Prinzip der Änderung der Induktivität einer Spule, wenn deren magnetische Permeabilität durch einen beweglichen metallischen Kern beeinflusst wird. Der Sensor liefert als Ausgangssignal eine Spannung, die der gemessenen Amplitude proportional ist.

3.1.3 Messgeräte

Zur Bestimmung der Frequenz und Amplitude des schwingenden Balkens wird ein Oszilloskop verwendet. Das Signal des piezoelektrischen Beschleunigungssensors wird hierzu vorab in einem ICP-Verstärker verstärkt und dann an das Oszilloskop weitergegeben.

Die Ermittlung der Motor- und Unwuchtdrehzahl geschieht ebenfalls mit diesem Oszilloskop. Die Drehzahl wird als periodisches Rechtecksignal angezeigt und lässt sich auf die aktuelle Drehzahl umrechnen. Durch die Verwendung von mehreren Eingängen können mit einem einzelnen Oszilloskop unterschiedliche Signale gleichzeitig ausgewertet und unabhängig skaliert werden.

3.1.4 Elektrodynamischer Krafterreger (Shaker)

Ein Shaker ist ein Krafterreger nach dem Lautsprecherspulenprinzip. Sein beweglicher Teil wird durch weiche Federn geführt. Die beweglichen Teile mit der Spule sind besonders leicht. Der Strom durch die Spule des Shakers ist mit guter Näherung proportional zur erzeugten Kraft.

3.2 Kontinuumsschwinger

3.2.1 Versuchsaufbau

Für die Untersuchung einseitig eingespannter Balken steht eine Klemmvorrichtung auf einer massiven Grundplatte zur Verfügung, in welche verschiedene Balken eingespannt werden können. Auf den Balken können mit Spezialwachs Beschleunigungsaufnehmer (s.u.) befestigt werden. Es stehen die 4 Balken aus der Aufgabe auf S. 10 für Untersuchungen zur Verfügung.

Weiterhin ist hier ebenfalls ein Krafterreger vorhanden, mit welchem die eingespannten Balken erregt werden können.

Die Schwingungen des Balkens werden ebenfalls mit zwei der bereits beschriebenen Beschleunigungsaufnehmer ermittelt. Durch ihre Verwendung zusammen mit dem Oszilloskop können die jeweiligen Amplituden an der aktuellen Sensorposition entlang des Balkens gemessen werden.

4 Versuchsdurchführung

4.1 Einmassen-Schwinger

4.1.1 Ausschwingversuch

Der erste Versuchsabschnitt besteht in der Aufnahme des Ausschwingversuches. Hierzu wird der Balken von Hand ausgelenkt und losgelassen. Die Ausschwingbewegung wird mit dem Oszilloskop aufgezeichnet. Anschließend wird die Ausschwingbewegung ausgedruckt werden, um daraus das logarithmische Dekrement zu bestimmen.

4.1.2 Unwuchterregter Schwinger

Im zweiten Versuchsabschnitt wird der Schwinger durch eine Unwucht erregt. Der Unwuchterreger besteht aus einem Antriebsmotor und zwei Unwuchtscheiben. Der Motor treibt die Scheiben über einen Zahnriemen an. Beim Versuch wird die Erregerfrequenz (\sim Motordrehzahl) geändert. Dies geschieht mit Hilfe des zwischen das Netzteil und den Motor geschalteten Potentiometers. Das Netzteil liefert dabei eine konstante Betriebsspannung. Die Motordrehzahl kann so über das Potentiometer eingestellt und am Oszilloskop abgelesen werden.

Um eine günstige Wahl der Messpunkte zu treffen, ist es notwendig, durch Veränderung der Motordrehzahl die Erregerfrequenz so lange zu variieren, bis die Amplitude ihre maximalen Werte erreicht. In der Umgebung dieser Resonanzstelle sind später die Abstände der Messpunkte ausreichend klein zu wählen, um den steilen Anstieg der Resonanzkurve durch genügend Messpunkte genau zu erfassen. Die Wahl der Messpunkte ist frei wählbar, es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass eine ausreichende Anzahl von Messpunkten für die spätere Auswertung und Skizzierung der Vergrößerungsfunktion vorhanden sind. Dies gilt insbesondere für den Bereich des Maximums der Resonanzkurve.

Die Vergrößerungsfunktion wird punktweise aufgenommen. Dabei wird zuerst eine gewünschte Motordrehzahl eingestellt. Wenn der Einschwingvorgang abgeklungen ist, wird die Motordrehzahl und die zugehörige Amplitude notiert.

4.1.3 Krafterregter Schwinger

Für den dritten Versuchsteil wird der Motor der Unwuchterregung abgeschaltet und der elektrodynamische Krafterreger elektrisch mit dem zugehörigen Leistungsverstärker verbunden.

Da die Kraft des Shakers proportional zum Strom ist, der durch seine Spule fließt, ist somit zur Bestimmung der Kraft eine Messung des Stromes ausreichend. Zur Bestimmung der Vergrößerungsfunktion wird der Shaker von Wechselstrom variabler Frequenz durchflossen und die Reaktion des Schwingers wieder mit dem Beschleunigungssensor gemessen.

Die Amplituden des Beschleunigungssignals sowie die Anregungsfrequenz des Shakers werden mit Hilfe des Oszilloskops bestimmt. Für die Wahl der Messpunkte gilt das unter 4.1.2 Gesagte entsprechend.

4.2 Elastischer Balken

4.2.1 Visualisierung von Eigenformen

Der Balken $3 \times 40 \text{ mm}^2$, $\ell = 1 \text{ m}$ wird eingespannt und mit dem Krafterreger gekoppelt. Mit einem Sinusgenerator werden die vorab berechneten Eigenfrequenzen eingestellt und die Schwingungsform des Balkens beobachtet. Durch Korrektur der Frequenz des Sinusgenerators sind die realen Eigenfrequenzen zu suchen und zu notieren. Die erkennbaren Eigenformen sind zu skizzieren. Zudem soll diskutiert werden, wodurch eventuelle Abweichungen zwischen den errechneten Werten und den real gemessenen Werten entstehen können.

5 Versuchsauswertung

5.1 Einmassen-Schwinger

Aus dem Ausschwingversuch ist das logarithmische Dekrement Λ zu ermitteln. Für die Bestimmung von Λ und D werden die Amplituden x_n auf halblogarithmischem Papier über der Anzahl n der Schwingungen aufgetragen. Durch diese Punkte ist eine Ausgleichsgerade zu legen. Aus der Steigung dieser Geraden lässt sich Λ und daraus D berechnen (vgl. Abschnitt 2.1.2).

Für krafterregte und unwuchterregte Schwingungen sollen jeweils folgende Auswertungen durchgeführt werden:

- Mit Hilfe des Messprotokolls sind die Amplituden- und Phasenverläufe in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz aufzutragen (je 2 Bilder untereinander auf Millimeterpapier).
- Aus dem Phasengang ist die Eigenfrequenz f_0 zu bestimmen.
- Aus dem Amplitudendiagramm ist der Dämpfungsgrad D nach Abschnitt 2.1.3 zu ermitteln.

Anschließend sind in die Diagramme neue Achsmaßstäbe einzutragen, so dass die Vergrößerungsfunktionen $V_1(\eta)$ bzw. $V_3(\eta)$ abgelesen werden können. Zur Beachtung: $V_{1,3}(\eta = 1) = \frac{1}{2D}$. Tragen Sie zudem qualitativ den entsprechenden Verlauf des jeweiligen Phasenwinkels $\Psi(\eta)$ mit in die Diagramme ein.

Die aus den drei Teilversuchen (Ausschwingversuch, Unwuchterregung und Krafterregung) bestimmten Eigenfrequenzen f_0 und Dämpfungsgrade D sind arithmetisch zu mitteln. Aus den Mittelwerten \bar{f}_0 und \bar{D} sowie mit der Federsteifigkeit c aus der Kalibrierung sind der Dämpfungskoeffizient b und das Massenträgheitsmoment $J^{(A)}$ zu bestimmen.

5.2 Elastischer Balken

Die experimentell ermittelten Eigenfrequenzen der untersuchten Balken sind mit den vorab berechneten Frequenzen zu vergleichen. Eventuelle Abweichungen sollen diskutiert werden. Zudem sollen Skizzen angefertigt werden, die den qualitativ die Verformung des Balkens in seinen Eigenfrequenzen verdeutlichen.

6 Allgemeine Hinweise

6.1 Versuchsvorbereitung

Im Vorfeld des Versuch sind die theoretischen Grundlagen zu erarbeiten. Vor Versuchsbeginn findet ein Testgespräch statt, in dem die Theorie des Versuches abgefragt wird. Bei nicht ausreichender Vorkenntnis kann ein Teilnehmer vom Versuch ausgeschlossen werden.

6.2 Ort der Versuche

Die Versuche finden statt im Institut für Mechanik, Appelstraße 11. Treffpunkt ist im Eingangsbereich des Institutes.

6.3 Ausarbeitung

Die Ausarbeitungen (ein Original pro Gruppe) sind spätestens 2 Wochen nach dem Versuch beim Versuchsleiter abzugeben. Eine Anerkennung des Versuchs erfolgt nur bei rechtzeitiger Abgabe eines vollständigen, fehlerfreien Protokolls.

Wir bitten um kurze, *handschriftliche* Protokolle, die die verlangten Punkte abhandeln. Bitte keine Romane!

Literatur

- [1] Magnus, K., Popp, K.: Schwingungen. B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, 5. Auflage 1997.
- [2] Knaebel, M.: Technische Schwingungslehre. B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1976.
- [3] Besdo, Heimann, Popp: Formelsammlung zur Technischen Mechanik I-IV, Neuauflage 1999, Institut für Mechanik, Hannover.
- [4] Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau. Kapitel 4: Schwingungslehre.