

Resonanz, gedämpfte und erzwungene Schwingung

Bearbeitet von Profs. Drs. U. Schanda / C. Schäfle / J. Aschaber / S. Stanzel, angepasst für WS 2020 Prof. Dr. R. Kellner

1 Literatur

Zur Erarbeitung der theoretischen Grundlagen dient Kapitel 3. Die Hinzunahme eines Lehrbuches ist notwendig, geeignete Lehrbücher sind beispielsweise:

Hering, Martin, Stohrer: *Physik für Ingenieure* (Springer-Verlag Kap 5.1.1 – 5.1.3)

Tipler: *Physik*, Kap. 11 (Springer Verlag); Giancoli: *Physik*, Kap. 14 (Pearson Verlag).

Kuypers: *Physik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*, Band 1; Kap. 7.1+7.2

2 Technische Bedeutung und Lernziel

Schwingungen spielen in Naturwissenschaft und Technik eine außerordentlich wichtige Rolle. Als Beispiele seien genannt die Schwingungen von Bauwerken (Brücken, Türme, ..), Schwingungen von Membranen (Trommelfell,...) und Saiten (Musikinstrumente), Schwingungen von Maschinen, Schwingungen von mikromechanischen Bauteilen (Beschleunigungssensoren,...) oder Schwingungen elektrischer Schaltkreise (Schwingquarze als Taktgeber in Uhren, Computern, etc.). Mechanische Schwingungen sind meist unerwünscht und müssen vermieden werden, da sie mit Nebenerscheinungen wie Materialermüdung und Lärmerzeugung und mitunter sogar wirklichen Gefahren durch Resonanz einhergehen können. Erwünscht sind mechanische Schwingungen hingegen bei schallerzeugenden Systemen wie Lautsprechern oder Musikinstrumenten.

Die Versuchsdurchführung soll Ihnen helfen, die Begriffe *freie* und *erzwungene* Schwingung und die damit verbundenen Begriffe *Eigenfrequenz* und *Erregerfrequenz* sowie die *Dämpfung* von Schwingungen zu verstehen. Weiterhin muss die Bedingung für das Auftreten und die Bedeutung einer *Schwingungsresonanz* erläutert werden können.

3 Grundlagen

3.1 Allgemeines

In einem fest verankerten, also einem translatorisch nicht bewegbaren mechanischen System, ist eine Schwingung die allgemeinste Bewegungsform. Wird ein solches mechanisches System aus seiner Ruhelage einmalig ausgelenkt und dann losgelassen, so führt es *freie* Schwingungen um diese Ruhelage aus, wenn eine rücktreibende Kraft, d.h. eine Kraft, die der Auslenkung entgegenwirkt, vorhanden ist. Wäre keine rücktreibende Kraft vorhanden, würde das System der Auslenkung nachgeben und sich von der Ruhelage entfernen.

In mechanischen Systemen kann die rücktreibende Kraft im System selbst vorhanden sein (z.B. bei einer elastischen Verformung eines Körpers wie einer Biegung eines Stabes schwingt der Körper nach der Wegnahme der äußeren Biegekraft in seine Ursprungsform zurück) oder aber ihre Ursache außerhalb des Körpers haben (z.B. Schwerkraft beim Pendel).

Die Bewegungsform der Schwingung ist dadurch gekennzeichnet, dass das einmalig ausgelenkte System auf Grund von Dämpfungsmechanismen wieder in die Ruhelage zurückkehrt, dies meist jedoch in einer zeitlich periodischen, in der Auslenkung aber abklingenden Bewegung um die Ruhelage – man denke an das Pendel einer Uhr. Die Auslenkung kann dabei von außen verursacht sein (Schwingungen von Bauwerken werden erregt durch Wind oder Erdbeben) oder vom System selbst erzeugt werden (z.B. Unwucht in rotierenden Maschinenkomponenten).

Die grundlegenden Eigenschaften einer mechanischen Schwingung können an dem einfachen Modellsystem einer geraden Feder mit daran befestigter Masse oder wie in diesem Praktikumsversuch aus einer Drehfeder, an die eine Schwungscheibe mit einem bestimmten Trägheitsmoment befestigt ist, untersucht werden.

Die Frequenz, mit der ein *frei* schwingendes System (es wirken keine Kräfte mehr, die das System aus seiner Ruhelage entfernen) bei vernachlässigbarer Dämpfung schwingt, nennt sich *Eigenfrequenz*. Bei einer geradlinigen Bewegung hängt die Eigenfrequenz nur von der Federkonstante und der bewegten Masse ab, bei einer Drehbewegung von der Federrichtgröße und dem Massenträgheitsmoment. Tatsächlich klingt jede freie Schwingung im Laufe der Zeit ab („Schwingung kommt zu Ende“), da mechanische Systeme immer gedämpft sind. Die Ursache der Dämpfung sind Reibungsprozesse (laminare Reibungskräfte, z.B. durch Dämpfung in zähen Ölen, turbulente Widerstandskräfte, z.B. der Luftwiderstand oder Festkörperreibung) oder wegen technischer Erfordernisse eingesetzte Schwingungsdämpfer.



Ein mechanisches System kann deshalb nur dauerhaft schwingen, wenn es ständig von einer äußeren, i.d.R. periodischen Kraft erregt wird („aus seiner Ruhelage entfernt wird“). In diesem Fall führt das System nach dem Einschwingen (Abklingen der freien Schwingung) eine *erzwungene* („von einer äußeren Ursache herrührende“) Schwingung aus. Das System schwingt dann mit der von der erregenden Kraft aufgeprägten Frequenz (*Erregerfrequenz*).

Die Größe der Amplitude hängt neben der Erregeramplitude v.a. vom Verhältnis der Eigenfrequenz des Systems zur Erregerfrequenz ab. Resonanz tritt auf, wenn die Frequenz der erregenden Kraft und die Eigenfrequenz übereinstimmen, außer die Dämpfung des Systems ist sehr groß.

3.2 Drehschwingungen

Schwingungen werden in freie ungedämpfte, freie gedämpfte und erzwungene Schwingungen eingeteilt. Im vorliegenden Versuch werden alle drei Schwingungsarten an einem Drehpendel (Drehpendel nach R.W. Pohl) untersucht, da dieses eine quantitative Auswertung ermöglicht.

Das Drehpendel (s. Abb. 1) besteht aus einem kupfernen Rad (Schwungrad) mit Massenträgheitsmoment J , das um eine feste, horizontale Achse drehbar gelagert ist. Die Winkelauslenkung φ des Schwungrades kann mit Hilfe eines Zeigers, der am Schwungrad befestigt ist, an einer kreisförmigen Skala abgelesen werden.

Das Rad ist mit dem inneren Ende einer Drehfeder verbunden. Das äußere Ende der Drehfeder ist an einer Stange befestigt, die exzentrisch an der Stange eines Motors befestigt ist, und damit hin- und her bewegt werden kann. Die Drehfeder hat eine Federhärtegröße D^* und bewirkt ein rücktreibendes Drehmoment:

$$M_{\text{Rück}} = -D^* \cdot \varphi.$$

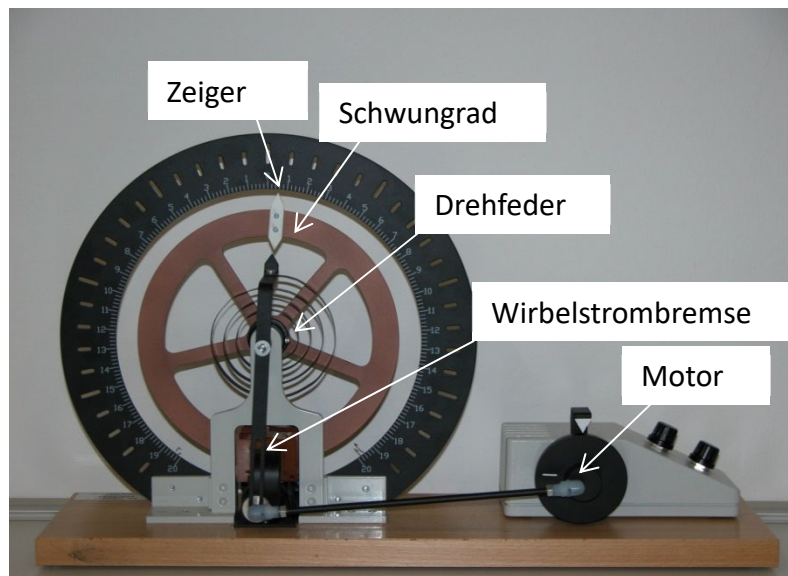


Abb. 1 Drehpendel "Pohlsches Rad"

Die Bewegung des Drehpendels kann durch eine Wirbelstrombremse gebremst werden. Die Wirbelstrombremse bewirkt eine Reibungskraft und damit ein bremsendes Drehmoment, das proportional zur Winkelgeschwindigkeit ist:

$$M_{\text{Reib}} = -k \cdot \dot{\varphi}.$$

3.3 Theoretische Grundlagen

Für den Fall einer Drehschwingung kann man die Lösung der Schwingungsgleichung einer geradlinigen Bewegung verwenden, wenn man folgende Ersetzungen macht:

Tab. 1: Analogie: Translation $\leftrightarrow$ Rotation

Translation eindimensional	$\leftrightarrow$	Rotation um feste Achse
Auslenkung x		Drehwinkel φ
Masse m		Massenträgheitsmoment J (immer auf die Drehachse bezogen)
Kraft F		Drehmoment M
Federkonstante D		Federrichtgröße D^*

Damit ergibt sich für die freie ungedämpfte Schwingung eine Eigenkreisfrequenz:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{D^*}{J}} \quad (1)$$

Ihre Bewegung kann (bei geeigneter Wahl des Anfangszeitpunktes) beschrieben werden durch:

$$\varphi(t) = A_0 \cos(\omega_0 \cdot t)$$

Freie gedämpfte Schwingung

Wird die Schwingung gedämpft, dann wirkt neben dem rücktreibenden Drehmoment das bremsende Drehmoment der Wirbelstrombremse, so dass sich für die Bilanz der Drehmomente (Drehung um die feste Achse) im gedämpften Fall ergibt:

$$\begin{aligned} M &= M_{\text{Rück}} + M_{\text{Reib}} \\ J \cdot \ddot{\varphi} &= -D^* \cdot \varphi - k \cdot \dot{\varphi} \quad | : J \end{aligned} \quad (2)$$

$$\ddot{\varphi} + \frac{k}{J} \cdot \dot{\varphi} + \frac{D^*}{J} \cdot \varphi = 0$$

$$\ddot{\varphi} + 2 \cdot \delta \cdot \dot{\varphi} + \omega_0^2 \cdot \varphi = 0 \quad (3)$$

wobei $\omega_0 = \sqrt{\frac{D^*}{J}}$ immer die Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Pendels und $\delta = \frac{k}{2 \cdot J}$ die Abklingkonstante ist. Gleichung (3) ist die Differentialgleichung (DGL), die die Bewegung des freien, gedämpften Pendels beschreibt. Eine Lösung der DGL ist:

$$\varphi(t) = A_0 e^{-\delta \cdot t} \cos\left(\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \cdot t\right) \quad (4)$$

wobei A_0 die Anfangsamplitude (Winkelauslenkung zum Zeitpunkt $t=0$ s) ist.

Setzt man

$$\omega_D = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad (5)$$

als reduzierte Kreisfrequenz, d.h. die Kreisfrequenz der gedämpften Schwingung, dann erhält man die Funktion, mit der die Bewegung der freien gedämpften Schwingung (bei geeigneter Wahl des Anfangszeitpunktes) beschrieben werden kann:

$$\varphi(t) = A_0 e^{-\delta \cdot t} \cos(\omega_D \cdot t) \quad (6)$$

Es ergibt sich eine cos-Schwingung deren Amplitude $A(t) = A_0 e^{-\delta \cdot t}$ exponentiell abfällt. Je größer die Abklingkonstante δ , desto schneller nähern sich die Amplituden der Schwingung dem Wert 0. Die Zeit, in der die Amplitude der Schwingung auf den $1/e$ -Teil des Ausgangswertes abgefallen ist, wird als Abklingzeit τ bezeichnet¹.

Die Frequenz, mit der ein gedämpftes System schwingt, ist im Vergleich zur Eigenfrequenz der ungedämpften Schwingung verkleinert (siehe Gleichung (5)).

Um die Dämpfung des schwingenden Systems zu charakterisieren, verwendet man den Gütefaktor

$$Q := \frac{\omega_0}{2 \delta} \quad (7)$$

Die Dämpfung eines Systems kann also durch die Güte, die Abklingzeit oder die Abklingkonstante charakterisiert werden. Ein System mit einer hohen Güte, hat eine geringe Dämpfung.

¹ Hinweis: Eine analog definierte und anschaulich aus der Radioaktivität meist bekanntere Größe ist die Halbwertszeit.



Erzwungene Schwingungen, Resonanz

Das Drehpendel wird durch ein periodisches äußeres Drehmoment $M_E(t)$ angeregt, das mit der Kreisfrequenz Ω durch den Elektromotorantrieb auf die Drehfeder und damit auf das Schwungrad wirkt.

$$M_E(t) = M_{E0} \cdot \cos(\Omega \cdot t) \quad (8)$$

Ergänzt man Gleichung (3) um das zusätzliche Drehmoment des Motors aus Gleichung (8), so folgt:

$$\ddot{\varphi} + 2 \cdot \delta \cdot \dot{\varphi} + \omega_0^2 \cdot \varphi = \frac{M_{E0}}{J} \cdot \cos(\Omega \cdot t) \quad (9)$$

Gleichung (9) ist die DGL für die erzwungene, gedämpfte Schwingung.

Nach dem Einschwingvorgang schwingt das System mit der Erregerfrequenz Ω . Die Amplitude der Schwingung hängt von Erregerfrequenz Ω ab. Löst man die DGL, dann ergibt sich für die Amplitude folgende Funktion, die die Amplitudenresonanzkurve beschreibt:

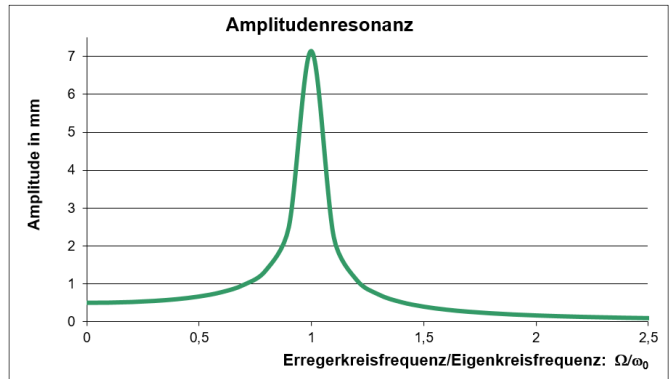


Abb. 2 Amplitudenresonanzkurve

$$A(\Omega) = \frac{M_{E0}}{J} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4 \cdot \left(\frac{\Omega}{\tau}\right)^2}} \quad (10)$$

Der Kurvenverlauf ist in Abbildung 2 für eine bestimmte Dämpfung zu sehen. Der Verlauf für unterschiedliche Dämpfungen ist in der Literatur zu finden.

Anhand obenstehender Abbildung der Amplitudenresonanz wird die Resonanzüberhöhung beispielhaft erläutert. Ein System wird durch ein periodisches äußeres Drehmoment so angeregt, dass bei einer kleinen Erregerfrequenz (quasistatisch) die Auslenkung 0,5 mm beträgt. Wird die Erregerkreisfrequenz bei gleichem Maximalwert des Drehmoments erhöht, so schwingt das System mit einer größeren Amplitude: z.B. beträgt der Wert bei $\Omega/\omega_0 = 0,8$ ca. 1,5 mm. Die Amplitude wird also hier verstärkt. Für eine Erregerkreisfrequenz, die annähernd der Eigenkreisfrequenz ($\Omega \approx \omega_0$) entspricht² beträgt die Amplitude des Systems gut 7 mm. Dort ist die Verstärkung maximal und das System schwingt im Resonanzfall.

Als Resonanzüberhöhung (die Verstärkung) bezeichnet man das Verhältnis des Maximums der Amplitudenresonanzkurve zur Amplitude bei quasistatischer Auslenkung:

Die Resonanzüberhöhung ist definiert als:
$$R\ddot{U} := \frac{\varphi(\Omega = \omega_{\text{Resonanz}})}{\varphi(\Omega = 0)}$$

Im vorliegenden Beispiel ist also
$$R\ddot{U} = \frac{\varphi(\Omega = \omega_{\text{Resonanz}})}{\varphi(\Omega = 0)} = \frac{7}{0,5} = 14$$

Man kann zeigen (siehe Aufgabe 3.3.6), dass die Resonanzüberhöhung eines Systems nur von der Dämpfung abhängt, so dass gilt

$$R\ddot{U} \approx Q \quad (11)$$

Hinweis: In der Elektrotechnik wird das Formelsymbol Ω abweichend von der hier verwendeten Bedeutung als „normierte Frequenz“ (das Verhältnis der Erregerkreisfrequenz, ω_{err} zur Eigenkreisfrequenz ω_0) verwendet.

² genauer: $\omega_{\text{res}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}$

Zusatzinformation: Zwischen der Erregerschwingung und der Schwingung des Systems tritt auch eine frequenzabhängige Phasenverschiebung auf. Für Erregerfrequenzen, die kleiner als die Resonanzfrequenz sind, liegt die Phasenverschiebung zwischen 0 und $\pi/2$. Für Erregerfrequenzen über der Resonanzfrequenz ist die Phasenverschiebung zwischen $\pi/2$ und π (siehe Literatur).

3.3 Pflichtaufgaben zur Versuchsvorbereitung

1. Folgende Begriffe müssen erklärt werden können:

- Schwingungen allgemein:
Schwingungsdauer, Frequenz, Kreisfrequenz, Amplitude, Phase, Eigenfrequenz, Schwingungs-DGL.;
- gedämpfte Schwingung mit geschwindigkeitsproportionaler Reibung:
Abklingkonstante, Abklingzeit, Dämpfungsgrad, Güte, Frequenz der gedämpften Schwingung;
- erzwungene Schwingung mit geschwindigkeitsproportionaler Reibung:
Amplitudenresonanz, Resonanzfrequenz, Resonanzüberhöhung, Resonanzbandbreite; Phasenverschiebung

2. Bearbeiten Sie folgende Aufgabe und schreiben Sie die Ergebnisse mit dem zugehörigen Formelsymbol, Zahlenwert und Einheit.

Eine Brücke bewegt sich nach einem einmaligen Sprung durch einen Menschen in vertikaler Richtung 200 Mal in der Minute um seine Ruhelage auf und ab. Die Amplitude der Schwingung beträgt 10 mm.

- Zeichnen Sie ein Diagramm der Auslenkung als Funktion der Zeit vom Beginn der Anregung bis zu einer Sekunde danach unter Vernachlässigung der Dämpfung. Achten Sie auf die Diagrammbeschriftung!
- Welchen Wert haben die Eigenfrequenz, die Eigenkreisfrequenz und die Periodendauer dieser Schwingung (vernachlässigte Dämpfung)?
- Tatsächlich nimmt durch innere Dämpfung die Amplitude als Funktion der Zeit mit jeder Schwingungsperiode ab und fällt gemäß: $A(t) = A_0 \cdot e^{-\delta t}$ (siehe auch Gleichung (6)– der cos-Anteil dieser Funktion wird im Umkehrpunkt maximal, also gleich 1)
 - Skizzieren Sie den Zeitverlauf der Amplitude qualitativ in ein Diagramm.
 - Zeichnen Sie ein, wo die Abklingzeit abzulesen ist.
 - Berechnen Sie die mathematische Beziehung zwischen der Abklingkonstante δ und der Abklingzeit τ .

Hinweis: Verwenden Sie die Definition der Abklingzeit und bilden das Verhältnis von $\frac{A(\tau)}{A(0)}$ mit der

Definition von $A(t)$.

d) Die Amplitude sei für die ersten sieben Schwingungsperioden in unten stehender Tabelle gegeben.

Schwingung	0	1	2	3	4	5	6	7
Amplitude in mm	10,0	8,6	7,0	6,4	5,0	4,4	3,6	3,2

Tragen Sie die Amplitude als Funktion der Zahl der Schwingungsperioden in ein Diagramm ein.

- Lesen Sie τ graphisch aus dem Diagramm ab. (Tipp: welchen Wert erwarten Sie für $A(\tau)$? Sie müssen dann noch den abgelesenen Wert in eine Zeit umrechnen).
- Logarithmieren Sie $A(t) = A_0 \cdot e^{-\delta t}$. Skizzieren Sie in einem Diagramm mit richtiger Achsenbezeichnung wie die Abklingkonstante δ graphisch bestimmt werden kann.

3. Ein System hat eine Eigenkreisfrequenz von $20 \cdot 1/s$, seine Abklingkonstante beträgt $\delta = 2 \cdot 1/s$. Es wird mit einer Kreisfrequenz von $10 \cdot 1/s$ angeregt. Mit welcher Kreisfrequenz schwingt das System?

4. Erklären Sie in einem Satz, was Resonanz anschaulich bedeutet und geben Sie mindestens ein selbst gefundenes Beispiel für Resonanz aus Ihrem Alltag an. Überlegen Sie qualitativ, was passiert, wenn dieses System bei sehr kleinen, sehr großen und „passenden“ Frequenzen angeregt wird.

**5. Amplitudenresonanzkurven**

- a) Skizzieren Sie für mindestens drei verschiedene Dämpfungen die Amplitudenresonanzkurven eines von außen erregten Systems. (Literatur)
 b) Veranschaulichen Sie sich den Verlauf dieser Kurven. Passt der Verlauf der Kurven zu Ihren Überlegungen aus Aufgabe 4? Was ist auf der Abszisse („x-Achse“) aufgetragen?

c) Der Verlauf der Amplitudenresonanzkurve wird mathematisch durch Gleichung (10) beschrieben.

Berechnen Sie den Formelwert der Kurve für folgende Fälle:

- (i) sehr kleine Anregungsfrequenzen $\Omega \ll \omega_0$, d.h. $\Omega \approx 0$
 (ii) sehr große Anregungsfrequenzen $\Omega \gg \omega_0$
 (iii) für $\Omega \approx \omega_0$

Passen Ihre Ergebnisse zum Kurvenverlauf?

6. *Zusatzaufgabe Resonanzüberhöhung (freiwillig bei WI und MB, Pflicht bei allen anderen Studiengängen):

a) Der Gütefaktor eines schwingungsfähigen Systems beträgt 15. Das System wird zu erzwungenen Schwingungen angeregt, so dass die Amplitude für sehr kleine, quasistatische Auslenkungen $A(\Omega=0)$ zwei Skalenteile beträgt. Mit welcher Auslenkung des Systems ist zu rechnen, wenn es mit einer Frequenz $\omega_0 \approx \omega_{\text{resonanz}}$ angeregt wird?

b) Skizzieren Sie die Amplitudenresonanzkurve dieses Systems, wenn die Eigenkreisfrequenz 20 1/s beträgt (mit richtiger Achsenbeschriftung und Achseneinteilung).

c) Für Interessierte: Zeigen Sie mithilfe von 5 c), dass Gleichung (11) gilt, d.h. dass

$$R\ddot{U} := \frac{A(\Omega = \omega_{\text{Resonanz}})}{A(\Omega = 0)} \approx Q$$

für den Fall nicht zu großer Dämpfungen, d.h. falls $\omega_0 \approx \omega_{\text{Resonanz}}$.

4 Beschreibung der Versuchsanordnung**4.1 Experiment**

Ein kupfernes Schwungrad ist um seine horizontale Schwerpunktsachse drehbar gelagert. An dieser Drehachse ist eine Spiralfeder angebracht, deren anderes Ende an einem ebenfalls drehbar gelagerten Hebel befestigt ist. Dieser Hebel ist über ein Exzentergestänge an einen Elektromotor gekoppelt, dessen Drehzahl regelbar ist. Im unteren Bereich der Schwungscheibe ist eine Wirbelstrombremse montiert, deren Bremskraft proportional zum Strom aus einem Netzgerät ist (siehe Foto in Abb.1 und Schema in Abb.3)

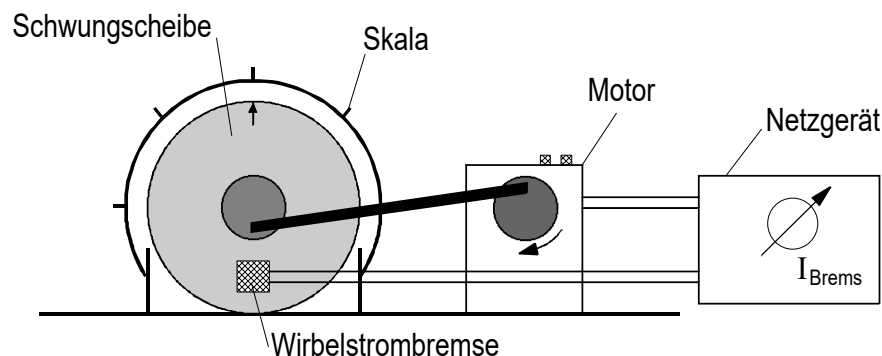


Abb. 3 Schematischer Versuchsaufbau des Drehpendels

Wird das Drehpendel manuell bei ausgeschaltetem Motor aus der Ruhelage ausgelenkt, ergibt sich bei abgeschalteter Wirbelstrombremse eine nahezu ungedämpfte freie Schwingung.

Unterschiedlich gedämpfte freie Schwingungen kann man durch Einstellen unterschiedlich starker Ströme in der Wirbelstrombremse erzeugen.

Bei Betrieb des Motors wird der obere Befestigungspunkt der Spiralfeder periodisch hin und her bewegt. Dies führt zu einer periodischen und harmonischen Anregung des Systems und erlaubt die Untersuchung der Resonanzef-

fekte. Die Drehzahl des Motors und damit die Erregerfrequenz kann über zwei Drehknöpfe (grob und fein) eingestellt werden. Die Messung der Drehzahl erfolgt durch stoppen der Zeit für eine sinnvoll gewählte Anzahl Umdrehungen des Motors. Wird die Erregerfrequenz geändert, so ist die Einschwingphase abzuwarten.

➔ Sehen Sie sich das Video an, in dem der Aufbau erklärt wird: <https://tetfolio.fu-berlin.de/web/1163417>

5 Versuchsdurchführung und Auswertung

Sollte die Zeit im Praktikum nicht ausreichen, um alle Werte aufzunehmen können Sie auf die Filme im Learning Campus zurückgreifen und damit die Messungen vervollständigen.

5.0 Nullpunktseinstellung

Beachten Sie, dass bei den gefilmten Experimenten der Nullpunkt richtig eingestellt ist, d.h. dass der weiße Zeiger in Ruhelage auf die 0 zeigt.

5.1 Freie ungedämpfte Schwingung (→ Film)

Ermittlung der Eigenfrequenz: Messen Sie die Dauer von 10 Schwingungen. Wiederholen Sie diese Messung fünf mal.

Berechnen Sie daraus die Eigenfrequenz mit Messunsicherheit.

5.2 Freie gedämpfte Schwingung (→ Film)

Das Pendel wird bei einem Bremsstrom von 0,25 A bis zum Skalenwert 15 ausgelenkt und dann frei schwingen gelassen. Lesen Sie die Amplituden von 10 aufeinander folgenden Schwingungen ab. Tragen Sie die Ergebnisse in eine Tabelle ein und zeichnen Sie in einen Graphen die Amplituden über die Anzahl der Schwingungen. Messen Sie außerdem die Schwingungsdauer.

5.2.1 Bestimmen Sie die Abklingzeit der gedämpften Schwingung direkt aus dem Graphen einschließlich einer aus dem Graphen geschätzten Messunsicherheit.

5.2.2 Tragen Sie die Amplituden in linearisierter Weise auf, um daraus die Abklingkonstante mit Messunsicherheit zu bestimmen. (Tipp: Kapitel 5.4 in der Anleitung „Messen, Auswerten, Messunsicherheit“: welche Funktion beschreibt das Abklingen der Amplitude mit der Zeit? siehe auch Vorbereitungsaufgabe 2f)

Berechnen Sie aus der Abklingkonstanten die Abklingzeit und die Güte (mit Messunsicherheit). Vergleichen Sie die so gewonnene Abklingzeit mit dem Ergebnis aus 5.2.1.

5.3 Erzwungene Schwingung und Resonanz → (13 Filme)

(Ist die Zeit zu knapp, um eine vollständige Kurve aufzunehmen, beobachten Sie das Verhalten des Drehpendels bei sehr niedriger und bei sehr hoher Erregerfrequenz. Anschließend, versuchen Sie die Resonanzfrequenz einzustellen und beobachten was passiert. Nutzen Sie für die spätere Auswertung die Filme.)

Ermitteln Sie die Amplitudenresonanzkurven, d.h. die maximale Winkelauslenkung als Funktion der Erregerfrequenz für den Bremsstrom von 0,25 A. Bestimmen Sie dafür für jede Einstellung des Motors (d.h. je Film) die Erregerfrequenz und die Amplitude des Drehpendels.

Tragen Sie die Werte jeweils in eine Tabelle und gleichzeitig in ein Diagramm ein. Beobachten und notieren Sie sich auch jeweils qualitativ die Phasenverschiebung zwischen Erregermotor (schwarzer Zeiger) und Schwungrad (weißer Zeiger), d.h. „in Phase“, „gegenphasig“.

5.3.1 Bestimmen Sie aus der Resonanzkurve die Resonanzüberhöhung einschließlich Messunsicherheit. Vergleichen Sie diese mit dem Gütefaktor aus 5.2.2, falls Sie die Werte selbst gemessen haben und nicht aus den Videos. Falls Sie die Werte aus den Videos haben, berechnen Sie daraus den zu erwartenden Gütefaktor.

6 Zusammenfassung

- Vergleichen Sie mittels einer Tabelle alle Ergebnisse der Auswertung einschließlich Messunsicherheit.
- Beurteilen Sie kritisch Ihre Ergebnisse.