Versuch 102

Freie und erzwungene Schwingungen mit Dämpfung

Lernziel: Freie und erzwungene Schwingungen mit Dämpfung gehören zu den wichtigsten Phänomenen der Physik und sind auf Gebieten verschiedenster Art zu beobachten, z.B. an Pendeln, Saiten, Maschinenteilen, sogar an der Erdkugel, an elektrischen Ladungsverteilungen in Schwingkreisen oder in Atomhüllen, an Lasern, an Molekülen, an Elementarteilchen. Besonders wichtig ist dabei das Phänomen der Resonanz. So verschieden die schwingenden physikalischen Messgrößen auch sein mögen, alle diese Schwingsysteme gehorchen denselben Gesetzmäßigkeiten. Daher ist das Verständnis der Eigenschaften irgendeines Schwingsystems die Grundlage für das Verständnis einer Vielzahl von Phänomenen, die wir in der Natur beobachten.

Dieser Versuch soll am Beispiel eines mechanischen Drehschwingsystems, dem Pohlschen Drehpendel, mit den grundlegenden Gesetzmäßigkeiten des allgemeinen Phänomens „Schwingung“ vertraut machen.

Kenntnisse: Hooksches Gesetz, Rotation eines starren Körpers, Trägheitsmoment, rücktreibendes und dämpfendes Drehmoment; freie Schwingung eines gedämpften Systems; erzwungene Schwingung, Amplituden- und Phasenverhalten, Resonanz, Inhalt von Anhang A2; Lorentz-Kraft, Induktionsgesetz, Wirbelströme.

Literatur: Jedes Grundkurs-Lehrbuch der Physik, z.B.
Brandt-Dahmen, Bd. I;
Gerthsen, Physik;
Berkeley, Physik-Kurs III, Kap. 1 und 3;
Pohl, Einfg. in die Physik, Bd. I;
Westphal, Physikalisches Praktikum, Anhang;
Walcher, Physikalisches Praktikum, Kap. 2 und 7

Geräte: Pohlsches Drehpendel 346 00 von Leybold-Heraeus mit Wirbelstrombremse und Exzentererregung, Stoppuhr.

102.1 Versuchsanordnung

Das Drehpendel nach Pohl ist ein schwingfähiges System, das eine Zusatzdämpfung besitzt. Damit lässt sich die Abhängigkeit von Amplitude und Phase eines Resonators mit gegebener Eigenfrequenz von der Frequenz eines Erregers und der Dämpfung des Resonators quantitativ aufnehmen.

Die wesentlichen Komponenten der Versuchsanordnung sind in Abb. 102.1 beschrieben. Das Schwingsystem kann durch ein periodisches, äußeres Drehmoment zu Schwingungen angeregt werden. Dieses Drehmoment wird von einem Motor (13) (mit einstellbarer Frequenz ν) über einen Exzenter (11) und ein Gestänge (12), das an einem Ende der Schnecken (2) angreift, erzeugt: dieses zusätzliche Drehmoment variiert kosinusförmig:

$$D\varphi \to D(\varphi - \varphi_1 \cos \omega t) = D\varphi - D\varphi_1 \cos \omega t. \tag{102.1}$$

Um auch die Dämpfung des Systems variieren zu können, ist eine Wirbelstrombremse eingebaut. Der kupferne Drehkörper (1) bewegt sich im Luftspalt eines Elektromagneten (16), dessen Feldstärke (über den durch ihn fließenden Strom) wählbar ist. Die Leitungselektronen im Kupfer eines Scheibensegments erfahren beim Eintritt in das Magnetfeld eine Änderung des magnetischen Flusses, wodurch ein elektrisches Wirbelfeld im Scheibensegment induziert wird. Dies erzeugt einen geschlossenen Wirbelstrom und damit ein Magnetfeld, das nach der Lenz´schen Regel dem äußeren Feld entgegen gerichtet ist und zu einer geschwindigkeitsproportionalen Reibungskraft führt. Die Abnahme der Bewegungsenergie wird über Ohm´sche Verluste der Wirbelströme in Wärme umgesetzt.

102.2 Durchführung des Versuchs

102.2.1 Freie Schwingung mit Dämpfung

Mit Hilfe des Motors wird der Zeiger des Drehkörpers mit dem Nullpunkt der Skala (5) einjustiert und der Motor in dieser Stellung abgeschaltet.

Eine Schwingung wird in Gang gesetzt, indem man das Pendel von Hand auslenkt (z. B. auf 19 Skalenteile) und dann loslässt. Vermeiden Sie dabei, dem System durch ungeschicktes Loslassen einen Drehimpuls zu erteilen.

Aufgabe 102.a: *Bestimmen Sie die Eigenfrequenz ν_0 aus der Messung der Schwingungsdauer bei abgeschalteter Wirbelstrombremse über hinreichend viele Perioden. Diese Messung ist mindestens drei mal zu wiederholen.*

Aufgabe 102.b: *Messen Sie für 3 verschiedene Stärken der Dämpfung (Magnetströme I_m = (0,1 / 0,3 / 0,5) A) die abklingenden Amplituden als Funktion der Zahl n der Schwingungsperioden. Es genügen 15 Schwingungen.*
Amplitude: $\varphi(t) = \varphi_0 e^{-\beta t}$ mit $t = n \cdot T$ $(n = 1, 2, 3, \dots)$ und $T = 2\pi/\omega$.
Da Sie zu zweit sind, kann eine/r Protokoll führen und der/die andere die aufeinanderfolgenden Amplitudenwerte eines Abklingvorgangs ablesen.

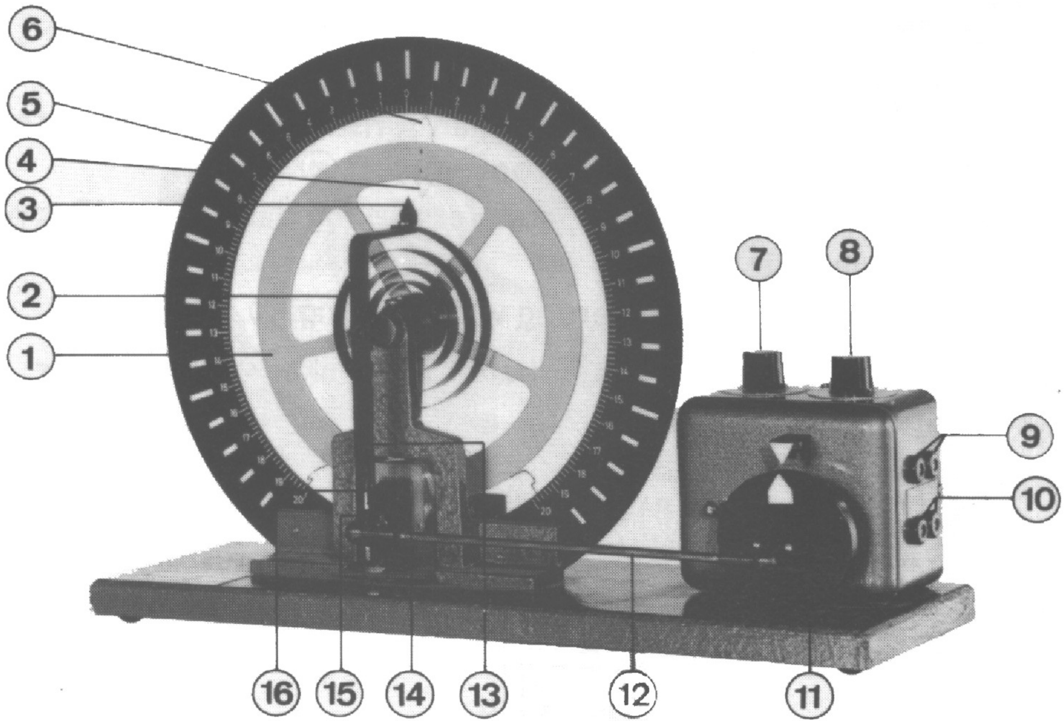

Abbildung 102.1: Pohlsches Drehpendel

- **1, 2** *Drehpendel*, bestehend aus *Pendelkörper* **1** aus Kupfer und *Schneckenfeder* **2**; ein Ende der Feder ist mit einem Schwingungserreger **13** verbunden.
- **3, 4** *Vergleichsanzeiger* für Phasenlagen des Schwingungserregers (**3**) und des Drehpendels (**4**).
- **5** *Skalenring* zur Amplitudenmessung der Drehschwingung; zur Projektion in Abständen von je 5 Skalenteilen geschlitzt.
- **6** *Amplitudenanzeiger*
- **9** *Anschlussbuchsen* für Versorgungsspannung des Motors.
- **11** *Antriebsrad* mit Exzenter.
- **12** *Schubstange*.
- **13** *Schwingungserreger*, mit Feder **2** des Drehpendels verbunden.
- **14** *Schlitz* zur Verschiebung des Angriffspunktes der Schubstange **11** am Schwingungserreger **13** (Amplitudeneinstellung des Schwingungserregers).
- **15** *Schraube* zur Halterung der Schubstange **12** in **14**.
- **16** *Elektromagnet* zur Wirbelstrombremsung des Drehpendels; 4 mm-Anschlußbuchsen für Spulenstrom an der Rückseite.

Technische Daten:
Eigenfrequenz: ca. 0,5 Hz
Erregerfrequenz: (0,1 – 1,2) Hz
Motorspannung: maximal 20 V
Stromaufnahme: maximal 600 mA
Wirbelstromdämpfung: (0 – 20) V
Belastbarkeit der Spulen: kurzzeitig maximal 2 A

Aufgabe 102.c: *Tragen Sie die gemessenen Amplituden φ gegen die Anzahl n der Perioden in ein halblogarithmisches Diagramm ein (3 Dekaden). Bestimmen Sie gemäß Anhang A1 die Ausgleichsgerade*

$$\ln \varphi_n = \ln \varphi_0 - (\beta T)n \tag{102.2}$$

und aus ihrer Steigung

$$\Delta \ln \varphi_n / \Delta n = -\beta T =: -\ln K \tag{102.3}$$

das Dämpfungsverhältnis K und die Güte $Q = \pi/(\beta T)$.

Vorsicht: Der Magnet der Wirbelstrombremse darf höchstens 2 – 3 Minuten mit Strömen über 1 A betrieben werden!

102.2.2 Erzwungene Schwingungen mit Dämpfung

Bei diesem Experiment wird die Amplitude φ als Funktion der Frequenz ν bzw. ω, d.h. die Resonanzkurve, gemessen. Der Motor wird dazu mit einer stabilisierten Spannung betrieben (an Klemmen (9) anschließen), wobei die Frequenz eine gut reproduzierbare Funktion der Spannung ist. Die Spannung wird an einem Digitalvoltmeter (DVM) abgelesen, welches im Versorgungsgerät eingebaut ist.

Aufgabe 102.d: *Ermitteln Sie den Zusammenhang zwischen der Frequenz des Exzenters (11) und der Motorspannung bei 4 geeignet gewählten Frequenzen im Bereich von (0,1 – 1) Hz, indem Sie die Zeit für mindestens 10 Umdrehungen stoppen. Stellen Sie den Zusammenhang zwischen Frequenz und Spannung auf mm-Papier (DIN A4) grafisch dar.*

Aufgabe 102.A: *Welche Maßeinheit hat das Amplitudenquadrat φ^2?*

Aufgabe 102.e: *Messen Sie nun für 2 verschiedene Stärken der Dämpfung (I_m = (0,3 und 0,5) A) die Amplitude φ als Funktion der Frequenz ν bzw. ω, d.h. die Resonanzkurve.*

$$\varphi(\omega) = \frac{\mu}{\sqrt{\left(\omega_0^2 - \omega^2\right)^2 + \frac{\omega^2 \cdot \omega_0^2}{Q^2}}} \tag{102.4}$$

Legen Sie hinreichend viele Messpunkte in den relativ schmalen Resonanzbereich. Eine Messung kann erst erfolgen, wenn der Einschwingvorgang hinreichend abgeklungen ist. Beobachten Sie daher, ob der stationäre Zustand erreicht ist.

Es empfiehlt sich, zuerst die Kurve mit der starken Dämpfung zu messen (warum?). Tragen Sie die Messwerte in ein Diagramm (φ gegen ν, $\nu = 1/T$) ein und zeichnen Sie die beiden Resonanzkurven. Bestimmen Sie die Frequenz ν aus der Motorspannung mit Hilfe der oben durchgeführten Kalibration.

Aufgabe 102.f: *Bestimmen Sie die Güte Q aus dem Abstand $\Delta\nu$ der beiden Frequenzen, für welche die Amplitude auf das $1/\sqrt{2}$-fache der Maximalamplitude abgesunken ist und der Frequenz ν_0, bei der die Maximalamplitude auftritt, mit $Q = \nu_0 / \Delta\nu$.*

Bestimmen Sie ferner die Güte Q aus dem Verhältnis der Amplituden $\varphi(\omega = \omega_0)$ und $\varphi(\omega \to 0)$.

Vergleichen Sie diese beiden Werte für Q mit denen, die Sie aus der freien Schwingung ermittelt haben.