U N I V E R S I T Ä T R E G E N S B U R G

Fakultät für Physik

Anleitung zum Anfängerpraktikum A1

5 - Lineares Pendel

25. überarbeitete Auflage 2023

Prof. Dr. Jascha Repp, Prof. Dr. Christian Schüller
Dr. Stephan Giglberger, Matthias Dietl

Version 5. Januar 2023

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 3
1.1 Lernziele 3
1.2 Vorkenntnisse 4
2 Grundlagen 4
2.1 ungedämpftes Pendel 4
2.2 Dämpfung 5
2.3 Phasenraum 7
3 Fragen zum Versuch 7
4 Hinweise zum Versuchsaufbau 9
4.1 Drehpendel 9
4.2 Lineares Pendel auf der Luftkissenschiene 10
4.3 Allgemeine Hinweise für beide Versuchsaufbauten 11
5 Aufgabenstellung 11
5.1 Drehpendel 11
5.2 Lineares Pendel auf der Luftkissenschiene 13

Lineares Pendel

1 Einleitung

Der harmonische Oszillator ist eines der wichtigsten Modellsysteme in der Physik. Er ist in sehr vielen Gebieten der Physik höchst relevant, natürlich in der Mechanik aber auch in der Elektrodynamik, der Optik, der Atomphysik, der Molekülphysik und der Festkörperphysik. Aufgrund seines vielfältigen Auftretens ist der harmonische Oszillator sowohl in seiner klassischen als auch der quantenmechanischen Ausprägung von großer Bedeutung, wobei ein gutes Verständnis des klassischen harmonischen Oszillators sehr hilfreich für das Verständnis der quantenmechanischen Ausprägung ist. Der harmonische Oszillator ist nach wie vor auch in hochaktuellen Forschungsthemen wichtig, und entsprechende Bespiele reichen von Methodenentwicklung in der Rasterkraftmikroskopie zu Cavity Quantum Electrodynamics. Dabei sind sowohl die freien als auch die erzwungenen Schwingungen von Interesse. Beides wird in diesem Versuch untersucht.

Der harmonische Oszillator wird in diesem Versuch in zwei unterschiedlichen Varianten in zwei unterschiedlichen Versuchsaufbauten realisiert:

1. Drehpendel
2. Lineares Pendel

Welchen dieser zwei Teile Sie durchzuführen haben, entnehmen Sie der Gruppeneinteilung, die in den Praktikumsräumen aushängt und auf der Homepage veröffentlicht ist. In Versuch 6, werden dieselben Versuchsaufbauten mit Erweiterungen verwendet. In Versuch 6 werden Sie die jeweils andere Variante der beiden Versuchsaufbauten verwenden; es nutzt Ihnen also für Versuch 6, wenn Sie sich bezüglich dieser Anleitung schon mit beiden Varianten vertraut machen.

1.1 Lernziele

- Praktische Erfahrung mit einem gedämpften harmonischen Oszillator
- Resonanzverhalten eines gedämpften harmonischen Oszillators
- Beobachtung des Verhaltens bei unterschiedlicher Dämpfung

1.2 Vorkenntnisse

- Kraftgesetz und potentielle Energie einer Feder
- Differentialgleichung für das Federpendel
- Phasenraum
- Wirbelstrombremse
- Gedämpfter harmonischer Oszillator: Differentialgleichung und Lösung für freie und erzwungene Schwingungen
- Resonanzkurve
- Güte eines Oszillators, Zusammenhänge mit der Abklingzeit der freien Schwingung, der Breite der Resonanzkurve und der Amplitude der erzwungenen Schwingung in Resonanz

2 Grundlagen

Beim klassischen harmonischen Oszillator wird zwischen Schwerependel und Federpendel unterschieden. Bei letzterem ist die Rückstellkraft proportional zur Auslenkung, bei ersterem gilt dies nur näherungsweise bei kleinen Auslenkungen. In diesem Versuch werden nur Federpendel behandelt. Ein Federpendel kann auf einer lineraren Bewegung oder einer Drehbewegung basieren. Die Physik und die zugrundeliegenden Gleichungen sind dabei gleich und es gelten folgende Entsprechungen:

Drehpendel			**lineares Pendel**
θ	Auslenkwinkel	$\Leftrightarrow$	x Auslenkung
D	Torsionsfederkonstante	$\Leftrightarrow$	k Federkonstante
I	Trägheitsmoment	$\Leftrightarrow$	m Masse
M	Drehmoment	$\Leftrightarrow$	F Kraft

2.1 ungedämpftes Pendel

Die Differenzialgleichung des ungedämpftes Pendels ergibt sich aus dem Hook'schen und dem dritten Newton'schen Gesetz zu

$$\begin{aligned} F = m\ddot{x} &= -kx, \quad \text{bzw.} \\ M = I\ddot{\theta} &= -D\theta \end{aligned} \tag{1}$$

mit der Lösung

$$\begin{aligned} x &= x_0 \cos(\omega_0 t + \varphi) \\ \theta &= \theta_0 \cos(\omega_0 t + \varphi) \end{aligned} \tag{2}$$

mit der Kreisfrequenz $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ bzw. $\omega_0 = \sqrt{k/I}$ des ungedämpften Falles. Die Phasenlage φ hängt dabei von den Anfangsbedingungen ab; Für eine anfängliche Auslenkung x_0 bei $t = 0$ mit einer Anfangsgeschwindigkeit von $\dot{x}(t = 0) = 0$ ist beispielsweise $\varphi = 0$.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass im Falle des hier verwendeten Drehpendels keine Torsionsfeder verwendet wird, sondern das rückstellende Drehmoment durch eine gewöhnliche (lineare) Feder mit einem entsprechenden Kraftarm realisiert wird. In der Differentialgleichung oben bewirkt sie jedoch den Term $-D\theta$.

2.2 Dämpfung

Ein reales Pendel ist stets gedämpft und der Dämpfungsterm wirkt stets der Geschwindigkeit entgegen. Allerdings kann die dämpfende Kraft ganz unterschiedlich von der Geschwindigkeit abhängen. Der einfachste Fall ergibt sich aus einer geschwindigkeitsproportionalen Dämpfung, weshalb dies meist in Lehrbüchern angenommen wird. Eine solche Dämpfung kann experimentell einfach in Form einer Wirbelstromdämpfung realisiert werden; so auch hier:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -kx - \gamma\dot{x}, \quad \text{bzw.} \\ I\ddot{\theta} &= -D\theta - \gamma'\dot{\theta} \end{aligned} \tag{3}$$

Man erhält ein exponentielles Abklingen der Schwingungsamplitude:

$$\begin{aligned} x &= x_0 \cos(\omega_0 t + \varphi) \cdot \exp(-\gamma t/(2m)) \\ \theta &= \theta_0 \cos(\omega_0 t + \varphi) \cdot \exp(-\gamma' t/(2I)) \end{aligned} \tag{4}$$

In der Praxis spielt aber die Dämpfung durch mechanische Reibung ebenfalls eine Rolle. Mechanische Reibung kann komplexe Abhängigkeiten aufweisen und wird oft als konstant, d. h. geschwindigkeitsunabhängig angenommen. Man kann zeigen, dass für den Fall einer konstanten geschwindigkeitsunabhängigen Reibungsdämpfung die Schwingungsamplitude als Funktion der Zeit linear abklingt, siehe Abb. 1. Eine solche Reibung kann in der Differenzialgleichung berücksichtigt werden als

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -kx - \operatorname{sign}(\dot{x}) \cdot \mu, \quad \text{bzw.} \\ I\ddot{\theta} &= -D\theta - \operatorname{sign}(\dot{\theta}) \cdot \mu'. \end{aligned} \tag{5}$$

Hierbei ist sign(x) die Vorzeichenfunktion, die hier bewirkt, dass die Reibung der Bewegung stets entgegenwirkt. Durch die geschwindigkeitsunabhängige Reibungsdämpfung erhält man näherungsweise ein lineares Abklingen:

$$
\begin{aligned}
x &= \begin{cases} \left(x_0 - \frac{2\mu}{\pi\omega_0 m}t\right)\cos(\omega_0 t + \varphi), & \text{für } t \leq \frac{x_0\pi\omega_0 m}{2\mu} \\ 0, & \text{anderenfalls} \end{cases} \\
\theta &= \begin{cases} \left(\theta_0 - \frac{2\mu'}{\pi\omega_0 I}t\right)\cos(\omega_0 t + \varphi), & \text{für } t \leq \frac{\theta_0\pi\omega_0 I}{2\mu'} \\ 0, & \text{anderenfalls} \end{cases}
\end{aligned}
\tag{6}
$$

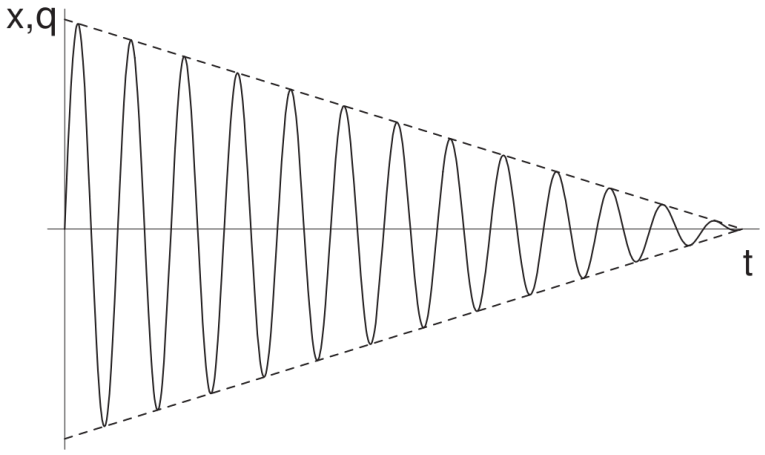

Abbildung 1: Schwingungsamplitude als Funktion der Zeit bei der geschwindigkeitsunabhängigen Reibungsdämpfung.

Bei der Realisierung des Pendels auf der Luftkissenschiene ist die mechanische Reibung sehr klein und kann in diesem Versuch vernachlässigt werden. Beim Drehpendel ist dies nicht der Fall; hier hat man im Allgemeinen beide Dämpfungsarten, wobei - je nach Einstellung der Wirbelstromdämpfung - die mechanische Reibung überwiegen kann.

Die beiden Versuchsaufbauten im Vergleich bieten also die Möglichkeit, die qualitativen Unterschiede zwischen mechanischer Reibung und geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung kennen zu lernen, insbesondere bezüglich der Amplitudenabnahme, die eher linear bzw. eher exponentiell ist. Beim Vergleich der Ergebnisse der beiden Varianten sieht man auch unmittelbar, dass das Verhalten weder komplett einer geschwindigkeitsunabhänigen Reibung noch komplett einer geschwindigkeitsproportionalen Dämpfung entspricht, sondern lediglich das eine oder andere dominiert.

Mit zunehmender Schwingungsamplitude nimmt jedoch auch der mittlere Geschwindigkeitsbetrag zu. Dies bedeutet, dass für hinreichend große Schwingungsamplituden die geschwindigkeitspropor-

tionale Dämpfungsterm stets dominiert, während für hinreichend kleine Schwingungsamplituden die geschwindigkeitsunabhängige Reibungsterm überwiegt.

Bei einer großen anfänglichen Auslenkung erwartet man daher zunächst eine exponentielle Abnahme der Auslenkung, die für spätere Zeiten in eine lineare Abnahme übergeht.

Bei dem Aufzeichnen einer Resonanzkurve – wenn das Drehpendel mit einem äußeren Drehmoment angetrieben wird – spielen meist beide Dämpfungsarten eine Rolle. In die Breite dieser Resonanzkurve gehen dementsprechend auch beide Beiträge ein. Die Breite wird also größer sein als für den Fall, bei dem nur die magnetische Dämpfung berücksichtigt und die mechanische Dämpfung vernachlässigt wird.

2.3 Phasenraum

Ein eindimensionaler harmonischer Oszillator wird in einem Schnappschuss allein durch Kenntnis der Ortskoordinate noch **nicht** vollständig beschrieben, denn die momentane Geschwindigkeit (oder alternativ der Impuls) ist damit nicht bekannt. Erst das Wertepaar Ort x und Geschwindigkeit v beschreiben den momentanen Zustand des eindimensionalen harmonischen Oszillators vollständig. Für das Drehpendel ist dieses Wertepaar der Auslenkwinkel θ und die Winkelgeschwindigkeit $\dot{\theta}$; für andere Realisierungen des eindimensionalen harmonischen Oszillators können dies auch zwei andere entsprechende verallgemeinerte Koordinaten sein. Eine intuitive Möglichkeit, das System grafisch zu beschreiben, wären daher zwei Diagramme, in denen diese zwei Größen – zum Beispiel Ort x und Geschwindigkeit v – gegen die Zeit aufgetragen sind. Eine andere kompaktere Möglichkeit ist es, in nur einem Diagramm die beiden Größen als Koordinaten der Auftragung zu wählen. Also, zum Beispiel, den Ort x als Abszisse und die Geschwindigkeit v als Ordinate. Der momentare Zustand des Systems wird repräsentiert durch einen Punkt, die Entwicklung des Systems durch eine Trajektorie. Eine solche Auftragung heißt Phasenraumdiagramm, und dies werden Sie in diesem Versuch kennen lernen.

Allgemeiner heißt der Raum, der durch alle Dimensionen aufgespannt wird, die nötig sind, um den momentanen Zustand eines Systems als Schnappschuss vollständig zu beschreiben, Phasenraum. Für das lineare Pendel wird dieser Raum zum Beispiel durch den Ort x und die Geschwindigkeit v (oder alternativ der Impuls) aufgespannt und der Zustand des Systems wird in der klassischen Physik durch einen Punkt repräsentiert.

3 Fragen zum Versuch

1. Freie Schwingung eines Federpendels

   a) Geben Sie die Schwingungsfrequenz ω_g einer geschwindigkeitsproportional gedämpften Schwingung an. Berechnen Sie die relative Änderung $\Delta\omega/\omega_0$ der Schwingungsfrequenz

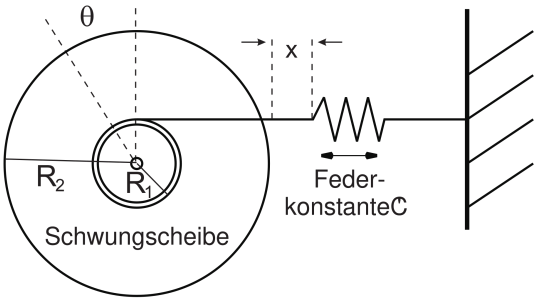

Abbildung 2: Vereinfachte Darstellung des Drehpendels.

gegenüber dem ungedämpften Fall für $\beta/\omega_0 = \frac{1}{10}$, wobei β ein Maß für die Dämpfung ist. Wie groß ist die Güte Q des Oszillators?

b) Skizzieren Sie den Verlauf einer Trajektorie im Phasenraum für eine gedämpfte Schwingung.

2. Erzwungene Schwingung eines Federpendels.

a) Die Schwingungsdauer einer freien, schwach geschwindigkeitsproportional gedämpften Schwingung sei $T = 1\,\mathrm{s}$, die Abklingzeit der Amplitude $\tau_A = 2m/\gamma = 2\,\mathrm{s}$ (siehe Gl. 4). Das entspricht einer Abklingzeit τ der Schwingungsenergie von $\tau = \tau_A/2 = 1\,\mathrm{s}$. Bei welcher Frequenz ω_R ist die Amplitude der erzwungenen Schwingung maximal?

b) Geben Sie den Zusammenhang zwischen der Halbwertsbreite der Resonanzkurve $\delta\omega$ (volle Breite bei halber Maximalamplitude) und der Güte Q des Oszillators an. Benutzen Sie den Zusammenhang $\delta\omega = 2\sqrt{3}\beta$.

3. Drehpendel

Verwenden Sie für die Lösung der Aufgaben die vereinfachte Darstellung des Drehpendels in Abb. 2.

Hinweis: Geben Sie alle Winkel im Bogenmaß an $(0..2\pi)$*!*

a) Geben Sie den Zusammenhang zwischen dem Auslenkungswinkel θ der Scheibe und der Auslenkung x der Feder an.

b) Geben Sie die rücktreibende Federkraft $F_F(\theta)$ und das zugehörige rücktreibende Drehmoment $M_F(\theta)$, das auf die Scheibe wirkt, an.

c) Berechnen Sie aus dem Drehmoment $M_F(\theta)$ das Potential $U_F(\theta)$ als Funktion des Auslenkwinkels θ und skizzieren Sie $U_F(\theta)$. Verwenden Sie die Anfangsbedingung $U_F(0) = 0$.

d) Geben Sie das gesamte Trägheitsmoment I der beiden Scheiben in Abb. 2 an.

e) Geben Sie die Differentialgleichung für das in Abb. 1 skizzierte lineare gedämpfte Drehpendel an. Wie groß ist die Schwingungsdauer T des ungedämpften Drehpendels?

Zahlenwerte: Federkonstante $C' = 23\,\mathrm{N/m}$; Radien der Scheiben: $R_1 = 1,5\,\mathrm{cm}$; $R_2 = 4,3\,\mathrm{cm}$. Massen der Scheiben: $M_1 = 70\,\mathrm{g}$; $M_2 = 200\,\mathrm{g}$.

4. Lineares Pendel auf der Luftschiene (siehe Abb. 4)

   a) Geben Sie die rücktreibende Federkraft $F_F(x)$ als Funktion der Auslenkung an.

   b) Berechnen Sie das Potential $U_F(x)$ als Funktion der Auslenkung x (Anfangsbedingung $U_F(0) = 0$).

   c) Geben Sie die Differentialgleichung für das Federpendel (Masse m) auf der Luftschiene an. Wie groß ist die Schwingungsdauer T des ungedämpften Pendels.

   Zahlenwerte: Federkonstanten $c_1 = c_2 = (12,6 \pm 0,2)\,\mathrm{N/m}$; führen Sie die Rechnungen für die Masse $m = 352\,\mathrm{g}$ und $m = 411\,\mathrm{g}$ (je 3% Fehler) durch.

4 Hinweise zum Versuchsaufbau

4.1 Drehpendel

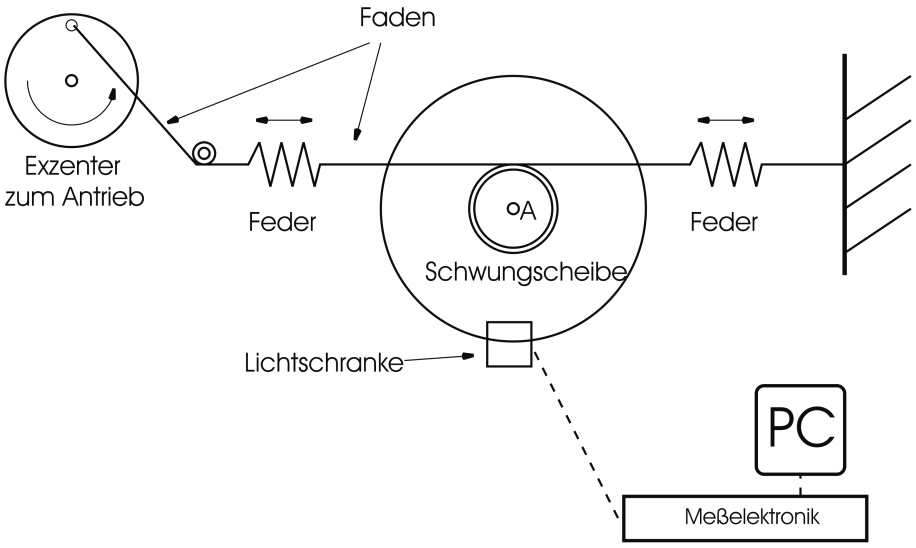

Abbildung 3: Schematischer Aufbau des Drehpendels

Die Schwungscheibe besteht aus einer kleinen und einer großen Scheibe. Sie kann Drehschwingungen um die Achse A ausführen. Die kleine Scheibe ist mit einem Faden umwickelt, der die Drehbewegung in eine lineare Bewegung überführt. Dadurch kann das rückstellende Drehmoment über zwei lineare Federn realisiert werden. Der Antrieb des Oszillators geschieht ebenfalls durch eine dieser Federn.

Dazu wird das eine Federende mittels eines Schrittmotors (400 Schritte pro Umdrehung) bewegt, der wiederum durch einen Frequenzgenerator gesteuert wird. Die Antriebsfrequenz ν erhält man also durch Division der am Frequenzgenerator angezeigten Frequenz durch 400. Diese Konstruktion hat den zusätzlichen Vorteil, dass im getriebenen Fall die Phasenverschiebung zwischen Antrieb und Oszillator qualitativ visuell wahrgenommen werden kann: am linken Ende der Feder sieht man die Bewegung der Anregung, am rechten Ende der Feder sieht man die Schwingung des Oszillators. Achten Sie beim Durchfahren der Resonanz beim getriebenen Oszillator auf diese Phasenbeziehung. Senkrecht zur Scheibe kann ein starker Magnet angenähert werden, der als Wirbelstrombremse abhängig vom Abstand zur Schwungscheibe eine Dämpfung zusätzlich zur mechanischen Reibung bewirkt. Der Auslenkungswinkel θ der Schwungscheibe wird durch ein Streifenraster mit einer Lichtschranke und Messelektronik bestimmt.

4.2 Lineares Pendel auf der Luftkissenschiene

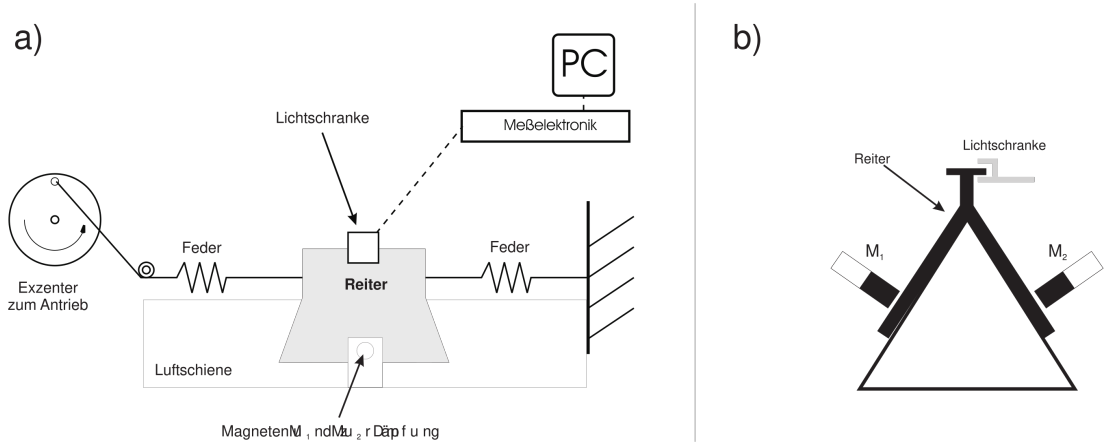

Abbildung 4: Schematischer Aufbau des Luftkissenpendels a) Seitenansicht, b) Sicht von vorne.

Der Oszillator wird über eine Feder angetrieben. Das eine Federende mittels eines Schrittmotors (400 Schritte pro Umdrehung) bewegt, der wiederum durch einen Frequenzgenerator gesteuert wird. Die Antriebsfrequenz ν erhalten Sie, wenn Sie die am Frequenzgenerator angezeigte Frequenz durch 400 dividieren. Diese Konstruktion hat den zusätzlichen Vorteil, dass im getriebenen Fall die Phasenverschiebung zwischen Antrieb und Oszillator qualitativ visuell wahrgenommen werden kann: am linken Ende der Feder sieht man die Bewegung der Anregung, am rechten Ende der Feder sieht man die Schwingung des Oszillators. Achten Sie beim Durchfahren der Resonanz beim getriebenen Oszillator auf diese Phasenbeziehung. Senkrecht zum Reiter kann von der linken und rechten Seite jeweils ein starker Magnet angenähert werden, der als Wirbelstrombremse abhängig vom Abstand

zum Reiter die Dämpfung bewirkt. Die Auslenkung x des Reiters wird durch ein Streifenraster mit einer Lichtschranke von der Messelektronik bestimmt.

4.3 Allgemeine Hinweise für beide Versuchsaufbauten

Die Daten werden über einen PC aufgenommen, abgespeichert und können weiter ausgewertet werden. Auf dem Bildschirm können die Winkelauslenkung θ der Schwungscheibe als Funktion der Zeit t und das Phasenraumdiagramm angezeigt werden. In die Bedienung des Messprogramms sowie der Auswertung wird Sie Ihr Betreuer vor Ort einweisen.

Die zeitliche Auflösung der Messungen mit dem PC beträgt 40 ms. Über diese Zeit werden die Messpunkte integriert, eine genauere Angabe der Zeit ist nicht möglich.
Die Breite und der Abstand der Striche auf dem Raster der Lichtschranke beträgt $0,33$ mm (entspricht $0,36^\circ$ beim Drehpendel). Diese Werte bestimmen die räumliche Auflösung. Da für die Amplitudenmessung zwei Punkte der Ellipse im Phasenraum benötigt werden, ist ein Fehler von $0,7$ mm (bzw. $0,7^\circ$ beim Drehpendel) anzunehmen.

5 Aufgabenstellung

Setzen Sie zunächst im ruhenden Fall den Nullpunkt. Drehen Sie dazu das Exzenterrad in eine Position, so dass die Linie, die die Drehachse und den Angriffspunkt verbindet, senkrecht zum Faden steht. Setzen Sie diese Position anschließend bei ruhendem Drehpendel als Nullpunkt durch Knopfdruck der elektronischen Messeinheit. Führen Sie zuerst **alle** Messungen durch und werten Sie die gesammelten Daten erst nach der Durchführung aus.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass bei Versuchen mit PC nur noch der Monitor betrachtet wird und nicht der eigentliche physikalische Vorgang. Machen Sie deshalb folgenden Vorversuch:

Lenken Sie das Pendel stark (beim Drehpendel um $\theta_0 = 180^\circ$) aus und lassen Sie es frei schwingen. Messen Sie mit der Stoppuhr die Dauer von 7 Schwingungen. Führen Sie dies viermal durch. Berechnen Sie die Schwingungsdauer T und geben Sie den Fehler an. Berücksichtigen Sie auch den systematischen Fehler beim Stoppen der Zeit.

5.1 Drehpendel

1. Frei schwingendes Drehpendel

   a) Bestimmen Sie am Monitor des PC anhand des Auslenkwinkel-Zeit-Diagramms $\theta(t)$ ohne magnetische Dämpfung die Schwingungsdauer $\overline{T}$ des Pendels aus 5 Messreihen, indem Sie es manuell auslenken ($\theta_0 \approx 180^\circ$) und frei schwingen lassen. Berechnen Sie aus T die

Kreisfrequenz ω_0 der Schwingung. Vergleichen Sie die experimentell bestimmte Schwingungsdauer mit dem Ergebnis von Aufgabe 3e. Versuchen Sie aus den Messreihen eine Fehlerabschätzung anzugeben. Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem des Vorversuchs.

b) Nehmen Sie ein Auslenkwinkel-Zeit-Diagramm ohne magnetische Dämpfung bei einer Anfangsauslenkung $\theta_0 \approx 180°$ auf und speichern Sie es. Drucken Sie das Diagramm und bestimmen Sie den Koeffizienten μ' in Nm der mechanischen Reibung nach Gleichung 6. Beachten Sie, dass Sie den Auslenkwinkel im Bogenmaß verwenden. Benutzen Sie das in den Vorbereitungsaufgaben berechnete Trägheitsmoment I. Bestimmen Sie die Fehler des Koeffizienten μ'[Nm] der mechanischen Reibung und vernachlässigen Sie dabei die Fehler im Trägheitsmoment I und in der Resonanzfrequenz ω_0.

c) Nehmen Sie ein Auslenkwinkel-Zeit-Diagramm für verschieden starke magnetische Dämpfungen (Abstand Magnet - Schwungscheibe: $d = 1{,}0$ und $2{,}0\,$mm) bei einer Anfangsauslenkung $\theta_0 \approx 270°$ auf und speichern Sie es. Bestimmen Sie die Dämpfungskonstante β'. Drucken Sie dazu das Diagramm $\ln|\theta(t)|$ gegen die Zeit t für jede magnetische Dämpfung aus. Bestimmen Sie aus dem Abfall bei kurzen Zeiten, in denen die Reibungsdämpfung zu vernachlässigen ist, d.h. anhand der ersten zwei bis drei Schwingungen, die Dämpfungskonstante β' der magnetischen Dämpfung. Zeichnen Sie die der magnetischen Dämpfung entsprechende Gerade und die Fehlergeraden in das Diagramm ein.

d) Berechnen Sie die Güte Q_f für die verschiedenen Dämpfungen β aus Aufgabe 1c.

2. Erzwungene Schwingung

a) Nehmen Sie sowohl für eine geringe magnetische Dämpfung ($d = 2{,}0\,$mm), als auch für starke magnetische Dämpfung ($d = 1{,}0\,$mm) die Resonanzkurve auf. Bestimmen Sie dazu am Monitor des PC für den Bereich der Anregungsfrequenz von etwa $\nu = 0{,}35 - 1{,}5\,$Hz die Amplitude θ_A der Winkelauslenkung des getriebenen Pendels aus dem Phasenraumdiagramm. Führen Sie diese Messung auch für den Grenzfall geringer Frequenz ($\nu = 0{,}005\,$Hz) durch, um die Amplitude $\theta_A(0)$ zu bestimmen (Vergleiche Messaufgabe 2c). Tragen Sie θ_A gegen ν auf. Beachten Sie, dass der Wert, den das Messprogramm im Phasenraumdiagramm anzeigt, immer die doppelte Amplitude $2\theta_A$ ist. Warten Sie mit dem Ablesen immer, bis der Einschwingvorgang abgeklungen ist.

b) Berechnen Sie die Dämpfungskonstante β' (Fehler angeben) aus der Halbwertsbreite $\delta\omega$ der Resonanzkurve und vergleichen Sie die Ergebnisse mit der Messaufgabe 1c. Treten Unterschiede auf und falls ja, woher kommen die Unterschiede?

c) Bestimmen Sie die Güte Q_R aus der Resonanzkurve sowohl unter Verwendung der Halbwertsbreite $\delta\omega$ als auch aus dem Verhältnis $\theta_A(\omega_R)/\theta_A(0)$ der Schwingungsamplituden

bei der Resonanzfrequenz ω_R und bei der Frequenz $\omega \to 0\,\mathrm{s}^{-1}$. Verwenden Sie für $\theta_A(0)$ näherungsweise den bei der kleinsten Frequenz ($\nu = 0,005\,\mathrm{Hz}$) gemessenen Wert. Stimmen die Werte innerhalb der Fehlergrenzen überein?

5.2 Lineares Pendel auf der Luftkissenschiene

1. Frei schwingendes Pendel

   a) Bestimmen Sie am Monitor des PC anhand des Auslenkung-Zeit-Diagramms $x(t)$ ohne magnetische Dämpfung die Schwingungsdauer T des Pendels aus 5 Messreihen, indem Sie es manuell auslenken ($x_0 \approx 3\,\mathrm{cm}$) und frei schwingen lassen. Berechnen Sie aus T die Kreisfrequenz ω_0 der Schwingung. Vergleichen Sie die experimentell bestimmte Schwingungsdauer mit dem Ergebnis von Aufgabe 4c. Versuchen Sie aus den Messreihen eine Fehlerabschätzung anzugeben. Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem des Vorversuchs.

   b) Nehmen Sie ein Auslenkung-Zeit-Diagramm ohne magnetische Dämpfung bei einer Anfangsauslenkung $x_0 \approx 3\,\mathrm{cm}$ auf und speichern Sie es. Drucken Sie das Diagramm und bestimmen Sie den Koeffizienten $\mu\,[\mathrm{N}]$ der mechanischen Reibung nach Gleichung (6). Vernachlässigen Sie in den folgenden Aufgaben die mechanische Reibung.

   c) Nehmen Sie ein Auslenkung-Zeit-Diagramm für verschieden starke magnetische Dämpfungen (Abstand Magnet - Schwungscheibe: $d = 0{,}5; 1{,}0\,\mathrm{mm}$) bei einer Anfangsauslenkung $x_0 \approx 3\,\mathrm{cm}$ auf und speichern Sie es. Bestimmen Sie die Dämpfungskonstante β. Drucken Sie dazu das Diagramm $\ln|x(t)|$ gegen die Zeit t für jede magnetische Dämpfung aus. Bestimmen Sie aus dem Abfall die Dämpfungskonstante β der magnetischen Dämpfung. Zeichnen Sie die der magnetische Dämpfung entsprechende Gerade in das Diagramm ein.

   d) Berechnen Sie die Güte Q_f für die Dämpfungen β aus Aufgabe 1c.

2. Erzwungene Schwingung

   a) Nehmen Sie sowohl für eine geringe magn. Dämpfung ($d = 1{,}0\,\mathrm{mm}$), als auch für starke magnetische Dämpfung ($d = 0{,}5\,\mathrm{mm}$) die Resonanzkurve auf. Bestimmen Sie dazu am Monitor des PC für den Bereich der Anregungsfrequenz von etwa $\nu = 0{,}5 - 2{,}0\,\mathrm{Hz}$ die Amplitude x_A der Auslenkung des Reiters aus dem Phasenraumdiagramm. Führen Sie diese Messung auch für den Grenzfall kleiner Frequenzen ($\nu = 0{,}005\,\mathrm{Hz}$) durch, um die Amplitude $x_A(0)$ zu bestimmen (Vergleiche Messaufgabe 2c). Tragen Sie x_A gegen ν auf. Beachten Sie, dass der Wert, den das Messprogramm im Phasenraumdiagramm anzeigt, immer die doppelte Amplitude $2x_A$ ist. Warten Sie mit dem Ablesen immer, bis der Einschwingvorgang abgeklungen ist.

b) Berechnen Sie die Dämpfungskonstante β (Fehler angeben) aus der Halbwertsbreite $\delta\omega$ der Resonanzkurve und vergleichen Sie die Ergebnisse für $d = 1{,}0\,\text{mm}$ mit der Messaufgabe 1c. Treten Unterschiede auf und falls ja, woher kommen die Unterschiede?

c) Bestimmen Sie die Güte Q_R aus der Resonanzkurve sowohl unter Verwendung der Halbwertsbreite $\delta\omega$ als auch aus dem Verhältnis $x_A(\omega_R)/x_A(0)$ der Schwingungsamplituden bei der Resonanzfrequenz ω_R und bei der Frequenz $\omega = 0\,\text{s}^{-1}$. Verwenden Sie für $x_A(0)$ näherungsweise den bei der kleinsten Frequenz $\nu = 0{,}005\,\text{Hz}$ gemessenen Wert. Stimmen die Werte innerhalb der Fehlergrenzen überein?