

Abbildung 1: Quelle: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/3857>

VERSUCHSANLEITUNG FÜR DAS ANFÄNGERPRAKTIKUM

A01 Bestimmung der Erdbeschleunigung mit dem Faden- und Reversionspendel

19. November 2025

Raum MD251

Inhaltsverzeichnis

1	Informationen	4
1.1	Literatur	4
1.2	Stichworte	4
2	Theoretische Grundlagen -	5
2.1	Mathematisches Schwerependel	5
2.2	Physikalisches Pendel	6
2.3	Reversionspendel	8
2.4	Korrekturen	9
2.4.1	Maximale Pendelauslenkung φ_0	9
2.4.2	Pendelauftrieb in der Luft	10
3	Aufgabenstellung	12
4	Versuchsaufbau	13
5	Versuchsdurchführung und Auswertung	15
5.1	1. Aufgabe	15
5.2	2. Aufgabe	16
6	Fragen zur Selbstkontrolle	19

Abbildungsverzeichnis

1	Quelle: https://lp.uni-goettingen.de/get/text/3857	1
2.1	mathematisches Schwerependel	5
2.2	physikalisches Schwerependel	5
2.3	Reversionspendel	9
4.1	Lagerung, Auslenkung und Zeitmessung der Pendelschwingungen schematisch: RP, FP Reversions- u. Fadenpendel mit Aufhängung A, Schneid- bzw. Spitzenlager LRP bzw. L_{FP} mit Rahmen R_{FP} , Justierung x_L der Lichtschranke L sowie x_0 der Maximalauslenkung M der Pendel	13
5.1	Schwingungszeiten T_1 (l_2) und T_2 (l_2) des Revisionspendels; Inset: Bestimmung des Schnittpunkts (T_a , l_a) und Fehlers ΔT_a	17

1 Informationen

1.1 Literatur

1. Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. I: Mechanik
2. Gerthsen-Kneser-Vogel, Physik
3. Pohl, Einführung in die Physik, 1. Bd.: Mechanik
4. Ilberg, Geschke (Hrsg.), Physikalisches Praktikum

1.2 Stichworte

- Pendelbewegung
- harmonische Schwingung
- mathematisches und physikalisches Schwerependel
- Reversionspendel
- Trägheitsmoment
- Steinerscher Satz
- reduzierte Pendellänge

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Mathematisches Schwerependel

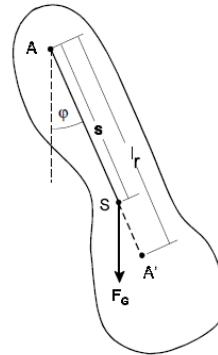
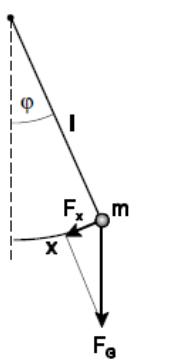


Abbildung 2.1: mathematisches Schwere- **Abbildung 2.2:** physikalisches Schwerependel

Wirkt auf einen beweglichen Körper, der aus seiner Ruhelage ausgelenkt wurde, eine der Auslenkung entgegen gerichtete und zu ihr proportionale Kraft, führt dieser eine *harmonische Schwingung* um seine Ruhelage aus. Ein einfaches Beispiel hierfür ist das mathematische Schwerependel (Abb. 2.1). Dieses Fadenpendel ist idealisiert, d.h. seine Masse m wird als punktförmig, der Faden mit Länge l als dehnungsfrei und masselos und darüber hinaus die Aufhängung und Bewegung des Pendels als reibungsfrei angenommen.

Ist die Bogenlänge $x = l \cdot \varphi$ bzw. der Winkel φ die Auslenkung der Masse m , wirkt aufgrund der Schwerkraft die Kraft F_G die Kraft $F_x = -m \cdot g \cdot \sin(\varphi)$ in Richtung der Auslenkung. Für genügend kleine Winkel φ ist $\sin(\varphi) \approx \varphi$; $F_x \approx -m \cdot g \cdot \varphi$, so dass dann die vereinfachte Bewegungsgleichung des Pendels lautet:

$$m \cdot l \cdot \ddot{\varphi} + m \cdot g \cdot \varphi = 0 \quad \text{bzw.} \quad \ddot{\varphi} + \frac{g}{l} \cdot \varphi = 0 \quad (2.1)$$

Die allgemeine Lösung dieser Differentialgleichung für den zeitabhängigen Auslenkwinkel $\varphi(t)$ lautet:

$$\varphi(t) = \varphi_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha) \quad (2.2)$$

φ_0 ist der maximale Auslenkungswinkel der Schwingung $\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{1}{T}$ die Kreisfrequenz, f die Frequenz, T die Schwingungsdauer und α ein Phasenwinkel. φ_0 und α sind durch die Anfangsbedingungen der Schwingung $\varphi(0)$ und $\dot{\varphi}(0)$ festgelegt. Einsetzen von Gl(2.2) in Gl(2.1) ergibt für die Schwingungsdauer T bzw. die Erdbeschleunigung g :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad \text{bzw.} \quad g = \frac{4\pi^2 l}{T^2} \quad (2.3)$$

Aus der Schwingungsdauer T und der Länge l eines Fadenpendels lässt sich also unter hinreichend idealen Bedingungen die Erdbeschleunigung g bestimmen.

2.2 Physikalisches Pendel

Abb. 2.2 skizziert ein physikalisches Pendel, dessen Masse m in dem durch die Umrandungslinie gekennzeichneten Volumen verteilt ist. Wird das Pendel um die Achse A mit dem Winkel φ ausgelenkt, bewirkt die im Abstand s von A im Schwerpunkt S wirkende Schwerkraft F_G ein rücktreibendes Drehmoment $M = -mgs \cdot \sin(\varphi)$. Die resultierende Bewegung des Pendels ist nicht von seiner Masse m , sondern von seinem Trägheitsmoment I_A bezüglich der Drehachse A abhängig (s. Versuch A8 Trägheitsmomente).

Für kleine Winkel φ ist $M \approx -m g s \varphi$ und die Bewegungsgleichung des Pendels lautet analog zu Gl. 2.1:

$$I_A \cdot \ddot{\varphi} + m \cdot g \cdot s \cdot \varphi = 0 \quad \text{bzw.} \quad \ddot{\varphi} + \frac{mgs}{I_A} \cdot \varphi = 0 \quad (2.4)$$

Entsprechend Gl. 2.1 und 2.3 ist die Schwingungsdauer des physikalischen Pendels

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_A}{mgs}} = 2\pi \sqrt{\frac{l_r}{g}} \quad \text{mit} \quad l_r = \frac{I_A}{ms} \quad (2.5)$$

Die Länge l_r wird *reduzierte Pendellänge* genannt. Gleichung 2.5 bedeutet: Ein physikalisches Schwerependel mit der reduzierten Pendellänge l_r hat die gleiche Schwingungsdauer wie ein mathematisches Schwerependel der Länge $l = l_r$. Die Kenntnis der reduzierten Pendellänge eines physikalischen Pendels bietet damit die Möglichkeit, die Erdbeschleunigung unter realen Bedingungen zu bestimmen.

Mit dem Satz von Steiner (s. Versuch A8) lässt sich das Trägheitsmoment I_A des Pendels

und damit die reduzierte Pendellänge l_r durch sein Trägheitsmoment I_S bezüglich des Schwerpunkts ausdrücken:

$$I_A = I_S + ms^2 \quad , \quad l_r = \frac{I_S}{ms} + s \quad (2.6)$$

Betrachtet wird zunächst ein Fadenpendel als physikalisches Schwerependel, das aus einer Kugel mit Radius R und Masse m_K , sowie einem Faden mit der Masse m_F und der Länge $l_F \gg R$ besteht. Die Pendellänge $l = l_F + R$ wird vom Aufhängepunkt bis zum Kugelmittelpunkt gerechnet. Die Bewegungsgleichung dieses Pendels lautet für kleine Auslenkungen:

$$I_A \ddot{\varphi} + \left(m_K + \frac{1}{2}m_F \right) g \cdot l \cdot \varphi = 0 \quad (2.7)$$

die reduzierte Pendellänge:

$$l_r = \frac{I_A}{\left(m_K + \frac{1}{2}m_F \right) \cdot l} \quad (2.8)$$

Das Trägheitsmoment I_A des Pendels ist die Summe der Trägheitsmomente I_K der Kugel und I_F des Fadens bzgl. der Achse A:

$$\begin{aligned} I_K &= m_K l^2 + I_S = m_K l^2 + \frac{2}{5}m_K R^2 = m_K l^2 \left(1 + \frac{2R^2}{5l^2} \right) \\ I_F &= \frac{1}{3} \cdot m_F \cdot l_F^2 \approx \frac{1}{3} \cdot m_F \cdot l^2 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Einsetzen in Gleichung 2.8, Vernachlässigung von Produkten kleiner Größen (R^2, l^2, m_F, m_K) und Vergleich mit Gleichung 2.3 führt zu:

$$\begin{aligned} l_r &= l \left(1 + \frac{2}{5} \cdot \frac{R^2}{l^2} - \frac{1}{6} \cdot \frac{m_F}{m_K} \right) \\ g &= \frac{4\pi^2 l}{T^2} \left(1 + \frac{2}{5} \cdot \frac{R^2}{l^2} - \frac{1}{6} \cdot \frac{m_F}{m_K} \right) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Es sind jeweils der zweite und dritte Term in der Klammer von Gl. 2.10, d.h. die räumliche Ausdehnung der Pendelmasse, welche das unterschiedliche Schwingungsverhalten von mathematischem und physikalischem Fadenpendel beschreibt.

2.3 Reversionspendel

Wird ein physikalisches Pendel (s. Abb. 2.2) nicht um die Achse A, sondern um eine in Richtung von S und im Abstand l_r liegende parallele Achse A, den (auf A bezogenen) sog. Schwingungsmittelpunkt ausgelenkt, gilt für die reduzierte Pendellänge l_r entsprechend Gl. 2.6:

$$l'_r = \frac{I_S}{m(l_r - s)} + l_r - s \quad (2.11)$$

Hieraus folgt ebenso mit Gl. 2.6:

$$l'_r = \frac{I_S}{m \cdot \left(\frac{I_S}{m \cdot s} + s - s \right)} + \frac{I_S}{ms} + s - s = s + \frac{I_S}{ms} = l_r \quad (2.12)$$

Dies bedeutet mit Gleichung 2.5: $T' = T$. Die Schwingungszeit eines physikalischen Pendels ändert sich nicht, die Schwingungszeit eines physikalischen Pendels ändert sich nicht, wenn es anstatt um die Drehachse A um den entsprechenden Schwingungsmittelpunkt A' ausgelenkt wird.

Abb. 2.3 zeigt das im Versuch vorliegende *Reversionspendel*. Es besteht aus einer Pendelstange mit zwei auf ihr verschiebbaren Masse $m_1 = 1400\text{g}$ und $m_2 = 1000\text{g}$. Das Pendel hat zwei Schneidlager S_1 und S_2 im Abstand l , auf denen es wahlweise gelagert jeweils Schwingungen mit den Schwingungsdauern T_1 und T_2 ausführt. Durch Verändern der Abstände der Massen, hier zum Beispiel zum Schneidlager S_1 , l_1 bzw. l_2 , werden auch die Schwingungsdauern (im Allg. unterschiedlich) verändert. Ist $T_1 = T_2 = T$, d.h. schwingt

das Pendel um beide Lager mit der gleichen Zeit T , ist der sehr genau bekannte Abstand l der Schneidlager gleich der reduzierten Pendellänge l_r . Über Gleichung 2.5 kann daraus die Erdbeschleunigung g bestimmt werden.

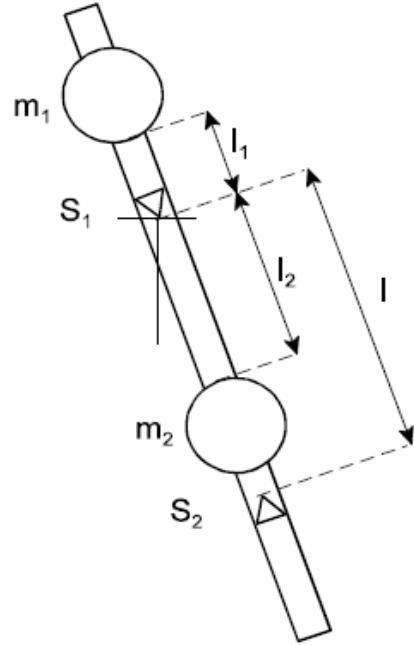


Abbildung 2.3: Reversionspendel

2.4 Korrekturen

2.4.1 Maximale Pendelauslenkung φ_0

Die exakte Bewegungsgleichung des mathematischen Pendels lautet:

$$ml\ddot{\varphi} + mg \cdot \sin(\varphi) = 0 \quad \text{bzw.} \quad \ddot{\varphi} + \frac{g}{l} \cdot \sin(\varphi) = 0 \quad (2.13)$$

Bei der Aufstellung von Gl. 2.1 wurde die Näherung $\sin(\varphi) \approx \varphi$ benutzt. Das Pendel schwingt daher i. Allg. nicht mit der im Ansatz, Gl. 2.2, für verschwindend geringe Auslenkung exakten Kreisfrequenz ω sondern mit einer leicht geänderten Kreisfrequenz ω' :

$$\varphi(t) = \varphi_0 \cdot \sin(\omega' t + \alpha) \quad (2.14)$$

Die Reihenentwicklung des Sinus bis zur nächsthöheren Ordnung:

$$\sin(\varphi) = \varphi - \frac{\varphi^3}{6} + \dots \approx \varphi_0 \cdot \sin(\omega' t) - \frac{\varphi_0^3}{6} \cdot \sin^3(\omega' t) \quad (2.15)$$

führt mit der Näherung: $\sin^3(\omega' t) \approx \frac{3}{4} \sin(\omega' t)$ zu

$$\sin(\varphi) \approx \varphi_0 \cdot \sin(\omega' t + \alpha) \cdot \left(1 - \frac{\varphi_0^2}{8}\right) \quad (2.16)$$

und mit $\omega'^2 = \frac{g}{l}$ nach Einsetzen in Gleichung 2.13 zur Gleichung:

$$-\omega'^2 + \omega^2 \cdot \left(1 + \frac{\varphi_0^2}{8}\right) = 0 \quad \text{bzw.} \quad T = \left(1 - \frac{\varphi_0^2}{16}\right) \cdot T' \quad (2.17)$$

Die Korrektur ist sowohl für das Fadenpendel als auch das Reversionspendel gültig. Für Auslenkungswinkel $\varphi \leq 5^\circ$ ist die relative Abweichung T von T' $\leq 5 \cdot 10^{-4}$.

2.4.2 Pendelauftrieb in der Luft

Physikalisches Fadenpendel

Infolge des Auftriebes der Luft lautet die Bewegungsgleichung (siehe Gl. 7) des Pendels:

$$I_A \ddot{\varphi} + \left(m_K + \frac{1}{2} m_F\right) g \cdot \left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_E}\right) \cdot l \cdot \varphi = 0 \quad (2.18)$$

Hier ist ρ_L die Dichte der Luft und ρ_E die Dichte des Pendels (Eisenkugel mit Stahldraht). Mit Gleichung 2.10 folgt für die reduzierte Pendellänge und die Erdbeschleunigung:

$$\begin{aligned} l_r &= l \left(1 + \frac{2}{5} \cdot \frac{R^2}{l^2} + \frac{\rho_L}{\rho_E} - \frac{1}{6} \cdot \frac{m_F}{m_K}\right) \\ g &= \frac{4\pi^2 l}{T^2} \left(1 + \frac{2}{5} \cdot \frac{R^2}{l^2} + \frac{\rho_L}{\rho_E} - \frac{1}{6} \cdot \frac{m_F}{m_K}\right) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Fasst man die Korrekturen infolge der Massenausdehnung des Fadenpendels, des Auftriebs und der Maximalauslenkung zusammen, ergibt sich für die Bestimmung von g:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2} \left(1 + \frac{2}{5} \cdot \frac{R^2}{l^2} + \frac{\rho_L}{\rho_E} + \frac{\varphi_0^2}{8} - \frac{1}{6} \cdot \frac{m_F}{m_K} \right) \quad (2.20)$$

Mit den Werten $\frac{R}{l} = 0,023$, $\frac{\rho_L}{\rho_E} = 1,6 \cdot 10^{-4}$, $\frac{m_F}{m_K} = 9 \cdot 10^{-4}$ und einer Maximalauslenkung von 2° (ca. 5cm Auslenkung der Kugel) hat der Korrekturfaktor von g gemäß Gleichung 2.20 den Wert $g = 1 + 4,1 \cdot 10^{-4}$.

Reversionspendel

Für das Reversionspendel sind die Korrekturen infolge der Maximalauslenkung φ_0 , sowie des Auftriebs in Luft analog zu denen des Fadenpendels. Man erhält für die reduzierte Pendellänge l_r bzw. die Formel zur Bestimmung von g:

$$\begin{aligned} l_r &= l \cdot \left(1 + \frac{\rho_L}{\rho_E} \right) \\ g &= \frac{4\pi^2 l}{T^2} \cdot \left(1 + \frac{\rho_L}{\rho_E} + \frac{\varphi_0^2}{8} \right) \end{aligned} \quad (2.21)$$

Bei einer Maximalauslenkung von $0,5^\circ$ (ca. 1cm des unteren Pendelendes) hat der Korrekturfaktor von g gemäß Gleichung 2.21 den Wert $g = 1 + 1,7 \cdot 10^{-4}$.

3 Aufgabenstellung

1. Bestimmen Sie aus der Schwingungsdauer T des Fadenpendels die Erdbeschleunigung g .
2. Bestimmen Sie aus den Schwingungsdauern T des Reversionspendels die Erdbeschleunigung g .

4 Versuchsaufbau

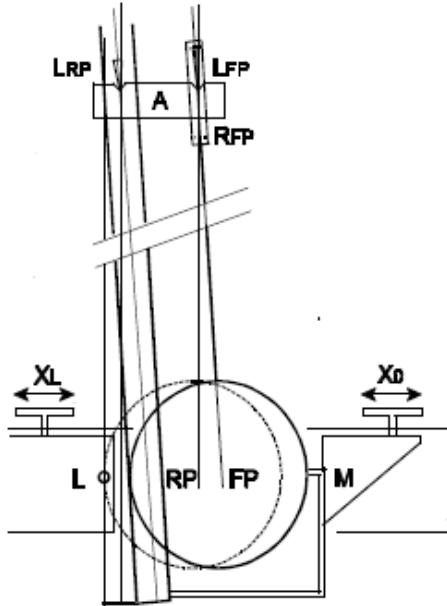


Abbildung 4.1: Lagerung, Auslenkung und Zeitmessung der Pendelschwingungen schematisch: RP, FP Reversions- u. Fadenpendel mit Aufhängung A, Schneid- bzw. Spitzenlager LRP bzw. L_{FP} mit Rahmen R_{FP} , Justierung x_L der Lichtschranke L sowie x_0 der Maximalauslenkung M der Pendel

Abb. 4.1 zeigt den Versuchsaufbau der Pendel schematisch. Für beide Pendel wird die gleiche Aufhängung A benutzt. Ist das Reversionspendel RP eingelegt, hängt das Fadenpendel FP an einem Lineal, welches die Messung der Länge vom Auflagepunkt des Spitzenlagers L_{FP} bis zur Unterseite der Eisenkugel gestattet. Der Rahmen R_{FP} der Lagerspitzen hat seinen Schwerpunkt in Höhe des Lagers, sein vergleichsweise geringes Trägheitsmoment kann bei der g-Bestimmung mit diesem Pendel vernachlässigt werden.

Zur Bestimmung der Schwingungsdauer T der Pendel wird eine Lichtschranke L mit angeschlossenem Zeitmesser benutzt. Die Lichtschranke besteht aus einem U förmigen Bügel und wird an einem Rahmen mit Hilfe der Rändelschraube X_L so justiert, dass der Lichtstrahl gerade beim Nulldurchgang der Pendel (linke Stabkante von RP bzw. Kugelseite von FP) unterbrochen oder geschlossen wird.

Der Betriebartenschalter ist in Position ganz rechts zu stellen. In dieser Betriebsart wird

nur jede zweite Pulsflanke der Lichtschranke registriert. Ist die mit der Rändelschraube X_0 einstellbare Maximalauslenkung M wie empfohlen für RP ca. 1 cm und für FP ca. 5 cm, unterbrechen die Pendel nur von rechts kommend den Lichtstrahl. Dadurch wird vom Zeitmesser die doppelte Schwingungsdauer 2T registriert und die Genauigkeit der Zeitmessung erhöht.

5 Versuchsdurchführung und Auswertung

5.1 1. Aufgabe

Bestimmen Sie zunächst mit Hilfe des Lineals die Länge $l+R$ vom Lagerpunkt des Fadenpendels bis zur Kugelunterseite (Tiefpunkt). Für die nicht exakt kugelförmige Eisenkugel wird der Radius $R = 30\text{mm} \pm 0,5\text{mm}$ angenommen. Entsprechend ist der systematische Fehler der Längenmessung $\Delta l = \pm 0,5\text{mm}$.

Nehmen Sie die Lichtschranke, falls eingebaut aus der Halterung und das Reversionspendel aus der Aufhängung. Heben Sie zum Transport des Fadenpendels den Bügel um die Lagerspitzen mit beiden Händen aus der Linealhalterung und legen Sie ihn vorsichtig auf das Spaltenlager L_{FP} . Achten Sie darauf, dass die Kugel beim Transport nicht zu sehr schwingt und danach zur Ruhe kommt und nicht in der Ruhelage rotiert.

Montieren Sie nun die Lichtschranke, so dass der Lichtstrahl die ruhende Kugel entweder an der linken oder rechten Seite streift. Der Lichtstrahl darf nicht die Mitte der Kugel treffen. Nach Drücken der Reset-Taste des Zeitmessers sollte dann die Zeitmessung infolge der geringen Kugelbewegung starten. Lenken Sie die Kugel um 5cm, gemessen vom Lichtsensor zur Außenseite der Kugel, aus. Warten Sie bis die Kugel frei, d.h. nicht an der Begrenzung anstoßend eingeschwungen ist, und drücken Sie den Resetknopf des Zeitmessers erneut. Die Kugel darf sollte nicht rotierend oder taumeln. Es sollte eine Schwingungszeit $2T$ von mehr als 4 s im Display abgelesen werden. Nach erneutem Drücken des Resetknopfes wird die Zeitmessung wiederholt. Die Ergebnisse der Zeitmessungen sollten sich nicht mehr als 2 Digits (ms) unterscheiden. Üben Sie die Auslenkung und Zeitmessung mehrmals.

Die Schwingungsdauern $2T$ des Fadenpendels werden nach der Auslenkung des Pendels 10 mal bestimmt. Anschließend wird das Pendel erneut ausgelenkt und der Versuch wiederholt. Bestimmen Sie in der Auswertung den Mittelwert \bar{T} und die Standardabweichung σ_T und Messunsicherheit u_T als Maß für den statistischen Fehler der Einzelmessung und des Mittelwertes.

Bestimmen Sie mit Gleichung 2.20 die Erdbeschleunigung g , sowie den relativen Größtfehler $(\frac{\Delta g}{g})_{max}$ nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz. Als Einzelfehler sind für die Pendellänge $\Delta l = \pm 0,5\text{mm}$ anzunehmen. Für die Zeit $2T$ ist die Auflösung des Zeitmessers $\Delta 2T = \pm 1\text{ms}$. d.h. $\Delta \pm 0,5\text{ ms}$ einzusetzen oder die Messunsicherheit u_T falls diese $> 0,5\text{ ms}$ ist. Der Korrekturfaktor wird als fehlerfrei angenommen.

Vergleichen Sie das Ergebnis für $g \pm \Delta g$ mit dem Literaturwert von g . Aufgrund der

Erdrotation und der Abweichung der Erde von der Kugelform ist g auf der Erdoberfläche von der geographischen Breite abhängig. Für Duisburg ergibt sich: $g = 9,8117 \frac{m}{s^2}$. Diskutieren Sie die Abweichung Ihres Messergebnisses vom angegebenen Wert im Zusammenhang mit den angenommenen, sowie weiteren möglichen Fehlern.

5.2 2. Aufgabe

Heben Sie zunächst das Fadenpendel aus der Aufhängung in die Halterung am Lineal zurück. Stellen Sie die Masse $m_1 = 1400$ g des Reversionspendels im Abstand $l_1 = 10$ cm von S_1 und die Masse $m_2 = 1000$ g zunächst im Abstand $l_2 = 20$ cm fest (siehe Abbildung 2.3). Die Einstellung der Positionen erleichtern eine Reihe von Markierungen, die im Abstand von je 5 cm auf dem Pendelstab angebracht sind.

Hängen Sie das Pendel nun vorsichtig mit der Schneide S_1 in das Lager L_{RP} ohne die Lichtschranke zu berühren. Das Schneidlager sollte mittig in der Vertiefung mir Abstand zum Lagerrand liegen. Justieren Sie die Lichtschranke wie zuvor beim Fadenpendel. Drehen Sie darauf das Pendel um, d.h. legen Sie es mit der Schneide S_2 in das Lager. Infolge einer leichten Krümmung des Pendelstabes ist die Position der Lichtschranke nun nicht mehr optimal. Suchen Sie eine mittlere Position zwischen den einzeln jeweils optimalen Lagen. (Der Versuch ergibt, dass eine geringe Verschiebung der Lichtschranke keinen messbaren Einfluss auf die registrierte Schwingungszeit hat.)

Wie in Aufgabe 1, ist die Lichtschranke so zu positionieren, dass die rechte oder linke Kante der Pendelstange gerade so die Lichtschranke verdeckt. Lenken Sie das Pendel (am besten von unten her) um 1cm aus, sodass es nach dem Loslassen möglichst nur in einer Richtung, d.h. durch seine Gleichgewichtslage (Tiefpunkt) schwingt. Warten Sie bis es frei, d.h. ohne am Anschlag anzustoßen schwingt und starten Sie die Zeitmessung. Nach Wiederholen der Zeitmessung sollten sich die Einzelergebnisse für die Schwingungsdauern $2T_1$ (um S_1) bzw $2T_2$ (um S_2) nach Umdrehen des Pendels jeweils nicht mehr als um 1 bis 2 Digits (ms) unterscheiden. Eine Periodendauer $2T$ von ≈ 4 s ist zu erwarten. Wiederholen Sie andernfalls die Auslenkung oder Zeitmessung und überprüfen Sie die Lagerung des Pendels.

Im Folgenden sind die Schwingungszeiten $2T_1$ und $2T_2$ jeweils dreimal bei den Einstellungen $l_1 = 10$ cm sowie $l_2 = 20, 30, 40, 50, 60, 70$ cm zu bestimmen. Trägt man die Zeiten T_1 und T_2 über l_2 auf, ergibt sich ein Verlauf $T(l_2)$ wie in Abb. 5.1 angedeutet.

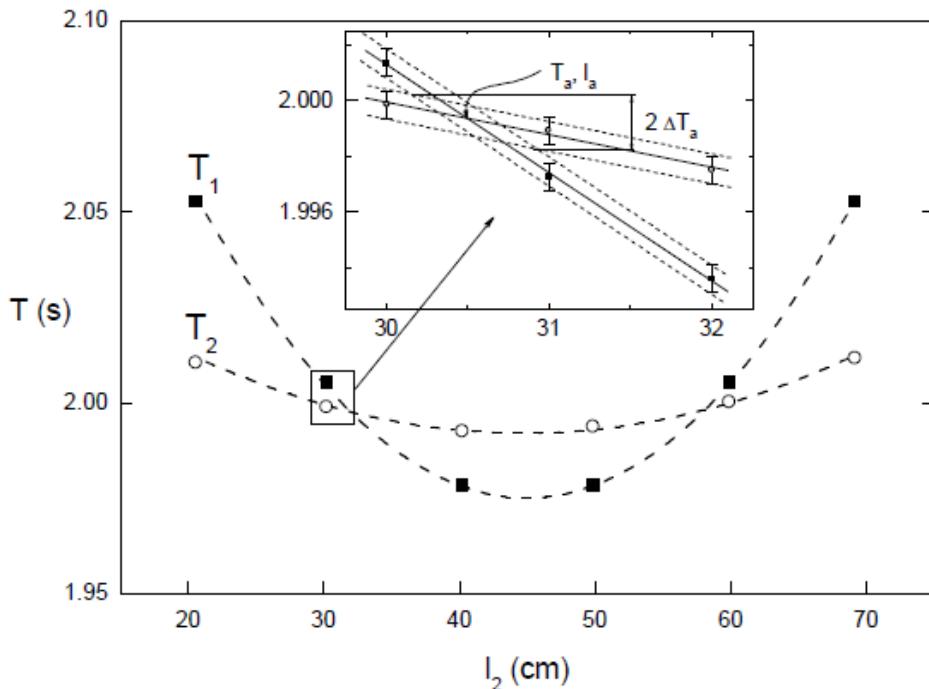


Abbildung 5.1: Schwingungszeiten T_1 (l_2) und T_2 (l_2) des Reversionspendels; Inset: Bestimmung des Schnittpunkts (T_a , l_a) und Fehlers ΔT_a .

Zur genaueren Bestimmung der beiden Schnittpunktzeiten T_a und T_b , bei denen $T_1 = T_2$ ist, werden zusätzlich je 3 Messungen der Schwingungszeiten bei Abständen $l_2 = n$ cm, $(n+1)$ cm und $(n+2)$ cm in der Umgebung von l_a und l_b durchgeführt.

Die Zeiten T_1 und T_2 sind aus dem Mittelwert von jeweils 4 gemessenen Zeiten $2T_1$ bzw. $2T_2$ zu bestimmen. Als Fehler wird wie zuvor die Messunsicherheit $\Delta T = \pm 0,5$ ms aufgrund der begrenzten Auflösung des Messgerätes angenommen. Der Inset in Abb. 5.1 skizziert die graphische Bestimmung der Zeit T_a durch lineare Interpolation. Aufgrund des Fehlers ΔT entstehen Fehlerschläüche", welche im Schnitt einen Fehler $\Delta T_a > \Delta T$ erzeugen (s. Abb. 5.1). Bestimmen Sie T_a und T_b sowie die Fehler ΔT_a bzw. ΔT_b graphisch wie in Abb. 5.1 gezeigt. Aus dem Mittelwert von T_a u. T_b ist die Schwingungsdauer T und mit Gleichung 2.19 die Erdbeschleunigung g zu bestimmen. Ermitteln Sie wie zuvor den relativen Größtfehler $\Delta g/g$ nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz. Benutzen Sie als Zeitfehler den graphisch ermittelten Wert ΔT_a oder ΔT_b .

Der Abstand der Lagerschneiden des Pendels beträgt bei $t = 22^\circ\text{C}$ $l = 0,99431 \pm 1 \cdot 10^{-5}$ m die Längenänderung des Pendels infolge der thermischen Ausdehnung etwa $\frac{\Delta l}{\Delta t} = 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{C}}$. (evtl. Temperatur bestimmen!)

Vergleichen Sie auch hier das Messergebnis für g mit dem Literaturwert und diskutieren Sie die beobachtete Abweichung beider Werte sowie mögliche Fehlerquellen.

6 Fragen zur Selbstkontrolle

1. Wie lautet die Bewegungsgleichung a) eines mathematischen Schwerependels, b) eines physikalischen Schwerependels bei geringer Auslenkung? Von welchen Größen hängt seine Schwingungsdauer T ab?
2. Was ist die reduzierte Pendellänge, was der auf die Drehachse bezogene Schwingungsmittelpunkt eines physikalischen Schwerependels?
3. Beschreiben Sie die Funktionsweise eines Reversionspendels und die Methode der g -Bestimmung mit diesem Pendel!
4. Welche Korrekturen der Bewegungsgleichung a) des Fadenpendels, b) des Reversionspendels sind nötig, um mit diesen Pendeln die Erdbeschleunigung möglichst präzise zu bestimmen?
5. Warum sollte die Bestimmung der Schwingungsdauer mittels einer Lichtschranke möglichst bei der Gleichgewichtslage der Pendel geschehen?
6. Von welchen Faktoren außer der geographischen Breite hängt die Erdbeschleunigung noch ab?