

Universität Freiburg
Physiklabor für Anfänger*innen
Ferienpraktikum nach dem Sommersemester 2023

Versuch 19

Gekoppeltes Pendel



26. September 2023

Datum der Durchführung: 22. September 2023

Assistent:



Inhaltsverzeichnis

1 Ziel des Versuchs	1
2 Versuchsaufbau	1
3 Versuchsdurchführung	2
4 Auswertung und Fehlerrechnung	2
4.1 Versuchsvorbereitung	3
4.1.1 Justierung der Pendel	3
4.1.2 Bestimmung der Federkonstante D_F der Kopplungsfeder	3
4.1.3 Bestimmung der effektive Pendellänge l	5
4.1.4 Bestimmung der Masse der Pendelstange	5
4.2 Bestimmung der Auslenkwinkel in Ruhelage	6
4.3 Bestimmung verschiedener Kreisfrequenzen	7
4.3.1 Gleichsinnige Schwingung	7
4.3.2 Gegensinnige Schwingung	8
4.3.3 Gekoppelte Schwingung	9
5 Diskussion	10
5.1 Allgemeine Diskussion	10
5.2 Diskussion des $\phi(\rho)$ Diagramms	10
5.3 Reibungseffekte	10
5.4 Fehlerquellen und Verbesserungsvorschläge	10
6 Anhang	11
6.1 Tabellen	11
6.2 Diagramme	12
6.3 Bilder Versuchsaufbau	14
6.4 Laborheft	16
6.5 Verzeichnisse	21

1 Ziel des Versuchs

In diesem Versuch koppeln wir zwei Pendel mit einer Kopplungsfeder. Hierbei wird untersucht, wie sich die Auslenkwinkel in der Ruhelage ϕ_0 sowie die Kreisfrequenzen ω von gleich-, gegensinnigen und gekoppelten Schwingungen bei unterschiedlichen Kopplungslängen ρ verhalten.

2 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus zwei identischen physikalischen Pendeln der Länge l' welche, wie in Abb. 1 und 7 zu sehen ist, mit einer Feder (Abb. 8) gekoppelt werden können.

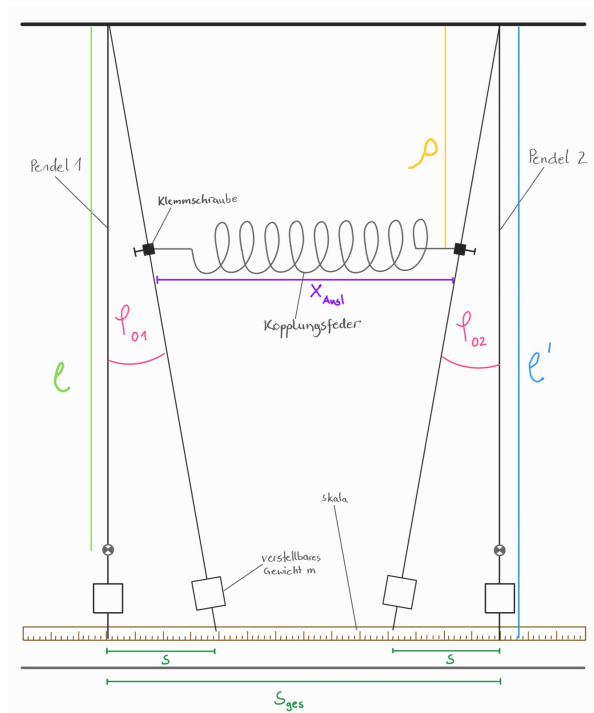


Abbildung 1: Versuchsaufbau Gekoppeltes Pendel

Die Kopplungslänge ρ kann mithilfe von Klemmschrauben an den Pendelstangen beliebig eingestellt werden. An den Pendelstangen ist zusätzlich je eine Masse m angebracht, die justiert werden kann.

Mithilfe von Arretierungshebeln, die an einer Stange befestigt sind, können beide Pendel parallel ausgelenkt und aus wohldefinierten Positionen zur selben Zeit losgelassen werden. Die Auslenkung s der Pendel kann an einer Skala abgelesen werden (Abb. 10).

3 Versuchsdurchführung

Zu Beginn des Versuchs wird mit einer Dosenlibelle kontrolliert, ob der Versuchsaufbau korrekt ausgerichtet ist. Danach werden die beiden Pendel im ungekoppelten Zustand mithilfe der Massen m so justiert, dass ihre Periodendauern T identisch sind.

Jetzt koppeln wir die Pendel mithilfe einer Feder. Diese wird mit Klemmschrauben an den beiden Pendelstangen befestigt. Mit einem Federkraftmesser (Abb. 9) wird die von der Feder ausgeübte Kraft bestimmt.

Wir führen nun mehrere Messungen bei jeweils $n = 17$ verschiedenen Kopplungslängen ρ durch.

Als Erstes werden die jeweiligen Auslenkwinkel ϕ_{01} und ϕ_{02} in der Ruhelage bestimmt. Dazu wird an der angebrachten Skala die Auslenkung s der Pendel abgelesen.

Anschließend werden zur Bestimmung der Kreisfrequenzen ω von gleichsinnigen, gegensinnigen und Kopplungsschwingungen die jeweiligen Periodendauern T mithilfe einer digitalen Stoppuhr gemessen.

Bei der gleichsinnigen Schwingung werden die Pendel mit den Arretierungshebeln um den gleichen Betrag ausgelenkt und gleichphasig schwingen gelassen. Dementsprechend werden bei den Messungen zur gegensinnigen Schwingung die Pendel in entgegengesetzte Richtungen ausgelenkt und gegenphasig schwingen gelassen. Sowohl bei den gleichphasigen, als auch den gegenphasigen Schwingungen messen wir die Zeit t für 5 Perioden mit der Stoppuhr.

Bei der Messreihe zur Kopplungsschwingung bleibt Pendel 2 in der Ruhelage während Pendel 1 ausgelenkt und losgelassen wird. Wir bestimmen die Frequenz ω_+ indem wir erneut die Zeit t_+ für fünf Schwingungsperioden bei Pendel 1 stoppen. Zusätzlich messen wir für die Bestimmung von ω_- die Zeit t_- , die Pendel 2 benötigt, um zum zweiten Mal wieder stillzustehen.

4 Auswertung und Fehlerrechnung

In den folgenden Versuchen beträgt der statistische Fehler der Zeitmessung Δt (Reaktion Stoppuhr, dreiecksverteilt, $2a = 0,2$ s)

$$\Delta t = 0,1 \text{ s}$$

die Unsicherheit der Messung von x , s , ρ und l' (Maßband, dreiecksverteilt, $2a = 0,2$ cm)

$$\Delta x = \Delta s = \Delta \rho = \Delta l' = 0,1 \text{ cm}$$

und die Unsicherheit der Kraft ΔF (Federkraftmesser, dreiecksverteilt, $2a = 0,04 \text{ N}$)

$$\Delta F = 0,02 \text{ N}$$

Die Unsicherheit $\Delta\eta$ beim Zählen der Perioden schätzen wir auf

$$\Delta\eta = 0,1$$

Der systematische Fehler bei der Zeitmessung (aufgrund der Auflösung von 10 ms der Stoppuhr) ist vernachlässigbar gering.

4.1 Versuchsvorbereitung

Bevor mit den eigentlichen Experimenten gestartet werden kann, müssen einige Größen bestimmt und der Versuchsaufbau richtig eingestellt werden.

4.1.1 Justierung der Pendel

Zunächst justieren wir die beiden Pendel mithilfe der Position der Gewichte m so, dass die Periodendauern T_1 und T_2 ohne Kopplung identisch sind. Wir haben vermutet, dass die Massen bereits gut justiert sind. Unsere Vermutung haben wir mithilfe von jeweils $n = 3$ Messungen pro Pendel überprüft. Hierfür haben wir die Zeiten t_1 und t_2 für $\eta = 5$ Periodendauern T_1 bzw. T_2 mit einer digitalen Stoppuhr gemessen.

Tabelle 1: Messreihe zum Kalibrieren der Periodendauern

t_1 (für $\eta = 5$) in [s]	9,3(1)	9,3(1)	9,3(1)
t_2 (für $\eta = 5$) in [s]	9,3(1)	9,2(1)	9,2(1)

Aus unseren Messergebnissen in Tabelle 1 erkennen wir, dass die gemessenen Zeiten für 5 Perioden zwischen den beiden Pendeln um maximal 0,1 s voneinander abweichen. Wir arbeiten daher mit der gewählten Einstellung weiter.

4.1.2 Bestimmung der Federkonstante D_F der Kopplungsfeder

Wir lesen an einem Federkraftmesser die aufzubringende Kraft F für verschiedene Auslenkungen x_a der Feder ab. Die Gesamtlänge x_a der Feder bei der jeweiligen Auslenkung messen wir mit einem Maßband. Als x bezeichnen wir die Differenz zwischen x_A und der Länge der unausgelenkten Feder x_0 .

Die Federstärke D_F berechnet sich nun aus den Größen F und x mit dem Hooke'schen Gesetz

$$\begin{aligned} F &= -D_F \cdot x \\ \Rightarrow D_F &= -\frac{F}{x} \end{aligned} \quad (1)$$

Der aus den Unsicherheiten von F und x resultierende Fehler der Federkonstante D_F berechnet sich mit der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung

$$\begin{aligned} \Delta D_x &= \sqrt{\left(\frac{\partial D_x}{\partial F} \cdot \Delta F\right)^2 + \left(\frac{\partial D_x}{\partial x} \cdot \Delta x\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(-\frac{1}{x} \cdot \Delta F\right)^2 + \left(\frac{F}{x^2} \cdot \Delta x\right)^2} \end{aligned}$$

Für $n = 3$ verschiedene Auslenkungen x sind die von uns bestimmten Werte in Tabelle 2 eingetragen.

Tabelle 2: x , F und D_F mit Fehlern

x in [cm]		$21,5 \pm 0,1$		$17,5 \pm 0,1$		$10,5 \pm 0,1$
F in [N]		$0,50 \pm 0,02$		$0,40 \pm 0,02$		$0,25 \pm 0,02$
D_F in [N m^{-1}]		$2,33 \pm 0,02$		$2,29 \pm 0,03$		$2,38 \pm 0,06$

Wir verwenden als bestimmte Federstärke D_F der Feder den Mittelwert der Messwerte

$$D_F = \frac{2,33 \text{ N m}^{-1} + 2,29 \text{ N m}^{-1} + 2,38 \text{ N m}^{-1}}{3} = 2,33 \text{ N m}^{-1} \quad (2)$$

mit der Unsicherheit

$$\Delta D_F = \sqrt{\left(\frac{0,02 \text{ N m}^{-1}}{3}\right)^2 + \left(\frac{0,03 \text{ N m}^{-1}}{3}\right)^2 + \left(\frac{0,06 \text{ N m}^{-1}}{3}\right)^2} = 0,02 \text{ N m}^{-1}$$

4.1.3 Bestimmung der effektive Pendellänge l

Die effektive Pendellänge l bezeichnet den Abstand zwischen Aufhängung des Pendels und dem Pendelschwerpunkt. Wir bestimmen diese an einem ungekoppelten Pendeln durch den Zusammenhang

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (3)$$

Wir verwenden als Periodendauer $T = (1,85 \pm 0,04)$ s (errechneter Mittelwert aus allen Zeitmessungen in Tabelle 1) und als Fallbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ [g]. Als effektive Pendellänge erhalten wir somit

$$l = \frac{T^2}{4\pi^2} \cdot g = 85,0 \text{ cm} \quad (4)$$

mit dem Fehler

$$\begin{aligned} \Delta l &= \frac{\partial l}{\partial T} \cdot \Delta T \\ &= \frac{T}{2\pi^2} \cdot g \cdot \Delta T \\ &= 4 \text{ cm} \end{aligned} \quad (5)$$

Wir haben somit eine effektive Pendellänge von $l = (85 \pm 4)$ cm berechnet.

4.1.4 Bestimmung der Masse der Pendelstange

Wir messen mit dem Maßband die Länge der Pendelstange $l' = (1,00 \pm 0,01)$ m und mit dem Messschieber den Radius $r = (3,25 \pm 0,05)$ mm. Als Volumen berechnet sich daraus

$$\begin{aligned} V &= \pi \cdot r^2 \cdot l' \\ &= 3,32 \cdot 10^{-5} \text{ m} \\ \Delta V &= \sqrt{(2\pi \cdot r \cdot l' \cdot \Delta r)^2 + (\pi \cdot r^2 \cdot \Delta l')^2} \\ &= 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (6)$$

Die Masse der Pendelstange berechnet sich aus dem Volumen $V = (3,3 \pm 1,0) \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ und der Dichte von Eisen $\rho_D = 7874 \text{ kg/m}^3$ (siehe [Dicht]) als

$$m_s = \rho_D \cdot V = 260 \text{ g}$$

mit der Unsicherheit

$$\Delta m_s = \frac{\partial m_s}{\partial V} = \rho_D \cdot \Delta V = 80 \text{ g}$$

Es darf nach [Omn] eine Masse von $m_z = (390 \pm 10)$ g für das Zusatzgewicht angenommen werden. Die Gesamtmasse m eines Pendels beträgt somit

$$m = m_s + m_z = (650 \pm 90) \text{ g} \quad (7)$$

4.2 Bestimmung der Auslenkwinkel in Ruhelage

Nun koppeln wir die Pendel mit der Feder und messen die Auslenkung s in der Ruhelage. Der Winkel ϕ lässt sich über den Zusammenhang

$$\phi = \frac{M_0}{mgl + 2D_F \rho^2} \quad (8)$$

berechnen. Dabei ist M_0 das Drehmoment welches sich durch

$$M_0 = \rho \cdot D_F \cdot x \quad (9)$$

berechnet.

Wir erkennen den deutlich einfacher zu berechnenden geometrischen Zusammenhang zwischen der Pendellänge l' , der Auslenkung s und dem Winkel ϕ

$$\frac{s}{l'} = \arctan(\phi)$$

Für $n = 17$ verschiedene Kopplungslängen ρ berechnen wir den Auslenkwinkel

$$\phi = \arctan\left(\frac{s}{l'}\right) \quad (10)$$

und mit der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung den Fehler

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \sqrt{\left(\frac{\partial\phi}{\partial s} \cdot \Delta s\right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial l'} \cdot \Delta l'\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{l^2}{s^2 + l'^2} \cdot \Delta s\right)^2 + \left(\frac{s}{l'^2} \cdot \Delta l'\right)^2} \end{aligned}$$

Wir haben festgestellt, dass sich unsere Auslenkwinkel ϕ_{01} und ϕ_{02} vom Betrag nicht messbar unterscheiden. Daher ist in Tabelle 3 lediglich der Auslenkwinkel ϕ bei den jeweiligen Kopplungslängen ρ notiert.

Wir tragen die Werte in Abb. 2 in ein $\phi(\rho)$ -Diagramm ein.

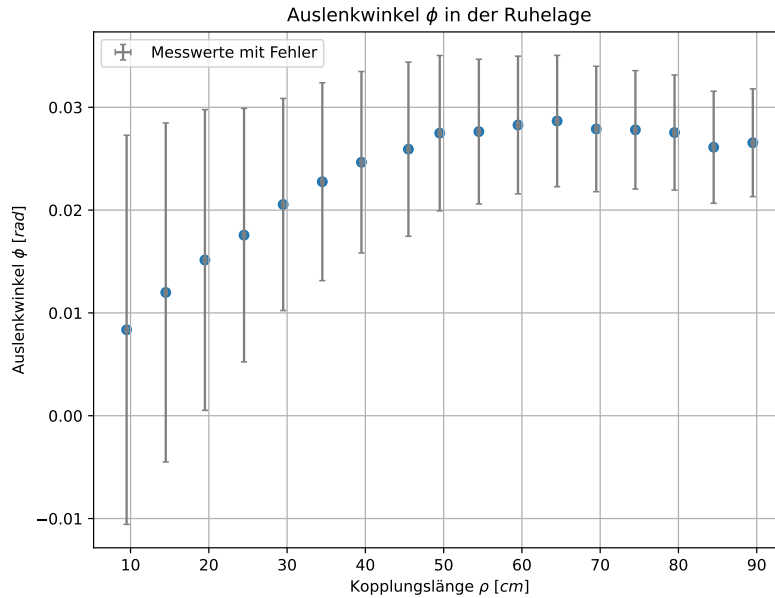


Abbildung 2: $\phi(\rho)$ mit Fehlerbalken

4.3 Bestimmung verschiedener Kreisfrequenzen

4.3.1 Gleichsinnige Schwingung

Zur Bestimmung der Winkelgeschwindigkeit ω_{g1} messen wir für $n = 17$ unterschiedliche Kopplungslängen ρ die Zeit t_{gl} für $\eta = 5$ Perioden mit der Stoppuhr (Tabelle 3).

Aus t_{gl} erhalten wir die Winkelgeschwindigkeiten ω_{gl} durch

$$\omega_{gl} = \frac{2\pi}{T_{gl}^2} = 2\pi \cdot \frac{\eta^2}{t_{gl}^2} \quad (11)$$

mit Fehler

$$\Delta\omega_{gl} = \sqrt{\left(4\pi \cdot \frac{\eta}{t_{gl}^2} \cdot \Delta\eta\right)^2 + \left(-4\pi \frac{\eta^2}{t_{gl}^3} \cdot \Delta t_{gl}\right)^2}$$

Wir tragen unsere Messergebnisse ω_{g1} gegen ρ in ein Diagramm ein (Abb. 4). Zusätzlich tragen wir in die Grafik den rechnerisch bestimmten Wert für ω_{g1} ein.

Bei einer gleichsinnigen Schwingungen berechnet sich dieser durch

$$\omega_{gl} = \sqrt{\frac{g}{l}} = 3,4 \text{ s}^{-1} \quad (12)$$

Der aus der Bestimmung der effektiven Pendellänge resultierende Fehler beträgt

$$\Delta\omega_{gl} = \sqrt{\frac{g}{4 \cdot l^3}} \cdot \Delta l = 0,4 \text{ s}^{-1} \quad (13)$$

In Abb. 3 sehen wir die aus Gleichung (12) erwartete Unabhängigkeit der Winkelgeschwindigkeit von der Kopplungslänge.

4.3.2 Gegensinnige Schwingung

Wir messen für $n = 17$ verschiedene ρ die Zeit t_{geg} für $\eta = 5$ (Tabelle 3) bei gegensinnigen Schwingungen und berechnen wie in Abschnitt 4.3.1 daraus ω_{geg} .

Die erwartete gegensinnige Kreisfrequenz berechnen wir mit

$$\omega_{geg} = \sqrt{\frac{2D_F \cdot \rho^2}{m \cdot l^2} + \omega_{gl}^2} \quad (14)$$

und tragen sie gemeinsam mit den experimentell bestimmten ω_{geg} in Abb. 3 ein.

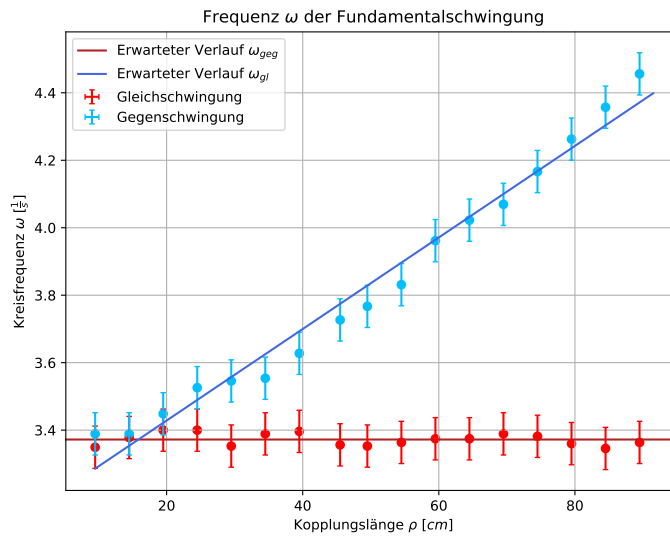


Abbildung 3: $\omega_{gl}(\rho)$ und $\omega_{geg}(\rho)$ (mit erwartetem Verlauf)

In Abb. 3 ist zu erkennen, dass unsere Messwerte den erwarteten Zusammenhängen folgen.

4.3.3 Gekoppelte Schwingung

Hier messen wir mit $n = 17$ verschiedenen Kopplungslängen, die Kreisfrequenz des Pendels welches sich in Bewegung findet ω_- und die Kreisfrequenz ω_+ der Schwebung.

$$\begin{aligned}\omega_- &= \frac{\omega_{geg} - \omega_{gl}}{2} \\ \omega_+ &= \frac{\omega_{geg} + \omega_{gl}}{2}\end{aligned}\tag{15}$$

Setzt man in diese Formeln ω_{geg} und ω_{gl} ein und löst auf bekommt man folgende Zusammenhang $\omega_- (\rho)$

$$\begin{aligned}\omega_- &\propto \rho \\ \omega_+ &\propto \rho\end{aligned}\tag{16}$$

Wir tragen unsere Messwerte mit den erwarteten Funktionen in Abb. 4 in ein Diagramm ein. Wir sehen, dass unsere Messwerte die Proportionalitäten aus Gleichung (16) bestätigen.

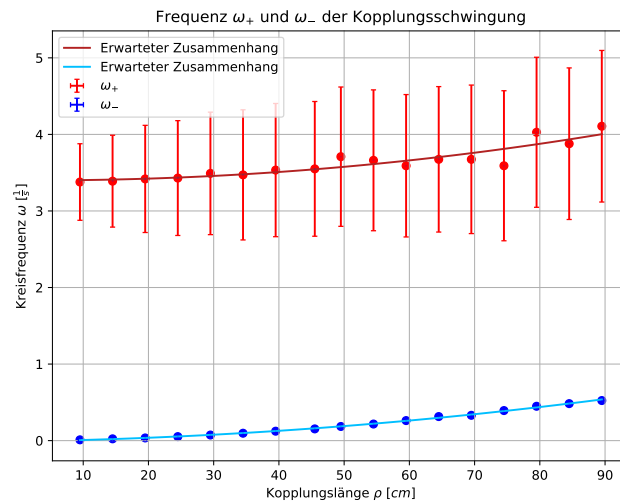


Abbildung 4: ω_- und ω_+ in Abhängigkeit von ρ

Diese Größen sind mit folgendem Fehler behaftet.

$$\Delta\omega_- = \Delta\omega_+ = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \Delta\omega_{gl}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \Delta\omega_{geg}\right)^2}$$

5 Diskussion

5.1 Allgemeine Diskussion

In diesem Versuch ging es um verschiedene Abhängigkeiten des Pendelsystems von der Kopplungslänge. Insgesamt wurden alle Zusammenhänge bestätigt und die meisten Messwerte liegen, wenn man das 2σ -Intervall ihrer Fehlerbalken betrachtet, auf den erwarteten Kurven. Dies lässt sich in den Residuendiagrammen erkennen. In Abb. 6 liegen mehr als die Hälfte der Messwerte mit ihren Fehlern auf der Gerade. In Abb. 5 liegt die erwartete Gerade innerhalb der Fehler aller Messwerte.

5.2 Diskussion des $\phi(\rho)$ Diagramms

In Abb. 2 erkennt man, dass mit abnehmender Kopplungslänge größere Fehlerbalken vorliegen. Dies liegt vermutlich daran, dass bei kleinen Kopplungslängen auch nur kleine Auslenkungen s im mm -Bereich vorliegen, welche mit einem Maßband ungenau bestimmt werden. Außerdem mussten wir feststellen, dass das System bei kleinen Kopplungslängen leichter unabsichtlich in Schwingung versetzt wird, wodurch die Auslenkungsbestimmung erschwert wird.

5.3 Reibungseffekte

Wir sehen in einigen Fällen, dass unsere Messwerte unterhalb erwarteter Funktionen liegen (beispielsweise in Abb. 4). Dies ist besonders bei hohen Frequenzen erkennbar. Dies liegt vermutlich an Reibungseffekten, die vor allem bei hohen Frequenzen ins Gewicht fallen, da sie proportional zur Geschwindigkeit sind. Reibungseffekte treten möglicherweise durch die Lagerung der Pedelstangen oder durch den Luftwiderstand auf. Wir könnten dies mithilfe besserer Lager und einer Durchführung im Vakuum minimieren, allerdings ist dies keinesfalls einfach durchzuführen. Vermutlich kann der Fehler durch Reibung aber, verglichen mit anderen Fehlerquellen, vernachlässigt werden.

5.4 Fehlerquellen und Verbesserungsvorschläge

Wir erkennen, dass unsere Hauptfehlerquelle in der Zeitmessung liegt. Um die Zeitmessung zu verbessern, könnte man beispielsweise wie in Versuch 18 eine Lichtschranke mit Durchgangszähler bei der Messung verwenden [Omna].

Ein möglicher systematischer Messfehler bei der Bestimmung der Größen ρ und l' tritt dadurch auf, dass die Pendelaufhängung schlecht zugänglich innerhalb eines Kastens angebracht ist. Dadurch sind exakte Messungen ab der Aufhängung nur schwierig möglich. Wenn man die Abdeckung des Kastens entfernen könnte, wäre eine deutlich genauere Bestimmung dieser Längen möglich. Eine verbesserte Messung könnte zusätzlich erzielt werden, wenn anstelle eines Maßbandes ein großer Riesenschieber mit geringerem Fehler verwendet wird.

6 Anhang

6.1 Tabellen

ρ [cm]	s [cm]	x [cm]	t_{gl} [cm] ($\eta = 5$)	t_{geg} [cm] ($\eta = 5$)	t_+ [s] ($\eta = 5$)	t_- [s] ($\eta = 5$)
11,2	1,4	21,5	9,38	9,27	9,30	600
16,2	1,9	21,5	9,30	9,27	9,27	268
21,2	2,3	21,0	9,24	9,11	9,19	180
26,2	2,9	20,0	9,24	8,91	9,16	120
31,2	3,6	20,0	9,37	8,86	9,00	86
36,2	3,9	19,5	9,27	8,84	9,05	65
41,2	4,3	19,0	9,25	8,66	8,89	51
46,2	4,5	18,0	9,36	8,43	8,85	41
51,2	5,1	18,0	9,37	8,34	8,47	34
56,2	5,5	17,0	9,34	8,20	8,58	29
61,2	5,8	16,5	9,31	7,93	8,75	24
66,2	6,1	16,0	9,31	7,81	8,55	20
71,2	6,4	15,0	9,27	7,72	8,75	19
76,2	6,8	14,5	9,29	7,54	8,55	16
81,2	7,0	14,0	9,35	7,37	7,80	14
86,2	7,2	13,0	9,39	7,21	8,10	13
91,2	7,5	13,0	9,34	7,08	7,65	12

Tabelle 3: Rohdaten

6.2 Diagramme

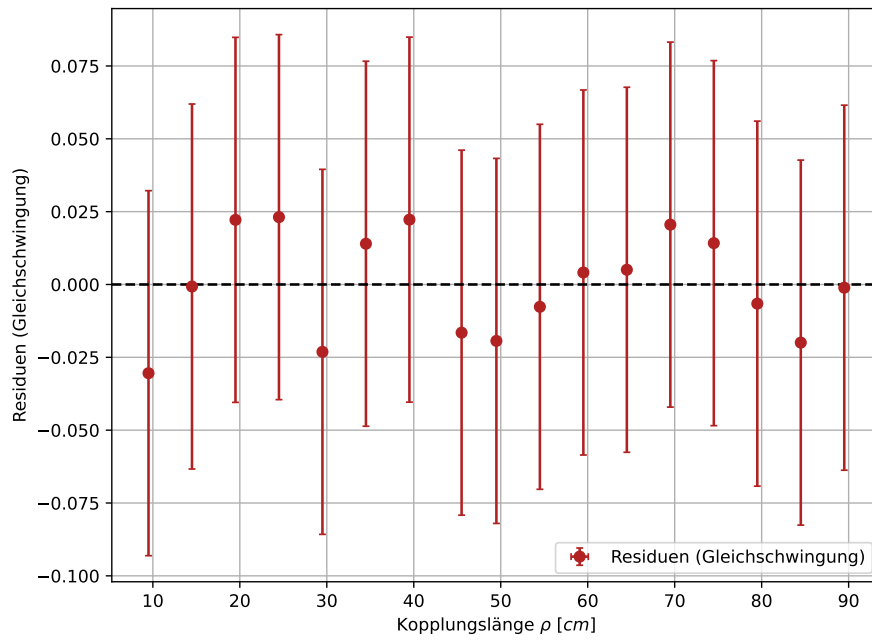


Abbildung 5: Residuen zur Gleichschwingung

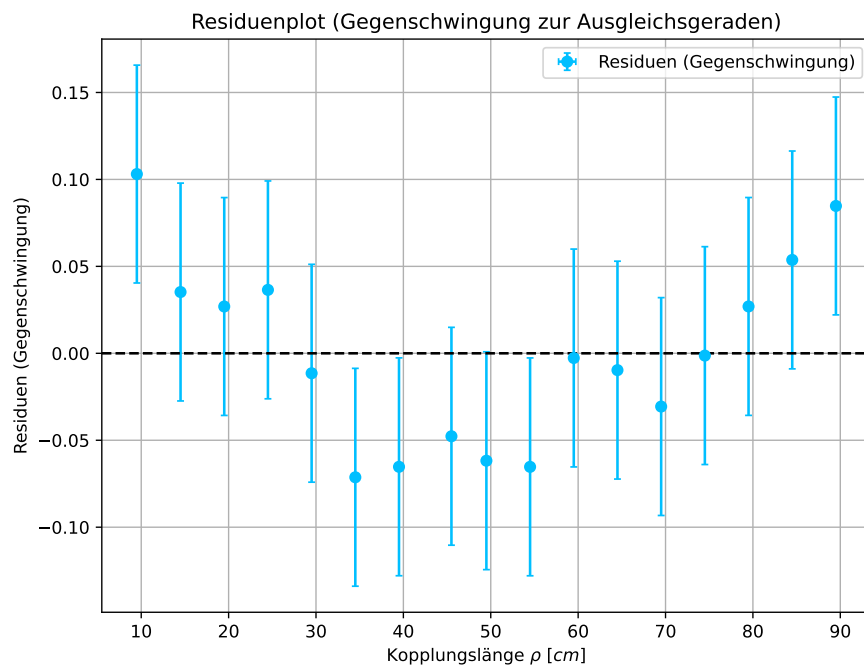


Abbildung 6: Residuen zur Gegenschwingung

6.3 Bilder Versuchsaufbau



Abbildung 7: Bild vom Versuchsaufbau

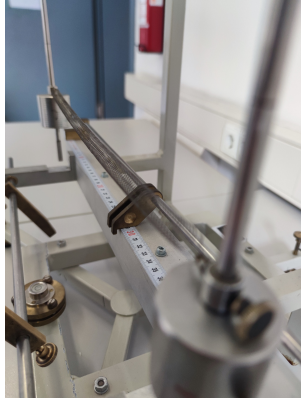


Abbildung 8: Kopplungsfeder



Abbildung 9: verwendeter Kraftmesser



Abbildung 10: Messskala zum Ablesen von s

6.4 Laborheft

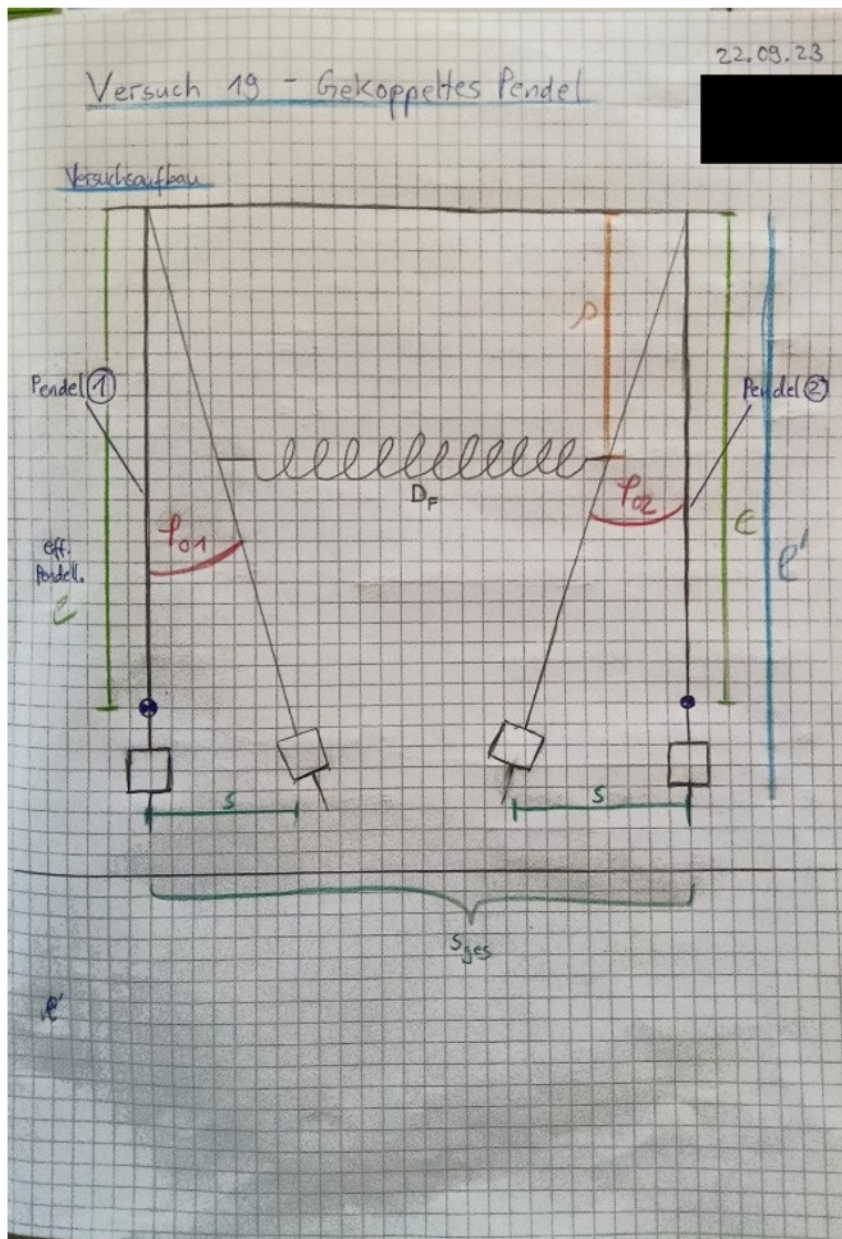


Abbildung 11: Laborheft Seite 1

1

- Justierung der Pendel, sodass T bei beiden Pendeln ohne Kopplung identisch ist

$n=3\text{mal}$

Wir haben sowohl bei Pendel 1 als auch 2 \downarrow für 5 Perioden die Zeit gemessen und verglichen. Auslenkung 5cm
(mit Stoppuhr)

$t_1 (= 5 \cdot T_1)$	9,27 s	9,34 s	9,25	$\bar{t}_1 = 9,29\text{s}$	} $ \bar{t}_1 - \bar{t}_2 = 0,04\text{s}$
$t_2 (= 5 \cdot T_2)$	9,31 s	9,19 s	9,24	$\bar{t}_2 = 9,25\text{s}$	

\Downarrow
Pass!

\label{tab: t-messung-justierung}

t: mit Stoppuhr \emptyset , geschätzte Reaktionszeit $\Delta t = 0,2\text{s}$

- Bestimmung Federkonstante D_F ($F = -D_F \cdot \overset{\uparrow}{x}$)

Ruhelänge $x_0 = 22\text{cm}$ $x = x_{\text{Ausl}} - x_0$

x	21,5cm	17,5cm	10,5cm	x: mit Maßband, dreiecksverteilt $\Delta x = 0,2\text{cm}$	
F	0,50N	0,40N	0,25N		F: Federkraftmesser, dreiecksverteilt $\Delta F = 0,04\text{N}$
D_F	$2,33 \frac{\text{N}}{\text{m}}$	$2,29 \frac{\text{N}}{\text{m}}$	$2,38 \frac{\text{N}}{\text{m}}$		

Addung:
 $P = p_{\text{mess}} + 1,7\text{cm}$
 in Halterung
 noch versteckt

Abbildung 12: Laborheft Seite 2

• Messung effektive Pendellänge l

Wir verwenden die Messwerte aus $\sqrt{\text{tab: t messung-justierung}}$.

Es gilt: $T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}} \Leftrightarrow l = \frac{T^2}{4\pi^2} \cdot g$ ($g \approx 9.81 \text{ m/s}^2$)

Wir sagen $l_1 = l_2$ im Rahmen der Messung gleich, da $t_1 \approx t_2$.

(ohne Feder)
 $s_{\text{ges}} = 47,5 \text{ cm}$ ($2a = 0,2 \text{ cm}$)

1) Bestimmen der Auslenkwinkel φ_1 & φ_2 in Ruhelage

Es gilt: $\varphi = \frac{\rho \cdot D_p \cdot x}{m \cdot g \cdot l + 2 \cdot D_p \cdot \rho^2}$ $M_b = \rho \cdot D_p \cdot x$

ρ [cm]	9,5									
t (BST) [s]	/									
x_{Ausl} [cm]	44,0									
s [cm]	1,25									
S [cm]	1,25	2,30	3,60	4,3	5,1	5,8	6,4	7,0	7,5	
ρ [cm]	11,2	21,2	31,2	41,2	51,2	61,2	71,2	81,2	91,2	
x [cm]	21,5	21,0	20,0	19,0	18,0	16,5	15,0	14,0	13,0	
D	16,2	26,2	36,2	46,2	56,2	66,2	76,2	86,2		
X	21,5	20,0	19,5	18,0	17,0	16,0	14,5	13,0		
S	1,9	2,9	3,9	4,5	5,5	6,1	6,8	7,2		

▲ x zwar Δ -verteilt wegen Maßband
 aber ablesen nur mit Genauigkeit von $\Delta x = 0,5 \text{ cm}$

Abbildung 13: Laborheft Seite 3

2.) ~~Wge~~ Fundamentalschwingungen

• Messung von Wge (P)

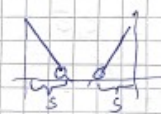
P [cm]	11,2	16,2	21,2	26,2	31,2	36,2	41,2	46,2	51,2	56,2	61,2	66,2
P [cm]	9,38	9,30	9,24	9,24	9,37	9,27	9,25	9,36	9,37	9,34	9,31	9,31
t (-5T) [s]												

71,2	76,2	81,2	86,2	91,2
9,27	9,29	9,35	9,39	9,34

$$W_{ge} = \sqrt{\frac{g}{e}}$$

=> erwarten konst Wge

• Messung von Wgeg (P) s = 8,5 cm



P [cm]	11,2	16,2	21,2	26,2	31,2	36,2	41,2	46,2	51,2	56,2	61,2	66,2
t (-5T) [s]	9,27	9,27	9,11	8,91	8,86	8,84	8,66	8,43	8,34	8,20	7,93	7,81

71,2	76,2	81,2	86,2	91,2
7,72	7,54	7,37	7,21	7,08

Abbildung 14: Laborheft Seite 4

3) Kopplungsschwingung

l [cm]	11,2	16,2	21,2	26,2	31,2	36,2	41,2	46,2	51,2	56,2	61,2	66,2
t_+ ($=5T_+$)	9,30	9,27	9,19	9,16	9,00	9,05	8,83	8,85	8,47	8,58	8,75	8,55
t_+ (g)	600	268	180	120	86	65	51	41	34	29	24	20

T_- [s]				71,2	76,2	81,2	86,2	91,2
Pendel steht recht Länge still \Rightarrow schätze $\Delta L = 0,5$				8,75	8,55	7,80	8,10	7,65
				19	16	14	13	12

$\rho_{\text{stab}} = 7900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
 Massen stab + Gewicht $m = 330$ (10) g (Omnibus)
 Länge stab: $l = 1,00$ m (Maßband)
 $d = 0,0065$ m (Messschieber)

UT 22.09.23

Abbildung 15: Laborheft Seite 5

6.5 Verzeichnisse

Tabellenverzeichnis

1	Messreihe zum Kalibrieren der Periodendauern	3
2	x , F und D_F mit Fehlern	4
3	Rohdaten	11

Abbildungsverzeichnis

1	Versuchsaufbau Gekoppeltes Pendel	1
2	$\phi(\rho)$ mit Fehlerbalken	7
3	$\omega_{\text{gl}}(\rho)$ und $\omega_{\text{geg}}(\rho)$ (mit erwartetem Verlauf)	8
4	ω_- und ω_+ in Abhängigkeit von ρ	9
5	Residuen zur Gleichschwingung	12
6	Residuen zur Gegenschwungung	13
7	Bild vom Versuchsaufbau	14
8	Kopplungsfeder	15
9	verwendeter Kraftmesser	15
10	Messkala zum Ablesen von s	15
11	Laborheft Seite 1	16
12	Laborheft Seite 2	17
13	Laborheft Seite 3	18
14	Laborheft Seite 4	19
15	Laborheft Seite 5	20

Literatur

- [Dicht] *Eisen*. "<https://de.wikipedia.org/wiki/Eisen>". 2023.
- [g] *Kraft und Masse; Ortsfaktor*. "<https://www.leifiphysik.de/mechanik/kraft-und-masse-ortsfaktor>". 2023.
- [Omna] *Versuch-18*. "<https://omnibus.uni-freiburg.de/phypra/ap/18/>". 2023.
- [Omb] *Versuch-19*. "<https://omnibus.uni-freiburg.de/phypra/ap/19/>". 2023.