

Universität Freiburg

Kleines Physiklabor für Anfänger\*innen  
Ferienpraktikum im Sommersemester 2022

# Versuch 19

## Gekoppelte Pendel

(Gruppe )

23. September 2022

Datum der Durchführung: 22. September 2022

Assistent: 

Ziel des Versuchs, Aufbau und Durchführung, 20%: 1,0

Auswertung, Fehleranalyse, 35%: 1,0

Diskussion, 35%: 1,0

Formalia, 10%: 1,0

**Gesamtnote: 1,0**

Eigentlich wollte ich euch einen kleinen Bonus für eure gute Vorbereitung geben, aber das hat sich wohl erübrigt...

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Ziel des Versuchs</b>	<b>2</b>
<b>2 Versuch</b>	<b>2</b>
2.1 Aufbau . . . . .	2
2.2 Durchführung . . . . .	2
<b>3 Auswertung und Fehleranalyse</b>	<b>3</b>
3.1 Auslenkwinkel $\varphi$ in Ruhelage . . . . .	3
3.2 Frequenzen $\omega_{gl}$ und $\omega_{geg}$ der Fundamentalschwingung bestimmen	6
3.3 Frequenzen $\omega_+$ und $\omega_-$ der Kopplungsschwingung bestimmen .	8
<b>4 Diskussion</b>	<b>10</b>
4.1 Verbesserungsmöglichkeiten für die Messung . . . . .	10
4.2 Systematischer Fehler Länge $l$ . . . . .	10
4.3 Folgerungen aus $\varphi$ . . . . .	11
4.4 Folgerungen aus $\omega_{gl}$ und $\omega_{geg}$ . . . . .	11
4.5 Vergleich der Werte $\omega_+$ . . . . .	12
4.6 Vergleich der Werte $\omega_-$ . . . . .	12
<b>A Abbildungsverzeichnis</b>	<b>13</b>
<b>B Tabellenverzeichnis</b>	<b>13</b>
<b>C Literaturverzeichnis</b>	<b>13</b>
<b>D Foto Versuchsaufbau</b>	<b>14</b>
<b>E Laborbucheintrag</b>	<b>15</b>

## 1 Ziel des Versuchs

Wir untersuchen bei zwei identischen gekoppelten Pendel den Zusammenhang von Federkopplung und Schwingung der Pendel. Hierbei betrachten wir den Auslenkungswinkel der Ruhelage, die Frequenzen der einzelnen Pendel für gleichsinnige, gegensinnige und Kopplungsschwingung sowie die Schwebefrequenz der Kopplungsschwingung.

## 2 Versuch

### 2.1 Aufbau

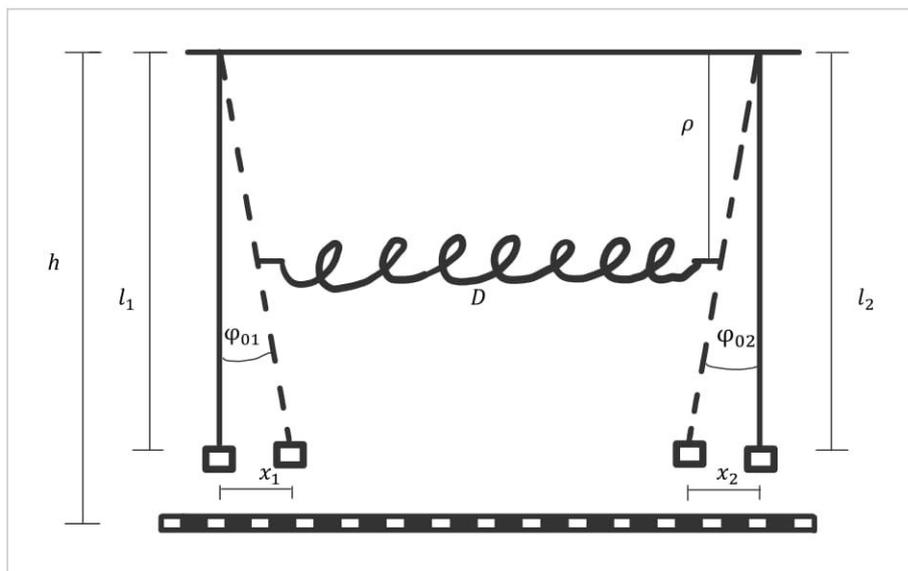


Abbildung 1: Skizze Versuchsaufbau und Definition der Variablen

Zwei identische Massen  $m$ , die an frei schwingenden Stäben hängen bilden zwei Pendel. Die effektive Länge  $l$  ist variabel, indem wir die Höhe der Massen verändern. Die Auslenkungen  $x_1$  und  $x_2$  der zwei Pendel lassen sich auf einer Skala ablesen, die in einer Distanz  $h$  vom Austrittspunkt der Stäbe angebracht ist (Abb. 1, Abb. 8). Durch eine Feder mit Federkonstante  $D$  und Länge  $z_{F1}$  (ohne darauf wirkende Kraft, also Feder in Ruhelage) können die zwei Pendel gekoppelt werden. Die Kopplungslänge  $\rho$  kann hierbei variiert werden.  $\rho, h$  und  $l_{1,2}$  messen wir mit dem Maßband, wobei wir auf Ungenauigkeiten von  $\Delta\rho = \Delta h = 1 \text{ mm}$  und  $\Delta l_{1,2} = 2 \text{ mm}$  schließen.

### 2.2 Durchführung

Zunächst haben wir durch Verändern der Höhe der Masse die beiden Pendel so kalibriert, dass sie ungekoppelt eine identische Periodendauer haben und wir

ihnen somit dieselben Eigenschaften bzgl. effektiver Länge, Winkelgeschwindigkeit etc. zuordnen können. Wir haben die Längen  $l_1$  und  $l_2$  vom Austrittspunkt der Stäbe bis zum oberen Ende der Massen gemessen und verwenden im Folgenden den Mittelwert  $l$  für die effektive Länge der Pendel. Dann haben wir für 7 verschiedene Kopplungslängen  $\rho$  im Bereich von 15 cm bis 75 cm folgende Messungen vorgenommen: wir haben die Auslenkungen  $x_1$  und  $x_2$  der beiden Pendel in der Ruhelage gemessen, wobei wir von einer Ungenauigkeit  $\Delta x_{1,2} = 1$  mm ausgegangen sind, dann haben wir beide Pendel um dieselbe Distanz in dieselbe Richtung ausgelenkt und die Periodendauer  $T_{gl}(n=5)$  für 5 Schwingungen mit einer Stoppuhr gemessen, wobei wir hierbei einen Fehler von  $\Delta T_{gl}(n=5) = 0.3$  s annehmen. Außerdem haben wir auf dieselbe Weise die Periodendauer  $T_{ged}(n=5)$  für gleiche Auslenkungen in entgegengesetzte Richtungen ermittelt und schließlich noch die Kopplungsschwingung betrachtet. Bei dieser betrachten wir die Periodendauern  $T_-$  und  $T_+$ , wobei  $T_+$  der Periodendauer der einzelnen Pendel entspricht, welche wir über 5 Einzelmessungen ermittelt haben und  $T_-$  der Gesamtdauer der Kopplungsschwingung entspricht (wir haben bei  $\rho_1$  bis  $\rho_3$   $\frac{T_-}{2}$  gemessen, also wie lange es dauert, bis das zu Beginn nicht ausgelenkte Pendel wieder in Ruhe ist, bei  $\rho_4$  bis  $\rho_7$  haben wir  $T_-$  gemessen). Damit wir plausible Werte für  $M_0$  angeben können messen wir außerdem Federlänge  $z$  für jedes  $\rho$ .  $M_0$  ist hierbei das Drehmoment, das auf das gekoppelte Pendel in Ruhelage wirkt, da dieses durch die Feder schon ausgelenkt ist.  $M_0$  ist dabei keine Konstante, sondern von  $\rho$  abhängig.

Kleiner Tipp: wenn nicht gerade ein Symbol für eine Variable im Subskript steht, nutzt (hier z. B.)  $T_{\text{text}}\{\text{geg}\}$ .

### 3 Auswertung und Fehleranalyse

Um plausible Werte für die effektive Pendellänge  $l$ , die Masse  $m$ , die Federkonstante  $D$  und das Drehmoment  $M_0$  angeben zu können, haben wir einige Messungen vorgenommen und die Werte im Folgenden so gut wie möglich abgeschätzt bzw. berechnet. Da wir unter plausiblen Werten die Bestwerte unserer Berechnungen verstehen, haben wir für diese Werte keine Fehler durch Gaußsche Fehlerfortpflanzung ermittelt.

#### 3.1 Auslenkwinkel $\varphi$ in Ruhelage

Wir bestimmen die Auslenkwinkel  $\varphi_{01}$  und  $\varphi_{02}$  auf folgende Weise (siehe auch Abb. 1):

$$\begin{aligned}\tan(\varphi) &= \frac{x_i}{h} \\ \Rightarrow \varphi &= \arctan\left(\frac{x_i}{h}\right)\end{aligned}$$

Die Unsicherheiten für  $\varphi$  berechnen wir über Gaußsche Fehlerfortpflanzung:

$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= \sqrt{\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x_i}\Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial h}\Delta h\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{\cos\left(\frac{x_i}{h}\right)^2 h}\Delta x_1\right)^2 + \left(-\frac{x_i}{\cos\left(\frac{x_i}{h}\right)^2 h^2}\Delta h\right)^2}.\end{aligned}$$

Daraus ergeben sich die Winkel, die in Tabelle 1 mit ihren Unsicherheiten und der relativen Unsicherheit aufgelistet sind.

Tabelle 1: Werte für  $\rho$  und entsprechend  $\varphi_{01}$ ,  $\varphi_{02}$  mit den jeweiligen Unsicherheiten, sowie den relativen Fehlern

$i$	$\rho[m]$	$\varphi_{01} [^\circ]$	$\varphi_{02} [^\circ]$	$\frac{\Delta\varphi_{01}}{\varphi_{01}} [\%]$	$\frac{\Delta\varphi_{02}}{\varphi_{02}} [\%]$
1	0.1500(1)	0.94(6)	0.88(6)	6.3	6.7
2	0.2500(1)	1.46(6)	1.46(6)	4.0	4.0
3	0.3500(1)	1.87(6)	1.87(6)	3.1	3.1
4	0.4500(1)	2.21(6)	2.21(6)	2.6	2.6
5	0.5499(1)	2.57(6)	2.50(6)	2.3	2.3
6	0.6500(1)	2.80(6)	2.75(6)	2.1	2.1
7	0.7500(1)	3.04(6)	2.98(6)	1.9	2.0

Zum Vergleich berechnen wir außerdem die Winkel über die in der Versuchsanleitung gegebenen Formel:

$$\varphi_{01} = \varphi_{02} = \frac{M_0}{mgl + 2D\rho^2}, \quad (1)$$

wobei wir für die Erdbeschleunigung  $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$  [1] verwenden.

Die Federkonstante  $D$  berechnen wir über

$$F = D \cdot (z_{F1} - z_{F2})$$

$$\Rightarrow D = \frac{F}{(z_{F1} - z_{F2})} = 1.75 \text{ Nm},$$

wobei  $z_{F2}$  der Länge der Feder bei einer wirkenden Kraft  $F$  entspricht. Wir haben diese auch mit dem Maßband gemessen,  $F$  haben wir mit dem Federkraftmesser gemessen.

Wir berechnen  $M_{0,i}$  durch:

$$M_{0,i} = F \cdot \rho = D \cdot (z_{F1} - z_i) \cdot \rho_i$$

Tragen wir nun die ermittelten Werte für  $M_0$  in einem Diagramm auf  $\rho_i$  auf (s. Abb. 2), so erkennen wir in dem Bereich, in dem wir die Schwingungen betrachten, annähernd einen linearen Zusammenhang. Über polyfit (Python, Numpy) bestimmen wir folgende Ausgleichsgerade:

$$M_0 = 0.27 \text{ N} \cdot \rho + 0.039 \text{ Nm}$$

Diese Gleichung für  $M_0$  setzen wir in Gleichung (1) erhalten die Funktion

$$\varphi_{0,1}(\rho) = \varphi_{0,1}(\rho) = \frac{0.27 \text{ N} \cdot \rho + 0.039 \text{ Nm}}{mgl + 2D\rho^2}.$$

Diese Funktion sowie die Werte für  $\varphi_{01}$  und  $\varphi_{02}$  tragen wir in einem Diagramm auf  $\rho$  auf (s. Abb. 3) und erkennen eine grobe Übereinstimmung der gemessenen

und analytischen Werte. Zusätzlich tragen wir auch noch folgende Abhängigkeit auf:

$$\begin{aligned}\varphi_{0,1}(\rho)' = \varphi_{0,1}(\rho)' &= \frac{\overline{M_{0,i}}}{mgl + 2D\rho^2} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n M_{0,i}}{7} \\ &= \frac{\overline{M_0}}{mgl + 2D\rho^2}\end{aligned}$$

Hier berechnen wir die Winkel mit einem Mittelwert von  $M_0$ . Dabei sehen wir aber, dass dies zu keinen sinnvollen Ergebnissen führt (rote Kurve in Abb. 3).

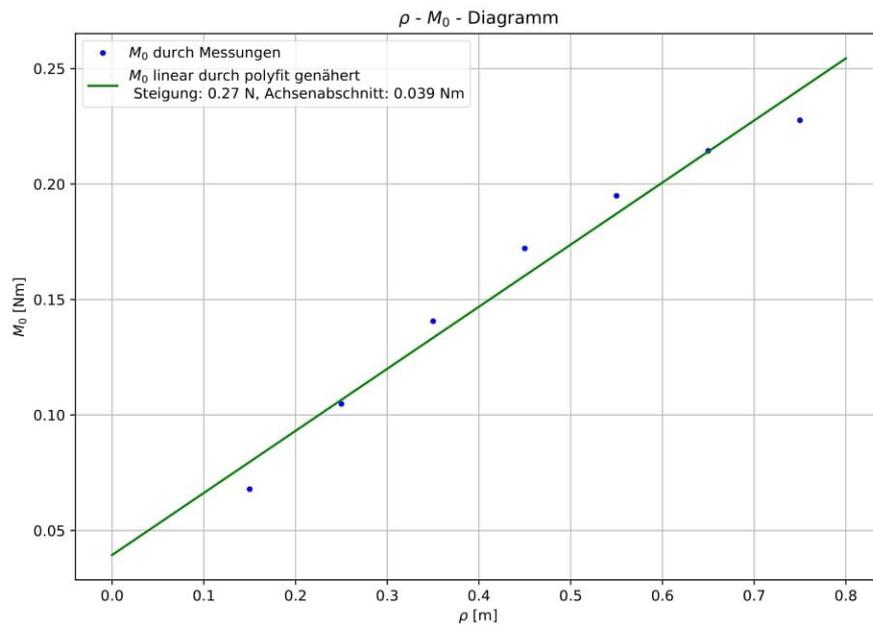


Abbildung 2:  $\rho - M_0$  - Diagramm

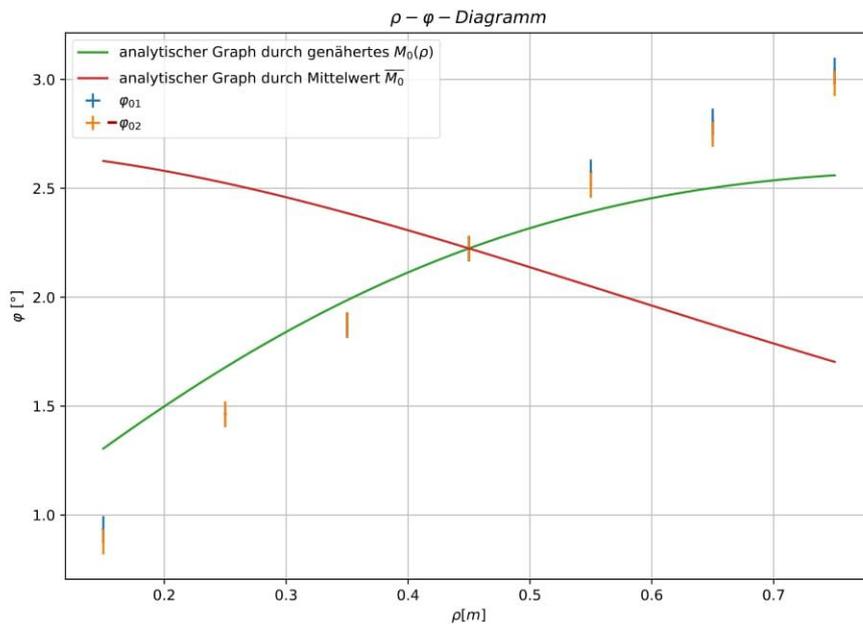


Abbildung 3:  $\rho - \phi$  - Diagramm

### 3.2 Frequenzen $\omega_{gl}$ und $\omega_{geg}$ der Fundamentalschwingung bestimmen

Zunächst berechnen wir für die gleichsinnige Fundamentalschwingung die Winkelgeschwindigkeit  $\omega_{gl}$  und die entsprechenden Unsicherheiten über Gaußsche Fehlerfortpflanzung. Außerdem bestimmen wir die relativen Unsicherheiten.

$$\hat{\omega}_{gl,i} = \frac{2\pi}{T_{gl,i}}$$

$$\Delta\omega_{gl,i} = \sqrt{\left(-\frac{2\pi}{T_{gl,i}^2} \Delta T_{gl}\right)^2}$$

Analog verfahren wir für  $\omega_{geg}$ :

$$\hat{\omega}_{geg,i} = \frac{2\pi}{T_{geg,i}}$$

$$\Delta\omega_{geg,i} = \sqrt{\left(-\frac{2\pi}{T_{geg,i}^2} \Delta T_{geg}\right)^2}$$

Die berechneten Werte sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Werte für  $\rho$  und entsprechend  $\omega_{gl}$ ,  $\omega_{geg}$ , die entsprechenden Unsicherheiten sowie die relativen Unsicherheiten

i	$\rho[m]$	$\omega_{gl}[\frac{rad}{s}]$	$\frac{\Delta\omega_{gl}}{\omega_{gl}}[\%]$	$\omega_{geg}[\frac{rad}{s}]$	$\frac{\Delta\omega_{geg}}{\omega_{geg}}[\%]$
1	0.150(1)	3.40(11)	3.2	3.44(11)	3.3
2	0.250(1)	3.40(11)	3.2	3.40(11)	3.3
3	0.350(1)	3.44(11)	3.3	3.53(12)	3.4
4	0.450(1)	3.41(11)	3.3	3.64(13)	3.5
5	0.550(1)	3.40(11)	3.3	3.88(14)	3.7
6	0.650(1)	3.35(11)	3.2	4.02(15)	3.8
7	0.750(1)	3.40(11)	3.2	4.12(16)	3.9

Auch hier berechnen wir die analytischen Werte über die Formeln aus der Versuchsanleitung:

$$\omega_{gl} = \sqrt{\frac{g}{l}} \tag{2}$$

$$\omega_{geg} = \sqrt{\omega_{gl}^2 + \frac{2D\rho^2}{ml^2}} \tag{3}$$

Wir tragen die gemessenen Werte und ihre Fehlerbalken sowie den analytischen Graphen in zwei verschiedene Diagramme auf  $\rho$  auf (Abb. 4 und Abb. 5) und erkennen, dass unsere gemessenen Werte und die analytischen Werte gut übereinstimmen.

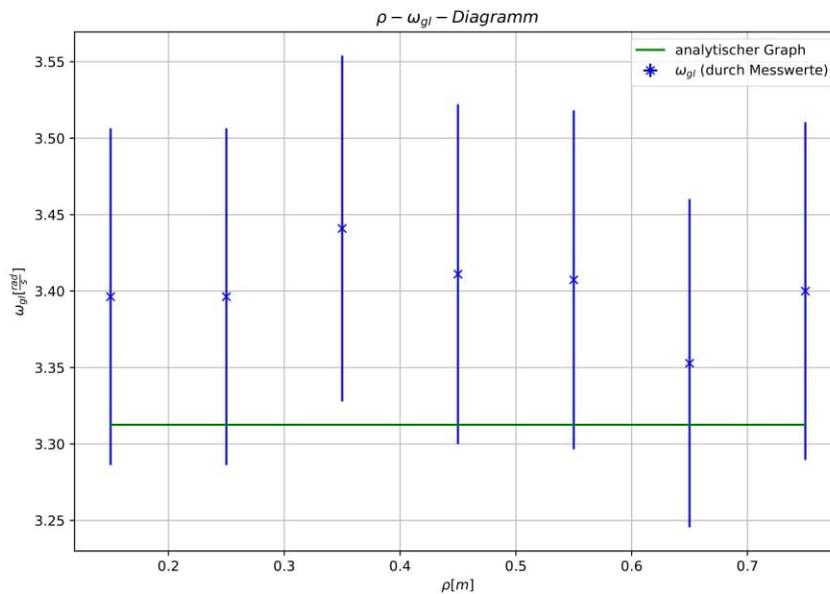


Abbildung 4:  $\rho - \omega_{gl} -$  Diagramm

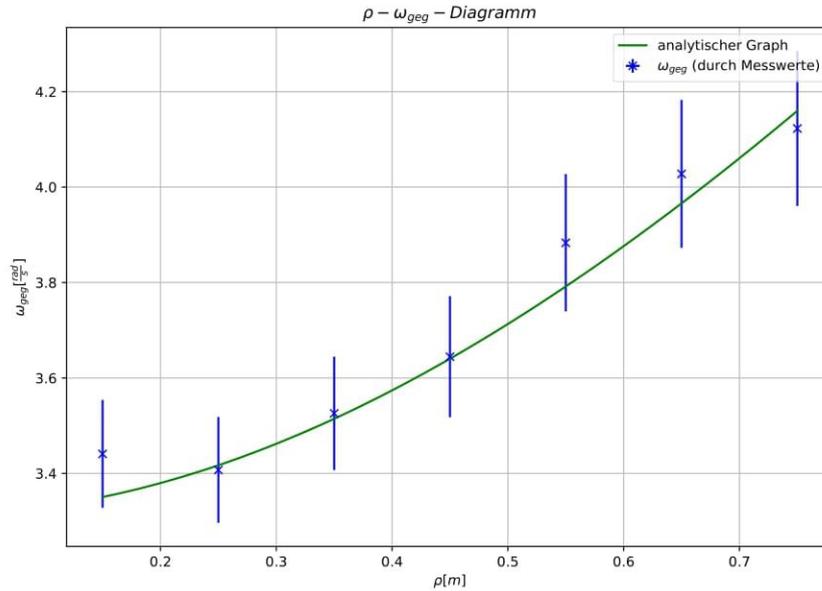


Abbildung 5:  $\rho - \omega_{geg}$  - Diagramm

### 3.3 Frequenzen $\omega_+$ und $\omega_-$ der Kopplungsschwingung bestimmen

Wir bestimmen die Zeiten  $T_{+,i}$  aus den gemessenen Einzelwerten (s. Anhang E) mithilfe des Mittelwerts und der Standardabweichung des Mittelwerts. Außerdem noch die Zeiten  $T_{-,i}$  aus den gemessenen (Teil-)Perioden (s. Anhang E). Weiter errechnen wir die Frequenzen  $\omega_{+,i}$  und  $\omega_{-,i}$  und die zugehörigen Unsicherheiten über Gauß'sche Fehlerfortpflanzung (s. Gleichung (4)). Die errechneten Werte sind in Tabelle 3 zu finden.

$$\omega_{\pm,i} = \frac{2\pi}{T_{\pm,i}}, \quad (4)$$

$$\Delta\omega_{\pm,i} = \sqrt{\left(\frac{\partial\omega}{\partial T_{\pm,i}} \Delta T_{\pm,i}\right)^2} = \sqrt{\left(-\frac{2\pi}{T_{\pm,i}^2} \Delta T_{\pm,i}\right)^2}.$$

Wir sehen, dass die relativen Fehler der Periodendauer  $T_+$  und der Kreisfrequenz  $\omega_+$  sehr viel größer sind, als die relativen Fehler der Periodendauer  $T_-$  und der Kreisfrequenz  $\omega_-$ . Dies geht aus der sehr viel längeren Periodendauer  $T_-$  der einhüllenden Frequenz hervor.

Die Kreisfrequenzen  $\omega_+$  und  $\omega_-$  tragen wir in Abb. 6 und Abb. 7 auf die Koppellänge  $\rho$  auf. Außerdem berechnen wir die Kreisfrequenzen in Abhängigkeit von der Koppellänge analytisch (s. Gleichung (5)) und tragen diese ebenfalls in den Graphen auf. Für die Berechnung von  $\omega_{gl}$  und  $\omega_{geg}$  nutzen wir wieder Gleichung (2) und Gleichung (3):

$$\omega_+ = \frac{\omega_{gl} + \omega_{geg}}{2}, \quad \omega_- = \frac{\omega_{gl} - \omega_{geg}}{2}. \quad (5)$$

Tabelle 3: Werte der Periodendauern  $T_{+,i}$ ,  $T_{-,i}$ , Frequenzen  $\omega_{+,i}$ ,  $\omega_{-,i}$  und deren relative Unsicherheiten

Index $i$	$T_{+,i}$ [s]	$\frac{\hat{T}_{+,i}}{\Delta T_{+,i}}$ [%]	$T_{-,i}$ [s]	$\frac{\hat{T}_{-,i}}{\Delta T_{-,i}}$ [%]	$\omega_{+,i}$ [ $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ ]	$\frac{\hat{\omega}_{+,i}}{\Delta \omega_{+,i}}$ [%]	$\omega_{-,i}$ [ $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ ]	$\frac{\hat{\omega}_{-,i}}{\Delta \omega_{-,i}}$ [%]
1	1.82(4)	2.36	317.6(6)	0.19	3.45(8)	2.36	0.01978(4)	0.19
2	1.69(5)	2.94	126.7(6)	0.47	3.72(11)	2.94	0.0496(2)	0.47
3	1.69(4)	2.59	75.3(6)	0.80	3.71(10)	2.59	0.0834(7)	0.80
4	1.75(4)	2.07	46.6(3)	0.64	3.59(7)	2.07	0.1344(9)	0.64
5	1.666(10)	0.62	32.2(3)	0.93	3.77(2)	0.62	0.1953(18)	0.93
6	1.70(3)	1.62	24.3(3)	1.24	3.70(6)	1.62	0.259(3)	1.24
7	1.662(15)	0.88	18.6(3)	1.61	3.78(3)	0.87	0.337(5)	1.61

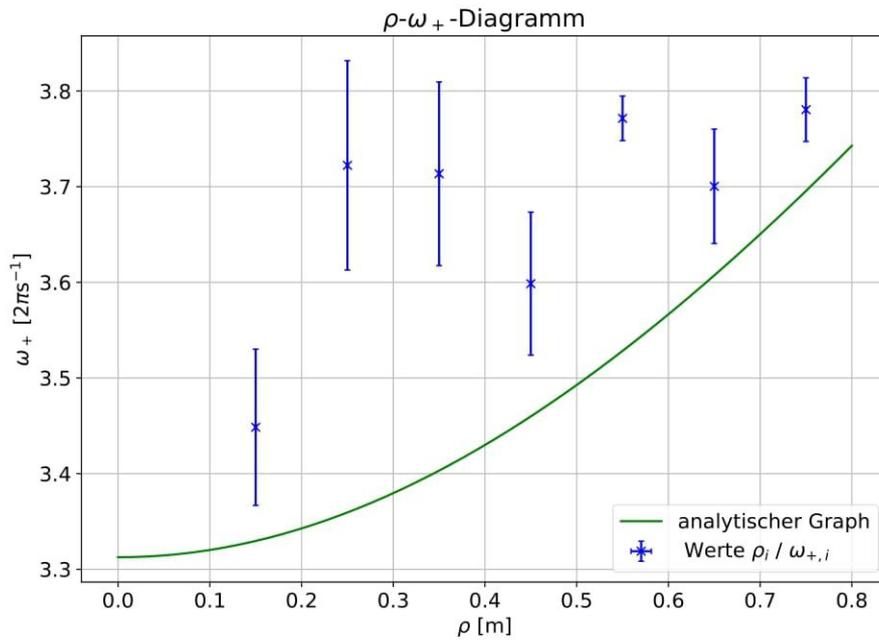
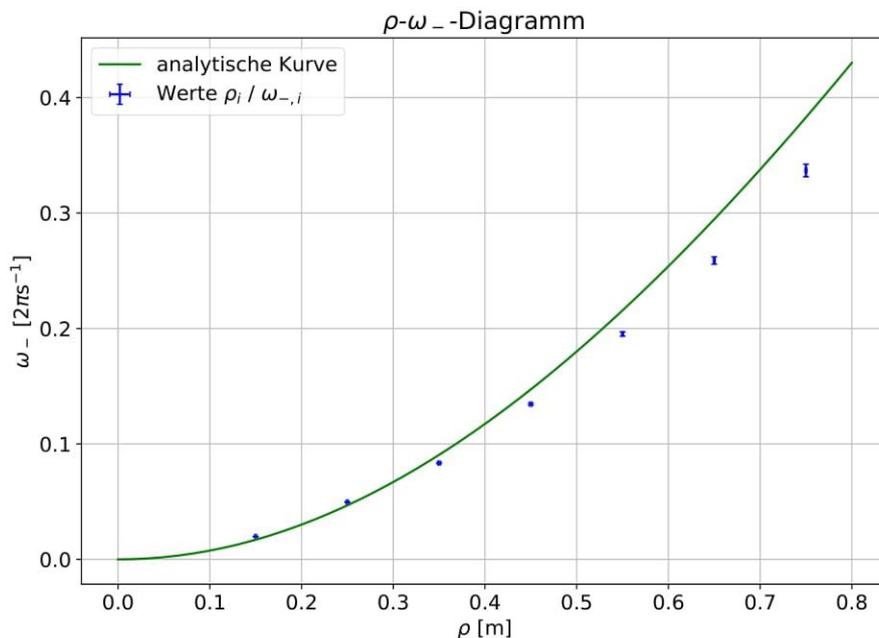


Abbildung 6:  $\rho$ - $\omega_+$ -Diagramm

Abbildung 7:  $\rho$ - $\omega_-$ -Diagramm

## 4 Diskussion

### 4.1 Verbesserungsmöglichkeiten für die Messung

Durch die Art des Versuchsaufbaus und der Messgeräte entstehen Ungenauigkeiten, die sich auf unsere Ergebnisse für  $\varphi_{01,02}$ ,  $\omega_{gl}$ ,  $\omega_{geg}$ ,  $\omega_+$  und  $\omega_-$  auswirken. Um kleinere Fehler zu erhalten, wäre es sinnvoll den Aufbau und die Art der Messung zu modifizieren. Es wäre z.B. hilfreich bei der Messung der Periodendauern nicht nur 5 Schwingungen zu betrachten sondern 10 oder mehr. Um hier noch die Unsicherheit durch langsame Reaktionszeit etwas zu minimieren könnte man über die Messung von 10 Schwingungen zusätzlich eine Messreihe durchführen, was im zeitlichen Rahmen des Anfängerpraktikums allerdings nicht umzusetzen wäre. Für die Messung der Winkel wäre es zudem gut zu wissen, wie groß die tatsächliche Distanz von Aufhängepunkt und Skala ist, da wir nur die Distanz von Austrittspunkt des Stabs bis zur Skala gemessen, und mit dieser Größe über den tangens die Winkel bestimmt haben. Um die Messung zu optimieren, müssten zudem auch Effekte wie Reibung, Luftzug etc. berücksichtigt, bzw. eliminiert werden.

### 4.2 Systematischer Fehler Länge $l$

Eine große Differenz von gemessenen und analytischen Werten entsteht durch unseren Wert für die effektive Länge  $l$ , die der Länge von Aufhängepunkt bis Masseschwerpunkt entsprechen sollte. Dies war bei uns schwierig zu ermitteln, da die Masse des Stabs und die Distanz von Aufhängepunkt zum Austrittspunkt des Stabs unbekannt ist. Auch der Schwerpunkt von der am Stab hängenden

Masse ist nicht einfach abzuschätzen. Da jede analytisch berechnete Größe von dieser Länge  $l$  abhängt, wirkt sich diese Unsicherheit auf alle Ergebnisse aus.

### 4.3 Folgerungen aus $\varphi$

Aus den gemessenen Werten für die Winkel  $\varphi_{01}$  und  $\varphi_{02}$  können wir schließen, dass die Abhängigkeit von  $\rho$  für unsere kleinen Auslenkungen annähernd linear ist. Man erkennt allerdings auch, dass die theoretisch hergeleitete Formel nicht ganz mit unseren gemessenen Werten übereinstimmt. Hier müsste man die Unsicherheiten der Messung größer wählen. Die Schwierigkeit liegt aber vor allem darin, einen plausiblen Wert für das Drehmoment  $M_0$  zu finden, da  $M_0$  von  $\rho$  abhängig ist. Einen Mittelwert zu berechnen und mit diesem  $\varphi$  zu bestimmen ist nach unserer Analyse nicht sinnvoll. Da wir die Differenzialgleichung für Pendelschwingungen aber auch immer nur als linear nähern, ist davon auszugehen, dass weitere Unsicherheiten aufgrund einer in Wirklichkeit trigonometrische Abhängigkeit zustande kommen.

Aus den berechneten Werten für die relativen Unsicherheiten der Winkel lässt sich schließen, dass die Winkelmessungen ziemlich genau sind, aber für kleinere  $\rho$  ungenauer werden. Dies können wir darauf zurückführen, dass die gemessene Länge  $h$  nicht ganz vom Aufhängepunkt des Pendels gemessen wurde, eine Unsicherheit, die signifikanter wird, je kleiner  $\rho$  ist. Für ausreichend große  $\rho$  ist die Unsicherheit beim Messen der Länge  $h$  nicht mehr sehr signifikant. Aus unseren Messungen können wir außerdem schließen, dass sich die Theorie bestätigt, dass bei einem symmetrischen gekoppelten Pendel beide Pendel in der Ruhelage mit dem gleichen Winkel zueinander ausgelenkt werden ( $\varphi_{01} = \varphi_{02}$ ).

### 4.4 Folgerungen aus $\omega_{gl}$ und $\omega_{geg}$

Aus den Ergebnissen der Messung für  $\omega_{gl}$  können wir folgern, dass die Kopplung der Pendel keinen Einfluss auf die Winkelgeschwindigkeit des Pendels hat. Die Feder ist durch die Kopplung der Pendel bereits gestreckt. Allerdings wird sie durch das gleichphasige Hin- und Herschwingen nicht weiter gestreckt oder gestaucht, wodurch die Feder keinen Einfluss auf die Periodendauer und die Winkelgeschwindigkeit der gleichsinnigen Schwingung hat. Somit ist es auch nicht relevant, welche Werte man für  $\rho$  wählt.  $\omega_{gl}$  ist also annähernd konstant. Die Abweichung des theoretischen Werts und der gemessenen Werte kommt sehr wahrscheinlich durch die nicht ganz korrekt eingeschätzte effektive Länge des Pendels zustande (Abschnitt 4.2). Wir können durch die berechneten relativen Unsicherheiten trotzdem folgern, dass die gemessenen Werte und die theoretische Formeln die annähernd gleichen Ergebnisse liefern, da die realen Unsicherheiten sehr gering sind (Tabelle 2).

Bei der gegensinnigen Schwingung sieht man, dass  $\omega_{geg}$  nicht konstant ist, sondern von  $\rho$  abhängt. Je größer  $\rho$  ist, desto größer ist auch  $\omega_{geg}$ . Außerdem erkennt man, dass der Zusammenhang nicht linear ist. Die Abhängigkeit von  $\rho$  und  $\omega_{geg}$  können wir dadurch erklären, dass die Kopplung nun signifikant ist, da die Feder während des Hin- und Herschwingens der Pendel gestreckt bzw. gestaucht wird. Je größer  $\rho$  ist, desto stärker ist auch die Kopplung der Pendel und somit der Einfluss der Feder. Bei gleicher Auslenkung der Pendel wirkt nun

eine stärkere Kraft zwischen Feder und Pendel (da die Feder bei gleicher Auslenkung und größerem  $\rho$  auch mehr gestreckt bzw. gestaucht wird) und somit auch ein größeres Drehmoment. Eine genauere Abhängigkeit zwischen  $\rho$  und  $\omega_{geg}$  können wir aus unseren Werten nicht erkennen, allerdings sieht man, dass auch hier gemessene Werte und die theoretische Formel bis auf Messungenauigkeiten annähernd gleiche Ergebnisse liefern, was sich auch mit den berechneten relativen Unsicherheiten deckt (Tabelle 2).

#### 4.5 Vergleich der Werte $\omega_+$

In Abb. 6 erkennen wir starke Abweichungen der aus den Messwerten errechneten Werte  $\omega_{+,i}$  zu den analytischen Werten. Dies liegt vermutlich überwiegend an unserer gewählten Messmethode. Da die Amplitude der Einzelschwingung der Schwebung sehr schnell so klein wird, dass sie schwierig messbar ist, entschieden wir uns einzelne Perioden zu messen. Dies führt zu großen Standardunsicherheiten. Außerdem sprechen die sporadisch stark schwankenden Abweichungen der Messwerte für systematische Fehler, die auf Grund der von uns Menschen durchgeführten Zeitmessung entstanden. Falls wir den Versuch erneut durchführen würden, wäre es sinnvoll die maximale Anzahl messbarer Perioden je angestoßener Schwingung zu messen und möglicherweise zusätzlich Messreihen zu diesen Merhfachperioden zu erstellen.

#### 4.6 Vergleich der Werte $\omega_-$

In Abb. 7 sehen wir wie die gemessenen Werte immer stärker von den analytischen Werten abweichen, je größer der Kopplungsabstand gewählt wurde. An dieser Stelle haben wir vermutlich die Unsicherheit  $\Delta T_-$  zu klein gewählt. Da wir über einen vergleichsweise sehr langen Zeitraum die Periodendauer  $T_-$  gemessen haben, kann man davon ausgehen, dass der Luftwiderstand und mögliche Luftturbulenzen zu längeren Periodendauern führen, welche wiederum kleineren Kreisfrequenzen implizieren. Des Weiteren ist der analytisch berechnete Wert eine Näherung, weswegen auch hier Werteabweichungen entstehen können.

## Abbildungsverzeichnis

1	Versuchsaufbau . . . . .	2
2	$\rho - M_0$ - Diagramm . . . . .	5
3	$\rho - \phi$ - Diagramm . . . . .	6
4	$\rho - \omega_{gl}$ - Diagramm . . . . .	7
5	$\rho - \omega_{geg}$ - Diagramm . . . . .	8
6	$\rho - \omega_+$ -Diagramm . . . . .	9
7	$\rho - \omega_-$ -Diagramm . . . . .	10
8	Foto Versuchsaufbau . . . . .	14

## Tabellenverzeichnis

1	Werte für $\varphi$ . . . . .	4
2	Werte $\omega_{gl}$ und $\omega_{gl}$ . . . . .	7
3	Werte $T_+$ , $T_-$ , $\omega_+$ und $\omega_-$ . . . . .	9

## Literatur

- [1] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 1: Mechanik und Wärme* (9. Auflage). Springer-Verlag, 2021. **Wenn ihr mir jetzt noch sagt, dass der Springer-Verlag in Heidelberg sitzt, dann ist alles gut.**

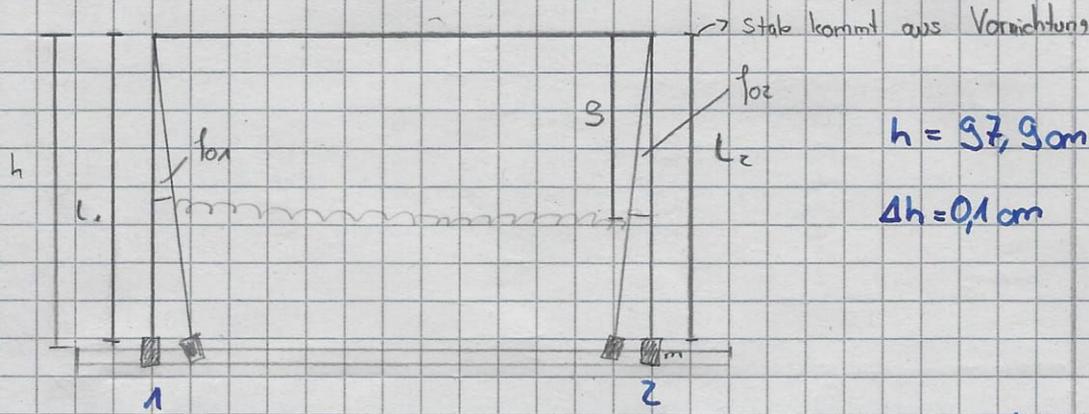
## D Foto Versuchsaufbau



Abbildung 8: Foto Versuchsaufbau

# Versuch 19 - Gekoppelte Pendel

## E Laborbucheintrag



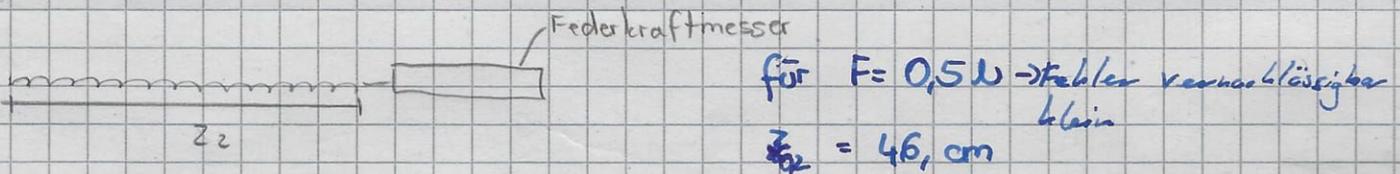
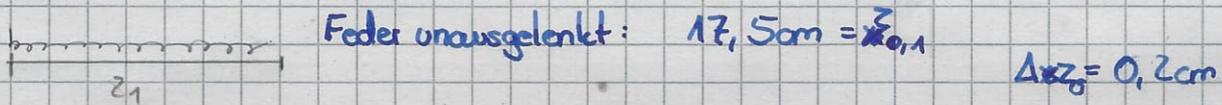
effektive Pendellänge  $L = (l_1 + l_2) \cdot \frac{1}{2}$       $l_2 = \frac{89,3 \text{ cm}}{2}$       $l_1 = \frac{89,3 \text{ cm}}{2}$

$\Delta L = 0,2 \text{ cm}$       $L_1 = 89,5 \text{ cm}$       $L_2 = 89,3 \text{ cm}$   
 wir messen vom Austrittspunkt Stab bis oberes Ende Masse

Nullpunkte Pendel : Pendel 1: 1cm auf Skala

Pendel 2: 48,1 cm auf Skala

## Federkonstante



$m = 390 \text{ g}$       $\Delta m = 10 \text{ g}$  (Versuchsanleitung)

$g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  (Demtröder)

S [cm]	x <sub>1</sub> [cm]	x <sub>2</sub> [cm]	S · T <sub>gl</sub> [s]	S · T <sub>geg</sub> [s]	T <sub>+</sub> [s]	T <sub>-</sub> [s]	z · L <sub>cm</sub>
15,0	1,6	1,5	9,26	9,13	1,97 1,75 1,75 1,87 1,77	$\frac{1}{2} T_- = 158,81$	42,3
25,0	2,5	2,5	9,25	9,22	1,50 1,74 1,78 1,68 1,74 1,71 1,74 1,76 1,73 1,52	$\frac{1}{2} T_- = 63,34$	41,4
35,0	3,2	3,2	9,13	8,91	1,73 1,88 1,74 1,72 1,66 1,69 1,69 1,66 1,65 1,64 1,68 1,62 1,77 1,75 1,67	$\frac{1}{2} T_- = 37,66$	40,4
45,0	3,8	3,8	9,21	8,62	1,73 1,88 1,74 1,72 1,66 1,69 1,69 1,66 1,65 1,64 1,68 1,62 1,77 1,75 1,67	46,72	39,3
55,0	4,4	4,3	9,22	8,09	1,69 1,69 1,66 1,65 1,64 1,68 1,62 1,77 1,75 1,67	32,18	37,7
65,0	4,8	4,7	9,37	7,80	1,69 1,69 1,66 1,65 1,64 1,68 1,62 1,77 1,75 1,67	24,27	36,3
75,0	5,2	5,1	9,24	7,62	1,69 1,69 1,66 1,65 1,64 1,68 1,62 1,77 1,75 1,67	18,65	34,8

allg.  $\Delta s = 1 \text{ mm}$   
 allg.  $\Delta x = 1 \text{ mm}$   
 allg.  $\Delta T = 0,3 \text{ s}$   
 allg.  $\Delta z = 0,2 \text{ cm}$