

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

# Versuch 18

## Reversionspendel



22. September 2023

Datum der Durchführung: 20. September 2023

Assistent:



## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Ziel des Versuchs</b>	<b>1</b>
<b>2 Versuchsaufbau</b>	<b>1</b>
<b>3 Versuchsdurchführung</b>	<b>2</b>
<b>4 Auswertung und Fehlerrechnung</b>	<b>2</b>
4.1 Bestimmung der lokalen Fallbeschleunigung $g$ . . . . .	2
4.1.1 Grobe Messungen zur Identifikation eines geeigneten x-Bereichs .	3
4.1.2 Weitere Messungen mit hoher Genauigkeit . . . . .	4
4.1.3 Graphische Auswertung . . . . .	4
4.2 Abhängigkeit der Schwingungsdauer $T$ von der Amplitude $\phi$ . . . . .	5
4.3 Abschätzen systematischer Fehler . . . . .	7
4.3.1 Dämpfung durch Auftrieb . . . . .	8
4.3.2 Dämpfung durch Reibung . . . . .	8
4.3.3 Verfälschung durch die Amplitude . . . . .	9
<b>5 Diskussion</b>	<b>9</b>
5.1 Übersichtliche Darstellung der Ergebnisse . . . . .	9
5.2 Vergleich mit dem Literaturwert . . . . .	10
5.3 Fehlerquellen und Verbesserungsvorschläge . . . . .	10
<b>6 Anhang</b>	<b>11</b>
6.1 Tabellen . . . . .	11
6.2 Diagramme . . . . .	13
6.3 Laborheft . . . . .	16
6.4 Verzeichnisse . . . . .	21

## 1 Ziel des Versuchs

Das Ziel des Versuchs ist es die lokale Erdbeschleunigung  $g$  mithilfe eines Reversionspendels mit einer Genauigkeit von  $< 10^{-3}$  zu bestimmen.

## 2 Versuchsaufbau

Unser Versuchsaufbau besteht aus einem Reversionspendel, welches aus einem Metallstab mit zwei Aufhängepunkten im Abstand  $L$  besteht. Wie in Abb. 1 zu sehen ist, kann das Pendel dadurch normal und revers aufgehängt werden. An dem einen Ende des Stabes ist ein Justiergewicht  $m_1$  angebracht. Ein zweites Gewicht  $m_2$ , das Laufgewicht, kann zwischen den Aufhängungen verschoben werden.

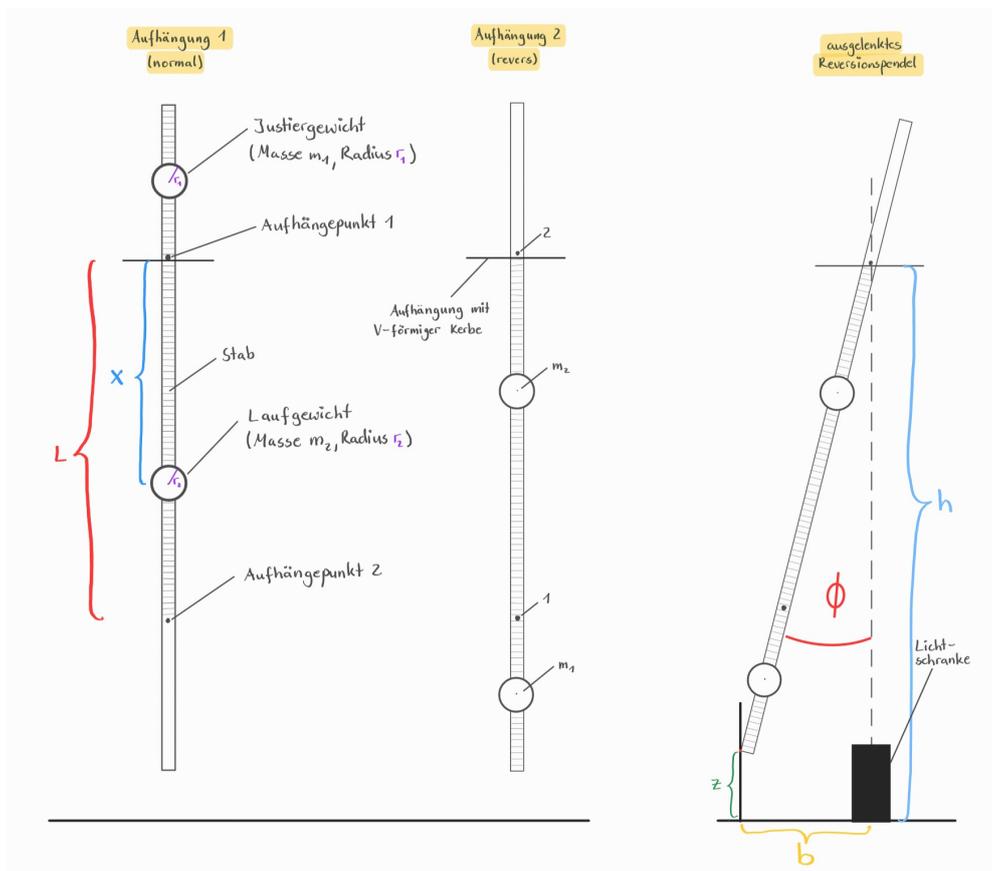


Abbildung 1: Versuchsaufbau

Die Periodendauer des Pendels wird mit einer Laserlichtschranke und einem elektronischen Zähler gemessen (siehe [Fre23a]).

### 3 Versuchsdurchführung

Das Laufgewicht  $m_1$  wird an der Metallstange auf einen Abstand  $x$  zum Aufhängepunkt 1 eingestellt. Wir lenken das Pendel um einen Winkel  $\Phi$  aus (vgl. auch Abb. 1). Wird das Pendel nun losgelassen, misst die Lichtschranke die Zeit für eine vorher eingestellte Anzahl an Durchgängen. Wir stellen den elektronischen Zähler so ein, dass er mithilfe der Lichtschranke unsere Zeit  $t$  ab dem ersten bis zum zehnten Durchgang misst. Nach der Messung drehen wir das Pendel um und messen bei reverser Aufhängung 2 für den gleichen Abstand  $x$  die dazugehörige Zeit  $t$ .

In Aufgabenteil eins führen wir die  $t$ -Messungen für beide Aufhängungen mit verschiedenen  $x$ -Werten durch. Das Pendel wird dabei stets um den gleichen Winkel  $\Phi$  ausgelenkt. Wir suchen dabei den Abstand  $x^*$  bei dem das Pendel für 10 Schwingungen sowohl bei der normalen, als auch bei der reversen Aufhängung gleich lange benötigt. Zunächst messen wir in großen  $x$ -Schritten die Periodendauer, um den groben Bereich von  $x^*$  zu bestimmen. In diesem Bereich führen wir nun weitere Messungen mit deutlich feineren Abständen durch.

Stellen wir fest, dass die gesuchte Stelle  $x^*$  nicht mittig, sondern am Rand oder nirgends auf unserem Pendel liegt, kann dies durch Verschieben des Justiergewichtes verändert werden.

In einem weiteren Experiment messen wir bei verschiedenen Auslenkwinkeln  $\Phi$  die Zeit  $t$  für 10 Lichtschrankendurchläufe. Wir verwenden hierfür die normale Aufhängung 1 und eine feste Positionierung der Gewichte.

## 4 Auswertung und Fehlerrechnung

### 4.1 Bestimmung der lokalen Fallbeschleunigung $g$

Im ersten Experiment wollen wir mithilfe des Reversionspendels die lokale Fallbeschleunigung  $g$  bestimmen.

Bei dem Reversionspendel unterscheiden wir zwischen der Periodendauer  $T_1$  für eine Schwingung in der normalen Aufhängung 1 und der dazugehörigen reversen Periodendauer  $T_2$  in Aufhängung 2.

Im Experiment suchen wir die Periodendauern  $T^*$ , bei der gilt  $T_1 = T_2 = T^*$ .

Für den Fall  $T_1 = T_2 = T^*$  können wir zur Berechnung der Periodendauer

$$T^* = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (1)$$

verwenden (siehe [Joh21]). Durch eine Umformung erhalten wir daraus für die lokale Fallbeschleunigung

$$g = 4\pi^2 \cdot \frac{L}{T^{*2}} \quad (2)$$

Hierbei ist  $L$  der Abstand zwischen den beiden Aufhängepunkten des Pendels (siehe Abb. 1).

Mithilfe der Laserschranke messen wir die Zeit  $t$  für 10 Lichtschrankendurchläufen des Pendels. Dies entspricht 5 Perioden. Es gilt also  $T = \frac{1}{5}t$  um die Periodendauer  $T$  zu erhalten.

Wir sind in zwei Schritten vorgegangen um die Position  $x^*$  unseres Laufgewichtes zu bestimmen an welcher  $T_1 = T_2$  gilt. Zuerst haben wir unseren Abstand  $x$  in großen Schritten verändert, um einen Bereich zu lokalisieren in dem  $x^*$  liegt.

#### 4.1.1 Grobe Messungen zur Identifikation eines geeigneten $x$ -Bereichs

Bei unserer ersten Messreihe haben wir festgestellt, dass sich der relevante Bereich in dem sich die beiden Periodendauern  $T_1$  und  $T_2$  annähern zu weit unten auf unserem Pendel befindet. Dadurch haben wir zu wenig Spielraum um die gesuchte Einstellung zu finden.

Um dies zu ändern, verschieben wir das Justiergewicht um 10 cm nach außen. Dadurch ist es uns gelungen, dass der interessante Bereich in etwa mittig zwischen den beiden Aufhängepunkten liegt. Für die grobe Messung haben wir das Gewicht immer in 10 cm Schritten verschoben. Die Messergebnisse der Zeiten  $t_1$  und  $t_2$  bei der jeweiligen Position  $x$  des Laufgewichtes sind in Tabelle 1 eingetragen.

$x$ in [cm]	88,9	78,9	68,9	58,9	48,9	38,9
$t_1$ in [s]	10,49	10,19	9,94	9,97	9,63	9,74
$t_2$ in [s]	10,36	10,10	9,93	9,84	9,81	9,83

Tabelle 1: Messungen für die grobe Einstellung

Aus den Werten bestimmen wir die jeweiligen Periodendauern und tragen diese in Abb. 4 gegen  $x$  auf. Wir legen Fits durch die Werte für  $T_1$  und  $T_2$ . Daraus lässt sich graphisch der Bereich schätzen, in dem der Punkt  $P^*(x^*|T^*)$  liegt. Wir wählen den Bereich von  $x = 54,9$  cm bis  $x = 78,9$  cm.

### 4.1.2 Weitere Messungen mit hoher Genauigkeit

In dem in Abschnitt 4.1.1 bestimmten  $x$ -Bereich, führen wir nun Messungen im Abstand von 1 cm durch. Die Messergebnisse sind in Tabelle 2 aufgetragen. Wir haben diese Werte in Abb. 4 in ein  $T$ - $x$  Diagramm eingetragen. Anhand dessen haben wir unseren Bereich für  $x^*$  weiter auf einen Bereich von  $x = 62$  cm bis 66 cm eingegrenzt.

Innerhalb dieses Intervalls haben wir noch feinere Messungen in 0,25 cm bis 0,5 cm-Schritten gemessen, um unser  $x^*$  so exakt wie möglich bestimmen zu können. Auch diese Messwerte sind in Tabelle 2 mit eingetragen. Aus den Werten haben wir ein weiteres  $T$ - $x$  Diagramm angefertigt (Abb. 2).

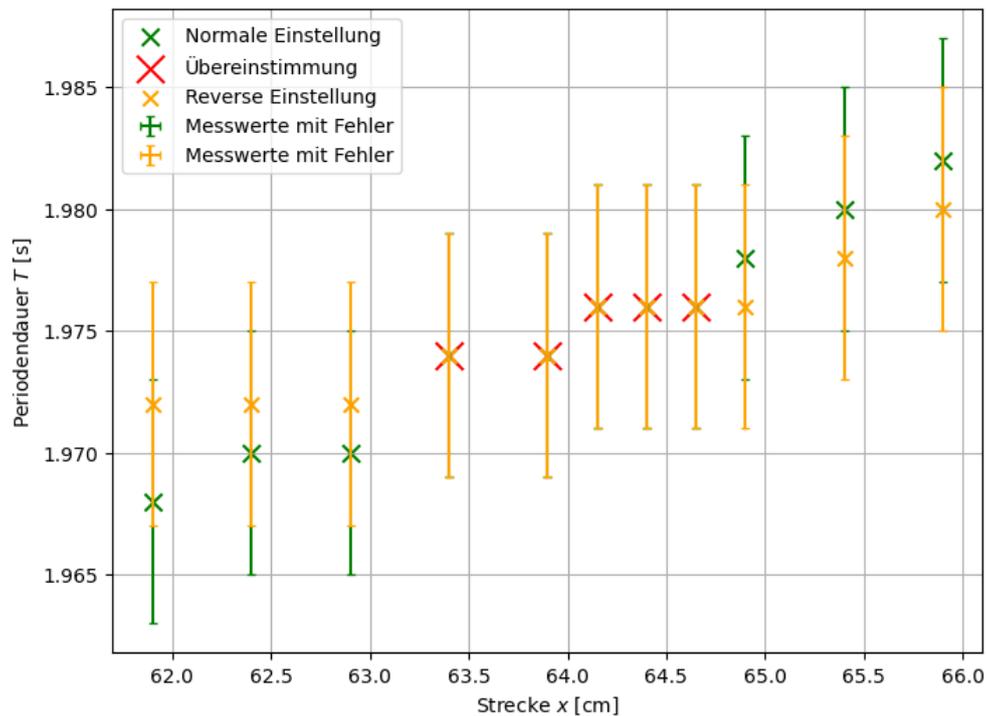


Abbildung 2:  $T$ - $x$  Diagramm mit feinsten Messwerten zur Bestimmung von  $T^*$  mit Fehlerbalken

In Abb. 2 erkennen wir, dass es fünf  $x$ -Messwerte gibt, für die  $T_1$  und  $T_2$  übereinstimmen.

### 4.1.3 Graphische Auswertung

Wie in Abschnitt 4.1 erwähnt, benutzen wir Gleichung (2) um die lokale Fallbeschleunigung  $g$  zu berechnen. Als Abstand zwischen den Aufhängepunkten messen wir mit einem großen Messschieber  $L = 0,969$  m. Unsere Periodendauer  $T^*$  mitteln wir aus den 5 Werten, bei denen  $T_1 = T_2$  gilt. Aus den Messwerten (Tabelle 2) erhalten wir

$$T^* = \frac{1}{5} \cdot \frac{9,88 + 9,88 + 9,88 + 9,87 + 9,87}{5} = \frac{1}{5} \cdot 9,876 \text{ s} = 1,975 \text{ s}$$

Mit Gleichung (2) erhalten wir als Bestwert unserer lokalen Fallbeschleunigung

$$\begin{aligned} \hat{g} &= 4\pi^2 \cdot \frac{L}{T^{*2}} \\ &= 4\pi^2 \cdot \frac{0,969 \text{ m}}{(1,975 \text{ s})^2} \\ &= 9,807 \text{ m/s}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Die Unsicherheit  $\Delta g$  ergibt sich aus dem Fehler der Zeitmessung einer Periode  $\Delta T^* = \frac{0,005}{\sqrt{6}}$  s und dem Fehler der Abstandsbestimmung  $\Delta L = \frac{0,001}{\sqrt{3}}$  m. Der Fehler berechnet sich per Gauß'scher Fehlerfortpflanzung.

$$\begin{aligned} \Delta g &= \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial T^*} \cdot \Delta T^*\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial L} \cdot \Delta L\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(4\pi^2 \cdot \frac{1}{T^{*2}} \cdot \Delta L\right)^2 + \left(-8\pi^2 \cdot \frac{L}{T^{*3}} \cdot \Delta T^*\right)^2} \\ &= \sqrt{(0,0058 \text{ m/s}^2)^2 + (-0,020 \text{ m/s}^2)^2} \\ &= 0,02 \text{ m/s}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Unsere berechnete Erdbeschleunigung mit relativem Fehler ist

$$\begin{aligned} g &= (9,81 \pm 0,02) \text{ m/s}^2 \\ \frac{\Delta g}{g} &= 0,2 \% \end{aligned} \quad (5)$$

## 4.2 Abhängigkeit der Schwingungsdauer $T$ von der Amplitude $\phi$

Bei unserer Berechnung in Gleichung (2) verwenden wir die Kleinwinkelnäherung. Wir haben somit bislang vernachlässigt, dass die Schwingungsdauer auch vom Auslenkwinkel  $\phi$  abhängt.

Bei größeren Winkeln wird ein Korrekturterm benötigt um die eigentliche Periodendauer  $T_{real}$  zu berechnen. Der Zusammenhang zwischen  $T^*$  und  $T_{real}$  ergibt sich aus der Taylerentwicklung als

$$T^* = T_{real} \left( 1 + \frac{1}{16} \cdot \phi^2 \right) \quad (6)$$

Wir untersuchen diesen Zusammenhang zwischen der Periodendauer  $T$  und dem Auslenkwinkel  $\phi$  nun experimentell .

Hierzu führen wir Zeitmessungen von 5 Periodendauern bei unterschiedlichen Auslenkwinkel  $\phi$  durch.

Den Winkel  $\phi$  können wir aus den Größen  $b$ ,  $h$  und  $z$  (vgl. Abb. 1) berechnen mit

$$\phi = \arctan \left( \frac{b}{h - z} \right) \quad (7)$$

Hierbei ist  $z = 10,7 \text{ cm}$  und  $h = 137,8 \text{ cm}$  mit dem Maßband bestimmt worden. Die jeweilige Auslenkungen  $b$  haben wir mit dem Geodreieck mit einer geschätzten Unsicherheit von  $\Delta b = \frac{2}{\sqrt{3}} \text{ mm}$  gemessen und den dazugehörigen Winkel  $\phi$  im Quadrat sowie die Periodendauer  $T$  in Tabelle 3 eingetragen.

Wir erwarten einen linearen Zusammenhang zwischen  $\phi^2$  und  $T$  mit der Gleichung

$$T = m \cdot \phi^2 + c \quad (8)$$

wobei  $m = \frac{T}{16}$  und  $c = T$ . Um die Proportionalität  $b \propto \phi^2$  zu überprüfen, tragen wir in Abb. 3  $\phi^2$  gegenüber  $T$  in einem Diagramm auf.

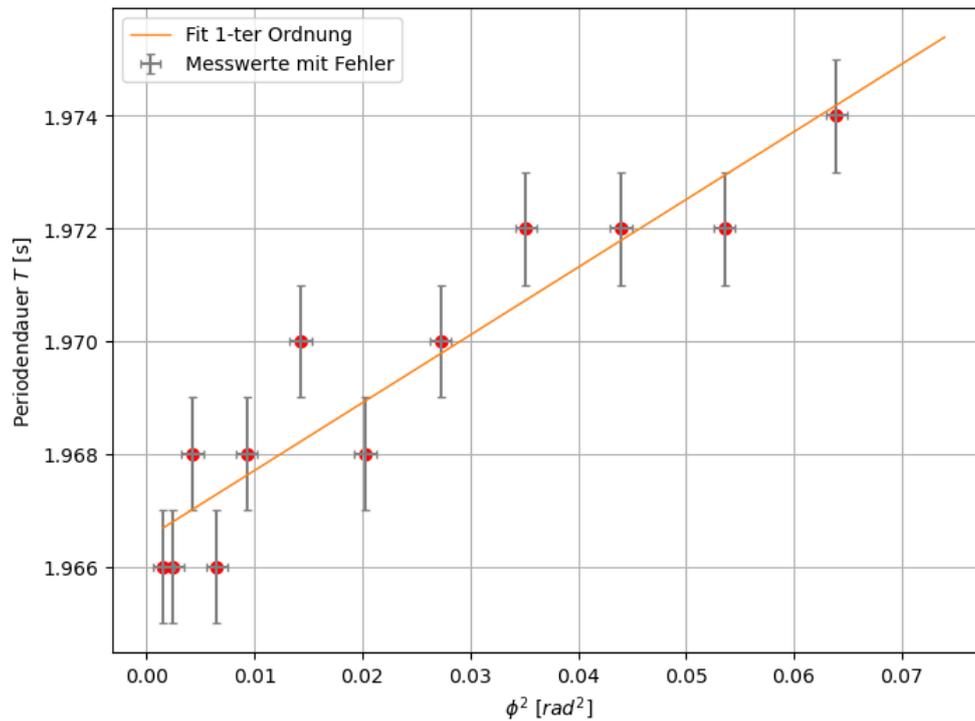


Abbildung 3: Schwingungsdauer  $T$  in Abhängigkeit von  $\Phi^2$  mit Fehlerbalken

Wir fitten mit Hilfe von Python einen Fit 1-ter Ordnung. Wegen der wenigen Messwerte ist es nicht möglich den linearen Zusammenhang vollständig zu bestätigen. Dennoch sehen wir anhand des Residuendiagramms in Abb. 6, dass bei mehr als der Hälfte aller Messwerte, die Ausgleichsgerade innerhalb der Fehler liegt. Wir erkennen somit, dass die Periodendauer nicht unabhängig von der Amplitude ist.

### 4.3 Abschätzen systematischer Fehler

In den verwendeten Gleichungen steckt die Annahme, dass unser Pendel mit konstanter Periodendauer  $T$  schwingt. Dies ist eine Idealisierung und wir ignorieren bislang mögliche Fehler im Versuch durch die Auftriebskraft, die Abhängigkeit der Schwingungsdauer von der Auslenkung und die Dämpfung der Schwingung durch Reibungseffekte. Im Folgenden werden wir überprüfen, ob diese Faktoren bei unserer Messung vernachlässigt werden dürfen oder signifikant die Messergebnisse beeinflussen.

### 4.3.1 Dämpfung durch Auftrieb

Der Auftrieb, der durch den Dichteunterschied zwischen Luft und Messing entsteht, erzeugt ein Drehmoment  $D$ , welches der treibenden Kraft des Pendels entgegenwirkt. Es gilt die Proportionalität

$$D \propto 1 - \frac{\rho_{Luft}}{\rho_{Metall}}$$

Zwischen der Periodendauer und dem Drehmoment gilt die Proportionalität

$$T \propto \sqrt{D}$$

Daraus folgt für die treibende Kraft der Korrekturfaktor

$$\begin{aligned} f_A &= \frac{T_0}{T_A} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\rho_l}{\rho_m}}} \\ &= 1 + \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \frac{\rho_l}{\rho_m}}_{\text{Taylorentwicklung}} \end{aligned} \quad (9)$$

Setzt man hier die Literaturwerte für die Dichte von Luft ( $\rho_l = 1,225 \text{ kg/m}^3$  [Wet23]) und die Dichte von Messing ( $\rho_m = 8400 \text{ kg/m}^3$  [Che23]) ein bekommt man einen Korrekturfaktor von

$$f_A = 1.000073$$

Da dieser Wert erst auf der fünften Nachkommastelle keine Null mehr hat können wir die Dämpfung durch die Auftriebskraft vernachlässigen.

### 4.3.2 Dämpfung durch Reibung

Wir werden nun den Einfluss der Dämpfung durch Reibung auf unsere Ergebnisse abschätzen. Die Schwingungsamplitude  $A$  folgt der Formel

$$A(\tau) = \frac{1}{e} \cdot A_0 \quad (10)$$

Wir bestimmen nun einen Grenzwert für die Halbwertszeit  $\tau$ , ab welcher wir die Dämpfung unseres Pendels durch Reibung vernachlässigen. Der Korrekturterm, welcher die Dämpfungseffekte durch Reibung berücksichtigt, lautet:

$$\begin{aligned} f_y &= \frac{T_\gamma}{T_0} = \underbrace{\frac{\omega_0}{\omega\gamma}}_{\text{Taylorentwicklung}} \\ &= 1 + \frac{T^2}{8\pi^2 \cdot \tau^2} \end{aligned} \quad (11)$$

Wenn  $f_\tau \leq 1,0005$  ist vernachlässigen wir den Fehler der aus der Dämpfung durch Reibung resultiert. Die Unsicherheit der Zeitmessung überwiegt dann gegenüber unserem Fehler durch die Dämpfung.

Mithilfe der Formel

$$\frac{1}{\tau} = \sqrt{\frac{0,0005 \cdot 8\pi^2}{T^{*2}}} \quad (12)$$

berechnen wir, dass  $\tau \approx 10$  s gelten muss, damit  $f_\tau \leq 1,0005$  ist.

Wir lassen das Pendel aus der Anfangsauslenkung los und messen mit der Lichtschranke bei der  $\frac{1}{e}$ -fachen Anfangsauslenkung die Durchläufe des Pendels. Das Pendel passiert nach 90 s immer noch nicht die Lichtschranke. Wir können somit die Dämpfung durch Reibung bei unserer Messung vernachlässigen, da die Halbwertszeit  $\tau$  deutlich größer als 10 s ist.

### 4.3.3 Verfälschung durch die Amplitude

Wie bereits in Abschnitt 4.2 erwähnt entsteht ein nicht zu vernachlässigender Fehler durch das verwenden der Kleinwinkelnäherung trotz größerer Auslenkwinkel  $\phi$ .

Die Gleichung mit Korrekturterm

$$T_{real} = \frac{T^*}{1 + \frac{\phi^2}{16}} \quad (13)$$

zeigt jedoch, dass bei unserem Auslenkungswinkel von  $6^\circ$  bzw.  $0,10$  rad der Korrekturfaktor  $\phi^2/16$  im Nenner  $0,00063$  beträgt und damit vernachlässigt werden kann. Unsere Messungenauigkeit von  $T$  durch die Auflösung des elektronischen digitalen Zählers ist im Vergleich dazu deutlich größer.

## 5 Diskussion

### 5.1 Übersichtliche Darstellung der Ergebnisse

Mit dem Reversionspendel war es uns möglich die Erdbeschleunigung auf

$$g = (9,81 \pm 0,02) \text{ m/s}^2 \quad (14)$$

zu bestimmen. Wir haben die angestrebte Unsicherheit  $< 10^{-3}$  um einen Faktor 2 knapp verfehlt. Dennoch liegt unsere relative Unsicherheit von  $0,2\%$  deutlich in der erhofften Größenordnung und weicht somit nicht signifikant ab.

## 5.2 Vergleich mit dem Literaturwert

Anhand der WELMEC-Normalschwereformel ([Sch21])

$$g_r = 9,780318 \cdot (1 + 0,0053024 \sin^2 \phi - 0,0000058 \sin^2 2\phi) - 0,000003085h \text{ m/s}^2 \quad (15)$$

wollen wir rechnerisch die lokale Fallbeschleunigung  $g_r$  für Freiburg bestimmen. Dazu brauchen wir die geographische Breite, sowie die Höhe über dem Meeresspiegel. Wir entnehmen [Fre23b] und [Wik23]  $\phi \approx 48^\circ$  und  $h = 278 \text{ m}$ . Da wir uns im Keller des Versuchsgebäude befinden und dieser tiefer als der gemessene Wert liegt, ziehen wir  $3 \text{ m}$  ab und kommen auf  $h_V = 275 \text{ m}$ .

Daraus folgt als berechneter Wert von  $g$  in Freiburg

$$g_r = 9,804 \text{ m/s}^2 \quad (16)$$

Wir stellen fest, dass unser gemessener Wert nicht signifikant von diesem Literaturwert abweicht und im  $1\sigma$ -Bereich liegt.

## 5.3 Fehlerquellen und Verbesserungsvorschläge

Unsere Messung der Fallbeschleunigung war bereits sehr genau. Daher liegen vermutlich keine gravierenden Messfehler vor. Dennoch gibt es mögliche Fehlerquellen.

Eine Fehlerquelle liegt darin, dass die zur Messung verwendete Lichtschranke auf einem Tisch platziert war, welcher nicht vollständig gerade justiert war. Dadurch haben wir möglicherweise einen systematischen Fehler bei der Zeitmessung von  $t$ .

Unsere Unsicherheit der gemessenen Erdbeschleunigung resultiert zu einem großen Teil aus der Unsicherheit der Zeitmessung, wie man in Gleichung (4) sehen kann. Noch genauere Messwerte könnten erzielt werden, indem ein Messzähler mit höherer Auflösung verwendet wird.

Falls dadurch eine noch genauere Zeitmessung erzielt wird muss darauf geachtet werden, dass die in Abschnitt 4.3 diskutierten Fehler möglicherweise nicht mehr zu vernachlässigen sind. Durch die Verwendung der Korrekturterme kann das Ergebnis genau bestimmt werden.

Die Messung der Länge  $L$  zwischen den beiden Aufhängungen ist mit dem großen Messschieber bereits sehr genau bestimmt worden. Dennoch kann hier ein Fehler beim Ablesen vorliegen. Die Genauigkeit könnte durch eine andere Messmethode, beispielsweise per Laser, noch weiter verbessert werden.

Eine andere Fehlerquelle ist, dass bei sehr großen Auslenkungen der Aufhängepunkt nicht immer optimal in der V-förmigen Kerbe der Aufhängung liegt. Durch eine andere Aufhängung könnte dies vermieden werden.

## 6 Anhang

### 6.1 Tabellen

x in [cm]	78,9	77,9	76,9	75,9	74,9	73,9
$t_1$ in [s]	10,21	10,18	10,15	10,14	10,11	10,09
$t_2$ in [s]	10,10	10,08	10,05	10,04	10,02	10,00
x in [cm]	72,9	71,9	70,9	69,9	68,9	67,9
$t_1$ in [s]	10,07	10,04	10,02	10,0	9,98	9,96
$t_2$ in [s]	9,99	9,97	9,96	9,95	9,93	9,92
x in [cm]	66,9	65,9	65,9	65,4	64,9	<b>64,65</b>
$t_1$ in [s]	9,93	9,91	9,91	9,90	9,89	<b>9,88</b>
$t_2$ in [s]	9,90	9,90	9,90	9,89	9,88	<b>9,88</b>
x in [cm]	<b>64,4</b>	<b>64,15</b>	<b>63,9</b>	<b>63,4</b>	62,9	62,4
$t_1$ in [s]	<b>9,88</b>	<b>9,88</b>	<b>9,87</b>	<b>9,87</b>	9,85	9,85
$t_2$ in [s]	<b>9,88</b>	<b>9,88</b>	<b>9,87</b>	<b>9,87</b>	9,86	9,86
x in [cm]	61,9	64,9	63,9	62,9	61,9	60,9
$t_1$ in [s]	9,84	9,89	9,88	9,85	9,84	9,82
$t_2$ in [s]	9,86	9,88	9,87	9,86	9,86	9,85
x in [cm]	59,9	58,9	57,9	56,9	55,9	54,9
$t_1$ in [s]	9,81	9,79	9,78	9,74	9,75	9,74
$t_2$ in [s]	9,84	9,84	9,83	9,83	9,82	9,81

Tabelle 2:  $t_1(x)$  und  $t_2(x)$  (Markierte Werte  $x^*$  wo  $t_1 = t_2$ )

Auslenkung $b$ [cm]	$\phi^2$ [rad <sup>2</sup> ]	Zeit $t$ ( $= 5 \cdot T$ ) in [s]
5,0	0,002	9,83
5,3	0,002	9,83
6,3	0,002	9,83
8,3	0,004	9,84
10,3	0,007	9,83
12,3	0,009	9,84
15,3	0,014	9,85
18,3	0,020	9,84
21,3	0,027	9,85
24,3	0,035	9,86
27,3	0,044	9,86
30,3	0,054	9,86
33,3	0,064	9,87

Tabelle 3:  $t$  (für 10 Durchläufe) und  $\phi^2$  für verschiedene  $b$

## 6.2 Diagramme

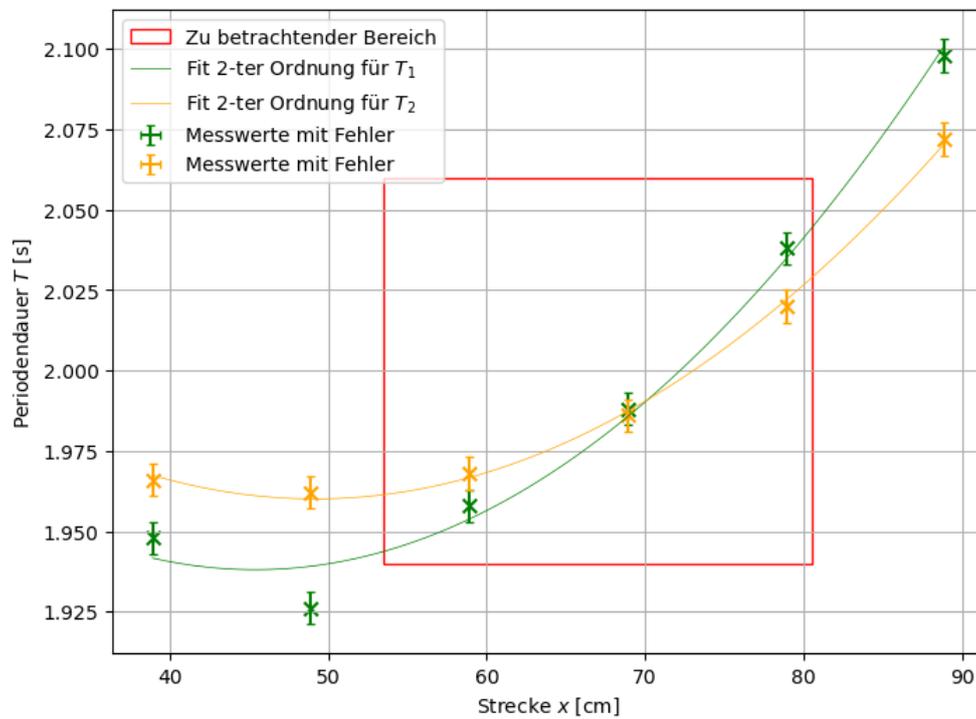


Abbildung 4:  $T$ - $x$  Diagramm mit Fehlerbalken (Grobe Annäherung an  $x^*$ )

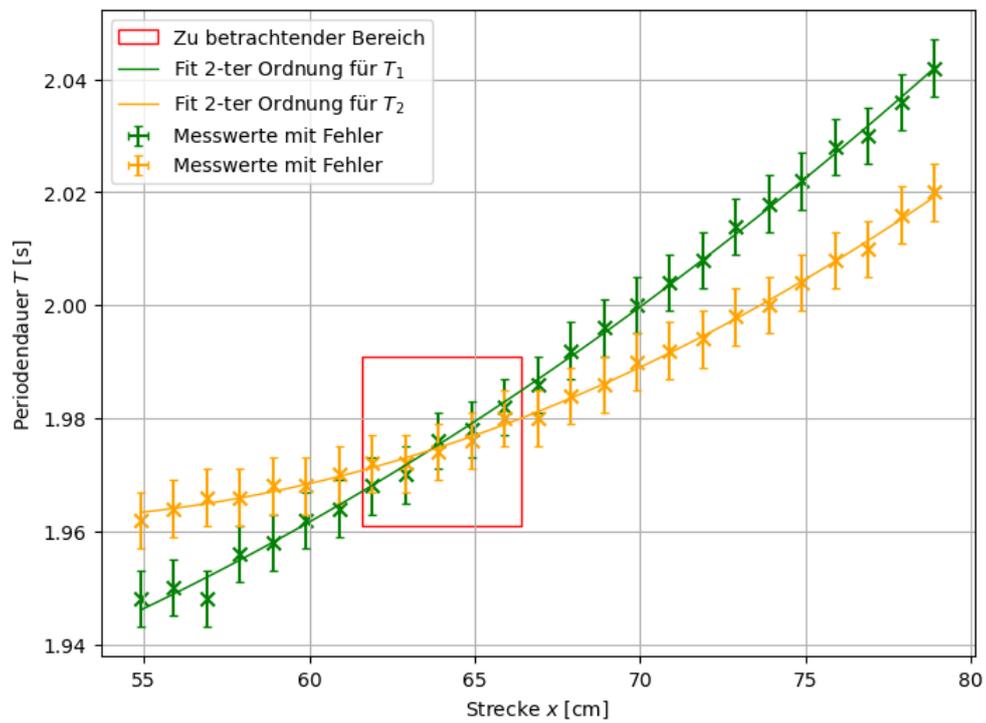


Abbildung 5:  $T$ - $x$  Diagramm mit Fehlerbalken (Etwas genauerer Bereich um  $T^*$  zu bestimmen)

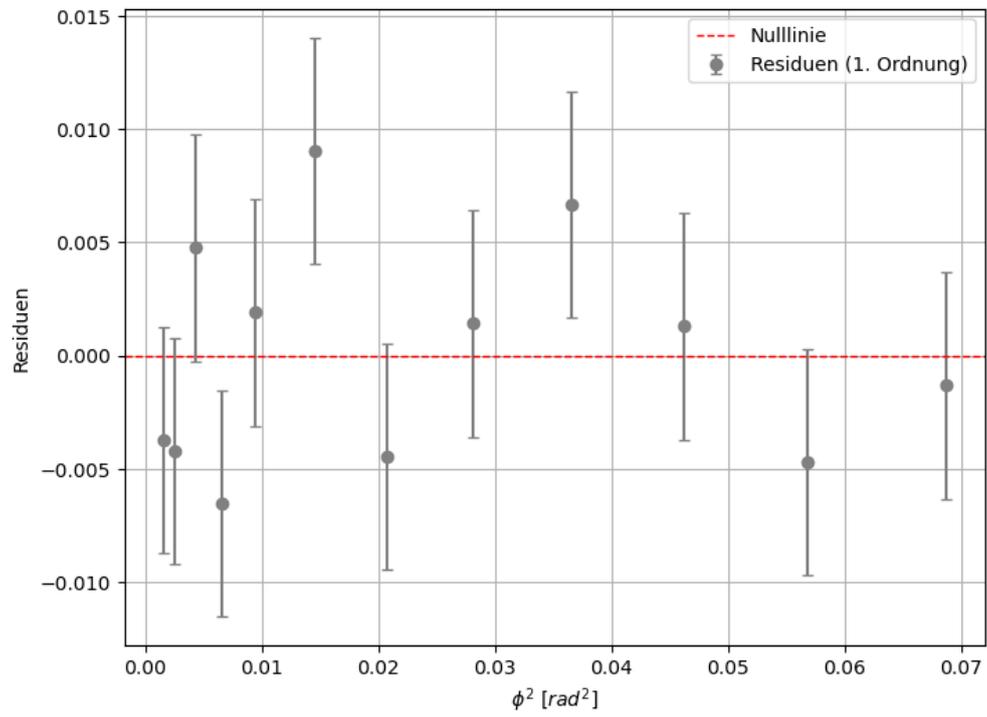


Abbildung 6: Residuenplots zur Bewertung unserer Ausgleichsgerade in Abb. 3

6.3 Laborheft

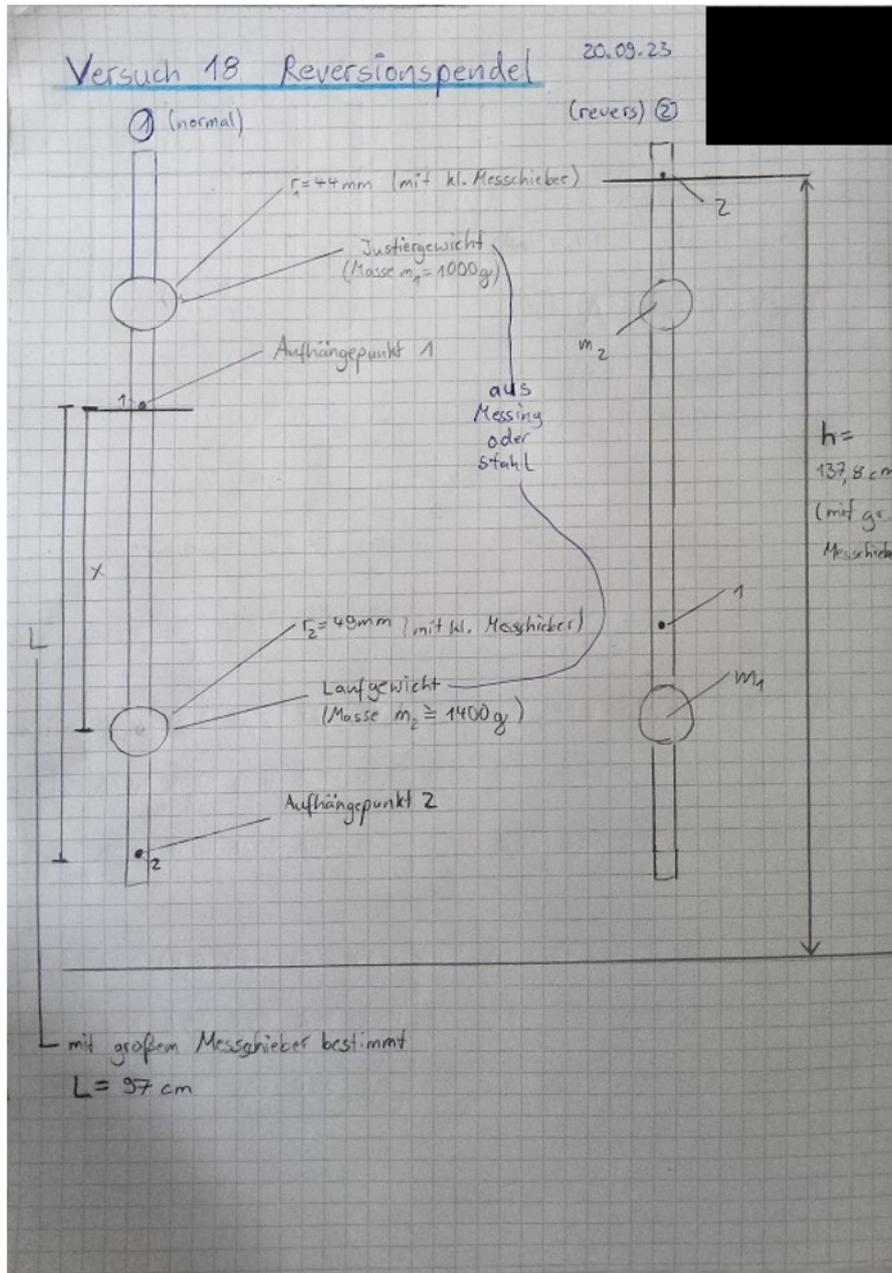


Abbildung 7: Laborheft Seite 1

$x$ [cm]	88,9	78,9	68,9	58,9	48,9	38,9				
$\bar{T}_1$ [s]	10,09	9,84	9,53	9,35	9,16	9,06				
$\bar{T}_2$ [s]	10,10	9,85	9,68	9,60	9,57	9,60				

• Wir messen jeweils 10 Durchläufe, also 5 Periodendauern  
 • Auslenkung wird immer gleich gewählt:  
 Unsicherheit der Auslenkung:  
 • Die Unsicherheit von  $x$  ist:  $\Delta x = \cancel{0,1} 0,1$  cm  
 (bisher messen wir ~~mit Augenmaß~~ einmalig  $x$  und verschieben den Abstand  $x$  mithilfe der am Pendel aufgezeichneten Skala)

$\Rightarrow$  Wir haben festgestellt, dass unser Bereich in dem  $T^*$  liegt am Rand des Messbereiches ist.  
 Dies ist nicht gut, da wir so evtl. den Wert für  $T^*$  gar nicht messen können und er außerhalb des Messbereiches liegt

$\Rightarrow$  wir entscheiden uns die Position des Justiergewichts um 10 cm weiter nach außen (von Aufhängepunkt) zu verschieben

Die neuen Messwerte sind auf der nächsten Seite:

Abbildung 8: Laborheft Seite 2

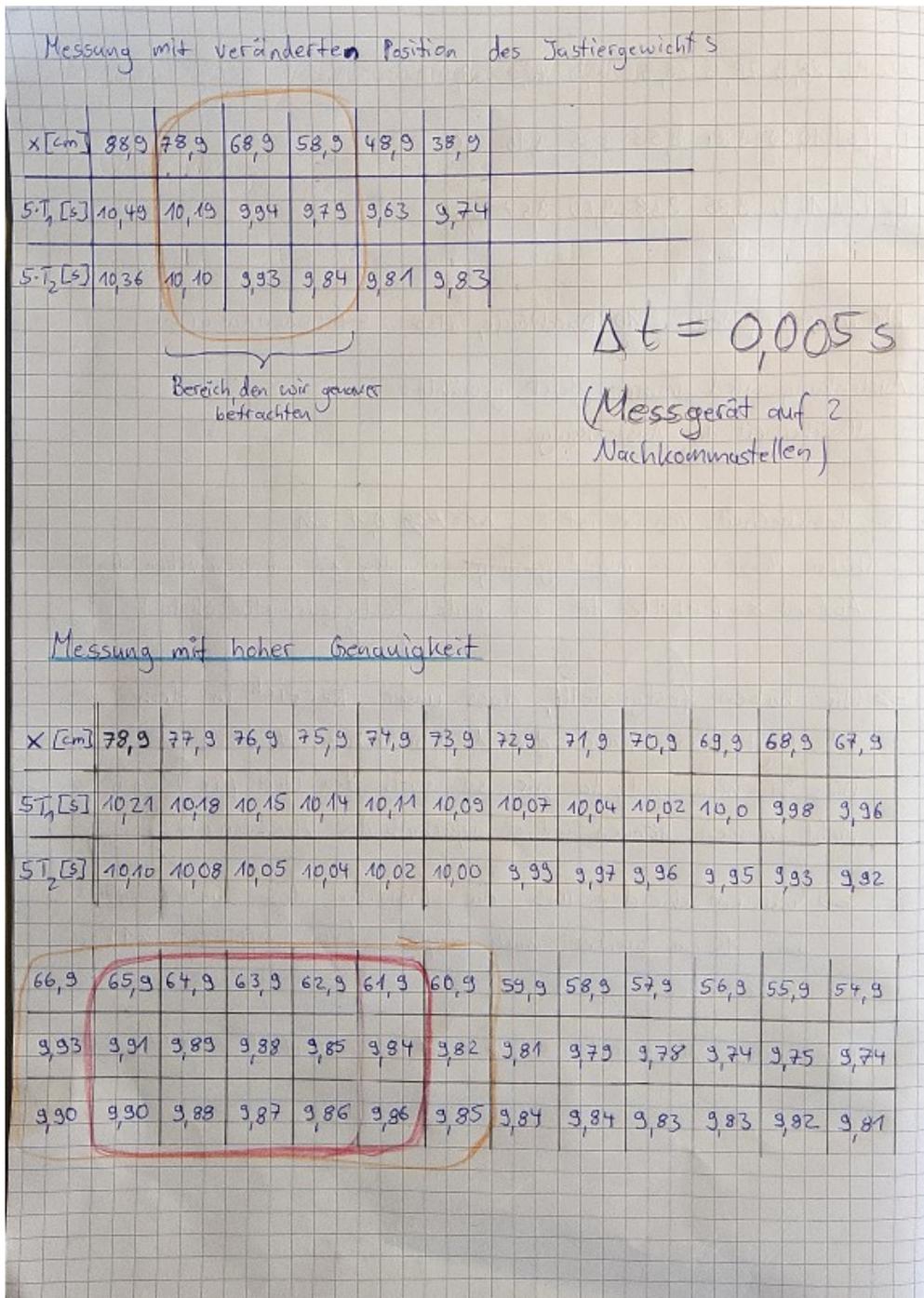


Abbildung 9: Laborheft Seite 3

Noch (auf 0,5cm genau) bzw. teilweise 0,25cm genau  
 ↓ Feinere Messungen zwischen 65,9 cm und 67,9 cm

$x$ [cm]	65,9	65,4	64,9	64,65	64,4	64,15	63,9	63,4	62,9	62,4	61,9
$s_1$ [s]	9,91	9,90	9,89	9,88	9,88	9,88	9,87	9,87	9,85	9,85	9,84
$s_2$ [s]	9,90	9,89	9,88	9,88	9,88	9,88	9,87	9,87	9,86	9,86	9,86

}

Zusammenhang Schwingungsdauer Amplitude

Einstellen Pendel auf normal (1)

$b$ [cm]	12,3	15,3	18,3	21,3	24,3	27,3	30,3	33,3
$T$ [s]	9,84	9,85	9,84	9,85	9,86	9,86	9,86	9,87

10,3	8,3	6,3	5,3	5,0
9,83	9,84	9,83	9,83	9,83

Light barrier  
 Auslenkung  
 b messen wir mit Geodreieck

Abbildung 10: Laborheft Seite 4

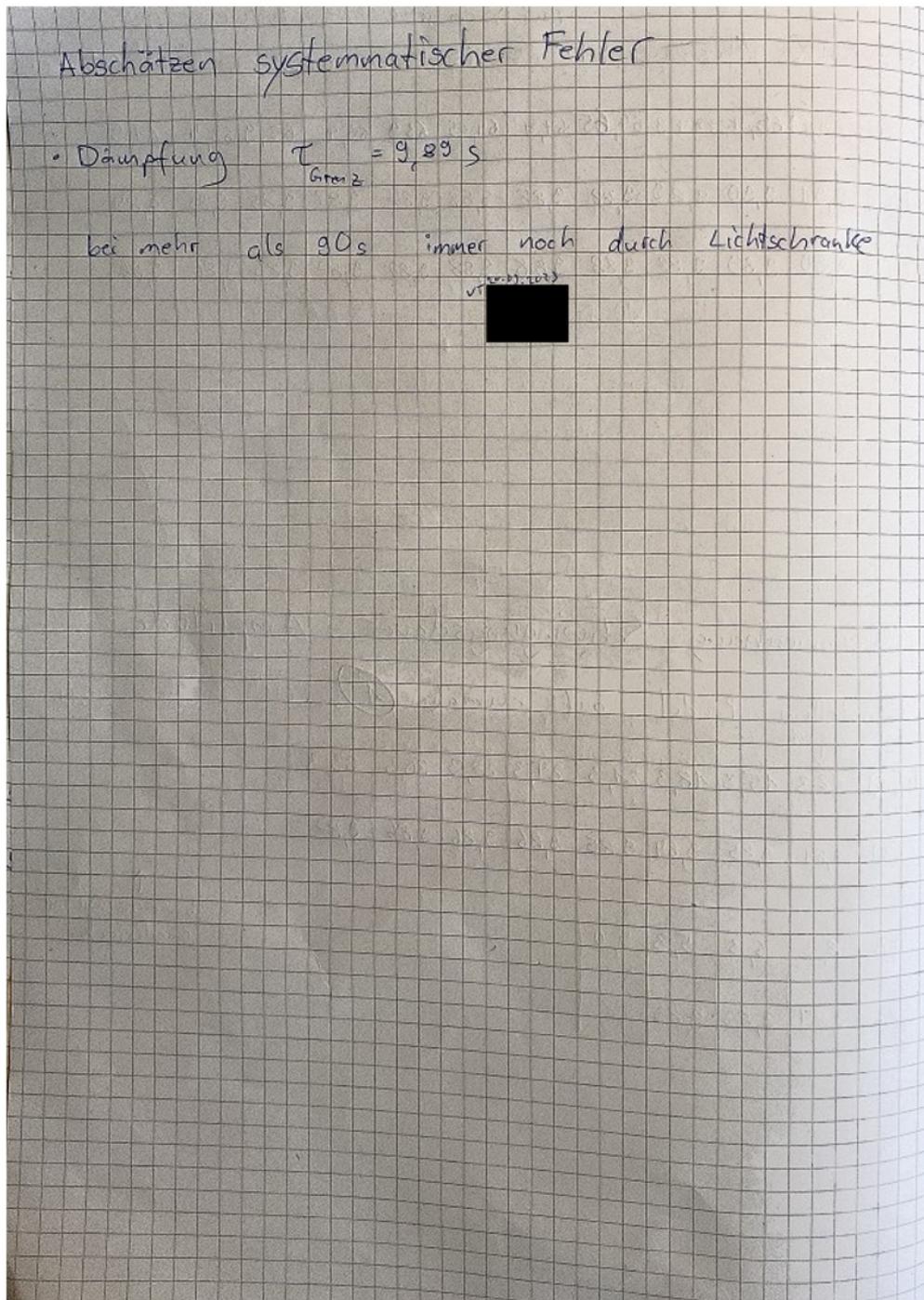


Abbildung 11: Laborheft Seite 5

## 6.4 Verzeichnisse

### Tabellenverzeichnis

1	Messungen für die grobe Einstellung . . . . .	3
2	$t_1(x)$ und $t_2(x)$ (Markierte Werte $x^*$ wo $t_1 = t_2$ ) . . . . .	11
3	$t$ (für 10 Durchläufe) und $\phi^2$ für verschiedene $b$ . . . . .	12

### Abbildungsverzeichnis

1	Versuchsaufbau . . . . .	1
2	$T$ - $x$ Diagramm mit feinsten Messwerten zur Bestimmung von $T^*$ mit Fehlerbalken . . . . .	4
3	Schwingungsdauer $T$ in Abhängigkeit von $\Phi^2$ mit Fehlerbalken . . . . .	7
4	$T$ - $x$ Diagramm mit Fehlerbalken (Grobe Annäherung an $x^*$ ) . . . . .	13
5	$T$ - $x$ Diagramm mit Fehlerbalken (Etwas genauerer Bereich um $T^*$ zu bestimmen) . . . . .	14
6	Residuenplots zur Bewertung unserer Ausgleichsgerade in Abb. 3 . . . . .	15
7	Laborheft Seite 1 . . . . .	16
8	Laborheft Seite 2 . . . . .	17
9	Laborheft Seite 3 . . . . .	18
10	Laborheft Seite 4 . . . . .	19
11	Laborheft Seite 5 . . . . .	20

### Literatur

- [Che23] Chemie.de. „Messing“. In: <https://www.chemie.de/lexikon/Messing.html> (2023).
- [Fre23a] Uni Freiburg. „Versuch-18“. In: <https://omnibus.uni-freiburg.de/phypra/ap/18/> (2023).
- [Fre23b] Freiburg<sub>imNetz</sub>.de. „Stadtgeographie“. In: <https://www.freiburg-im-netz.de/stadtinfo/48.Breitengrad> (2023).
- [Joh21] Alex und Johannes. „Versuch-18-Reversionspendel“. In: <https://www.youtube.com/watch?v=acJ0-DkP3bw> (2021).
- [Sch21] Roman Schwartz. „Das europäische Gravitationszonenkonzept nach WEL-MEC für eichpflichtige Waagen“. In: [https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung1/1.1\\_masse/1.15\\_gravzonen.pdf](https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung1/1.1_masse/1.15_gravzonen.pdf) (2021).

- [Wet23] Deutscher Wetterdienst. „Wetter und KLimalexikon- Luftdichte“. In: *https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?l3=60774&l2=101518* (2023).
- [Wik23] Wikipedia-Kommunity. „Freiburg im Breisgau“. In: *https://de.wikipedia.org/wiki/Freiburg;inBreisgau* (2023).