

Anforderungen an die schriftliche Auswertung eines Praktikumsversuchs im Anfängerpraktikum

Das Physikalische Anfängerpraktikum ist ein wesentlicher Bestandteil des Physikstudiums an der Universität Heidelberg. Die Hauptziele der Praktika sind:

1. Die Studierenden entwickeln grundlegende experimentelle Fähigkeiten und Sicherheit im Umgang mit einfachen Apparaturen und Messinstrumenten.
2. Das Erlernen von Messmethoden und die Fähigkeit Fehlerquellen zu erkennen und Messfehler abzuschätzen.
3. Die Studierenden erlernen das Führen eines Protokolls, die Auswertung der gesammelten Daten und die kritische Einschätzung der Resultate Ihres Experimentierens.

Zu diesem Zweck enthält das Praktikum Versuche mit überschaubarer Theorie und einfachen Messapparaturen, deren Funktionsweisen leicht einzusehen sind. Natürlich ist damit nicht die Messgenauigkeit aufwendiger Apparaturen, wie sie in der Forschung verwendet werden, erreichbar. Das Ziel des Praktikums sind weniger präzise Ergebnisse, sondern Sie sollen lernen, die Einflüsse, die die Messgenauigkeit begrenzen, zu erkennen und einzuschätzen.

Ein sehr wichtiges Ziel stellt Punkt 3 da: Das Führen eines Protokolls und die Auswertung und Präsentation der Ergebnisse. Ein Protokoll bzw. die Ausarbeitung ist eine dokumentarische Darstellung des gesamten Versuchsablaufs:

- Versuchsaufbau
- Versuchsdurchführung
- Erfassung und Auswertung von Messdaten
- Diskussion der Ergebnisse.

Die Qualität der bei einem Praktikumsversuch erzielten Ergebnisse hängt nicht nur vom Messverfahren und der Genauigkeit der Messgeräte ab, sondern auch vom exakten experimentellen Arbeiten und der korrekten Protokollführung.

Die Ausarbeitung muss so angefertigt werden, dass sie selbsterklärend ist. Sie soll die Studenten zum einen in das Führen eines Laborbuches einführen und zum anderen sollen die Grundlagen des wissenschaftlichen Publizierens vermittelt werden.

Jeder Student muss zu jedem Praktikumsversuch eine eigenformulierte, handschriftliche Ausarbeitung anfertigen. Die Berichte müssen bestimmten inhaltlichen und äußerlichen Anforderungen entsprechen die im Folgenden dargelegt werden.

Protokollierung der Messdaten

- Die schriftliche Aufzeichnung von Messdaten stellt ein Dokument da. Verwenden Sie keinen Bleistift sondern Kugelschreiber oder Tinte.
- Die Messdaten können direkt in das Ausarbeitungsheft oder auf einem separaten Papier aufgeschrieben werden welches später in die Ausarbeitung fest eingebunden wird (einheften oder einkleben).
- Es sind keine „Schmierzettel“ erlaubt um Daten später in „Schönschrift“ zu übertragen. Die Daten müssen unmittelbar, leserlich und ausreichend dokumentiert aufgezeichnet werden.
- Nach Beendigung der Messungen muss das fertige Messprotokoll vom Tutor vortestiert d.h. unterschrieben werden. Das abgezeichnete Messprotokoll darf danach nicht mehr verändert werden.
- Es ist ausreichend wenn ein Student das Messprotokoll führt, während der Partner die Ablesung der Messwerte übernimmt. Der Partner kann nach Beendigung der Messung das unterschriebene Protokoll fotokopieren und in seine Ausarbeitung fest einbinden.
- Im Kopf des Messprotokolls müssen das Datum, der Versuchsname und die Namen der Studenten stehen.
- Notieren Sie die verwendeten Messgeräte (Hersteller und Typ).
- Die Messwerte müssen kommentiert werden. Verweisen Sie nicht einfach nur auf die Nummerierungen der Aufgaben laut Praktikumsskript, sondern beschreiben Sie was die Messwerte darstellen und wie Sie gemessen wurden.
- Bei vermutlichen Fehlmessungen dürfen die Messwerte nicht unwiderruflich gelöscht werden. Streichen Sie die Werte so durch, dass diese noch lesbar sind und kommentieren Sie, warum Sie vermuten, dass die Werte falsch bestimmt wurden.
- Notieren Sie die Messwerte exakt so wie sie diese ablesen. Das alleinige Notieren von Berechnungen die mit den Rohdaten durchgeführt wurden, ist nicht zulässig.
- Notieren Sie die Genauigkeit der Messgeräte gemäß den ausliegenden Gerätebeschreibungen. Sind diese nicht vorhanden, versuchen Sie diese abzuschätzen z.B. bei Analoginstrumenten aus der Skalenteilung. Falls dies nicht möglich kommentieren Sie dies in Ihrem Messprotokoll. Geben Sie die Fehler eindeutig an. Notieren Sie nicht einfach z.B. $\pm 50 \text{ mV}$, sondern geben Sie an: *„Gemäß der Gerätebeschreibung des Herstellers beträgt die Genauigkeit $\pm 2\%$ vom Messwert + 3 Digit“*.
- Vergessen Sie nicht eventuelle zusätzliche Messgrößen wie Zimmertemperatur oder Luftdruck zu protokollieren. Häufig kann es sinnvoll sein solche Größen zu Beginn und am Ende des Versuchs zu messen. Z.B. könnte die Zimmertemperatur während des Versuchs gestiegen sein. Notieren Sie in diesem Fall auch die Uhrzeit bei der die Messung durchgeführt wurde.

Das folgende Messprotokoll zeigt ein mangelhaftes Beispiel des Einführungsversuchs „Bestimmung der Erdbeschleunigung g mit einem Federpendel“.

Max Mustermann, Tina Musterfrau

1

Messung von g 2

3

1. 4

$T[s]: 8,37 / 8,58 / 8,47 / 8,72 / 8,48 / 8,45 / 8,68 / ~~8,68~~ / 8,51 / 8,33 / 8,55$ 5

$\bar{T} = 1,704$, $\Delta_{\bar{T}} = 0,008$

6

7

$T[s]: 8,57 / 8,47 / 8,53 / 8,63 / 8,57 / 8,52 / 8,53 / 8,5 / 8,53 / 8,58$

$\bar{T} = 1,709$, $\Delta_{\bar{T}} = 0,003$

8

2.

Messprinzip wie zweite Messung in 1. 9

50g: $T[s]: 5,13 / 5,08 / 5,16$

100g: $6,49 / 6,53 / 6,59$ 10

150g: $7,69 / 7,66 / 7,61$

200g: in 1. gemessen 11

250g: $9,32 / 9,38 / 9,46$

3.

12

0g: 848mm / 50g: 673mm / 100g: 516mm / 150g: 370mm / 200g: 213mm / 250g: 46mm

Genauigkeit 3mm 13

14

1. Datum fehlt.
2. Überschrift ist nicht aussagekräftig. „g“ deutet zwar auf die Erdbeschleunigung hin, es könnte sich aber auch um eine andere Größe handeln. Schreiben Sie besser „Bestimmung der Erdbeschleunigung g“ oder noch besser „Bestimmung der Erdbeschleunigung g mit einem Federpendel“.
3. Geräteliste fehlt.
4. Es ist völlig unklar was hier gemessen wurde. Wie unterscheiden sich die beiden Messreihen? Nicht einfach die Nummerierung der Aufgabenstellung der Praktikumsanleitung übernehmen, sondern die Messwerte kommentieren. Was wurde wie gemessen! Messwerte sollten zur besseren Übersicht in Tabellen eingetragen werden. Jede Tabelle muss nummeriert werden und ist mit einer Überschrift zu versehen.
5. Falschmessungen dürfen nicht unkenntlich gemacht werden. Streichen Sie die Werte so, dass sie noch lesbar sind und kommentieren Sie warum Sie diese Werte verwerfen.
6. Es ist nicht klar was diese Werte bedeuten. \bar{T} impliziert zwar einen Mittelwert, aber ein Ergebnis von 1,704 s ist völlig inkompatibel mit den notierten Messwerten. Definieren Sie solche Größen und beschreiben Sie wie diese berechnet wurden.
7. Einheiten fehlen.
8. Messwerte exakt so notieren wie Sie diese ablesen. Physikalisch ist es ein Unterschied ob Sie eine Zeit von 8,5 s oder von 8,50 s gemessen haben. Letzterer Wert enthält die Information, dass Sie eine Zeitmessung mit einer Auflösung von besser als 1/10 Sekunde durchgeführt haben.
9. Diese Aussage ist sinnlos da das Messprinzip nie erklärt wurde.
10. Völlig unübersichtliche Darstellung der Messwerte. Was bedeuten die Gewichte? Einheiten fehlen!
11. Verweis auf Aufgabe 1. Es ist völlig unklar wie das Gewicht 200g in Messung 1 eingeht.
12. Was bedeutet ein Gewicht von 0g.
13. Wie kommt diese Genauigkeit zu Stande? Die Messwerte konnten mit einer Auflösung von 1mm bestimmt werden. Warum ist die Genauigkeit dreimal so hoch?
14. Das Protokoll wurde nicht vom Tutor abgezeichnet. Das Messprotokoll wird in diesem Fall nicht akzeptiert.

Das folgende Beispiel zeigt ein Messprotokoll bei dem diese Kritikpunkte nicht vorhanden sind.

Bestimmung der Erdbeschleunigung g mit einem Federpendel

Geräte:

Spiralfeder montiert an einem Stativ

Maßstab 1000mm, Skalenteilung 1mm

5 Gewichte je 50g

Handstoppuhr, Ablesegenauigkeit 0,01s

Aufgabe 1: Messung der SchwingungsdauerDie Feder wird mit einer Masse von $m=200g$ belastet.

Es werden zwei Messreihen durchgeführt. Bei der Messreihe in Tabelle 1 erfolgt das Starten und Stoppen der Uhr bei der Maximalauslenkung, bei der Messreihe in Tabelle 2 im

Nulldurchgang. Die Messungen werden zehnmals durchgeführt

Tabelle 1: Messung der Periodendauer. Start/Stop bei der Maximalauslenkung

lfd. Nr.	Anzahl der Schwingungen	Zeit [s]
1	5	8,37
2	5	8,58
3	5	8,47
4	5	8,72
5	5	8,48
6	5	8,45
7	5	8,68
8	5	10,31
9	5	8,33
10	5	8,55
8'	5	8,51

Bei Messung 8 wurden vermutlich 6 statt 5 Schwingungen gemessen. Die Messung wurde daher verworfen und nochmals durchgeführt (Messung 8').

Mit Hilfe der Statistikfunktion des Taschenrechners wurde der Mittelwert \bar{T} , die Standardabweichung σ und der Fehler des Mittelwerts $\sigma_{\bar{T}}$ berechnet und auf eine Periode umgerechnet:

$$\bar{T} = 1,703 \text{ s}, \Delta T = 0,025 \text{ s}, \Delta \bar{T} = 0,008 \text{ s}$$

Tabelle 2 : Messung der Periodendauer. Start/Stopp im Nulldurchgang

lfd. Nr.	Anzahl der Schwingungen	Zeit [s]
1	5	8,57
2	5	8,47
3	5	8,53
4	5	8,63
5	5	8,57
6	5	8,52
7	5	8,53
8	5	8,50
9	5	8,53
10	5	8,58

$$\bar{T} = 1,709 \text{ s} , \Delta T = 0,009 \text{ s} , \Delta \bar{T} = 0,003 \text{ s}$$

Die Messung in Tabelle 2 erweist sich als genauer als die Messung in Tabelle 1. Im Folgenden werden daher alle Zeitmessungen im Nulldurchgang gestartet und gestoppt.

Aufgabe 2: Messung der Schwingungsdauer als Funktion der Masse

Die Feder wird mit unterschiedlichen Massen m beschwert und die Dauer von 5 Schwingungen gemessen. Die Messung wird für jede Masse dreimal durchgeführt. Die Messung mit $m=200\text{g}$ wurde bereits in Aufgabe 1 durchgeführt und kann aus Tabelle 2 übernommen werden.

Tabelle 3 : Schwingungsdauer von 5 Schwingungen als Funktion der Masse

Masse [g]	Zeit [s]
50	5,13 / 5,08 / 5,16
100	6,49 / 6,53 / 6,59
150	7,69 / 7,66 / 7,61
200	diese Werte wurden bereits in Tabelle 2 bestimmt
250	9,32 / 9,38 / 9,46

Aufgabe 3: Messung der Auslenkung als Funktion der Masse

Die Feder wird mit unterschiedlichen Gewichten belastet und die Auslenkung x gemessen. Die Genauigkeit ergibt sich aus der Skalenteilung des Maßstabs von 1mm. Da das Pendel während der Messung nicht ruhig war sondern leicht rotierte und schwankte, wird ein Fehler von 3mm abgeschätzt.

Tabelle 4 : Pendelauslenkung x als Funktion der Masse

Masse [g]	Auslenkung x [mm]
ohne Masse	848
50	673
100	516
150	370
200	213
250	46

Genauigkeit $\Delta x = 3\text{mm}$

Unterschrift Tutor

Ausarbeitung

Die Ausarbeitung muss handschriftlich in einem gebundenen Laborheft durchgeführt werden. Jeder Studierende sollte sich daher 4-5 Schulhefte besorgen die in den folgenden Praktika weiter benutzt werden können. Die Verwendung von Ringordnern ist nicht erlaubt. Die Ausarbeitung muss folgende Punkte enthalten:

1. **Versuchsprotokoll** mit den vortestierten Messdaten. Eine Ausarbeitung ohne die originalen Messdaten wird vom Tutor nicht akzeptiert. Im Praktikum 2 werden teilweise Messdaten mit einem Computer aufgezeichnet. Drucken Sie diese aus und lassen Sie diese vom Tutor abzeichnen.
2. **Einleitung**
 - 2.1. Motivation. Was sind die Ziele des Versuchs. Was wird wie gemessen.
 - 2.2. Knappe aber vollständige Angaben über das Messverfahren, soweit dies nicht völlig selbstverständlich ist.
 - 2.3. Kurze und knappe Darstellung der Physik:
Formulierung der theoretischen Grundlagen, Begriffe und Gesetze die zum Verständnis des Versuchs erforderlich sind.
 - 2.4. Skizze und Beschreibung der Versuchsanordnung (schematisch, Schaltplan bei elektrischen Schaltungen).
 - 2.5. Alle Abkürzungen die in den Formeln vorkommen, müssen erklärt werden, evtl. mit Hilfe der Skizze der Apparatur. Formeln sind fortlaufend zu nummerieren.
3. **Auswertung**
 - 3.1. Die Auswertung muss strukturiert sein. Versehen Sie Abschnitte mit Überschriften und kommentieren Sie mit einigen Sätzen was Sie genau machen.
 - 3.2. Bearbeitung der Aufgaben laut Praktikumsanleitung. Alle Berechnungen und Zwischenrechnungen müssen im Protokollheft ausgeführt werden. Im Praktikum 2 können Berechnungen auch elektronisch mit einer Tabellenkalkulation durchgeführt werden. In diesem Fall müssen Sie genau erklären wie die Berechnung durchgeführt wurde (Formel angeben).
 - 3.3. Präsentation der Messergebnisse in Form von Tabellen und Diagrammen.
Diagramme müssen im Praktikum 1 von Hand angefertigt werden. Netzpapiere liegen bei den Versuchen aus bzw. sind im Assistentenraum erhältlich. Im Praktikum 2 können Diagramme und Tabellen elektronisch erstellt werden. Diese sind auszudrucken und in das Heft einzukleben.
Alle Tabellen und Diagramme benötigen eine aussagekräftige Überschrift und müssen nummeriert werden. Die Achsen müssen klar und ausreichend beschriftet sein. Befinden sich mehrere Datensätze in einem Diagramm, so müssen diese mit einer Legende definiert werden.
Bei linearen Funktionen ist eine Ausgleichs- und Fehlergerade einzuzeichnen. Hierfür ist im Praktikum 1 „Augenmaß“ ausreichend. Für die Fehlergerade ist eine Min/Max- Abschätzung zulässig. Im Praktikum 2 sollen Sie Funktionen an die Daten anpassen (Funktion fitten).

- 3.4. Auf Diagramme und Tabellen muss im Text verwiesen werden. Versuchen Sie daher Diagramme und Tabellen an den Stellen einzubinden, bei denen auf diese verwiesen wird.
- 3.5. Präsentation der Messdaten mit Fehlerangabe. Endergebnisse gesondert kennzeichnen (einrahmen oder unterstreichen).
- 3.6. Sinnvolle Angabe von Nachkommastellen.

4. Zusammenfassung und Diskussion

- 4.1. Fassen Sie den Versuch zusammen und stellen Sie die wesentlichen Ergebnisse des Versuchs heraus.
- 4.2. Interpretation der Ergebnisse. Was bedeuten sie physikalisch.
- 4.3. Vergleich mit Literaturwerten/Erwartung, Diskussion signifikanter Abweichungen. Gehen Sie eventuell auf systematische Fehler ein. Diskrepanzen, Abweichungen von der Erwartung etc. müssen angemessen im Text diskutiert werden. Geben Sie grundsätzlich quantitative Angaben an. Aussagen wie „unser Messwert stimmt ganz gut mit dem Literaturwert überein“ sind sinnlos. Schreiben Sie genau wie weit ihr Messwert abweicht, z.B. „der Messwert weicht um $1,5\sigma$ vom Literaturwert ab“. Sollte Ihr Ergebnis weit von den Erwartungen oder von einem Literaturwert abweichen (z.B. Abweichung um mehr als 3σ), dann muss hierfür eine (systematische) Ursache vorliegen. Schreiben Sie nicht einfach „die Messinstrumente waren zu schlecht“ oder die „grafische Darstellung mit einem Computer wäre viel genauer“, sondern überlegen Sie sich wo die Ursachen für diese Abweichungen liegen. Eventuell haben Sie auch die Fehler falsch abgeschätzt.
- 4.4. Kritische Kommentare zum Versuchsaufbau und zur Durchführung. Sehen Sie Möglichkeiten das Experiment zu verbessern?

Bestimmung der Erdbeschleunigung g mit einem Federpendel

Mit einem Federpendel wird die Erdbeschleunigung g bestimmt.

Aufgaben:

1. Untersuchung der Messgenauigkeit bei unterschiedlichen Start-/Stopppunkten.
2. Bestimmung der Federkonstante durch Messung der Periodendauer als Funktion der angehängten Masse.
3. Bestimmung der Erdbeschleunigung durch Messung der Pendelauslenkung als Funktion der angehängten Masse.

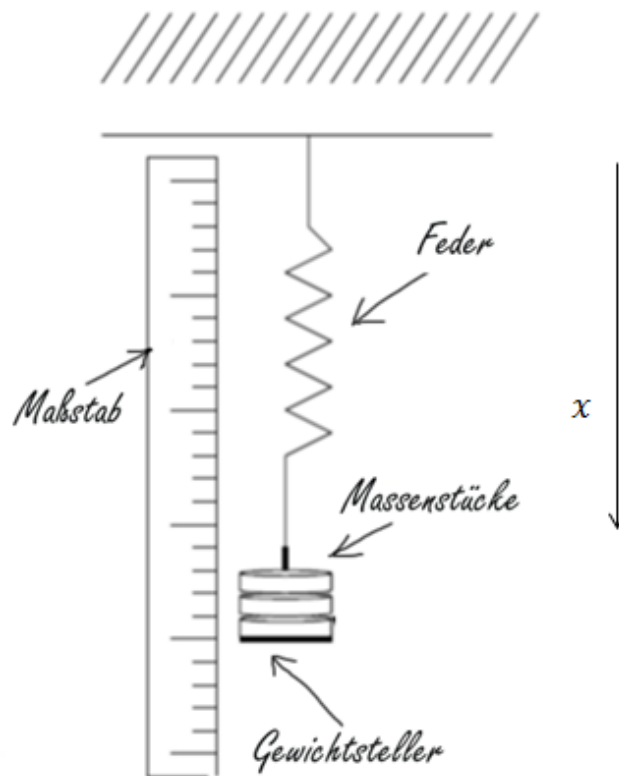


Abbildung 1. Versuchsaufbau

Grundlagen

Die Differentialgleichung für ein ideales Federpendel lautet:

$$m\ddot{x} + Dx = 0, \quad (1)$$

wobei D die Federkonstante und m die angehängte Masse darstellen. Wird das Pendel zum Zeitpunkt $t=0$ um x_0 ausgelenkt, so lautet die Lösung der Differentialgleichung:

$$x(t) = x_0 \cos \omega t, \quad (2)$$

mit
$$\omega = \sqrt{\frac{D}{m}}. \quad (3)$$

Die Periodendauer T ist mit der Kreisfrequenz ω verbunden über

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (4)$$

Für die Periodendauer ergibt sich somit

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{D}}. \quad (5)$$

Durch Messung der Periodendauer bei bekannter Masse kann hieraus die Federkonstante bestimmt werden.

Wird eine Feder mit einer Masse m belastet, so gilt:

$$mg = Dx. \quad (6)$$

Da der Wert der Federkonstante durch Messung der Periodendauer T gemäß Gleichung (5) bestimmbar ist, kann aus Gleichung (6) die Erdbeschleunigung g bestimmt werden.

Auswertung

1. Untersuchung der Messgenauigkeit bei unterschiedlichen Start-/Stopppunkten

Der Gewichtsteller des Federpendels wurde mit einer Masse von 200g beschwert und die Schwingungsdauer auf zwei unterschiedliche Methoden bestimmt: Einmal wurde die Zeit gestoppt wenn das Pendel die Maximalauslenkung erreicht, bei der zweiten Methode wurde die Zeit beim

Nulldurchgang des Pendels genommen. Die Messergebnisse befinden sich in Tabelle 1 und 2 des Mehrprotokolls. In den folgenden Tabellen wurde die Zeit auf eine Periode umgerechnet und Mittelwert \bar{T} , Standardabweichung ΔT und der Fehler des Mittelwerts $\Delta \bar{T}$ berechnet.

Tabelle 5: Berechnung der Periodendauer. Start/Stopp bei der Maximalauslenkung

lfd. Nr.	Periode T/s	Mittelwert \bar{T}/s	$\Delta T/s$	$\Delta \bar{T}/s$
1	1,674	1,703	0,025	0,08
2	1,716			
3	1,694			
4	1,744			
5	1,696			
6	1,69			
7	1,736			
8	1,702			
9	1,666			
10	1,71			

Tabelle 6: Berechnung der Periodendauer. Start/Stopp beim Nulldurchgang

lfd. Nr.	Periode T/s	Mittelwert \bar{T}/s	$\Delta T/s$	$\Delta \bar{T}/s$
1	1,714	1,709	0,009	0,003
2	1,694			
3	1,706			
4	1,726			
5	1,714			
6	1,704			
7	1,706			
8	1,700			
9	1,706			
10	1,716			

Start und Stopp bei Maximalauslenkung: $T = (1,703 \pm 0,008)\text{s}$
 Start und Stopp beim Nulldurchgang: $T = (1,709 \pm 0,003)\text{s}$

Die Zeitmessung beim Durchgang durch die Nulllage ist präziser und wurde für die folgenden Messreihen verwendet.

Die Messwerte sind in Diagramm 1 histogrammiert. Hier ist gut zu erkennen, dass die Messwerte bei der Zeitmessung bei der Maximalauslenkung, stärker streuen als bei der Messung im Nulldurchgang. Da es sich bei den Messreihen um unabhängige Messungen handelt erwartet man, dass die Messwerte einer Gaußverteilung folgen. Unter Berücksichtigung der geringen Statistik der Messungen entsprechen die Histogramme dieser Erwartung.

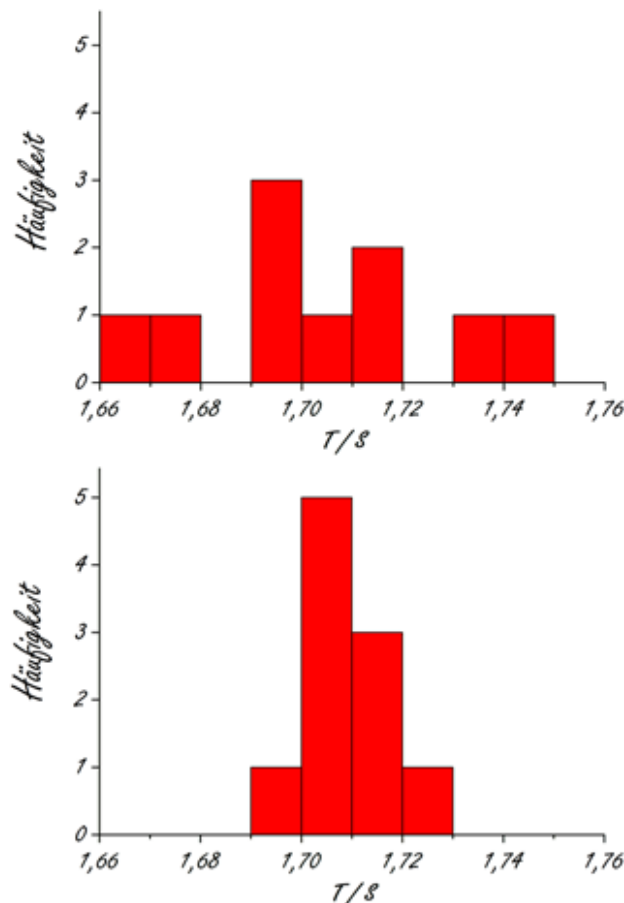


Diagramm 1: Verteilung der gemessenen Periodendauern. Oben: Start/Stopp bei der Maximalauslenkung. Unten: Start/Stopp im Nulldurchgang.

2. Bestimmung der Federkonstante

Die Federkonstante des Pendels kann aus der Messung der Schwingungsdauer in Abhängigkeit von der Masse bestimmt (Tabelle 3) werden. Durch umformen von Gleichung (5) zu

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{D} m \quad (7)$$

erkennt man, dass man bei Auftragen des Quadrats der Schwingungsdauer gegen die Masse einen linearen Zusammenhang erwartet. In Tabelle 7 werden die Periodendauern und dessen Quadrate mit den dazugehörigen Fehler berechnet. Die Fehler der Massen sind vernachlässigbar.

Tabelle 7: Quadrierte Periodendauer als Funktion der Masse

Masse [g]	Mittelwert \bar{T} /s	$\Delta\bar{T}$ /s	$(\bar{T})^2$ /s ²	$\Delta(\bar{T})^2$ /s ²
50	1,025	0,005	1,051	0,010
100	1,307	0,006	1,708	0,016
150	1,531	0,005	2,344	0,015
200	1,709	0,003	2,921	0,010
250	1,877	0,008	3,523	0,030

Der Fehler für das Quadrat der Schwingungsdauer ergibt sich aus dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz zu

$$\Delta(\bar{T})^2 = 2\bar{T}\Delta\bar{T}. \quad (8)$$

Hierbei ist $\Delta\bar{T}$ der Fehler in der Messung der Schwingungsdauer, der sich aus dem mittleren Fehler des Mittelwertes der Messungen aus Tabelle 3 ergibt.

Die Messwerte sind in Diagramm 2 dargestellt.

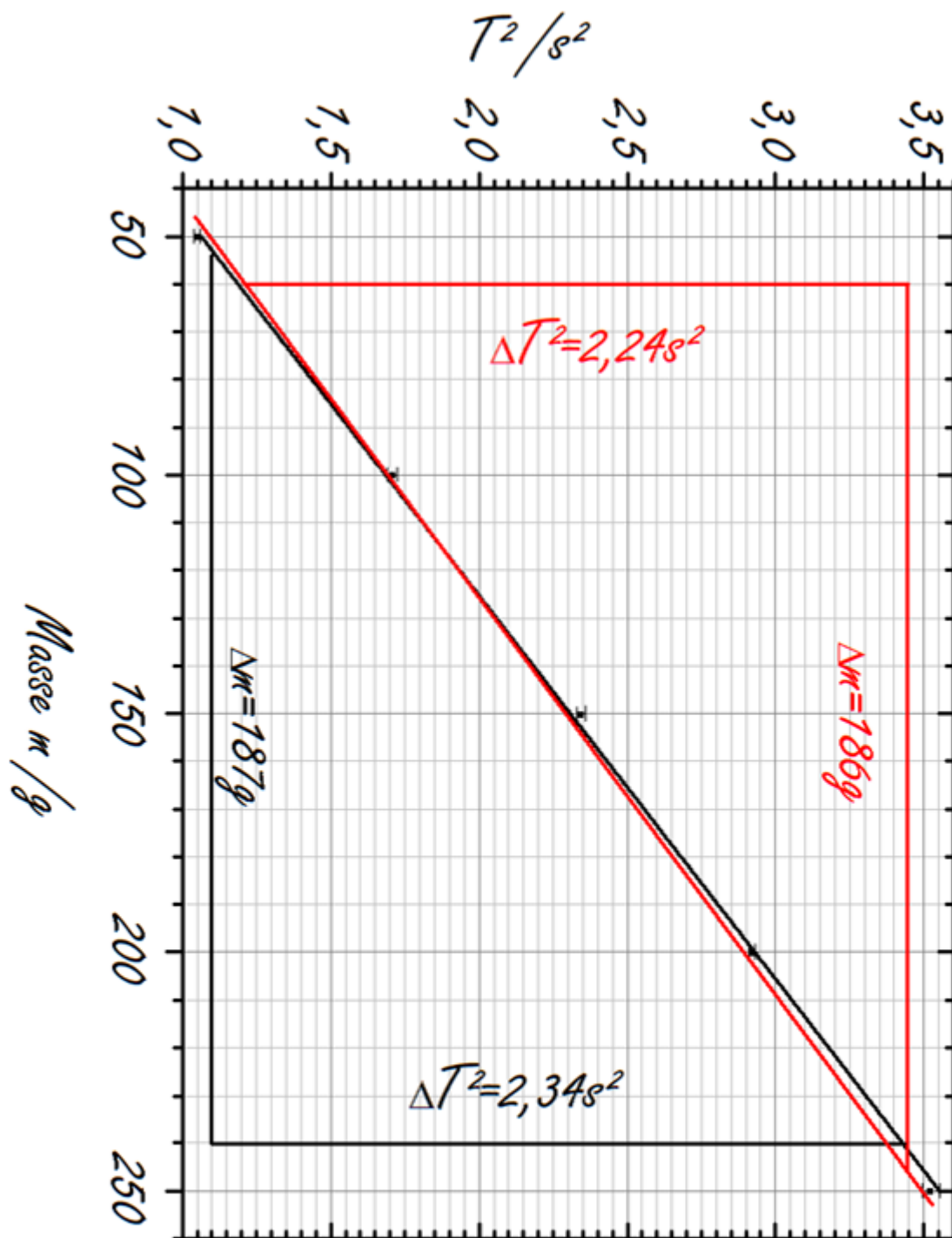


Diagramm 2: Quadrat der Periodendauer als Funktion der am Pendel angehängten Masse. Die schwarze Kurve stellt die Ausgleichsgerade dar, die rote Kurve die Fehlergerade.

Aus Diagramm 2 liest man den Wert für die Steigungen a der Ausgleichsgeraden und der Fehlergeraden ab:

$$a_{\text{Ausgleich}} = \frac{2,34 \text{ s}^2}{187 \text{ g}} = 12,51 \text{ s}^2/\text{kg}$$

$$a_{\text{Fehler}} = \frac{2,24 \text{ s}^2}{186 \text{ g}} = 12,90 \text{ s}^2/\text{kg}.$$

Für die Steigung ergibt sich schließlich:

$$a = (12,5 \pm 0,4) \text{ s}^2/\text{kg}.$$

Nach Gleichung (7) ist die Steigung a mit der Federkonstante D verknüpft durch:

$$a = \frac{4\pi^2}{D}. \quad (9)$$

Somit erhalten wir für die Federkonstante:

$$D = \frac{4\pi^2}{a_{\text{Ausgleich}}} = \frac{4\pi^2}{12,5} \text{ kg/s}^2 = 3,158 \text{ kg/s}^2, \quad (10)$$

und für den Fehler nach dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz:

$$\Delta D = \frac{4\pi^2}{a^2} \Delta a = 0,101 \text{ kg/s}^2. \quad (11)$$

3. Bestimmung der Erdbeschleunigung

Um die Erdbeschleunigung zu bestimmen werden die Messungen der Auslenkung gegen die Masse gegeneinander aufgetragen. Die Messwerte sind in Tabelle 4 aufgelistet. Diagramm 3 zeigt den linearen Zusammenhang zwischen den beiden Größen. Die Fehler der Massen werden wieder als vernachlässigbar angenommen.

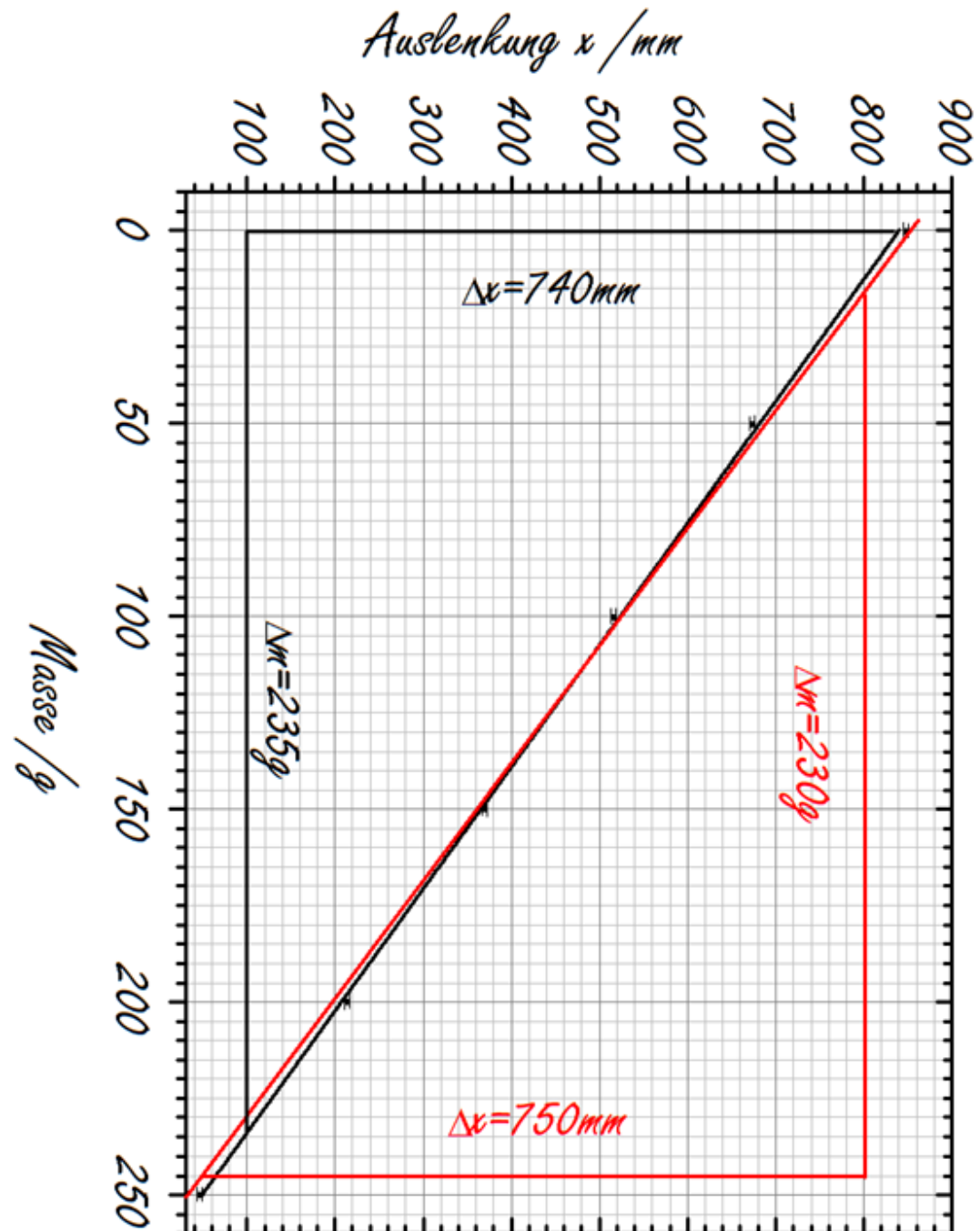


Diagramm 3: Auslenkung x als Funktion der am Pendel angehängten Masse. Die schwarze Kurve stellt die Ausgleichsgerade dar, die Rote Kurve die Fehlergerade.

Aus Diagramm 3 ergibt sich für die Steigungen a' der Ausgleichsgerade und der Fehlergerade:

$$a'_{\text{Ausgleich}} = \frac{740 \text{ mm}}{235 \text{ g}} = 3,149 \frac{\text{m}}{\text{kg}} \quad (12)$$

$$a'_{\text{Fehler}} = \frac{750 \text{ mm}}{230 \text{ g}} = 3,261 \frac{\text{m}}{\text{kg}} \quad (13)$$

und somit für den Fehler der Ausgleichsgerade

$$\Delta a' = 0,112 \text{ kg/s}^2. \quad (14)$$

Aus Gleichung (6) und den Werten aus (10) und (12) ergibt sich für die Erdbeschleunigung

$$g = D \frac{x}{m} = D a'_{\text{Ausgleich}} = 9,945 \text{ m/s}^2.$$

Bei der Bestimmung des Fehlers muss berücksichtigt werden, dass sowohl die Federkonstante, als auch die Steigung der Ausgleichsgeraden fehlerbehaftet sind. Der Messfehler für die Erdbeschleunigung berechnet sich daher nach dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz:

$$\frac{\Delta g}{g} = \sqrt{\left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a'}{a'}\right)^2} \rightarrow \Delta g = \sqrt{(a' \Delta D)^2 + (D \Delta a')^2} = 0,48 \text{ m/s}^2.$$

Bei der Berechnung wurden die Werte aus (10), (11), (12) und (14) eingesetzt.

Damit erhalten wir als Ergebnis für die Erdbeschleunigung g :

$$g = (9,95 \pm 0,48) \text{ m/s}^2.$$

Zusammenfassung und Diskussion

Mit Hilfe eines Federpendels wurde der Wert der Erdbeschleunigung g bestimmt. In einem Vorversuch wurden zunächst zwei unterschiedliche Methoden der Zeitmessung auf ihre Genauigkeit untersucht. Es stellte sich heraus, dass eine Zeitmessung bei der das Starten und Stoppen der Uhr im Nullpunkt der Pendelschwingung erfolgt, genauer ist als eine Zeitmessung

bei der die Uhr bei der Maximalauslenkung gestartet und gestoppt wird. Die beiden Messungen unterscheiden sich dadurch, dass die Geschwindigkeit der Pendelmasse im Nullpunkt maximal ist, im Umkehrpunkt aber Null ist. Die Verweildauer der Pendelmasse in der Umgebung des Umkehrpunkts ist daher größer als in einem entsprechenden Bereich um den Nullpunkt. Das Auslösen der Uhr beim Start- und Stopppunkt ist somit bei der Nulllage zeitlich genauer definiert.

In einer weiteren Messreihe wurde die Periodendauer als Funktion der angehängten Masse gemessen und hieraus die Federkonstante berechnet.

Schließlich wurde die Auslenkung des Pendels als Funktion der Masse gemessen. Aus dieser Messreihe und mit dem zuvor berechneten Wert der Federkonstante, wurde die Erdbeschleunigung bestimmt.

Die Erdbeschleunigung wurde zu $g = 9,95 \text{ m/s}^2$ mit einer Messgenauigkeit von 5% bestimmt. Die Abweichung vom Literaturwert $g = (9,80984 \pm 2 \times 10^{-5}) \text{ m/s}^2$ (Quelle: Praktikumsanleitung Versuch 14) beträgt $0,3\sigma$.

Eine Verbesserung der Präzision in der Messgenauigkeit ist möglich durch eine Verbesserung der Messung der Schwingungsdauer des Federpendels. Dies kann einfach erreicht werden, indem entweder mehr Messungen der Schwingungsdauer durchgeführt werden, oder bei jeder Messung mehr Schwingungen ausgezählt werden. Des Weiteren kann die Genauigkeit der Messung der Pendelauslenkung erhöht werden. Bei der Ablesung der Auslenkung muss abgewartet werden bis sich die Pendelmasse in Ruhe befindet. Schwingungen sind zu vermeiden.

Benotung

Die Ausarbeitung muss folgende Abschnitte enthalten:

- Versuchsprotokoll (vom Tutor abgezeichnet)
- Einleitung
- Auswertung
- Zusammenfassung und Diskussion

Fehlt einer dieser Punkte, wird die Ausarbeitung zur Nacharbeit zurückgegeben. Die Note + kann dann nicht mehr vergeben werden. Falls das Versuchsprotokoll verloren gegangen ist und auch vom Partner nicht fotokopiert werden kann, muss der Versuch erneut durchgeführt werden.

Mängel werden mit Minuspunkten versehen.

Minuspunkt (Anzahl) gibt es für:

- Schlechte Strukturierung des Messprotokolls und der Ausarbeitung. Kapitel müssen mit Überschriften versehen werden und die Vorgehensweise muss kommentiert werden. **(1-3)**
- Unvollständige Einleitung. **(1-3)**
- Formeln müssen durchnummeriert und alle darin vorkommenden Größen definiert werden. Alle Formeln die bei der Auswertung benötigt werden, müssen in der Einleitung beschrieben werden (ausgenommen triviale Formeln). **(1-2)**
- Fehlen der Skizze des Versuchsaufbaus (ausgenommen triviale Aufbauten). **(1-2)**
- Alle Berechnungen müssen nachvollziehbar sein. Besonders wenn Berechnungen in Tabellen durchgeführt werden, muss angegeben werden wie diese zustande kamen. **(1-4)**
- Fehlen von Einheiten bei Ergebnissen, Tabellen und Diagrammen. **(1-2)**
- Unsinnige Angabe von Nachkommastellen im Endergebnis. Endergebnisse müssen hervorgehoben werden. **(1-2)**
- Fehlen von Überschriften bei Diagrammen, Abbildungen und Tabellen. Die Überschrift muss genau erklären was die jeweiligen Figuren beschreiben. **(1-3)**
- Fehlerhafte Diagramme. Fehlen von Achsenbeschriftungen, Einheiten, Legende, Fehlerbalken etc. Lassen sich die Fehlerbalken nicht einzeichnen, so muss dies genannt werden. Diagramme möglichst groß darstellen. Sinnvolle Skalierung der Achsen. Steigungsdreiecke möglichst über die gesamte Gerade legen. Punkte dürfen nicht direkt verbunden werden. Entweder eine Ausgleichs- und Fehlergerade einzeichnen oder im Praktikum 2 eine Funktion anfitten. Die Fitergebnisse müssen kommentiert werden. **(1-4)**
- Fehlerhafte Berechnungen. Falls etwas wirklich falsch berechnet/ausgewertet wurde, wird das Protokoll zurückgegeben. Die Note + kann nicht mehr vergeben werden. **(6)**

- Fehlen von Auswertungen die in der Anleitung gefordert sind. Das Protokoll wird zurückgegeben. Die Note + kann nicht mehr vergeben werden. **(6)**
- Mangelhafte Zusammenfassung/Diskussion. Nur den Versuch zusammenzufassen reicht nicht aus. Die wesentlichen Resultate müssen herausgestellt werden und mit Erwartungen bzw. Literaturwerten verglichen werden. Quantitative Angabe der Genauigkeit der Ergebnisse und Abweichungen. **(1-3)**
- Auch eine verspätete Abgabe der Auswertung kann mit Minuspunkten bewertet werden. Dies erfolgt durch die Praktikumsleitung.

Die Note + kann nur vergeben werden, wenn nicht mehr als 5 Minuspunkte vergeben wurden. Wird die Ausarbeitung zur Korrektur zurückgegeben, kann die Ausarbeitung nicht mehr mit + bewertet werden. Ab 15 Minuspunkte wird Auswertung mit – bewertet. Die Note ++ kann nur vergeben werden, wenn keine Minuspunkte vorliegen und die Ausarbeitung über die Anforderungen hinausgeht.