F3 FADENPENDEL als Heimversuch

Lernziele:
Es soll zu Hause ein Messaufbau eines Fadenpendels in Eigeninitiative realisiert werden. Dieser Messaufbau **kann** durch das theoretische Modell des „mathematischen Pendels“ **beschrieben werden**. In dieses Modell geht die Kleinwinkelnäherung ein; alleine hieraus ergeben sich Grenzen, in wie weit Ihre experimentell erzielten Messergebnisse durch die zugrundeliegenden theoretischen Vorhersagen beschrieben **werden können**. Abzuschätzen und zu erkennen, in wie weit das zugrundeliegende Modell die Messergebnisse beschreiben kann, ist Ziel des Versuches.
Neben der Entwicklung eines geeigneten Messaufbaus ist die geeignete Umgang von Messunsicherheiten ein weiteres Lernziel.
Ausgehend von den erhobenen Rohdaten und der Beschreibung Ihres Versuchsaufbaus erlernen sie ein schlüssiges Protokoll, in dem Sie ihre erzielten Ergebnisse präsentieren, zu erstellen. Als Endergebnis werden Sie eine experimentelle Bestimmung der Erdbeschleunigung erhalten.

PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

Wichtige physikalische Grundbegriffe: *Massenpunktmodell, mathematisches und physikalisches Pendel, Bewegungsgleichung, Schwerkraft, Newtonsche Axiome, Schwingungsdifferentialgleichung.*
Die einzelnen Rechenschritte dienen lediglich dem Verständnis aus physikalischer Sicht. Sie müssen diese mathematisch nicht „nachrechnen“ können. Ein grobes Nachvollziehen, woraus Gl. (7) resultiert, ist ausreichend. ***Dabei ist allerdings sehr entscheidend, welche „Rahmenbedingungen“ für Gl. (7) gelten: d.h. welche Näherungen gemacht werden.*** *Außerhalb dieser „Rahmenbedingungen“ kann das Modell nicht mehr hinreichend die „Wirklichkeit“ beschreiben.*

Ein an einem Faden aufgehängter Körper stellt aufgrund der auf ihn wirkenden Schwerkraft und seiner Trägheit ein schwingungsfähiges System dar.
In dem betrachteten **Modell** wird von einem punktförmigen Körper der Masse m, der an einem Faden der Länge l hängt, ausgegangen. Wird er um einen Winkel φ (Abb. 1) aus der Senkrechten ausgelenkt, so führt der Körper nach dem Loslassen Schwingungen um die Senkrechte aus.

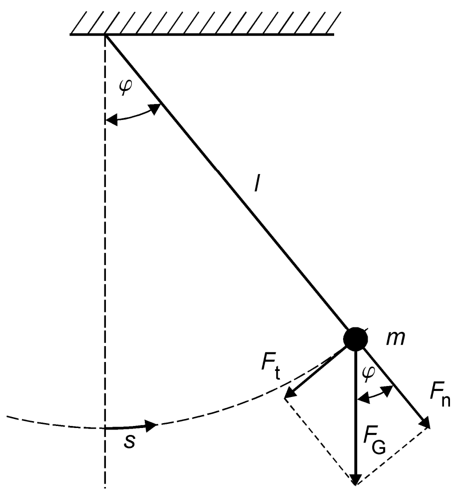

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Fadenpendels mit Länge l und der Masse m, auf welche die im Text beschriebenen Kräfte $\vec{F}_i$ wirken.

F3 FADENPENDEL als Heimversuch

In dieser **Modellbetrachtung** wirkt unter Vernachlässigung der Masse des Fadens und der Luftreibung auf den Körper an jedem Punkt seiner Bahn die Gewichtskraft

$$\vec{F}_G = m \cdot \vec{g} \tag{1}$$

senkrecht nach unten, wobei g die Fallbeschleunigung ist. Die Normalkomponente (normal zur Bahn des Körpers) $F_n = m \cdot g \cdot \cos\varphi$ dieser Kraft findet ihre Gegenkraft in der in der Aufhängung auftretenden Kraft und beeinflusst die Bewegung des Körpers nicht. Dagegen erzeugt die Tangentialkomponente $F_t = m \cdot g \cdot \sin\varphi$ der Gewichtskraft entsprechend der Newtonschen Bewegungsgleichung

$$m \cdot \frac{d^2 s}{dt^2} = m \cdot \ddot{s} = -m \cdot g \cdot \sin\varphi \tag{2}$$

eine Beschleunigung des Körpers längs der kreisförmigen Bahnkurve. Zwischen dem Auslenkwinkel φ und der Bahnkurvenkoordinate s auf der Bahnkurve besteht die Beziehung $s = l \cdot \varphi$ (siehe Definition Bogemaß). Bei (zeitlich) konstanter Fadenlänge l folgt daraus unmittelbar

$$\frac{ds}{dt} = l \cdot \frac{d\varphi}{dt} \text{ und } \frac{d^2 s}{dt^2} = l \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2}\,. \tag{3}$$

Mit Gl. (3) ergibt sich Gl. (2) zu

$$l \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} + g \cdot \sin\varphi = 0\,. \tag{4}$$

Für **kleine** Auslenkwinkel φ (im Bogenmaß) **kann** die Kleinwinkelnäherung $\sin\varphi \approx \varphi$ gemacht werden, sodass sich

$$l \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} + g \cdot \varphi = 0\,. \tag{5}$$

ergibt. Diese Newtonsche Bewegungsgleichung für das „mathematische Pendel" hat Gültigkeit innerhalb der in das Modell eingeflossenen Approximationen[1]; man spricht von Idealisierung.
Diese Differentialgleichung Gl (5), die die Schwingung in dem betrachteten Modell beschreibt, wird gelöst von

$$\varphi = \varphi_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi) \text{ mit } \omega = \sqrt{\frac{g}{l}}\,. \tag{6}$$

Die hier zunächst willkürlich erscheinenden Konstanten heißen Amplitude[2] φ_0 bzw. Phasenkonstante[3] ψ und sind durch die konkreten Anfangsbedingungen für $t = 0$ festgelegt.

---

[1] punktförmige Masse,
kein Luftwiderstand → keine Dämpfung,
kleine Winkel, für die $\sin\varphi \approx \varphi$ gilt

[2] φ_0 ist der maximale Auslenkwinkel des sich mit der Zeit t verändernden Auslenkwinkels, weil $-1 \leq \sin(\ldots) \leq 1$

Die zeitliche Entwicklung des Auslenkwinkel $\varphi(t)$ von dem Pendel folgt entsprechend Gl. (6) einer harmonischen Schwingung. Das mathematische Pendel, das lediglich ein Modell mit entsprechenden Approximationen ist, vollführt demnach bei Auslenkung um kleine Winkel harmonische Schwingungen mit der Kreisfrequenz ω und der Periodendauer

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \,. \tag{7}$$

Dieses Modell ist unabhängig von der Masse m, die sich entsprechend Gl. (2) kürzt und der gewählten Amplitude φ_0 ist.
Die Beziehung, die Gl. (7) beschreibt, erlaubt prinzipiell bei bekannter Pendellänge l durch Messung der Periodendauer T eine Bestimmung der Fallbeschleunigung g.

Gleichung (7) ist das zentrale theoretische Ergebnis, auf das die experimentellen Untersuchungen aufbauen.

Achtung:

Bei dem Aufbau und der Durchführung des Versuches ist strengstens auf die Arbeitssicherheit zu achten. Es werden keine gesundheitlichen Risiken eingegangen. Bei Unklarheiten müssen diese mit dem Betreuer im Voraus besprochen werden.

Grundsätzliche Bemerkungen zu einem Protokoll / Report:

- Abbildungen haben eine Unterschrift und werden durchnummeriert
  (Eine Bildunterschrift beschränkt sich auf das Beschreiben dessen, was man auf einer Abbildung sieht. Keine Schlüsse, keine Funktionsbeschreibungen, etc. Man muss aber verstehen, was man auf der Abbildung sieht.)

  !!! Dargestellte Messergebnisse nicht verbinden!!!

- Tabellen haben eine *Überschrift und werden durchnummeriert*
  (Rohdaten auch in tabellarischer Form kommen in den Anhang)

- Formeln, die zur Berechnung herangezogen werden, müssen angegeben werden. Alle Formeln, die für die Mehrzahl „Ihre Kommilitonen /-innen nicht trivial" sind[4], müssen zitiert bzw. hergeleitet werden. *Formeln und Gleichungen sind durchzunummerieren.*

---

[3] ψ ist hierbei eine Konstante, die den anfänglichen Auslenkwinkel $\varphi\,(t{=}0) = \varphi_0 \cdot \sin(\psi)$ zum Zeitpunkt $t = 0$ beschreibt. Ist bei $t = 0$ das Pendel am Nulldurchgang (der sin-Funktion, also an dem tiefsten Punkt in Abb.: 1), so ist $\psi = 0$. Ist hingegen bei $t = 0$ das Pendel an einem Umkehrpunkt, so ist $\psi = \frac{\pi}{2}$ bzw. $\psi = -\frac{\pi}{2}$

[4] z.B. sollte $\vec{F}_G = m \cdot \vec{g}$ aus Ihrer Sicht bekanntes „triviales" Wissen sein; Gl. (8) dieser Anleitung hingegen ist

F3 FADENPENDEL als Heimversuch

Ein Report sollte derart geschrieben sein, dass sämtliche Aussagen und Ergebnisse (ohne Anleitung) von jemandem, der die Anleitung nicht kennt, nachvollzogen werden kann. Und zwar in schlüssiger, strukturierter und prägnanter[5] Form.

Formulieren Sie fließende Übergänge zwischen einzelnen Kapiteln

Versuchsteil 0

- Bereiten Sie ein Protokoll vor, mit folgenden Unterkapiteln:

- Abstract……………………………………………..(…noch nichts hineinschreiben….)
- Inhaltsverzeichnis[6]
- Einführung…………………………………………. (…noch nichts hineinschreiben…)
- Theorie……………….. .(…noch nichts hineinschreiben…)
- Umsetzung des Experimentes ……………………… (…noch nichts hineinschreiben…)
- Durchführung und Auswertung……….……………. (…noch nichts hineinschreiben…)
- Fazit……………….. ……………………………..(…noch nichts hineinschreiben…)
- Anhang……………………………………….…..(…noch nichts hineinschreiben….)

- Schreiben Sie den KURZEN Theorieteil, der das Modell des mathematischen Pendels mit Kleinwinkelnäherung beschreibt:

- Rekapitulieren Sie die **relevante** Gleichung (7) und gehen Sie auf die gemachten Approximationen (Näherungen), innerhalb derer das Modell (Gl.(7)) Gültigkeit hat, ein.

- Füllen Sie das Kapitel: „Umsetzung des Experimentes".
  (lesen Sie hierfür die einzelnen Versuchsteile 1 bis mindestens 3 dieser Anleitung auf den folgenden Seiten durch, damit Sie erklären können, wie diese von Ihnen Umgesetzt werden.)

- Skizzieren Sie den Versuchsaufbau durch eine schematische Abbildung.[7]
  Ergänzen Sie diese Abbildung zusätzlich durch ein Foto.

---

sicherlich für die Mehrzahl Ihrer Kommilitonen/-innen (zumindest vor dem Versuch) nicht bekannt gewesen.

[5] Es soll ein Report, der das **Wesentliche** des Experimentes vorstellt, angefertigt werden und kein Lehrbuch!

[6] In einer Arbeit wie Bachelor-, Master-, Dr-Arbeit, etc. kommt an dieser Stelle ein Inhaltsverzeichnis mit Seiten-
angaben. In einem wissenschaftlichen Report hingegen kann am Ende der Einleitung in Textform eine Gliederung gegeben werden. Wählen Sie ein Format, das Ihnen zusagt.

[7] bei Übernahme von Abbildungen aus der Anleitung ist die entsprechende Referenz anzugeben.

F3 FADENPENDEL als Heimversuch

- Beschreiben Sie den Versuchsaufbau

Füllen Sie sukzessiv das Kapitel „Durchführung und Auswertung“ mit den Versuchsteilen 1 bis 5 und beschreiben sie die jeweilige Versuchsdurchführung

Versuchsteil 1: statistische Messunsicherheit der Periodendauer

Entwickeln Sie mittels alltäglicher Gegenstände einen Versuchsaufbau, der den Approximationen des mathematischen Pendels möglichst gerecht werden kann.

Lenken Sie das Pendel zunächst immer mit dem gleichen Winkel bei einer festen Pendellänge aus. Überlegen Sie bis zu welchem Winkel die Kleinwinkelnäherung mit einer Abweichung von 1% noch gültig ist. (Erst im späteren Verlauf soll die Pendellänge im Versuchsteil 3 verändert werden.)

Aufgabe 1:

Messen Sie bei einer festen Fadenlänge die Zeit von einer Periode jeweils zehnmal

- am Nulldurchgang (am tiefsten Punkt bei $\varphi = 0$)
- am Umkehrpunkt (am Punkt maximaler Auslenkung $\varphi = \varphi_0$)

Tab. 1: Messdaten von T am Nulldurchgang und am Umkehrpunkt

	T (s) am Nulldurchgang	T (s) am Umkehrpunkt
1		
2		
…		
10		

Auswertung 1a:

- Geben Sie die Formeln von dem Mittelwert, der Standardabweichung und dem Vertrauensbereich an.

Für eine Messgröße x, die n-mal gemessen wird gilt:
(x_i ist die i-te Messung)

Mittelwert: Standardabweichung: (Standardabw. des Mittelwertes) zufällige-Unsicherheit

F3 FADENPENDEL als Heimversuch

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum x_i \qquad s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \qquad s_m = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Die statistische Unsicherheit der n-mal gemessen Größe x ist gegeben durch

$$\Delta x_{stat} = s_m$$

- Berechnen Sie hieraus den Mittelwert, Standardabweichung und statistische Unsicherheit für jede der beiden Messreihen mit hinreichend[8] vielen Stellen mit einem geeigneten Rechenprogramm.

- Geben Sie die Messergebnisse mit absoluter Messunsicherheit[9] für die Messung am Nulldurchgang und die Messung am Umkehrpunkt an. (Bisher wurden nur statistische Unsicherheiten betrachtet.)

$$T = (T_{Mittelwert} \pm \Delta T\ ) * Einheit$$

- Geben Sie die Messergebnisse mit relativer Messunsicherheit[10] für die Messung am Nulldurchgang und die Messung am Umkehrpunkt an. (Bisher wurden nur statistische Unsicherheiten betrachtet.)

$$T = T_{Mittelwert} * (1 \pm ...\%) * Einheit$$

- Diskutieren Sie diese Ergebnisse
  Welche Messung der Periodendauer T halten Sie für geeigneter?

- Diskutieren Sie, in wie weit systematische Fehler Ihrer Zeitmessung zu berücksichtigen sind. Wenn sie einen systematischen Fehler angeben (abschätzen) können, verrechnen Sie diesen entsprechend $\Delta T_i = \sqrt{(\Delta T_{stat.})^2 + (\Delta T_{syst.})^2}$ mit dem statistischen Ergebnis, dem Sie am meisten vertrauen.

---

[8] alle Stellen, die z.B. ein Taschenrechner angeben würde.

[9] Schauen sie sich zunächst die *Messunsicherheit mit hinreichend vielen Stellen* an.
→ Ist die erste signifikante Stelle eine „1“ oder „2“, so wird die darauffolgende Stelle aufgerundet.
→ Ist die erste signifikante Stelle eine „3“ bis „9“, so wird diese Stelle selbst aufgerundet.

Der Mittelwert wird anschließend auf die gleiche Stelle (verglichen mit der Position des Kommas) gerundet, wie die Messunsicherheit.

[10] Teilen Sie hierfür die *Messunsicherheit mit hinreichend vielen Stellen* durch den *Mittelwert mit hinreichend vielen Stellen* und geben das %-uale Ergebnis auf zwei signifikante Stellen an. Runden Sie hierbei die zweite signifikante Stelle auf.

F3 FADENPENDEL als Heimversuch

Füllen Sie sukzessiv das Kapitel „Durchführung und Auswertung“ mit den Versuchsteilen 1 bis 5 und beschreiben sie die jeweilige Versuchsdurchführung

Versuchsteil 2: Gültigkeit der Kleinwinkelnäherung

Die Kleinwinkelnäherung $\sin\varphi \approx \varphi$ ist mathematisch begründet durch die Taylor-Entwicklung des Sinus an der Stelle $\varphi = 0$. Eine Konsequenz dieser Näherung ist Gl. (6), die Gl. (5), wobei hierbei in diesem Modell ω und damit *T* unabhängig vom Winkel sind.
Mit zunehmender Auslenkung verliert diesen Modell somit immer mehr an Gültigkeit.

Machen Sie sich dies bewusst und formulieren Sie hierzu einen kleinen Abschnitt in Ihrem Protokoll.

Füllen Sie sukzessiv das Kapitel „Durchführung und Auswertung“ mit den Versuchsteilen 1 bis 5 und beschreiben sie die jeweilige Versuchsdurchführung

Versuchsteil 3: Variation der Fadenlänge

- Verwenden Sie in diesem Versuchsteil stets dieselbe Anfangs-Amplitude φ_0.
- Verwenden Sie in diesem Versuchsteil stets die Bestimmung der Periodendauer *T*, die Sie für am geeignetsten halten (vgl. *Auswertung 1c*).
- Messen Sie die Fadenlängen l_i (ausschließlich Fadenlängen) mit einem Metermaß, dessen EG-Genauigkeitsklasse[11] Sie kennen; oder verwenden Sie alternativ eine Messmethode, deren systematische Unsicherheit Sie bestimmen können.
- Schätzen Sie zudem weitere Längen und deren Unsicherheiten **grob** ab:

  - Um welche Länge $l_{0,schätz}$ wird das Pendel länger, wenn die Lage des Schwerpunktes

[11] Genauigkeitslassen von Meterstäben entsprechend $\Delta l_i = b \cdot l + a$

EG-Genauigkeitsklasse	a (mm)	b (mm/m)
I	0,1	0,1
II	0,3	0,2
III	0,6	0,4

abgeschätzt wird? Schätzen sie auch $\Delta l_{0,schätz}$ ab.

Bestimmung der Periodendauer für 10 verschiedene Fadenlängen l_i. Messen Sie nun keine Einzelperiode mehr, sondern die Dauer von 10 Perioden! Messen Sie für die längste und kürzeste Seillänge jeweils 10-mal die Dauer von 10 Perioden. Bestimmen Sie die Gesamtunsicherheit beider Messungen. Bestimmen Sie die Periodendauern T_1 und T_{10} (teilen durch 10) samt Unsicherheit (Fehlerfortpflanzung). Bestimmen Sie die relative Messgenauigkeit beider Periodendauern und Vergleichen Sie diese mit den Messungen in Aufgabe 2. Messen Sie für die restlichen Pendellängen nur einmal, nutzen sie für diese Messungen die größere von beiden zuvor bestimmten Unsicherheiten für die Periodendauer.

Tab. 4: Messdaten und Messergebnisse von Periodenuntersuchungen mit verschiedenen Pendellängen

l_i	Δl_i *EG-Genauigkeit*	$l_{0,schätz}$	$\Delta l_{0,schätz}$	$T_{i,10}$	$\Delta T_{i,sys}$
l_1		*immer*	*immer*	$10\ T_{1,10}$ *(für eine Länge werden 10 Zeiten von 10 Schwingungen gemessen,)*	
…				$T_{2,10}$	
				…	
l_{10}		*gleich*	*gleich*	$10\ T_{10,10}$	

----------------------*Messdaten*----------------------------

$l_{i,ges}$	$\Delta l_{i,ges}$	$\overline{T}_i$	$\Delta\overline{T}_{i,stat}$	$\Delta\overline{T}_{i,ges}$

----------------*Auswertung*---------------

Auswertung 3a:

- Berechnen Sie für jeweilige gesamte Fadenlänge $l_{i,ges} = l_i + l_{0,schätz}$
  ($l_{0,schätz}$ sollte natürlich immer gleich sein)

- Berechnen Sie für jede gewählte Fadenlänge die Gesamtlänge mit ihrer Messunsicherheit.

$$\Delta l_{i,ges} = \sqrt{(\Delta l_i)^2 + (\Delta l_{0,schätz})^2}$$

- Bestimmen Sie für jede gewählte Länge die Dauer einer einzelnen Perioden T_i und die Unsicherheit $\Delta T_{i,ges}$ (hier müssen Sie zunächst die Gesamtunsicherheit für die 10 Perioden bestimmen und diese dann auf Grund der Fehlerfortpflanzung durch 10 Teilen)

Auswertung 3b:

Gleichung (7) kann linerarisiert werden, um danach aus der Steigung der Ausgleichsgeraden[12] die Erdbeschleunigung[13] zu bestimmen → $y = T^2 = \frac{4\pi^2}{g} \cdot l$

Die Unsicherheit der Periodendauer ΔT wirkt sich auch auf $y(T)$ entsprechend $\Delta y_i = 2\overline{T}_i \cdot \Delta\overline{T}_{i,ges}$ aus[14].

- Berechnen Sie die $\Delta y_i = 2T_i \cdot \Delta\overline{T}_{i,ges}$ von *Auswertung 3a*
- Tragen Sie $y_i = T_i^2$ mit den Δy_i-Unsicherheiten in Abhängigkeit von l_i in einem Plot auf.
- Berechnen Sie mittels eines geeigneten Programm die Ausgleichsgerade durch **den Ursprung** und stellen Sie diese in dem Diagramm dar. Der Fitparameter (die Steigung) ist mit Unsicherheit und Einheit anzugeben.
- Formulieren Sie eine Bildunterschrift:
  Beschreiben Sie, welche Messergebnisse dargestellt sind und dass der Fit als durchgezogene (farbige) Linie eine Ursprungs[15]-Gerade beschreibt.
- Leiten Sie aus dem Fit-Ergebnis die Erdbeschleunigung g mit Unsicherheit ab. Bedenken Sie hierbei, dass die Steigung invers in g eingeht; daher muss wiederum eine Fortpflanzung der Unsicherheit (mit nur einem Summanden) gemacht werden.
- Diskutieren Sie Ihr Ergebnis

Füllen Sie sukzessiv das Kapitel „Durchführung und Auswertung“ mit den Versuchsteilen 1 bis 5 und beschreiben sie die jeweilige Versuchsdurchführung

Versuchsteil 4: Optimierung der Ergebnisse durch geeignetere Auswertung

In dem Experiment, das durch das Modell des mathematischen Pendels beschrieben werden kann, vereinigt sich die theoretische Punktmasse des Pendels auf dessen Schwerpunkt. Dieser ist nur sehr ungenau bestimmbar, wie Tab.: 4 zu entnehmen ist. Die in das Modell eingehende Pendellänge *l* ist demnach nur sehr ungenau bestimmbar, wie die groben Abschätzungen aus Versuchsteil 3 zeigen.
Durch eine geringfügige **Erweiterung des Modells** durch den Experimentator, der seine Daten auswertet, können die bereits bestehenden Messdaten (von Tab. 4) genauer ausgewertet werden:

---

[12] , die an die y_i -Messergebnisse gefittet wird,

[13] aus der Steigung, die ein Fitparameter ist,

[14] Dies ist die direkte Folge von Variation bzw. der Gaußschen Fehlerfortpflanzung, die auch hier angewendet werden kann.

[15] Wenn Sie das Wort „Ursprungsgerade“ verwenden, ist dem Leser automatisch klar, dass es (auch der zugrunde liegenden Theorie zufolge) keinen y-Achsenabschnitt gibt.

F3 FADENPENDEL als Heimversuch

Abgesehen von der EG-Genauigkeit des Metermaßes ist die tatsächliche Fadenlänge (zwischen Gewicht und Aufhängungspunkt) sehr genau bestimmbar. Hierauf baut das erweiterte Modell auf:
Die gesamte Pendellänge $l_{i,ges} = l_0 + l_i$ **kann** in dieser Modellerweiterung durch die Addition zweier Größen beschrieben werden. Bis auf die EG-Genauigkeit gehen in die Größe l_0 viele unbekannte Störfaktoren[16] ein, die (ebenso wie eine reale Pendelverlängerung durch Fadenvariation) zu einer veränderten Periodendauer führen.

In dieser Modellerweiterung ergibt sich aus Gl. (7) mit $l_{i,ges} = l_0 + l_i$

$$y_i = T_i^2 = \frac{4\pi^2 l}{g} = \frac{4\pi^2}{g} \cdot (l_0 + l_i). \tag{9}$$

Bzw.

$$y_i = l_i = \frac{g}{4\pi^2} \cdot T_i^2 - l_0. \tag{10}$$

Aufgabe 4:

- Bestimmen Sie analog zu der Fortpflanzung der Messunsicherheit in *Aufgabe 3a* und *3b* die Unsicherheit Δy_i für Gl. (9) bzw. (10) und stellen Sie Ihre Messergebnisse $y_i = T_i^2$ bzw. $y_i = l_i$ dieser neuen Auswertung in Abhängigkeit von l_i bzw. T_i^2 graphisch dar.
- stellen Sie Ihre Messergebnisse y_i mit Unsicherheiten Δy_i in Abhängigkeit von l_i bzw. T_i^2 graphisch dar.
- Fitten Sie eine Ausgleichsgerade (diesmal mit *y*-Achsenabschnitt) an diese Messergebnisse und geben Sie die Fitparameter mit Einheit an.
- Formulieren Sie eine Bildunterschrift
- Leiten Sie aus dem Fit-Ergebnis die Erdbeschleunigung g und Schwerpunktabstand l_0 ab.
- Diskutieren Sie Ihre Ergebnisse und vergleichen Sie diese mit Ihren Ergebnissen aus *Aufgabe 3*

Versuchsteil 5: Fertigstellung des Protokolls

Aufgabe 5a:

Formulieren Sie ein **abschließendes** Fazit im Kapitel „Fazit“

- Was war das Ziel des Versuches?

[16] Häufig wird dieser Term l_0 durch den Schwerpunkt des pendelnden Körpers dominiert; in ihn vereinen sich aber auch unbekannte Faktoren wie Reibung oder ein gewisses Mitschwingen des Aufhängungspunktes etc. Diese Faktoren sind theoretisch in ihrer Gesamtheit nicht zu erfassen, können aber in der effektiven Pendelverlängerung l_0 Zusammengefasst werden.

- Wie konnte dieses Ziel umgesetzt werden?
- Stimmt g mit dem Literaturwert innerhalb der Unsicherheit überein? Wenn nein, woran könnte es liegen.
- Relevanz Ihrer Ergebnisse für die Wissenschaft.

Aufgabe 5b:

Formulieren Sie eine Einführung in die Thematik im Kapitel „Einführung“

- Betten Sie den Versuch innerhalb der Thematik ein.
  (wo gibt / gab es Pendel und warum?
  wo gibt es überall harmonische Oszillatoren z.B. Mechanik oder Quanten Mechanik?
  ….
  Gestalten sie einen kurzen thematischen Übergang zur g-Konstante anhand Ihres Versuches. + Einführende Worte zur g-Konstante.)
- Stellen Sie Ziel und Zweck des Experimentes deutlich klar.
  (finden Sie den Übergang zur Theorie)
- Beachten Sie Fußnote 6

Aufgabe 5c:

Formulieren Sie ein Abstract im Kapitel „Abstract“:

Schreiben Sie ein Abstract, indem Sie vier grundlegende Fragen kurz und prägnant beantworten (Empfehlung: Schreiben Sie das Abstract zum Schluss, nachdem das restliche Protokoll geschrieben ist.):

- Warum ist das was Sie hier gemacht haben möglicherweise interessant?
- Was genau und wie haben Sie untersucht?
- Was ist als wesentliches Ergebnis dabei herausgekommen?
- Was haben Sie dabei wichtiges gelernt?

(bedenken Sie hierbei, dass die Aufgabenstellung der Auswertung auf die experimentelle Bestimmung der Erdbeschleunigung hinausläuft)

Dr. Daniel Kohlberger