

Physikalisches Praktikum

## **Protokoll**

zu Versuch M8 –  
Pendelschwingungen

durchgeführt von  
Tobias Heidig und René Schneider  
am 02.06.2005

## Gliederung

1. Aufgabenstellung	3
2. Grundlagen zum Versuch	4
3. Versuchsaufbau	5
4. Messergebnisse	6
5. Messunsicherheiten	8
6. Zusammenfassung und Diskussion	9
7. Literatur	9

## **1. Aufgabenstellung**

- 1.1** Die Schwingungsdauer  $T$  eines Fadenpendels ist bei mindestens 6 unterschiedlichen Pendellängen  $l$  zu messen, die Funktion  $T^2 = f(l)$  ist graphisch darzustellen, die Schwerebeschleunigung  $g$  ist durch lineare Regression zu ermitteln.
- 1.2** Die Abhängigkeit der Periodendauern und der Schwingungen eines physikalischen Pendels (Reversionspendels) um seine beiden möglichen Drehachsen A und B vom Abstand  $x$  des Laufgewichts von einer der Drehachsen ist aufzunehmen und graphisch darzustellen. Daraus ist die Schwingungsdauer  $T$  zu ermitteln, für die der Achsabstand der reduzierten Pendellänge entspricht.
- 1.3** Aus der auf Amplitudenabhängigkeit korrigierten Schwingungsdauer  $T$  des Reversionspendels und der reduzierten Pendellänge ist die Schwerebeschleunigung  $g$  zu berechnen.

## 2. Grundlagen zum Versuch

Für Aufgabenstellung 1.1 verwenden wir das Modell eines mathematischen Pendels, um unser Versuchspendel zu beschreiben. Dazu gehen wir davon aus, dass die Fadenlänge  $l$  sehr viel größer als die Auslenkung  $\varphi$  ist und das Gewicht des Pendels in einem Massepunkt, dem Schwerpunkt, konzentriert ist.

Für die Periodendauer  $T$  des mathematischen Pendels gilt laut [1] folgendes:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (1)$$

Dabei gilt für die Schwerebeschleunigung  $g$ :

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2} \quad (2)$$

In Aufgabenstellung 1.2 kommt ein Reversionspendel zum Einsatz, das sich nicht mehr als mathematisches Pendel beschreiben lässt.

Als Ausgangspunkt für Berechnungen am Reversionspendel verwendet man die Formel für die Periodendauer eines physikalischen Pendels. Ein physikalisches Pendel ist laut [2] ein ausgedehnter, starrer Körper, welcher nicht an seinem Schwerpunkt  $S$  aufgehängt ist. Für solch ein Pendel gilt:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mgs}} \quad (3)$$

Dabei ist  $J$  das Massenträgheitsmoment des Pendels,  $m$  seine Masse und  $s$  der Abstand des Schwingungsmittelpunktes vom Drehpunkt des Pendels.

Beim Reversionspendel gibt es eine sogenannte reduzierte Pendellänge  $l_r$ , für die die Periodendauer gleich der Periodendauer eines gleichlangen mathematischen Pendels ist.

Wegen (1) und (3) muss damit für  $l_r$  gelten:

$$l_r = \frac{J}{ms} \quad (4)$$

Man kann mit Hilfe des STEINERschen Satzes beweisen, dass eine Vertauschung des Schwingungsmittelpunktes und des Drehpunktes die Periodendauer nicht verändert.

Die Formeln zur Berechnung der Periodendauer gelten allerdings nur für harmonische Schwingungen. Im realen Experiment müssten wir jedoch die Dämpfung der Schwingung berücksichtigen und die Periodendauern auf Amplitudenabhängigkeit korrigieren. Für Letzteres verwenden wir die in [3] genannte Formel, die man mit dem Energieerhaltungssatz als Ansatz und Verwendung einer Reihenentwicklung eines vollständigen elliptischen

Integrals erster Gattung herleiten kann. Besagte Formel lautet:

$$T_{\text{korr}} = \frac{T}{1 + \frac{\hat{\phi}^2}{16}} \quad (5)$$

### **3. Versuchsaufbau**

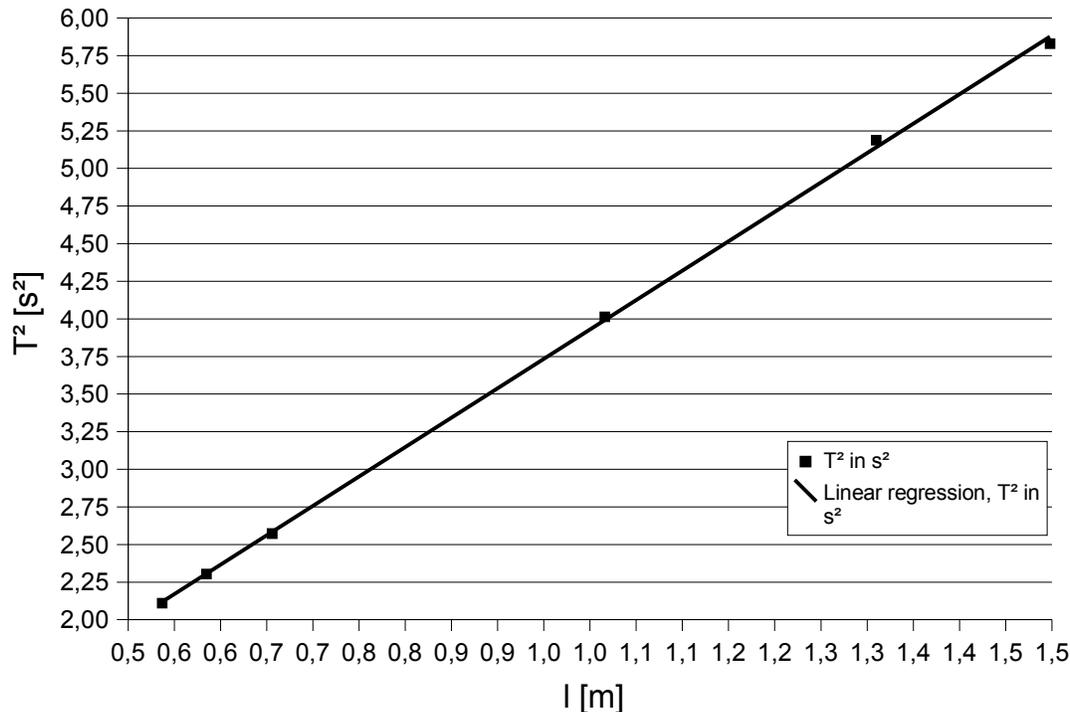
Für Aufgabenstellung 1.1 messen wir bei mindestens 6 verschiedenen Pendellängen  $l$  die Periodendauer. Um Messabweichungen zu minimieren, die beim Messen der Zeit mittels handbetätigter Stoppuhr auftreten, messen wir die Dauer von 10 Schwingungen, die wir anschließend durch 10 dividieren.

In der weiteren Versuchsdurchführung 1.2 messen wir jeweils die Schwingungsdauer des Reversionspendels um seine beiden Aufhängepunkte, wobei wir zwischen den Messungen die Lage des Schwerpunkts variieren, indem wir eine der beiden Massen verlagern. Nach einer Aufnahme weniger Messungen schätzten wir die Positionen der veränderlichen Masse so ab, dass die an diesen Stellen um die beiden Aufhängepunkte gemessenen Periodendauern annähernd gleich waren. In der Nähe dieser Stellen verfeinerten wir unsere Messungen, indem wir die Masse in kleineren Abständen verschoben.

Während der gesamten Versuchsdurchführung achteten wir auf eine möglichst konstante Auslenkung.

## 4. Messergebnisse

Zu Beginn des Versuchs stellten wir 6 verschiedene Pendellängen  $l$  ein, bei denen wir jeweils 3 Mal die Dauer von 10 Periodendauern mittels Stoppuhr maßen. Die daraus errechneten Mittelwerte für die Dauer einer Periode wurden gemäß der Aufgabenstellung quadriert und sind in Abhängigkeit von der Fadenlänge in nachfolgendem Diagramm (Abb. 1) dargestellt.



(Abb. 1)  $T^2$ - $l$ -Diagramm mit eingezeichneter linearer Regressionsgerade

Die aus den Messwertpaaren errechnete Gleichung der linearen Regressionsgerade lautet:

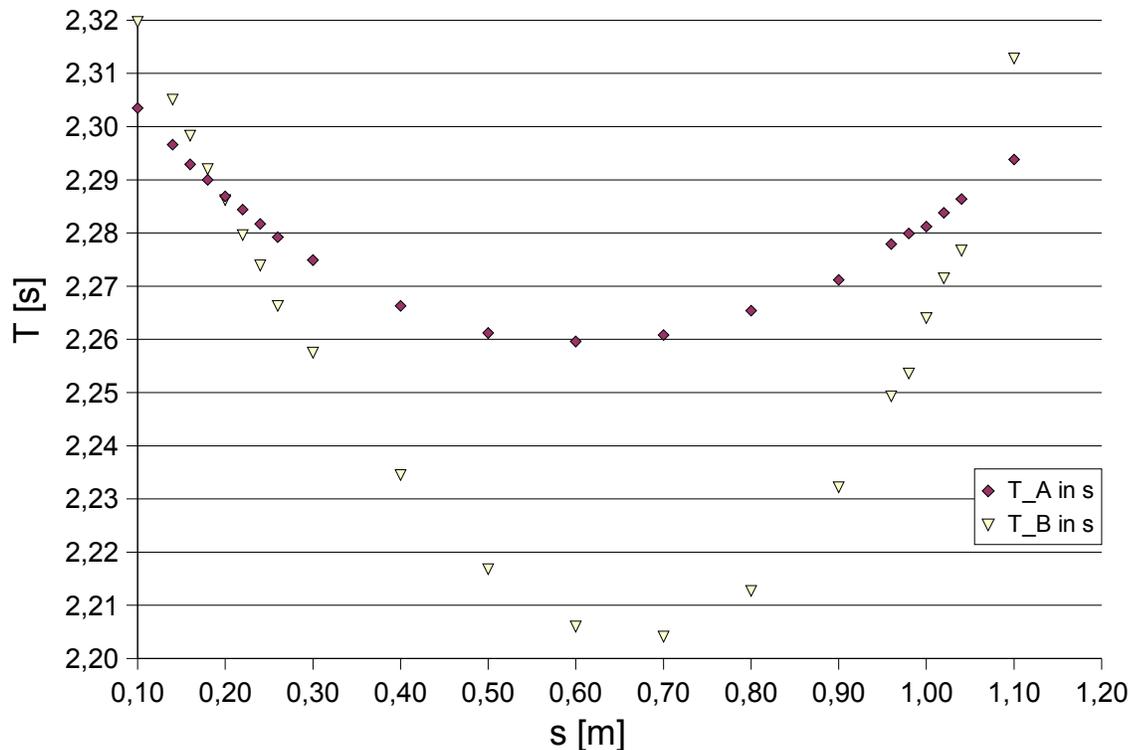
$$y(x)=ax+b=3,90975 \cdot x+0,019171 \quad (6)$$

Wie man durch Umstellen von Gleichung (1) leicht feststellt, kann man die Schwerebeschleunigung  $g$  nach folgender Gleichung (7) aus dem Anstieg  $a$  der Regressionsgerade berechnen:

$$g = \frac{4\pi^2}{a} \quad (7)$$

Damit erhalten wir für die Schwerebeschleunigung  $g=10,09742 \text{ m/s}^2$ .

Für Aufgabenstellung 1.2 ermittelten wir mit einem Digitalzähler die beiden Periodendauern  $T_A$  und  $T_B$  um die beiden Schneiden A bzw. B des Reversionspendels für verschiedenen Entfernungen  $s$  des Laufgewichts von einer der Schneiden. Die dabei entstehende  $T$ - $s$ -Kennlinie ist in nachfolgendem Diagramm (Abb. 2) dargestellt:



(Abb. 2)  $T_A$  bzw.  $T_B$  in Abhängigkeit der Position  $s$  des Laufgewichts von einer Schneide

Durch nichtlineare Regression der Messwerte erhält man 2 Schnittpunkte, in denen die Periodendauern  $T_1=2,28833$  s bzw.  $T_2=2,28829$  s betragen. Beide sollten zwar theoretisch gleich sein, in der Praxis rechnet man allerdings mit dem Mittelwert der beiden Werte weiter; dieser beträgt in unserem Fall  $T_r=2,28831$  s. Für diese Periodendauer entspricht der Abstand beider Schneiden der reduzierten Pendellänge, für die das Reversionspendel die gleiche Periodendauer aufweist, wie ein gleichlanges mathematisches Pendel.

Laut [4] gilt, dass die Summe der beiden Abzissenwerte  $s_1$  und  $s_2$  in den beiden Schnittpunkten der reduzierten Pendellänge entspricht. Daher ist sie in unserem Fall:

$$l_r = s_1 + s_2 = 0,20288 \text{ m} + 1,09699 \text{ m} = 1,29987 \text{ m}.$$

Bevor man mit Formel (2) die Schwerebeschleunigung  $g$  berechnen kann, müssen wir jedoch die ermittelte Periodendauer noch mittels Formel (5) auf Amplitudenabhängigkeit korrigieren. Setzt man wie in unserem Versuch  $\varphi = 5^\circ = 0,0872664626$  rad, so erhält man eine korrigierte Periodendauer von  $T_{r,\text{korr}} = 2,28722$  s.

Mit Formel (2) ergibt sich aus  $T_{r,\text{korr}}$  und  $l_r$  eine Schwerebeschleunigung von  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

## 5. Messunsicherheiten

Bei Aufgabenstellung 1.1 besteht die wesentlichste Messunsicherheit in der manuellen Bedienung der Stoppuhr. Da bei uns alle gemessenen Periodendauern je Pendellänge nur um jeweils maximale 0,02 s vom Mittelwert abwichen, nahmen wir diesen Wert als Ungenauigkeit  $\Delta t$  für die Zeit an. Zudem traten bei der Messung der Pendellänge mittels des Maßbandes Ungenauigkeiten der Größe  $\Delta l = 0,5$  mm auf.

Bei dem Fadenpendel kann mit Formel (8) die Messunsicherheit zu jedem Messwertepaar ( $l$ ,  $T$ ) berechnet werden. Da bei unserer Rechnung die Gravitationsbeschleunigung aus dem Anstieg der nach linearer Regression berechneten Geraden (6) hervorgeht, verzichten wir auf die Angabe der Messunsicherheiten für jedes einzelne Wertepaar, sondern gehen vereinfachend davon aus, dass die Messabweichungen durch den Berechnungsschritt der linearen Regression eliminiert werden.

Bei den Messungen zu Aufgabenstellung 1.2 ist dank des Digitalzählers die zeitliche Ungenauigkeit sehr viel geringer, sie beträgt laut Herstellerangaben  $\Delta t = \frac{1}{10000} + 5 \cdot 10^{(-4)} \cdot t$ , für die maximale gemessene Periodendauer also  $\Delta t = 0,00126$  s. Auch hier spielt die Ungenauigkeit des Maßbandes bei der Längenmessung eine Rolle, sie beträgt wie oben  $\Delta l = 0,5$  mm.

$$\Delta g = \left| \frac{4\pi^2}{T^2} \right| \Delta l + \left| \frac{8\pi^2 l}{T^3} \right| \Delta t \quad (8)$$

Mit obiger Formel (8) ergibt sich hier eine Ungenauigkeit der errechneten Schwerebeschleunigung von 0,01208 m/s<sup>2</sup>

Andere Faktoren, wie z.B. der Fehler bei der gleichmäßigen Einstellung der Amplitude können wegen Formel (5) als vernachlässigbar klein betrachtet werden.

## **6. Zusammenfassung und Diskussion**

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Bestimmung der Schwerebeschleunigung mit dem Reversionspendel weitaus genauer ist als die mit dem Fadenpendel ermittelte. Dies ist auf verschiedene Faktoren zurückzuführen: Erstens war die Zeitmessung einer Periodendauer des Reversionspendels genauer als beim Fadenpendel, zweitens beachteten wir beim Reversionspendel auch die Amplitude. Nicht zuletzt ließ sich beim Fadenpendel wegen der kugelförmigen Masse auch die Fadenlänge nur grob ermitteln. Im Gegensatz zum Reversionspendel bewegte sich das Pendel auch nicht in einer Ebene und es traten Schwingungen im Faden auf. Bei beiden Versuchen trat zudem Lagerreibung auf.

Allerdings könnte man auch den Reversionspendelversuch noch genauer machen, indem man ihn beispielsweise im Vakuum ausführt, was keine Reibung und Auftrieb in der Luft zur Folge hätte. Oder man könnte ebendiese durch Luftreibung verursachte Schwingungsdämpfung bei der Korrektur der Periodendauer mit berücksichtigen. Die Auswirkungen einer solchen Betrachtung, auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden soll, zeigt Quelle [3].

## **7. Literatur**

- [1] Heribert Stroppe: Physik für Studenten der Natur- und Ingenieurwissenschaften, 12. Auflage, München, Wien: Fachbuchverlag Leipzig 2003
- [2] Wikipedia: [http://de.wikipedia.org/wiki/Physikalisches\\_Pendel](http://de.wikipedia.org/wiki/Physikalisches_Pendel) vom 01.06.2005
- [3] Hinweise zum physikalischen Praktikum der Universität Heidelberg:  
[http://www.physikpraktika.uni-hd.de/versuche/14\\_mathematischesPendel\\_01.pdf](http://www.physikpraktika.uni-hd.de/versuche/14_mathematischesPendel_01.pdf) vom 01.06.2005
- [4] Dieter Geschke: Physikalisches Praktikum mit multimedialen Ergänzungen, 12., durchgesehene Auflage, Stuttgart, Teubner 2001

## M 8 Pendelschwingungen

### 1. Aufgabenstellung

- 1.1 Die Schwingungsdauer  $T$  eines Fadenpendels ist bei mindestens 6 unterschiedlichen Pendellängen  $l$  zu messen, die Funktion  $T^2 = f(l)$  ist graphisch darzustellen, die Schwerebeschleunigung  $g$  ist durch lineare Regression zu ermitteln.
- 1.2 Die Abhängigkeit der Periodendauern  $T_A$  und  $T_B$  der Schwingungen eines physikalischen Pendels (Reversionspendels) um seine beiden möglichen Drehachsen A und B vom Abstand  $x$  des Laufgewichts von einer der Drehachsen ist aufzunehmen und graphisch darzustellen. Daraus ist die Schwingungsdauer  $T$  zu ermitteln, für die der Achsabstand der reduzierten Pendellänge entspricht.
- 1.3 Aus der auf Amplitudenabhängigkeit korrigierten Schwingungsdauer  $T$  des Reversionspendels und der reduzierten Pendellänge ist die Schwerebeschleunigung  $g$  zu berechnen.

### 2. Grundlagen zum Versuch

- Schwingungsdauer eines mathematischen Pendels:  $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$  (1), wobei  $T$  - Schwingungsdauer (Periode) in  $s$ ,  $l$  - Fadenlänge in  $m$ ,  $g$  - Schwerebeschleunigung in  $m \cdot s^{-2}$ .  
Somit ist  $T^2(l) = \frac{4\pi^2}{g}l$  (2) und  $g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}$  (3)
- Schwingungsdauer eines physikalischen Pendels:  $T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mgs}}$  (4), wobei  $J$  - Trägheitsmoment des Pendels in  $kg \cdot m^2$ ,  $m$  - Masse des Pendels in  $kg$ ,  $s$  - Abstand des Schwerpunkts zum Drehpunkt des Pendels
- Reduzierte Pendellänge eines physikalischen Pendels:  $l = \frac{J}{ms}$  (5)
- „Das Reversionspendel ist ein physikalisches Pendel. Es lässt sich zeigen [...], dass die Schwingungsdauern bei der Schwingung um zwei Achsen im Abstand der reduzierten Pendellänge genau gleich sind. Im Experiment wird nun durch Verschieben eines Gewichts das Trägheitsmoment des Pendels so lange variiert, bis die Schwingungsdauern für die beiden Achsen A und B gleich sind. Dann ist  $l = AB$  gerade die reduzierte Pendellänge, und man kann  $g$  aus  $T$  und  $l$  bestimmen.“ [1]
- Da die Pendelschwingungen nicht harmonisch sind ( $T$  ist von  $\hat{\phi}$ , der maximalen Schwingungsamplitude, abhängig), muss  $T$  mit Hilfe der Beziehung  $T_{korrr} = \frac{T}{1 + \frac{\hat{\phi}^2}{16}}$  (6) korrigiert werden.

### 3. Versuchsaufbau

Zu 1.1:

- Digitale Stoppuhr:
  - Zufällige Messunsicherheiten
    - durch menschliches Reaktionsvermögen:  $\Delta T' = \pm 0,1 \text{ s}$  (jeweils  $\pm 0,05 \text{ s}$  am Anfang und am Ende der Messung)
    - durch Digitfehler:  $\Delta T'' = \pm 0,01 \text{ s}$

Systematische Messunsicherheiten:

- $\Delta T''' = 5 \cdot 10^{-4} t \text{ s}$ , vernachlässigbar gegenüber den zufälligen Messunsicherheiten bei einer maximalen Messzeit von  $t = 3 \text{ s}$ .

Somit ist  $\Delta T_{SU} = \pm 0,11 \text{ s}$

- Längenmessung des Fadenpendels:  $\Delta l = \pm 0,001 \text{ m}$

Zu 1.2

- Mit Lichtschranke gekoppelter Digitalzähler:  $\Delta t_{DZ} = \pm 0,0002 \text{ s}$
- Positionsmessung des Laufgewichts:  $\Delta x = \pm 0,0005 \text{ m}$

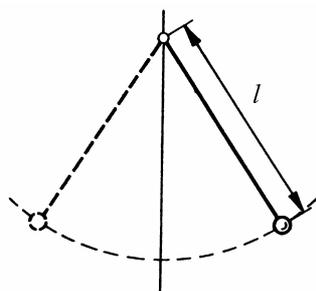


Abb. 3.1. Fadenpendel

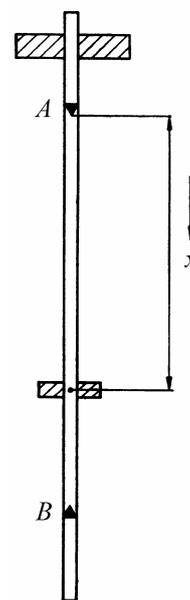


Abb. 3.2. Reversionspendel

### 4. Messergebnisse

4.1 Mehrfachmessungen, 10 Messungen bei jeweils 10 versch. Pendellängen (vgl. 1.1):

Nr. \ l in m	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
1	2,35	2,26	2,17	2,11	1,99	1,93	1,81	1,68	1,53	1,43
2	2,37	2,25	2,23	2,14	2,08	1,92	1,85	1,67	1,54	1,42
3	2,36	2,27	2,26	2,14	1,98	1,96	1,81	1,78	1,53	1,40
4	2,35	2,32	2,24	2,14	2,00	1,89	1,85	1,70	1,51	1,36
5	2,39	2,30	2,25	2,12	2,04	1,95	1,85	1,72	1,55	1,42
6	2,33	2,28	2,22	2,11	2,01	1,88	1,76	1,69	1,52	1,42
7	2,35	2,31	2,27	2,10	2,00	1,88	1,85	1,67	1,60	1,40
8	2,37	2,32	2,26	2,08	2,03	1,93	1,80	1,67	1,53	1,42
9	2,35	2,27	2,23	2,13	2,01	1,94	1,80	1,63	1,52	1,37
10	2,36	2,35	2,21	2,10	1,95	1,90	1,81	1,66	1,59	1,40

Tabelle 4.1.1. Messergebnisse der Periode  $T$  (in s) der 10 Messungen bei jeweils 10 versch. Pendellängen

$l$ in m	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
$\bar{T}$ in s	2,35	2,29	2,23	2,11	2,00	1,91	1,81	1,68	1,54	1,40
$(\bar{T})^2$ in s <sup>2</sup>	5,523	5,244	4,972	4,452	4,000	3,648	3,276	2,822	2,371	1,960

Tabelle 4.1.2 Arithmetisch gemittelte Periodendauern der 10 Pendellängen

Modellierung des Quadrats der gemittelten Periode  $\bar{T}^2$  als (lineare) Funktion der Pendellänge  $l$  durch Regressionsgerade:

$$y = ax + b \quad (7), \quad \text{wobei} \quad a = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - (\bar{x})^2}, \quad b = \bar{y} - a\bar{x}$$

$$\bar{x} = 0,95, \quad \bar{y} = 3,8268, \quad \bar{x} \cdot \bar{y} = 3,6355, \quad \overline{xy} = 3,9695, \quad \overline{x^2} = 0,985, \quad (\bar{x})^2 = 0,9025$$

Die Gleichung der Regressionsgeraden lautet also:  $T^2(l) = 4,0485 \cdot l - 0,0193$  (8)

Aus (2) ergibt sich  $T^2(l) = \alpha \cdot l$  mit  $\alpha = \frac{4\pi^2}{g}$ . Wenn man  $b$  aufgrund der Messunsicherheiten vernachlässigt, so

entspricht  $\alpha$  genau dem Steigungskoeffizienten  $a$  der Regressionsgeraden. Somit ergibt sich

$$g = \frac{4\pi^2}{a} = 9,751 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

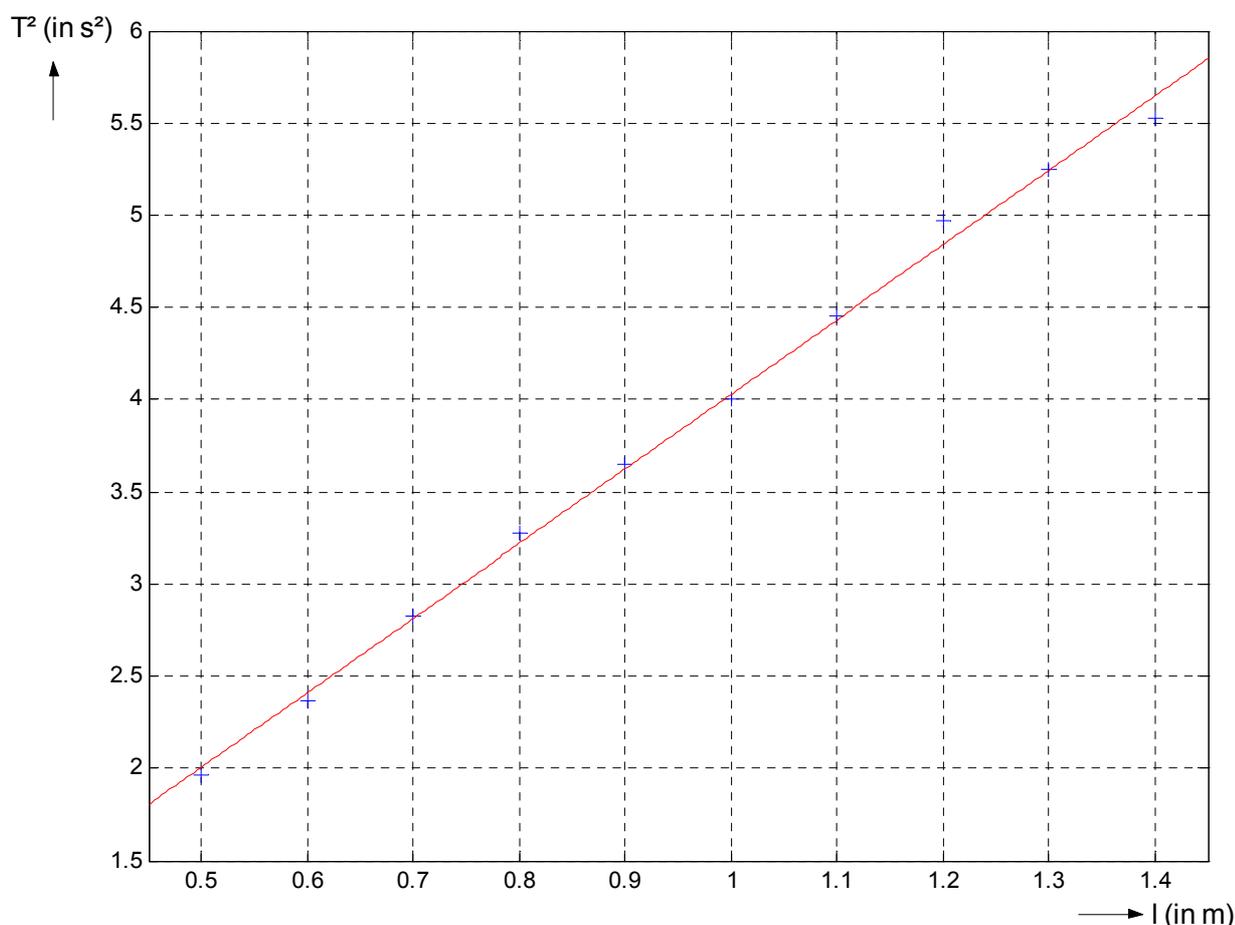


Abb. 4.1.1. Die funktionale Abhängigkeit  $T^2 = f(l)$  und die Regressionsgerade

#### 4.2 Mehrfachmessungen von $T_A$ und $T_B$ (vgl. 1.2):

Da in der Aufgabenstellung nicht ersichtlich war, in welchem Umfang die Messungen durchzuführen war, beschlossen wir, für jede Position  $x$  des Laufgewichts je 10 Messungen durchzuführen. Somit ergaben sich mit jeweils 12 Messpunkten (von den beiden Schneiden aus) insgesamt 240 Messwerte.

Da wir im Folgenden sowieso nur mit den Mittelwerten rechnen, verzichteten wir auf die tabellarische Darstellung aller 240 Messwerte.

Aus Zeitgründen konnten wir danach die zweite Messreihe mit kleineren Verschiebungen des Laufgewichts zur genaueren Bestimmung eines der Schnittpunkte der Kurven  $T_A = f(x)$  und  $T_B = f(x)$  nicht mehr durchführen. Um dennoch zu einem brauchbaren Ergebnis zu kommen, modellierten wir mit MATLAB die zwei Kurven anhand der (gegenüber Einfachmessungen) genaueren Mittelwerte mit zwei Polynomen vierten Grades. Die Schnittpunkte der beiden Kurven wurden durch Interpolation berechnet.

$x (\pm 0,001)$ in m	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
$T_A (\pm 0,0002)$ in s	2,3804	2,3142	2,2649	2,2317	2,2117	2,2041	2,2062	2,2166	2,2344	2,2583	2,2874	2,3208
$T_B (\pm 0,0002)$ in s	2,3068	2,2921	2,2799	2,2701	2,2630	2,2588	2,2574	2,2593	2,2645	2,2730	2,2853	2,3012

Tabelle 4.2.1. Gemittelte Messergebnisse der Mehrfachmessung bei versch. Laufgewichtpositionen

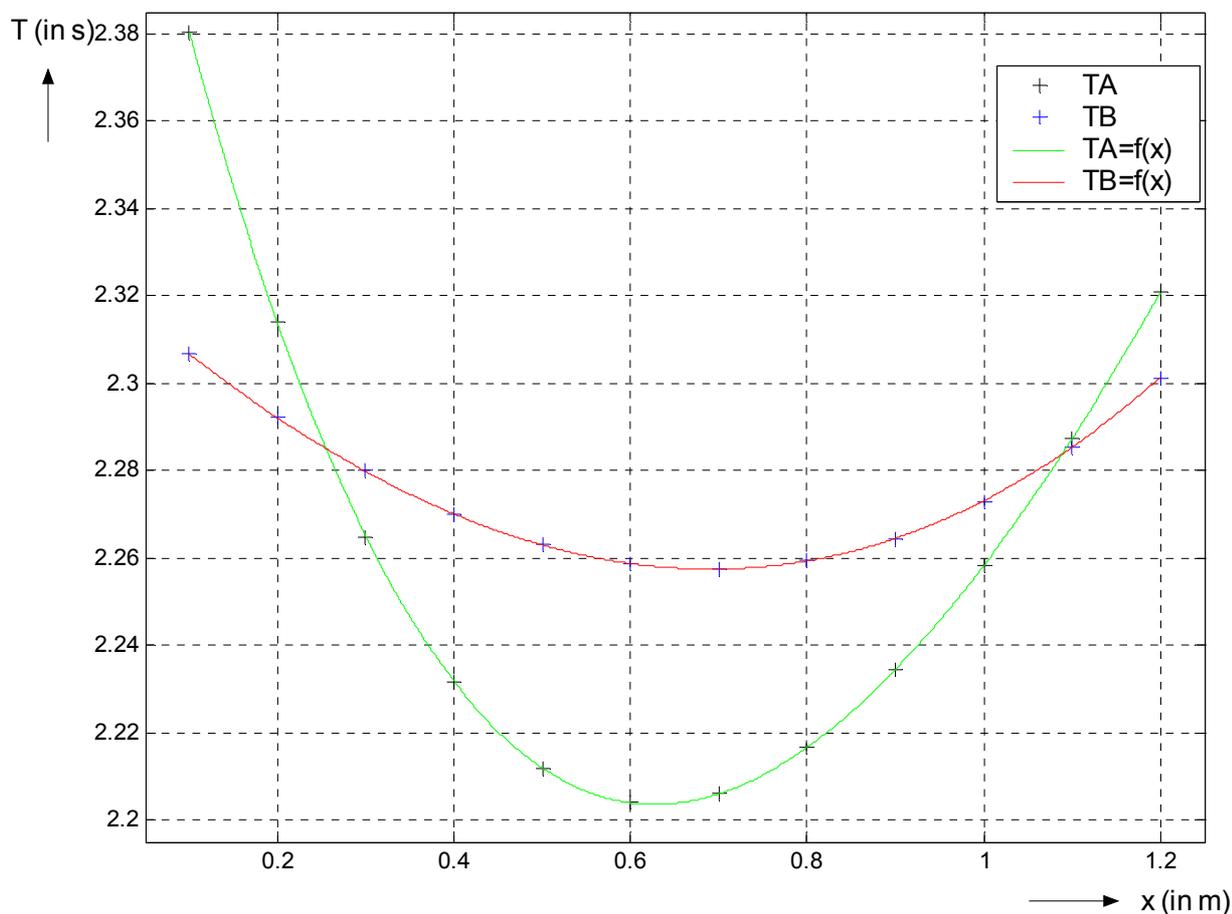


Abb. 4.2.1. Modellierung  $T_A = f(x)$  und  $T_B = f(x)$  der Messreihen

Die interpolierten Schnittpunkte der beiden Kurven sind  $S_1(0,2546 ; 2,2851)$  und  $S_2(1,0875 ; 2,2835)$ .

4.3 Berechnung der Erdbeschleunigung anhand der korrigierten Schwingungsdauern (vgl. 1.3):

$$\text{Mit (6) ergibt sich } T_{A_{\text{kor}}r} = \frac{2,2851}{1 + \frac{\left(4^\circ \cdot \frac{2\pi}{360^\circ}\right)^2}{16}} = 2,2844 \text{ s} \text{ und } T_{B_{\text{kor}}r} = \frac{2,2835}{1 + \frac{\left(4^\circ \cdot \frac{2\pi}{360^\circ}\right)^2}{16}} = 2,2828 \text{ s}.$$

Nach (3) ergibt sich mit  $l = 1,3 \text{ m}$   $g_A = 4\pi^2 \frac{1,3}{2,2844^2} = 9,8346 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  und

$$g_B = 4\pi^2 \frac{1,3}{2,2828^2} = 9,8484 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

## 5. Messunsicherheiten

### 5.1 Messunsicherheiten beim Fadenpendel (vgl. 1.1)

Die Fortpflanzung der Messunsicherheiten bei der Berechnung der Erdbeschleunigung anhand des Steigungskoeffizienten der Regressionsgeraden ist uns nicht ersichtlich.

### 5.2 und 5.3 Messunsicherheiten beim Reversionspendel (vgl. 1.2 bzw. 1.3)

Es ist uns leider auch nicht ersichtlich, wie sich der Messfehler zuerst in der Modellierung und dann in der Interpolation fortpflanzt.

## 6. Zusammenfassung und Diskussion

Nach Berechnung der Mittelwerte der Schwingungsdauer bei 10 verschiedenen Pendellängen (10 Messungen je Pendellänge) ermittelten wird die Gleichung der linearen Regressionsgerade der Funktion  $T^2 = f(l)$ . Somit

erhielten wir den Wert des Steigungskoeffizienten  $\alpha = \frac{4\pi^2}{g}$ , woraus wir dann den Wert  $g = 9,751 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

berechneten. Das ist eine Abweichung von  $0,055 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  vom Normwert der Fallbeschleunigung

$g_n = 9,80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , was eine relative Abweichung von  $0,567 \%$  bedeutet.

Die Abweichung hat mehrere Gründe: Messungenauigkeiten der verwendeten Geräte (Stoppuhr, Maßband), die allerdings gering sind gegenüber den (zufälligen) Messfehlern durch den „Faktor Mensch“: man konnte den Mittelpunkt der Kugel bei der Messung der Pendellänge nur abschätzen, die Bestimmung der Schwingungsdauer wurde ungenau durch das Reaktionsvermögen des Zeitnehmers (Abhilfe: Messung eines Vielfachen einer Periode und Division durch das Vielfache – somit wird auch der Messfehler „mitgeteilt“).

Anhand der Messung mit dem Reversionspendel (mit Lichtschranke gekoppelte Digitaluhr, genauere Längenmessung) bekamen wir genauere Werte:  $g_A = 9,8346 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  und  $g_B = 9,8484 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . Ersterer Wert entspricht einer Differenz vom Normwert von  $0,027 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  was eine relative Abweichung von  $0,285 \%$  bedeutet. Der anhand des Reversionspendels und dessen (korrigierter) Schwingungsdauer berechnete Wert ist somit etwa doppelt so präzise.

Der durch die Modellierung und Interpolation der Messwerte entstandene Fehler, der noch zu den Messfehlern hinzukommt, war uns nicht bekannt.

Fraglich bleibt, ob die genauere empirische Bestimmung der Schnittpunkte (kleinere Verschiebungen des Laufgewichts) auch genauere Ergebnisse für die Schwerebeschleunigung gegenüber unserer Modellbildung und Interpolation bringt.

Um die Genauigkeit bei dem Verfahren mit dem Reversionspendel zu steigern, müsste man das umgebende Medium (Luft) in Bezug auf Auftrieb und Reibung mit einbeziehen, da die Formel für ein im Vakuum schwingendes Pendel gilt. Die Dämpfung der Schwingung ist also auch ein wichtiger Faktor - der neben mathematischen Korrekturen auch anhand eines größeren Pendels (länger, schwerer) verringert werden kann.

## 7. Literaturangaben

- [1] <http://pl.physik.tu-berlin.de/groups/pg235/Vorschlaege/reversionspendel.html>
- Heribert Stroppe: „Physik für Studenten der Natur- und Technikwissenschaften“, Fachbuchverlag Leipzig, S. 291 ff
- Wilhelm H. Westphal: „Physikalisches Praktikum“, Friedrich Vieweg + Sohn Verlagsgesellschaft Braunschweig, S. 66 ff
- Ilberg, Krötzsch, Geschke: „Physikalisches Praktikum“, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart, Leipzig, S. 54 ff