

---

INSTITUT FÜR PHYSIK  
HUMBOLDT-UNIVERSITÄT ZU BERLIN

---



Physikalisches Grundpraktikum I  
Versuchsprotokoll  
M9 – Reversionspendel

Betreuer: Dr. Peter Schäfer

NEW 14, Raum 3'16, Versuchsplatz 4

Benjamin Maier, 529225  
Versuchspartner: Tobias Perna, 528983

20.5.2009



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Versuchsbeschreibung und Motivation</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Versuchsdurchführung und Auswertung</b>	<b>3</b>
2.1	Messen des Schneidenabstandes $L$ . . . . .	3
2.2	Aufnahme der Periodendauer in Abhängigkeit der Massenverteilung . . . . .	3
2.3	Ermittlung der reduzierten Pendellänge $l_r$ und zugehöriger Periodendauer $T$ . . . . .	4
2.4	Abhängigkeit der Periodendauer von der Auslenkung $\varphi_0$ . . . . .	5
2.5	Berechnung der Fallbeschleunigung $g$ . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Ergebnis- und Fehlerdiskussion</b>	<b>7</b>
3.1	Schnittwerte . . . . .	7
3.2	Amplitudenabhängigkeit der Periodendauer . . . . .	7
3.3	Fallbeschleunigung . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Rechnungen</b>	<b>8</b>
4.1	Ermittlung der Periodendauer als Schnittpunkt von vier Werten . . . . .	8
4.2	Partielle Ableitungen . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Quellen</b>	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Anhang</b>	<b>9</b>



# 1 Versuchsbeschreibung und Motivation

Im zu bearbeitenden Experiment sollten durch ein Reversionspendel die Abhängigkeit der Periodendauer eines Pendels von der Auslenkung und die Fallbeschleunigung  $g$  ermittelt werden. Dazu war es nötig, die Massenverteilung des Pendels so zu verändern, dass die Pendellänge der reduzierten Pendellänge entspricht, sodass das physikalische Pendel als ein mathematisches betrachtet werden kann. Das Pendel war so konstruiert, dass auf jeder Seite eine Schneide aus gehärtetem Stahl als Aufhängung verwendet werden konnte. An einer Seite des Pendels war eine Masse befestigt, zwischen den Schneiden eine verschiebbare Masse angebracht. So ergab sich für jede Massenverteilung eine andere Periodendauer, die auch abhing von der Wahl der Aufhängung.

Nach Ermittlung des Punktes, an dem der Schneidenabstand der reduzierten Pendellänge entspricht, ergibt sich für beide Aufhängungen die gleiche Periodendauer  $\bar{T}$ . Mit dieser Einstellung des Pendels konnte nun die Amplitudenabhängigkeit der Periodendauer und die Fallbeschleunigung untersucht werden.

Mathematische und physikalische Hintergründe sowie eine ausführlichere Versuchsbeschreibung findet sich in [1], S.44-47.

## 2 Versuchsdurchführung und Auswertung

### 2.1 Messen des Schneidenabstandes $L$

Zuerst erfolgte die Ermittlung des Schneidenabstandes  $L$ . Hierzu wurde ein Messschieber verwendet, mit dem man die Strecke zwischen den Schneiden abfuhr und den Wert  $l = L - d$  ablesen konnte, wobei  $d = (10.03 \pm 0.03)$  mm die Dicke der Halterung des Gerätes ist. Für den systematischen Fehler von  $l$  gelte  $e_s = (0.02 \text{ mm} + 0.00005 \cdot l)$ . Bei der Addition von  $l$  und  $d$  zur Ermittlung des Schneidenabstandes addieren sich die Unsicherheiten der beiden Größen pythagoreisch, da sie nicht voneinander abhängig sind. In Tabelle 1 sind Messwerte und Auswertung dargestellt.

Messung i	$l_i$ in mm
1	972.76
2	972.87
3	972.86
4	972.85
5	972.86
6	972.86
7	972.85
8	972.83
9	972.84
10	972.83
Mittelwert	$\bar{l} = 972.841$ mm
Standardabweichung	$\sigma_l = 0.031$ mm
Vertrauensbereich	$e_{zl} = 0.0099$ mm
Systematischer Fehler	$e_{sl} = 0.0686$ mm
Messunsicherheit	$u_l = 0.0694$ mm
Zwischenergebnis	$l = (972.84 \pm 0.07)$ mm
Endwert	$(L = 982.87 \pm 0.08)$ mm

Tabelle 1: Ermittlung des Schneidenabstandes

### 2.2 Aufnahme der Periodendauer in Abhängigkeit der Massenverteilung

In diesem Teil des Versuches wurde die bewegliche Masse des Pendels stets auf einen Abstand zu einer bestimmten Schneide eingestellt und dann durch ein mit einer Lichtschranke verbundenes digitales Zeitmessgerät die für 10 Schwingungen benötigte Zeit gemessen. Aus  $t = T \cdot n$  ließ sich dann die für den bestimmten Abstand benötigte Periodendauer ermitteln, wobei sich ihre Unsicherheit aus dem systematischen Fehler des

Gerätes zu  $e_{s,T} = \frac{1}{10}(10^{-3} \text{ s} + 1 \frac{\text{s}}{\text{d}} \cdot t)$  ergibt. Zu jedem Abstand  $x_i$  erhält man zwei Periodendauern (da zwei Schneiden vorhanden sind, zu denen man  $t$  misst), woraus sich die grafische Darstellung Abb. 1 ergibt. Der Graph 2 entspricht der Schneide, in deren Nähe eine Masse konstant befestigt war. Graph 1 gilt damit für die andere Schneide, wobei zu beachten ist, dass die durchgezogenen Graphen polynomielle Regressionen des Grades fünf sind, also nicht nach einer bekannten physikalischen Beziehung geplottet wurden, sondern nur der Anschauung dienen. Die Messdaten sind dem handschriftlichen Versuchsprotokoll oder dem Datenblatt aus MS-Excel zu entnehmen.

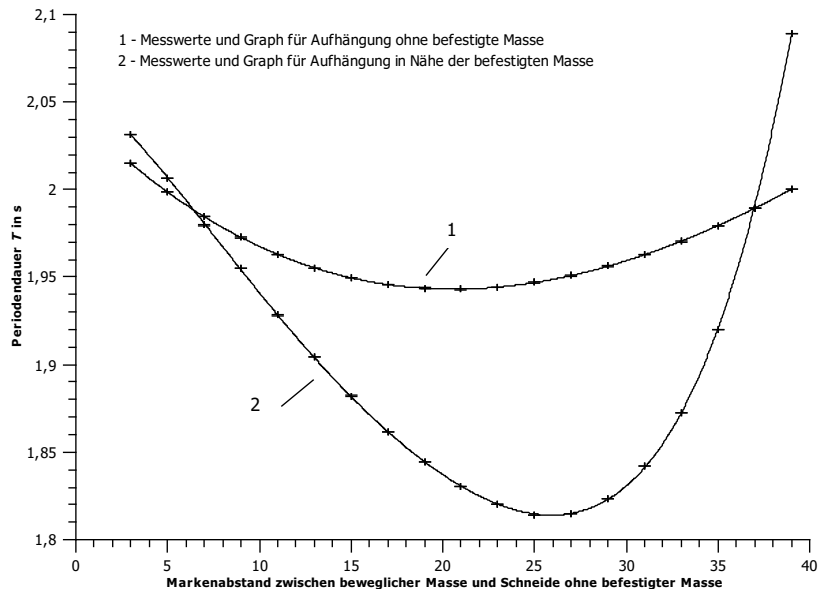


Abbildung 1: Aus den Werten resultierende Graphen

### 2.3 Ermittlung der reduzierten Pendellänge $l_r$ und zugehöriger Periodendauer $T$

An den Schnittpunkten der Graphen entspricht der Schneidenabstand  $L$  genau der reduzierten Pendellänge  $l_r$ , bei der sich das physikalische Pendel wie ein mathematisches verhält. Hier kommt es auch nicht darauf an, auf welcher Schneide gependelt wird, da die Periodendauern gleich sind. Um später die Fallbeschleunigung bestimmen zu können, ist es wichtig, diese Periodendauer zu ermitteln. Also werden vier Punkte gemessen, je zwei, in denen die Periodendauern der unterschiedlichen Aufhängungen kurz vor einem Schnittpunkt sind, und zwei, in denen sie sich kurz nach einem Schnittpunkt befinden. Dies wurde für beide Schnittpunkte durchgeführt und die in Tabelle 2 dargestellten Messwerte aufgenommen. Zu beachten ist, dass wiederum die Zeit  $t_i = T_i \cdot n$  für 10 Schwingungen gemessen, und dann  $T_i$  errechnet wurde, die Unsicherheit ergibt sich wie in Abschnitt 2.2.

Abstand zu $x_1 = 6$ in Umdrehungen	Periodendauer für Schneidenaufhängung	
	ohne befestigte Masse	bei befestigter Masse
5.5	$T_1 = (1989.20 \pm 0.12) \text{ ms}$	$T_3 = (1989.60 \pm 0.12) \text{ ms}$
6	$T_4 = (1989.20 \pm 0.12) \text{ ms}$	$T_2 = (1989.10 \pm 0.12) \text{ ms}$
Abstand zu $x_2 = 36.5$ in Umdrehungen		
7	$T_1 = (1989.00 \pm 0.12) \text{ ms}$	$T_3 = (1988.40 \pm 0.12) \text{ ms}$
8	$T_4 = (1989.10 \pm 0.12) \text{ ms}$	$T_2 = (1990.40 \pm 0.12) \text{ ms}$

Tabelle 2: Punktequadrupel für die Ermittlung beider Schnittpunkte

Nun wird durch eine Annäherung mit Geraden der Schnittpunkt ausgerechnet. Die Ermittlung der dafür nötigen Formel (4) ist in Abschnitt 4.1 nachzulesen. So folgt für die  $\bar{T}$ -Werte

$$\begin{aligned}\bar{T}_{x_1} &= 1989.20 \text{ ms}, & \text{und} \\ \bar{T}_{x_2} &= 1989.03 \text{ ms}.\end{aligned}$$

Die Unsicherheiten der beiden Werte ergeben sich aus dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz, wobei die dafür nötigen partiellen Ableitungen wie alle nötigen Ableitungen dieses Dokumentes in Abschnitt 4.2 berechnet wurden:

$$u_{T_{x_i}} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_{x_i}}{\partial T_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{x_i}}{\partial T_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{x_i}}{\partial T_3}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{x_i}}{\partial T_4}\right)^2}.$$

Damit errechnen sich die Endwerte zu

$$\begin{aligned}T_{x_1} &= (1989.20 \pm 0.01) \text{ ms}, & \text{und} \\ T_{x_2} &= (1989.03 \pm 0.01) \text{ ms}.\end{aligned}$$

## 2.4 Abhängigkeit der Periodendauer von der Auslenkung $\varphi_0$

Ausgehend vom vorherigen Teil des Versuchs wurde das Pendel nun in verschiedene Abstände  $a = \sin(\varphi_0) \cdot L$  zur Ruhelage gebracht und dann die für 10 Schwingungen benötigte Zeit gemessen, um die Abhängigkeit von Periodendauer und Auslenkung zu überprüfen. Die Referenzformel ist nach [1], S.44:

$$T_{\varphi_0} = T \cdot \left(1 + \frac{1}{4} \sin^2\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) + \frac{9}{64} \sin^4\left(\frac{\varphi_0}{2}\right)\right). \quad (1)$$

Diese Abhängigkeit wurde nun für beide Schnittpunkte überprüft. Die Messwerte sind in Tabelle 3 dargestellt.

	$a$ in mm	$\varphi_0$ im Bogenmaß	$T \cdot n$ in s	$T$ in s	Wert nach (1)	rel. Abweichung in %
Umg. $x_1 = 6$	30	0.031	19.897	1.9897	1.9893	0.02
	40	0.041	19.898	1.9898	1.9894	0.02
	50	0.051	19.902	1.9902	1.9895	0.03
	60	0.061	19.902	1.9902	1.9897	0.03
	70	0.071	19.905	1.9905	1.9898	0.03
	110	0.112	19.919	1.9919	1.9908	0.06
	140	0.143	19.926	1.9926	1.9917	0.04
Umg. $x_2 = 36.5$	30	0.031	19.883	1.9883	1.9891	0.04
	40	0.041	19.882	1.9882	1.9892	0.05
	50	0.051	19.885	1.9885	1.9894	0.04
	60	0.061	19.887	1.9887	1.9895	0.04
	70	0.071	19.891	1.9891	1.9897	0.03
	110	0.112	19.904	1.9904	1.9906	0.01
	140	0.143	19.913	1.9913	1.9916	0.01

Tabelle 3: Überprüfung der Abhängigkeitshypothese

## 2.5 Berechnung der Fallbeschleunigung $g$

Verzichtet man auf die Kleinwinkelnäherung und beachtet die Auftriebskraft der Luft, so erhält man statt der aus der Periodendauer eines mathematischen Pendels resultierende Beziehung  $g = 4\pi^2 l_r / T^2$  die aus [1], S.45 entnommene Formel

$$g_c = \frac{4\pi^2}{T_{\varphi_0}^2} \cdot l_r \cdot \left(1 + \frac{\varphi_0^2}{8} + \frac{\rho_{\text{Luft}}}{\rho_{\text{Pendel}}}\right). \quad (2)$$

Es sind also die Messung der Auslenkung  $\varphi_0$  und die daraus resultierende Periodendauer  $T_{\varphi_0}$  vonnöten. Für die Auslenkung wurde der horizontale Abstand  $a = 30$  mm gemessen, für den durch die Messung mit Geodreieck ein Ablesefehler von  $u_a = 0.5$  mm entsteht. Für die Auslenkung gilt dann wiederum  $\varphi_0 = \arcsin\left(\frac{a}{l_r}\right)$  und für dessen Unsicherheit kann das Fehlerfortpflanzungsgesetz zu

$$u_a = \sqrt{\left(u_a \cdot \frac{\partial \varphi_0}{\partial a}\right)^2 + \left(u_{l_r} \cdot \frac{\partial \varphi_0}{\partial l_r}\right)^2}$$

verwendet werden. So erhält man

$$\varphi_0 = 0.0305 \pm 0.0005.$$

Für die Periodendauer gilt (1), wobei hier  $T = T_{x2}$  gewählt wird, da dieser Wert wie in [1] beschrieben dort aufgenommen wurde, wo sich die Graphen steiler schneiden. Für ihre Unsicherheit kann wiederum das Fehlerfortpflanzungsgesetz verwendet werden, da die Größen nicht korrelieren, also

$$u_{T_{\varphi_0}} = \sqrt{\left(u_T \cdot \frac{\partial T_{\varphi_0}}{\partial T}\right)^2 + \left(u_{\varphi_0} \cdot \frac{\partial T_{\varphi_0}}{\partial \varphi_0}\right)^2},$$

sodass man schließlich

$$T_{\varphi_0} = (1989.1 \pm 0.4) \text{ ms}$$

erhält. Mit diesen Werten lässt sich aus (2) nun der Wert für die Fallbeschleunigung errechnen, wobei nach [1], S.45 für die Dichten  $\rho_{\text{Luft}} = 1.29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  und  $\rho_{\text{Pendel}} = 8000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  gilt. Da die Größen  $T_{\varphi_0}$  und  $\varphi_0$  jedoch korrelieren, kann das Fehlerfortpflanzungsgesetz nicht verwendet werden. Deshalb wird hier nach [2], S.39f. verfahren und eine Größtfehlerabschätzung

$$u_{g_c} = \left| \frac{\partial g_c}{\partial T_{\varphi_0}} \right| + \left| \frac{\partial g_c}{\partial \varphi_0} \right| + \left| \frac{\partial g_c}{\partial l_r} \right|$$

durchgeführt. Der Endwert dieser Rechnung ergibt sich damit zu

$$g_c = (9.8098 \pm 0.0018) \frac{\text{m}}{\text{s}^2}. \quad (3)$$



## 3 Ergebnis- und Fehlerdiskussion

### 3.1 Schnittwerte

Die in Abschnitt 2.3 ermittelten Werte sollten nach der Theorie genau gleich sein. Hier stellt sich eine Abweichung um 17 Zehntausendstel, also 0.009% ein, wobei die Unsicherheiten der Werte allerdings mit nur 0.0005% sehr viel kleiner sind als diese Abweichung. Die Periodendauern sind damit nicht in innerer Konsistenz. Der Fehler liegt hier wahrscheinlich in ungenügend präziser Einstellung der Massenverteilung. Da das System sehr empfindlich auf Änderungen der Masse reagierte, kann es sein, dass die zwei Quadrupel nicht genau in den gleichen Abständen der Masse gemessen und damit die Geraden falsch ermittelt wurden. Dadurch würde sich der Schnittpunkt logischerweise verschieben. Um Gewissheit zu erlangen, ob es sich um einen einmaligen Fehler oder eine oft auftretende Erscheinung handelt, könnte der Versuch hinreichend oft wiederholt werden.

### 3.2 Amplitudenabhängigkeit der Periodendauer

Wie man in Tabelle 3 und Abb. 2 sehen kann, liegen die Messwerte für den ersten Schnittpunkt über, für den zweiten unter der erwarteten Kurve. Mit einer größten Abweichung von 0.06% liegen die Werte größtenteils in der Erwartung. Die geringe Anzahl der Messwerte geben allerdings keine große Sicherheit gegenüber der Hypothese. Man erkennt allgemein eine Zunahme der Periodendauer mit  $\varphi_0$ , lässt man jedoch das Programm "QtiPlot" über beide Messreihen linear regressieren, erhält man eine niedrigere Irrtumswahrscheinlichkeit als bei einer Regression mit unserer Hypothese. Für ein Treffen von Aussagen größerer Sicherheit sollten mehr Messwerte für einzelne Amplituden und mehr Amplituden in die Messreihen aufgenommen werden. Eine höhere Genauigkeit könnte möglicherweise auch die Addition weiterer Terme der Taylorentwicklung bringen.

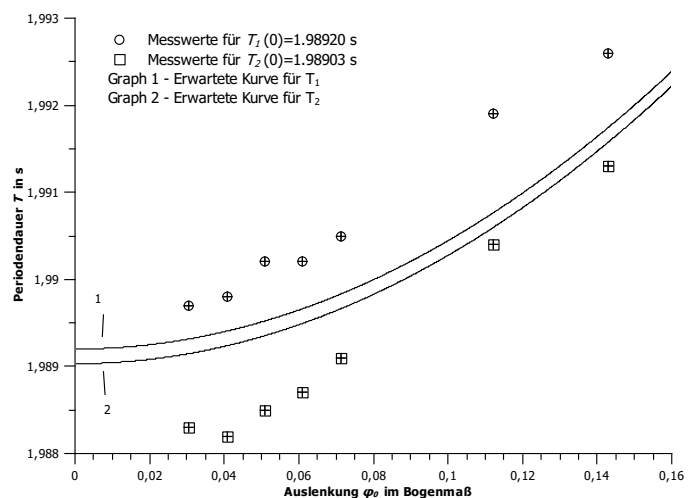


Abbildung 2: Messwerte und erwartetes Verhalten

### 3.3 Fallbeschleunigung

Der ermittelte Wert weicht um rund  $0.033 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  vom aus [3] entnommenen Referenzwert  $g = (9.812613 \pm 0.000020) \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  ab, also um 0.03%. Damit erfolgt die Abweichung früher als erwartet. Auch die Unsicherheit ist trotz ihrer geringen Größe von 0.02% größer, als vor dem Versuch erwartet und überlappt den Referenzwert nicht. Also liegen wahrscheinlich nicht bedachte Fehlerquellen vor. Da der Wert von  $g$  kleiner ist als erwartet, kann angenommen werden, dass der Bewegung Kräfte entgegenwirkten, wie z.B. die Luftreibung, die von der Geschwindigkeit des Pendels abhängt, oder die minimale Reibung der Schneiden auf dem gehärteten Stahl. Um die Unsicherheit zu reduzieren, sollte die systematische Unsicherheit des Längenmessgerätes verringert werden, da diese den zufälligen Fehler der Längenmessung um einen Faktor 7 übersteigt und zu großen Teilen in die Unsicherheit von  $g$  eingeht.

## 4 Rechnungen

### 4.1 Ermittlung der Periodendauer als Schnittpunkt von vier Werten

Es liegen in der Umgebung des Schnittpunktes vier Punkte vor, wobei sich aus je zwei Punkten eine Gerade ergibt (s. Skizze). Die  $x$ -Werte der Punkte können willkürlich gewählt werden, da nur der  $y$ -Wert (also die  $T$ -Komponente) von Interesse ist. Aus der Skizze kann man die Ortsvektoren

$$\vec{t}_1 = (0, T_1), \quad \vec{t}_2 = (1, T_2), \quad \vec{t}_3 = (0, T_3), \quad \vec{t}_4 = (1, T_4)$$

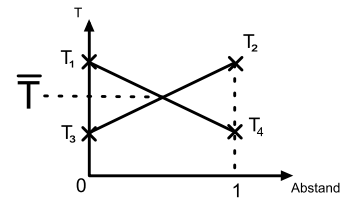


Abbildung 3: Skizze

entnehmen. Zu beachten ist, dass die Vektoren hier keine physikalischen Größen mit Dimension darstellen, sondern nur eine geometrische Beziehungen zwischen Abstand und Periodendauer sind. Mit den Stützvektoren  $\vec{t}_1, \vec{t}_3$  und den Richtungsvektoren  $\vec{t}_2 - \vec{t}_3$  und  $\vec{t}_4 - \vec{t}_1$  ergeben sich die Geradengleichungen

$$\begin{aligned} \vec{g}_1 &= (0, T_3) + (1, T_2 - T_3) \cdot s, \\ \vec{g}_2 &= (0, T_1) + (1, T_4 - T_1) \cdot w. \end{aligned}$$

Die für den Schnittpunkt nötige Bedingung ist dann  $\vec{g}_1 = \vec{g}_2$ . Aus der ersten Komponente der Gleichsetzung folgt  $s = w$ . Damit ergibt sich die zweite Komponente zu

$$\begin{aligned} T_3 + (T_2 - T_3) \cdot s &= T_1 + (T_4 - T_1) \cdot s, \quad \text{und schließlich} \\ s &= \frac{T_1 - T_3}{T_1 + T_2 - T_3 - T_4}. \end{aligned}$$

Setzt man  $s$  nun in  $\vec{g}_1$  ein, erhält man schließlich aus dessen  $y$ -Komponente den Wert

$$\bar{T} = \frac{(T_1 - T_3)(T_2 - T_3)}{T_1 + T_2 - T_3 - T_4} + T_3. \quad (4)$$

### 4.2 Partielle Ableitungen

*Mittlere Periodendauer*

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{T}}{\partial T_1} &= -\frac{(T_1 - T_3)(T_2 - T_3)}{(T_1 + T_2 - T_3 - T_4)^2} + \frac{(T_2 - T_3)}{T_1 + T_2 - T_3 - T_4} \\ \frac{\partial \bar{T}}{\partial T_2} &= -\frac{(T_1 - T_3)(T_2 - T_3)}{(T_1 + T_2 - T_3 - T_4)^2} + \frac{(T_1 - T_3)}{T_1 + T_2 - T_3 - T_4} \\ \frac{\partial \bar{T}}{\partial T_3} &= 1 - \frac{(T_1 - T_3) + (T_2 - T_3)}{T_1 + T_2 - T_3 - T_4} + \frac{(T_1 - T_3)(T_2 - T_3)}{(T_1 + T_2 - T_3 - T_4)^2} \\ \frac{\partial \bar{T}}{\partial T_4} &= \frac{(T_1 - T_3)(T_2 - T_3)}{(T_1 + T_2 - T_3 - T_4)^2} \end{aligned}$$

*Periodendauer in Abhängigkeit der Auslenkung*

$$\begin{aligned} T_{\varphi_0} &= T \left( 1 + \frac{1}{4} \sin^2 \left( \frac{\varphi_0}{2} \right) + \frac{9}{64} \sin^4 \left( \frac{\varphi_0}{2} \right) \right) \\ \frac{\partial T_{\varphi_0}}{\partial T} &= 1 + \frac{1}{4} \sin^2 \left( \frac{\varphi_0}{2} \right) + \frac{9}{64} \sin^4 \left( \frac{\varphi_0}{2} \right) \\ \frac{\partial T_{\varphi_0}}{\partial \varphi_0} &= T \left( \frac{1}{4} \sin \left( \frac{\varphi_0}{2} \right) \cos \left( \frac{\varphi_0}{2} \right) + \frac{9}{32} \sin^3 \left( \frac{\varphi_0}{2} \right) \cos \left( \frac{\varphi_0}{2} \right) \right) \end{aligned}$$

$$\varphi_0 = \arcsin\left(\frac{a}{l_r}\right)$$
$$\frac{\partial\varphi_0}{\partial a} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{a}{l_r}\right)^2}} \cdot \frac{1}{l_r}$$
$$\frac{\partial\varphi_0}{\partial l_r} = -\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{a}{l_r}\right)^2}} \cdot \frac{a}{l_r^2}$$

Korrigierte Fallbeschleunigung  $g_c$

$$g_c = \frac{4\pi^2}{T_{\varphi_0}^2} \cdot l_r \cdot \left(1 + \frac{\varphi_0^2}{8} + \frac{\rho_{\text{Luft}}}{\rho}\right)$$
$$\frac{\partial g_c}{\partial l_r} = \frac{4\pi^2}{T_{\varphi_0}^2} \cdot \left(1 + \frac{\varphi_0^2}{8} + \frac{\rho_{\text{Luft}}}{\rho}\right)$$
$$\frac{\partial g_c}{\partial \varphi_0} = \frac{\pi^2}{T_{\varphi_0}^2} \cdot l_r \cdot \varphi_0$$
$$\frac{\partial g_c}{\partial T_{\varphi_0}} = -\frac{8\pi^2}{T_{\varphi_0}^3} \cdot l_r \cdot \left(1 + \frac{\varphi_0^2}{8} + \frac{\rho_{\text{Luft}}}{\rho}\right)$$

## 5 Quellen

- [1] Skript: "Physikalisches Grundpraktikum - Mechanik und Thermodynamik" von Dr. Uwe Müller, Berlin 2005
- [2] Skript: "Physikalisches Grundpraktikum - Einführung in die Messung, Auswertung und Darstellung experimenteller Ergebnisse in der Physik" von Dr. Uwe Müller, Berlin 2007
- [3] "Gravity Information System der PTB" (<http://www.ptb.de/cartoweb3/SISproject.php>), für 52.4315° n.B. und 13.53° ö.L. (Adlershof)

## 6 Anhang

I Datenblatt der Rechnungen in MS-Excel

II-V Handschriftliche Protokollierung des Versuches

## Datenblatt der Rechnungen in MS-Excel

Abstand	T*n in s	T in s	u_T in s	T*n in s	T in s	u_T in s
3	20,15	2,015	0,00012332	20,315	2,0315	0,00012351
5	19,985	1,9985	0,00012313	20,066	2,0066	0,00012322
7	19,845	1,9845	0,00012297	19,797	1,9797	0,00012291
9	19,727	1,9727	0,00012283	19,55	1,955	0,00012263
11	19,63	1,963	0,00012272	19,282	1,9282	0,00012232
13	19,552	1,9552	0,00012263	19,042	1,9042	0,00012204
15	19,497	1,9497	0,00012257	18,822	1,8822	0,00012178
17	19,458	1,9458	0,00012252	18,618	1,8618	0,00012155
19	19,437	1,9437	0,0001225	18,444	1,8444	0,00012135
21	19,43	1,943	0,00012249	18,302	1,8302	0,00012118
23	19,441	1,9441	0,0001225	18,201	1,8201	0,00012107
25	19,469	1,9469	0,00012253	18,141	1,8141	0,000121
27	19,508	1,9508	0,00012258	18,15	1,815	0,00012101
29	19,563	1,9563	0,00012264	18,235	1,8235	0,00012111
31	19,63	1,963	0,00012272	18,42	1,842	0,00012132
33	19,703	1,9703	0,0001228	18,725	1,8725	0,00012167
35	19,794	1,9794	0,00012291	19,202	1,9202	0,00012222
37	19,893	1,9893	0,00012302	19,896	1,9896	0,00012303
39	20,002	2,0002	0,00012315	20,891	2,0891	0,00012418

	T*n	T	u	T*n	T	u
T1	19,892	1,9892	0,00012302	19,89	1,989	0,000123021
T2	19,896	1,9896	0,00012303	19,904	1,9904	0,000123037
T3	19,89	1,989	0,00012302	19,884	1,9884	0,000123014
T4	19,892	1,9892	0,00012302	19,891	1,9891	0,000123022

1	
T	u
1,9892	9,1696E-05

2	
T	u
1,98903158	9,7706E-05

Pendellänge		sin(phi_0)*L	30	0,5
Messung	L in mm	phi_0	0,03052757	0,00050896
1	972,76	T(phi_0)	1,98914744	9,7788E-05
2	972,87	Dichte Luft	1,29	
3	972,86	Dichte Pende	8000	
4	972,85	g_c	9,8094106	0,00175676
5	972,86	rel u_g in %		0,01790897
6	972,86			
7	972,85	referenz	9,812613	0,00002
8	972,83			
9	972,84	Abweichung	0,03263557 %	
10	972,83	Abweichung	0,0032024 m/s <sup>2</sup>	
mittelwert	972,841			
stabw	0,03142893			
vertrauensb	0,0099387			
syst	0,06864205			
u	0,06935783			
dicke D	10,03	0,03		
L=	982,871	0,07556791		

umgebung x1=6							
sin(phi_0)*L in mm	phi_0	T*n in s	T in s	Gl.(5) (Referenz)	Delta T	in %	
30	0,03052757	19,897	1,9897	1,98931587	0,00038413	0,01930599	
40	0,04070834	19,898	1,9898	1,98940605	0,00039395	0,01979862	
50	0,05089334	19,902	1,9902	1,98952207	0,00067793	0,03406361	
60	0,06108363	19,902	1,9902	1,98966398	0,00053602	0,02693289	
70	0,07128027	19,905	1,9905	1,98983186	0,00066814	0,03356626	
110	0,11215199	19,919	1,9919	1,99076489	0,00113511	0,05698629	
140	0,14292597	19,926	1,9926	1,99174264	0,00085736	0,04302717	

umgebung x2=36,5							
sin(phi_0)*L in mm	phi_0	T*n in s	T in s	Gl.(5) (Referenz)	Delta T	in %	
30	0,03052757	19,883	1,9883	1,98914744	0,00084744	0,04260307	
40	0,04070834	19,882	1,9882	1,98923761	0,00103761	0,05216112	
50	0,05089334	19,885	1,9885	1,98935362	0,00085362	0,0429093	
60	0,06108363	19,887	1,9887	1,98949552	0,00079552	0,03998608	
70	0,07128027	19,891	1,9891	1,98966339	0,00056339	0,0283158	
110	0,11215199	19,904	1,9904	1,99059634	0,00019634	0,0098632	
140	0,14292597	19,913	1,9913	1,991574	0,000274	0,01375818	