



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT  
GÖTTINGEN

PHYSIKALISCHES  
GRUNDPRAKTIKUM

---

VERSUCH 3

# DAS TRÄGHEITSMOMENT

---

*Praktikanten:*

Alexander Osterkorn

Tobias Wegener

*E-Mail:*

a.osterkorn@stud.uni-goettingen.de

tobias.wegener@stud.uni-goettingen.de

*Tutor:*

Marten Düvel

*Gruppe:*

3

*Durchgeführt am:*

15.4.2013

*Protokoll abgegeben:*

22.4.2013

Testiert:

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>2</b>
2.1	Rotation und Trägheitsmoment . . . . .	2
2.2	Das physikalische Pendel . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>4</b>
3.1	Teil A: Trägheitsmoment aus Drehschwingungen . . . . .	4
3.2	Teil B: Trägheitsmoment aus Winkelbeschleunigung . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>7</b>
4.1	Teil A: Trägheitsmoment aus Drehschwingungen . . . . .	7
4.1.1	Bestimmung der Winkelrichtgröße . . . . .	7
4.1.2	Bestimmung der Trägheitsmomente der Körper . . . . .	7
4.1.3	Trägheitsmoment des Tischchens . . . . .	9
4.2	Teil B: Trägheitsmoment aus Winkelbeschleunigung . . . . .	10
4.2.1	Bestimmung der Beschleunigung . . . . .	10
4.2.2	Physikalisches Pendel . . . . .	11
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>12</b>
5.1	Teil A: Trägheitsmoment aus Drehschwingung . . . . .	12
5.2	Teil B: Trägheitsmoment aus Winkelbeschleunigung . . . . .	13
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>13</b>

# 1 Einleitung

Der aktuelle Versuch beschäftigt sich mit dem *Trägheitsmoment*. Diese Größe ist ein Maß für die Trägheit eines Objektes bzgl. der Rotation um eine bestimmte Achse. Es kann theoretisch aus der Form des Objektes und auch empirisch auf verschiedene Art und Weise berechnet werden.

## 2 Theorie

### 2.1 Rotation und Trägheitsmoment

Das Trägheitsmoment für einen beliebig geformten Körper bezüglich einer Rotationsachse durch den Schwerpunkt berechnet sich nach der Formel:

$$J = \int_V r^2 dm \quad (1)$$

Ist ein Trägheitsmoment  $I_A$  für eine Achse  $A$  zu berechnen, die im Abstand  $a$  durch den Schwerpunkt geht, so kann man dieses auf eine Berechnung des Trägheitsmomentes  $I_{CM}$  durch den Schwerpunkt zurückführen, die Formel dazu liefert der Satz von Steiner ( $M$  ist die Gesamtmasse des Körpers):

$$J_A = J_{CM} + Ma^2 \quad (2)$$

Insbesondere ist also das Trägheitsmoment von Achsen durch den Schwerpunkt am größten. In der folgenden Tabelle sind alle Trägheitsmomente aufgelistet, die für die Auswertung des Drehschwingungsversuchs benötigt werden [Stöcker, 2005]:

Körper	Trägheitsmoment
Kugel	$\frac{2}{5}MR^2$
Zylinder	$\frac{1}{2}MR^2$
Hohlzylinder	$\frac{1}{2}M(R_i^2 + R_a^2)$
Scheibe	$\frac{1}{2}MR^2$
Stab	$\frac{1}{12}ML^2$
Hantelkörper ( $L$ Abstand CM - Hantelmasse $M_H$ )	$\frac{1}{3}ML^2 + 2M_H L^2$
Würfel (durch Seitenfläche)	$\frac{1}{6}Ma^2$
Würfel (durch Diagonale)	$\frac{1}{6}Ma^2$

Tabelle 1: Übersicht über die Trägheitsmomente verschiedener Körper

Dabei bezeichnet  $M$  stets die Masse des ganzen Körpers und  $R$  den Radius.  $a$  ist die Kantenlänge des Würfels,  $R_i$  und  $R_a$  sind Innen- und Außenradius des Hohlzylinders.

Das Trägheitsmoment lässt sich nun auch empirisch aus einer Drehschwingung berechnen. Für eine solche Schwingung gilt nach [Demtröder, 2013, S. S.137]:

$$\tau = -D\varphi \quad (3)$$

$$J\ddot{\varphi} = -D\varphi \quad (4)$$

$$J = \frac{T^2 \cdot \tau}{4\pi^2} \quad (5)$$

Dabei ist  $\tau$  die sogenannte "Winkelrichtgröße", eine Federkonstante bzgl. der Rotation.  $J$  bezeichnet das Trägheitsmoment des Drehtisches und  $\varphi$  den Winkel,  $T$  die Periodendauer.

Interessiert man sich nun nicht nur für den skalaren Zusammenhang zwischen Winkelgeschwindigkeit und Drehimpuls, sondern möchte auch die vektorielle Beziehung ausdrücken, so betrachtet man den Trägheitstensor  $\mathfrak{J}$ , z.B.  $\vec{L} = \mathfrak{J}\vec{\omega}$ . Dieser Tensor hat die Form einer 3x3-Matrix und lässt sich diagonalisieren. Die Diagonalelemente  $I_a, I_b, I_c$  des Tensors stellen die Hauptträgheitsmomente dar. Eines dieser drei Trägheitsmomente ist stets das größtmögliche, das der Körper bei Rotation erreichen kann und ein Wert stellt das kleinstmögliche Trägheitsmoment dar. Durch geeignete Normierung spannen sie ein Koordinatensystem  $(\xi, \eta, \zeta)$  mit der folgenden Eigenschaft auf:

$$\xi^2 I_a + \eta^2 I_b + \zeta^2 I_c = 1 \quad (6)$$

Das ist genau die Gleichung eines Ellipsoids, der dreidimensionalen Entsprechung einer Ellipse. Man kann weiter sehen, dass ein Vektor  $\vec{R}$  mit Betrag  $R$ , der vom Schwerpunkt des Körpers auf den Rand des Ellipsoids verläuft, der Bedingung  $I = \frac{1}{R^2}$  genügt, wobei  $I$  das skalare Trägheitsmoment bei Rotation um die durch  $\vec{R}$  vorgegebene Raumrichtung bedeutet. Kennt man den Trägheitsellipsoiden, kann man also das skalare Trägheitsmoment bei Rotation um jede beliebige Raumrichtung berechnen. Dem größtmöglichen Abstand von Ellipsoidenrand zu Schwerpunkt entspricht somit nach obiger Gleichung das kleinstmögliche Trägheitsmoment und umgekehrt.

## 2.2 Das physikalische Pendel

Ein starrer Körper, der um eine Achse im Raum drehbar gelagert ist, die im Abstand  $b$  vom Schwerpunkt durch den Körper geht, bildet ein physikalisches Pendel. Wird das Pendel um den Winkel  $\varphi$  aus seiner Ruhelage ausgelenkt, beginnt es, unter Einfluss der Schwerkraft zu schwingen. Hat der Körper die Masse  $M$  und

das Trägheitsmoment  $J$ , ergibt sich die entsprechende Bewegungsgleichung (für kleine Winkel bis ca. 10 Grad) nach [S. 504f][Giancoli, 2010] zu

$$J\ddot{\varphi} = -bMg\varphi \quad (7)$$

Analog zum mathematischen Pendel ergibt sich eine Schwingungsdauer  $T$ , über die sich nach [ebd.] das Trägheitsmoment bestimmen lässt via

$$J = \frac{T^2 b M g}{4\pi^2} \quad (8)$$

### 3 Durchführung

Der Versuch lässt sich in zwei Teile gliedern. In Teil A wird für verschiedene Körper die Periodendauer bei einer Drehschwingung bestimmt und daraus das Trägheitsmoment berechnet. In Teil B wird ein Rad in eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung versetzt, sodass aus den bekannten Parametern ebenfalls ein Trägheitsmoment ausgerechnet werden kann.

#### 3.1 Teil A: Trägheitsmoment aus Drehschwingungen

In diesem Teil soll das Trägheitsmoment unterschiedlich geformter Körper experimentell bestimmt und anschließend mit einem theoretisch berechneten Wert verglichen werden. Dazu ist es notwendig, alle Körper zu vermessen, die Winkelrichtgröße der Feder zu bestimmen und für jeden Körper die Schwingungsdauer zu messen. Bei den Körpern handelt es sich um eine Kugel, einen Zylinder, einen Hohlzylinder, einen Hantelkörper, eine Scheibe, einen dünnen Stab und einen Würfel.

Um später einen theoretischen Wert ausrechnen zu können, müssen für jeden Körper das Gewicht und eine oder mehrere Längen bestimmt werden. Die Gewichte werden mit einer Balkenwaage gewogen, die Längen mit einem Lineal. Um den Radius der Kugel bestimmen zu können, ist es hilfreich, den Umfang mit einem Seil zu messen.

Der Versuchsaufbau besteht im Wesentlichen aus einer fest verankerten Spiralfeder, an deren Ende ein Objekt drehbar befestigt werden kann. Zunächst wird die Winkelrichtgröße der Feder bestimmt. Dazu wird die Spiralfeder senkrecht eingespannt, sodass eine an der Feder befestigten Scheibe mit Hilfe von kleinen Gewichten einen Ausschlag um einen Winkel  $\varphi$  aufweist. Danach wird für verschiedene Gewichte dieser Ausschlag bestimmt. Diese Messung muss zudem für die andere Drehrichtung wiederholt werden, da die Rückstellkraft der Feder bauartbedingt nicht genau linear zum Winkel ist. Der Mittelwert aus beiden Messungen ergibt letztendlich den besten Faktor für eine lineare Näherung.

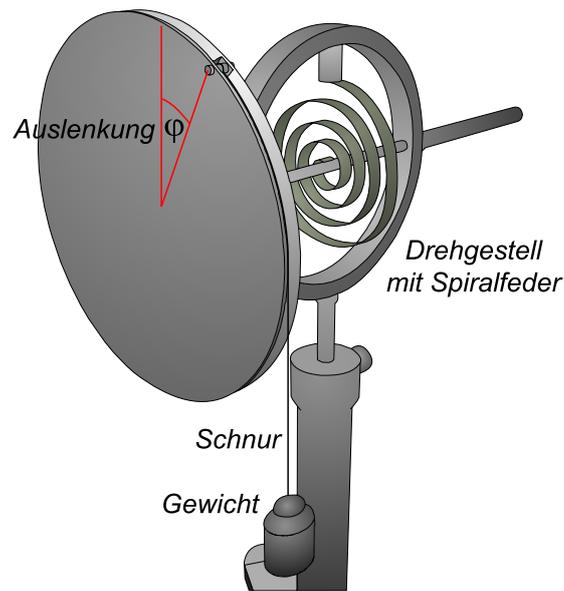


Abbildung 1: Versuchsaufbau Federschwingung

Nachdem die Winkelrichtgröße bestimmt wurde, kann mit den Schwingungsmessungen begonnen werden. Um das Gravitationskraftfeld der Erde vernachlässigen zu können, wird nun die Konstruktion um  $90^\circ$  gedreht, sodass die Feder in der horizontalen Ebene liegt. Nun werden die einzelnen Körper nacheinander eingespannt. Man lenkt jeden Körper um einen bestimmten Winkel aus, um dann die benötigte Zeit für 10 Schwingungen zu messen. Dies erhöht die Messgenauigkeit um ein Vielfaches, da der Fehler, der aus der Ungenauigkeit beim Stoppen resultiert, bezogen auf die Gesamtzeit sehr klein wird. Diese Messung wiederholen wir für jeden Körper drei Mal. Danach wird auf die gleiche Weise die Periodendauer eines Körpers in Form eines Tisches gemessen, wobei dieser nach jeder Messung mittels einer entsprechenden Vorrichtung um einen Winkel von  $15^\circ$  gedreht wird. Daraus lässt sich exemplarisch für diesen Körper eine Trägheitsellipse bilden, die den Trägheitsellipsoid in zwei von drei Raumrichtungen repräsentiert.

### 3.2 Teil B: Trägheitsmoment aus Winkelbeschleunigung

Im zweiten Teil des Versuches soll das Trägheitsmoment eines Speichenrades bestimmt werden. Der Versuchsaufbau ist so konstruiert, dass die Achse des Rades horizontal gelagert ist. An der Achse des Rades ist zudem ein kleineres Rad befestigt, an deren Außenseite ein Faden aufgerollt ist. An das Ende dieses Seiles können verschiedene Massestücke (0,1, 0,2, 0,5 und 1 kg) gehängt werden, sodass das Rad in eine gleichmäßig beschleunigte Drehbewegung versetzt wird. Währenddessen zeichnet ein Markengeber im zeitlichen Abstand von 0,1 s Zeitmarken auf ein Registrierpapier, das auf der Oberfläche der Felge befestigt ist.

Nach jedem Durchlauf wird der Markengeber etwas seitlich verschoben, sodass die Marken der einzelnen Umläufe bei der Auswertung gut zu unterscheiden sind.

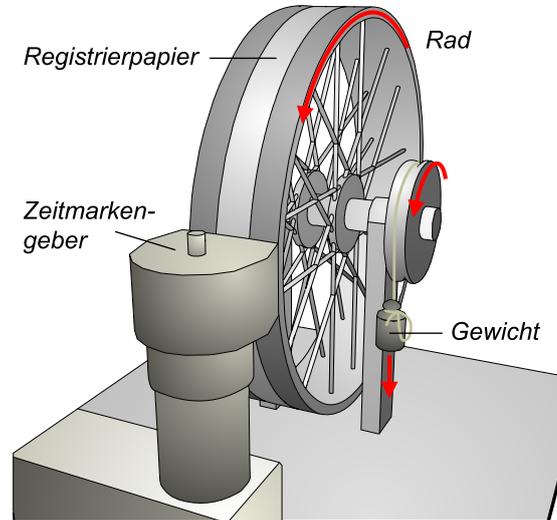


Abbildung 2: Versuchsaufbau Winkelbeschleunigung

Im letzten Teil des Versuches soll das Trägheitsmoment des Speichenrades noch auf eine weitere Weise bestimmt werden. Dazu befestigt man ein kleines Massestück an einer der Speichen, sodass das Rad bei einer kleinen Auslenkung aus der Ruhelage eine harmonische Schwingung ausführt (physikalisches Pendel). Dabei ist zu beachten, dass der Auslenkungswinkel nicht größer als etwa  $10^\circ$  ist, da sonst in der Auswertung die Kleinwinkelnäherung des Sinus seine Gültigkeit verlieren würde. Auch hier müssen zunächst alle signifikanten Größen gemessen werden. Diese sind der Umfang des Rades, Radius des Fadenrades, Masse des Zusatzgewichtes und der Abstand des Gewichtes von der Drehachse. Dann wird die Zeit für zehn Schwingungsperioden gemessen. Da das Rad möglicherweise nicht ganz homogen ist, soll die gleiche Messung noch einmal für die diametral gegenüberliegende Speiche wiederholt werden.

## 4 Auswertung

### 4.1 Teil A: Trägheitsmoment aus Drehschwingungen

#### 4.1.1 Bestimmung der Winkelrichtgröße

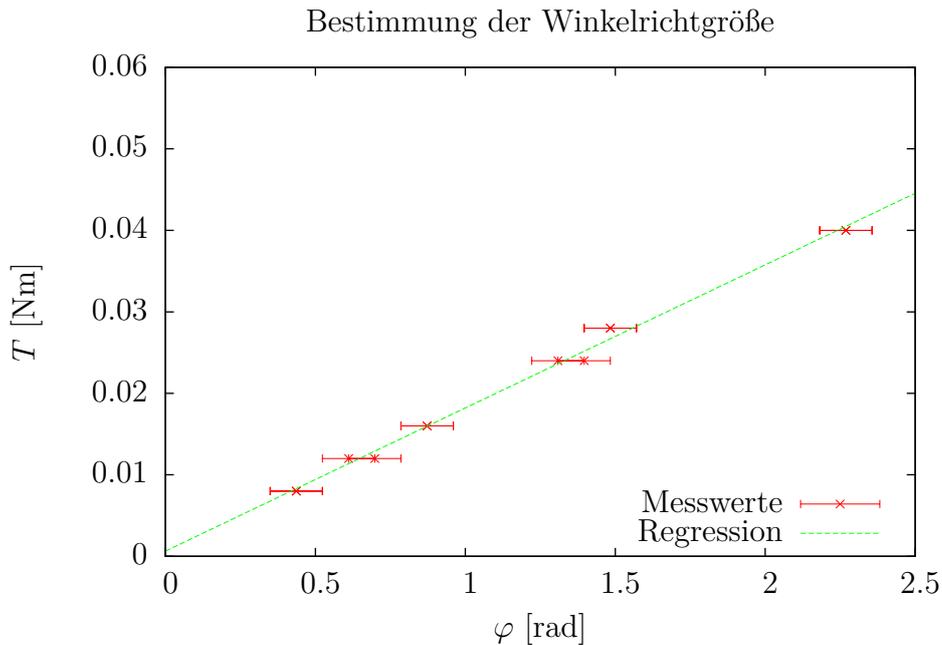


Abbildung 3: Bestimmung der Winkelrichtgröße

Das rücktreibende Drehmoment  $\tau$  hängt mit dem Auslenkungswinkel  $\varphi$  der Feder über die Beziehung  $\tau = \frac{D}{\varphi}$  zusammen, ergibt sich also als Steigung der Geraden im Winkel-Drehmoment-Diagramm (Abb. 3). Im Diagramm sind sowohl die Messung bei Auslenkung im und gegen den Uhrzeigersinn berücksichtigt. Ein linearer Fit mit Gnuplot liefert für unsere Daten einen Wert von  $D = 0.0176$  ( $\pm 0.0004$ ).

#### 4.1.2 Bestimmung der Trägheitsmomente der Körper

Im Folgenden werden die Trägheitsmomente für die Messwerte der einzelnen Körper berechnet. Aus dem Mittelwert der drei gemessenen Periodendauern  $T$  und der bekannten Winkelrichtgröße  $D$  ergibt sich das jeweilige Trägheitsmoment zu  $J = \frac{DT^2}{4\pi^2}$ . Der systematische Fehler des Messens der Periodendauer mit der Stoppuhr ist durch  $\sigma_T = 0.01 + 0.005 \cdot T$  abgeschätzt. Dann folgt aus der Fehler-

fortpflanzung für den Fehler des Trägheitsmomentes

$$\sigma_J^2 = \sigma_D^2 \left( \frac{\partial J}{\partial D} \right)^2 + \sigma_T^2 \left( \frac{\partial J}{\partial T} \right)^2 = \sigma_D^2 \left( \frac{T}{2\pi^2} \right)^4 + \sigma_T^2 \left( \frac{\pi}{2} DT \right)^2$$

Körper	$T$ [s]	$J$ [ $10^{-4}$ kg m <sup>2</sup> ]	$\sigma_J$ [ $10^{-4}$ kg m <sup>2</sup> ]
Würfel (Diagonale)	0.970	4.27	0.17
Würfel (Seitenfläche)	0.98	4.33	0.17
Zylinder	0.674	2.06	0.11
Kugel	1.025	4.76	0.18
Hohlzylinder	0.975	4.31	0.17
Stab (durch CM)	2.169	21.3	0.6
Stab (nicht durch CM)	2.517	28.7	0.8
Hantel	3.033	42	11
Scheibe	1.561	11.1	0.4

Tabelle 2: Trägheitsmomente aus der Drehschwingung

Die Theoriewerte wurden mit den Daten der Vermessung der Körper und der im Theorieteil angegebenen Formeln berechnet.

Theoriewert [ $10^{-4}$ kg m <sup>2</sup> ]	Abweichung [%]
5.10	16.3
5.10	15.1
2.29	10.1
5.44	12.4
6.32	31.8
44.9	36.1
34.4	38.0
48.9	14.7
13.5	18.1

Tabelle 3: Theoriewerte für die Trägheitsmomente

### 4.1.3 Trägheitsmoment des Tischchens

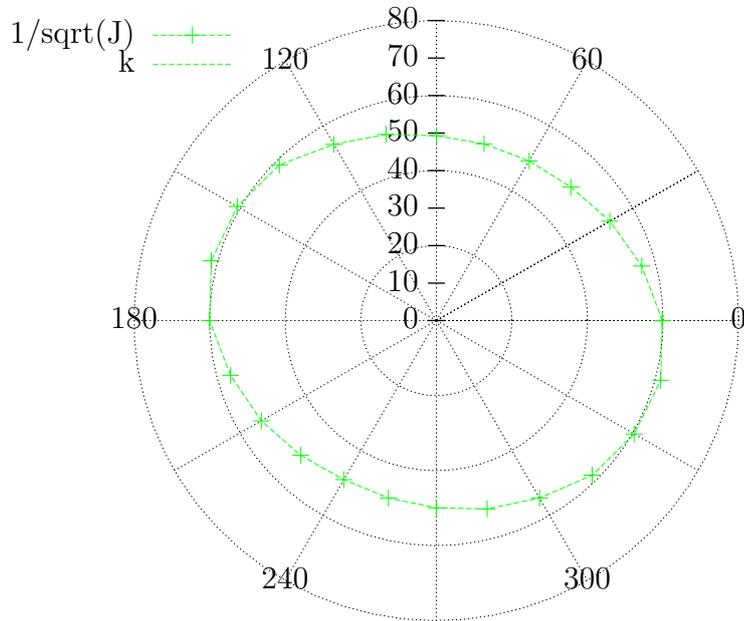


Abbildung 4: Trägheitsellipsoid für das Tischchen

In obigem Diagramm ist die Abhängigkeit des Trägheitsmomentes von dem am Tischchen eingestellten Winkel zu erkennen. Die Rotationsachse mit dem kleinsten Trägheitsmoment ist erkennbar am größten Abstand von Messpunkt zu Diagrammmittelpunkt. In unserem Fall verläuft die Rotationsachse kleinsten Trägheitsmomentes etwa bei 165 bzw. 345 Grad, die Achse größten Trägheitsmomentes senkrecht dazu bei ca. 75 bzw. 255 Grad.

## 4.2 Teil B: Trägheitsmoment aus Winkelbeschleunigung

### 4.2.1 Bestimmung der Beschleunigung

Es wird jeweils der Term  $\frac{\Delta x}{\Delta t}$  gegen die verstrichene Zeit  $t$  aufgetragen. Der Fehler für das Ablesen der Zeitmarken wird je nach verwendeter Masse auf 1, 2 oder 5 mm abgeschätzt, da bei den größeren Massen die Beschleunigung größer war und die Zeitmarken immer undeutlicher gezeichnet wurden.

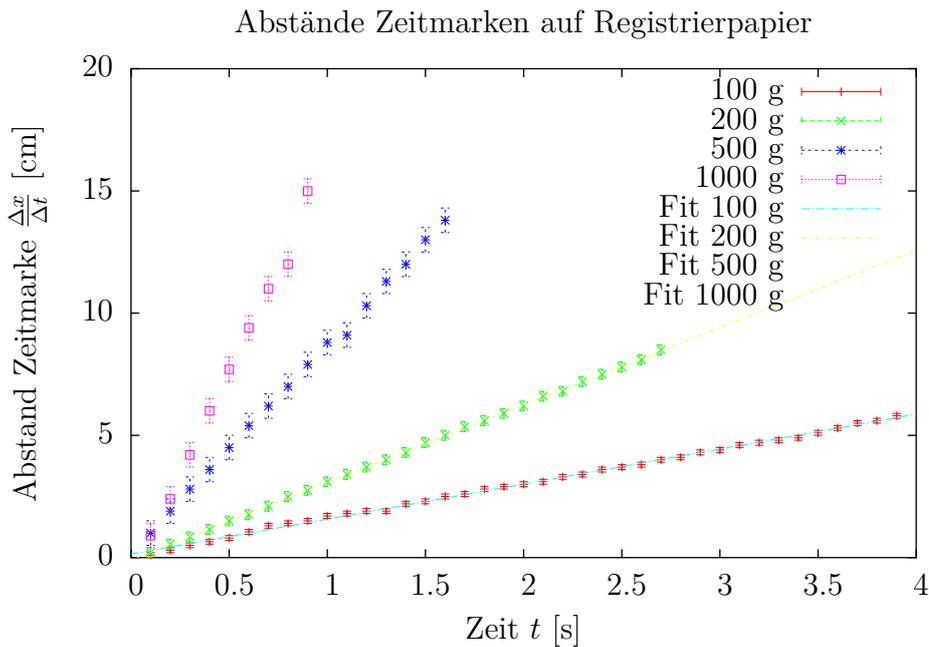


Abbildung 5: Abstände der Zeitmarken auf dem Papier

Aus den Abständen der Zeitmarken auf dem Registrierpapier kann man die Beschleunigung  $a$  eines Punktes auf dem Umfang des großen Rades ermitteln. Sie ergibt sich als Steigung der Geraden im  $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ - $t$ -Diagramm und wird durch lineare Regression ermittelt. Gnuplot liefert für obige Daten:

Masse $m$ [kg]	Beschleunigung $a$ [ $\text{cm s}^{-2}$ ]	Fehler $\sigma_a$ [ $\text{m s}^{-2}$ ]
100 g	1.41	0.03
200 g	3.168	0.009
500 g	8.45	0.08
1000 g	17.1	0.5

Tabelle 4: Beschleunigung in Abhängigkeit der Masse

Aus den angegebenen Beschleunigungen berechnen wir das Trägheitsmoment über die Formel

$$J = \frac{rRmg}{a} - mr^2 \quad (9)$$

Die Vermessung der Radien des kleinen Rades  $r$  und des großen Rades  $R$  ergab  $r = (0.065 \pm 0.005)\text{m}$  und  $R = (0.211 \pm 0.005)\text{m}$ . Dass hier ein größerer Fehler als lediglich der kleinste Skalenwert angenommen wurde, ist dadurch zu rechtfertigen, dass das Anlegen des Lineals nicht ganz einfach war und dass bei Messungen an Kreisflächen stets die Möglichkeit besteht, dass man nicht genau den Durchmesser trifft, sondern eine etwas zu kurze Strecke misst. Also lautet die zugehörige Fehlerfortpflanzung:

$$\sigma_J^2 = \sigma_r^2 \left( \frac{\partial J}{\partial r} \right)^2 + \sigma_R^2 \left( \frac{\partial J}{\partial R} \right)^2 + \sigma_a^2 \left( \frac{\partial J}{\partial a} \right)^2$$

Masse $m$ [kg]	Trägheitsmoment $J$ [kg m <sup>2</sup> ]	Fehler $\sigma_J$ [kg m <sup>2</sup> ]
100 g	0.0955	0.0194
200 g	0.0841	0.0071
500 g	0.0775	0.0091
1000 g	0.0748	0.0222

#### 4.2.2 Physikalisches Pendel

Wir haben als Mittelwert für die Periodendauer einen Wert von  $(2.79 \pm 0.05)\text{s}$  erhalten. Das Zusatzgewicht hat eine Masse von  $m = (0.256 \pm 0.001)\text{kg}$  und einen Abstand zum Mittelpunkt von  $z = (0.143 \pm 0.005)\text{m}$ . Die Formel zur Berechnung für das Trägheitsmoment wurde bereits im Theorieteil hergeleitet. Es muss lediglich noch das Trägheitsmoment der Zusatzmasse bei Rotation um den Radmittelpunkt abgezogen werden. Stellt man sich die Zusatzmasse vereinfachend als punktförmig im Abstand  $z$  vom Radmittelpunkt vor, so ergibt sich das entsprechende Trägheitsmoment zu  $mz^2$ . Mit Hilfe der Formel  $J = \frac{T^2 z m g}{4\pi^2} - mz^2$  lässt sich dann das Trägheitsmoment des Rades berechnen. Die zugehörige Fehlerfortpflanzung lautet

$$\sigma_J^2 = \sigma_T^2 \left( \frac{\partial J}{\partial T} \right)^2 + \sigma_z^2 \left( \frac{\partial J}{\partial z} \right)^2 + \sigma_m^2 \left( \frac{\partial J}{\partial m} \right)^2$$

So kommen wir auf ein Trägheitsmoment von  $(0.0656 \pm 0.0074)\text{kg m}^2$ .

## 5 Diskussion

### 5.1 Teil A: Trägheitsmoment aus Drehschwingung

Bei der Auswertung der Drehschwingungen der verschiedenen Körper wurden aus den experimentellen Daten die jeweiligen Trägheitsmomente bestimmt. Diese weichen ziemlich stark von den erwarteten theoretischen Werten ab. Dabei sind die theoretischen Werte systematisch etwa 10-20%, in zwei Fällen sogar über 30% größer als die experimentellen Werten. Dieser Umstand lässt einen systematischen Fehler vermuten. Ein Erklärungsansatz dafür ist, dass die Form der vermessenen Objekte von den theoretisch angenommenen zum Teil stark abweicht. Insbesondere wurde die Halterung aus Metall in der Theorie komplett vernachlässigt, jedoch bei der Gewichtsbestimmung der einzelnen Körper deren recht großes Gewicht mitgemessen. Der Einfluss der Halterung auf die experimentell bestimmten Trägheitsmomente ist vermutlich recht klein, da die Masse dieser sehr nah bei der Drehachse liegt. Bei den theoretischen Werten wird die Masse jedoch als gleichverteilt angenommen, als wäre die Masse der Halterung über den ganzen Körper verteilt. Da das Trägheitsmoment eines Massenelements proportional zu dem Quadrat der Entfernung von der Drehachse ist, folgt daraus ein theoretischer Wert für das Trägheitsmoment, der zum Teil deutlich höher als der real Wert sein kann. Dieser Umstand könnte eine Erklärung für die um etwa 15% zu hohen Werte sein. Jedoch beträgt die Abweichung für den Stab und den Hohlzylinder mehr als 30%. Bei dem Hohlzylinder könnte es dadurch erklärt werden, dass hier die Verfälschung durch die Halterung besonders groß ist, denn auf dem Hohlzylinder war entlang des Durchmessers eine recht massive Metallplatte befestigt. Eine Erklärung für die hohe Abweichung beim Stab könnte sein, dass seine Form sehr deutlich von der Idealvorstellung eines dünnen Stabes abweicht, dessen Radius viel kleiner als die Länge ist. Es handelt dabei eher um eine dünne, schmale Platte. Diese Vermutung wird dadurch bekräftigt, dass die Abweichung in beiden Messungen (Stab im Schwerpunkt befestigt, Stab versetzt befestigt) auftritt.

Die Ergebnisse aus der Trägheitsmomentsmessung des Tisches unter verschiedenen Winkeln liefert ein qualitativ mit der Theorie übereinstimmendes Ergebnis. Nach dieser ergibt sich ein Ellipsoid, wenn man das Trägheitsmoment in Abhängigkeit von der Drehachse im Raum aufträgt. Im Experiment wurde die Drehachse in einer Raumrichtung nicht verändert, sodass eine einfache Ellipse zu erwarten ist. Eben diese ist gut auf der graphischen Darstellung der Messwerte zu erkennen. Dabei geht die große Halbachse etwa entlang der  $345^\circ$  Linie, die kleine entlang der  $75^\circ$ -Linie.

## 5.2 Teil B: Trägheitsmoment aus Winkelbeschleunigung

Das Trägheitsmoment des Rades wurde mit zwei Methoden bestimmt, dabei lieferte die zweite Methode über die Schwingungsdauer des physikalischen Pendels das Ergebnis mit der geringsten relativen Fehlerbehaftung. Die berechneten Trägheitsmomente aus dem ersten Versuch weichen, vor allem bei der Messung mit dem 100g-Gewicht, untereinander ab. Die Messungen mit 100g und 1kg weisen auch recht hohe relative Fehler im Bereich von 20% auf, was man wohl zum Teil auf die eher geringe Ablesegenauigkeit auf dem Kohlepapierstreifen zurückführen kann, auf dem manche Markierungen eher undeutlich erkennbar waren. Bei der Messung mit dem 1kg-Gewicht kam als erschwerender Faktor auch die kurze Fallzeit dazu, die einen recht frühen Abbruch der Aufzeichnung auf das Papier verlangt hat, was wiederum zu einer insgesamt niedrigen Zahl an Messwerten geführt hat. Generell problematisch ist auch die Bestimmung des Raddurchmessers, da durch die Speichen ein direktes Anlegen der Maßstabes verhindert wird, so haben in diesem Fall auch die Längenmessungen einen verhältnismäßig hohen Fehler. Ansonsten ist aber erfreulich, dass die durch beide Methoden berechneten Werte zumindest in der selben Größenordnung liegen.

## 6 Literaturverzeichnis

- Für die Theorie: Wolfgang Demtröder. (2013). Experimentalphysik I. Springer-Verlag.
- Horst Stöcker, Taschenbuch der Physik, H.Deutsch, 2005
- Douglas C. Giancoli, Physik Lehr- und Übungsbuch, Pearson Deutschland GmbH, 2010
- Für die Skizzen der Durchführung: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/3606>