

Versuch W1 für Physiker

Mechanisches

Wärmeäquivalent

I. Physikalisches Institut, Raum 105
Stand: 15. Oktober 2013



generelle Bemerkungen

- bitte verwendeten Versuchsaufbau angeben
- bitte Versuchspartner angeben
- bitte Versuchsbetreuer angeben
- bitte nur handschriftliche Auswertung

1 Einleitung

In diesem Versuch beschäftigen Sie sich mit dem Zusammenhang zwischen mechanischer Arbeit und thermischer Energie (Wärme).

Die Entdeckung des mechanischen Wärmeäquivalentes μ , also der Konstanten, mit der Wärme in mechanische Energie umgerechnet werden kann, war die Voraussetzung für den Beleg des Energieerhaltungssatzes. Zur Zeit seiner Entdeckung wurde thermische Energie in Einheiten von Kalorien und mechanische Arbeit in Newton-Metern angegeben. In SI-Einheiten ist die gemeinsame Einheit Joule, so dass das mechanische Wärmeäquivalent $\mu = \frac{\Delta W}{\Delta Q} = 1$ ist.

2 Vorbereitung (zu Hause)

Die folgenden Stichpunkte und theoretischen Überlegungen sollen in Ihrem Heft schriftlich bearbeitet werden. Außerdem sollten Sie in der Lage sein, sie am Versuchstag im Antestat selbstständig wiederzugeben. Weitere Hinweise zum Vorgehen bei den Herleitungen finden Sie in Abschnitt 7. Literaturhinweise gibt es in Abschnitt 8.

1. Machen Sie sich mit folgenden Begriffen und Gesetzmäßigkeiten vertraut:
Erster Hauptsatz der Thermodynamik, Zusammenhang zwischen Temperatur und Wärmemenge, Wärmekapazität / spezifische Wärmekapazität, Kraft, Arbeit, Zusammenhang zwischen Kraft und Arbeit, Reibungskraft, -arbeit, Fehlerfortpflanzung
2. Wie werden Wärmemenge, mechanische Arbeit und spezifische Wärmekapazität in diesem Versuch bestimmt?
3. Skizzieren Sie den Versuchsaufbau im Heft. Zeichnen Sie die wirkenden Kräfte und ihre Richtungen ein.
4. Diskutieren Sie, welche Auswirkungen es auf die Messergebnisse haben sollte, dass der Messingzylinder nicht reibungsfrei drehbar ist.

3 Versuchsaufbau und -beschreibung

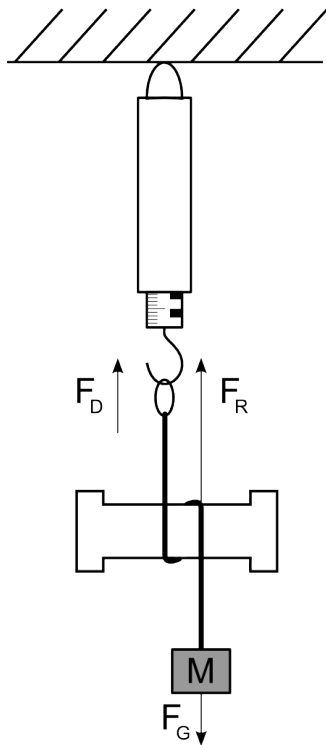


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Versuchs



Abbildung 2: Kraftmesser, Zylinder mit Kurbel, Reibband und Thermometer. Nicht im Bild: 5 kg Gewicht

Ein Messingzylinder ist drehbar gelagert. Es wird angenommen, dass das Lager reibungsfrei ist. Über dem Zylinder hängt an einem Metallarm ein Kraftmesser (Newtonmeter). Der Zylinder wird nun mit einem Reibband umwickelt und das Band an der oberen Seite mit dem Kraftmesser verbunden. Am unteren Ende des Bandes wird ein Gewicht angehängt. Die Temperatur des Messingzylinders kann über ein Thermometer, das in eine zentrische Bohrung im Zylinder gesteckt wird, gemessen werden. Über eine Handkurbel kann der Zylinder gedreht werden.

4 Benötigte Formeln

4.1 mechanisches Wärmeäquivalent

Das mechanische Wärmeäquivalent μ ist der Quotient aus der geleisteten mechanischen Arbeit ΔW und der umgesetzten Wärmemenge ΔQ .

$$\mu = \frac{\Delta W}{\Delta Q} \quad (1)$$

4.2 Geleistete Reibungsarbeit

Die geleistete Reibungsarbeit ΔW ist das Produkt aus der Reibungskraft F_R und dem zurückgelegten Weg s . Die Reibungskraft ergibt sich aus der Differenz zwischen der Gewichtskraft F_G und der Rückstellkraft der Feder des Newtonmeters F_D .

$$\Delta W = F_R \cdot \Delta s = 2\pi r n \cdot (F_G - F_D) \quad (2)$$

(mit r = Radius des Messingzylinders und n = Anzahl der Umdrehungen)

4.3 Umgesetzte Wärmemenge

Die umgesetzte Wärmemenge ΔQ ist das Produkt aus der gesamten Wärmekapazität C_{total} und der Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur ΔT vor und der nach dem Betätigen der Kurbel.

$$\Delta Q = C_{total} \cdot \Delta T = (C_{Zylinder} + C_{Reibband} + C_{Thermometer}) \cdot \Delta T \quad (3)$$

mit

$$C_{Zylinder} = c_{Messing} \cdot m_{Zylinder} \quad (4)$$

$C_{Reibband}$ und $C_{Thermometer}$ sind die Wärmekapazitäten von Reibband bzw. Thermometer. $c_{Messing}$ ist die spezifische Wärmekapazität von Messing und $m_{Zylinder}$ die Masse des Messingzylinders. Die Werte stehen auf dem Tisch neben der Apparatur.

5 Durchführung (im Praktikum)

Kalibrieren Sie zunächst den Kraftmesser (am besten zu zweit): Hängen Sie dazu das 5 kg Gewicht an den Kraftmesser. Lösen Sie dann die Feststellschraube am oberen Teil des grünen Zylinders. Nun verschieben Sie den grünen Zylinder bis der Kraftmesser die richtige Kraft anzeigt ($5 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx 49 \text{ N}$). Fixieren Sie den Zylinder mit der Feststellschraube in dieser Position. Ab jetzt sollten Sie den grünen Zylinder des Kraftmessers nicht mehr berühren, um die Kalibrierung zu erhalten.

Hängen Sie nun den Kraftmesser in den vorgesehenen Karabiner ein und befestigen Sie das Reibband am unteren Ende des Kraftmessers. Das Reibband wird einmal um den Zylinder geschlungen und am unteren Ende das 5 kg Gewicht *vorsichtig(!)* angehängt. Das Stabthermometer steckt in einem Schutzmantel aus Messing und wird in die zentrische Bohrung des Zylinders eingesetzt und bis zum Anschlag hineingeschoben.

Achtung: Ab jetzt Finger Weg vom Thermometer! Vor allem beim Drehen der Kurbel muss es frei beweglich bleiben, damit es sich nicht im Zylinder verkantet.

Spielen Sie mit der Apparatur. Achten Sie vor allem darauf, was das Newtonmeter anzeigt. Wie würden Sie den Fehler der Kraftmessung einschätzen? Dabei sollten Sie nicht zu lange an der Kurbel drehen, damit der Zylinder vor Beginn des Versuches noch nicht zu stark erwärmt wird.

Legen Sie eine dreispaltige Tabelle an:

| Zeit t/s | Temperatur $T/^\circ\text{C}$ | Kraft F_D/N |
|-------------------|-------------------------------|----------------------|
| 0 | | |
| 30 | | |
| 60 | | |
| ... | ... | ... |

Starten Sie die Stoppuhr. Messen und notieren Sie ohne den Zylinder zu drehen zunächst vier Minuten lang alle 30 s die Temperatur des Zylinders.

Danach drehen Sie die Kurbel zügig, aber gleichmäßig (etwa eine Umdrehung pro Sekunde). Messen Sie dabei weiterhin alle 30 s die Temperatur und lesen Sie zusätzlich die Kraft am Kraftmesser ab. Das Kurbeln kann kurz unterbrochen werden um die Temperatur abzulesen, die Kraft muss allerdings während des Kurbelns gemessen werden.

Nach 300 Umdrehungen ($n=300$) hören Sie auf zu Kurbeln und lesen noch einmal vier Minuten lang die Temperatur ohne Drehen ab.

Entfernen Sie das Gewicht und das Reibband und messen Sie mit dem Messschieber den Durchmesser ($2r$) des Zylinders an der Stelle, an dem Sie ihn mit dem Reibband umwickelt hatten. Notieren Sie sich den Fehler dieser Längenmessung, sowie (je nach Konzentration des Kurbelnden ;-)) einen Fehler auf n .

Vermerken Sie den Fehler der Temperaturmessung, sowie die Werte für m_{Zylinder} , c_{Messing} , C_{Reibband} und $C_{\text{Thermometer}}$ für Ihren Versuchsaufbau (auf dem Tisch neben der Apparatur).

6 Auswertung und Diskussion (im Praktikum / zu Hause)

Bitte führen Sie zu jedem Wert eine Fehlerrechnung durch. Geben Sie alle verwendeten Formeln an und erläutern Sie kurz, was Sie tun und warum. Zeichnen Sie Ihr Diagramm auf Millimeterpapier. Beschriften Sie Ihre Diagramme vollständig (zu welcher Aufgabe gehört das Diagramm?, was ist auf den Achsen aufgetragen?). Die korrekte Form zur Angabe von Ergebnissen, sowie Hinweise zur Fehlerrechnung entnehmen Sie bitte der *Allgemeinen Praktikumsanleitung*.

6.1 Bestimmung von ΔT

Tragen Sie die gemessenen Temperaturwerte mit Fehlerbalken gegen die Zeit in einem Diagramm auf. Sie sollten einen Verlauf ähnlich Abbildung 3 erhalten. Um nun aus dem Diagramm ΔT zu bestimmen, machen Sie jeweils eine graphische Geradenanpassung für den Zeitbereich vor, während und nach dem Kurbeln. Platzieren Sie eine senkrechte Linie im Zeitbereich, in dem gedreht wurde, und zwar so, dass die beiden Flächen A_1 und A_2 möglichst gleich groß sind. Auf dieser senkrechten lesen Sie T_1 und T_2 ab. Bestimmen sie die Differenz $\Delta T = T_2 - T_1$ und den Fehler auf ΔT aus den Extremalgeraden.

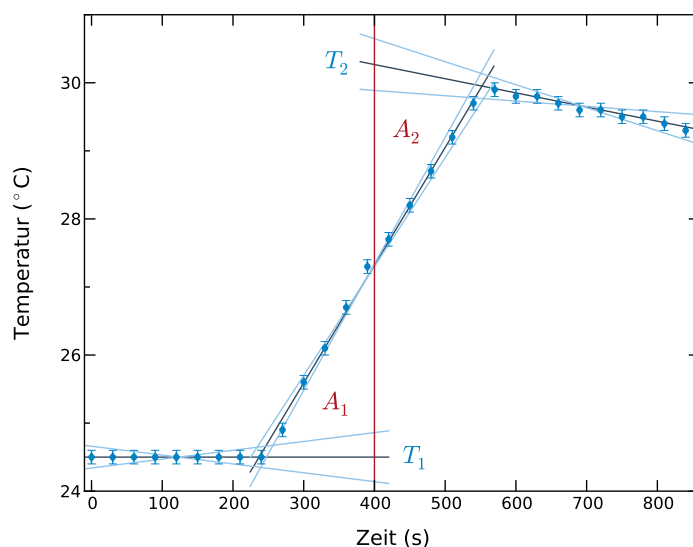


Abbildung 3: Temperaturdiagramm mit graphischer Geradenanpassung

6.2 Bestimmung von ΔW

Berechnen Sie ΔW nach Gleichung (2). Für F_D verwenden Sie den Mittelwert der gemessenen Werte (während Sie gekurbelt haben). Der Fehler von F_D kann durch Standard-

abweichung oder Fehlerfortpflanzung Ihrer Abschätzung aus der Durchführung bestimmt werden. Berechnen Sie beide und verwenden Sie im weiteren Verlauf den Größeren.

6.3 Bestimmung von ΔQ

Berechnen Sie zuerst $C_{Zylinder}$ mit Gleichung (4). Bestimmen Sie dann ΔQ aus Gleichung (3).

6.4 mechanisches Wärmeäquivalent

Bestimmen Sie das mechanische Wärmeäquivalent μ aus Gleichung (1).

6.5 spezifische Wärmekapazität von Messing

Das mechanische Wärmeäquivalent ist in SI-Einheiten 1. Berechnen Sie unter dieser Voraussetzung die spezifische Wärmekapazität von Messing unter Verwendung von Gleichung (3). Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem Literaturwert.

6.6 Diskussion

- Diskutieren Sie die Ergebnisse und eventuelle systematische Fehler.
- Erläutern Sie Ihre Erkenntnisse aus der Durchführung in Bezug auf die Messwerte von F_D . Welches Verfahren haben Sie verwendet um den Fehler von F_D zu bestimmen und warum?

7 Anhang: Herleitung der Formeln

Zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents müssen Reibungsarbeit und Wärmemenge bestimmt werden.

7.1 Mechanische Arbeit

Die Arbeit W_{allg} ist allgemein definiert als Linienintegral entlang des zurückgelegten Weges \vec{s} über die Kraft \vec{F} , die auf das Objekt wirkt.

$$W_{allg} = \int_L \vec{F}(\vec{s}) d\vec{s} \quad (5)$$

Hierbei ist L die Bahnkurve des Objekts und $\vec{F}(\vec{s})$ die Kraft, die an jedem Punkt \vec{s} des Weges wirkt. Bewegt sich ein Objekt entlang einer Geraden und ist die wirkende Kraft konstant und schließt mit der Bewegungsrichtung immer den gleichen Winkel Φ ein, vereinfacht sich (5) zu

$$W_{allg} = \vec{F} \cdot \vec{s} = F \cdot s \cdot \cos(\Phi) \quad (6)$$

Bei Drehung des Zylinders muss Arbeit gegen die Reibungskraft F_R , die das Band erzeugt, geleistet werden. Beginnt man damit, den Zylinder so zu drehen, dass der Kraftmesser entlastet wird, wird das angehängte Gewicht zunächst einige Zentimeter angehoben, verharrt dann jedoch bei weiteren Drehungen auf einer gewissen Höhe. Das Gewicht wird also nicht weiter beschleunigt. Die Kräfte, die in diesem System wirken sind (vgl. Abb. 4)

1. die nach unten gerichtete Gewichtskraft $F_G = M \cdot g$
(M -Masse des Gewichtes, g -Erdbeschleunigung),
2. die nach oben wirkende Rückstellkraft der Feder im Kraftmesser F_D ,
3. die nach oben wirkende Reibungskraft F_R .

Es muss also gelten

$$F_G = F_D + F_R \quad (7)$$

Die Masse M des Gewichtes ist bekannt und F_D ist am Kraftmesser ablesbar. Damit kann die Reibungskraft berechnet werden:

$$F_R = F_G - F_D = M \cdot g - F_D \quad (8)$$

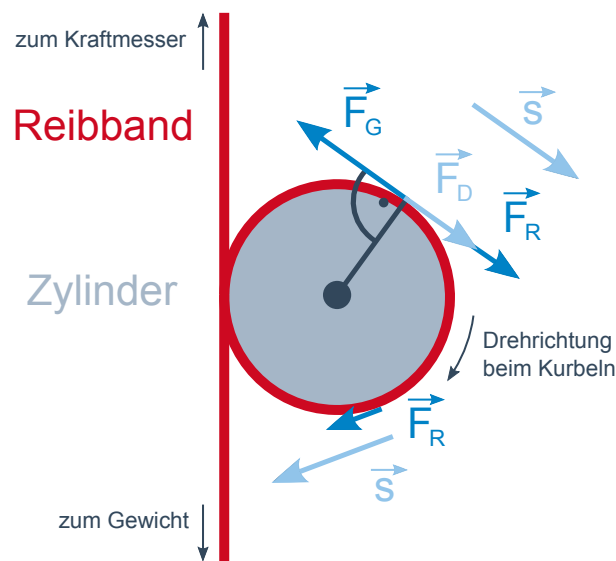


Abbildung 4: Kräftesituation am Zylinder. Es herrscht Kräftegleichgewicht, der Wegvektor \vec{s} ist immer parallel zur Reibungskraft F_R .

Der zurückgelegte Weg Δs , über den die Reibungskraft wirkt, ist gegeben durch den Umfang des Zylinders und die Anzahl n der getätigten Drehungen,

$$s = 2\pi \cdot r \cdot n \quad (9)$$

(r ist der Radius des Zylinders)

Der Kraftvektor \vec{F}_R und der Ortsvektor \vec{s} zeigen immer in die gleiche Richtung. Somit gilt für Gleichung (6) $\Phi = 0$ und $\cos(\Phi) = 1$. Durch Einsetzen erhält man die Formel für die geleistete mechanische Arbeit:

$$\Delta W = F_R \cdot \Delta s = 2\pi r n \cdot (F_G - F_D) \quad (10)$$

7.2 Umgesetzte Wärmemenge

Die Wärmemenge Q , die aus der geleisteten mechanischen Arbeit hervorgeht, kann über die Temperaturerhöhung des Messzylinders bestimmt werden. Die Wärmekapazität eines Körpers gibt an, wieviel Wärmeenergie er pro Grad Temperaturerhöhung aufnimmt:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (11)$$

Die spezifische Wärmekapazität ist die auf die Masse des Körpers bezogene Wärmekapazität, $c = \frac{C_{\text{Körper}}}{m}$. Besteht der Körper nur aus einem Stoff, kann seine Wärmekapazität aus

seiner Masse und c berechnet werden.

Die Wärmekapazität C_{total} , auf die sich in diesem Versuch die gemessene Temperaturerhöhung bezieht, setzt sich aus der Summe der Wärmekapazitäten aller sich erwärmenden Komponenten des Versuchsaufbaus zusammen. Das heißt

$$C_{total} = C_{Zylinder} + C_{Reibband} + C_{Thermometer} \quad (12)$$

Weitere Komponenten können vernachlässigt werden, da das Reibband thermisch gut genug isoliert. $C_{Zylinder}$ ist gegeben durch die spezifische Wärmekapazität von Messing und seiner Masse

$$C_{Zylinder} = c_{Messing} \cdot m_{Zylinder} \quad (13)$$

Die benötigten Werte finden sich auf dem Tisch neben dem jeweiligen Versuchsaufbau. Über die Formel

$$\Delta Q = C_{total} \cdot \Delta T \quad (14)$$

kann nun die zugeführte Wärmemenge berechnet werden.

8 Literatur

- Fehlerrechnung:
http://www.astro.uni-koeln.de/teaching_seminars/AP/
<http://www.ph2.uni-koeln.de/fileadmin/Lehre/Anfaengerpraktikum/Fehler.pdf>
- Meschede und Gerthsen: Physik, Springer, Berlin, 24. Aufl., 2010 (Kapitel 6)
http://www.ub.uni-koeln.de/digital/e_books/springer_links/index_ger.html
- Halliday, Physik, Wiley-VCH, 2. Auflage, 2009 (Kapitel 19)

9 Sicherheitshinweise

Bitte beachten Sie die allgemeinen Sicherheitshinweise, die in der Praktikumsanleitung dargelegt wurden.

Das 5 kg-Gewicht ist schwerer als es aussieht. Lassen Sie es bitte nicht auf Ihre Zehen oder die Ihrer Kommilitonen fallen. Falls doch: Am Telefon 01112 wählen!