

# ► Messung des mechanischen Wärmeäquivalents mit modernen Mitteln

Hans Kammer



Das mechanische Wärmeäquivalent erlaubt die Berechnung der bei mechanischer Reibung entstehenden Wärme. J.P. Joule wies 1845 experimentell nach, dass zur Erwärmung von 1 Kilogramm Wasser um 1°C eine Arbeit von 4186 Newton-Meter (Joule) erforderlich ist (Abb.1). Joules mechanisches Wärmeäquivalent wies damit den Weg zu einer entscheidenden Erweiterung des Energiesatzes der Mechanik.

Im Schulunterricht ist das Joule'sche Experiment von grundlegender Bedeutung und wird meist mit dem klassischen Gerät der Firma Leybold (Abb.2) durchgeführt.

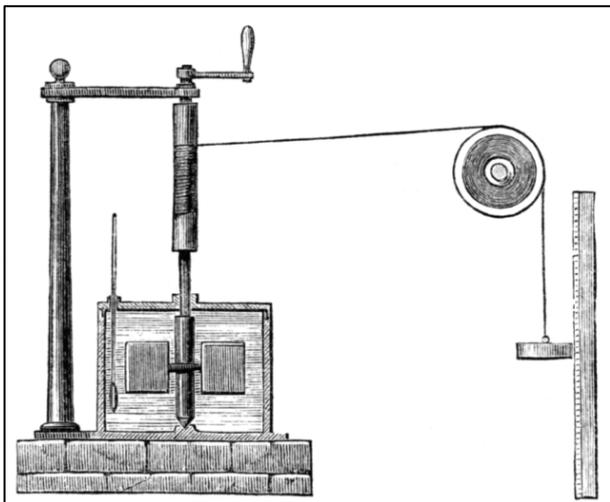


Abb. 1: Joule'sche Apparatur zum mechanischen Wärmeäquivalent (1869)

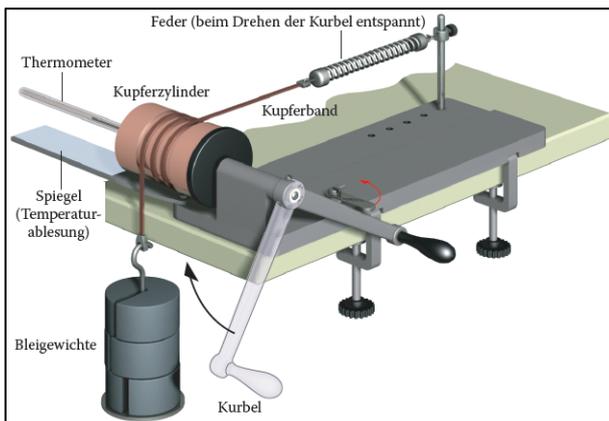


Abb.2: Schulgerät (Leybold, Nr. 388 00-06)

Mit diesem Gerät wird die spezifische Wärmekapazität eines rotierenden Kupfer- oder Aluminiumzylinders durch Umwandlung von Reibungsarbeit in Wärme direkt gemessen. Ein weiches Band oder eine Kunststoffschnur umschlingt einen massiven Kupfer- oder Aluminiumzylinder (Durchmesser  $d$ , Masse  $m$ ) in einigen Windungen.

Am einen Ende des Bands hängt ein Gewichtsstein (z.B. Bleigewichte, Masse  $M$ ), das andere Ende wird mit einer Feder  $F$  gespannt. Im Zylinder steckt ein Flüssigkeitsther-

momenter, das mitrotiert und mithilfe eines Spiegels abgelesen werden kann (Abb.2).



Abb.3: Apparatur zum Wärmeäquivalent mit Temperatursonde (Vernier)

Wir ersetzen dieses Thermometer durch eine Temperatursonde (z.B. Go!Temp der FA Vernier) und messen mithilfe eines Messprogramms, hier mit der Vernier DataQuest Applikation des Rechners oder der Software TI-Nspire™ CX CAS (Abb.3).

Setzt man den Versuch als Demonstrationsexperiment im Unterricht ein, hat dies den Vorteil, dass die Schülerinnen und Schüler den Temperaturanstieg während des Drehens an der Kurbel direkt beobachten können (Abb.4 und 5).

Als Wärmekontaktmedium zwischen der Sonde und Kupferzylinder wird ein Silikonfett eingesetzt. Dreht man die mit dem Kupferzylinder verbundene Kurbel, entspannt die Feder, so dass das gesamte Gewicht  $M \cdot g$  des Gewichtssteins als Reibungskraft auf den Kupferzylinder wirkt. Pro Umdrehung wird so eine mechanische Arbeit  $W = M \cdot g \cdot d \cdot \pi$  verrichtet, welche dem Kupferzylinders die Wärmemenge

$$\Delta Q = c_{\text{Cu}} \cdot m \cdot \Delta \vartheta$$

zuführt.

Dabei nimmt die innere Energie dieses Körpers um den Betrag  $\Delta Q$  zu. Macht man  $z$  Umdrehungen mit der Kurbel,

so misst man eine Temperaturzunahme von  $\Delta\vartheta$ . Setzt man die gesamte verrichtete mechanische Arbeit  $z \cdot W$  gleich der dem Kupfer- bzw. Aluminiumzylinder zugeführte Wärme  $c \cdot m \cdot \Delta\vartheta$ , so erhält man für die spezifische Wärmekapazität von Kupfer:

$$c = \frac{z \cdot M \cdot g \cdot d \cdot \pi}{m \cdot \Delta\vartheta}$$

Für ansprechende Messresultate spielt wegen der zu erwartenden Wärmeverluste (vor allem durch Konvektion und Strahlung) die Wahl der Anfangstemperatur eine Rolle. Ist bei der Erwärmung durch Reibung eine Temperaturdifferenz von z.B.  $5^\circ\text{C}$  zu erwarten, so sollte die Anfangstemperatur des Kupfer- bzw. Aluminiumzylinders ca.  $2,5^\circ\text{C}$  unter die Zimmertemperatur abgesenkt werden. So können die Wärmeverluste näherungsweise kompensiert werden. Zu diesem Zweck wird der Zylinder vor der Durchführung des Versuchs z.B. in kaltes Leitungswasser getaucht.

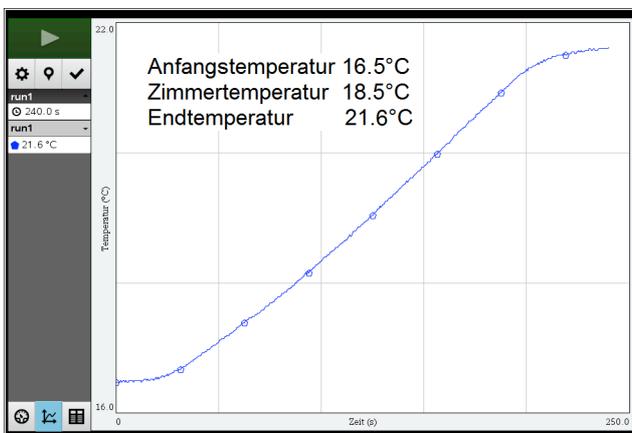


Abb.4: Temperaturanstieg des Kupferzylinders

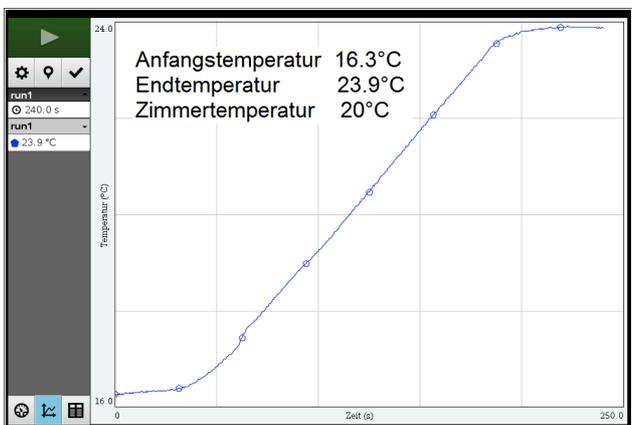


Abb.5: Temperaturanstieg des Aluminiumzylinders

## 1. Experiment Kupferzylinder (Figur 4)

Masse  $m_{\text{Cu}} = (0,663 \pm 0,001) \text{ kg}$ ;  
 Durchmesser  $d_{\text{Cu}} = (0,0469 \pm 0,0001) \text{ m}$   
 Masse Gewichtsstein  $M = (5,00 \pm 0,01) \text{ kg}$   
 Anzahl Umdrehungen  $z = (200 \pm 1)$  (Zählwerk)  
 Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta = (21,6 - 16,5)^\circ\text{C} = 5,1^\circ\text{C} \pm 0,2^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} c_{\text{Cu}} &= \frac{z \cdot M \cdot g \cdot d_{\text{Cu}} \cdot \pi}{m_{\text{Cu}} \cdot \Delta\vartheta} \\ &= \frac{200 \cdot 5 \cdot 9,81 \cdot 0,0469 \cdot \pi}{0,663 \cdot 5,1} \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \\ &= (427 \pm 21) \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

Der resultierende Wert von  $(427 \pm 21) \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$  liegt ca. 10% über dem Literaturwert von  $383 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$  bei einem Messfehler von ca. 5%.

Die systematische Abweichung dürfte auf Wärmeverluste (vor allem durch Konvektion und Strahlung) zurückzuführen sein, da das Mittel zwischen Anfangs- und Endtemperatur  $0,6^\circ\text{C}$  über der Zimmertemperatur liegt.

Beim zweiten Experiment mit einem Aluminiumzylinder lag das Mittel zwischen Anfangs- und Endtemperatur nur ca.  $0,1^\circ\text{C}$  über der Zimmertemperatur. So entstand ein besseres Resultat:

## 2. Experiment Aluminiumzylinder (Figur 5)

Masse  $m_{\text{Al}} = (0,216 \pm 0,001) \text{ kg}$   
 Durchmesser  $d_{\text{Al}} = (0,0470 \pm 0,0001) \text{ m}$   
 Masse Gewichtsstein  $M = (5,00 \pm 0,01) \text{ kg}$   
 Anzahl Umdrehungen  $z = (200 \pm 1)$  (Zählwerk)  
 Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta = (23,9 - 16,3)^\circ\text{C} = 7,6^\circ\text{C} \pm 0,2^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} c_{\text{Al}} &= \frac{z \cdot M \cdot g \cdot d_{\text{Al}} \cdot \pi}{m_{\text{Al}} \cdot \Delta\vartheta} \\ &= \frac{200 \cdot 5 \cdot 9,81 \cdot 0,0470 \cdot \pi}{0,216 \cdot 7,6} \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \\ &= (887 \pm 35) \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

Hier liegt der Mittelwert zwischen Anfangs- und Endtemperatur ( $16,3^\circ\text{C}$  und  $23,9^\circ\text{C}$ ) bei  $20,1^\circ\text{C}$ , also praktisch bei der Zimmertemperatur. Deshalb erhalten wir mit  $(887 \pm 35) \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$  ein ausgezeichnetes Resultat, das nur ca. 1% vom Literaturwert  $c_{\text{Al}} = 896 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$  abweicht.

Ich danke meinen Kollegen Jürg Barblan, Niklaus Koch und Thomas Thormeier sowie der Schulleitung des Gymnasiums Thun für die kollegiale Zusammenarbeit und die Möglichkeit die Geräte der Physiksammlung zu benutzen.

### Literatur

Leybold Didactic GmbH, Gebrauchsanweisung 388 00-06, Gerätegruppe zum mechanischen und elektrischen Wärmeäquivalent, [www.ld-didactic.de/documents/enUS/GA/GA/3/388/38800de.pdf](http://www.ld-didactic.de/documents/enUS/GA/GA/3/388/38800de.pdf)

### Autor

Hans Kammer, Bern (Schweiz)  
[hanskammer@bluewin.ch](mailto:hanskammer@bluewin.ch)