

Ziel dieses Versuches ist der experimentelle Nachweis der Äquivalenz von mechanischer und elektrischer Energie. Dazu werden beide Energieformen in die gleiche Wärmeenergie umgewandelt.

1. Theoretische Grundlagen

1.1 Vorbemerkung

Historisch gesehen war die Einheit der Wärmemenge eine Energieeinheit und dadurch die Kilokalorie festgelegt worden. Man hatte die spezifische Wärmekapazität c_W des Wassers im Temperaturbereich $\vartheta = (14,5 \dots 15,5)^\circ\text{C}$, also einem Temperaturintervall $\Delta\vartheta = \Delta T = 1\text{ K}$, gleich $c_W = 1\text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ gesetzt ($[\vartheta] = ^\circ\text{C}$, $[T] = \text{K}$).

Daraus entstand die Notwendigkeit eines „Vergleichs“ anderer Energieeinheiten, etwa der historischen Energieeinheit Meterkilopond oder der elektrischen Energieeinheit Wattsekunde mit der Einheit Kilokalorie. Als Ergebnis resultierten die sogenannten „Wärmeäquivalente“, das mechanische und das elektrische. Diese Äquivalente waren vom Stand der Messkunst abhängige Größen. Mit fortschreitender Messgenauigkeit änderten sich die Äquivalentwerte. Diese mit der jeweiligen Messunsicherheit belastete Verknüpfung zweier Einheitensysteme, des mechanisch-elektrischen und des kalorischen, veranlasste die Festlegung der Verknüpfung $1\text{ kcal} = 4,186 \cdot 10^3\text{ J}$. Damit wird zwar der Äquivalentwert der beiden Einheiten ein Festwert, die Messunsicherheit tritt dafür am Zahlenwert der spezifischen Wärmekapazität c_W des Wassers auf, die sich mit dem Fortschritt der Messverfahren ändern kann.

1.2 Umwandlung von mechanischer in Wärmeenergie

Im Experiment wird mechanische Energie durch Reibung in Wärmeenergie umgewandelt. Die Reibungskraft wird durch ein Band erzeugt, welches um einen zylindrischen Kalorimeterkörper gewickelt und durch zwei Federkraftmesser gespannt ist (**Bild 1**).

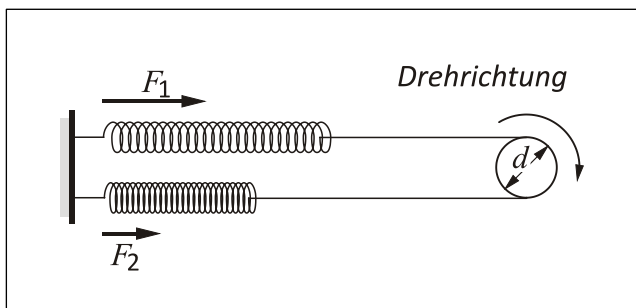


Bild 1: Prinzipskizze

Wird der Kalorimeterkörper gegen die Reibungskraft gedreht, ergibt sich die verrichtete Reibungsarbeit aus dem Produkt der Reibungskraft F , hier durch die auftretende Kraftdifferenz $\Delta F = F_1 - F_2$ der beiden Federkraftmesser, und dem zurückgelegten Weg s .

Der Weg s ergibt sich aus dem Umfang des Kalorimeterkörpers (Durchmesser d) und der Anzahl der Umdrehungen k zu $s = k \cdot \pi \cdot d$.

Damit lautet die mechanische Reibungsarbeit:

$$W_{\text{mech}} = \Delta F \cdot s = (F_1 - F_2) \cdot k \cdot \pi \cdot d \quad (1)$$

Die am Kalorimeterkörper verrichtete mechanische Arbeit führt zu einer Temperaturerhöhung um $\Delta\vartheta$.

1.3 Umwandlung von elektrischer in Wärmeenergie

Bei diesem Experiment wird dem Kalorimeterkörper über ein eingebautes Heizelement elektrische Energie zugeführt. Die zugeführte Leistung wird dabei direkt gemessen.

$$W_{el} = P \cdot t \quad (2)$$

P : zugeführte Leistung

t : Zeitdauer des Stromflusses

1.4 Vergleich der Wärmeenergien

Das Experiment wird mit zwei kompakten Metallkalorimetern (*Kupfer, Aluminium*) durchgeführt. Zum Vergleich der zugeführten Energien ist diese jeweils auf die Energiemenge zurückzurechnen, die zur Temperaturerhöhung **von 1 K** benötigt wird.

Die dazu benötigten Temperaturdifferenzen sind über ein Temperatur–Zeit–Diagramm entsprechend **Abschnitt 3** zu ermitteln.

Die Ergebnisse sind entsprechend der Aufgabenstellung einschließlich der bestimmten Messunsicherheit zu vergleichen und zu diskutieren.

1.5 Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität

von Wasser aus der Umwandlung mechanischer in Wärmeenergie

Bei diesem Experiment wird ein Wasserkalorimeter (*Hohlkalorimeter mit Wasserfüllung*) verwendet und entsprechend **Abschnitt 1.2** verfahren.

Die dem Wasser und Kalorimetergefäß zugeführte mechanische Energie ist durch Gleichung (1) gegeben. Die Zufuhr an Wärmeenergie beträgt:

$$\Delta Q = (c_W \cdot m_W + K) \cdot \Delta \vartheta \quad (3)$$

K : Wärmekapazität des Kalorimeters [K] = J·K⁻¹

c_W : spezifische Wärmekapazität des Wassers

m_W : Masse des Wassers

$\Delta \vartheta$: Temperaturdifferenz $\Delta \vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1$

Durch Gleichsetzen ergibt sich:

$$\Delta Q = W_{mech}$$

$$(c_W \cdot m_W + K) \cdot \Delta \vartheta = \Delta F \cdot s$$

und für die Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser gilt:

$$c_W = \frac{\Delta F \cdot s}{\Delta \vartheta \cdot m_W} - \frac{K}{m_W} \quad (4)$$

2. Versuch

2.1 Vorbetrachtung

Aufgabe: Ein Kupferzylinder mit einer Masse von $m=488\text{ g}$ und einer Höhe von $h=45,5\text{ mm}$ soll mechanisch um eine Temperatur von $\Delta\vartheta=10\text{ K}$ erwärmt werden. Dazu wird er in Rotation versetzt. Dabei sorgt ein Riemen, der um ihn gelegt ist, für die nötige Reibungskraft von $\Delta F=40\text{ N}$.

Um den gleichen Zylinder elektrisch um die gleiche Temperatur zu erwärmen, wird eine Arbeit von $W_{el}=3\text{ kJ}$ benötigt.

Wie viele Umdrehungen muss dieser Zylinder vollziehen, wenn er die gleiche Arbeit verrichten soll, die durch das elektrische Heizen verrichtet wurde?

2.2 Versuchsdurchführung

2.2.1 Verwendete Geräte

Kompaktversuchsaufbau: Reibungsapparat mit Umdrehungszähler und 2 Kraftmessern, Thermometer, Netzgerät, Leistungsmessgerät, Stoppuhr, 2 Kalorimeterkörper (*Cu, Al im Kühlschrank*), Cu-Kleinkalorimeter (70 ml)

2.2.2 Versuchshinweise

Vorbereitung für Aufgabe 4:

- Ermitteln Sie die Masse m_{leer} des leeren Kupfer-Kalorimeters (*hohl*).
- Füllen Sie dann das Kalorimeter bis zur Verjüngung mit Wasser und bestimmen Sie die Gesamtmasse ($m_{\text{leer}} + m_W$). Danach stellen Sie es in den Kühlschrank.

Aufgabe 1: Erzeugung von Wärmeenergie durch Reibung

Mit einem Reibungsapparat wird nacheinander an zwei Kalorimeterkörpern (*Kupfer, Aluminium*) Energie durch Reibung zugeführt. Die dabei auftretende Temperaturerhöhung ist zu messen und die zugeführte Energie zu bestimmen.

- Nehmen Sie einen der beiden Kalorimeterkörper aus dem Kühlschrank (*Anfangstemperatur sollte unter der Raumtemperatur liegen*).
- Bringen Sie diesen auf dem Reibungsapparat an und füllen Sie die Öffnung für das Thermometer mit Wasser auf.
- Spannen Sie den Reibungsriemen zwischen den Kraftmessern und dem Kalorimeterkörper (*Laborpersonal*). Die mechanische Vorspannung an den beiden Kraftmessern beträgt **ca. 20 N**.
- Notieren Sie den Umdrehungszählerstand.
- Füllen Sie etwas Wasser oben in die Kalorimeteröffnung (*thermischer Übergang*) und führen Sie den Temperaturfühler in diese Öffnung so ein, dass dieser nicht vom Riemen beeinflusst werden kann.
- Beginnen Sie mit der Temperaturmessung und notieren Sie die Temperatur zum Zeitpunkt $t=0$.
- Messen Sie **5 Minuten** die Temperatur (*Vorhaltezeit*) mit einer Schrittweite **von einer Minute**.
- Starten Sie den Motor und lesen Sie die Temperatur **jede folgende Minute** ab.
- Notieren Sie die Kräfte F_1 und F_2 ebenfalls **nach jeder Minute**.
- Schalten Sie den Motor nach einer Laufzeit von **5 Minuten** aus.
- Lesen Sie noch weitere **5 Minuten** die Temperatur im **Minutenabstand** ab.

- Notieren Sie erneut den Umdrehungszählerstand.
- Wechseln Sie den Kalorimeterkörper und wiederholen Sie die Versuchsaufgabe. Stellen Sie das nicht gebrauchte Kalorimeter wieder in den Kühlschrank zurück.
- Überprüfen Sie, ob für die Berechnung der mechanischen Arbeit nach Gleichung (1) alle relevanten Größen erfasst wurden.

Aufgabe 2: Erzeugung von Wärmeenergie durch elektrische Leistung

Den beiden Kalorimeterkörpern aus **Aufgabe 1** wird jetzt elektrische Energie zugeführt. Die dabei auftretende Temperaturerhöhung ist zu messen und die zugeführte Energie zu bestimmen.

- Schließen Sie vom Stromversorgungsgerät über einen Leistungsmesser die Kalorimeterkörper mittels 3mm-Stecker an die Energieversorgung an.
- Führen Sie die Temperaturmessung analog zur **Aufgabe 1** durch.
- Füllen Sie erneut Wasser in die Kalorimeteröffnung und führen Sie den Temperaturfühler in diese Öffnung ein.
- Beginnen Sie mit der Temperaturmessung und notieren Sie die Temperatur zum Zeitpunkt $t=0$.
- Starten Sie die Stoppuhr und lesen Sie die Temperatur **jede folgende Minute** ab.
- Schalten Sie **nach 5 Minuten** die elektrische Leistung zu und lesen Sie diese am Leistungsmesser ab.
- Ermitteln Sie die Temperatur weiterhin **jede Minute**.
- Schalten Sie die Energiezufuhr **nach 5 Minuten** ab.
- Lesen Sie die Temperatur noch **weitere 5 Minuten** im **Minutenabstand** ab.
- Wechseln Sie den Kalorimeterkörper und wiederholen Sie die Versuchsaufgabe. Stellen Sie das nicht gebrauchte Kalorimeter wieder in den Kühlschrank zurück.

Aufgabe 3: Da die Einhaltung einer gleichen Temperaturdifferenz bei den **Aufgaben 1** und **2** sehr schwierig ist, sind zum Vergleich die erhaltenen mechanischen und elektrischen Energien zurückzurechnen auf den jeweiligen Wert, der für eine Temperaturerhöhung **um 1K** notwendig ist.

Aufgabe 4: Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser aus der Umwandlung von mechanischer in Wärmeenergie

- Nehmen Sie das bereits mit Wasser gefüllte Kalorimeter aus dem Kühlschrank (*Anfangstemperatur unter Raumtemperatur*) und befestigen Sie es auf dem Reibungsapparat.
- Führen Sie den Versuch analog zur **Aufgabe 1** durch.

2.3 Versuchsauswertung

Aufgabe 1: Wärmeenergie durch Reibung

- Berechnen Sie die Wärmeenergie aus der zugeführten mechanischen Arbeit entsprechend der Gleichung (1). Verwenden Sie dazu den Mittelwert der Kraftdifferenz.
- Stellen Sie den funktionalen Verlauf (*Vorhaltezeit; Heizphase; Nachhaltezeit*) der ermittelten Messwerte in je einem Diagramm der Funktion $\vartheta = f(t)$ für beide Kalorimeter graphisch dar.
- Bestimmen Sie die Anstiegsfunktionen der Vor- bzw. der Nachhaltezeit durch Regressionsrechnungen sowie durch Interpolationen.
- Ermitteln Sie daraus die Temperaturdifferenzen (*siehe Abschnitt 3*).
- Bestimmen Sie die Messunsicherheiten für beide Kalorimeter durch eine Fehlerrechnung.

Aufgabe 2: Wärmeenergie durch elektrische Leistung

- Berechnen Sie die Wärmeenergie aus der zugeführten elektrischen Arbeit entsprechend der Gleichung (2).
- Stellen Sie den funktionalen Verlauf (*Vorhaltezeit; Heizphase; Nachhaltezeit*) der ermittelten Messwerte in je einem Diagramm der Funktion $\vartheta = f(t)$ für beide Kalorimeter graphisch dar.
- Bestimmen Sie die Anstiegsfunktionen der Vor- bzw. der Nachhaltezeit durch Regressionsrechnungen sowie durch Interpolationen.
- Ermitteln Sie daraus die Temperaturdifferenzen (*siehe Abschnitt 3*).
- Bestimmen Sie die Messunsicherheiten für beide Kalorimeter durch eine Fehlerrechnung.

Aufgabe 3: Normierung auf 1 K

- Normieren Sie die erhaltenen Werte aus den **Aufgaben 1** und **2** auf **1 K** und bestimmen Sie die Messunsicherheit. Vergleichen und diskutieren Sie die Ergebnisse.

Aufgabe 4: Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser

- Gegeben ist die Wärmekapazität des Kalorimeters $K=(40\pm0,5) \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$.
- Berechnen Sie die spezifische Wärmekapazität c_W von Wasser aus der Umwandlung mechanischer in Wärmeenergie nach der Gleichung (4) und bestimmen Sie die Messunsicherheit durch eine Fehlerrechnung.
- Ermitteln Sie die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ analog zu den **Aufgaben 1** und **2**.
- Vergleichen Sie die Messwerte mit den Tabellenwerten und diskutieren Sie die Ergebnisse.

3. Ergänzung

Wenn die Wärmeisolierung des Kalorimeters vollkommen wäre, dann würde seine Temperatur vor und nach dem Energieaustausch zeitlich konstant bleiben, so dass man Anfangs- und Endtemperatur gut ablesen könnte. In Wirklichkeit treten aber stets Energieverluste auf. **Diagramm 1** stellt ein Beispiel für den realen Temperaturverlauf vor, während und nach dem Energieaustausch dar.

Da die Messungen über einen längeren Zeitraum erfolgen, muss der Einfluss des Temperatúrausgleichs zur Umgebungstemperatur beachtet werden. Ebenfalls berücksichtigt werden muss die Transportzeit der Wärme zum Thermometer.

Beide Einflüsse werden berücksichtigt durch die Bestimmung der Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ mit Hilfe eines Temperatur-Zeit-Diagrammes. Aus der gemessenen Kurve für den Temperaturverlauf $\vartheta(t)$ kann man Anfangs- und Endtemperatur für den idealisierten Grenzfall unendlich schnellen Temperatúrausgleichs auf folgende Weise ermitteln: Man extrapoliert die beiden annähernd linearen Kurventeile für $t \leq t_1$ und $t \leq t_2$ auf Zeiten $t < t_1$ und $t < t_2$.

Dann bestimmt man eine vertikale Gerade g so, dass die beiden Flächen A_I und A_{II} untereinander gleich groß werden.

Die Schnittpunkte von g mit den extrapolierten Geraden liefern die Temperaturen ϑ_a und ϑ_e .

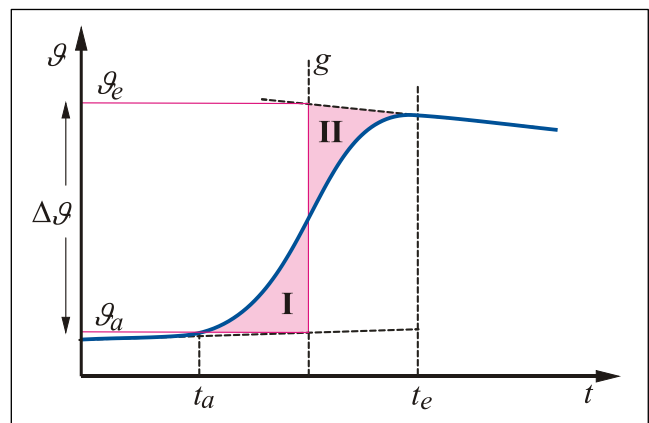


Diagramm 1: Temperaturverlauf über eine Messung