Versuch 117

Spezifische Wärmekapazität - Adiabatenexponent von Luft

Lernziel: Die spezifischen Wärmekapazitäten von Aluminium, Kupfer und Messing werden bestimmt. Die DULONG-PETITsche Regel soll bestätigt werden.

Mit Hilfe eines in einer Glasröhre auf einem Luftpolster schwingenden Körpers wird der Adiabatenexponent von Luft bestimmt.

Kenntnisse: Wärmekapazität (spezifische, molare (= Atomwärme) eines Stoffs), DULONG-PETITsche Regel; kinetische Gastheorie; C_p, C_v, Freiheitsgrade, adiabatische Vorgänge; Schwingungen.

Literatur: Jedes Grundkurs-Lehrbuch der Physik, Praktikumsbücher, insbesondere Westphal.

117.1 Erläuterungen

117.1.1 Wärmekapazität

Die Wärmemenge Q, die ein Körper während einer Temperaturänderung aufnimmt oder abgibt, ist innerhalb nicht allzu großer Temperaturbereiche der Temperaturdifferenz T_2 - T_1 zwischen der End- und der Anfangstemperatur proportional:

$$Q = C \cdot (T_2 - T_1) \tag{117.1}$$

C ist die Wärmekapazität des Körpers, und diese ist seiner Masse m proportional:

$$C = c \cdot m \tag{117.2}$$

(c = spezifische Wärmekapazität des Stoffs)

Tauschen nun zwei Körper mit den Wärmekapazitäten C und C' über Temperaturausgleich die Wärmemenge Q aus, so folgt aus dem Energiesatz:

$$C \cdot (T_1 - T_=) = C' \cdot (T_= - T_1') \tag{117.3}$$

Hierauf basiert das Prinzip des Wasserkalorimeters zur Bestimmung unbekannter Wärmekapazitäten:

Bringt man den auf eine definierte Anfangstemperatur T_1 erhitzten Körper in ein mit Wasser der bekannten Anfangstemperatur T_Kal gefülltes, und gegen Wärmeaustausch mit der Umgebung gut geschütztes Gefäß und misst man nach erfolgtem Temperaturausgleich die gemeinsame Endtemperatur $T_=$, so ergibt sich seine Wärmekapazität C nach:

$$C = C_\mathrm{Kal} \cdot \frac{T_= - T_\mathrm{Kal}}{T_1 - T_=} \tag{117.4}$$

Bestimmt man nun noch mit einer Waage die Masse des Körpers, so kann man nach Gleichung 117.2 die spezifische Wärmekapazität berechnen.

Das im Versuch verwendete Kalorimeter besteht aus einem mit Wasser gefüllten Messingbecher. Die Gesamtwärmekapazität des Kalorimeters C_Kal setzt sich aus den Einzelwärmekapazitäten des Wassers c_W und des Messing c_Ms zusammen nach:

$$C_\mathrm{Kal} = m_\mathrm{W} \cdot c_\mathrm{w} + m_\mathrm{Ms} \cdot c_\mathrm{Ms} \tag{117.5}$$

Die jeweiligen Massen lassen sich mit einer Waage bestimmen.

Praktisch ist es, den zu untersuchenden Körper in siedendem Wasser auf ca. 100°C zu erhitzen. Da die Siedetemperatur des Wassers luftdruckabhängig ist, muss sie auf:

$$T[^\circ C] = 100^\circ + 0,03687^\circ \cdot (p - 760) - 0,000022^\circ \cdot (p - 760)^2 \tag{117.6}$$

(p in Torr) korrigiert werden. Der Luftdruck p (Höhe 0 m) wird an dem im Praktikumsraum angebrachten Barometer abgelesen und auf Höhe 65 m umgerechnet.

Da die Temperatur des Leitungswassers unter der Raumtemperatur liegt, wird nach Einbringen des Wassers in das Kalorimetergefäß die Temperatur ca. 5 min lang alle 30 s gemessen.

Nun bringt man den erhitzten, zu untersuchenden Körper ein und misst weiter die Temperatur alle 10 s solange sich die Temperatur stark ändert, danach wieder alle 30 s. Trägt man die Temperatur gegen die Zeit auf, so ergibt sich ein Diagramm wie in Abb. 117.1 gezeigt.

Da der Wärmeaustausch nicht instantan erfolgt und es einen unvermeidlichen Wärmeverlust an die Umgebung gibt, wird die theoretisch erwartete Endtemperatur nicht erreicht. Um sie dennoch zu bestimmen, geht man wie folgt vor:

Man zeichnet die Ausgleichsgeraden AB und CD und sucht nun eine Gerade EF senkrecht zur Zeitachse so, dass die Flächen BEG und FGC gleich groß sind (Augenmaß genügt). Der Punkt E gibt dann T_Kal und der Punkt F gibt $T_=$ an.

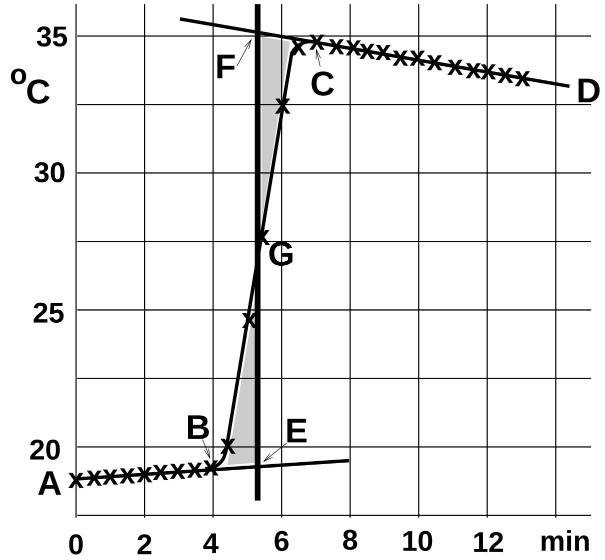

Abb. 117.1: *Mess- und Auswertediagramm Wärmekapazität.*

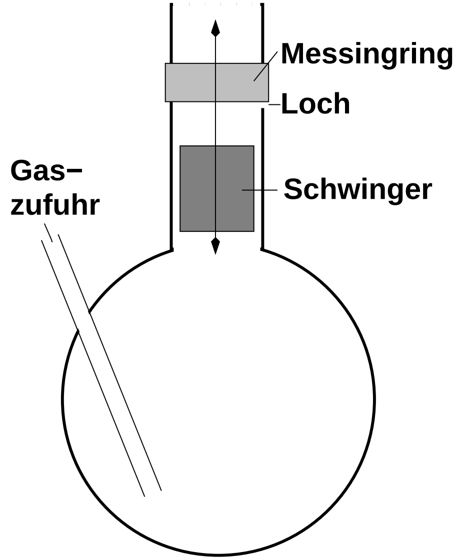

Abb. 117.2: *Rüchardt's Aufbau zur Messung des Adiabatenkoeffizienten.*

117.1.2 Adiabatenkoeffizient

Zur Bestimmung des Adiabatenkoeffizienten $\kappa = C_p/C_v$ lässt man einen Schwingkörper über einem Gasvolumen schwingen und misst die Periodendauer Θ.

Die experimentelle Herausforderung besteht darin, eine stabile, ungedämpfte Schwingung zu erhalten. Dazu wird zum einen das durch den unvermeidlichen Spielraum zwischen dem Präzisionsglasrohr und dem Schwingkörper entweichende Gas über ein Rohr dem System nachgeführt. Zum anderen ist in der Mitte des Glasrohres seitlich eine kleine Öffnung angebracht. Der Schwingkörper befindet sich zunächst unterhalb der Öffnung. Durch das nachströmende Gas baut sich ein geringer Überdruck auf, der den Schwinger nach oben treibt. Sobald sich der Schwinger über der Öffnung befindet, entweicht der Überdruck. Der Schwinger fällt nach unten und der beschriebene Vorgang wiederholt sich. Auf diese Weise ist der eigentlichen, freien Schwingung eine geringe, gleichphasige Anregung überlagert, welche Reibungsverluste ausgleicht. Der Gasstrom wird nun so eingestellt, dass man eine um die Öffnung symmetrische Schwingung konstanter Amplitude erhält, deren Periodendauer mit Hilfe einer Stoppuhr bestimmt werden kann.

Zur Bestimmung von κ geht man vom Gleichgewichtsfall aus. Der Schwingkörper der Masse m befindet sich im Gleichgewicht, wenn der innere Gasdruck p durch den äußeren Luftdruck p_{L} plus dem durch das Gewicht des Schwingers hervorgerufenen Druck entspricht:

$$p = p_L + \frac{m\,g}{\pi\,r^2}, \tag{117.7}$$

mit der Erdbeschleunigung g und dem Radius des Schwingkörpers r. Schwingt der Körper nun um die kleine Strecke x aus der Gleichgewichtslage, so ändert sich das Volumen V um dV und somit der Druck p um dp. Als Bewegungsgleichung ergibt sich damit:

$$m\frac{\mathrm{d}^2\,x}{\mathrm{d}t^2} = \pi\,r^2\,\mathrm{d}p. \tag{117.8}$$

Da der Schwingvorgang relativ schnell abläuft, können wir ihn als adiabatisch ansehen und die Adiabatengleichung ansetzen:

$$pV^{\kappa} = const$$

.

Die Ableitung von $p = p(V)$ nach V liefert

$$\mathrm{d}p = -\frac{p\,\kappa\,\mathrm{d}V}{V} \tag{117.9}$$

Setzt man nun (117.9) mit $dV = \pi \cdot r^2 \cdot x$ in (117.8) ein, so erhält man die Differentialgleichung des harmonischen Oszillators:

$$\frac{d^2\,x}{dt^2} + \frac{\pi^2\,r^4\,p\kappa}{m\,V}\,x = 0, \tag{117.10}$$

mit der bekannten Lösung für die Eigenfrequenz:

$$\omega_0 = \sqrt{\kappa\frac{\pi^2\,r^4\,p}{m\;V}}. \tag{117.11}$$

Mit der Periodendauer $T = 2\pi/\omega$ folgt daraus

$$\kappa = \frac{4\,m\,V}{T^2\,r^4\,p}. \tag{117.12}$$

Für ein genaues Ergebnis muss daher neben der Messung der Periodendauer insbesondere der Radius des Schwingkörpers sehr exakt gemessen werden (z.B. mit einer Mikrometerschraube), da dieser Wert in vierter Potenz eingeht (Radien für die Schwingkörper siehe Tabelle im Abschnitt 117.2.2).

Aufgabe 117.A: *Wie ist die molare Wärmekapazität definiert? Welche Beziehung gilt zwischen molarer und spezifischer Wärmekapazität?*

Aufgabe 117.B: *Das richtig justierte Barometer zeigt den Druck auf der Normal-Null-Fläche an. Wie rechnen Sie den angezeigten Wert auf den Druck in Höhe h um?*

Aufgabe 117.C: *Welche Abhängigkeit besteht zwischen C_p und C_v?*

Aufgabe 117.D: *Bestimmen sie den Adiabatenkoeffizienten κ von Luft aus der Anzahl der Freiheitsgrade f unter der Annahme, dass es sich bei Luft um ein reales Gas mit inneren Freiheitsgraden aber ohne Wechselwirkung der Teilchen untereinander handelt.*

117.2 Versuchsdurchführung

117.2.1 Wärmekapazitäten

Aufgabe 117.a: *Bestimmen Sie, wie in 117.1.1 beschrieben, die Wärmekapazitäten der Körper aus Aluminium, Messing (63% Cu, 37% Zn) und Kupfer. Schätzen Sie die Fehler sinnvoll ab.*

Aufgabe 117.b: *Bestimmen Sie die Massen der zu untersuchenden Körper.*

Aufgabe 117.c: *Bestimmen Sie die spezifischen Wärmekapazitäten der drei Stoffe mit Gleichung (117.2) und vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit den Literaturwerten.*

Aufgabe 117.d: *Bestimmen Sie die molaren Wärmekapazitäten der drei Stoffe und vergleichen Sie diese mit der Aussage der* DULONG-PETIT*-Regel.*

117.2.2 Adiabatenkoeffizient

Zur Bestimmung des Adiabatenkoeffizienten stehen Versuchsanordnungen nach Abb. 117.2 zur Verfügung. Regulieren Sie die Schwingungsamplitude durch die Luftzufuhr (Druckminderer) und den geschlitzten Messingring, mit dem Sie die Größe der Austrittsöffnung variieren können.

	Glaskolben
V	1,14 l

Schwinger		
Material	Farbe	Masse
Trovidur	rot oder schwarz	(4,5 ± 0,1) g
Teflon	weiß	(7,1 ± 0,1) g
Aluminium	Aluminium	(9,4 ± 0,1) g
Alle Radien: (5,95 ± 0,05) mm		

Aufgabe 117.e: *Messen Sie mit mindestens zwei verschiedenen Schwingern jeweils mehrmals die Zeit für 50 Schwingungen und berechnen Sie hieraus die mittleren Schwingungsdauern T. Schätzen Sie den Messfehler sinnvoll ab.*

Aufgabe 117.f: *Berechnen Sie nach Gleichung (117.12) den Adiabatenexponenten von Luft (inkl. Fehlerrechnung). Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem erwarteten Wert aus Aufgabe 117.D.*