

APW— Ausgewählte Phänomene der Wärmelehre

P2 — Praktikum

4. August 2020

Ziele

Die durchzuführenden Versuche sollen elementare Aspekte thermodynamischer Zusammenhänge verdeutlichen.

Teilversuche

1. **Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser**

Zunächst wird der Wasserwert des verwendeten Kalorimeters bestimmt und mit Erfahrungswerten verglichen. Anschließend wird die spezifische Wärmekapazität von Wasser bestimmt.

2. **Bestimmung der Wärmekapazitäten von Festkörpern**

Bestimmung der Wärmekapazität verschiedener Körper mittels Kalorimeter und Vergleich mit der Theorie nach Dulong und Petit.

3. **Bestimmung der spezifischen Schmelzwärme von Eis**

Gefrorenes Wasser (Eis) wird im Kalorimeter geschmolzen und daraus die spezifische Schmelzwärme bestimmt.

4. **Adiabatische Zustandsänderung**

Eine adiabatische Zustandsänderung einer Luftmenge, die wegen mangelhafter Wärmeisolierung schnell ablaufen muss, wird mit Hilfe einer schwingenden Wassersäule realisiert. Aus dem Experiment ergibt sich der Adiabatenexponent von Luft.

5. **Strahlung eines Schwarzen Strahlers**

Bestätigung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes durch Messung der Abstrahlung eines Schwarzen Strahlers.

Inhaltsverzeichnis

1	Physikalische Grundlagen	3
1.1	Begriff der Wärmeenergie	3
1.2	Begriff der Temperatur	3
1.3	Wärmekapazität	4
1.4	Kalorimetrie	5
1.5	Spezifische Schmelzwärme	6
1.6	Die adiabatische Zustandsänderung	7
1.7	Temperaturstrahlung	8
1.8	Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität von Festkörpern	11
2	Technische Grundlagen	13
2.1	Temperaturmessung	13
2.2	Kalorimetrie	13
2.3	Druckmessung mit Flüssigkeitssäulen	16
2.4	Versuchsanordnung zur adiabatischen Zustandsänderung	17
2.5	Versuch zur Temperaturstrahlung	19
2.6	Infrarotthermometer und Wärmebildkamera	20
3	Versuchsdurchführung	21
3.1	Teilversuch 1: Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser . . .	21
3.2	Teilversuch 2: Bestimmung der Wärmekapazitäten von Festkörpern	23
3.3	Teilversuch 3: Bestimmung der spezifischen Schmelzwärme von Eis	24
3.4	Teilversuch 4: Adiabatische Zustandsänderung	24
3.5	Teilversuch 5: Strahlung eines schwarzen Strahlers	25
4	Auswertung	27
4.1	Teilversuch 1: Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser . . .	27
4.2	Teilversuch 2: Bestimmung der Wärmekapazitäten von Festkörpern	27
4.3	Teilversuch 3: Bestimmung der spezifischen Schmelzwärme von Eis	28
4.4	Teilversuch 4: Adiabatische Zustandsänderung	28
4.5	Teilversuch 5: Strahlung eines Hohlraumstrahlers	28

Literatur

- [Ede12] EDER, F.X.: *Arbeitsmethoden Der Thermodynamik: Band II Thermische Und Kalorische Stoffeigenschaften*. Springer, 2012. – ISBN 9783642932274

1 Physikalische Grundlagen

1.1 Begriff der Wärmeenergie

Charakteristisch für die Energieform Wärme ist die *statistische Verteilung* der Energie auf die einzelnen Teilchen eines Stoffes. Die thermische Molekularbewegung ist ungeordnet¹, d. h., die Richtung der Geschwindigkeitsvektoren der einzelnen Teilchen ist in makroskopisch ruhenden Stoffen isotrop verteilt.

1.2 Begriff der Temperatur

Die Temperatur ist ein Maß für die mittlere kinetische Energie und damit für den mittleren Geschwindigkeitsbetrag der Teilchen. Die Zufuhr von Energie in Form von Wärme kann zwei Wirkungen haben: eine Temperaturerhöhung oder einen Phasenübergang.

Temperaturerhöhung

Führt man einem Stoff eine Wärmemenge Q zu, ohne dass sich dabei sein Aggregatzustand verändert, so erhöht sich die mittlere kinetische Energie seiner Moleküle und damit auch die mittlere Länge der Geschwindigkeitsvektoren (siehe Abbildung 1). Die Vergrößerung des mittleren Geschwindigkeitsbetrages entspricht einer Temperaturerhöhung.

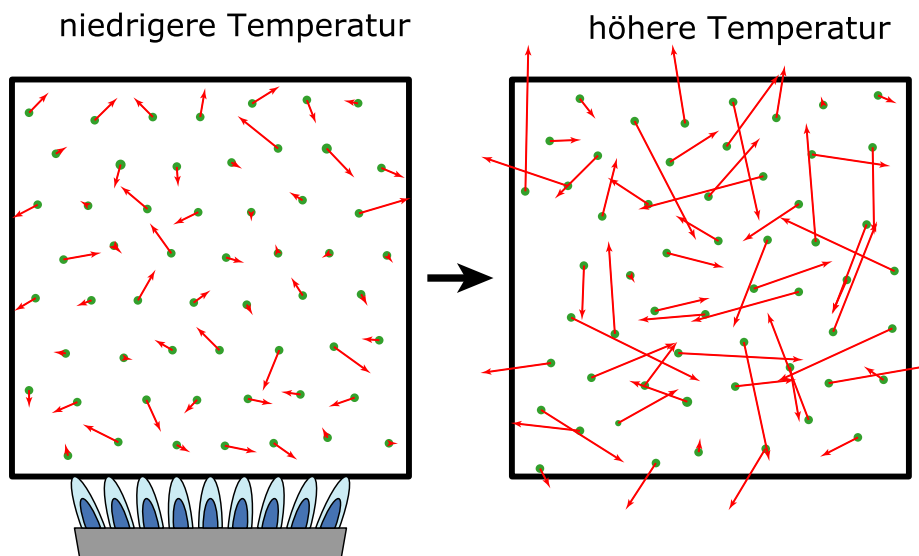


Abbildung 1: Wärmezufuhr erhöht den Geschwindigkeitsbetrag der Teilchen und damit die Temperatur

¹Ein Maß für diese „molekulare Unordnung“, die mit stärkerer thermischer Bewegung zunimmt, ist die Entropie S .

1.3 Wärmekapazität

Zusammenhang zwischen zugeführter Wärmemenge und Temperaturänderung

Die Zufuhr von Wärme in ein System ändert dessen Temperatur, solange kein Phasenübergang stattfindet. Für eine kleine Temperaturänderung ΔT kann in guter Näherung angenommen werden, dass ΔT proportional der zugeführten Wärmemenge Q ist:

$$\Delta T = \frac{1}{C} Q \quad (1)$$

Dabei ist die Proportionalitätskonstante $1/C$ zunächst willkürlich gewählt. (1) kann umgeschrieben werden:

$$Q = C \Delta T \quad (2)$$

Der Proportionalitätsfaktor C in (2) gibt die Wärmemenge Q an, welche die Substanzmenge bei der Temperaturänderung um 1K aufnimmt oder abgibt. C heißt deshalb Wärmekapazität dieser Substanzmenge.

Für kleine Temperaturänderungen ΔT ist C über das ganze Temperaturintervall konstant, nur dann ist (2) gültig. Im allgemeinen Fall kann die Wärmekapazität von der Temperatur abhängen. Zur Berechnung von Q muss dann über die Temperatur integriert werden:

$$Q_x = \int_{T_1}^{T_2} C_x(T) dT$$

Der Index x bedeutet eine Zustandsgröße, die während des Wärmeaustauschs konstant gehalten wird (Volumen V , Druck p , Entropie S , Teilchenzahl N , Magnetfeld B usw.) Leider ist es zu zeitaufwändig, den Temperaturverlauf der Wärmekapazität im Rahmen eines Grundpraktikums zu messen. Daher muss hier die Bestimmung des Mittelwerts

$$\bar{c} = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} c(T) dT \quad (3)$$

über ein endliches Temperaturintervall genügen.

Spezifische Wärmekapazitäten

Die Wärmekapazität C ist zu der Substanzmenge n bzw. der Molekülzahl N proportional. Um eine Materialkonstante zu erhalten, muss durch die Substanzmenge oder eine zu ihr proportionale Größe dividiert werden. Das ergibt z. B. folgende Arten von spezifischen Wärmekapazitäten:

- Massenbezogene spezifische Wärmekapazität: $c = C/m$ (m = Masse, $[c] = \text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$)
- Molwärme: $C^m = C/n$ (n = Stoffmenge, $[C^m] = \text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$)
- Molekülwärme: $c^m = C/N$ (N = Zahl der Moleküle, $[c^m] = \text{J K}^{-1}$)

1.4 Kalorimetrie

In der Kalorimetrie geht es ganz allgemein um die Bestimmung von Wärmemengen, die bei unterschiedlichen Prozessen freigesetzt oder aufgenommen werden können. Das Messgerät, das zur Bestimmung dieser Wärmemenge verwendet wird, heißt Kalorimeter. Der Aufbau kann sehr unterschiedlich sein, das Prinzip ist aber meist sehr ähnlich. Im Praktikum verwenden Sie ein Flüssigkeitskalorimeter².

Messung mit einem Flüssigkeitskalorimeter

Ein Flüssigkeitskalorimeter (Abbildung 6) besteht aus einem wärmeisolierten Gefäß, das eine Flüssigkeitsmenge enthält, im Praktikum Wasser. Man kann z. B. einen wärmeren Körper in die Flüssigkeit bringen, sie elektrisch heizen oder eine chemische Reaktion in ihr ablaufen lassen. Gemessen werden die Temperaturänderungen ΔT der Kalorimeterflüssigkeit. Bei bekannter Wärmekapazität C des Kalorimeters kann mit (2) aus ΔT die aufgenommene Wärmemenge Q bestimmt werden.

Der Wasserwert eines Kalorimeters

Es ist unvermeidlich, dass neben der Kalorimeterflüssigkeit auch das Kalorimetergefäß einen Teil der zugeführten Energie aufnimmt. Daher setzt sich die Wärmekapazität des Kalorimeters C aus der Wärmekapazität der Kalorimeterflüssigkeit (Wasser) C_W und der des Kalorimetergefäßes C_G zusammen:

$$C = C_W + C_G \quad (4)$$

C_W = Wärmekapazität des Wassers im Kalorimeter, C_G = Wärmekapazität des Gefäßes (einschließlich Thermometer, Rührer, Heizer usw.)

Zur Bestimmung von C_G bedarf es eines Zusatzexperiments, das allerdings nicht C_G selbst, sondern nur den so genannten Wasserwert m_W^* des Kalorimeters liefert. Dieser ist die (fiktive) Masse an Wasser, welche die gleiche Wärmekapazität C_G wie das Kalorimetergefäß besitzt:

$$C_G = c_W m_W^*$$

Damit kann (4) unter Benutzung der Definition der spezifischen Wärmekapazität wie folgt modifiziert werden:

$$C = c_W (m_W + m_W^*)$$

Aus früheren Messungen des Wasserwerts der Kalorimeter ergibt sich ein Wert von $m_W^* = 80\text{ g}$, den Sie für die Auswertung verwenden können (falls Ihr eigener Wert zu große Unsicherheiten aufweist).

²Kalorimeter werden auch in der aktuellen Forschung benutzt, z. B. zur Bestimmung von Reaktionsenthalpien oder in Teilchendetektoren.

1 Physikalische Grundlagen

Der Wasserwert lässt sich wie folgt selbst bestimmen: Füllt man das Kalorimeter mit Wasser der Masse m_1 und misst die Temperatur T_1 des Systems, schüttet anschließend eine zweite Wassermenge m_2 mit der Temperatur $T_2 > T_1$ dazu und bestimmt die sich dabei im Kalorimeter einstellende Mischungstemperatur T_M , dann lässt sich aus diesen Größen der Wasserwert bestimmen. Da es sich bei einem Kalorimeter näherungsweise um ein geschlossenes System handelt, gilt nach dem Energieerhaltungssatz:

$$c_W m_2 (T_2 - T_M) = c_W (m_1 + m_w^*) (T_M - T_1)$$

Es findet ein Wärmeaustausch zwischen der Wassermasse m_2 und dem Kalorimeter mit der Äquivalenzmasse m_w^* sowie der sich bereits zuvor im Kalorimeter befindlichen Wassermenge m_1 statt. Da sich c_W wegekürzt lässt sich durch Auflösen nach m_w^* der Wasserwert bestimmen.

Bestimmung der Wärmekapazität eines Festkörpers

Eine Probesubstanz der Masse m_s , der Temperatur Θ_s und der spezifischen Wärmekapazität c_s wird in das Kalorimeter mit bekannter Wärmekapazität $C = c_w(m_w + m_w^*)$ und der Temperatur Θ_k eingebracht. Durch Wärmeaustausch stellt sich eine Mischungstemperatur Θ_m ein. Es ergibt sich folgender Wärmeübertrag:

Kalorimeter:

$$Q_1 = c_w(m_w + m_w^*)(\Theta_m - \Theta_k),$$

Probesubstanz:

$$Q_2 = c_s m_s (\Theta_s - \Theta_m).$$

Bei hinreichender Wärmeisolation gilt $Q_1 = Q_2$, also:

$$c_s = \frac{c_w(m_w + m_w^*)(\Theta_m - \Theta_k)}{m_s(\Theta_s - \Theta_m)}. \quad (5)$$

1.5 Spezifische Schmelzwärme

Im Bereich der Phasenumwandlung erhöht sich die Temperatur eines Systems bei Zufuhr von Wärme erst, wenn die Phasenumwandlung vollständig stattgefunden hat. Erhöht man die Temperatur eines Festkörpers wie Eis bis zum Schmelzpunkt, dann bewirkt jede weitere Wärmezufuhr zunächst nur, dass die Atome aus den Gleichgewichtslagen herausgerissen werden, ohne dass sich die Temperatur ändert. Dies findet so lange statt, bis der Körper insgesamt in die flüssige Phase überführt worden ist. Weitere Wärmezufuhr bewirkt dann wieder eine Temperaturerhöhung (bis zur nächsten Phasenumwandlung wie dem Sieden).

Wärme, die für den Phasenübergang aufgewendet wird, bezeichnet man als Umwandlungswärme. In Teilversuch 3 bestimmen Sie die spezifische Schmelzwärme von Eis.

1 Physikalische Grundlagen

Die Schmelzwärme eines Stoffes ist die Wärme, die man benötigt, um ihn am Schmelzpunkt von der festen in die flüssige Phase zu überführen. Mit der spezifischen Schmelzwärme λ berechnet sie sich nach

$$\Delta Q = \lambda m . \quad (6)$$

Die spezifische Schmelzwärme von Wasser bei Normaldruck beträgt $\lambda = 333 \text{ J g}^{-1}$.

Bei der Bestimmung in einem Kalorimeter ergibt sich wieder eine Mischungstemperatur, wobei diesmal zusätzlich der Term für die Schmelzwärme des Eises zusätzlich zu berücksichtigen ist:

$$c_W m_{\text{Eis}} (T_M - T_0) + \lambda m_{\text{Eis}} = c_W (m_1 + m_W^*) (T_1 - T_M) \quad (7)$$

1.6 Die adiabatische Zustandsänderung

Herleitung der Poissonschen Gleichung

Eine adiabatische Zustandsänderung liegt dann vor, wenn das System während ihres Ablaufs keine Energie in Form von Wärme mit seiner Umgebung austauscht. Gesucht wird eine Beziehung zwischen Druck und Volumen, welche diese Bedingung erfüllt. Dazu werde die allgemeine Zustandsgleichung des idealen Gases folgendermaßen geschrieben:

$$p(V)V = nRT(V) \quad (8)$$

Die Größe $T(V)$ soll durch bekannte Größen ausgedrückt werden. Dazu ist der 1. Hauptsatz in differentieller Form mit der Bedingung $\delta Q = 0$ geeignet:

$$nC_V^m dT = -p dV$$

Daraus folgt:

$$\frac{dT}{dV} = -\frac{p}{nC_V^m} \quad (9)$$

Um in (8) die Größe $T(V)$ mithilfe von (9) ersetzen zu können, werde (8) nach V differenziert:

$$\frac{dp}{dV} V + p = nR \frac{dT}{dV}$$

Einsetzen von $\frac{dT}{dV}$ nach (9) ergibt:

$$\frac{dp}{dV} V = -p - nR \frac{p}{nC_V^m} = -\frac{C_V^m + R}{C_V^m} p = -\frac{C_p^m}{C_V^m} p$$

Umformung liefert folgende Differentialgleichung für $p(V)$:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{C_p^m}{C_V^m} \frac{dV}{V}$$

Die linke Seite werde zwischen dem festen Anfangsvolumen V_0 und einem beliebigen Volumen V , die rechte Seite zwischen den entsprechenden Drücken p_0 und p integriert:

$$-\frac{C_p^m}{C_V^m} \ln \left[\frac{V}{V_0} \right] = \ln \left[\frac{p}{p_0} \right]$$

Umformung nach den Regeln der Logarithmenrechnung ergibt

$$\frac{p}{p_0} \left[\frac{V}{V_0} \right]^{C_p^m/C_V^m} = \frac{p}{p_0} \left[\frac{V}{V_0} \right]^\gamma = 1 \quad (10)$$

Das ist die Poissonsche Gleichung für die adiabatische Zustandsänderung (Beachten Sie, dass die Basis einer Potenz mit beliebigem Exponenten dimensionslos sein muss!).

Im Versuchsskript zu dem in diesem Jahr nicht durchführbaren Versuch TEP sind in den dortigen Gleichungen (19) und (21) noch Beziehungen angegeben und zuvor hergeleitet, mit deren Hilfe eine Beziehung zwischen dem Adiabatenkoeffizienten und der Zahl f der Freiheitsgrade abgeleitet werden kann:

$$C_V^m = f \frac{1}{2} R \quad (11)$$

$$C_p^m = C_V^m + R \quad (12)$$

Für den durch (10) definierten Adiabatenexponenten γ liefert die Anwendung von (11) und (12) folgende Beziehung:

$$\gamma = \frac{C_p^m}{C_V^m} = \frac{f+2}{f}$$

Sie kann experimentell bestätigt werden, wenn γ gemessen und eine Modellvorstellung entwickelt wird, aus der die Zahl f der Freiheitsgrade ableitbar ist. So besteht die im Versuch verwendete Luft im Wesentlichen aus zweiatomigen Molekülen (N_2 , O_2), die um die beiden zur Verbindungslinie der Einzelatome senkrechten Hauptachsen rotieren können (die Rotation um die dritte Hauptachse längs der Verbindungslinie ist durch Stöße nicht anregbar). Die Moleküle haben also 5 Freiheitsgrade der Bewegung (3 für die Translation, 2 für die Rotation), d. h., es ist $\gamma = 7/5 = 1,4$.

1.7 Temperaturstrahlung

Aufgrund der Temperaturbewegung erfahren die in Atomen, Molekülen, Ionen usw. enthaltenen elektrischen Ladungen Beschleunigungen und senden deshalb elektromagnetische Strahlung aus. Diese wird dann thermische Strahlung, Wärmestrahlung oder Temperaturstrahlung genannt.

Aus alltäglichen Beobachtungen (z. B. glühende Herdplatte) ist bekannt, dass nicht nur die abgestrahlte elektromagnetische Leistung eines Körpers von der Temperatur abhängt, sondern dass sich mit steigender Temperatur auch die mittlere Wellenlänge der emittierten

Strahlung verändert. Es ist deshalb sinnvoll, für die Beschreibung der Temperaturstrahlung die temperatur- und wellenlängenabhängige spektrale spezifische Ausstrahlung M_λ einzuführen:

$$M_\lambda(\lambda, T) = \frac{\Delta\Phi(T)}{\Delta A \Delta\lambda}$$

$M_\lambda(\lambda, T)$ ist die auf das Flächenelement ΔA und auf das Wellenlängenintervall $(\lambda, \lambda + \Delta\lambda)$ bezogene Strahlungsleistung $\Delta\Phi$ eines Körpers.

Für die Entwicklung der modernen Physik war das Verständnis der Temperaturstrahlung wesentlich. Einen experimentellen und theoretischen Zugang zu den Gesetzen der Temperaturstrahlung zu finden, gelang mit dem sogenannten Hohlraumstrahler.

Die spezifische Ausstrahlung eines Hohlraumstrahlers

In Abbildung 2 ist der prinzipielle Aufbau eines Hohlraumstrahlers abgebildet. Die Innenwände eines Hohlraums werden durch eine Heizung auf einer Temperatur T gehalten. Befindet sich das System im thermodynamischen Gleichgewicht, ist die Temperaturstrahlung im Hohlraum unabhängig von den Eigenschaften des Hohlraums, wie Geometrie oder Wandbeschaffenheit. Durch Herstellen eines kleinen Lochs kann die Hohlraumstrahlung von Außen untersucht werden. Um das Gleichgewicht nicht zu stark zu stören, sollte der Lochdurchmesser möglichst klein gewählt werden, um andererseits eine vernünftige Strahlungsleistung für eine experimentelle Untersuchung zu erhalten, darf das Loch aber auch nicht beliebig klein gewählt werden.

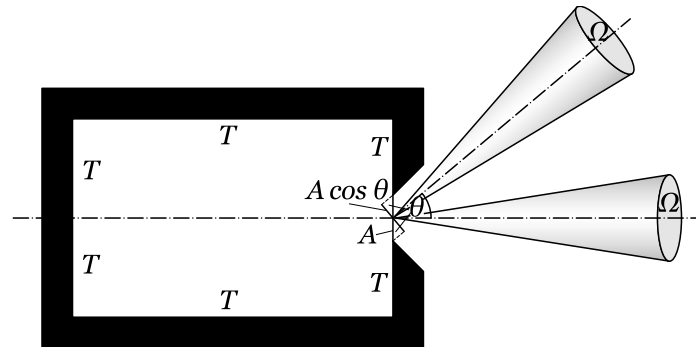


Abbildung 2: Temperaturstrahlung eines geheizten Hohlraums

Die spektrale spezifische Ausstrahlung $M_{\lambda s}(\lambda, T)$ der Hohlraumstrahlung ist als Funktion der Wellenlänge λ mit der Temperatur T als Parameter in Abbildung 3 dargestellt.

Die Kurven in Abbildung 3 sind durch die Plancksche Strahlungsformel gegeben:

$$M_{\lambda s}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(\frac{hc}{\lambda k_B T}) - 1} \quad (13)$$

λ = Wellenlänge, T = absolute Temperatur, c = Lichtgeschwindigkeit, h = Plancksche Konstante, k_B = Boltzmann-Konstante.

1 Physikalische Grundlagen

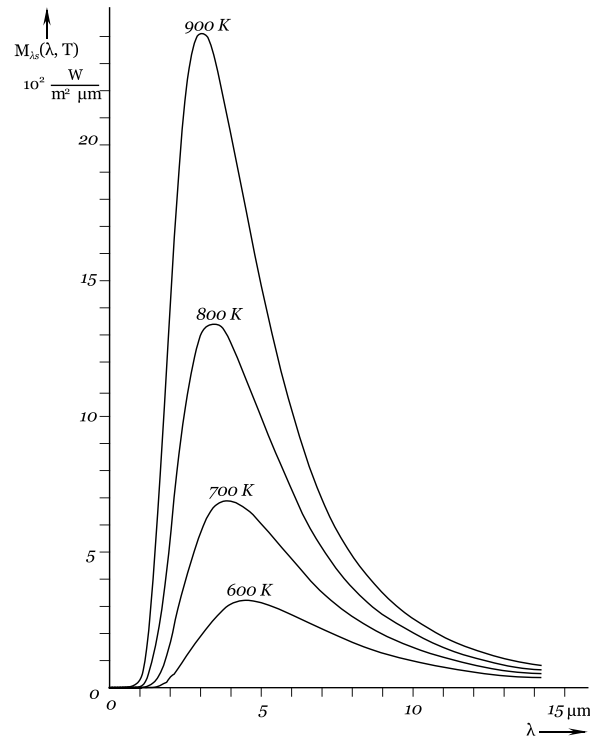


Abbildung 3: Spezifische Spektren des Hohlraums für verschiedene Temperaturen

Mit steigender Temperatur T wächst $M_{\lambda s}(\lambda, T)$ für alle Wellenlängen, außerdem verschiebt sich das Maximum zu kleineren Wellenlängen³.

Das Stefan-Boltzmannsche Gesetz

Die Integration über alle Wellenlängen liefert die totale spezifische Ausstrahlung:

$$M_s(T) = \int_0^\infty M_{\lambda s}(\lambda, T) d\lambda \quad (14)$$

Die Integration von (13) gemäß (14) ergibt, dass die totale spezifische Ausstrahlung $M_s(T)$ des Hohlraumstrahlers (Fläche unter einer Kurve für $M_{\lambda s}(\lambda, T)$) dem Stefan-Boltzmann-Gesetz genügt:

$$M_s(T) = \sigma T^4 \quad (15)$$

Dabei ist σ die Stefan-Boltzmann-Konstante mit $\sigma \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$. Der starke Anstieg der Gesamtemission (Flächen unter den Kurven) mit steigender Temperatur (nach (15) mit T^4)

³Diese Verschiebung wird durch das Wiensche Verschiebungsgesetz wiedergegeben:

$$\lambda_m T = b$$

λ_m = Wellenlänge, bei der das jeweilige Maximum auftritt, Konstante $b \approx 0,2898 \text{ cm K}^{-1}$.

ist in Abbildung 3 gut zu erkennen. Entsprechend gilt für die gesamte Strahlungsleistung Φ durch ein Loch der Querschnittsfläche A

$$\Phi(T) = \sigma A T^4$$

Dieser Zusammenhang gilt für alle schwarzen Strahler. Je nach Oberfläche eines Körpers kann die ausgestrahlte Leistung auch niedriger sein, steigt aber trotzdem mit T^4 an. Für solche Körper gilt dann

$$\Phi(T) = \epsilon \sigma A T^4 \quad (16)$$

wobei ϵ der über alle Wellenlängen gemittelte integrale Emissionskoeffizient ist. Er liegt zwischen 0 und 1 und hängt von der Oberflächenbeschaffenheit des Materials ab. Ist $\epsilon = 1$, so ist der Körper ein idealer schwarzer Strahler. Körper mit $\epsilon < 1$ bezeichnet man manchmal auch als „graue Strahler“.

1.8 Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität von Festkörpern

Die Regel von Dulong und Petit

Ein kristalliner Festkörper besteht aus einer regelmäßigen Anordnung von Molekülen. Jedes Molekül befindet sich an einem bestimmten Ort in einer Gleichgewichtslage, um die herum es Schwingungen ausführen kann. Die gesamte Energie eines Moleküls im Festkörper ist gleich der Summe der potentiellen und der kinetischen Energie, deren Mittelwerte bei einer harmonischen Schwingung untereinander gleich sind. Jedes Molekül hat demnach sechs Freiheitsgrade, und nach dem Gleichverteilungssatz entfällt auf jeden Freiheitsgrad eine mittlere Energie von $(1/2)k_B T$ pro Teilchen. Somit ist die innere Energie U eines Mols eines Festkörpers:

$$U = 6 \cdot \frac{1}{2} N_A k_B T = 3RT.$$

Zusammen mit (2) und $Q = \Delta U$ folgt:

$$C_V^m = 3R$$

Dies ist das Gesetz von Dulong und Petit.

Quantisierte Gitterschwingungen

Im klassischen Bild sollte die Wärmekapazität eines Festkörpers demnach unabhängig von der Temperatur sein. Experimente zeigen aber eine Temperaturabhängigkeit. Abbildung 4 zeigt diese Temperaturabhängigkeit für Blei und Aluminium. Das Gesetz von Dulong und Petit gilt nur als theoretischer Näherungswert für relativ hohe Temperaturbereiche.

Das klassische Bild muss wegen der Quantisierung der Schwingungsenergie modifiziert werden. Es können nicht alle der quantisierten Schwingungszustände angeregt werden,

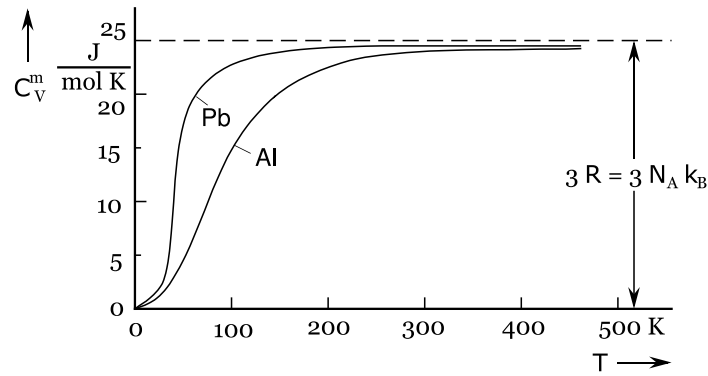


Abbildung 4: Temperaturabhängigkeit der Molwärmen von Blei und Aluminium. Für tiefe Temperaturen ändert sich die Wärmekapazität stärker und wird durch das Debyesche Gesetz ($C_V \sim T^3$) beschrieben.

sondern nur diejenigen, für welche die vorhandene thermische Energie ausreicht. Das führt zu einer Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität wie in Abbildung 4. Die Zunahme der inneren Energie ist dabei umso schwächer, je kleiner die Atommasse ist.

Für Interessierte: Man kann den Unterschied im Verlauf einer Kurve von Abbildung 4 für hohe und tiefe Temperaturen experimentell nachweisen. Dazu würde im Versuch der Mittelwert der Wärmekapazität eines der beiden Metalle einmal oberhalb der Raumtemperatur und einmal oberhalb der Siedetemperatur von flüssigem Stickstoff (77 K) bestimmt. Die zugeführten bzw. abgeführten Wärmemengen entsprechen den Flächen unter der Kurve für gleiche Temperaturintervalle (Abbildung 5) bzw. der Verdampfungswärme mal der verdampften Masse von Stickstoff. Der funktionale Zusammenhang hierzu ist:

$$Q = Q_V m_V = m_x c_x (T_1 - T_2) \quad (17)$$

wobei $Q_V = 199 \text{ J g}^{-1}$ die Verdampfungswärme von Stickstoff ist. In diesem Jahr können die Messungen mit flüssigem Stickstoff jedoch leider nicht durchgeführt werden.

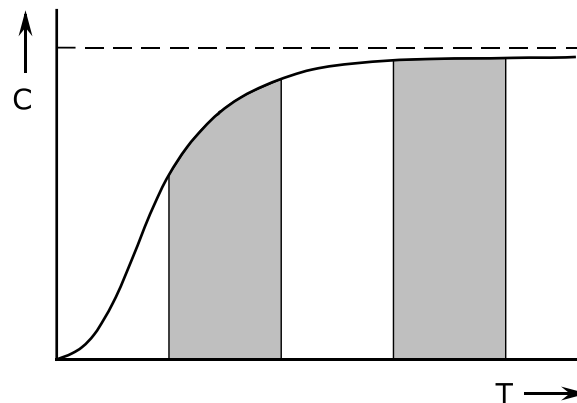


Abbildung 5: Experimenteller Nachweis der Temperaturabhängigkeit von Wärmekapazitäten fester Körper (vgl. (3)).

2 Technische Grundlagen

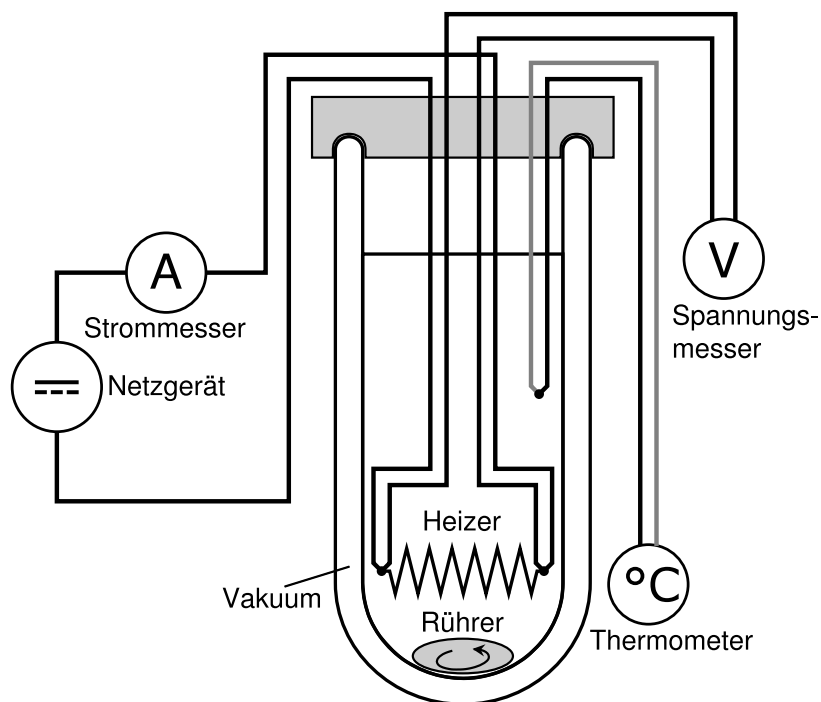
2.1 Temperaturmessung

Die Messung der Temperatur erfolgt im Praktikum mit verschiedenen Thermometern, die auf ganz unterschiedliche Arten funktionieren.

2.2 Kalorimetrie

Versuchsaufbau

Die in Abbildung 6 schematisch dargestellte Anordnung besteht im Wesentlichen aus dem Kalorimeter. Die Heizung kann benutzt werden, um dem Kalorimeter eine definierte Energiemenge zuzuführen. Zur besseren Durchmischung besitzt das Kalorimeter einen Magnetrührer. Die Temperaturänderung wird mit einem Thermoelement gemessen.



Kalorimeter

Abbildung 6: Kalorimeter mit Beschaltung

Das Kalorimetergefäß (Dewar-Gefäß) besteht aus doppelwandigem Kunststoff, dessen Zwischenraum zur Isolierung mit Polyurethan-Schaum ausgefüllt ist. Die Öffnung des Gefäßes wird mit einem Deckel verschlossen. Durch diese Maßnahmen werden Wärmeverluste durch Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion weitgehend unterbunden.

Temperierung der Probekörper

Die Temperierung der Probekörper auf Temperaturen oberhalb der Raumtemperatur erfolgt mittels eines Temperierbads (Abbildung 7).

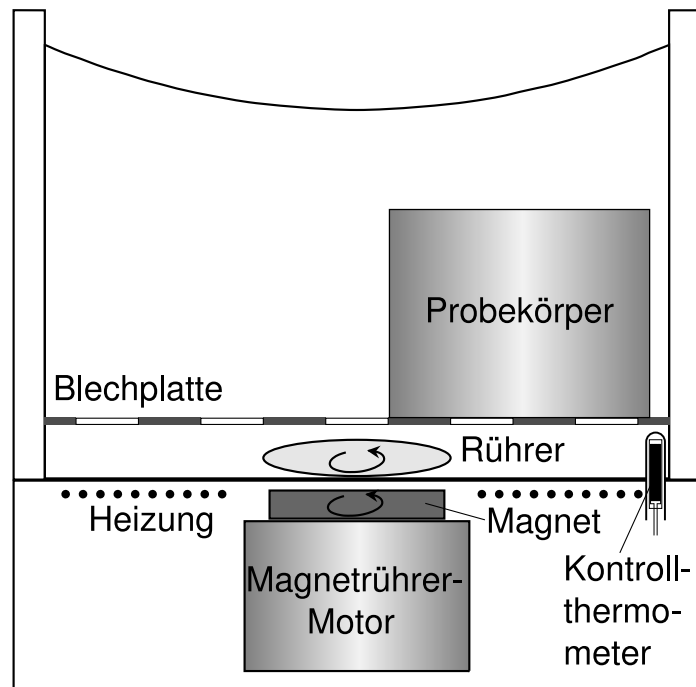


Abbildung 7: Temperierbad

Die Temperierbadflüssigkeit wird durch eine Regelautomatik auf konstanter Temperatur gehalten. Vereinfacht dargestellt bleibt die Heizung eingeschaltet, bis die gewünschte Temperatur erreicht ist. Diese wird durch ein eingebautes Kontrollthermometer mit der Isttemperatur verglichen. Sind beide gleich geworden, schaltet die Heizung ab. Sie schaltet sich wieder ein, wenn die Temperatur merklich abgesunken ist usw. Ein Magnetrührer versetzt die Temperierbadflüssigkeit in Rotation. Der Probekörper soll von ihr turbulent umströmt werden, damit der Wärmeaustausch möglichst schnell erfolgt. Das ist bei einer Positionierung am Rand des Gefäßes besser gewährleistet.

Extrapolationsverfahren

Mit idealer Wärmeisolierung würde die Temperatur im Kalorimeter vor und nach der Zufuhr einer Wärmemenge zeitlich konstant bleiben, sodass man Anfangs- und Endtemperatur gut ablesen könnte. In Wirklichkeit treten aber stets kleine Energieverluste auf. Abbildung 8 zeigt den realen Temperaturverlauf für ein Beispiel, in dem sich die Kalorimeterflüssigkeit vor der Wärmezufuhr unterhalb der Umgebungstemperatur Θ_u (Vorlauf) und nach dem Temperatúrausgleich oberhalb derselben (Nachlauf) befand. Der dargestellte Kurvenverlauf ergibt sich in dieser Form beim Eintauchen eines Festkörpers mit $\Theta \geq \Theta_a$.

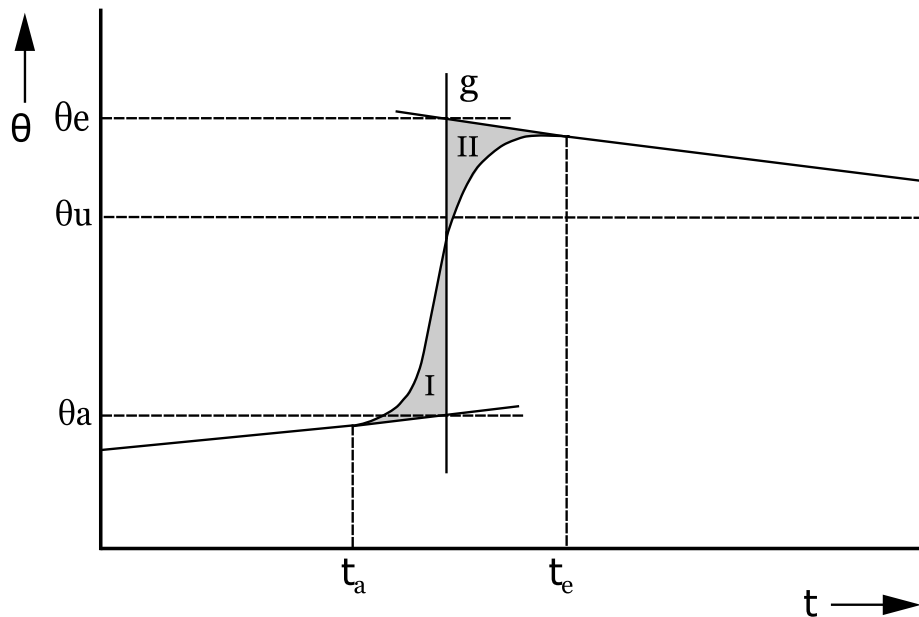


Abbildung 8: Temperaturverlauf einer Kalorimeterflüssigkeit für das Eintauchen eines Festkörpers

Im idealisierten Fall würde sich die Mischtemperatur unendlich schnell einstellen, d. h. zum Zeitpunkt der Wärmezufuhr gäbe es einen Temperatursprung. Aus der gemessenen Kurve für den Temperaturverlauf $\Theta(t)$ kann man Anfangs- und Endtemperatur näherungsweise auf folgende Weise ermitteln: Man extrapoliert die beiden annähernd linearen Kurventeile für $t \leq t_a$ und $t \geq t_e$ auf Zeiten $t > t_a$ bzw. $t < t_e$. Dann bestimmt man eine vertikale Gerade g so, dass die beiden Flächen I und II untereinander gleich groß werden. Die Schnittpunkte von g mit den extrapolierten Geraden liefern die Temperaturen Θ_a und Θ_e . Es ist wichtig, dass nur die beiden annähernd linearen Kurvenabschnitte verlängert werden.

Durch Anwendung des oben beschriebenen Verfahrens kann durch Verlängern des Vor- und Nachlaufs und Schneiden mit der vertikalen Geraden die Mischtemperatur korrekt ermittelt werden⁴.

⁴Für eine Begründung dieses Verfahrens siehe [Ede12], Seite 161

2.3 Druckmessung mit Flüssigkeitssäulen

Ein unbekannter Druck p (z. B. der eines Gases) drücke in einem zylindrischen Rohr von unten mit der Kraft F auf einen (gewichtslosen) Kolben der Querschnittsfläche A (Abbildung 9). Zur Kompensation von F werde in das Rohr oberhalb des Kolbens eine Flüssigkeit der Dichte ρ bis zur Höhe h gefüllt. Die Flüssigkeitssäule der Masse m drückt mit dem Gewicht $-F = mg$ auf die Kolbenfläche A . Dann ist der Schweredruck an dieser Stelle:

$$p = -\frac{F}{A} = \frac{mg}{A} = \frac{\rho V g}{A} = \frac{\rho A h g}{A} = \rho g h \quad (18)$$

Der Druck p ergibt sich nach (18) aus der abgelesenen Höhe h . Damit h nicht zu groß⁵ wird, sollte eine Flüssigkeit mit großer Dichte ρ verwendet werden, man nimmt daher meistens Quecksilber (Dichte $13,5 \text{ g cm}^{-3}$).

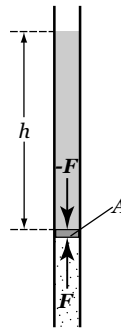


Abbildung 9: Prinzip der Druckmessung mit einer Flüssigkeitssäule

Für die Praxis ist die prinzipielle Anordnung von Abbildung 9 ungünstig. Man kommt ohne zusätzlichen Kolben aus, wenn das Gas von oben auf den Flüssigkeitsspiegel drückt.

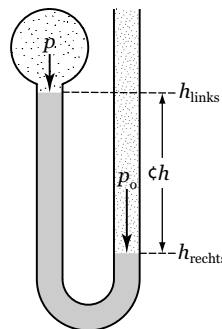


Abbildung 10: Manometer: Messung einer Druckdifferenz mit Hilfe von verbundenen Flüssigkeitssäulen

Um den absoluten Druck p des im Kolben abgesperrten Gases aus der abgelesenen Höhendifferenz $\Delta h = h_{\text{links}} - h_{\text{rechts}}$ zu bestimmen, braucht man eine zusätzliche Information über den Außendruck p_0 . Sie wird mit dem in Abbildung 11 dargestellten Barometer gewonnen. Über

⁵Die Länge einer Wassersäule, die den Atmosphärendruck kompensiert, beträgt ungefähr 10 m! In der Theresienstraße steht ein solches Wasser-Barometer.

dem einen der beiden Flüssigkeitsspiegel befindet sich hier ein Vakuum, d. h. die Differenz entspricht dem Druck auf den anderen Flüssigkeitsspiegel.

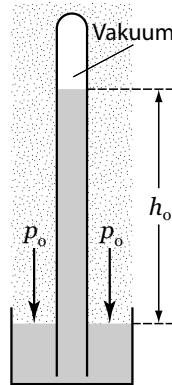


Abbildung 11: Hg-Barometer: Messung des Atmosphärendrucks als Differenz gegen ein Vakuum

2.4 Versuchsanordnung zur adiabatischen Zustandsänderung

Bei einer adiabatischen Zustandsänderung tauscht das System keine Wärme mit der Umgebung aus. In der Realität muss sie deshalb, vor allem bei Gasen, hinreichend schnell durchgeführt werden, da bei einem langsamen Ablauf jede reale Wärmeisolierung wegen der sehr kleinen Wärmekapazität einer Gasmenge ungenügend wäre. Für Teilversuch 5 wird ein Glaskolben mit angeschlossenem wassergefülltem U-Rohr verwendet (Abbildung 12). Das Wasser kann dadurch in Schwingung versetzt werden, indem mit Hilfe eines Gummiballs in den (mit einem Finger verschlossenen) rechten Schenkel des U-Rohrs Luft eingepresst wird, die nach Freigabe der Öffnung wieder entweichen kann. Dadurch wird die Luft im Kolben schnell periodisch komprimiert und expandiert.

Formel zur Auswertung

Gemessen wird u. a. die Schwingungsdauer τ . Nach der Theorie der ungedämpften freien Schwingung (behandelt in Kurs P1, Versuch MOS– Mechanische Schwingungen) hängt sie folgendermaßen von der Masse m des Wassers und der Rückstellkonstante k für die Wassersäule ab:

$$\tau^2 = 4\pi^2 \frac{m}{k} \quad (19)$$

Die rücktreibende Kraft $k\Delta x$ setzt sich aus der Schwerkraft $\rho A \Delta x g$ (ρ = Dichte des Wassers, A = Querschnitt der Wassersäule, g = Erdbeschleunigung) auf die jeweils überstehende Wassersäule (siehe Abbildung 13) und der Kraft $\Delta p A$ aus dem durch die adiabatische Zustandsänderung hervorgerufenen Über- bzw. Unterdruck Δp des Gases zusammen. Da der

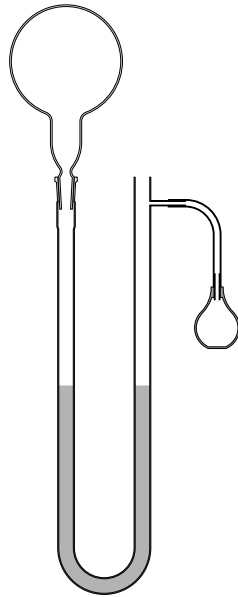


Abbildung 12: Luftgefüllter Kolben mit angeschlossener schwingungsfähiger Wassersäule

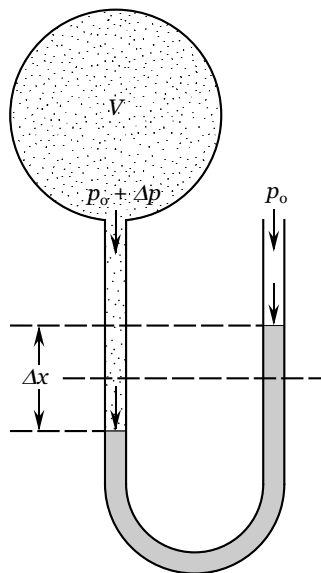


Abbildung 13: Zustandekommen der rücktreibenden Kraft einer ausgelenkten Wassersäule in einem U-förmigen Rohr

letztere bei kleiner Schwingungsamplitude klein gegen den Gleichgewichtsdruck p ist, ergibt er sich in guter Näherung aus (10):

$$dp = -\gamma p \frac{dV}{V} \quad (20)$$

Die Gleichgewichtslage der Schwingung liegt in der Mitte zwischen den beiden Wasserspiegeln, daher ist $dV = A dx/2$.

Die Schwingungsdauer wird einmal ohne (τ_0) und einmal mit angeschlossenem Kolben (τ_k) gemessen. Bei Division der Quadrate der Schwingungsdauern hebt sich nach (19) die in beiden Fällen gleiche Masse m heraus, und es folgt für γ :

$$\gamma = \frac{2\rho g V}{pA} \left[\frac{\tau_0^2}{\tau_k^2} - 1 \right] \quad (21)$$

2.5 Versuch zur Temperaturstrahlung

In Abbildung 14 ist die Apparatur zur Untersuchung der Temperaturstrahlung dargestellt.

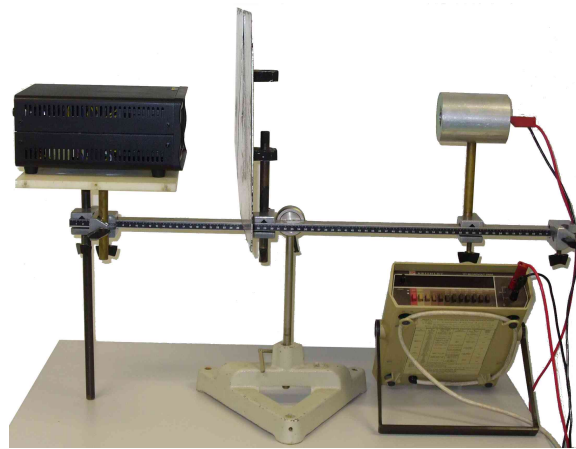


Abbildung 14: Versuchsaufbau zur Messung der Temperaturstrahlung. Abstand Kalibrator – Blende: ca. 7 cm; Abstand Blende – Thermosäule: ca. 40 cm

Der schwarze Strahler ist im Versuch als Kalibrator zur Kalibrierung von Infrarotthermometern realisiert. Er hat eine beheizte Fläche, die mit einer speziellen Farbe beschichtet ist. Diese Farbe hat einen Emissionskoeffizienten ϵ von 0,95. Damit das so bleibt und Sie sich nicht verbrennen, fassen Sie diesen Bereich bitte nicht an. Von der beheizten Fläche ausgehend gelangt die Strahlung über eine Blende in die Thermosäule. Die Thermosäule liefert eine Spannung, die proportional ist zur Intensität der Temperaturstrahlung.

Messungen kleiner Spannungen

Für die Messung von sehr geringen Thermospannungen wird ein entsprechend empfindliches Tischmultimeter verwendet (siehe Abbildung 15).

Das Tischmultimeter lässt sich prinzipiell wie alle Multimeter bedienen: Die Stellung der Taste **AC/DC** legt fest, ob mit Wechselspannung/strom oder Gleichspannung/strom gearbeitet werden kann (**AC** = Alternating Current, **DC** = Direct Current). Widerstandsmessung ist nur bei der Stellung **DC** möglich. Mit den weiteren Tasten wird die Einheit der gewünschten

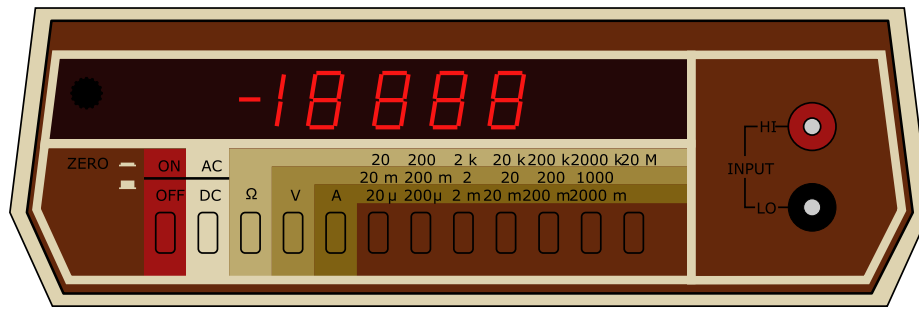


Abbildung 15: Frontplatte des Tischmultimeters

Größe und der Messbereich gewählt. Die angegebenen Zahlwerte sind zusammen mit den Einheiten zu lesen, diese werden ggf. mit den Vorsätzen μ (Mikro), m (Milli), k (Kilo) oder M (Mega) versehen. Beim Display handelt es sich um eine sogenannte „4 1/2“ stellige Anzeige, da links höchstens eine Eins und danach höchstens vier Neunen erscheinen können. In die mit **INPUT LO** bezeichnete Buchse wird bei Gleichspannungs- oder Gleichstrommessungen der Minuspol gesteckt. Verpolung ist unschädlich, es erscheint lediglich ein Minuszeichen in der Anzeige.

2.6 Infrarotthermometer und Wärmebildkamera

Jeder Gegenstand gibt je nach seiner Temperatur Wärmestrahlung ab. Gegenstände bei Raumtemperatur strahlen Infrarotlicht (Wellenlänge $\approx 10\mu\text{m}$) aus. Ein Infrarotthermometer misst die Leistung der Infrarotstrahlung und nutzt das Strahlungsgesetz (16), um aus der gemessenen Strahlungsleistung eine Temperatur zu berechnen. Damit das funktioniert, muss der Emissionskoeffizient ϵ natürlich bekannt sein. Im Infrarotlicht sind die meisten Gegenstände recht schwarz, d. h. der Emissionskoeffizient ist nahe an 1. Menschliche Haut hat z. B. einen Emissionskoeffizienten von 0,96. Das Infrarotthermometer ist für einen Emissionskoeffizienten von $\epsilon = 0,95$ kalibriert. Bei der Benutzung des Thermometers muss man also vorsichtig sein: Der angezeigte Wert ist nur dann richtig, wenn für die gemessene Oberfläche $\epsilon \approx 0,95$ gilt. Bei spiegelnden Materialien⁶ wie Metall ist das z. B. nicht der Fall!

Die Wärmebildkamera nutzt das gleiche Prinzip wie das Infrarotthermometer, enthält aber zusätzlich eine abbildende Optik, um die gemessene Strahlungsleistung räumlich aufgelöst darzustellen. Der gemessene Temperaturverlauf wird auf dem Bildschirm als Falschfarbenbild dargestellt. Da Glas für Infrarotlicht undurchlässig ist, ist die Linse der Kamera aus für Infrarotlicht durchlässigem Germanium gefertigt. Die Leistung wird auf einem Chip aus Mikrobolometern gemessen. Das sind berührungslose Temperatursensoren, die nach dem Prinzip der Widerstandsänderung infolge von Temperaturänderungen arbeiten.

⁶„Spiegelnd“ bedeutet hier, dass Infrarotlicht stark reflektiert wird. Ein Körper, der sichtbares Licht reflektiert, muss nicht zwangsläufig Infrarotlicht spiegeln und umgekehrt.

3 Versuchsdurchführung

Beachten Sie bei den ersten beiden Teilversuchen bitte Folgendes:

- Die Angaben der zu verwendenden Massen für Wasser und die Temperaturangaben sind *Richtwerte*, die z. B. ein Überlaufen des Kalorimetergefäßes verhindern sollen. Für die Auswertung müssen immer die tatsächlichen Werte protokolliert werden!
- Der Tauchheizereinsatz und der Rührfisch müssen sich bei allen Versuchen im Kalorimeter befinden (auch wenn sie nicht benötigt werden), damit das Kalorimeter stets denselben Wasserwert hat!
- Versuchen Sie einerseits, alle Temperaturen möglichst zeitnah zum Mischprozess zu messen, weil diese sich schnell ändern können. Warten Sie andererseits bei allen Temperaturmessungen ab, bis sich die Temperaturanzeige einigermaßen stabilisiert hat (wegen Trägheit des Thermofühlers).
- Der Magnetrührer muss während der Versuche in Betrieb sein, um eine gute Durchmischung im Kalorimeter zu gewährleisten. Überprüfen Sie vor jedem Versuch, ob sich der Rührfisch im Kalorimeter dreht. Etwa 400 U/min haben sich als günstigste Einstellung für den Magnetrührer herausgestellt.

3.1 Teilversuch 1: Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser

Inhalt

In diesem Teilversuch bestimmen Sie die spezifische Wärmekapazität von Wasser. In einem Vorversuch wird zunächst der Wasserwert des Kalorimeters bestimmt bzw. überprüft.

Messungen

- **Vorbemerkung:** Im Versuchsraum stehen mehrere Waagen zur Bestimmung von Massen zur Verfügung. Überlegen Sie sich, wie Sie die zum Einsatz kommenden Wassermassen möglichst präzise bestimmen können. Bedenken Sie dabei, dass die verwendeten Gefäße selbst eine Masse besitzen und ggf. auch später noch Wasser enthalten. Stellen Sie sich die Frage: Welche Wassermengen wurden wirklich gemischt?
- Heizen Sie Wasser im Temperierbad auf ca. 80 °C auf.
- Füllen Sie ca. 0,60 kg möglichst kaltes Leitungswasser mit dem Messzylinder in das Kalorimeter. Schalten Sie den Magnetrührer ein. Notieren Sie die Temperatur θ_1 des Wassers, sobald diese konstant bleibt.
- Füllen Sie ca. 0,20 kg warmes Wasser vom Temperierbad (etwa 80 °C) in den Aluminiumtopf und messen Sie die Wassertemperatur θ_2 des warmen Wassers. Notieren Sie auch die Temperatur θ_2 des warmen Wassers, sobald diese konstant bleibt.

3 Versuchsdurchführung

- Schütten Sie nun das warme Wasser aus dem Aluminiumtopf zusätzlich in das Kalorimetergefäß und lesen Sie die Temperatur ab. Wenn diese sich nicht mehr merklich ändert, ist die Mischtemperatur θ_M erreicht.
- Berechnen Sie bereits vor Ort den Wasserwert m_W . Liegt Ihr Wert nicht zwischen 40 g und 120 g, dann sollten Sie die Messung wiederholen.
- Entleeren Sie das Wasser aus dem Kalorimeter.
- Füllen Sie nun ca. 0,60 kg möglichst kaltes Leitungswasser mit dem Messzylinder in das Kalorimeter.
- Bereiten Sie den Aufbau nach Abbildung 6 vor, ohne das Netzgerät mit dem Kalorimeter zu verbinden. Beachten Sie, dass bei den Digitalmultimetern verschiedene Buchsen für Strom- und Spannungsmessung vorgesehen sind (siehe Anleitung zu ESK). Verwenden Sie beim Amperemeter die Buchse für **10 A** und wählen Gleichstrommessung aus.
- Stellen Sie wie folgt eine Heizleistung von ca. 20 W ein: Das Netzgerät einschalten, die Spannungsbegrenzung durch Drehen am Spannungsregelungsknopf auf ca. 30 V (Maximalwert) einstellen. Verbinden Sie jetzt das Netzgerät mit dem Kalorimeter. Dann erhöhen Sie langsam den Strom durch Drehen am Strombegrenzungsknopf auf ca. 1,6 A. Damit regeln Sie effektiv den Strom, das Netzteil liefert jeweils die dazu gerade notwendige Spannung. Notieren Sie die an den Multimetern angezeigten Strom- und Spannungswerte.
- Stecker aus den Buchsen des Netzgerätes ziehen, dieses aber eingeschaltet lassen. Damit unterbrechen Sie den Stromkreis zur Aufheizung des Wassers, erhalten jedoch die Stabilisierung des Netzgerätes.
- Warten Sie, bis Sie sicher sein können, einen konstanten Wert für die Anfangstemperatur θ_0 des Kalorimeterwassers zu haben. Dies ist der Fall, wenn sich für einige Minuten die Temperatur des Kalorimeterwassers nicht mehr geändert hat. Notieren Sie diese Temperatur.
- Schließen Sie den Stromkreis an den Buchsen des Netzgerätes und starten in diesem Moment die Stoppuhr. Notieren Sie in den folgenden 15 Minuten jede Minute die Temperatur θ .
- Anschließend schalten Sie das Netzgerät aus und notieren noch den Endwert der Temperatur.

3.2 Teilversuch 2: Bestimmung der Wärmekapazitäten von Festkörpern

Inhalt

Zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazitäten von Festkörpern für Temperaturen oberhalb der Raumtemperatur werden erwärmte Probekörper aus zwei verschiedenen Metallen zum Temperatúrausgleich in das kältere Kalorimeterwasser gebracht. Die Ergebnisse sollen mit den theoretischen Werten nach der Regel von Dulong und Petit verglichen werden.

Vorbereitung des Kalorimeters

- Bestimmen Sie die Massen m_s beider Probekörper (trocken!).
- Füllen Sie das Kalorimetergefäß mit 0,80 kg kaltem Wasser. Die Füllhöhe einschließlich Probekörper ist damit etwa gleich der bei der (vom Hersteller durchgeführten) Wasserwertbestimmung, was wegen der Abhängigkeit des Wasserwerts von der Füllhöhe sinnvoll ist.
- Heizen Sie die Probekörper im Temperierbad auf 80 °C auf. Bei Erreichen der Endtemperatur Θ_s messen Sie diese mit dem Digitalthermometer und überprüfen Sie, ob die Temperatur konstant ist. Warten Sie noch eine Zeit lang, bis die Probekörper die Temperatur des Wassers angenommen haben.

Messungen

- Messen Sie die Temperatur der Probekörper im Temperierbad unmittelbar vor dem Eintauchen in das Kalorimeter und schieben Sie dann den Temperaturfühler wieder ins Kalorimeter. Protokollieren Sie die Temperatur im Kalorimeter und die der Probekörper.
- Im Folgenden sollen Sie den Probekörper in das Kalorimeter tauchen. Protokollieren Sie den zeitlichen Temperaturverlauf des Kalorimeters bereits ca. 20 Sekunden vor dem Eintauchen und so oft wie möglich (ca. alle 5 Sekunden).
- Hängen Sie einen Probekörper am Kalorimeterdeckel ein, nehmen Sie ihn möglichst schnell aus dem Wasserbad heraus und tauchen Sie ihn in das Kalorimeterwasser.
- Messen Sie die Temperatur während der ersten 45 Sekunden nach Eintauchen des Probekörpers weiterhin so oft wie möglich (ca. alle 5 Sekunden), danach noch 5 Minuten lang in Schritten von einer halben Minute.
- Führen Sie dieselbe Prozedur mit dem zweiten Probekörper durch. Vergessen Sie nicht, vorher neues kaltes Wasser in das Kalorimeter zu füllen!

3.3 Teilversuch 3: Bestimmung der spezifischen Schmelzwärme von Eis

Inhalt

In diesem Teilversuch bestimmen Sie die spezifische Schmelzwärme von Eis.

Messungen

- Füllen Sie ca. 0,40 kg warmes Wasser vom Temperierbad (etwa 50 °C) mit dem Aluminiumtopf in das Kalorimeter. Notieren Sie die Temperatur θ_1 des Wassers, sobald diese konstant bleibt.
- Wiegen Sie ca. 0,20 kg Eis im Aluminiumgefäß ab. Kontrollieren Sie, ob die Eis-Wasser-Mischung die Temperatur von 0 °C hat.
- Gießen Sie das Tauwasser ab und wiegen die Eismasse so genau wie möglich. Schütten Sie das Eis in das Kalorimetergefäß mit dem warmen Wasser. Achten Sie dabei darauf, dass das gesamte Eis in das Kalorimeter gelangt.
- Rühren Sie, bis das Eis geschmolzen ist. Notieren Sie dann die Endtemperatur θ_M , sobald sich dies nicht mehr ändert.

3.4 Teilversuch 4: Adiabatische Zustandsänderung

Inhalt

Adiabatische Kompression und Expansion einer Luftmenge mithilfe einer schwingenden Wassersäule. Bestimmung des Adiabatenexponenten von Luft.

Messung der Schwingungsdauer

Versetzen Sie die Wassersäule im U-Rohr einmal ohne und einmal mit aufgesetztem Kolben in Schwingungen und messen Sie die Schwingungszeiten mit der Stoppuhr. Die Amplitude darf im ersten Fall groß sein, im zweiten Fall ist das nicht zulässig, damit (20) hinreichend gut erfüllt ist. Die Schwingung ist stark gedämpft, der Einfluss der Dämpfung auf die Schwingungsdauer hebt sich allerdings in (21) heraus. Sie müssen wegen der relativ kleinen Schwingungsdauer die Zeit von mehreren Schwingungen messen, sollten aber die Messung beenden, bevor die Amplituden zu klein werden. Wiederholen Sie die Messung mehrmals, damit ihre Genauigkeit durch Erzielen einer guten Statistik verbessert werden kann.

Messung der übrigen Werte

- Bestimmen Sie das Volumen des Kolbens durch Wägung ohne und mit Wasser.
- Ermitteln Sie die übrigen Teile des Gesamtvolumens (siehe Abbildung 12).
- Der Atmosphärendruck p_0 , wird hier in der SI-Einheit Pa benötigt (Umrechnung nach (18)), allerdings kürzt sich beim Einsetzen von (18) in (21) die Erdfeldbeschleunigung g heraus.

3.5 Teilversuch 5: Strahlung eines schwarzen Strahlers

Inhalt

Das Stefan-Boltzmannsche Gesetz soll durch Messung der Strahlungsleistung eines geheizten Kalibrators in Abhängigkeit von der Temperatur bestätigt werden. Auftragen von $\ln(U/V)$ gegen $\ln(\Theta/^\circ\text{C})$ soll die Abhängigkeit der Strahlungsleistung von der Temperatur bestimmen. Auftragen der gemessenen Thermospannungen gegen die vierte Potenz der absoluten Temperatur soll eine Gerade ergeben.

Versuchsvorbereitung

- Schalten Sie das Tischmultimeter ein (Aufwärmzeit etwa 10 min) und schließen es an die Thermosäule an.
- Machen Sie sich zunächst mit dem Versuchsaufbau nach Abbildung 14 vertraut.
- Justieren Sie den Versuchsaufbau so, dass die Thermosäule auf die schwarze Fläche des Kalibrators gerichtet ist.
- Entfernen Sie das Schutzfenster an der Thermosäule.
- Gleichen Sie die Anzeige des Tischmultimeters auf 0.000 ab.

Hinweis 1: Sie müssen bei der Verwendung der Thermosäule darauf achten, dass außer der Kalibratorfläche keine weiteren Wärmequellen einstrahlen. Zur Minimierung dieses Problems existiert deshalb im Versuchsaufbau eine Blende. Der Abstand der Blende vom Kalibrator sollte dementsprechend klein sein, andererseits aber noch so groß, dass sie selbst nicht merklich über Raumtemperatur erwärmt wird. Außerdem muss man darauf achten, dass auch Personen, deren Körpertemperatur ebenfalls über der Raumtemperatur liegt, die Messungen nicht verfälschen.

Hinweis 2: Der Nullabgleich dient zur Eichung der Thermosäule, da diese auch Wärmestrahlung aus der Umgebung (vor allem von der Blende) misst. Für den Versuch ist aber nur die Strahlung des Kalibrators von Interesse. Wegen Schwankungen der Hintergrundstrahlung (z. B. durch leichtes Erwärmen der Blende, das nicht vollständig zu vermeiden ist) muss dieser Nullabgleich vor jeder Spannungsmessung wiederholt werden, wobei bei jedem Abgleich die Öffnung in der Blende zu verschließen ist.

3 Versuchsdurchführung

Messreihe

Die Ausgangsspannung der Thermosäule soll für folgende Kalibratortemperaturen gemessen werden:

Temperatur / °C:	80	100	130	160	190	210	240	270	300	330	350
------------------	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Die Temperatur stellt man über die Pfeiltasten ein und bestätigt sie durch Drücken der set-Taste. Wenn die Temperatur erreicht ist, warten Sie noch ca. 2 Minuten, bevor sie die Messung durchführen, damit sich im Gerät das thermische Gleichgewicht einstellen kann.

Notieren Sie sich die Raumtemperatur T_0 .

Nach den Messungen stellen Sie bitte eine Temperatur von 50 °C ein und warten Sie deren Erreichen ab, bevor Sie den Kalibrator ausschalten.

4 Auswertung

Vorbemerkung zu Teilversuch 1 und 2

- In diesem Versuch wird wegen der teilweise großen Messunsicherheiten besonderer Wert auf die Diskussion der Fehler gelegt. Überlegen Sie sich, welche Fehlereinflüsse vorhanden sind und schätzen Sie deren Einfluss auf das Ergebnis ab.

4.1 Teilversuch 1: Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser

- Vergleichen Sie Ihren Wasserwert mit dem in Kapitel 1.4 genannten Erfahrungswert. Berechnen Sie dazu die Unsicherheit des von Ihnen bestimmten Wasserwertes m_W . Die Unsicherheiten welcher Eingangsgrößen sorgen für den größten Beitrag der Unsicherheit Ihres Wasserwertes?
- Tragen Sie in einem Diagramm die Temperaturen gegen die Zeiten auf, und legen Sie durch die Punkte eine optimale Gerade.
- Bestimmen Sie die Steigung der Geraden inklusive Unsicherheit und berechnen Sie daraus die Wärmekapazität von Wasser. Tipp: Die von der Heizung pro Zeitintervall Δt abgegebene Wärmeenergie führt zu einer Temperaturänderung des Wassers, die proportional zur spezifischen Wärmekapazität und der Wassermenge ist.
- Für die Unsicherheit der spezifischen Wärmekapazität berücksichtigen Sie nur die Unsicherheit der Geradensteigung und die Unsicherheit des Wasserwertes.
- Diskutieren Sie Ihr Ergebnis, insbesondere indem Sie dieses mit dem Literaturwert vergleichen.

4.2 Teilversuch 2: Bestimmung der Wärmekapazitäten von Festkörpern

- Bestimmen Sie die Mischtemperaturen (Al und Pb) und verwenden Sie dazu das im Theorieteil beschriebene Extrapolationsverfahren.
- Berechnen Sie die spezifischen Wärmekapazitäten von Al und Pb nach (5). Verwenden Sie dazu den Literaturwert der spezifischen Wärmekapazität von Wasser (in diesem Temperaturbereich $4,18 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$) und die Herstellerangaben für den Wasserwert des Kalorimeters ($m_W = 80 \text{ g}$).
- Führen Sie eine Fehlerbestimmung mit der Min-Max-Methode durch.
- Berechnen Sie aus den spezifischen die molaren Wärmekapazitäten (molare Massen: $M_{\text{Al}} = 27 \text{ g mol}^{-1}$, $M_{\text{Pb}} = 207 \text{ g mol}^{-1}$). Vergleichen Sie die Ergebnisse mit dem theoretischen Wert nach der Regel von Dulong und Petit (allgemeine Gaskonstante: $R = 8,31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

4.3 Teilversuch 3: Bestimmung der spezifischen Schmelzwärme von Eis

- Berechnen Sie nach (7) die spezifische Schmelzwärme des Eises mitsamt Messunsicherheit. Setzen Sie dort den Literaturwert von c_w ein. Diskutieren Sie Ihr Ergebnis.

4.4 Teilversuch 4: Adiabatische Zustandsänderung

- Berechnen Sie den Adiabatenexponenten γ nach (21), und bestimmen Sie seinen Fehler mit Hilfe der Gaußschen Fehlerfortpflanzung.
- Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem theoretischen Wert.

4.5 Teilversuch 5: Strahlung eines Hohlraumstrahlers

- Tragen Sie zur Überprüfung des Stefan-Boltzmannschen Gesetzes die gemessenen Thermospannungen gegen $T^4 - T_0^4$ auf.
- Legen sie durch die Messpunkte eine optimale Gerade.
- Zeichnen Sie um die Gerade einen Fehlerstreifen.
- Warum wurde T_0^4 abgezogen?