

Versuch 2A: Spezifische Wärmekapazität

Physikalische Grundbegriffe

- Temperatur, absolute Temperatur,
- Wärmeenergie, Energiebilanzen,
- Schmelz- und Verdampfungswärme
- Wärmekapazität
- Molbegriff
- Aggregatzustände, Phasendiagramm
- Wärmetransport
- Ideales Gas

messtechnische Grundlagen

- Kalorimetrie
- Temperaturmessung

weiterführende Literatur:

- W.Seibt, Physik f. Mediziner, 3.Aufl. p. 159-168, 188-201
- W.Hellenthal, Physik für Mediziner und Biologen, 6.Aufl. p. 79-106
- V.Harms, Physik für Mediziner und Pharmazeuten, 14 Aufl. p. 77-88

Erläuterung der wichtigsten physikalischen Begriffe

- Temperatur

Der Temperaturbegriff ist aus unserer Sinnesempfindung entstanden. Die Temperatur beschreibt den Wärmezustand eines Körpers. Unsere Haut verfügt über Rezeptoren, die uns einen Körper bei Berührung als wärmer oder kälter gegenüber der Haut erscheinen lassen. Diese Beurteilung ist jedoch subjektiv und oft Täuschungen unterworfen, so dass zur objektiven Feststellung des Wärmezustands eines Körpers nur physikalische Methoden in Frage kommen. Die Temperatur ist eine Zustandsgröße.

- Temperaturskalen

Es werden zwei Temperaturskalen verwendet. Im täglichen Leben wird überwiegend die **Celsius-Skala** benutzt. (Für die **Fahrenheit-Skala** (in USA üblich) gilt: $0\text{ °C} = 32\text{ °F}$ und $100\text{ °C} = 212\text{ °F}$.) Sie ist durch gewisse Fixpunkte festgelegt, wie z.B.: die Temperatur des schmelzenden Eises sei 0 °C , die des siedenden Wassers sei 100 °C (jeweils bei einem Luftdruck von $p = 1013\text{ mbar}$) mit linearer Unterteilung, auch über diese Fixpunkte hinaus. Bei der Celsius-Skala gibt es auch negative Temperaturwerte. Symbol für die Celsius-Temperatur: °C .

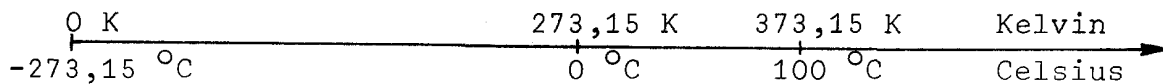
Physikalisch sinnvoller und als Basisgröße international eingeführt ist die **thermodynamische Temperatur** oder **Kelvin-Temperatur** mit dem Symbol **T**.

Definition: Temperatur T

SI-Einheit der Temperatur T: 1 K (Kelvin).

1 K ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers (Erläuterung des Tripelpunkts weiter unten unter dem Begriff Phasendiagramm). Die Kelvin-Skala beginnt bei Null Kelvin (OK).

Es gibt also keine negative Kelvin-Temperaturen. Null Kelvin ist die tiefstmögliche Temperatur. Die thermodynamische Temperatur wird daher auch als **absolute Temperatur** bezeichnet. Die Beziehung zwischen Kelvin-Skala und Celsius-Skala zeigt am einfachsten die folgende Darstellung:



Kelvin- und Celsius-Temperatur unterscheiden sich um 273,15 Einheiten. Es gilt daher:

$$\text{Temperaturdifferenzen sind in beiden Skalen gleich groß: } \Delta T = \Delta \vartheta$$

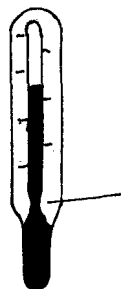
Für Temperaturumrechnungen kann der gerundete Wert **273** verwendet werden.

- **Thermometer**

Zur Temperaturmessung verwendet man immer Vorgänge, die in gesetzmäßiger Weise von der Temperatur abhängen, wie z.B.:

a) **Die Volumenausdehnung von Flüssigkeiten (Quecksilber, Alkohol).**

Von diesen Flüssigkeitsthermometern sei das Fieberthermometer als sog. "Maximalthermometer" in seiner Funktion kurz erläutert. Eine Kapillarverengung oberhalb des Quecksilberreservoirs bewirkt, dass der Hg-Faden an dieser Stelle abreißt, wenn sich das Quecksilber nach Trennung des Thermometers von der Messstelle wieder zusammenzieht. Man kann also die höchste erreichte Temperatur ablesen, muss jedoch vor einer erneuten Benutzung das Quecksilber wieder "hinunterschütteln".



Kapillarverengung

Abb. 2.1: Fieberthermometer

b) Die Druckänderung von Gasen.

Die Gasthermometer werden nur zu Eichzwecken verwendet.

c) Die unterschiedliche Längenausdehnung verschiedener Metalle (Bimetallthermometer).**d) Die Änderung des elektrischen Widerstandes mit der Temperatur (Widerstandsthermometer)****e) Die Strahlungsgesetze.**

Man vergleicht, in einem schmalen Spektralbereich die Helligkeit des Körpers, dessen Temperatur bestimmt werden soll, mit der Helligkeit eines geeichten Glühfadens. Diese Thermometer heißen **Pyrometer**.

f) Der thermoelektrische Effekt.

Thermometer, die nach diesem Prinzip arbeiten, heißen **Thermoelemente**.

- **Wärme**

Wärme ist eine Energieform. Sie ist die kinetische Energie bzw. Schwingungsenergie der Moleküle und Atome in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern. Die Moleküle bzw. Atome sind dauernd in Bewegung. Wie heftig diese Bewegung ist, wird durch die Temperatur beschrieben. Wärme kann aus anderen Energieformen (z.B. elektrischer, mechanischer oder chemischer Energie) gewonnen werden und teilweise wieder in diese zurückgeführt werden (1. und 2. Hauptsatz der Thermodynamik).

Definition: Wärme, Wärmeenergie Q

SI-Einheit für die Wärme: 1 J (Joule)

Früher wurde für die Wärmeenergie als spezielle Einheit die **Kalorie** (cal) definiert.
Es gilt:

$$1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$$

- **Spezifische Wärmekapazität c**

Für nicht zu große Temperaturintervalle gilt, dass die Wärmemenge Q, die man einem Körper zuführen muss, um ihn von der Temperatur T_1 auf die Temperatur T_2 zu erwärmen, proportional zur Masse m des Körpers und proportional zur Temperaturdifferenz $\Delta T = T_2 - T_1$ ist: Der Proportionalitätsfaktor c ist eine Materialkonstante und heißt **spezifische Wärmekapazität**.

Definition: spezifische Wärmekapazität c

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T \quad \text{d.h.} \quad c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}$$

SI-Einheit für c: $1 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Die Maßzahl von c ist also die Wärmemenge, die nötig ist, um 1 kg des Stoffes um 1 K zu erwärmen.

Wasser hat die spezifische Wärmekapazität $4,186 \cdot 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; dies entspricht $1 \text{ cal}/\text{g} \cdot \text{K}$ der ursprünglichen Definition der Kalorie.

- **Wärmekapazität W**

Man versteht darunter die Wärmemenge, die nötig ist, um den ganzen Körper um 1 K zu erwärmen. Ist Q die zugeführte Wärme und ΔT die dabei erzielte Temperatursteigerung, so ist:

$$Q = W \cdot \Delta T \quad \text{und daher} \quad W = \frac{Q}{\Delta T}$$

SI-Einheit für W : 1 J/K

- **Definition des Begriffs Mol**

1 mol ist definiert als die Stoffmenge eines Systems, das aus ebenso vielen Molekülen (oder Ionen oder Atomen oder Elektronen oder anderen Teilchen) besteht, wie Atome in genau 12 Gramm des reinen Kohlenstoff-Nuklids ^{12}C enthalten sind, nämlich:

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ Teilchen},$$

N_A heißt **Avogadrosche Zahl**.

- **Mol-Masse**

Die Masse eines Mols einer Substanz (genannt Molmasse oder molare Masse) ist gleich der relativen Atom- bzw. Molekülmasse in Gramm. Die relative Atom- bzw. Molekülmasse gibt an, wie viel mal größer die Masse eines Atoms oder Moleküls gegenüber 1/12 der Masse des Kohlenstoffnuklids ^{12}C ist. Die relativen Atommassen können aus dem Periodensystem der Elemente entnommen werden.

- **Molare Wärmekapazität C**

Führt man einer Stoffmenge von n mol eine Wärmemenge Q zu, wobei die Temperatur um ΔT steigen soll, so ist C definiert als:

Definition: molare Wärmekapazität

$$Q = C \cdot n \cdot \Delta T \quad \text{und daher} \quad C = \frac{Q}{n \cdot \Delta T}$$

SI-Einheit von C : $1 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$

Es gilt auch: $C = c \cdot M$, wobei $M = m/n$ die Molmasse des Stoffes ist.

C ist also die Wärmemenge, die nötig ist, um 1 Mol eines Stoffes um 1K zu erwärmen.

- **Phasenänderungen - Umwandlungswärmen - Phasendiagramm**

Jeder Stoff kann in drei Aggregatzuständen (Phasen) vorkommen: fest, flüssig, gasförmig. Führt man einer Substanz, ausgehend vom festen Zustand, Wärme zu, so steigt die

Temperatur des Stoffes an, bis der **Schmelzvorgang** einsetzt. Von hier ab bleibt die Temperatur des Stoffes trotz ständiger Energiezufuhr zunächst konstant (Temperaturfixpunkt). Erst wenn die gesamte Substanz geschmolzen ist, steigt die Temperatur weiter an, bis ein zweiter Fixpunkt - **der Siedepunkt** - erreicht ist. Auch hier steigt die Temperatur erst wieder, wenn die flüssige Phase vollständig verschwunden ist. In der untenstehenden Abb. 2.2 ist der Temperaturanstieg qualitativ als Funktion der zugeführten Wärmemenge Q dargestellt.

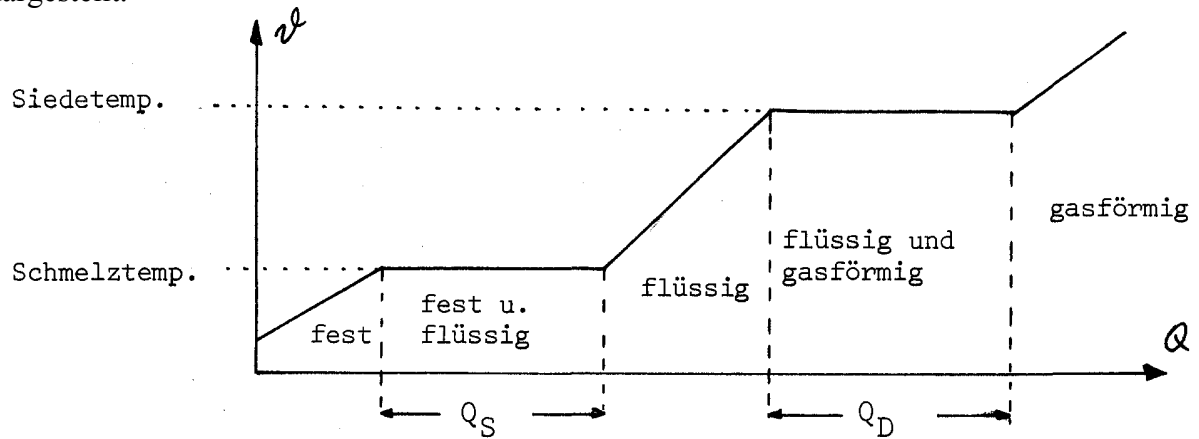


Abb. 2.2: Diagramm zur Phasenumwandlung

Man nennt die zur vollständigen Phasenumwandlung ohne Temperaturerhöhung nötige Wärmemenge die **Umwandlungswärme** oder **latente Wärme**. In der Abb. 2.2 bedeuten Q_S die **Schmelzwärme**, Q_D die **Verdampfungswärme**.

Unter der **spezifischen Umwandlungswärme** versteht man die auf die Masseneinheit bezogene Umwandlungswärme:

Definition: spezifische Umwandlungswärmen

Spezifische Schmelzwärme $q_S = \frac{Q_S}{m}$

Spezifische Verdampfungswärme $q_D = \frac{Q_D}{m}$

SI-Einheit für die spezifischen Umwandlungswärmen: $1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$

Beim Kondensieren von Dampf und beim Erstarren von Flüssigkeit werden die zuvor aufgenommenen Umwandlungswärmen wieder freigesetzt und an die Umgebung abgegeben. Neben den Phasenübergängen fest/flüssig und flüssig/gasförmig ist auch der Phasenübergang fest/gasförmig möglich (**Sublimation**). Die Temperatur, bei der eine Phasenumwandlung einsetzt, hängt vom äußeren Druck ab. Bei einem Druck von 1013 mbar (Normaldruck) beträgt z.B. die Siedetemperatur des Wassers 100 °C. Ist der Luftdruck geringer, so liegt die Siedetemperatur niedriger. Andererseits steigt die Siedetemperatur von Wasser auch über 100 °C, wenn der äußere Druck über 1,013 bar liegt. Die Erhöhung des äußeren Druckes kann z.B. dadurch erreicht werden, dass man das Gefäß, in dem die Flüssigkeit erhitzt wird, mit einem Deckel fest verschließt. Anwendungen u.a. bei den Schnellkochtöpfen im Haushalt (die Deckel der Schnellkochtöpfe müssen ein Überdruckventil haben!).

Ermittelt man nun experimentell die Siedetemperaturen als Funktion des Druckes und trägt die Werte in ein p-T-Diagramm ein, so erhält man die **Siedepunktskurve**, auch **Dampfdruckkurve** genannt, da der Siedevorgang immer dann einsetzt, wenn der

Dampfdruck der Flüssigkeit gleich dem äußeren Druck ist. Die Dampfdruckkurve endet beim **kritischen Punkt**. Oberhalb der kritischen Temperatur ist nämlich nur noch die gasförmige Phase vorhanden (s. Abb. 2.3).

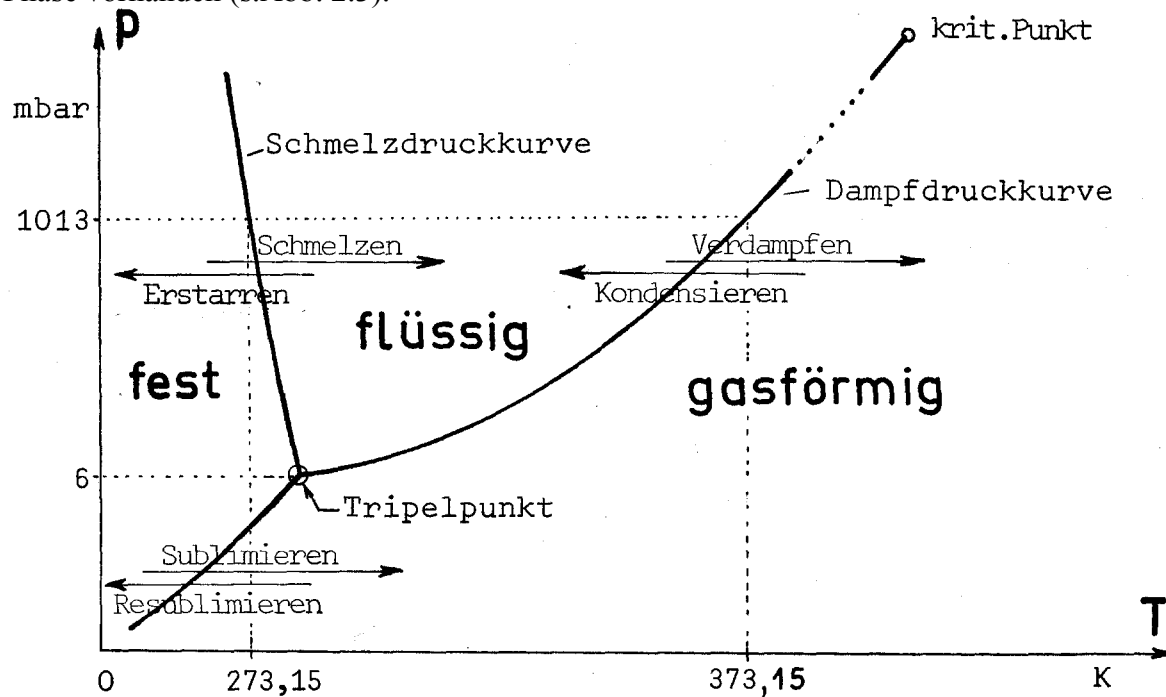


Abb. 2.3: Phasendiagramm des Wassers.

Ermittelt man die Schmelz- und die Sublimationspunkte als Funktion des Druckes, so erhält man im p-T-Diagramm die **Schmelzdruckkurve** und die **Sublimationsdruckkurve**. Das so erhaltene Diagramm wird **Phasendiagramm** genannt (Abb. 2.3). Die drei Kurven grenzen die drei Phasen fest, flüssig, gasförmig gegeneinander ab. Der Schnittpunkt der drei Kurven heißt **Tripelpunkt**. Beim Tripelpunkt sind alle drei Phasen im Gleichgewicht, d.h. zeitlich unbegrenzt nebeneinander existent.

In Abb.2.3 ist qualitativ das Phasendiagramm des Wassers dargestellt. Eine Besonderheit bei Wasser gegenüber anderen Substanzen besteht darin, dass die Schmelzdruckkurve eine negative Steigung hat, während sie bei anderen Substanzen eine positive Steigung besitzt. Dies hat zur Folge, dass Eis auch ohne Temperaturerhöhung allein durch Druckerhöhung schmelzen kann. Der Tripelpunkt des Wassers hat die Werte: $T = 273,16 \text{ K}$ ($=0,01 \text{ °C}$) und $p = 6 \text{ mbar}$.

Der Tripelpunkt des Wassers dient heute zur Definition der Kelvin-Skala: 1 Kelvin (1 K) ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers.

• Wärmetransport

Der Wärmeübergang zwischen zwei Körpern unterschiedlicher Temperatur kann durch drei Mechanismen erfolgen:

- **Konvektion**
- **Wärmeleitung**
- **Wärmestrahlung**

Bei der **Konvektion** ist der Wärmetransport mit einem Massentransport verbunden. Beispiele: Warmwasserheizung (warmes Wasser wird mittels einer Pumpe durch Rohrleitungen in die Heizkörper transportiert) oder warme Luftmassen aus dem Süden bringen Wärmeenergie in den kühleren Norden.

Bei der **Wärmeleitung** erfolgt der Wärmetransport durch Materie ohne Massentransport. Wärmeenergie strömt hierbei von selbst von Orten höherer zu Orten niedrigerer Temperatur. Man spricht in diesem Zusammenhang von gutem oder schlechtem **Wärmeleitvermögen** der Stoffe, wenn bei gegebener Temperaturdifferenz und vergleichbarer Geometrie der Körper pro Sekunde viel oder wenig Wärme durch den Stoff strömt. Man charakterisiert eine Substanz diesbezüglich durch die Angabe einer **Wärmeleitzahl**. Sie ist folgendermaßen definiert:

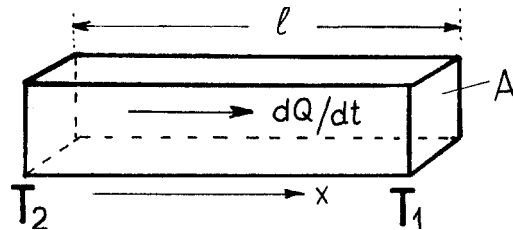


Abb. 2.4: Definition der physikalischen Größen zur Ableitung der Wärmeleitzahl.

Wir betrachten einen Stab der Länge l (Abb. 2.4) mit dem Querschnitt A , dessen Enden auf den Temperaturen T_1 und T_2 gehalten werden ($T_2 > T_1$). Die Seitenflächen des Stabes seien völlig wärmeundurchlässig. Es fließt dann ständig ein Wärmestrom von der wärmeren zur kälteren Seite des Stabes. Dieser Wärmestrom ist proportional zur Querschnittsfläche A , prop. zum Temperaturgefälle $(T_2 - T_1)/l$ und abhängig vom Material des Stabes:

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_2 - T_1}{l} \quad \text{oder} \quad \frac{dQ}{dt} = \lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

Die Materialkonstante λ heißt **Wärmeleitfähigkeit** oder **Wärmeleitzahl**. Metalle sind gute Wärmeleiter, während z.B. Holz, Porzellan, Glas die Wärme schlecht leiten. Es zeigt sich allgemein, dass gute elektrische Leiter auch gute Wärmeleiter sind.

Bei der **Wärmestrahlung** handelt es sich um elektromagnetische Wellenstrahlung. Die von der Oberfläche eines Körpers pro Flächeneinheit und Zeiteinheit abgestrahlte Energie S ist proportional zur 4-ten Potenz der absoluten Temperatur T :

$$S(T) = \sigma \cdot T^4$$

mit $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$. Diese Gleichung nennt man das **Stefan-Boltzmann-Gesetz**.

Während der Wärmetransport durch Wärmeleitung nur in Materie stattfinden kann, ist bei der Wärmestrahlung der Energietransport auch durch das Vakuum gegeben.

Obige Gleichung gilt nur für einen sog. **schwarzen Körper** oder **schwarze Strahler**. Man versteht darunter einen Körper, dessen Absorptionsvermögen α (= Verhältnis von absorbierter zu eingestrahlter Energie) für alle Wellenlängen den Wert 1 hat, der also jegliche Strahlung absorbiert. Für einen nicht-schwarzen Körper ist das Absorptionsvermögen $\alpha < 1$. Bei gegebener Temperatur und Wellenlänge hängt α von der Oberflächenbeschaffenheit des Körpers ab. Nach dem Kirchhoffschen Satz ist das Verhältnis von Emissionsvermögen zu Absorptionsvermögen für jeden Körper das gleiche (nur abhängig von Wellenlänge und Temperatur), d.h. ein nicht-schwarzer Körper emittiert auch

weniger Strahlung als ein schwarzer bei gleicher Temperatur. Für den nicht-schwarzen Körper gilt dann:

$$S(T) = \alpha \cdot \sigma \cdot T^4$$

Jedem Körper wird auch Energie von der Umgebung zugestrahlt.

• Die Zustandsgleichung idealer Gase

Man spricht von idealen Gasen, wenn man das Eigenvolumen der Moleküle und die anziehenden Kräfte zwischen ihnen vernachlässigt, Wir betrachten eine Gasmenge der Masse m , die beim Druck p und der Temperatur T das Volumen V einnimmt. Zwischen den drei **Zustandsgrößen** p , V und T besteht - wie sich aus Experimenten herleiten lässt - folgender Zusammenhang:

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$$

wobei mit p_1 , V_1 , T_1 und mit p_2 , V_2 , T_2 zwei beliebige, verschiedene Zustände des Gases gekennzeichnet sind. Für eine bestimmte Gasmenge bleibt also bei einer Zustandsänderung der Ausdruck $p \cdot V / T$ unverändert:

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{konst.}$$

Vereinbarungsgemäß wird der Zustand eines Gases (auch bei Festkörpern und Flüssigkeiten) beim Druck $p_0 = 1013 \text{ mbar}$ (=Normaldruck) und bei der Temperatur $T_0 = 273 \text{ K}$ (=Normaltemperatur) als **Normalzustand** oder **Normzustand** bezeichnet. Das zugehörige Volumen V_0 ist dann das Normalvolumen. Um einen quantitativen Vergleich der Volumina verschiedener Gas Mengen zu ermöglichen, rechnet man immer auf das Normalvolumen um. Sind p , V und T bekannte Werte eines beliebigen Zustands, so berechnet sich V aus der Gleichung:

$$\frac{p \cdot V}{T} = \frac{p_0 \cdot V_0}{T_0}$$

In der Physiologie werden Gasvolumina außer auf die obigen Normalbedingungen (0°C , 1013 mbar , trockenes Gas) auch auf folgende Bedingungen bezogen: 37°C (Körpertemperatur), 1013 mbar , wasserdampf gesättigtes Gas (z.B. ausgeatmete Luft). Diese beiden Bedingungen werden wie folgt gekennzeichnet:

- **STPD = Standard Temperature and Pressure, Dry** (0°C , 1013 mbar , trocken);
- **BTPS = Body Temperature, Pressure, Saturated** (37°C , 1013 mbar , wasserdampfgesättigt).

• Der Sättigungsdruck des Wasserdampfes bei 37°C beträgt $62,5 \text{ mbar}$.

Die obige Gleichung lässt sich auch anders formulieren, wenn man die Erfahrungstatsache berücksichtigt, dass das Molvolumen eines Gases bei Normalbedingungen (STPD) den von

der Gasart unabhängigen Wert von $V_{0(\text{mol})} = 22400 \text{ cm}^3/\text{mol}$ hat. Ist n die Anzahl der Mole im Volumen V_0 , so gilt: $V_0 = n \cdot V_{0(\text{mol})}$ und die Gleichung nimmt dann folgende Form an:

$$\boxed{p \cdot V = n \cdot R \cdot T}$$

mit $R = p_0 \cdot V_{0(\text{mol})} / T_0$; n = Anzahl der Mole im Volumen V . Diese Gleichung wird als **allgemeine Gasgleichung** bezeichnet.

R ist die **allgemeine oder universelle Gaskonstante**. Ihr Wert ist $R = 8,3 \text{ J} / (\text{mol K})$. Ist M die molare Masse (Molmasse) in g/mol und m die Masse in g eines Stoffes, so ist $m = n \cdot M$. Die Maßzahl für die Molmasse in g/mol ist gleich der relativen Molekülmasse der betreffenden Stoffart.

Beispiel: Sauerstoff hat die rel. Molekülmasse 32. Also hat ein Mol Sauerstoffgas die Masse 32 g.

Zustandsänderungen, bei denen sich das Volumen nicht ändert, heißen **isochore Zustandsänderungen**. Bleibt der Druck konstant, so spricht man von **isobaren Prozessen**. Bei **isothermen** Prozessen ändert sich die Temperatur nicht. Als **adiabatische** Prozesse bezeichnet man Zustandsänderungen, die ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung erfolgen. Bei solchen Prozessen muss sich also immer die Temperatur ändern. Ein merklicher Wärmeaustausch mit der Umgebung kann oft dann nicht erfolgen, wenn eine Zustandsänderung sehr schnell erfolgt, z.B. Erwärmung bei schneller Kompression (adiabatische Kompression) und Abkühlung bei adiabatischer Expansion.

Für **reale Gase und Dämpfe** gilt die obige Zustandgleichung nicht. Das Eigenvolumen der Moleküle und die anziehenden Kräfte zwischen ihnen (Van der Waals-Kräfte) können nicht mehr vernachlässigt werden, vor allem bei tiefen Temperaturen und hohen Dichten. Bei hohen Temperaturen und geringen Dichten können reale Gase mit genügender Näherung als ideale Gase behandelt werden. Das Verhalten der realen Gase wird durch die Van der Waals-Gleichung beschrieben (S. Lehrbücher der Physik)

Was man unbedingt wissen sollte:

- Was ist der Celsius- und der Fahrenheit-Skala gemeinsam und worin unterscheiden sie sich?
- Welche physikalischen Gesetzmäßigkeiten können zur Temperaturmessung herangezogen werden?
- Welche Proportionalität wird durch die spezifische Wärmekapazität beschrieben?
- Was besagen die Wärmekapazität und die spezifische Wärmekapazität eines Körpers?
- Welche Wärmetransportmechanismen kennen Sie?
- Welche Voraussetzungen muss ein ideales Gas erfüllen?
- Wie lautet die allgemeine Gasgleichung?
- In welchem Zusammenhang stehen die Wärmeenergieeinheiten Joule und Kalorie?
- Welche Eigenschaft eines Metalls wird durch die Austrittsarbeit charakterisiert?
- Was ist eine Kontaktspannung, wo tritt sie auf und von was ist sie abhängig?

Übungsaufgaben:

Ü 2.1

Berechnen Sie die Körpertemperatur (37°C) in Grad Fahrenheit und in Kelvin.

Ü 2.2

Wie lauten die SI-Einheiten der Größen: Wärmekapazität; spezifische Wärmekapazität; molare Wärmekapazität; spezifische Verdampfungswärme?

Ü 2.3

Zur Erwärmung von 3 kg einer Substanz um 5 K sind 0,36 kcal nötig. Wie groß ist die Wärmekapazität dieser Stoffmenge in SI-Einheiten?

Ü 2.4

Wie viele Moleküle enthält 1 g Wasser (H_2O)?

Ü 2.5

Bei der Kondensation von 1 g Wasserdampf (100°C) und der anschließenden Abkühlung des Wassers auf 40°C werden 600 cal an Wärme freigesetzt. Berechnen Sie daraus die spez. Verdampfungswärme des Wassers in SI-Einheiten.

Ü 2.6

Wie viel Gramm Eis von 0°C muss man zu 0,25 l Wasser von 30°C geben, um es auf 15°C zu kühlen? Spez. Schmelzwärme von Eis: 332 kJ/kg.

Ü 2.7

In ein Dewargefäß (Wärmekapazität $W = 40 \text{ J/K}$, Temperatur 21°C) werden 0,30 l Wasser der Temperatur 55°C geschüttet. Welche Temperatur ϑ_m hat das Wasser nach dem Temperatenausgleich?

Ü 2.8

Was kostet die Zubereitung von 2 Tassen (= 0,35 l) Tee, wenn die kWh 0,30 DM kostet (das Teewasser muss dabei von 20°C auf 100°C erhitzt werden)?

Ü 2.9

Wann siedet eine Flüssigkeit?

Ü 2.10

Wodurch wird bei einem Dewargefäß (Thermosflasche) die gute Isolierwirkung erzielt?

Ü 2.11

Ein Schlittschuhläufer gleitet, wenn er über das Eis fährt, nicht auf dem Eis selbst, sondern auf einem dünnen Wasserfilm. Warum?

Versuchsdurchführung 2A : Spezifische Wärmekapazität von Metallen

- Apparative Grundlagen

Kalorimeter

Wärmemengen, die von einem Körper aufgenommen oder abgegeben werden, bestimmt man mit dem **Kalorimeter**. Dies ist ein wärmeisolierendes Gefäß (Dewargefäß), das eine Wassermenge m_w von bestimmter Temperatur ϑ_w enthält. Bringt man einen Körper der Masse m_k und der Temperatur ϑ_k in das Kalorimeter, so tritt ein Temperatúrausgleich ein, indem der wärmere Körper Wärme an den kälteren abgibt. Es stellt sich eine Mischungstemperatur ϑ_m ein. Da auch das Kalorimetergefäß Wärme aufnimmt oder abgibt, muss bei allen Messungen die Wärmekapazität W des Kalorimeters (auch Wasserwert genannt) berücksichtigt werden.

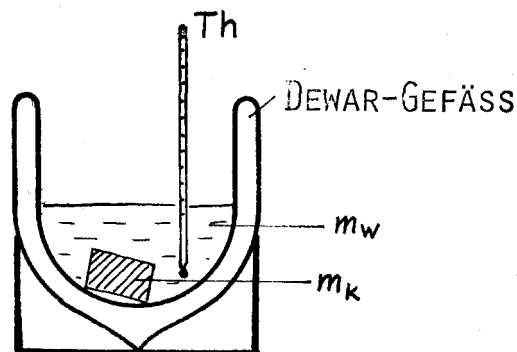


Abb. 2.5: Schematischer Versuchsaufbau.

Der sog. Wasserwert W ist die Wärmemenge, die man dem Gefäß (incl. Thermometer und Rührer) zuführen muss, um es um 1 K zu erwärmen.

- Aufgabenstellung

Teil A) Man bestimme die **spezifische Wärmekapazität eines Metalls** mit dem Mischungskalorimeter (Metallart im Protokoll vermerken!). Der Wert soll in folgenden

Einheiten angegeben werden: $\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{K}}, \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}, \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$.

Zusätzlich ist die **molare Wärmekapazität** in $\frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ zu berechnen.

Teil B) Stellen Sie schriftlich die Wärmebilanzen für folgende möglichen Experimente auf:

1) Eis (Masse m_E , Temperatur $\vartheta_E < 0^\circ \text{C}$) wird in ein Dewargefäß gefüllt, in dem sich Wasser (Masse m_w) der Temperatur ϑ_w befindet. Das Eis schmilzt und die Endtemperatur (Mischungstemperatur) sei $\vartheta_m > 0$. Die Wärmekapazität des Dewargefäßes sei W und soll mitberücksichtigt werden.

2) In einem Dewargefäß (Wärmekapazität W) befindet sich Wasser (Masse m_W) der Temperatur ϑ_W . Leitet man 100°C heißen Wasserdampf (Masse m_D) in das Wasser, so kondensiert dieser und die Wassertemperatur im Dewargefäß steigt von ϑ_W auf ϑ_m .

• **Versuchsdurchführung:**

Man wiegt zunächst das Dewargefäß (incl. Thermometer und Rührer) ohne Wasser ($= m_G$), füllt dann etwa 100 cm^3 Wasser ein und wiegt es erneut ($= m_G + m_W$). Die Differenz ergibt die Masse m_W des Wassers. Zwischenzeitlich ist das Metall in einem dafür vorgesehenen Gefäß auf $\vartheta_K = 100^\circ\text{C}$ erhitzt worden. **Bevor** das Metall in das Kalorimeter geschüttet wird, notiert man die Temperatur ϑ_W des Wassers im Kalorimeter. Unter stetigem Rühren wird die Temperatur der Mischung beobachtet. Wenn sich die Temperatur nicht mehr verändert, liest man die Mischungstemperatur ϑ_m ab. Man wiegt nun das Kalorimeter (mit Wasser und Metall) erneut ($= m_G + m_W + m_K$) und erhält aus der Differenz zur vorangegangenen Wägung die Masse m_K des Metalls. Man stellt nun eine **Wärmebilanz** auf, die beinhaltet, dass die vom Metall beim Abkühlen abgegebene Wärme gleich ist der Summe aus den Wärmemengen, die Wasser und Kalorimeter aufnehmen:

$$c_K m_K \cdot (\vartheta_K - \vartheta_m) = (c_W m_W + W) \cdot (\vartheta_m - \vartheta_W)$$

mit c_W = spezifische Wärmekapazität von Wasser.

Aus dieser Gleichung lässt sich durch entsprechendes Umformen die gesuchte spezifische Wärmekapazität c_K berechnen.

Versuch 2B: Thermoelement

Physikalische Grundbegriffe

- Thermoelektrischer Effekt,
- Thermospannung,
- Kontaktspannung
- Peltier-Effekt

messtechnische Grundlagen

- Temperaturmessung

weiterführende Literatur:

- W.Seibt, Physik f. Mediziner, 3.Aufl. p. 230-132
- W.Hellenthal, Physik für Mediziner und Biologen, 6.Aufl. p. 79-82
- V.Harms, Physik für Mediziner und Pharmazeuten, 14 Aufl. p. 79, 159-160

Erläuterung der wichtigsten physikalischen Begriffe

- Thermoelement - Thermoelektrischer Effekt

Lötet man an die Enden eines Metalldrahtes (z.B. Fe) zwei Drahtstücke aus einem anderen Metall (z.B. Konstantan) und schließt die beiden freien Enden der Konstantandrähte an ein Voltmeter an, so zeigt dieses eine elektrische Spannung an, wenn die beiden Lötstellen (1) und (2) verschiedene Temperaturen haben (siehe Abb. 2.6). Man nennt diese Spannung **Thermospannung** und den im Leiterkreis fließenden Strom **Thermostrom**.

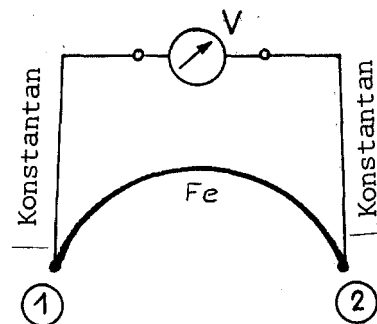


Abb. 2.6: Messprinzip eines Thermoelementes

Die Höhe der Thermospannung hängt von der Temperaturdifferenz der beiden Lötstellen und von der Art der Metalle ab. Es lassen sich Metallkombinationen finden (z.B. Nickel - Chromnickel), bei denen die Thermospannung proportional zur Temperaturdifferenz $T_1 - T_2$ bzw. $\vartheta_1 - \vartheta_2$ ist:

$$U_{\text{th}} = a \cdot (T_1 - T_2) = a \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2)$$

a ist eine für das betreffende Metallpaar charakteristische Konstante. Die pro 1 Kelvin Temperaturdifferenz auftretende Thermospannung bezeichnet man als **differentielle Thermospannung**.

In der obigen Gleichung ist die Konstante a gleich der differentiellen Thermospannung. Die Größenordnung der differentiellen Thermospannung beträgt 10^{-5} V/K.

Das die Thermospannung liefernde Metallpaar wird **Thermoelement** genannt. Es kann zur Temperaturmessung verwendet werden, wenn eine Lötstelle auf einer konstanten Vergleichstemperatur ϑ_0 gehalten wird und die andere Lötstelle mit dem Messobjekt, dessen Temperatur ϑ sei, in thermischen Kontakt gebracht wird. Es ist dann:

$$U_{\text{Th}} = a \cdot (\vartheta - \vartheta_0)$$

Aus der gemessenen Thermospannung U_{Th} kann ϑ bei bekannten Werten a und ϑ_0 ermittelt werden. Die Konstante a wird durch Eichung bestimmt. Bei kommerziellen Geräten ist das Voltmeter gleich in $^{\circ}\text{C}$ oder K geeicht.

Thermoelemente zur Temperaturmessung sind in Technik, Biologie und Medizin sehr verbreitet. Einige Vorteile dieser Geräte sind z.B.:

Direkte elektrische Registrierung (Schreiberanschluss);

Lötstelle kann zur **feinen Spitze** ausgebildet werden, besitzt also eine kleine Wärmekapazität, wodurch dem Messobjekt wenig Wärme entzogen wird und so die Temperatur des Messobjekts wenig beeinflusst wird.

Weiter sind **Messungen an schwer zugänglichen Stellen** (z.B. in Körperhöhlen) möglich, da die Thermodrähte flexibel sind.

• Kontaktspannung

Aus einer freien Metalloberfläche können Elektronen nur unter Energieaufwand austreten. Diese sog. **Austrittsarbeit** ist von Metall zu Metall verschieden. Bringt man nun zwei verschiedene Metalle A und B durch Verlöten oder Verschweißen in innigen Kontakt (in Abb. 2.7 z.B. bei (1)), so gehen einige Elektronen vom Metall mit der kleineren Austrittsarbeit in das mit der größeren über (z.B. von A nach B), so dass es an der Kontaktstelle aufgrund der Ladungstrennung zur Ausbildung einer Potentialdifferenz - der sog. **Kontaktspannung** - kommt. Die typische Größe der Kontaktspannung beträgt etwa 1 V.

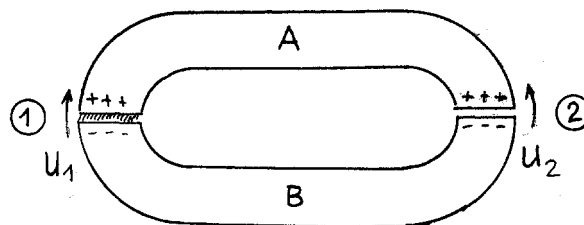


Abb. 2.7: Schematische Darstellung zur Erläuterung der Kontaktspannung.

Verschweißt man auch die beiden anderen Enden der Metalle (Kontaktstelle (2)), so entsteht ein geschlossener Leiterkreis, in dem aber zunächst kein Strom fließen kann, da an der Stelle

(2) ebenfalls eine Kontaktspannung entsteht, die der Spannung bei (1) entgegengerichtet und von gleicher Größe ist. Die beiden Kontaktspannungen kompensieren sich daher zu Null. Es zeigt sich, dass die Kontaktspannungen sich geringfügig mit der Temperatur verändern. Haben die Kontaktstellen (1) und (2) unterschiedliche Temperaturen, so sind auch die Kontaktspannungen dort etwas verschieden und kompensieren sich nicht mehr zu Null. Die **Differenz der Kontaktspannungen** tritt nun als Thermospannung in Erscheinung (thermoelektrischer Effekt!), wenn man A oder B an einer beliebigen Stelle aufschneidet und dort die Spannung misst.

Die **Ursache** für die Thermospannung ist also in der **Temperaturabhängigkeit** der **Kontaktspannung** begründet.

- **Peltier-Effekt**

Die Umkehrung des thermoelektrischen Effekts ist der **Peltier-Effekt**. Schickt man über eine Kontaktstelle aus zwei verschiedenen Metallen einen Strom, so wird die Kontaktstelle je nach Stromrichtung entweder erwärmt oder abgekühlt. Um diesen Effekt für den Bau von Kühlelementen zu nützen, muss die Kontaktstelle möglichst großflächig sein, damit sie einen geringen ohmschen Übergangswiderstand hat. Andernfalls würde die Stromwärme (Joulesche Wärme) den Kühleffekt überkompensieren.

Für den Bau solcher **Peltier-Elemente** verschweißt man ca. handtellergroße Platten aus geeigneten Materialien und schickt bei geringen Spannungen große Ströme (20 - 30 A) über die Kontaktstelle. Der Vorteil solcher Kühlelemente besteht z.B. darin, dass keine bewegten Teile (z.B. Kompressor) und keine Flüssigkeiten als Arbeitssubstanzen nötig sind. Ihr Einsatz ist jedoch auf Spezialzwecke (z.B. in der Medizin) beschränkt, da der Nutzeffekt sehr gering ist (hoher Energieverbrauch!). Für Kühlschränke wären sie höchst unwirtschaftlich. Neuerdings werden sie in kleineren Kühltaschen eingesetzt für den Anschluss an das Auto-Netz (12 V).

Übungsaufgaben:

Ü 2.12

Wovon ist die abgestrahlte Energie bei einem **schwarzen** und wovon bei einem **nicht-schwarzen** Körper abhängig ?

Ü 2.13

Um wie viel Prozent erhöht sich die vom menschlichen Körper pro Sekunde abgestrahlte Energie, wenn sich dessen Temperatur von 37°C auf 41°C erhöht?

Versuchsdurchführung 2B : Eichung eines Thermoelements

- Apparative Grundlagen

Funktionsweise eines Thermoelements

- Aufgabenstellung

Man bestimme die differentielle Thermospannung eines Nickel/Chromnickel Thermoelements.

- Versuchsdurchführung:

Die Abb. 2.8 zeigt eine Skizze des Versuchsaufbaues. Eine Lötstelle wird in ein Dewargefäß mit Wasser (ϑ_0 °C) getaucht, die andere in ein Gefäß mit Wasser plus Heizspirale, Quecksilberthermometer und Rührer. Als Spannungsmessgerät V dient ein digitales Voltmeter (mV-Bereich).

Die erste Ablesung von Thermospannung und Temperatur erfolgt bei Zimmertemperatur. Dann wird die Heizung eingeschaltet, permanent gerührt (zur guten Durchmischung), bis das Thermometer um ca. 6-8 Grad gestiegen ist. Die Heizung wird nun abgeschaltet und es wird solange weitergerührt, bis die Temperatur nicht weiter steigt. Die Spannung am Voltmeter und die Celsius-Temperatur werden abgelesen und in die Wertetabelle eingetragen. Anschließend Heizung wieder einschalten usw. Man verfähre in dieser Weise bis etwa 80°C.

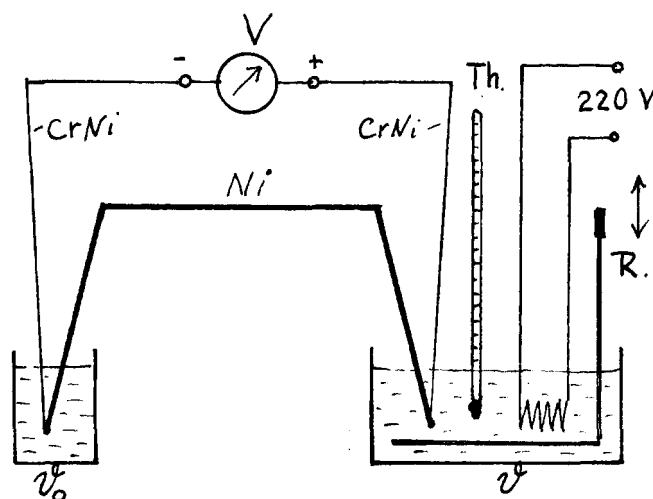


Abb. 2.8: Der Versuchsaufbau zur Eichung des Thermoelements.

• **Auswertung**

Die Messpunkte werden in ein Diagramm (Millimeterpapier DIN A4) eingetragen und es wird eine **Ausgleichsgerade** durch die Messpunkte gelegt. Die Steigung dieser Geraden ist dann die gesuchte differentielle Thermospannung a .

Geben Sie das Ergebnis, die differentielle Thermospannung in $\text{mV}/^\circ\text{C}$ und in $\mu\text{V}/\text{K}$ an und ermitteln Sie aus dem Diagramm auch die Vergleichstemperatur ϑ_0 .

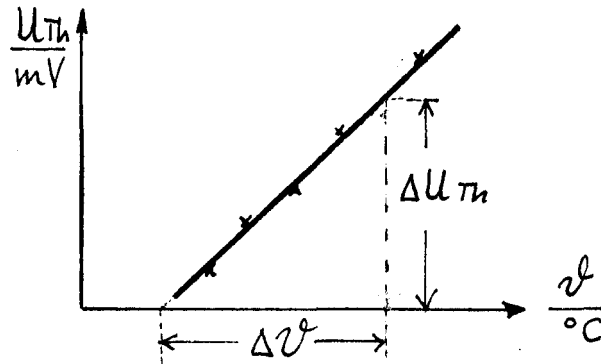


Abb. 2.9: Beispiel für die graphische Auswertung der Messdaten und die Bestimmung der Steigung der Ausgleichsgeraden.

Sie sollten folgende Wertetabelle in Ihrem Protokoll eintragen:

$\vartheta [^\circ\text{C}]$							
$U_{\text{Th}} [\text{mV}]$							