

## 11. Wärme

Die Beherrschung des Feuers zum Wärmen, zur Abwehr wilder Tiere und zur Bereitung von Speisen war ein entscheidender Fortschritt in der Entwicklung der Menschheit. Im Gedächtnis der Menschen lebt dieses Ereignis fort in dem griechischen Mythos vom Prometheus, der den Menschen das Feuer vom Himmel brachte und dafür von den Göttern grausam bestraft wurde. Feuer gehörte vielleicht schon seit einer Million Jahre zum Leben unserer Vorfahren. Feuer und Wärme standen auch am Beginn des industriellen Zeitalters von ca. 200 Jahren, denn mit der Erfindung der Dampfmaschine konnte man Wärme zum Verrichten von schweren Arbeiten, zum Betreiben von Eisenbahnen und zur Erzeugung von Elektrizität benutzen. Unter dem Einfluss der möglichen technischen Nutzung rückte die Wärme auch in das Interesse der Wissenschaft.

### 11.1 Temperatur

Im Alltag wird der Begriff Wärme in zwei Bedeutungen benutzt: Man sagt z.B., "dass man sich in der Wärme wohlfühle" oder "dass ein Zimmer eine angenehme Wärme habe" oder andererseits "dass ein Ofen Wärme abgebe" oder "dass Wärme verloren gehe". Im ersten Fall verbinden wir mit Wärme einen Zustand bzw. eine Eigenschaft "warm" oder "kalt". Sie lässt sich mit unserem Tastsinn erfahren. Indem wir die Hand an die Stirne eines Kindes legen, können wir feststellen, ob es Fieber hat. Indem wir zwei Körper nacheinander anfassen, können wir herausfinden, welcher Körper wärmer ist. Allerdings kann man sich dabei sehr täuschen z.B., wenn die beiden Körper aus verschiedenen Materialien bestehen oder unterschiedliche Oberflächen besitzen

#### **Versuch: Subjektives Temperaturempfinden**

Faßt man einen Körper aus Aluminium und einen andern aus Holz gleichzeitig mit jeweils einer Hand an, so empfindet man das Aluminium als kälter, obwohl beide Körper die gleiche Temperatur haben.

Die qualitativen Empfindungen heiß, warm oder kalt werden durch den Begriff der Temperatur quantifiziert. In den Thermometern benutzt man gewisse physikalische Eigenschaften, die sich in Abhängigkeit von der Temperatur ändern, z.B. die Ausdehnung von Flüssigkeiten oder den elektrischen Widerstand. Alle Thermometer müssen geeicht werden. Dazu nutzt man die Tatsache aus, dass beim Schmelzen bzw. beim Sieden eines Stoffes die Temperatur solange konstant bleibt, bis der entsprechende Vorgang beendet ist. Dies wurde für den Siedepunkt des Wassers experimentell gezeigt. Das Ergebnis ist in Abb. 11.1 dargestellt.

Bei der uns geläufigen Temperaturskala wurde der Schmelzpunkt von Eis willkürlich als Nullpunkt festgelegt. Die Temperatur des siedenden Wassers wurde - auch willkürlich - als Hundert Grad definiert. Dann teilte man die Skala in gleiche 100 Teile und setzt sie auch zu negativen Werten hin und zu Werten über 100 Grad fort. Diese so erhaltene Skala heißt Celsius Skala und man schreibt "100 Grad Celsius" oder 100 °C.

Bei weiteren Fortschritten in der Physik der Wärme ergab sich, dass die Temperaturskala nach unten begrenzt ist: Kein System kann eine Temperatur haben,

die kleiner als  $-273,2\text{ °C}$  ist. Warum es diese untere Grenze gibt, werden wir erst verstehen, wenn wir die Natur der Wärme aufgeklärt haben. Eine obere Temperaturgrenze scheint es nicht zu geben. In der wissenschaftlichen Temperaturskala, der sog. abso-

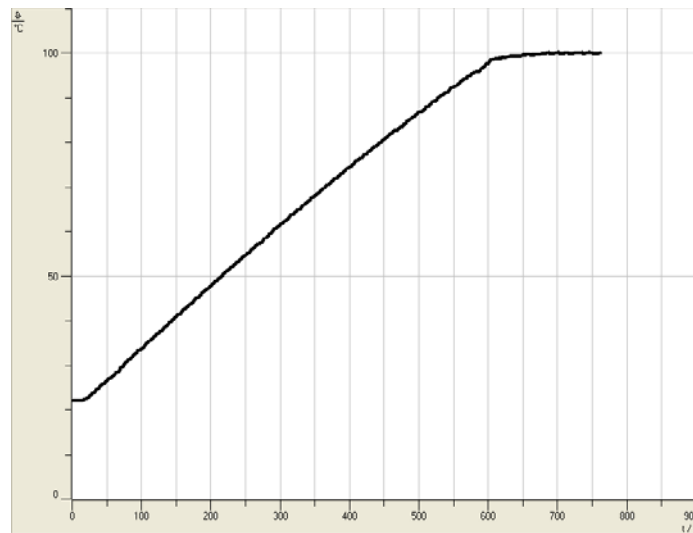


Abb. 11.1: Die Abhängigkeit der Temperatur von der Zeit beim Erhitzen von Wasser mit einem Tauchsieder. Man beobachtet, dass von einem bestimmten Zeitpunkt ab die Temperatur bei  $100\text{ °C}$  konstant bleibt.

luten oder Kelvin Skala, verschiebt man den Nullpunkt auf die tiefstmögliche Temperatur, behält jedoch die Einheit der Celsiuskala bei. Damit "rutscht" der Schmelzpunkt von Wasser von  $0\text{ °C}$  auf  $273,2\text{ K}$  (man sagt "273,2 Kelvin") und der Siedepunkt von  $100\text{ °C}$  auf  $373,2\text{ K}$ . In der absoluten Temperaturskala gibt es also keine negativen Temperaturen.

Noch einige Temperaturwerte aus unserem Kosmos: Auf der Oberfläche der Sonne herrscht eine Temperatur von ca.  $6000\text{ K}$  und in ihrem Innern von ca. 15 Millionen K. Aus den Ansagen im Flugzeug kennen wir die Temperatur in der Atmosphäre in Flughöhe (ca.  $10\text{ km}$ ) als  $-50\text{ °C}$  oder  $220\text{ K}$ , während in den Weiten des Kosmos eine Temperatur von  $-270\text{ °C}$  oder  $3\text{ K}$  herrscht.

## 11.2 Thermische Energie

Kommen wir nun zu dem anderen Aspekt aus dem alltäglichen Sprachgebrauch, in dem Wärme als etwas Übertragbares betrachtet wird, das man nicht umsonst bekommt, das sogar relativ teuer sein kann. Der zweite zentrale Begriff der Wärmelehre ist die Wärmeenergie oder thermische Energie. Für sie hat unser Körper kein unmittelbares Sinnesorgan. Dennoch haben wir aus dem täglichen Leben vielfache Beispiele dafür, dass das Erwärmen einer Substanz mit Energieaufwand verbunden ist. Beim Bremsen von Autos werden die Bremsen heiß. Hierbei wird die Bewegungsenergie des Autos verkleinert und in Wärmeenergie umgewandelt. Beim Erhitzen von Wasser auf dem Herd muss man für die "verbrauchte" elektrische Energie bezahlen. Wir lernen: Um einen Körper zu erwärmen, d.h. um seine Temperatur zu erhöhen, ohne ihn zu bewegen oder zu verformen, müssen wir dem Körper Energie zuführen. Diese Energie kann zunächst in verschiedener Form vorliegen (als Bewegungsenergie wie beim Auto, als elektrische Energie auf dem Herd oder als Energie aus der Verbrennung von Gas,

Kohle oder Holz). Durch verschiedene Verfahren wird diese Energie in thermische Energie umgewandelt und zwar vollständig. Das garantiert uns der Satz von der Erhaltung der Energie.

Wie viel Energie nötig ist, um bei einer gegebenen Substanz eine bestimmte Temperaturerhöhung zu erzielen, hängt von der Masse der Substanz und einer Materialeigenschaft, der spezifischen Wärmekapazität, ab. Um 1 kg Wasser von 0°C auf 100°C zu erwärmen, ist eine Energie von 420 kJ oder 0,1 kWh nötig, für dieselbe Masse Aluminium nur etwa ein Fünftel nämlich 0,02 kWh. Bei einem Preis von etwa 10 ct/kWh für elektrische Energie kostet es etwa einen Cent, wenn man einen Liter Wasser von 0°C zum Kochen bringt.

### 11.3 Thermische Energie als Energie der ungeordneten Bewegung kleinster Teilchen

Um die Temperatur eines Körpers zu erhöhen, muss man Energie zuführen. Sieht man von Schmelz- oder Verdampfungsprozessen ab, erhöht sich bei Energiezufuhr nur die Temperatur, andere sichtbare Veränderungen treten i.a. nicht auf: Der Körper bewegt sich nicht, er verändert auch kaum seine Größe, Form oder Farbe. Man fragt sich: Was bewirkt die zugefügte Energie? Oder genauer gefragt: Welche innere Eigenschaft des Körpers verändert sich in welcher Weise, wenn man ihm thermische Energie zufügt?

Um das herauszufinden, betrachten wir zunächst ein einfaches System, ein Edelgas wie Helium oder Neon, das in einem ruhenden Behälter eingeschlossen ist. Ein solches Gas besteht aus einzelnen Atomen, die durch den Raum fliegen und gegeneinander stoßen oder an den Wänden reflektiert werden. Die Gesamtenergie des Gases ergibt sich als Summe der kinetischen Energien seiner Einzelatome. Hierbei unterscheiden sich die Geschwindigkeiten der Atome sowohl in der Richtung als auch in der Größe. Dieses Bild kann man testen, indem man ein kleines Loch in den Behälter bohrt und die Geschwindigkeiten der austretenden Gasatome analysiert.

Da die Geschwindigkeiten in Richtung und Größe unterschiedlich sind, nennt man die Bewegung der Atome in einem Gas ungeordnet. Im Gegensatz dazu nennt man eine Bewegung geordnet, wenn alle Atome sich in die gleiche Richtung und mit gleicher Geschwindigkeit bewegen. Dann würde sich auch der Behälter in dieser Richtung und mit dieser Geschwindigkeit bewegen. Alle Bewegung von Körpern die wir im täglichen Leben sehen, wie fahrende Autos oder fallende Äpfel beruhen auf (teilweise) geordneter Bewegung.

Kehren wir zu dem Gas zurück: Erhöht man die Temperatur des Gases, indem man thermische Energie zuführt, wird diese Energie auf die einzelnen Atome verteilt, diese bewegen sich jetzt schneller, aber es entsteht keine Ordnung. Die mittlere (kinetische) Energie  $E_m$  jedes Atoms nimmt mit der Temperatur zu. Der Zusammenhang ist sehr einfach:

$$E_m = 3/2 \cdot k \cdot T.$$

Hierin sind  $T$  die absolute Temperatur und  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K eine fundamentale Konstante, die sog. Boltzmann Konstante.

Ein Beispiel: Bei Zimmertemperatur, d.h.  $T = 300$  K, beträgt die mittlere Energie eines Teilchens ungefähr  $6 \cdot 10^{-21}$  J = 0,04 eV, woraus sich für Sauerstoffmoleküle eine mittlere Geschwindigkeit von  $v = 500$  m/s = 1800 km/h ergibt. Weiterhin folgert man aus dem Zusammenhang zwischen Bewegungsenergie und Temperatur, dass am absoluten Nullpunkt, d.h. bei  $T = 0$  K, die Bewegungsenergie der Atome Null ist, sie

also in Ruhe sind. Da es keine negativen Bewegungsenergien gibt, sind auch keine negativen absoluten Temperaturen möglich. Dies ist die einfachste Erklärung dafür, dass es eine niedrigste Temperatur geben muss. Diese Aussage ist richtig, auch wenn die anschauliche Erklärung in der Nähe des absoluten Nullpunktes versagt, da die Gase sich verflüssigen oder fest werden.

Auch in Festkörpern bewegen sich die einzelnen Teilchen. Allerdings können sie sich nicht frei bewegen, sondern schwingen um eine Gleichgewichtslage, wobei die Schwingungsenergie auch proportional zur absoluten Temperatur ist.

Wir fassen zusammen:

1. Es gibt eine niedrigste Temperatur, den absoluten Nullpunkt 0 K, an dem alle Bewegung zur Ruhe kommt.
2. Wenn einem ruhenden System thermische Energie zugeführt wird, verstärkt sich die ungeordnete Bewegung der einzelnen Teilchen, wobei das System als ganzes in Ruhe bleibt.

#### 11.4 Effekte bei tiefen Temperaturen, Supraleitung

Kühlt man Körper ab, so können sich gewisse Eigenschaften wie z.B. Härte, Elastizität und elektrischer Widerstand, deutlich ändern.

##### Versuche mit flüssigem Stickstoff

Die Temperatur des flüssigen Stickstoffs ist  $-196^{\circ}\text{C} = 77\text{ K}$ .

Eine Bleiglocke kann man bei Zimmertemperatur nicht zum Klingen bringen, bei  $-196^{\circ}\text{C}$  tönt sie wunderschön hell.

Ein Gummischlauch ist normalerweise elastisch; wenn man ihn mit flüssigem Stickstoff abkühlt, wird er spröde und lässt sich leicht mit einem Hammer zerstören.

Der Widerstand eines Eisendrahts wird drastisch kleiner. Wenn man ihn von Raumtemperatur auf die Temperatur des flüssigen Stickstoffs abkühlt, fällt der Widerstand von  $19\ \Omega$  auf  $5\ \Omega$ .

Wenn man zu noch tieferen Temperaturen übergeht, wobei "tief" nun bedeutet, dass man in die Nähe des absoluten Temperaturnullpunktes kommt, treten eine Reihe von ganz neuen und unerwarteten Phänomenen auf. Eines davon hat die Gruppe um den holländischen Physiker H. Kammerlingh Onnes im Jahre 1911 in Leiden entdeckt. Im

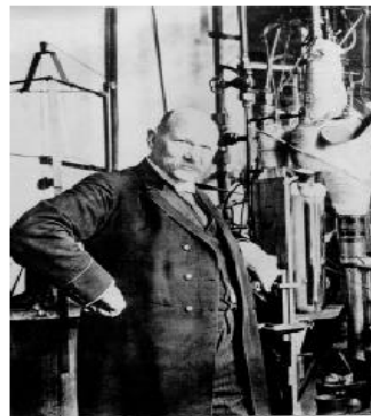
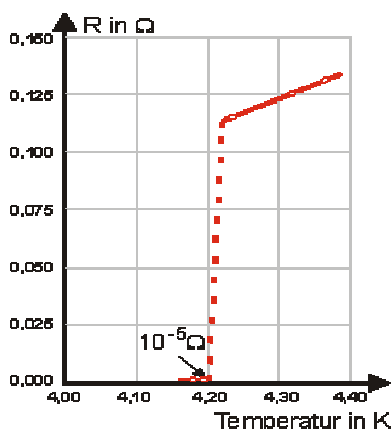


Abb. 11.2: Die Entdeckung der Supraleitung durch H. Kammerlingh Onnes (rechts in seinem Labor). Im linken Bild ist die Abhängigkeit des Widerstands von Quecksilber als Funktion der Temperatur gezeigt. Bei 4,2 K sinkt der Widerstand auf einen unmessbar kleinen Wert.

Temperaturbereich zwischen 1 K und 5 K verlor das bei dieser Temperatur feste Quecksilber plötzlich seinen elektrischen Widerstand, seine Leitfähigkeit wurde sehr sehr groß. Dieses Phänomen, das man "Supraleitung" nennt, kann nur mit Hilfe der Quantenphysik verstanden werden. Inzwischen sind Materialien entdeckt worden, die bei wesentlich höheren Temperaturen supraleitend werden, der Rekord steht bei etwa 134 K. Hierfür erhielten Bednorz und Müller 1987 den Nobelpreis für Physik. Heute wird die Supraleitung technisch genutzt, z.B. um Energieverluste in Elektromagneten zu reduzieren.

Mit einem Hochtemperatursupraleiter, der bei der Temperatur des flüssigen Stickstoffs supraleitend ist, soll nun ein anderes Phänomen vorgestellt werden, das von F. W. Meißner und R. Ochsenfeld im Jahre 1933 entdeckt wurde und unter dem Namen Meißner-Ochsenfeld-Effekt bekannt ist. In einem Behälter befindet sich flüssiger Stickstoff, der ein Plättchen aus einem supraleitenden Material auf  $-196\text{ °C}$  abkühlt, so

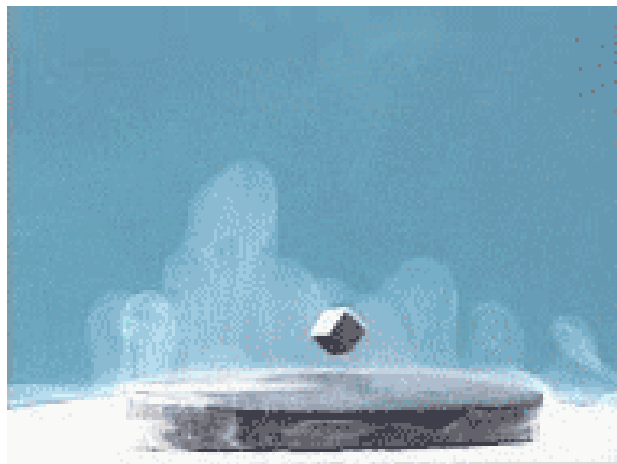


Abb. 11.3: Meißner-Ochsenfeld-Effekt. Ein Permanentmagnet schwebt über einem supraleitenden Plättchen

dass es supraleitend wird. Dann bringt man einen Permanentmagneten darüber und lässt ihn los: Er schwebt über dem (nicht ferromagnetischen) Supraleiter. Erst wenn sich das Plättchen erwärmt hat, fällt er herunter.

Dieser Effekt erklärt sich wie folgt: Ein Supraleiter "wehrt" sich gegen das Eindringen von magnetischen Feldlinien, indem in einer ganz dünnen Schicht an der Oberfläche des Supraleiters elektrische Ströme entstehen und diese wegen des verschwindenden Widerstandes kontinuierlich weiterfließen. Sie erzeugen ein magnetisches Gegenfeld, sodass das Innere des Supraleiters feldfrei ist. Da die Feldlinien des Permanentmagneten nicht in den Supraleiter eindringen können und sich so oberhalb des Plättchens verstärken, erfährt der Magnet eine nach oben gerichtete Kraft, so dass er über dem Supraleiter schwebt.

### 11.5 Biographie Anders Celsius (1701 - 1744)

Geboren wurde Celsius in Uppsala. Er entstammte einer alten Familie, die viele Wissenschaftler hervorgebracht hatte und ihren Namen latinisieren ließ. Seine beiden Großväter waren Professoren für Mathematik bzw. Astronomie und auch sein Vater war Professor für Astronomie an der Universität Uppsala. So ist es nicht verwunderlich, dass auch Anders, bei dem schon früh eine besondere Begabung für Mathematik auffiel, im Jahre 1730 von der Universität Uppsala zum Professor für

Astronomie berufen wurde. Da es zu dieser Zeit in Schweden kein größeres Observatorium gab, besuchte Anders Celsius zwischen 1732 und 1736 etliche berühmte Observatorien in ganz Europa (u.a. Nürnberg, Rom und Paris), wo er mit vielen der berühmtesten Astronomen des 18. Jahrhunderts zusammenarbeitete.

Nach der Rückkehr in seine Heimat nahm er im Jahre 1736 an der sog. Lapland-Expedition teil. Ziel dieser Expedition war, in der Nähe des Pols die Entfernung zwischen zwei Punkten auf der Erdoberfläche, die auf dem gleichen Meridian liegen und sich in der geographischen Breite um  $1^\circ$  unterscheiden, zu messen. Eine zweite ähnliche Messung fand zu gleicher Zeit in Südamerika (in Ekuador) in der Nähe des Äquators statt. Aus diesen Messungen ergab sich, dass die Erde abgeplattet ist, so wie Newton es vorhergesagt hatte.



Durch die Lapland-Expedition war Celsius berühmt geworden, so dass er anschließend die Behörden davon überzeugen konnte, die Mittel für ein modernes Observatorium zur Verfügung zu stellen. Dieses Observatorium, das nach Celsius benannt wurde, konnte um 1740 fertiggestellt werden und wurde mit im Ausland gekauften Instrumenten ausgestattet, die dem neuesten Stand der damaligen Technik entsprachen.

Im 18. Jahrhundert umfasste die Astronomie ein größeres Feld als heute; so zählten auch geographische Messungen und meteorologische Beobachtungen zu den Aufgaben der Astronomen. Celsius als erster Direktor des Observatoriums war u.a. an der Erstellung einer schwedischen Generalkarte und an der Beobachtung der langfristigen Bewegung der skandinavischen Landmasse beteiligt.

Für seine meteorologischen Beobachtungen konstruierte er im Jahre 1742 das sog. Celsius-Thermometer, das ihn berühmt machte. Schon als Student hatte er bei meteorologischen Messungen die Problematik bei Temperaturmessungen erkannt und wohl schon damals die Notwendigkeit einer gemeinsamen internationalen Skala gesehen. Zur damaligen Zeit gab es mehrere Temperaturskalen, u.a. die des Glasherstellers Gabriel Daniel Fahrenheit (1686 – 1736) und die des Biologen Antoine Ferchault de Réaumur (1683 – 1757). Jede Temperaturskala muss sich zumindest auf eine Standardtemperatur, einen sog. Fixpunkt stützen, viele Skalen sind jedoch durch zwei Fixpunkte festgelegt. Auch vor Celsius wurden der Schmelzpunkt und der Siedepunkt des Wassers als mögliche Fixpunkte benutzt, doch es war damals nicht klar, ob dies universelle Fixpunkte waren, d.h. zum Beispiel, ob sie unabhängig von der geographischen Breite waren. Es war nun das Verdienst von Celsius, dass er auf Grund von Experimenten nachwies,

- dass der Gefrierpunkt des Wassers unabhängig von der geographischen Breite und vom Luftdruck ist und
- dass der Siedepunkt vom Luftdruck abhängt und wie man ihn auf einen Standarddruck umrechnen kann.

So blieb für Celsius nur die Frage, welche Temperaturwerte er den Fixpunkten, Gefrier- und Siedepunkt des Wassers, zuordnen sollte. Er wählte  $100^\circ$  für den Gefrierpunkt und  $0^\circ$  für den Siedepunkt. Dies hatte den Vorteil, dass die im täglichen Leben und in der

Meteorologie vorkommenden Temperaturen nur positive Werte annahmen, setzte sich auf die Dauer jedoch nicht durch. Schon kurz nach Celsius' Tod wurde seine Skala umgekehrt. Sie verbreitete sich sehr schnell und blieb seit jener Zeit unverändert.

Auch wenn Celsius manchmal als Astronom, der nicht zur Astronomie kam, bezeichnet wird, so hat er auch auf diesem Gebiet wichtige Beiträge geleistet:

- Er beobachtete die verschiedensten astronomischen Objekte und beschäftigte sich insbesondere mit Sonnen- und Mondfinsternissen.
- Er erkannte den Zusammenhang zwischen Aktivitäten auf der Sonne und magnetischen Erscheinungen auf der Erde.
- Er bestimmte nach einem von ihm entwickelten Verfahren die Helligkeiten von 300 Fixsternen. Dazu schickte er das Sternlicht solange durch eine verschiedene Anzahl von identischen Glasplatten, bis man den Stern nicht mehr sah. Beim Sirius, dem hellsten Stern unseres Nachthimmels, brauchte er hierzu 25 Platten.

Ferner unterstützte Celsius die Einführung des Gregorianischen Kalenders in Schweden, war damit jedoch zu seinen Lebzeiten nicht erfolgreich. Zwar hatte man bereits im Jahre 1700 damit begonnen, zwischen 1700 und 1740 alle 4 Jahre einen Schalttag ausfallen zu lassen, doch bereits 1712 war man zum Julianischen Kalender zurückgekehrt. Erst im Jahre 1753, also 10 Jahre nach Celsius' Tod – er starb im Alter von 43 Jahren an Tuberkulose – wurde der Gregorianische Kalender abrupt eingeführt, indem auf einmal 11 Tage gestrichen wurden.