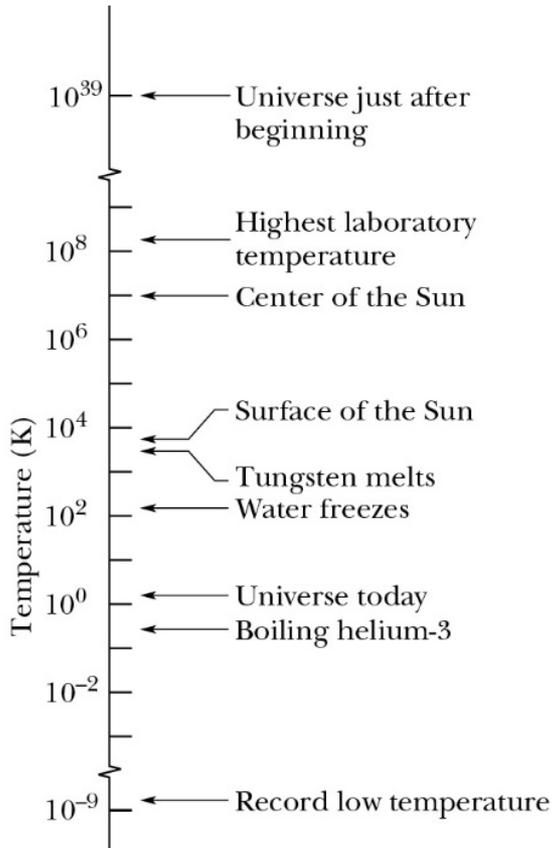


Physik 2 – exp. Teil.

15 Temperatur, Wärme und der erste Hauptsatz der Thermodynamik

15.1 Temperatur



Der zentrale Begriff der Thermodynamik ist die Temperatur.
Bsp.: Menschlicher „Temperatursinn“ - Eisen vs. Holz.

Unsere Finger messen „die Temperatur“ durch die Energie-
Abfluß.

Die Temperatur ist eine der sieben SI-Basisgrößen. Die Physiker
messen die Temperatur auf der **Kelvin-Skala** Einheit -das *Kelvin*
Die Temperatur eines Körpers besitzt zwar keine offensichtliche
obere Grenze, aber es gibt eine untere Grenze -die Nullmarke
der Kelvin-Skala.

Die Zimmertemperatur entspricht ungefähr 290 Kelvin (oder
290 K) oberhalb dieses absoluten Nullpunkts.

Zu Beginn unseres Universums vor rund 10 bis 20 Milliarden
Jahren betrug seine Temperatur ungefähr 10^{39} K. Im Verlauf
seiner Expansion kühlte sich das Universum ab und hat heute
eine durchschnittliche Temperatur von knapp 3 K.

15.2 Der nullte Hauptsatz der Thermodynamik

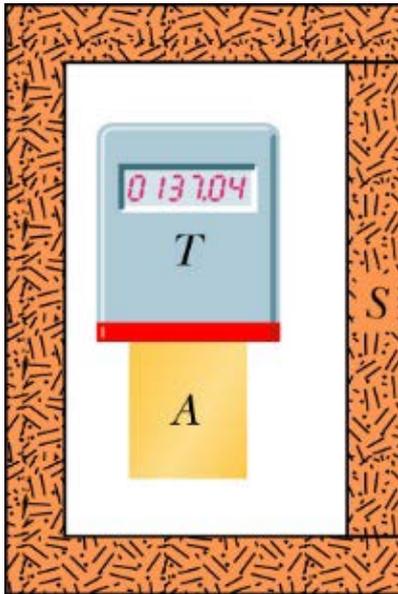


Thermally sensitive element

Viele Eigenschaften von Körpern verändern sich, wenn sich ihre Temperatur ändert.

Bsp.: Mit zunehmender Temperatur nimmt das Volumen einer Flüssigkeit zu, ein Metallstab wird etwas länger, der elektrische Widerstand eines Drahts wird größer, der Druck eines Gases in einem abgeschlossenen Behälter wird größer.

Jede dieser Eigenschaften kann zur Grundlage eines Instruments (Thermoskop, kein Thermometer) werden.



Bringen wir das Thermoskop (Körper T) in Kontakt mit einem anderen Körper A.

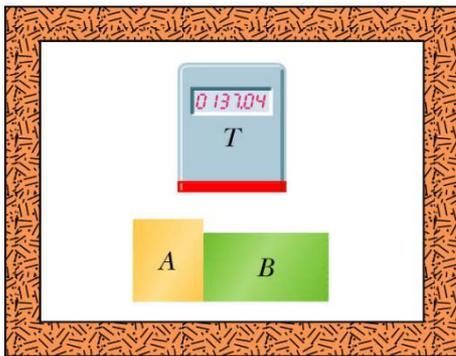
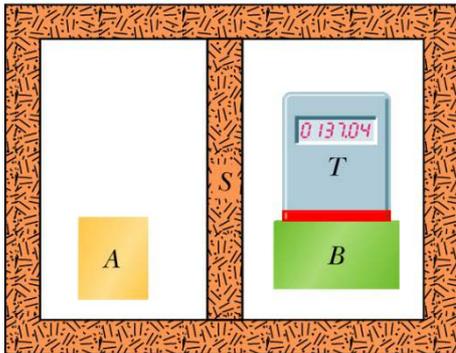
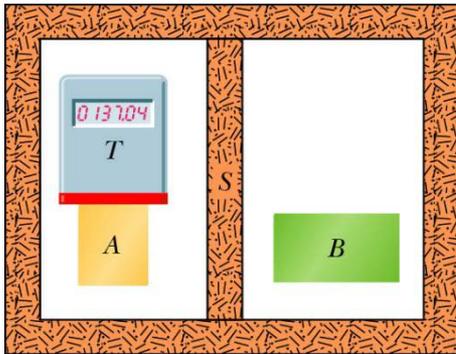
Das gesamte System befinde sich innerhalb eines wärmeisolierten Behälters.

Zuerst ändert sich die Zahl. Was passiert in der Zeit?

Nach einer Bestimmt Zeit zeigt die Anzeige des Thermoskops eine konstante Zahl an.

In diesem Fall sagen wir, die beiden Körper befinden sich in einem thermodynamischen Gleichgewicht.

Wir können davon ausgehen, dass die Körper T und A dieselbe Temperatur besitzen. (welche? Kalibrierung!!!)



Wenn wir Körper T in unmittelbarem Kontakt mit einem anderen Körper B bringen und stellen fest, dass sich die beiden Körper bei demselben Anzeigewert des Thermoskops im thermischen Gleichgewicht befinden. Dann müssen auch die Körper T und B dieselbe (unbekannte) Temperatur haben. Angenommen, wir bringen nun die beiden Körper A und B in Kontakt. Befinden sie sich sofort im thermischen Gleichgewicht? Experimentell finden wir, ja.

Den nullte Hauptsatz der Thermodynamik:

Wenn sich zwei Körper A und B jeweils im thermischen Gleichgewicht mit einem dritten Körper T befinden, dann befinden sie sich auch untereinander im thermischen Gleichgewicht.

D.h.: jeder Körper besitzt eine Eigenschaft, die wir *Temperatur* nennen. Befinden sich zwei Körper im thermischen Gleichgewicht, dann sind ihre Temperaturen gleich.

Ein Thermoskops können wir in ein Thermometer umwandeln, indem wir es kalibrieren.

SI-Basiseinheiten

Basis- größe	Basiseinheit		Definition (siehe auch DIN 1301)
	Name	Zeichen	
Tempe- ratur	Kelvin	K	Das Kelvin, die Einheit der thermodynamischen Temperatur, ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers.

Das Kelvin, die Einheit der thermodynamischen Temperatur, ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers.

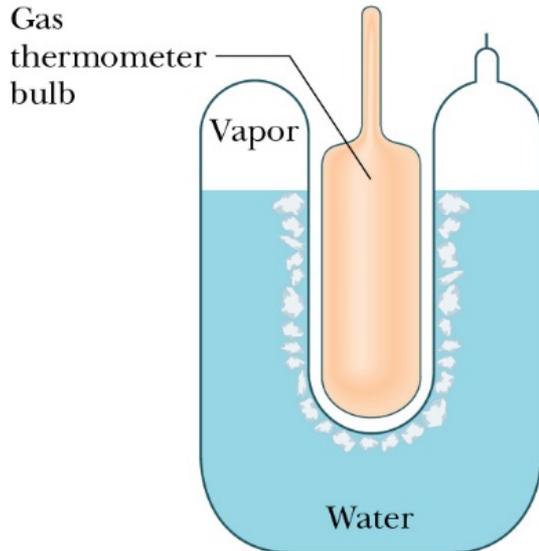
Es folgt, dass die thermodynamische Temperatur des Tripelpunktes des Wassers genau gleich 273,16 Kelvin, $T_{\text{tpw}} = 273,16 \text{ K}$, ist.

Auf seiner Sitzung im Jahre 2005 hat das Internationale Komitee bestätigt:

Diese Definition bezieht sich auf ein Wasser, dessen Isotopenzusammensetzung exakt durch folgende Stoffmengenverhältnisse definiert ist:

0,000 155 76 Mol ^2H pro Mol ^1H , 0,000 379 9 Mol ^{17}O pro Mol ^{16}O und 0,002 005 2 Mol ^{18}O pro Mol ^{16}O .

15.3 Temperaturmessung



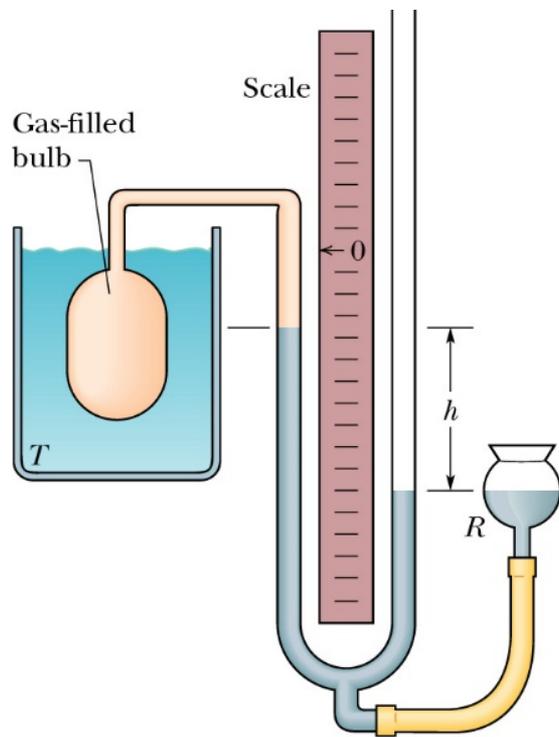
Der Tripelpunkt von Wasser

Zur Definition einer Temperaturskala brauchen wir irgendein reproduzierbares thermisches Phänomen und ordnen seiner Umgebung ziemlich willkürlich eine bestimmte Temperatur (in Kelvin) zu. Wir definieren uns also einen standardisierten Fixpunkt und geben ihm eine standardisierte Temperatur.

Flüssiges Wasser, festes Eis und Wasserdampf (gasförmiges Wasser) können nur bei genau einem Druck und einer Temperatur gleichzeitig im thermischen Gleichgewicht existieren. In eine *Tripelpunktzelle* lässt sich der Tripelpunkt von Wasser im Labor realisieren. Nach internationaler Übereinkunft entspricht dem Tripelpunkt von Wasser ein Wert von

$$T_3 = 273,16 \text{ K} \quad (\text{Tripelpunkttemperatur})$$

als Standardtemperatur zur Kalibrierung von Thermometern. Nach dieser Übereinkunft entspricht einem Kelvin der $1/273,16$ te Teil der Differenz zwischen dem absoluten Nullpunkt und der Tripelpunkttemperatur von Wasser.



Das Gasthermometer mit konstantem Gasvolumen

Das Standardthermometer, das auch zur Kalibrierung aller anderen Thermometer herangezogen wird, beruht auf dem Gasdruck in einem festen Volumen. Es besteht aus einem gasgefüllten Kolben, der über ein Rohr mit einem Quecksilbermanometer verbunden ist. Durch Anheben bzw. Absenken des Reservoirs R kann der Quecksilberpegel auf der linken Seite immer auf den Nullwert der Skala gebracht werden, sodass das Gasvolumen konstant bleibt.

Die Temperatur eines Körpers im thermischen Kontakt mit dem Kolben wird als

$$T = Cp$$

definiert, wobei p der Druck innerhalb des Gases und C eine Konstante ist.

Der Druck p ist gleich (erster Semester!)

$$p = p_0 - \rho gh$$

wobei p_0 der Atmosphärendruck, ρ die Dichte des Quecksilbers im Manometer und h die gemessene Höhendifferenz zwischen den beiden Quecksilbermiveaus sind.

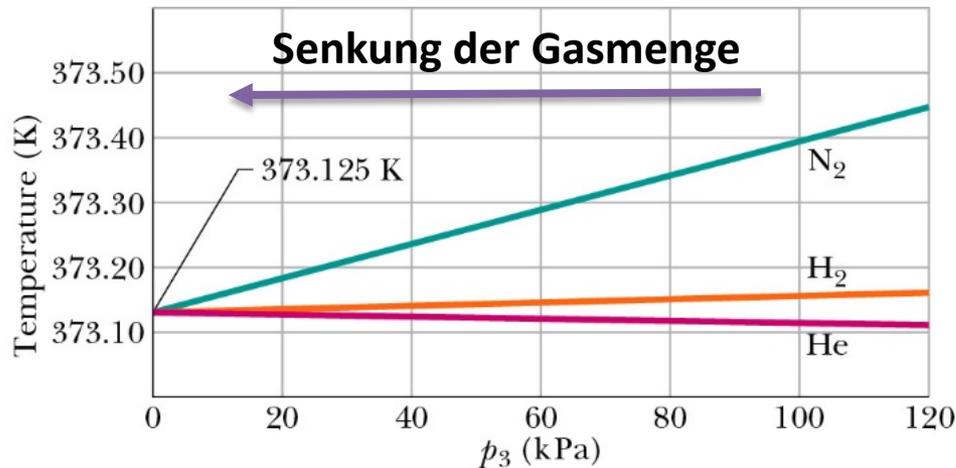
Messen wir mit dem Thermometer die Temperatur einer Tripelpunktzelle

$$T_3 = Cp_3$$

Damit:

$$T = T_3 \frac{p}{p_3} = \frac{p}{p_3} 273,16 K$$

Problem: was passiert, wenn ich ein anderes Gasthermometer mit konstantem Gasvolumen nehme?



Wir stellen fest, dass verschiedene Gase in dem Kolben auch etwas verschiedene Ergebnisse liefern. Verwenden wir jedoch in dem (gleichen) Kolben immer geringere Gasmengen, so konvergieren die Werte zu einer einzigen Temperatur, unabhängig von der Art des Gases.

Fazit: eine unbekannte Temperatur soll wie folgt gemessen werden: Man fülle den Thermometerkolben mit einer beliebigen Menge irgendeines Gases und messe p_3 sowie, den Gasdruck bei der zu messenden Temperatur. Man berechne das Verhältnis p/p_3 . Anschließend wiederhole man beide Messungen mit einer kleineren Gasmenge in dem Kolben und berechne wiederum dieses Verhältnis. Auf diese Weise fahre man fort und verwende dabei immer kleinere Gasmengen, bis man das Verhältnis p/p_3 zu dem Wert extrapolieren kann, bei dem nahezu kein Gas mehr in dem Kolben wäre. Man berechne T:

$$T = \lim_{Gas \rightarrow 0} \frac{p}{p_3} 273,16 K$$

Diese Temperatur bezeichnet man als die ideale Gastemperatur.

15.4 Die Celsius- und die Fahrenheit-Skalen

Im Gegensatz zur Physik wird in fast allen Ländern der Welt für den umgangssprachlichen und wirtschaftlichen Gebrauch die Celsius-Skala benutzt. Celsius-Temperaturen werden in Grad gemessen, und das Celsius-Grad hat dieselbe Größe wie das Kelvin.

Allerdings entspricht dem Nullpunkt der Celsius-Skala ein etwas gebräuchlicherer Wert als der absolute Nullpunkt.

$$T_C = T - 273,15$$

wobei T_C die Celsius-Temperatur. Werden Temperaturen auf der Celsius-Skala angegeben, so wird meist das Grad-Symbol verwendet. Wir schreiben daher 20,00 °C für 293,15 K.

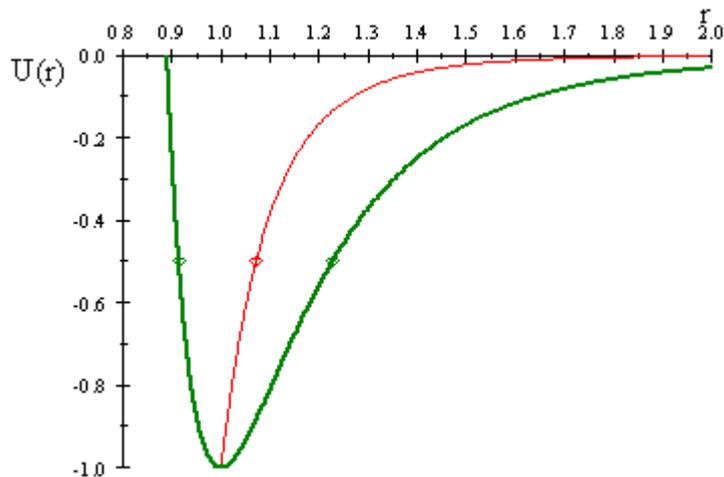
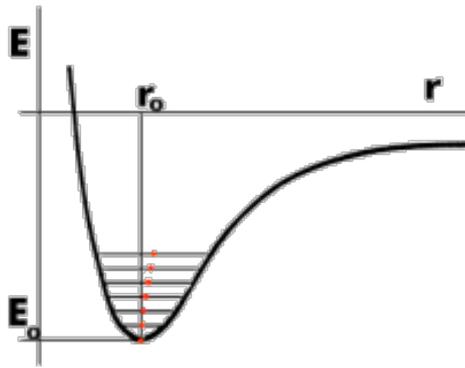
In den Vereinigten Staaten verwendet man auch die Fahrenheit-Skala, die ein kleineres Grad verwendet als die Celsius-Skala und nochmals einen anderen Nullpunkt für die Temperaturangabe. Die Beziehung zwischen der Celsius- und der Fahrenheit-Skala ist:

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32$$

Temperatur	°C	°F
Siedepunkt von Wasser	100	212
Normale Körpertemperatur	37,0	98,6
Absolut Null	-273,15	-459,67
Gefrierpunkt von Wasser	0	32
Nullpunkt der Fahrenheit-Skala	-18	0
Übereinstimmung beider Skalen	-40	-40

15.5 Wärmeausdehnung

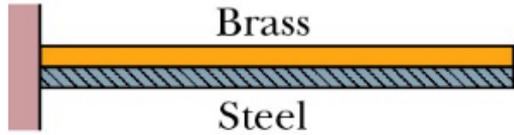
Einen festen Metaldeckel auf einem Glas könnten Sie oft lösen, indem Sie ihn unter einen heißen Wasserstrahl halten. Sowohl das Metall des Deckels als auch das Glas dehnen sich aus, wenn ihren Atomen durch das heiße Wasser Energie zugeführt wird.



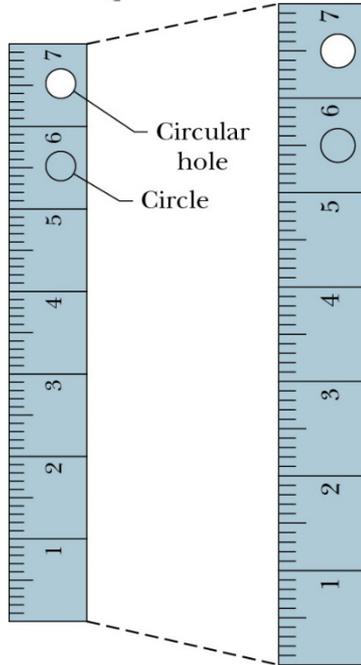
Mit der zugeführten Energie können sich die Atome etwas weiter als gewöhnlich voneinander entfernen und den federartigen interatomaren Kräften, die jeden Festkörper Zusammenhalten, entgegenwirken. Da sich die Wechselwirkung zwischen Atome im Metall von der Wechselwirkung zwischen Atome im Glas unterscheidet, dehnen sich der Deckel und der Behälter unterschiedlich.

Das Phänomen nennt sich die **Wärmeausdehnung** oder **thermische Ausdehnung**

Längenausdehnung



$T = T_0$



$T > T_0$

Erhöht sich die Temperatur eines Metallstabs der Länge L um einen Betrag ΔT , so nimmt seine Länge um den Betrag

$$\Delta L = L\alpha\Delta T$$

zu.

Die Konstante α bezeichnet man als (linearen) Längenausdehnungskoeffizienten.

Die Einheit von α ist „eins pro Grad“ bzw. „eins pro Kelvin“. Der Wert von α ist materialabhängig.

Die Wärmeausdehnung eines Festkörpers entspricht einer dreidimensionalen Vergrößerung (Länge, Breite, Dicke).

Material	α ($10^{-6}/K$)	Material	α ($10^{-6}/K$)
Eis	51	Stahl	11
Blei	29	Glas	9
Aluminium	23	Quarzglas	3,2
Messing	19	Diamant	1,2
Kupfer	17	Invar	0,7

Volumenausdehnung

Da sich alle Dimensionen eines Festkörpers mit der Temperatur ausdehnen, muss sich auch das Volumen dieses Körpers ausdehnen. Für Fluide ist die Volumenausdehnung sogar der einzig sinnvolle Ausdehnungsparameter.

Erhöht sich die Temperatur eines Festkörpers oder eines Fluids vom Volumen V um einen Betrag ΔT , so nimmt auch das Volumen zu und zwar um

$$\Delta V = V \beta \Delta T$$

wobei β der so genannte Volumenausdehnungskoeffizient des Festkörpers bzw. des Fluids ist.

Die beiden Koeffizienten für die Volumenausdehnung und die Längenausdehnung hängen bei einem Festkörper über die Beziehung $\beta = 3\alpha$ zusammen

Wasser verhält sich jedoch nicht so wie die meisten anderen Fluide. Oberhalb von ungefähr 4 °C dehnt sich Wasser bei einer Temperaturerhöhung wie erwartet aus. Zwischen 0 und 4 °C jedoch zieht Wasser sich mit zunehmender Temperatur zusammen. Bei ungefähr 4 °C durchläuft die Dichte von Wasser also ein Maximum. Bei allen anderen Temperaturen ist die Wasserdichte kleiner als dieser maximale Wert. Dieses besondere Verhalten von Wasser ist auch der Grund, weshalb ein See von oben nach unten zufriert und nicht von unten nach oben.