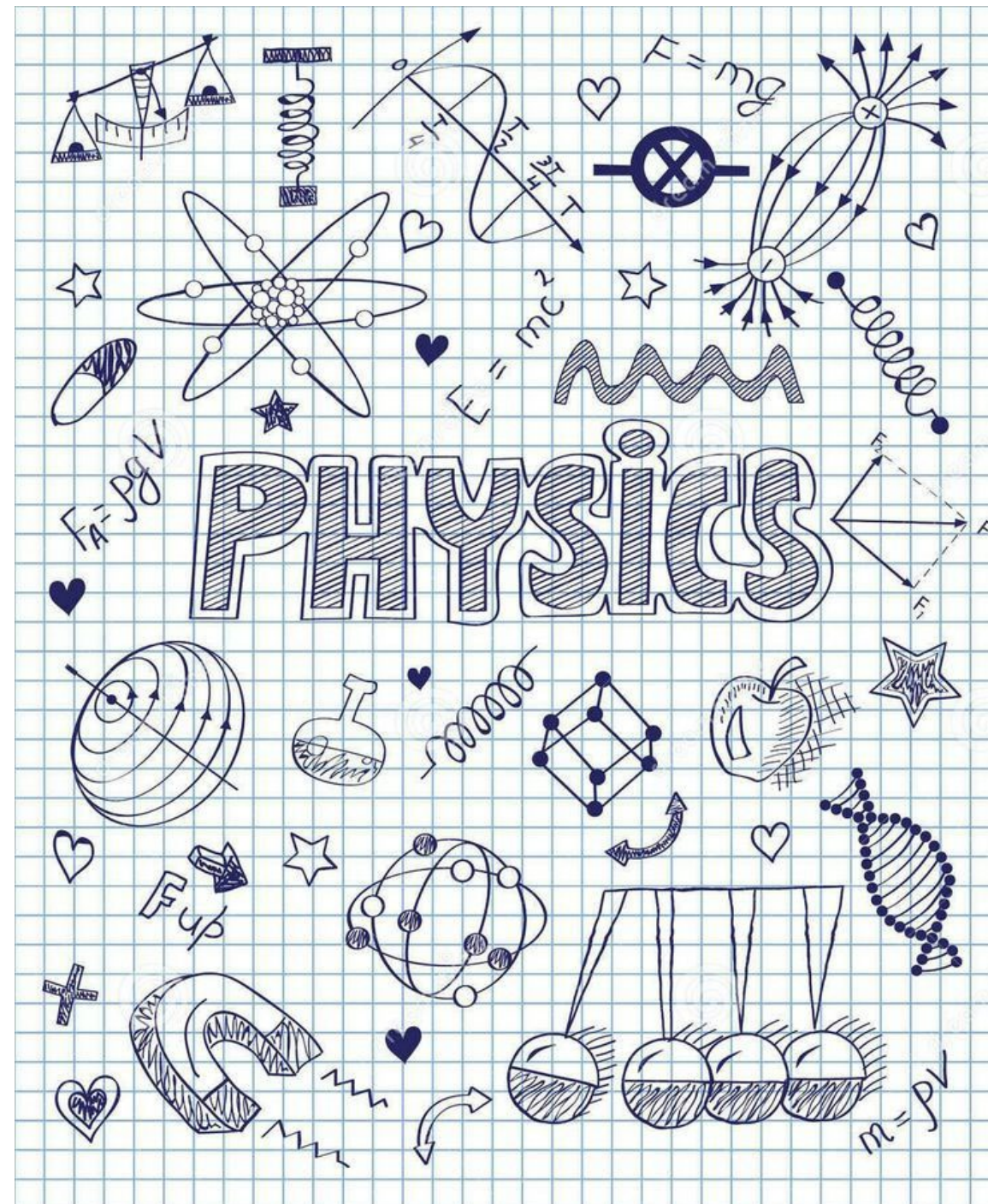


PHYSIK

Thermodynamik

Temperatur und Wärme

Prof. Dr.-Ing. Tatsiana Malechka



Thermodynamik

- Thermodynamik und Kinetische Gastheorie
 - Geschwindigkeitsverteilung
 - Wärme und 0. Hauptsatz Thermodynamik
 - Temperaturskalen und Fixpunkte
 - Thermische Ausdehnung und Messung der Temperatur
 - Ideales Gasgesetz
-
- Innere Energie
 - 1. Hauptsatz der Thermodynamik
 - Wärmekapazität
 - Reales Gas

Thermodynamik

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

1 mol

$3 \times 6,08 \cdot 10^{23}$

6×10^{23}



18 ml Water



22.4 l Air



55.9 g Iron

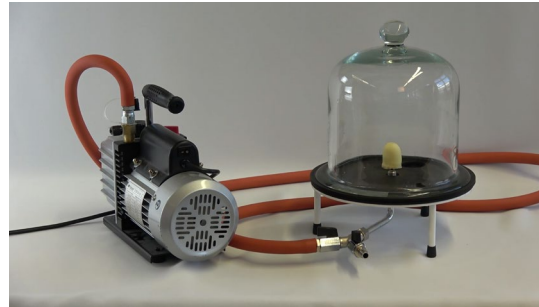
- $3 \times \text{ca. } 10^{23}$ Gleichungen (Newtonsche Mechanik) werden benötigt, um $\vec{r}(t) = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ – Ort aller Teilchen – zu bestimmen → unmöglich!
- Welche Beschreibungen sind möglich?
 - **Makroskopische Beschreibung** - Beschreibung eines thermodynamischen Systems (im therm. Gleichgewicht) mit makroskopisch messbaren Größen, den sog. thermodynamischen Zustandsgrößen, unabhängig von der Stoffart und davon, wie der Zustand erreicht wurde.
 - **Temperatur (T), Druck (p), Volumen (V), Energie**
 - **Mikroskopische Beschreibung** - Beschreibung eines thermodynamischen Systems mit statistischen Methoden der klassischen Mechanik (Statistische Mechanik, kinetische Theorie der Wärme)
 - **Wahrscheinlichkeitsaussagen** für mikroskopische Größen wie z.B. Geschwindigkeit der Teilchen und Energie der Teilchen
 - **Mittelwerte** von mikroskopischen Größen, wie z.B. Teilchengeschwindigkeit oder Energie pro Teilchen

Thermodynamik

Thermodynamik (Wärmelehre) = Beschreibt die funktionalen Zusammenhänge der makroskopischen Größen p , V , T , E_{kin}



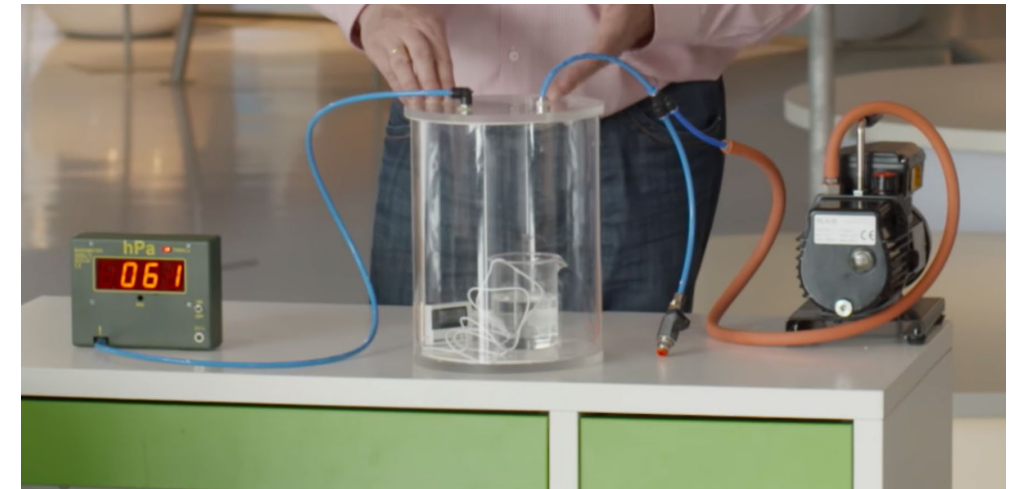
Quelle: <https://experimentis-shop.de/physikspielzeug-a-z/goethe-barometer-wetterglas>



Quelle: <https://www.youtube.com/watch?v=kLf3sNoDV-k>



Quelle: <https://naturesraincoats.com/leidenfrost-effect/>



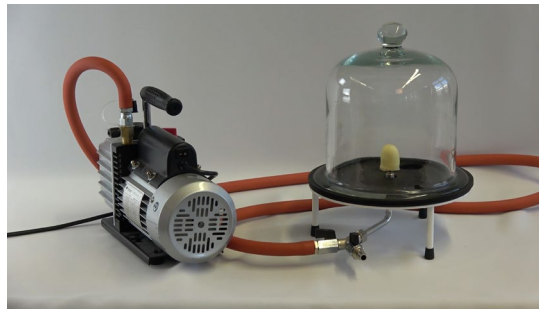
Quelle: <https://www.youtube.com/watch?v=eIFh4GYRSQA/>

Kinetische Gastheorie

Kinetische Gastheorie = Beschreibt die mechanischen Eigenschaften wie **Geschwindigkeit** und **Energie** der Teilchen, bzw. deren Mittelwerte und führt die thermischen Eigenschaften (T , p) darauf zurück



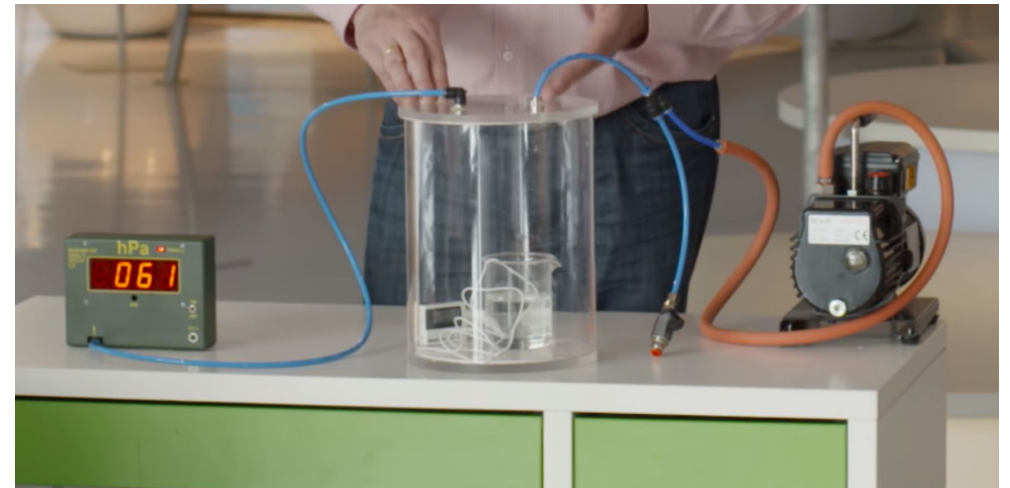
Quelle: <https://experimentis-shop.de/physikspielzeug-a-z/goethe-barometer-wetterglas>



Quelle: <https://www.youtube.com/watch?v=kLf3sNoDV-k>



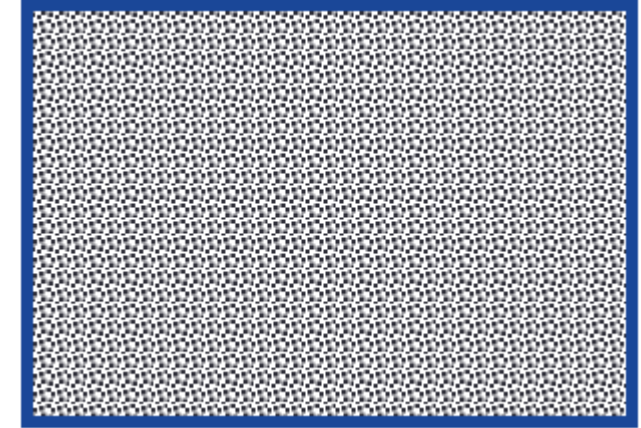
Quelle: <https://naturesraincoats.com/leidenfrost-effect/>



Quelle: <https://www.youtube.com/watch?v=eIFh4GYRSQA/>

Kinetische Energie von Gasen

- Durchschnittliche kinetische Energie: $\overline{E_{kin,1}} = \frac{m}{2} \overline{v_1^2} = \frac{m}{2} (\overline{v_{x,1}^2} + \overline{v_{y,1}^2} + \overline{v_{z,1}^2})$
- "Isotrop" bezeichnet im Allgemeinen die Gleichförmigkeit von Eigenschaften in allen Richtungen $\rightarrow \overline{v_{x,1}^2} = \overline{v_{y,1}^2} = \overline{v_{z,1}^2}$
- $\overline{E_{kin,1}} = \frac{3m}{2} \overline{v_{x,1}^2}$
- Mit Hilfe der statistischen Methoden wird $\overline{v_{x,1}^2} = \frac{1}{m\beta}$ bestimmt (ohne Herleitung)
- $\overline{E_{kin,1}} = \frac{3m}{2} \overline{v_{x,1}^2} = \frac{3m}{2} \cdot \frac{1}{m\beta} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{\beta}$
- Gesetz der idealen Gase (empirisch): $\overline{E_{kin,1}} = \frac{3}{2} k_B T$, wobei k_B - Boltzmann-Konstante
- $\overline{E_{kin,1}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{\beta} = \frac{3}{2} k_B T \rightarrow \beta = \frac{1}{k_B T}$ – Statistical / thermodynamical definition of the temperature



Kinetische Gastheorie

Die durchschnittliche kinetische Energie der Moleküle eines idealen Gases direkt proportional zur absoluten Temperatur ist.

$$\langle E_{kin,1} \rangle = \overline{E_{kin,1}} = \frac{3}{2} \cdot k_B \cdot T$$

Je höher die Temperatur, desto schneller bewegen sich gemäß der kinetischen Gastheorie die Moleküle im Durchschnitt.

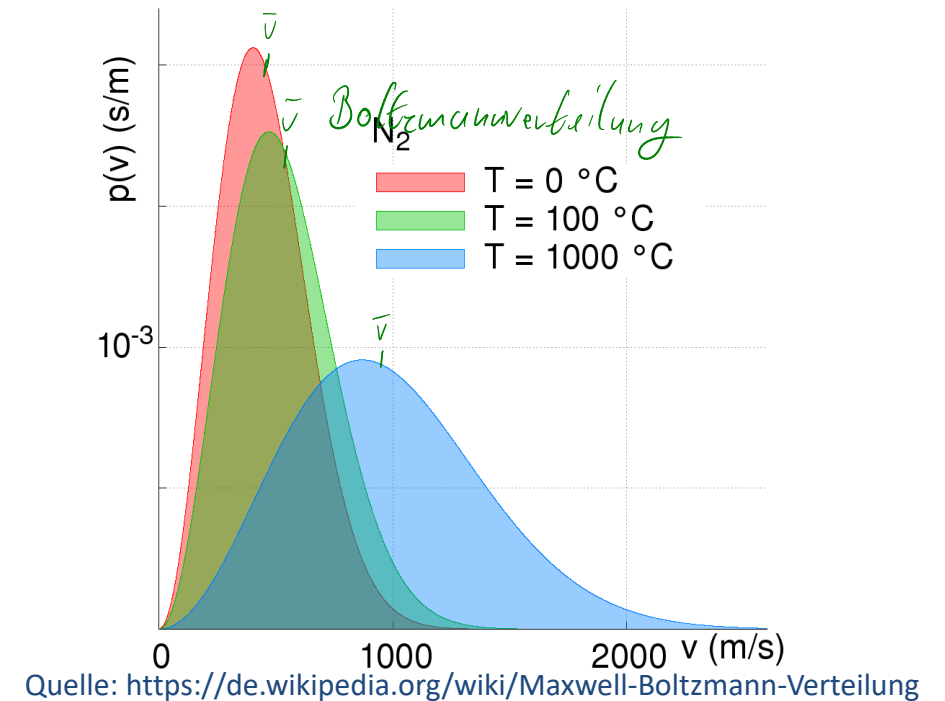
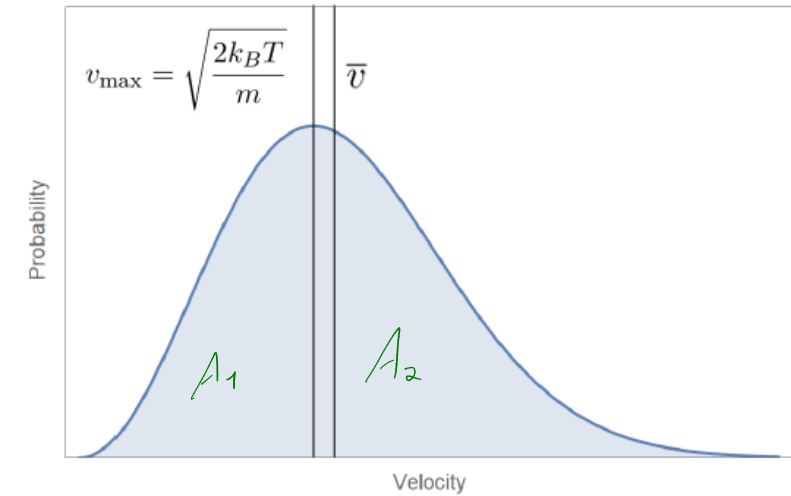
Geschwindigkeitsverteilung

Maxwell-Boltzmann Verteilung:

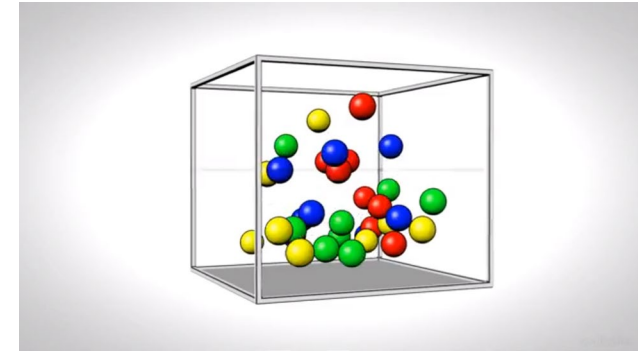
- Gasatome haben unterschiedliche Geschwindigkeiten.
- Berechnung der Verteilung mit Hilfe statistischer Methoden

Es gilt (ohne Beweis):

$$p(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2k_B T}}$$



Wärme und 0. Hauptsatz



Quelle: <http://www.cg-physics.org/index.php/de/waermelehre/teilchenmodell>

Wärme

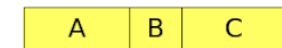
- **Wärme** = Energie, die von System 1 auf System 2 übergeht wegen einer Temperaturdifferenz ΔT
- **Wärme** ist ungeordnete Molekülbewegung. **Wärmeenergie** ist kinetische Energie dieser Bewegung. **Temperatur** ist ein lineares Maß für den Mittelwert der kinetischen Energie der ungeordneten Molekülbewegung.

Ausgangszustand:



$$T_A > T_B = T_C$$

Gleichgewichtszustand:



$$T_A = T_B = T_C$$

0. Hauptsatz der Thermodynamik:

Befinden sich zwei Körper im thermischen Gleichgewicht mit einem dritten, so stehen sie auch untereinander in thermischen Gleichgewicht. Sie haben in diesem Fall die gleiche Temperatur.

Viele Eigenschaften können von der Temperatur abhängen (z.B. Leitfähigkeit, Volumen, Länge, Farbe, etc.) und zur Temperaturmessung dienen. Dies nutzt man für die Temperaturskala

$$T_1 = 0^\circ\text{C} \quad T_2 = 100^\circ\text{C} \quad \Delta T = 100\text{K}$$

$$T_1 = 273\text{K} \quad T_2 = 373\text{K} \quad \Delta T = 100\text{K}$$

Temperaturskalen und Fixpunkte

$$\Delta T = 100^\circ\text{C} = 100\text{K}$$

Zum Festlegen einer Temperaturskala benötigt man zwei Temperatur-Referenzpunkte und eine Einteilung in Untereinheiten

Drei Temperaturskalen in Gebrauch:

- Celsius-Skala T_C in $^\circ\text{C}$ $T_C = \frac{5}{9} \cdot (T_F - 32)^\circ\text{C}$
- Fahrenheit-Skala T_F in $^\circ\text{F}$ $T = (T_C + 273)\text{K}$
- Kelvin-Skala T in K

Es gilt:

- Temperatur nach oben unbegrenzt
- Temperatur nach unten begrenzt \longrightarrow Def.: $T = 0\text{K}$

Celsius nutzte *Eiswasser* und *kochendes Wasser* als Referenzpunkte für die Temperatur

Fahrenheit nutzte als Referenzpunkte: *Salzlake-Eis-Wasser Mischung* = 0°F ($-17,8^\circ\text{C}$) \rightarrow Körpertemperatur eines gesunden Menschen = 96°F (36°C)

Kelvin-Skala: $T = 0\text{K} \rightarrow$ *absoluter Temperatur-nullpunkt*, keine Bewegung, es gibt keine Temperatur $< 0\text{K}$; $T = 273,16\text{K}$: Tripelpunkt¹ des Wassers (gleichzeitig fest, flüssig und gasförmig)

¹ [Tripelpunkt – Wikipedia](#)

Thermische Ausdehnung

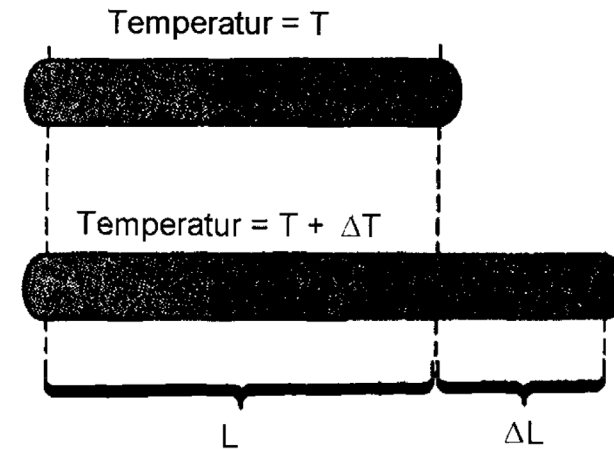
Längenausdehnung:

$$l_1 - l_0 = \Delta l = \alpha l_0 \Delta T$$

$$l = l_0(1 + \alpha \Delta T)$$

linearer Ausdehnungskoeffizient = thermischer
Längenausdehnungskoeffizient

Material	α , [K ⁻¹]
Eis	$51 \cdot 10^{-6}$
Eisen	$12 \cdot 10^{-6}$
Kupfer	$17 \cdot 10^{-6}$
Glas	$3 \cdot 10^{-6}$
Aluminium	$23 \cdot 10^{-6}$



Quelle: <https://www.montanstahl.com/de/magazin/rohrleitungen-edelstahl-vielfaeltiger-einsatz/>

Thermische Ausdehnung

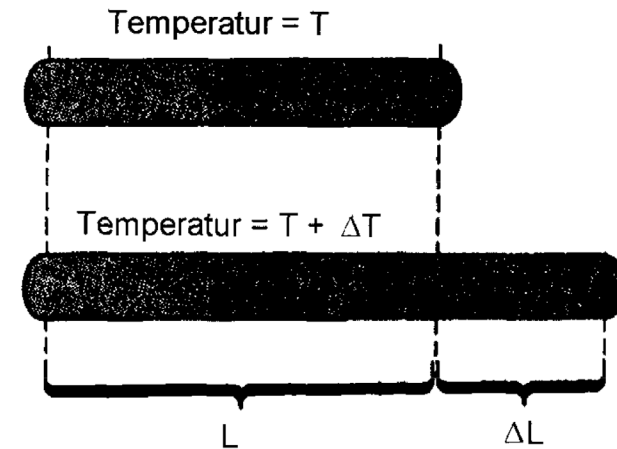
Längenausdehnung:

$$l_1 - l_0 = \Delta l = \alpha l_0 \Delta T$$

$$l = l_0(1 + \alpha \Delta T)$$

linearer Ausdehnungskoeffizient = thermischer
Längenausdehnungskoeffizient

Material	α , [K ⁻¹]
Eis	$51 \cdot 10^{-6}$
Eisen	$12 \cdot 10^{-6}$
Kupfer	$17 \cdot 10^{-6}$
Glas	$3 \cdot 10^{-6}$
Aluminium	$23 \cdot 10^{-6}$



Quelle: Tipler Physik s. 549

Thermische Ausdehnung und Messung der Temperatur

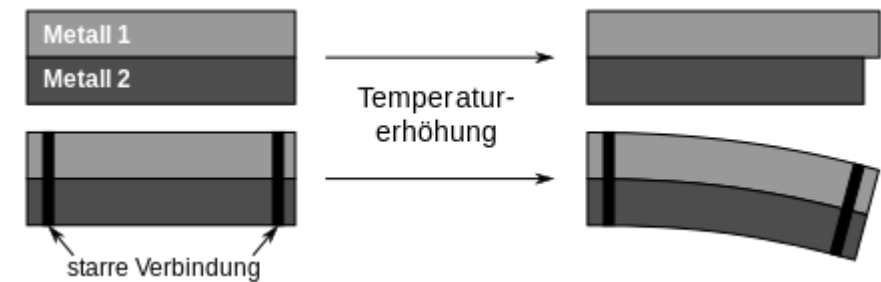
Längenausdehnung:

$$l_1 - l_0 = \Delta l = \alpha l_0 \Delta T \quad l = l_0(1 + \alpha T)$$

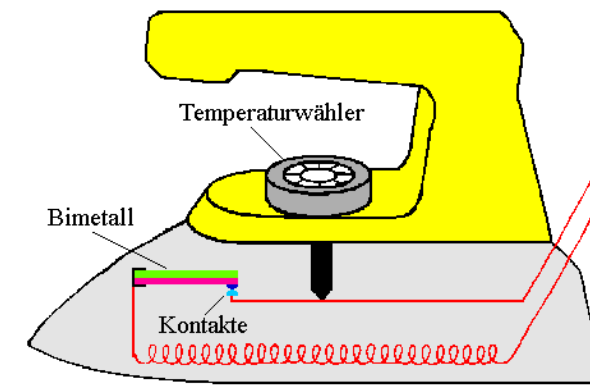
linearer Ausdehnungskoeffizient = thermischer
Längenausdehnungskoeffizient

Material	α , [K ⁻¹]
Eis	$51 \cdot 10^{-6}$
Eisen	$12 \cdot 10^{-6}$
Kupfer	$17 \cdot 10^{-6}$
Glas	$3 \cdot 10^{-6}$
Aluminium	$23 \cdot 10^{-6}$

Bimetallschalter



Quelle: <https://www.wikiwand.com/de/Bimetall>



Quelle: <https://www.leifiphysik.de/waermelehre/ausdehnung-bei-erwaermung/aufgabe/buegeleisen>

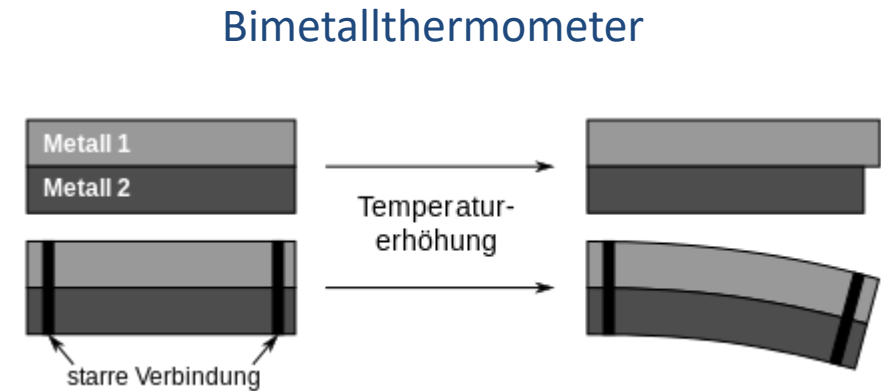
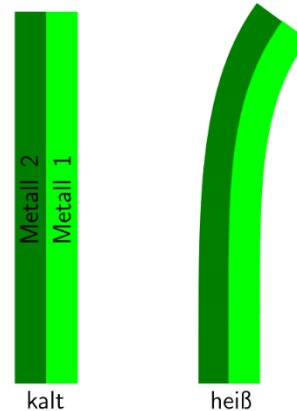
Thermische Ausdehnung und Messung der Temperatur

Längenausdehnung:

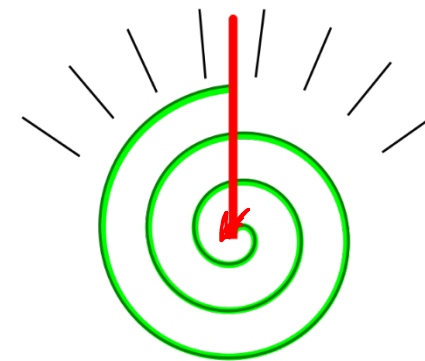
$$l_1 - l_0 = \Delta l = \alpha l_0 \Delta T \quad l = l_0(1 + \alpha T)$$

linearer Ausdehnungskoeffizient = thermischer Längenausdehnungskoeffizient

Material	α , [K ⁻¹]
Eis	$51 \cdot 10^{-6}$
Eisen	$12 \cdot 10^{-6}$
Kupfer	$17 \cdot 10^{-6}$
Glas	$3 \cdot 10^{-6}$
Aluminium	$23 \cdot 10^{-6}$



Quelle: <https://www.wikiwand.com/de/Bimetall>



Einfaches Thermometer



Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Bimetallthermometer>

Thermische Ausdehnung und Messung der Temperatur

Volumenausdehnung: Ausdehnung in Flüssigkeiten → Wie beim Festkörper aber in drei Raumrichtungen:

$$V = V_0(1 + \gamma T)$$

$$\Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot T$$

thermischer Volumenausdehnungskoeffizient

Material	γ , [K ⁻¹]
Aceton	$1,46 \cdot 10^{-3}$
Ethanol	$1,40 \cdot 10^{-3}$
Mineralöl	$0,7 \cdot 10^{-3}$
Quecksilber	$0,18 \cdot 10^{-3}$
Wasser (bei 100° C)	$0,782 \cdot 10^{-3}$
Wasser (bei 0° C)	$-0,068 \cdot 10^{-3}$



Haushaltsthermometer,
Alkoholfüllung

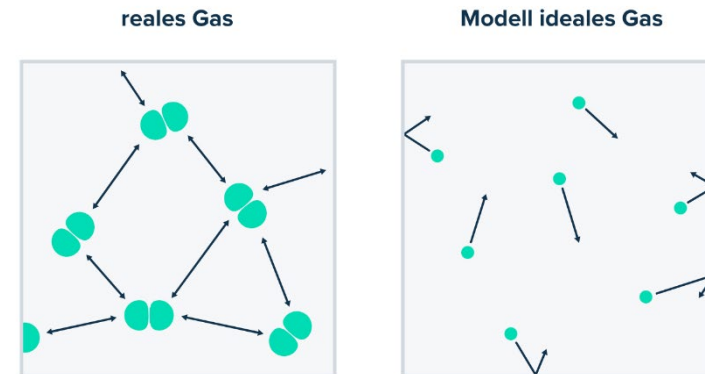
Quelle <https://de.wikipedia.org/wiki/F%C3%BCssigkeitsthermometer>

Ideales versus reales Gas

- Die Moleküle eines **idealen Gases** werden als Punktmassen angenommen. Ihr **Eigen volumen** wird dabei **vernachlässigt**. Außerdem können sie **nicht** miteinander **wechselwirken**. Ihre einzige Wechselwirkung sind **elastische Stöße** miteinander und mit den Gefäßwänden.
- Die Moleküle eines **reale Gase** haben eine Ausdehnung (sogenanntes **Eigen volumen**). Zudem können die Moleküle realer Gase miteinander **wechselwirken (wirken anziehende bzw. abstoßende Kräfte)**, wodurch unter anderem die Bildung von Aggregatzuständen möglich ist.

$$V = V_0(1 + \gamma T)$$

Für Volumenausdehnung eines Gases nicht anwendbar!



Ideales Gasgesetz

Für ein ideales Gas gilt die allgemeine Gasgleichung:

$$p \cdot V = k_B \cdot N \cdot T$$

in Kelvin!

Bolzmann-Konstante $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$

Anzahl der Teilchen

Mit $N_A = \text{Avogadrokonstante}$ = Anzahl der Atome oder Moleküle in einem Mol des jeweiligen Materials.

$$N = n \cdot N_A$$

Anzahl der Mole = Stoffmenge

Avogadro-Zahl

$$N_A = 6,023 \cdot 10^{23} 1/\text{mol}$$

Ideales Gasgesetz oder Zustandsgleichung für ein ideales Gas

$$p \cdot V = n \cdot N_A \cdot k_B \cdot T = n \cdot R \cdot T$$

$1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$

allgemeine Gaskonstante:

$$R = 8,31 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}}$$

Ideales Gasgesetz

Das ideale Gasgesetz als Verhältnisgleichung:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

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

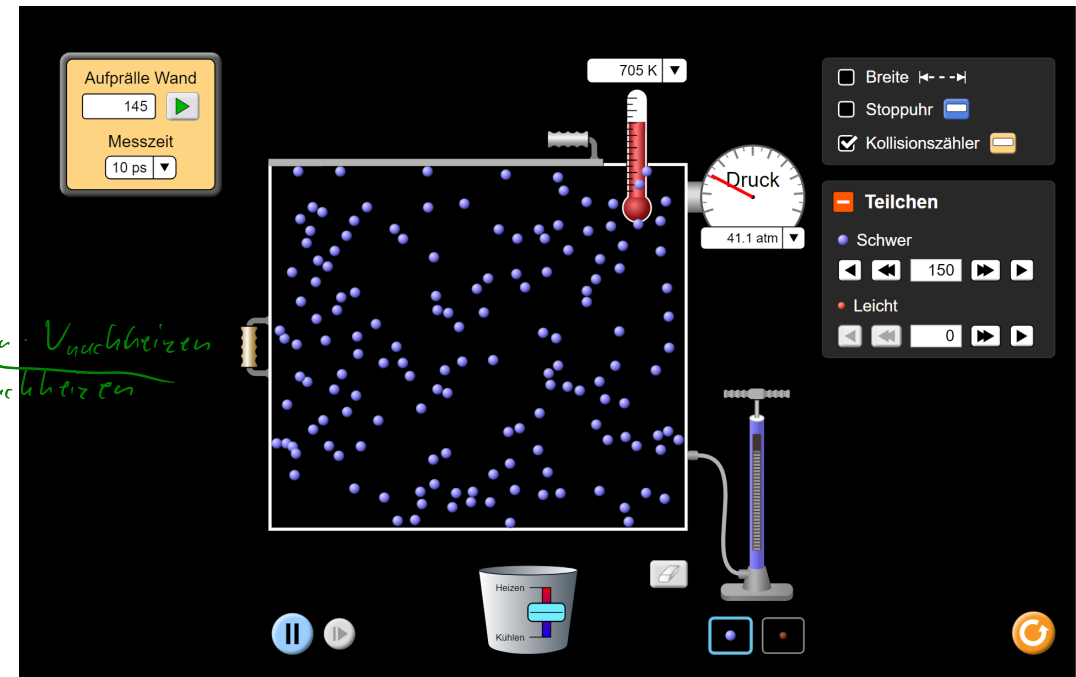
$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$$

wichtig!

const

$\frac{p_{vorheizen} \cdot V_{vorheizen}}{T_{vorheizen}} = \frac{p_{nachheizen} \cdot V_{nachheizen}}{T_{nachheizen}}$

Die Zustandsgleichung des idealen Gases ist bei genügend hohen Temperaturen für alle Gase gültig. Luft verhält sich bei Umgebungsbedingungen annähernd wie ein ideales Gas.



Quelle: https://phet.colorado.edu/sims/html/gases-intro/latest/gases-intro_de.html

Ideales Gasgesetz

Das Gasgesetz wurde aus unterschiedlichen Beobachtungen entwickelt.

Boyle-Mariotte

Boyle 1662; Mariotte 1676

$$p \sim \frac{1}{V} \quad , \text{ wenn } T = \text{const}$$

$$p \cdot V = \text{const}$$

Gay-Lussac

Charles, 1780s; Gay-Lussac, 1802

①

$$V \sim T \quad , \text{ wenn } p = \text{const}$$

$$\frac{V}{T} = \text{const}$$

Amontons

Amontons, ca. 1700; Gay-Lussac, 1802

③

$$p \sim T \quad , \text{ wenn } V = \text{const}$$

$$\frac{p}{T} = \text{const}$$

④ später

$$p \cdot V \sim T$$

$$V \sim n$$

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$



https://de.wikipedia.org/wiki/Robert_Boyle
Robert Boyle
(1627-1691)



https://en.wikipedia.org/wiki/Edme_Mariotte
Edme Mariotte
(1620-1684)



https://en.wikipedia.org/wiki/Jacques_Charles
Jacques Charles
(1746-1823)



https://de.wikipedia.org/wiki/Joseph-Louis_Gay-Lussac
Joseph Gay-Lussac
(1778-1850)



https://de.wikipedia.org/wiki/Guillaume_Amontons
Guillaume Amontons
(1663-1705)

Zusammenfassung zum Thema Temperatur

- **Wärme** ist ungeordnete Molekülbewegung. **Wärmeenergie** ist kinetische Energie dieser Bewegung. **Temperatur** ist ein lineares Maß für den Mittelwert der kinetischen Energie der ungeordneten Molekülbewegung.

0. Hauptsatz der Thermodynamik:

- Befinden sich zwei Körper im thermischen Gleichgewicht mit einem dritten, so stehen sie auch untereinander in thermischen Gleichgewicht. Sie haben in diesem Fall die gleiche Temperatur.
- Zum Festlegen einer Temperaturskala benötigt man zwei **Temperatur- Referenzpunkte** und eine Einteilung in Untereinheiten.

- Längenausdehnung: $\frac{\Delta l}{l} = \alpha \Delta T$ Thermischer Längenausdehnungskoeffizient: α

- Volumenausdehnung: $\frac{\Delta V}{V} = \gamma \Delta T$ Thermischer Volumenausdehnungskoeffizient: γ

- Ideales Gasgesetz: $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$ $\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$ $R = 8,31 \frac{J}{K \cdot mol}$

Wärmekapazität

Es gilt: Trotz Wärmezufuhr kann $\Delta T = 0$ sein.

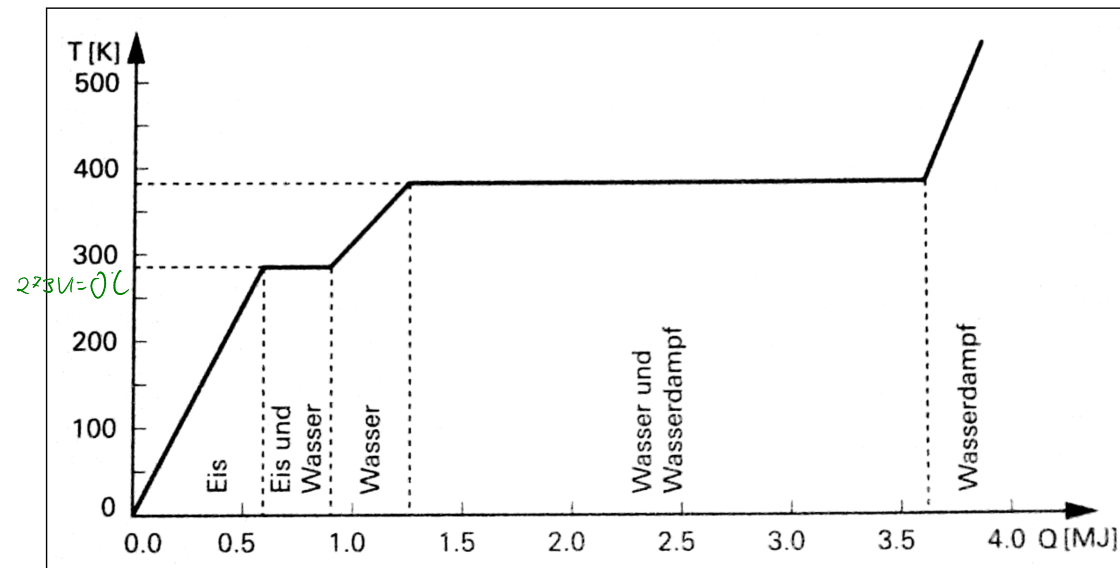
Grund: **Phasenübergang**

Beispiele: Flüssig \rightarrow gasförmig

Fest \rightarrow flüssig

Die zur Umwandlung notwendige Wärme = **latente Wärme**

z.B. Schmelzwärme Q_S , Verdampfungswärme Q_V



Quelle: http://www.agertsch.ch/Physik_150/td_kap2_150.pdf

Wärmekapazität:	L_S , [J·kg ⁻¹]	L_V , [J·kg ⁻¹]
Blei	24.700	858.000
Kupfer	205.000	4.726.000
Wasser	333.000	2.257.000

$$Q_S = L_s \cdot m$$

$$Q_V = L_v \cdot m$$

Innere Energie

- **Wärme** (eine Form der Energie mit der **Einheit [J]**) fließt vom Körper mit höherer Temperatur zu dem Körper mit niedrigerer Temperatur
- **Wärme** in atomaren **Gasen**: **Bewegungsenergie** der Teilchen;
- **Wärme** im **Festkörper**: **Schwingungsenergie** der Teilchen;
- **Wärme** in **Flüssigkeiten**: **beides**.
- **1. Hauptsatz der Thermodynamik: Erhaltung der Energie**

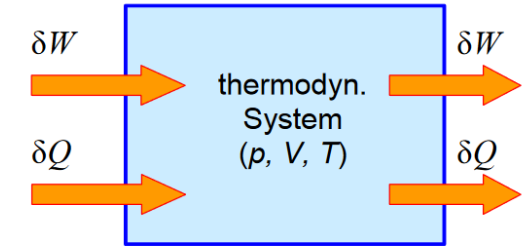
Die **Energie** eines **isolierten** Systems bleibt **konstant**: Jedes System besitzt eine innere Energie U . Diese kann sich nur durch den Transport von Energie in Form von Arbeit W und/oder Wärme Q über die Grenze des Systems ändern.

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

Konsequenz: Es gibt keine Maschine, die ständig Arbeit verrichtet, ohne gleichzeitig Energie aufzunehmen = kein **Perpetuum mobile 1. Art**

1. Hauptsatz der Thermodynamik

- In einem geschlossenen System, welches sich in thermischem Kontakt mit seiner Umgebung befindet kann sich die Innere Energie vom einem Zustand 1 (p_1, V_1, T_1) in einen Zustand 2 (p_2, V_2, T_2) ändern, durch:
 - a) Zufuhr oder Entzug von Energie, indem am oder vom System **Arbeit** verrichtet wird (Ausdehnungsarbeit, Reibungsarbeit, elektrische Arbeit, chemische Arbeit).
 - b) Zufuhr oder Entzug von **Wärme** (Energietransport aufgrund eines Temperaturunterschieds, der dazu erforderlich ist).
- Im Innern des Systems kann von sich aus keine Energie erzeugt oder vernichtet werden.



$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

ΔU = Änderung der inneren Energie,
 ΔQ = Wärmeaustausch,
 ΔW = Arbeit

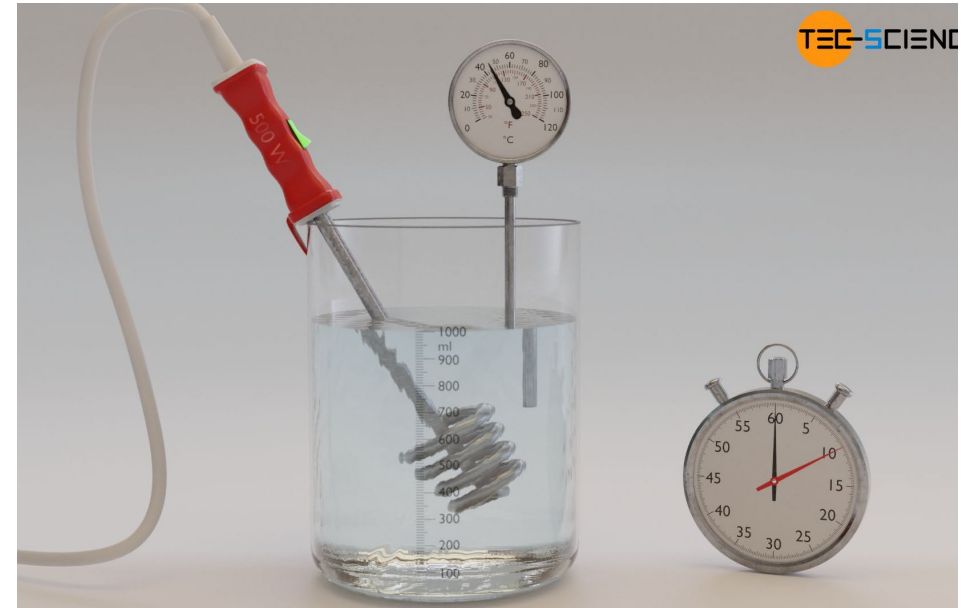
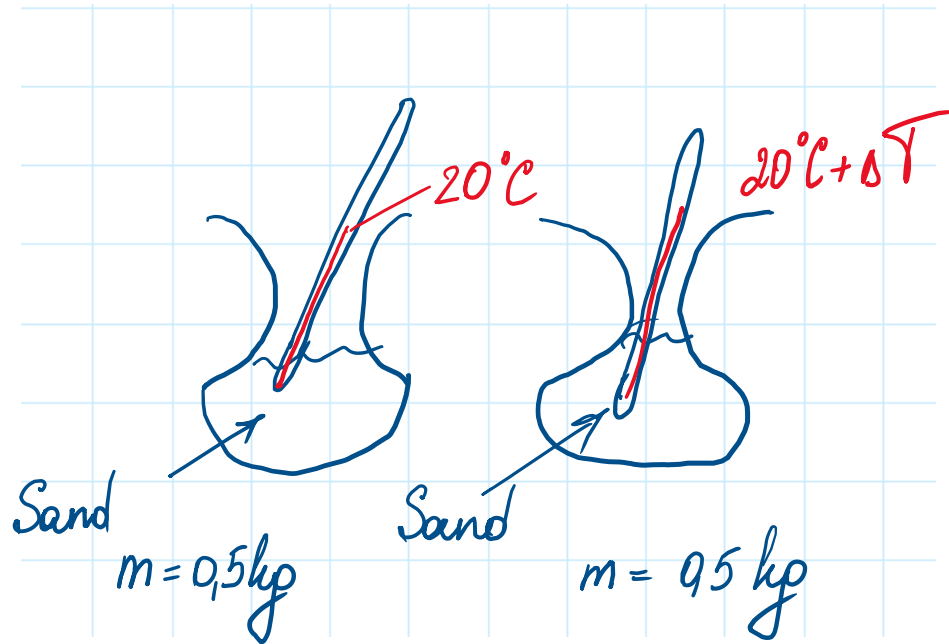
Arbeit am System $\rightarrow +$
Arbeit vom System $\rightarrow -$

Wärme wird zugeführt $\rightarrow +$
Wärme wird abgeführt $\rightarrow -$

Änderung der inneren Energie

Eine Änderung der inneren Energie ΔU kann durch **Verrichtung von Arbeit** an einem Körper oder durch **Übertragung von Wärme** auf einen Körper erfolgen.

- **Zufuhr der Wärme ΔQ** \rightarrow (meist) Temperaturerhöhung ΔT
- Zufuhr von gleicher Wärmemengen ΔQ kann zu unterschiedlichen ΔT führen $\rightarrow \Delta T = f(\text{Wärmekapazität } C)$



Quelle: <https://www.tec-science.com/de/thermodynamik-waermelehre/waerme/spezifische-waermekapazitaet-definition/>

Wärmekapazität

Eine Änderung der inneren Energie ΔU kann durch **Verrichtung von Arbeit** an einem Körper oder durch **Übertragung von Wärme** auf einen Körper erfolgen.

- **Zufuhr der Wärme** $\Delta Q \rightarrow$ (meist) Temperaturerhöhung ΔT
- Zufuhr von gleicher Wärmemengen ΔQ kann zu unterschiedlichen ΔT führen $\rightarrow \Delta T = f(\text{Wärmekapazität } C)$

Die Wärmemenge, um die Temperatur eines Körpers mit Masse m um 1°C zu erhöhen, ist die **Wärmekapazität C [J/K]**

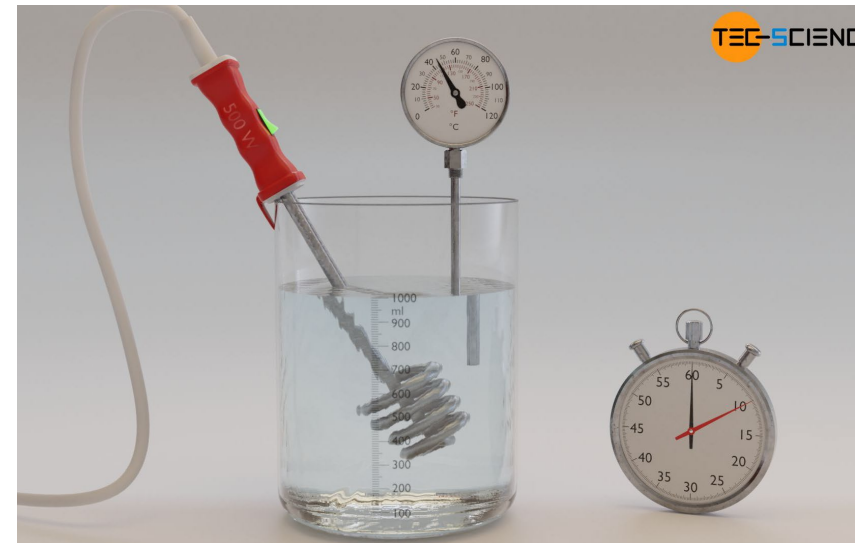
Spezifische Wärmekapazität: $c_m = \frac{C}{m}$

Molare Wärmekapazität: $c_{mol} = \frac{C}{n}$

1 mol = $6,034 \times 10^{23}$ Teilchen (Avogadro-Zahl)

Masse von 1 mol einer Substanz = **Molmasse**

$$Q = C\Delta T = mc_m\Delta T = nc_{mol}\Delta T$$



Quelle: <https://www.tec-science.com/de/thermodynamik-waermelehre/waerme/spezifische-waermekeapazitat-definition/>

Wärmekapazität

Eine Änderung der inneren Energie ΔU kann durch **Verrichtung von Arbeit** an einem Körper oder durch **Übertragung von Wärme** auf einen Körper erfolgen.

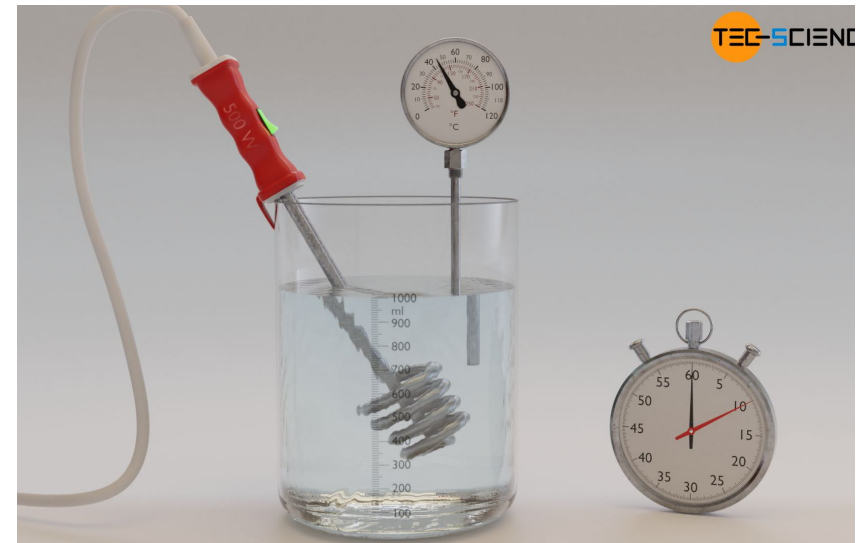
- **Zufuhr der Wärme** $\Delta Q \rightarrow$ (meist) Temperaturerhöhung ΔT
- Zufuhr von gleicher Wärmemengen ΔQ kann zu unterschiedlichen ΔT führen $\rightarrow \Delta T = f(\text{Wärmekapazität } C)$

Die Wärmemenge, um die Temperatur eines Körpers mit Masse m um 1°C zu erhöhen, ist die **Wärmekapazität C [J/K]**

Spezifische Wärmekapazität: $c_m = \frac{C}{m}$

Molare Wärmekapazität: $c_{mol} = \frac{C}{n}$

$$Q = C\Delta T = mc_m\Delta T = nc_{mol}\Delta T$$



Quelle: <https://www.tec-science.com/de/thermodynamik-waermelehre/waerme/spezifische-waermekeapazitat-definition/>

Wärmekapazität

Eine Änderung der inneren Energie ΔU kann durch **Verrichtung von Arbeit** an einem Körper oder durch **Übertragung von Wärme** auf einen Körper erfolgen.

- **Zufuhr der Wärme** $\Delta Q \rightarrow$ (meist) Temperaturerhöhung ΔT
- Zufuhr von gleicher Wärmemengen ΔQ kann zu unterschiedlichen ΔT führen $\rightarrow \Delta T = f(\text{Wärmekapazität } C)$

Die Wärmemenge, um die Temperatur eines Körpers mit Masse m um 1°C zu erhöhen, ist die **Wärmekapazität C [J/K]**

Spezifische Wärmekapazität: $c_m = \frac{C}{m}$

Molare Wärmekapazität: $c_{mol} = \frac{C}{n}$

$$Q = C\Delta T = mc_m\Delta T = nc_{mol}\Delta T$$

Wärmekapazität:	$c_m, [\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}]$	$c_{mol}, [\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}]$
Blei	128	26,4
Silber	256	24,9
Kupfer	386	24,5
Aluminium	900	24,3
Wasser	4182	75,2
Ethanol	2430	111
Luft	1010	29,07
Helium	5190	12,9

Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Spezifische_W%C3%A4rmekapazit%C3%A4t

Reales Gas

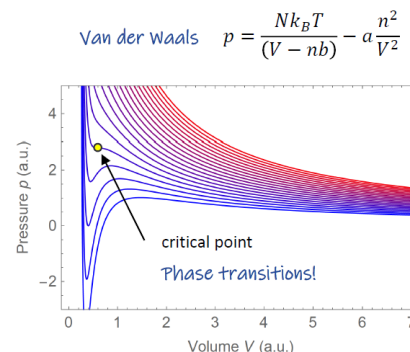
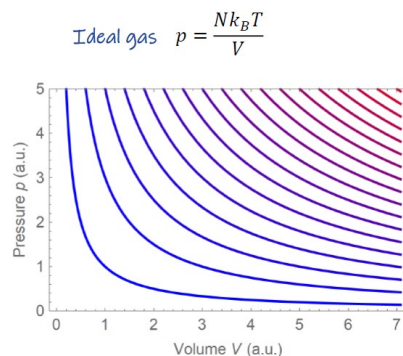
- Die meisten Gase verhalten sich bei normalen Drücken praktisch wie das ideale Gas.
- Von diesem Verhalten weichen sie bei steigendem Druck oder sinkender Temperatur immer stärker ab

$$p \cdot V = n \cdot N_A \cdot k_B \cdot T = n \cdot R \cdot T$$

Gaskonstante
 $R = 8,31 \frac{J}{K \cdot mol}$

$$\left(p + \frac{an^2}{V^2} \right) \cdot (V - bn) = n \cdot R \cdot T$$

a- Kohäsionsdruck-(parameter)
 b- Kovolumen



Van-der-Waals-Gleichung an einer Hauswand in Leiden Quelle:
<https://de.wikipedia.org/wiki/Van-der-Waals-Gleichung>



Van-der-Waals-Gleichung

Zusammenfassung

Spezifische Wärmekapazität:

$$c_m = \frac{C}{m}$$

Molare Wärmekapazität:

$$c_{mol} = \frac{C}{n}$$

$$Q = C\Delta T = mc_m\Delta T = nc_{mol}\Delta T$$

$$Q_S = L_s \cdot m$$

$$Q_V = L_v \cdot m$$

Mittlere kinetische Energie eines Gasteilchens (ideales Gas):

$$\langle E_{1,kin} \rangle = \overline{E_{1,kin}} = \frac{3}{2} \cdot k_B \cdot T = \frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{1}{2} m \cdot (\overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2})$$

Zustandsgleichung des idealen Gases:

$$p \cdot V = n \cdot N_A \cdot k_B \cdot T = n \cdot R \cdot T$$

Gaskonstante

$$R = 8,31 \frac{J}{K \cdot mol}$$

Zustandsgleichung des realen Gases = Van-der-Waals-Gleichung

$$\left(p + \frac{an^2}{V^2}\right) \cdot (V - bn) = n \cdot R \cdot T$$