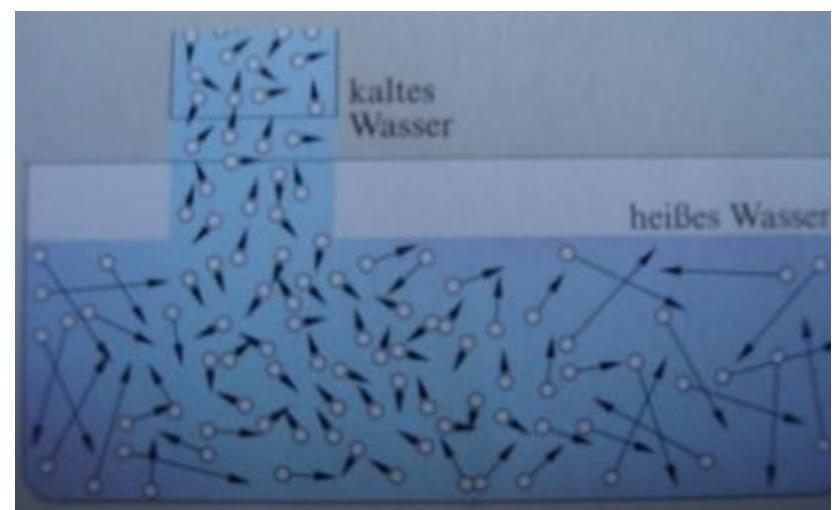


# Hauptsätze der Thermodynamik (1)

## ”0.” Hauptsatz

- Kontakt von Körpern **unterschiedlicher** Temperatur führt zu einem **Temperaturausgleich**
- Wärme **fließt** dabei immer **vom wärmeren zum kälteren** Körper
- Ausgleich findet **selbstständig** statt!
  - Keine zusätzliche Energie notwendig!



# Hauptsätze der Thermodynamik (2)

## 1. Hauptsatz (Energiesatz)

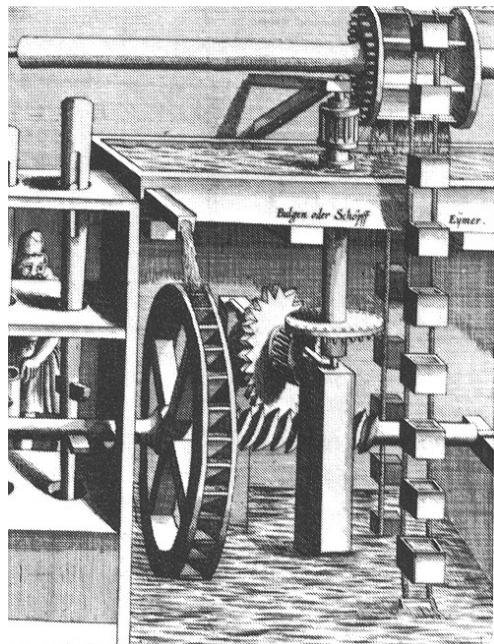
Gültigkeit der **Energieerhaltung** auch unter Einbeziehung der inneren Energie

- Die **Gesamtenergie** eines **abgeschlossenen Systems** ist konstant

$$\Delta E = 0$$

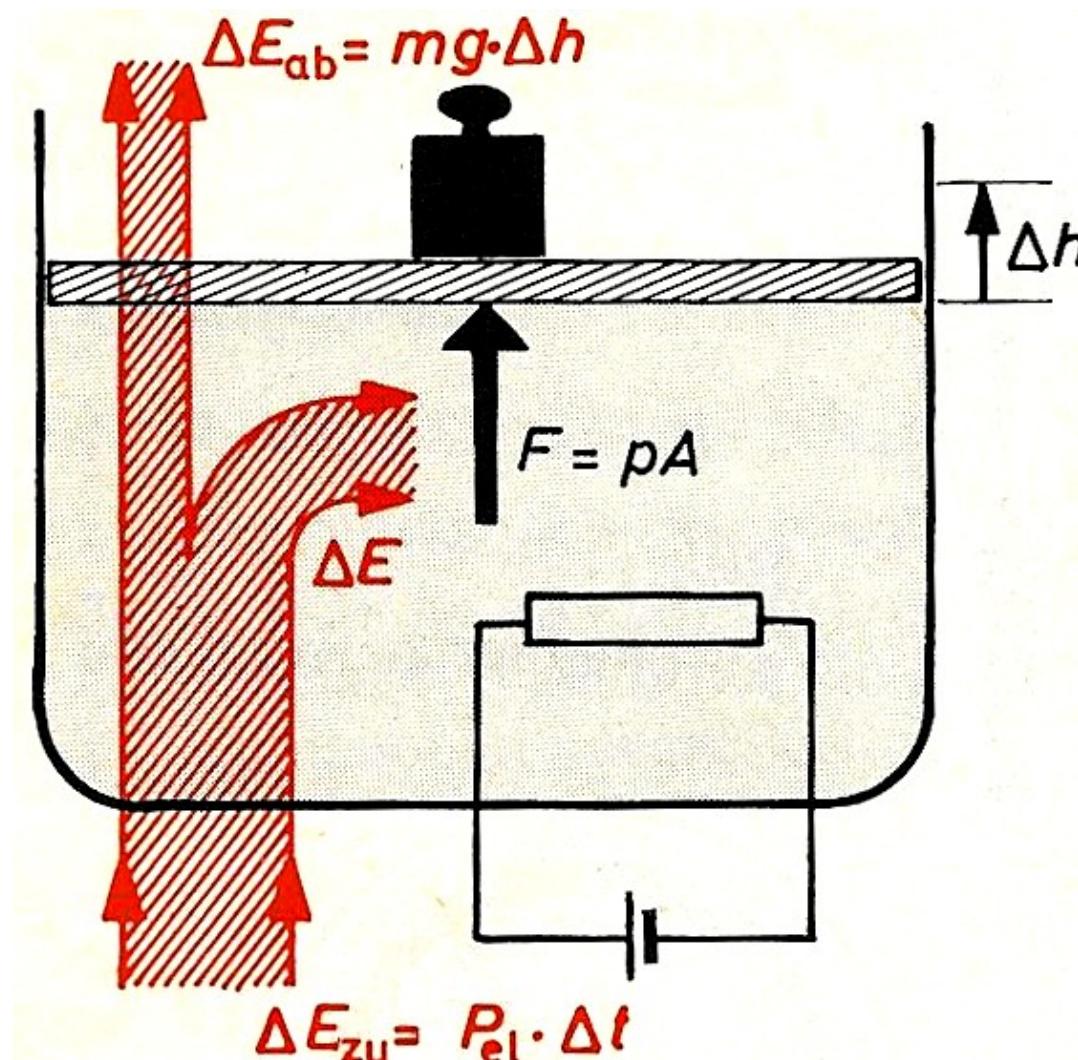
- Die **Veränderung** der Energie eines **nicht abgeschlossenen Systems** ist die Differenz der dem System zugeführten und vom System abgegebenen Energie

$$\Delta E = \Delta E_{zu} - \Delta E_{ab}$$



# Hauptsätze der Thermodynamik (3)

Beispiel: nicht abgeschlossenes System



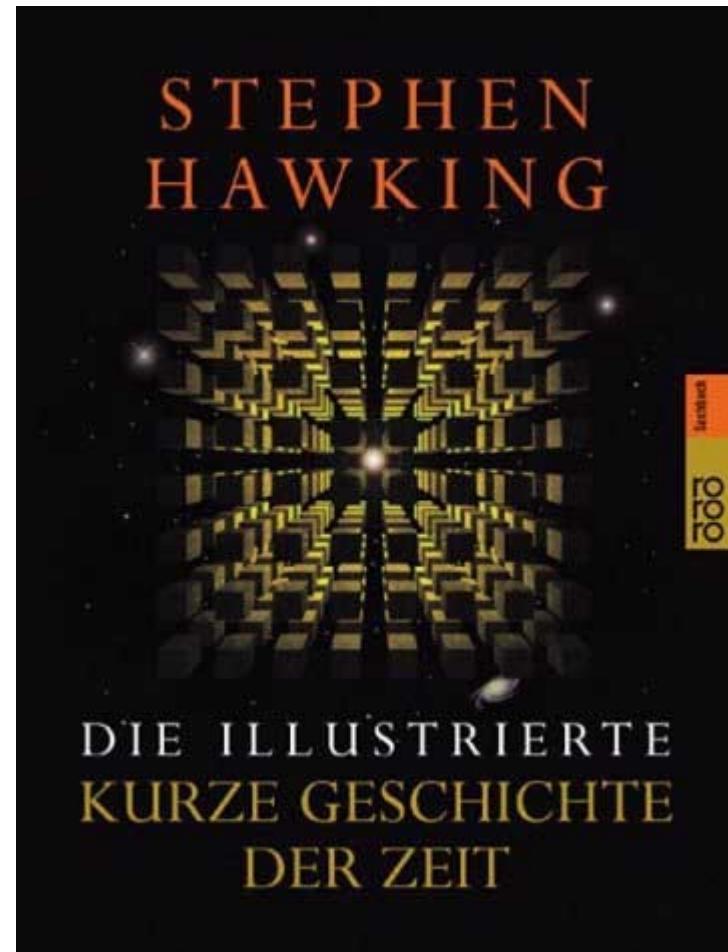
Nur für den schulinternen Gebrauch!

# Hauptsätze der Thermodynamik (4)

## 2. Hauptsatz (Version 1)

- **Wärme geht von selbst nie von einem Körper niedriger Temperatur auf einen Körper mit höherer Temperatur über**
- **Umgekehrter Fall wäre kein Widerspruch zum ersten Hauptsatz**
- **Kühlschrank?**
  - Kühlt **nicht von selbst!**
  - **Arbeit** (Kompressor) zum Kühlen erforderlich!

# Hauptsätze der Thermodynamik (5)



# Hauptsätze der Thermodynamik (6)

## Hausübung

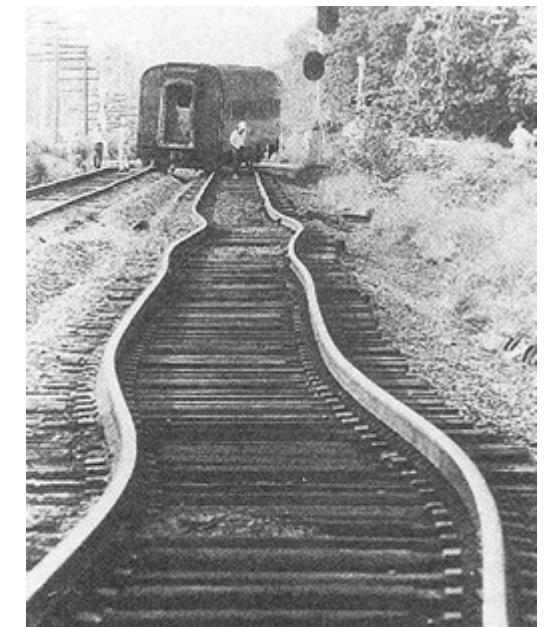
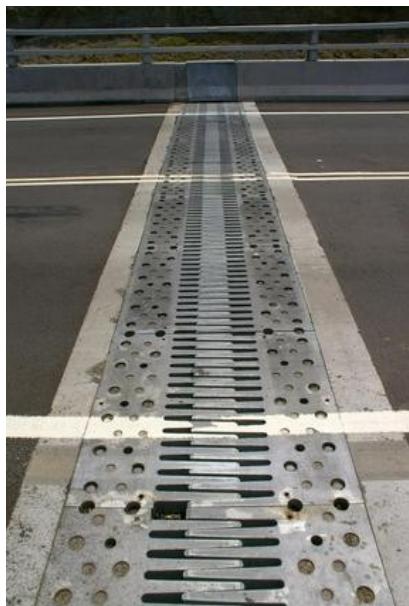
- 1) In welchen Einheiten wird  
    a) Energie                  b) Temperatur  
gemessen?
  
- 2) Wie nennt man Stöße, bei denen  
    a)  $\Delta U = 0$               b)  $\Delta U \neq 0$   
ist?

# Wärmeausdehnung (1)

## Ursache

- Thermische Schwingungen der Moleküle werden bei zunehmender Temperatur stärker
  - Moleküle / Atome brauchen mehr Platz
- Materie dehnt sich bei steigender Temperatur i. A. aus
- Beispiele:
  - Ölpipelines, Freileitungen, Ausdehnungsgefäß
  - Thermometer, Dehnungsfugen (Brücken, ....)

# Wärmeausdehnung (2)



Nur für den schulinternen Gebrauch!

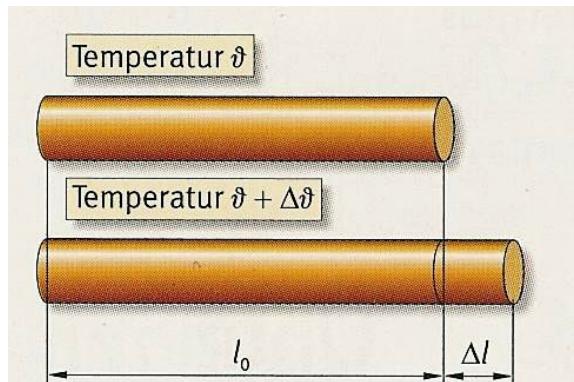
# Wärmeausdehnung (3)

## Längenausdehnung

- Vorwiegend Festkörper
- Längenausdehnungskoeffizient  $\alpha$ :

Es gilt:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta \vartheta} \quad [\alpha] = \frac{1}{K}$$



$\Delta l$ ..... Längenausdehnung

$\Delta \vartheta$ ..... Temperaturänderung

$l_0$  ..... Länge bei 0°C

# Wärmeausdehnung (4)

## Längenausdehnungskoeffizient $\alpha$

- Ist in der Regel **selbst temperaturabhängig**
- Für **eingeschränkte** Temperaturbereiche **lineare Näherung** meist ausreichend genau

$$\text{Es gilt dann: } l = l_0 + \Delta l = l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta \vartheta)$$

- Beispiele für  $\alpha$  [1/K] (0 -100°C):

Aluminium	$2,4 \cdot 10^{-5}$
Stahl	$1,1 \cdot 10^{-5}$
Stahlbeton	$1,4 \cdot 10^{-5}$
Glas	$9,1 \cdot 10^{-6}$
Quarzglas	$5,1 \cdot 10^{-7}$
Platin	$9,1 \cdot 10^{-6}$

# Wärmeausdehnung (5)

## Berücksichtigung der Längenausdehnung in der Technik

- **Durchhang** von Freileitungen im Sommer
- **Dehnungsfugen** und Rollenlagerung im Brückenbau
- **Aufschrumpfen** von Bauteilen
- **Materialkombinationen**
  - Stahlbeton nur möglich weil Stahl und Beton annähernd gleiche thermische Längenausdehnung
- Verlegung von **Eisenbahnschienen**
- ...

# Wärmeausdehnung (6)

## Volumausdehnung

- Würfel mit Kantenlänge  $l_0$

$$V_0 = l_0^3$$

$$V = V_0(1 + \gamma \Delta \vartheta)$$

$\Delta l$ ..... Längenausdehnung

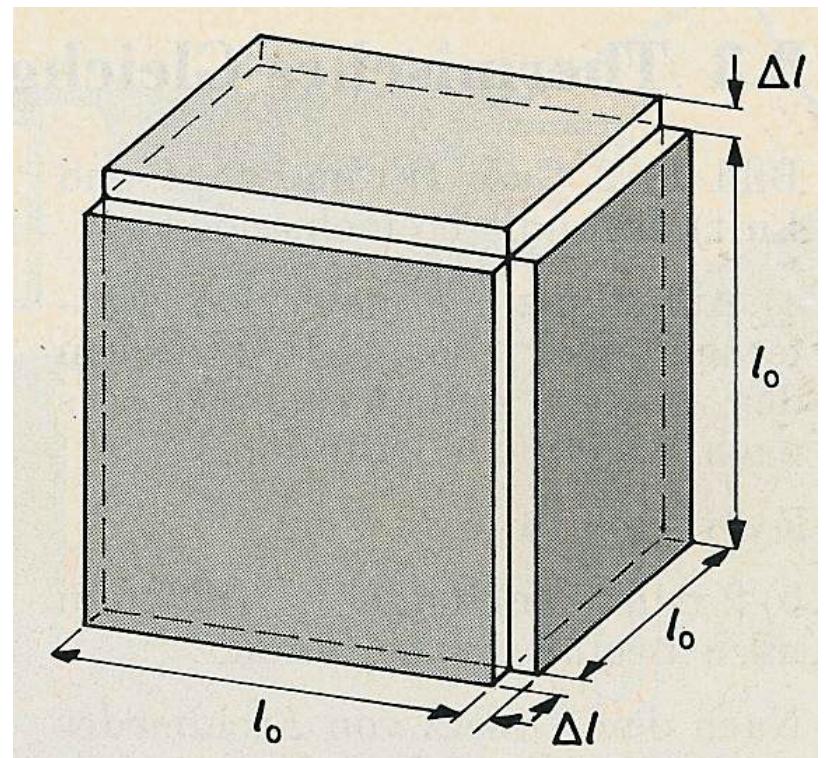
$\Delta \vartheta$ ..... Temperaturänderung

$V_0$  ..... Volumen bei 0°C

$l_0$  ..... Länge bei 0°C

$\gamma$ ..... Volumausdehnungskoeffizient

$$\gamma \approx 3 \cdot \alpha \quad [\gamma] = \frac{1}{K}$$



# Wärmeausdehnung (7)

## Volumensausdehnungskoeffizient $\gamma$

- Gilt auch für **Flüssigkeiten** und Gase
  - Bei **Gasen** zusätzlich **Druck** wichtig  
→ Kapitel: **Ideales Gas**
  - Bei **Flüssigkeiten ~100 mal größer** als bei Festkörpern
    - Flüssigkeitsthermometer
- Masse bleibt konstant → **Dichteänderung**

$$\varrho_0 = \frac{m}{V_0} ; \quad \varrho = \frac{m}{V} = \frac{m}{V_0(1 + \gamma \Delta \vartheta)}$$

$$\Rightarrow \varrho = \frac{\varrho_0}{(1 + \gamma \Delta \vartheta)}$$

Nur für den schulinternen Gebrauch!

# Wärmeausdehnung (8)

Beispiele Volumausdehnungskoeffizient  $\gamma$  in  $K^{-1}$  ( $20^\circ C$ )

Ethanol .....  $1,1 \cdot 10^{-3}$

Benzin.....  $1,0 \cdot 10^{-3}$

Quecksilber.....  $1,8 \cdot 10^{-4}$

Heizöl.....  $9,5 \cdot 10^{-4}$

Wasser ( $20^\circ C$ ).....  $2,1 \cdot 10^{-4}$

Wasser ( $50^\circ C$ ).....  $4,6 \cdot 10^{-4}$

Wasser ( $90^\circ C$ ).....  $7,0 \cdot 10^{-4}$

## Anomalie des Wassers

- **Größte Dichte bei  $4^\circ C$** 
  - In der Natur von außerordentlicher Bedeutung!

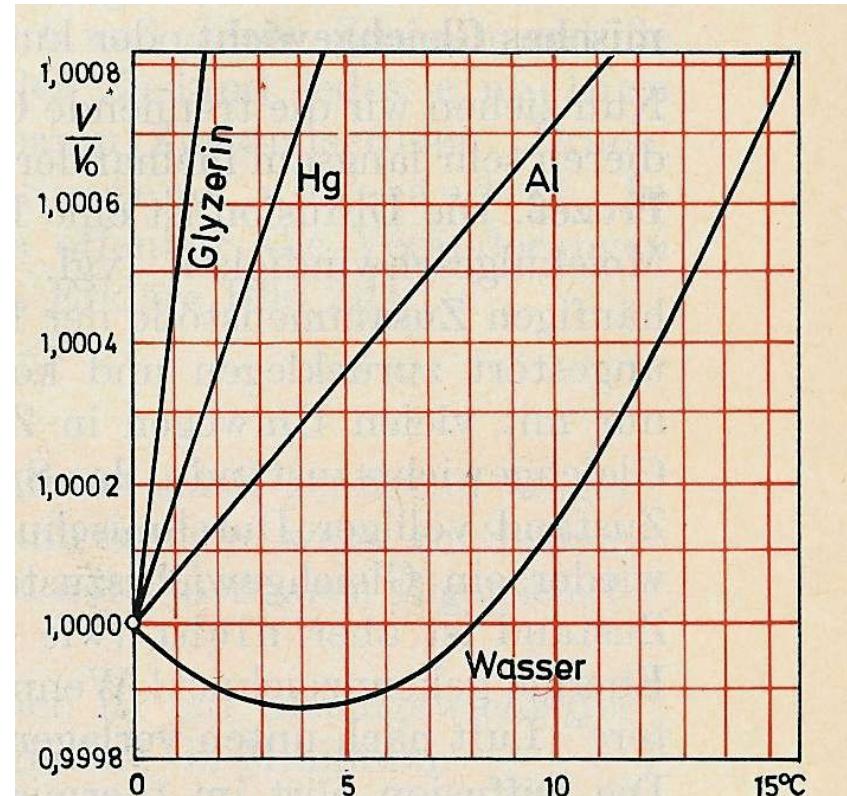


Bild 4: Relatives Volumen einiger Stoffe und Anomalie des Wassers

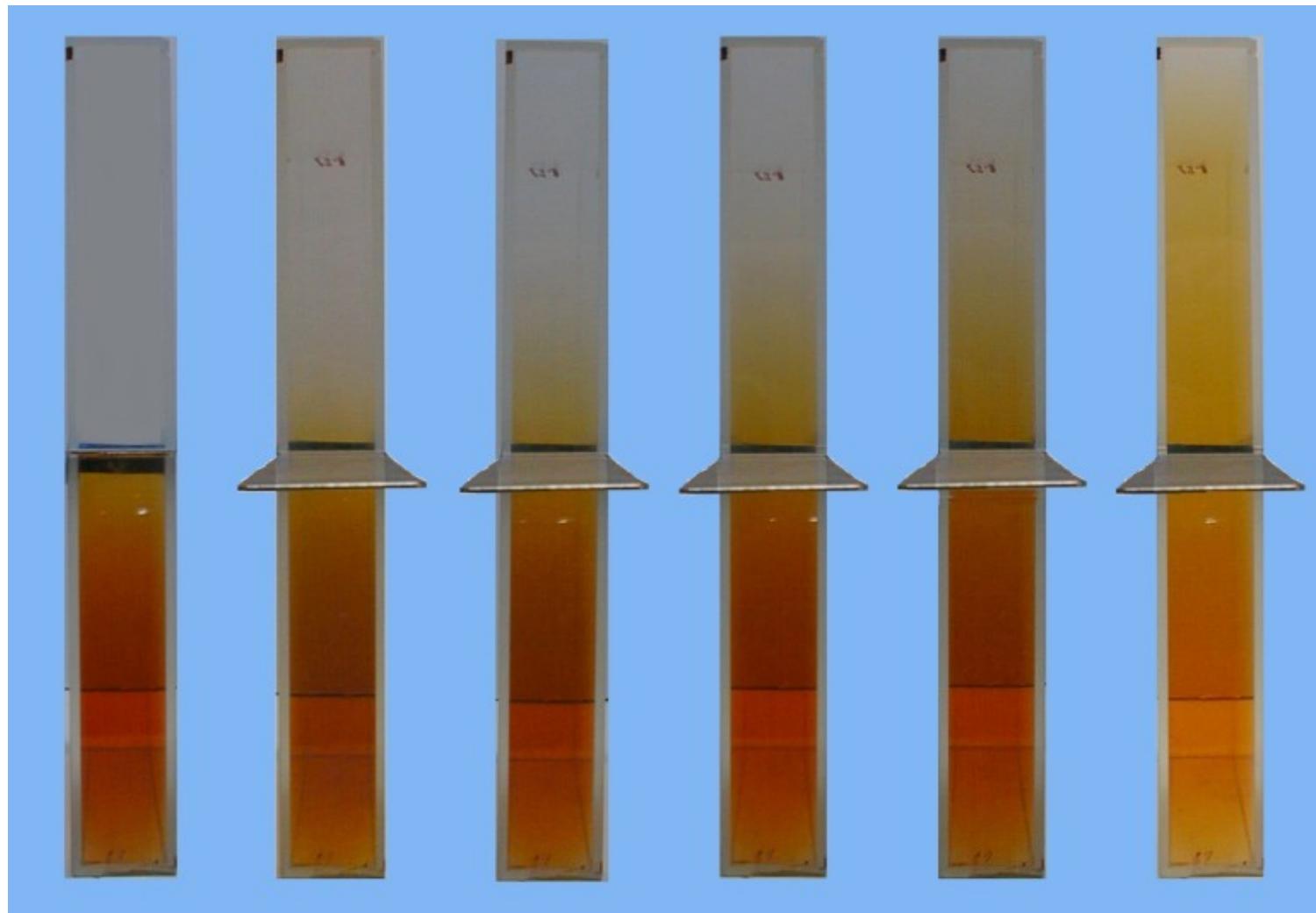
# Wärmeausdehnung (9)

## Hausübung

- 1) Eine **1,5km** lange, aus Stahl gebaute Fernwärmeleitung über die bei einem Kraftwerk Wärme für Heizzwecke ausgekoppelt wird, soll bei einer Dampftemperatur von **380°C** betrieben werden. Berechne die Längenausdehnung ( $\alpha_{Stahl} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , Ausgangstemperatur **20°C**)
- 2) a) Ein Stahl-Treibstofftank fasst lt. Hersteller bei **10°C** **80l**. Welches Volumen kann bei **36°C** aufgenommen werden? (Hinweise: kann berechnet werden, als ob der Tank ein Stahlklotz wäre;  $\gamma_{Stahl} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  ).  
b) Wenn der Tank bei **10°C** randvoll mit Diesel gefüllt wurde, wie viel rinnt bei **36°C** über? ( $\gamma_{Diesel} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  ).

# Thermodynamisches Gleichgewicht (1)

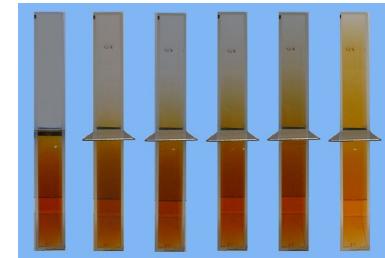
Beispiel: Diffusion von Bromdampf



Nur für den schulinternen Gebrauch!

# Thermodynamisches Gleichgewicht (2)

Beispiel: **Diffusion** von Bromdampf



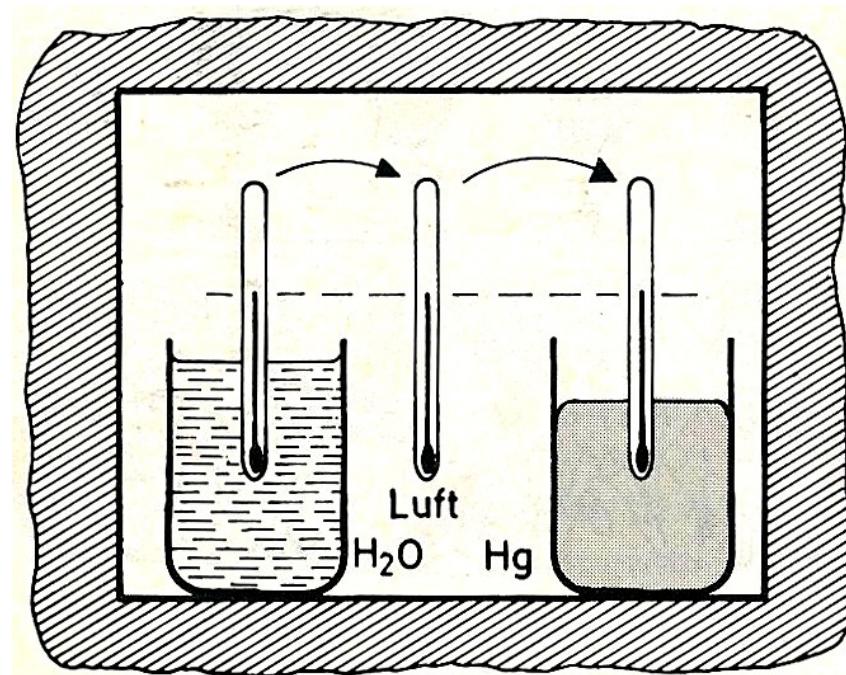
- Bromdampf und Luft **diffundieren ineinander**
  - System verändert sich → **Thermodynamischer Prozess**
- **Diffusion** → Folge der **Molekularbewegung**
- Nach längerer **Zeit** → Zustand **völliger Durchmischung**
  - **Stabiler Zustand**, aber **nicht** Zustand geringster potentieller Energie (Bromdampf schwerer als Luft!)
- Diffusion geht weiter
  - Aber **gleich** viele Bromteilchen diffundieren **nach oben** wie **nach unten** → **Thermodynamisches Gleichgewicht**

# Thermodynamisches Gleichgewicht (3)

Beispiel: Temperaturen im **abgeschlossenen System**

Temperaturen im **abgeschlossenen System** gleichen sich nach gewisser Zeit an

=> **Thermodynamisches (thermisches) Gleichgewicht**



# Thermodynamisches Gleichgewicht (4)

## Thermodynamisches (thermisches) Gleichgewicht

Jedes **abgeschlossene System** von sehr vielen Teilchen nimmt nach **genügend langer Zeit** einen **thermischen Gleichgewichtszustand** an. Er ist dann erreicht, wenn am System **keine messbaren Veränderungen** mehr auftreten, wenn also alle messbaren Eigenschaften (**alle Zustandsgrößen**) **unverändert** bleiben.

- Das **thermische Gleichgewicht** eines **großen Kollektivs** **ständig bewegter** Teilchen ist ein **Gleichgewicht** **gegensätzlicher Veränderungen**, die einander **kom pensieren**.
- Das **stabile Gleichgewicht** eines Systems **ruhender Teilchen** ist ein **Gleichgewicht der Kräfte** an jedem einzelnen Teilchen; die **potentielle Energie** hat ein **Minimum**.

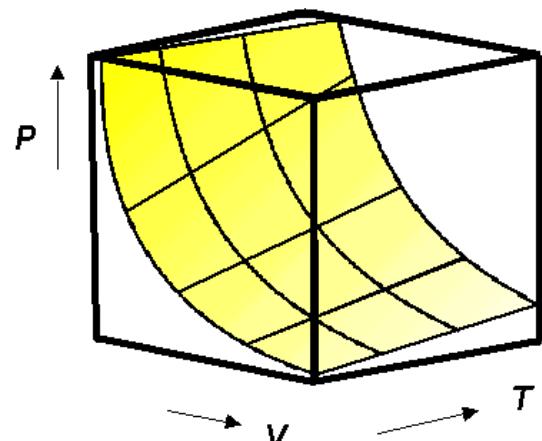


# Ideales Gas (1)

Was ist das ideale Gas?

**Idealisierte Modellvorstellung** eines realen Gases

- Gasteilchen mit **verschwindender Ausdehnung**
  - Volumen der Teilchen verschwindend gegen das Gasvolumen
- Gasteilchen **frei beweglich**
  - Zwischen den Teilchen **keine Molekülkräfte**
  - Elastische Stöße mit anderen Teilchen bzw. Systemwänden
- Gasteilchen **gleichartig**
- Gasteilchen gehorchen den Gesetzen der Mechanik



# Ideales Gas (2)

	Ideales Gas	Reales Gas
Molekül-durchmesser	Verschwindend klein	Klein gegen den mittleren Molekülabstand
Wechselwirkung zwischen den Gasteilchen	Keine (Auch Gravitation wird vernachlässigt)	Kaum wirksam (wegen der großen Molekülabstände)
Teilchenart	Gleichartig	Auch Mischungen möglich (z. B.: Luft)
Teilchenbewegung	Ungeordnet	Überwiegend ungeordnet  (aber auch Strömung)
Stöße (mit anderen Teilchen bzw. Wänden)	Rein elastisch	Überwiegend elastisch

## Ideales Gas (3)

Modell des idealen Gases stellt eine **starke Vereinfachung** dar!

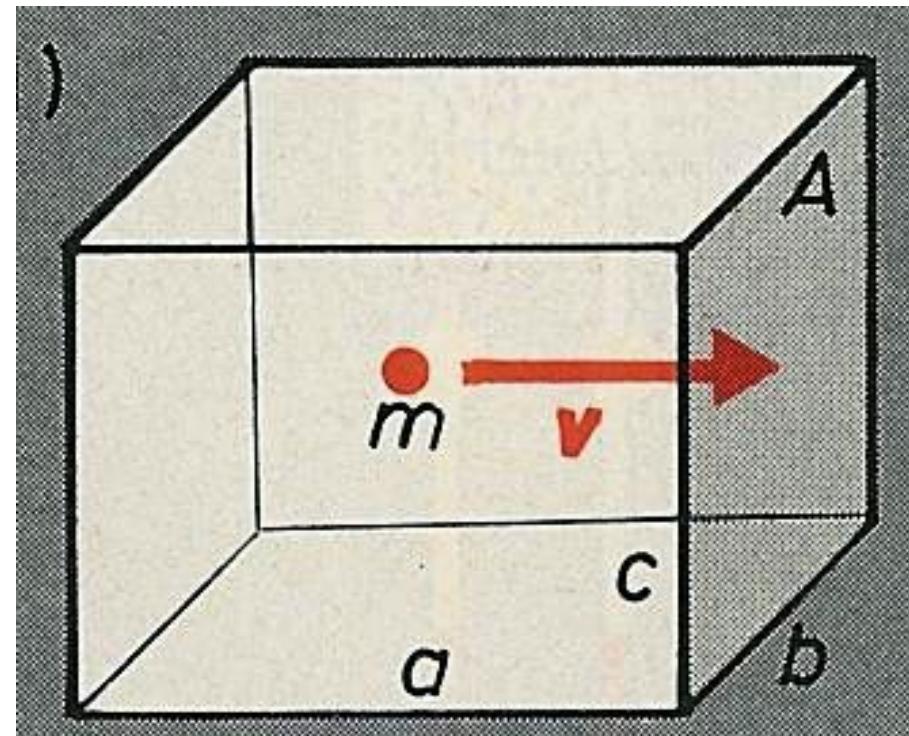
- Trotzdem werden dadurch viele **thermodynamische Prozesse von realen Gasen** mathematisch beschreibbar
- Anwendbarkeit auf reale Gase je nach Gasart von **Randbedingungen** abhängig
  - **Druck**
  - **Dichte**
  - **Temperatur**

# Ideales Gas (4)

## Gasdruck

Annahme: Einzelnes Molekül im Behälter

Masse  $m$ , Geschwindigkeit  $v$  (normal zu A)



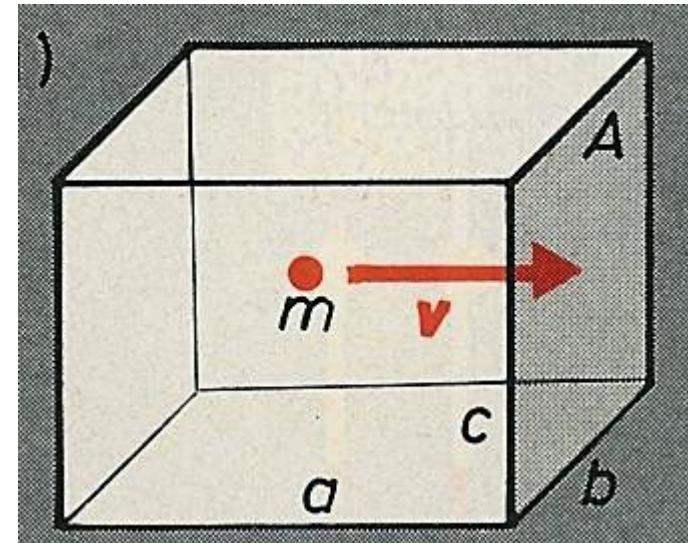
# Ideales Gas (5)

Elastischer Stoß mit der rechten Wand

- Impulsübertrag auf die Wand =  $2 \cdot m \cdot v$

Moleköl pendelt zwischen den Wänden

- In  $\Delta t$  zurückgelegter Weg =  $v \cdot \Delta t$
- Anzahl der Stöße in der Zeit in  $\Delta t$  mit der rechten Wand =  $v \cdot \Delta t / (2a)$



Gesamtimpulsübertrag in der Zeit  $\Delta t$  auf die rechte Wand:

$$F \cdot \Delta t = \frac{2m v \cdot v \Delta t}{2a} = \frac{m v^2 \Delta t}{a}$$

- An der Wand wirkender mittlerer Druck:

$$p_x = \frac{F}{A} = m \frac{v^2}{A a} = \frac{2m v^2}{2V} = 2 \frac{E_{Tx}}{V}$$

# Ideales Gas (6)

Anzahl der Teilchen im Behälter =  $N \gg 1$

- Extrem häufige Stöße mit der Wand
- Quasi konstante Druckkraft → **quasi konstanter Druck**

Mittlere Translationsenergie eines Teilchens

$$\bar{E}_T = \frac{m \bar{v}^2}{2}$$

Gesamte innere Translationsenergie:

$$E_T = N \cdot \bar{E}_T$$

# Ideales Gas (7)

Keine bevorzugte Bewegungsrichtung

- Energie teilt sich auf → Druck isotrop:

$$E_{Tx} = E_{Ty} = E_{Tz} = \frac{E_T}{3} = \frac{N \cdot \bar{E}_T}{3}$$

Zustandsgleichung des idealen Gases:

$$p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{E}_T = \frac{2}{3} n \bar{E}_T = \frac{1}{3} n m \bar{v}^2 = \frac{1}{3} \varrho \bar{v}^2$$

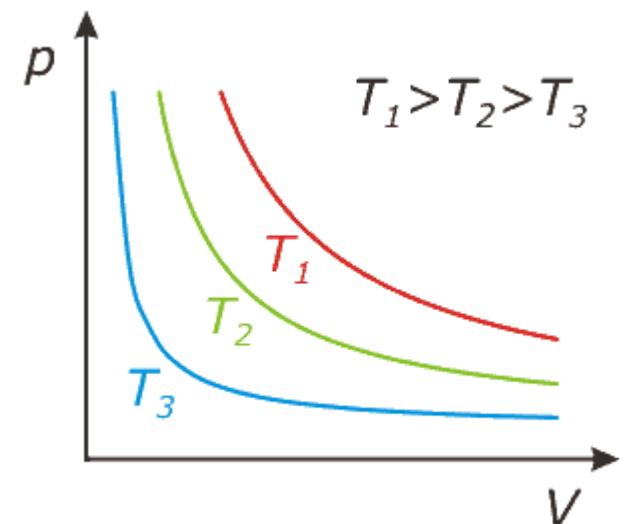
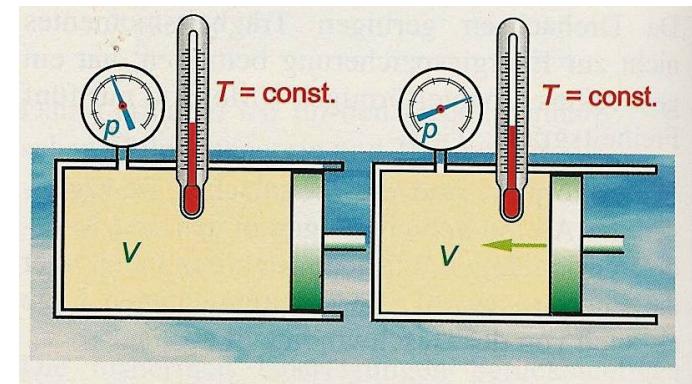
- Zusammenhang der **Zustandsgrößen**
  - **Statistische** Größen:

$$p, n, \bar{E}_T$$

# Ideales Gas (8)

## Isotherme Zustandsänderung

- Isotherme Kompression
- Kolben wird in Zylinder gedrückt
- Gasvolumen verringert sich
  
- Gleichzeitig Zylinder gut gekühlt
- Temperatur bleibt konstant
  
- Verschiedene Temperaturen
- Isothermen im  $pV$ -Diagramm
- Hyperbelschar



# Ideales Gas (9)

## Isotherme Zustandsänderung

$$\text{Es gilt: } N = \text{const.} \quad \bar{E}_T = \text{const.}$$

$$\Rightarrow p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{E}_T = \frac{\text{const.}}{V}$$

$$\Leftrightarrow \frac{2}{3} N \bar{E}_T = \frac{2}{3} E_T = p \cdot V = \text{const.}$$

Gesetz von Boyle-Mariotte

Für zwei Zustände:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

# Ideales Gas (10)

## ■ Hausübung

Eine Stahlflasche enthält  $20dm^3$  Wasserstoff bei  $0^\circ C$  und  $100bar$ .

a) Berechne die Dichte und die Masse des Wasserstoffs in der Flasche! Was erkennt man?

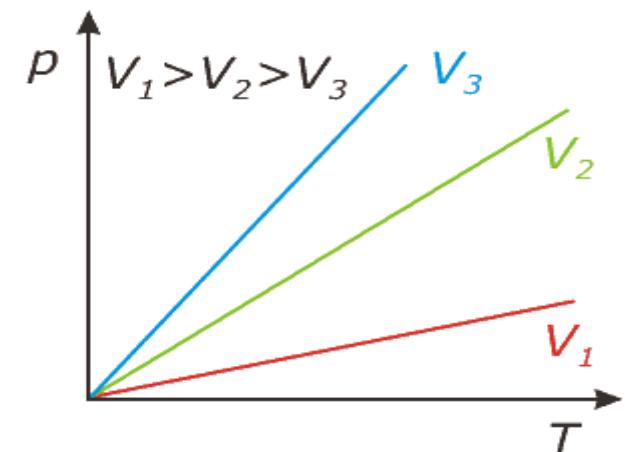
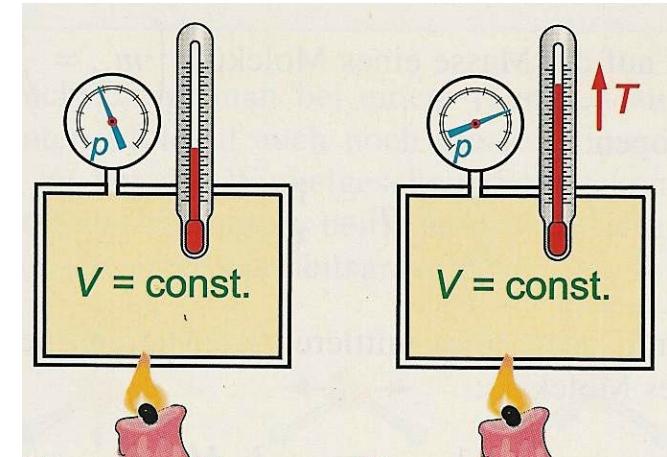
b) Wie viele Ballons von  $5dm^3$  Volumen können bei einem Druck von  $1,1bar$  gefüllt werden?

(Dichte  $H_2$  bei  $0^\circ C / 1 bar = \rho_0 = 88,7g/m^3$ ;  $\vartheta = const. = 0^\circ C$ )

# Ideales Gas (11)

## Isochore Zustandsänderung

- Isochore Erwärmung
  - Gas wird bei **konstant gehaltenem Volumen** erwärmt
    - Temperatur, Druck steigen
- Verschiedene Volumen
  - Isochore im pT-Diagramm
    - Geraden



# Ideales Gas (12)

## Isochore Zustandsänderung

Es gilt:

$$\begin{aligned} V &= V_0 = \text{const.} & n &= n_0 = \frac{N}{V_0} = \text{const.} \\ \Rightarrow p &= \frac{2}{3} \frac{N}{V_0} \bar{E}_T = \text{const.} \cdot \bar{E}_T \end{aligned}$$

- **Gasdruck proportional zur mittleren Translationsenergie!**
  - Abkühlung  $\leftrightarrow$  Verminderung der Translationsenergie
  - Es gilt stets wegen  $\bar{v}^2 \geq 0$ :
  - Temperatur kann **nicht unbegrenzt gesenkt** werden
    - **Absoluter Nullpunkt!**

# Ideales Gas (13)

## Isochore Zustandsänderung

Es gilt:

$$V = \text{const.}$$

$$\Rightarrow p = \frac{p_0}{T_0} \cdot T$$

$$T_0 = 273,15 \text{ K}$$

Gesetz von  
Gay-Lussac

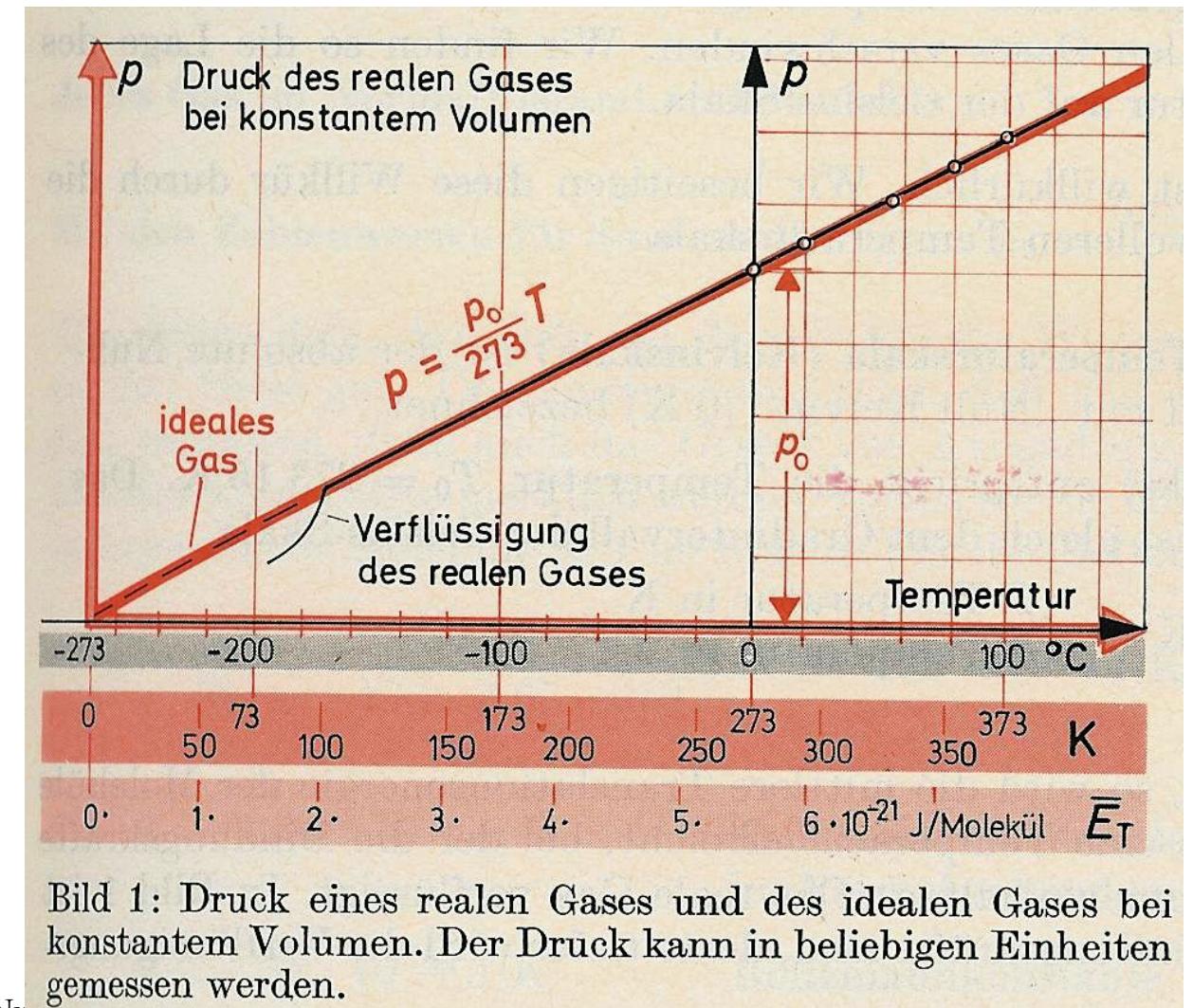


Bild 1: Druck eines realen Gases und des idealen Gases bei konstantem Volumen. Der Druck kann in beliebigen Einheiten gemessen werden.

# Ideales Gas (14)

## Isochore Zustandsänderung

Es gilt weiter

$$\begin{aligned} p &= \frac{2}{3} n_0 \bar{E}_T = \frac{p_0}{T_0} T \\ \Leftrightarrow \bar{E}_T &= \frac{3}{2} \frac{p_0}{T_0 n_0} T = \frac{3}{2} k T \end{aligned}$$

$$\frac{p_0}{T_0 n_0} = k = \text{Boltzmannkonstante}$$

Gesetz von Avogadro

→ k für alle Gase gleich!

# Ideales Gas (15)

SI-Basiseinheit für die Stoffmenge: **mol**

- Ein Mol ist jene Menge eines Stoffes, die ebenso viele Teilchen wie 12 g reinen Kohlenstoffs des Isotops  $^{12}\text{C}$  enthält!
- Formelzeichen:  
$$\nu = \frac{m}{M} \quad [\text{mol}]$$
  
 $m$ .....Masse des Gases [kg]  
 $M$ .....Molare Masse des Gases [kg/Mol]
- Avogadro-Konstante (Loschmidt'sche Zahl)

$$N_A = \frac{N}{\nu} = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

# PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

Selected Radioactive Isotopes

## Table of Selected Radioactive Isotopes

GROUP  
1/IA

<b>1</b>	<b>1.00794</b>
20.28	<b>H</b>
13.81	
0.0899 $\dagger$	

**Hydrogen**

**2/IIA**

<b>3</b> (6.941)	<b>4</b> 9.012182
1615	1
453.7	2744

**Lithium**

<b>11</b> 22.989770	<b>12</b> 24.3050
1156.1	1
371.0	1363

**Magnesium**

<b>19</b> 39.0983	<b>20</b> 40.078
1033	1
336.8	1757

**Potassium**

<b>21</b> 44.95591	<b>22</b> 47.867
3109	3
3560	4,3,2

**Calcium**

<b>29</b> 4.54	<b>30</b> 4.54,3,2
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Scandium**

<b>23</b> 50.9415	<b>24</b> 51.996
3109	4,3,2
3560	2183

**Titanium**

<b>25</b> 54.9380	<b>26</b> 55.845
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Vanadium**

<b>27</b> 54.11	<b>28</b> 56.8934
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Chromium**

<b>29</b> 54.9380	<b>30</b> 55.845
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Manganese**

<b>31</b> 55.845	<b>32</b> 56.8934
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Iron**

<b>33</b> 56.8934	<b>34</b> 57.9232
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Cobalt**

<b>35</b> 58.6934	<b>36</b> 59.0499
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Nickel**

<b>37</b> 59.0499	<b>38</b> 60.4099
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Copper**

<b>39</b> 60.4099	<b>40</b> 61.7922
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Zinc**

<b>41</b> 61.7922	<b>42</b> 62.867
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Nickel**

<b>43</b> 62.867	<b>44</b> 63.8905
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Manganese**

<b>45</b> 63.8905	<b>46</b> 64.8645
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Ruthenium**

<b>47</b> 64.8645	<b>48</b> 65.8409
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Rhenium**

<b>49</b> 65.8409	<b>50</b> 66.8409
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Rhenium**

<b>51</b> 66.8409	<b>52</b> 67.8409
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Rhenium**

<b>53</b> 67.8409	<b>54</b> 68.8409
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Rhenium**

<b>55</b> 68.8409	<b>56</b> 69.8409
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Rhenium**

<b>57</b> 69.8409	<b>58</b> 70.8409
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Rhenium**

<b>59</b> 70.8409	<b>60</b> 71.8409
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Rhenium**

<b>61</b> 71.8409	<b>62</b> 72.8409
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Rhenium**

<b>63</b> 72.8409	<b>64</b> 73.8409
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Rhenium**

<b>65</b> 73.8409	<b>66</b> 74.8409
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Rhenium**

<b>67</b> 74.8409	<b>68</b> 75.8409
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Rhenium**

<b>69</b> 75.8409	<b>70</b> 76.8409
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Rhenium**

<b>71</b> 76.8409	<b>72</b> 77.8409
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Rhenium**

<b>73</b> 77.8409	<b>74</b> 78.8409
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Rhenium**

<b>75</b> 78.8409	<b>76</b> 79.8409
[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>	[Ar]3d <sup>14</sup> s <sup>2</sup>

**Rhenium**

**77** 79.8409	**78** 80.8409



</tbl

# Ideales Gas (17)

<sup>93</sup> Np	238	[4.47 x 10 <sup>9</sup> y] $\alpha$
	236	(1.1 x 10 <sup>5</sup> y) EC, $\beta^-$
	237	(2.14 x 10 <sup>6</sup> y) $\alpha$
	239	(2.346 d) $\beta^-$
<sup>94</sup> Pu	238	(87.75 y) $\alpha$
	239	(2.41 x 10 <sup>4</sup> y) $\alpha$
	240	(6.54 x 10 <sup>3</sup> y) $\alpha$
	242	(3.8 x 10 <sup>5</sup> y) $\alpha$
	244	(8.3 x 10 <sup>7</sup> y) $\alpha$
<sup>95</sup> Am	241	(432 y) $\alpha$
	243	(7.37 x 10 <sup>3</sup> y) $\alpha$
<sup>96</sup> Cm	242	(163.2 d) $\alpha$
	244	(18.12 y) $\alpha$
	247	(1.55 x 10 <sup>7</sup> y) $\alpha$
<sup>97</sup> Bk	247	(3.5 x 10 <sup>5</sup> y) $\alpha$ , SF
<sup>98</sup> Cf	247	(1.4 x 10 <sup>3</sup> y) $\alpha$
	249	(351 y) $\alpha$
	251	(900 y) $\alpha$
<sup>99</sup> Es	252	(472 d) $\alpha$
	253	(20.47 d) $\alpha$
	254	(276 d) $\alpha$
<sup>100</sup> Fm	255	(20.1 h) $\alpha$
	257	(100.5 d) $\alpha$
<sup>101</sup> Md	258	(55 d) $\alpha$
<sup>102</sup> No	259	(58 min) $\alpha$
<sup>103</sup> Lr	260	(3.0 min) $\alpha$
<sup>104</sup> Rf	261	(65 s) $\alpha$
<sup>105</sup> Db	262	(40 s) $\alpha$
<sup>106</sup> Sg	263	(0.9 d) $\alpha$

scribing the principal mode (or modes) of decay are as follows  
(these processes are generally accompanied by gamma radiation):

$\alpha$  alpha particle emission  
 $\beta^-$  beta particle (electron) emission  
 $\beta^+$  positron emission  
EC orbital electron capture  
IT isomeric transition from upper to lower isomeric state  
SF spontaneous fission

**18/VIII**

**2** 4.00260

4.216  
0.95  
at 26 atm  
0.1785<sup>t</sup> **He**

1s<sup>2</sup>  
Helium

**13/IIIB** **14/IVB** **15/VB** **16/VIB** **17/VIIB**

<b>5</b> 4275 2348 2.37	<b>10.811</b> 3 [He]2s <sup>2</sup> p <sup>1</sup> Boron	<b>6</b> 4675* 3915* 2.26	<b>12.0107</b> ±4,2 [He]2s <sup>2</sup> p <sup>2</sup> Carbon	<b>7</b> 77.344 63.15 1.251 <sup>t</sup>	<b>14.0067</b> ±3,5,4,2 [He]2s <sup>2</sup> p <sup>3</sup> Nitrogen	<b>8</b> 90.2 54.4 1.429 <sup>t</sup>	<b>15.9994</b> -2,-1 [He]2s <sup>2</sup> p <sup>4</sup> Oxygen	<b>9</b> 85.0 53.55 1.696 <sup>t</sup>	<b>18.99840</b> -1 [He]2s <sup>2</sup> p <sup>5</sup> Fluorine	<b>10</b> 27.07 24.56 0.900 <sup>t</sup> [He]2s <sup>2</sup> p <sup>6</sup> Neon	
<b>13</b> 2792 933.5 2.6989	<b>26.981538</b> 3 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup> Aluminum	<b>14</b> 3538 1687 2.33	<b>28.0855</b> 4,2 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup> Silicon	<b>15</b> 553 317.3 1.82	<b>30.97376</b> ±3,5,4 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup> Phosphorus	<b>16</b> 717.75 388.36 2.07	<b>32.065</b> 6,±2,4, [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup> Sulfur	<b>17</b> 239.11 171.65 3.214 <sup>t</sup>	<b>35.453</b> ±1,7,5,3 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup> Chlorine	<b>18</b> 87.8 83.8 1.784 <sup>t</sup> [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup> Argon	
<b>10</b> 58.6934 2,3 2835 1357.8 8.96	<b>11/IB</b> <b>29</b> 63.546 2,1 1180 692.68 7.13	<b>12/IIB</b> <b>30</b> 65.409 2 1180 692.68 7.13	<b>31</b> 2477 302.91 6.095	<b>69.723</b> 1,3 3106 1211.4 5.32	<b>72.64</b> 4 876 (subl.) 1090 (28 atm.) 5.73	<b>32</b> 3106 1211.4 5.32	<b>74.9216</b> ±3,5 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup>	<b>33</b> 958 494 4.79	<b>78.96</b> 4,6,-2 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup>	<b>34</b> 331.95 265.95 3.12	<b>35</b> 331.95 265.95 3.12
<b>Ni</b> [3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup> nickel	<b>Cu</b> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup> Copper	<b>Zn</b> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> Zinc	<b>Ga</b> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup> Gallium	<b>Ge</b> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup> Germanium	<b>As</b> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup> Arsenic	<b>Se</b> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup> Selenium	<b>Br</b> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup> Bromine	<b>Kr</b> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup> Krypton	<b>36</b> 83.80 0,2 119.93 115.8 3.73 <sup>t</sup>		

<b>58.6934</b> 2,3 2835 1357.8 8.96	<b>29</b> 63.546 2,1 1180 692.68 7.13	<b>30</b> 65.409 2 1180 692.68 7.13	<b>31</b> 2477 302.91 6.095	<b>69.723</b> 1,3 3106 1211.4 5.32	<b>72.64</b> 4 876 (subl.) 1090 (28 atm.) 5.73	<b>32</b> 3106 1211.4 5.32	<b>74.9216</b> ±3,5 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup>	<b>33</b> 958 494 4.79	<b>78.96</b> 4,6,-2 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup>	<b>34</b> 331.95 265.95 3.12	<b>35</b> 331.95 265.95 3.12
<b>Ni</b> [3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup> nickel	<b>Cu</b> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup> Copper	<b>Zn</b> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> Zinc	<b>Ga</b> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup> Gallium	<b>Ge</b> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup> Germanium	<b>As</b> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup> Arsenic	<b>Se</b> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup> Selenium	<b>Br</b> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup> Bromine	<b>Kr</b> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup> Krypton	<b>36</b> 83.80 0,2 119.93 115.8 3.73 <sup>t</sup>		
<b>10</b> 10.811 3 [He]2s <sup>2</sup> p <sup>1</sup> Boron	<b>11/IB</b> <b>14/IVB</b> <b>12/IIB</b>	<b>13/IIIB</b> <b>15/VB</b> <b>16/VIB</b>	<b>17/VIIB</b>								
<b>10</b> 58.6934 2,3 2835 1357.8 8.96	<b>11/IB</b> <b>29</b> 63.546 2,1 1180 692.68 7.13	<b>12/IIB</b> <b>30</b> 65.409 2 1180 692.68 7.13	<b>13/IIIB</b> <b>31</b> 2477 302.91 6.095	<b>14/IVB</b> <b>69.723</b> 1,3 3106 1211.4 5.32	<b>15/VB</b> <b>72.64</b> 4 876 (subl.) 1090 (28 atm.) 5.73	<b>16/VIB</b> <b>74.9216</b> ±3,5 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup>	<b>17/VIIB</b> <b>78.96</b> 4,6,-2 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup> [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup>				

# Ideales Gas (18)

Molare Atom- bzw. Molekülmassen [g/mol]

Atom	M	Molekül	M
He	4,0026	H <sub>2</sub>	2,0158
H	1,0079	O <sub>2</sub>	31,9988
O	15,9994	O <sub>3</sub>	47,9982
N	14,0067	N <sub>2</sub>	28,0134
C	12,011	CO	28,0104
S		H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
Fe		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Si		SiO <sub>2</sub>	
U		(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> U <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	

# Ideales Gas (19)

## Gesetz von Avogadro

- **Gleiche Volumina verschiedener Gase enthalten bei gleichem Druck und gleicher Temperatur gleich viele Gasteilchen.**
- Alternativ:
  - Unter gleichen Bedingungen von Druck und Temperatur haben alle Gase das gleiche **Molvolumen**.  
Unter **Normalbedingungen** ( $1013\text{hPa}$ ,  $0^\circ\text{C}$ ) sind dies  $22,4 \text{ dm}^3$ .
  - Ein Mol eines Gases enthält  $6,022 \cdot 10^{23}$  Gasteilchen, unabhängig von Druck und Temperatur.



Amadeo Avogadro

# Ideales Gas (20)

## Boltzmannkonstante

- Normalbedingungen
  - Molvolumen von idealem Gas = **22,4 dm<sup>3</sup>**
  - → **44,64 mol/m<sup>3</sup>** (Normalbedingungen)



$$n_0 = N_A \cdot 44,64 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} = 2,689 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$$

$$\Rightarrow k = \frac{p_0}{T_0 n_0} = \frac{101300 \text{ Pa}}{273,15 \text{ K} \cdot 2,689 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

# Ideales Gas (21)

- **Zustandsgleichung** des idealen Gases

$$p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{E}_T = \frac{2}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot \frac{3}{2} k T = n k T$$

$$\Rightarrow p V = N k T = \nu R T$$

- **Universelle Gaskonstante**  $R = 8,314 \frac{J}{mol \cdot K}$

- **Allgemeine Gasgleichung** (ideales Gasgesetz):

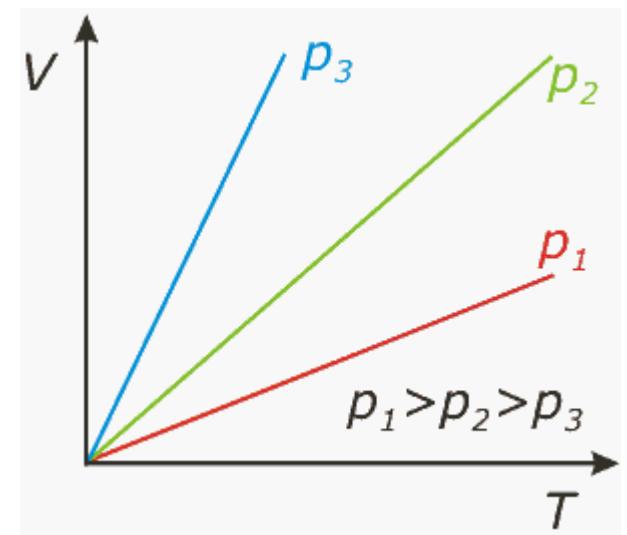
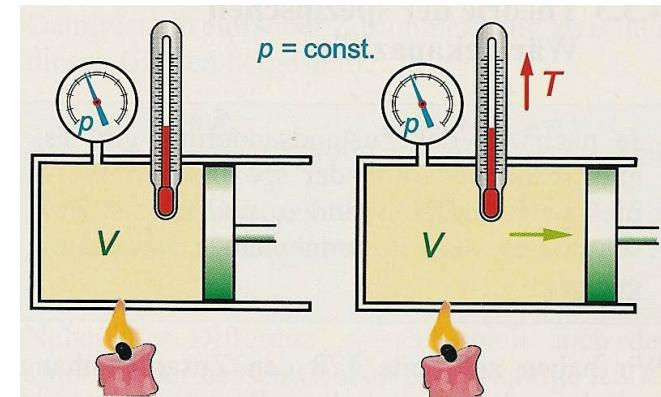
$$p V = N k T \Leftrightarrow p \frac{V}{T} = N k = \text{const.}$$

$$\Leftrightarrow \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad \text{für } N_1 = N_2 = N = \text{const.}$$

# Ideales Gas (22)

## Isobare Zustandsänderung

- Isobare Erwärmung
  - Gas wird bei konstant gehaltenem **Druck** erwärmt
  - **Temperatur, Volumen** steigen
- Verschiedene Drücke
  - **Isobare** im TV-Diagramm
  - Geraden



# Ideales Gas (23)

## ■ Isobare Zustandsänderung

Es gilt:

$$\frac{pV}{T} = \frac{pV_0}{T_0} \Rightarrow V = \frac{V_0}{T_0} \cdot T$$

Oder alternativ:

$$\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0} = \text{const.} \quad \text{für } p = \text{const.}$$

Gesetz von Charles



# Ideales Gas (24)

## ■ Hausübung

- 1) Ein Autoreifen wird mit einem Überdruck von  $1,8\text{bar}$  bei  $20^\circ\text{C}$  mit Luft befüllt. Nach längerer, kühner Bergfahrt erwärmt sich der Reifen auf  $60^\circ\text{C}$ . Wie hoch ist jetzt der Druck im Autoreifen?
  
- 2) Ein Gas nimmt bei  $30^\circ\text{C}$  ein Volumen von  $1,2\text{dm}^3$  ein. Welches Volumen nimmt es bei  $100^\circ\text{C}$  ein, falls der Druck konstant bleibt?

# Ideales Gas (25)

## Isobare Zustandsänderung

- Volumensausdehnung des idealen Gases

Es gilt:

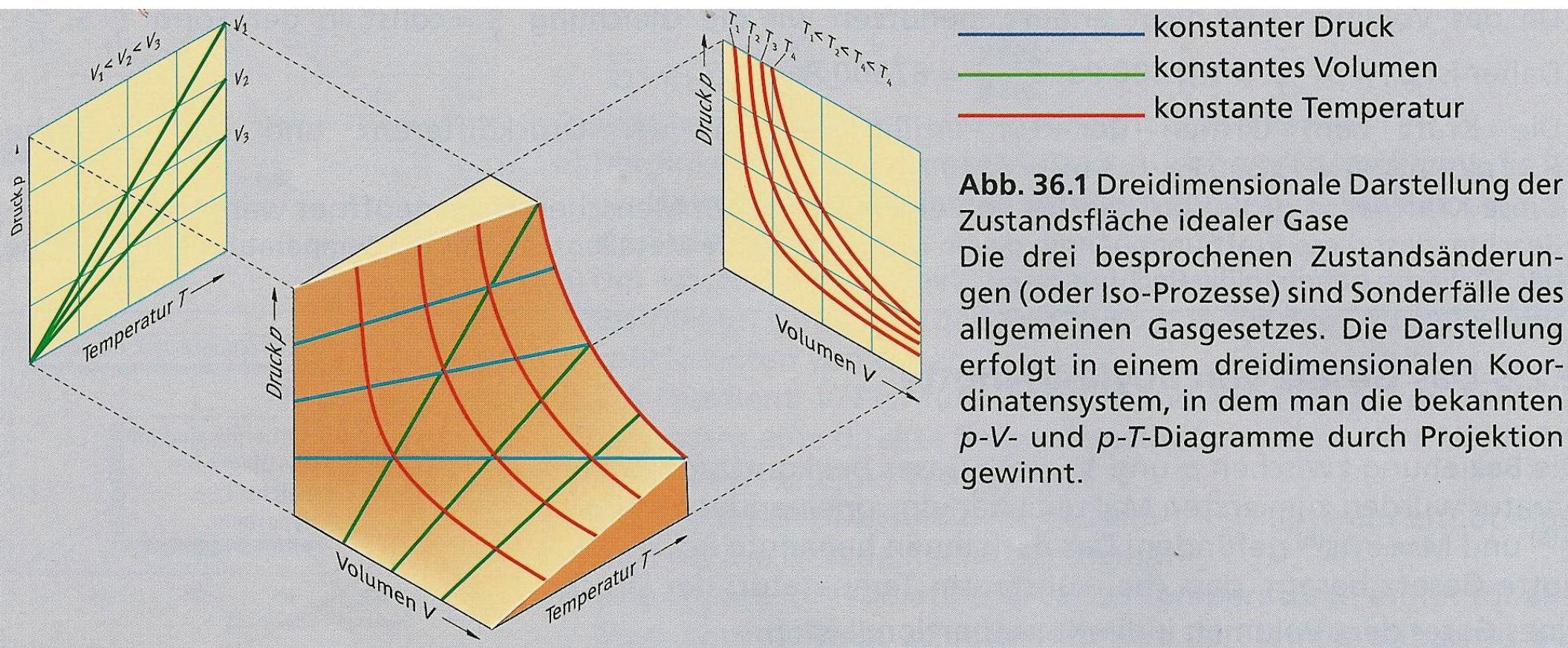
$$V = \frac{V_0}{T_0} \cdot T \Rightarrow \Delta V = \frac{V_0}{T_0} \cdot \Delta T$$

$$\gamma = \frac{\Delta V}{V_0 \cdot \Delta T} = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{273,15 \text{ K}} = 3,66 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

- Alle Gase haben im Idealzustand denselben Volumausdehnungskoeffizienten  $1/T_0$ . Sie dehnen sich bei konstantem Druck je  $K$  Temperaturerhöhung um  $1/273$  ihres Volumens bei  $0^\circ\text{C}$  aus.

# Ideales Gas (26)

## Zustandsraum des idealen Gases



**Abb. 36.1** Dreidimensionale Darstellung der Zustandsfläche idealer Gase  
Die drei besprochenen Zustandsänderungen (oder Iso-Prozesse) sind Sonderfälle des allgemeinen Gasgesetzes. Die Darstellung erfolgt in einem dreidimensionalen Koordinatensystem, in dem man die bekannten  $p$ - $V$ - und  $p$ - $T$ -Diagramme durch Projektion gewinnt.

# Ideales Gas (27)

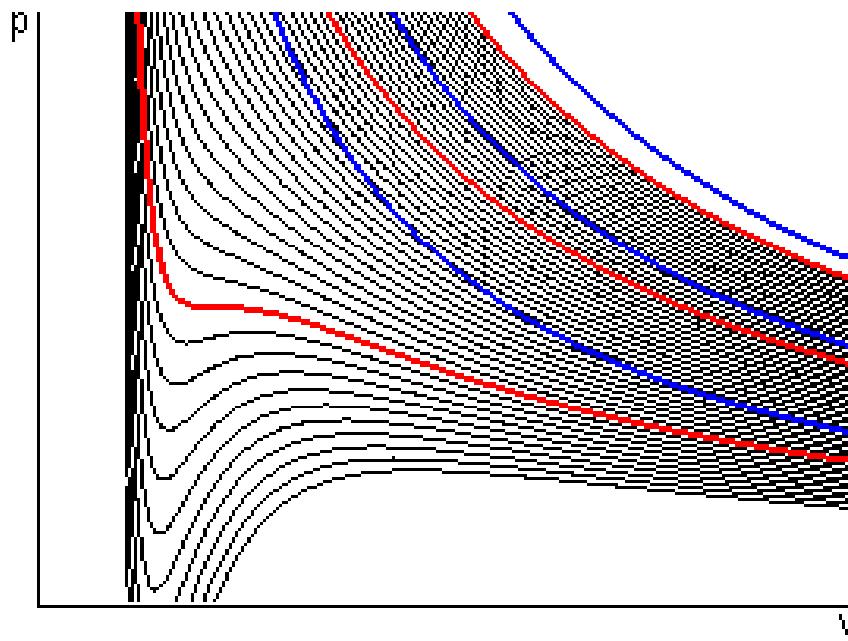
**Gültigkeit der Zustandsgleichung des idealen Gases für reale Gase**

- Abkühlen von Gasen
  - Mittlere kinetische Energie der Gasteilchen **sinkt**
  - Molekularkräfte **gewinnen an Bedeutung**
    - Gas **verflüssigt**
  - Moleküle eng zusammengepackt

**Reale Gase befolgen die Zustandsgleichung des idealen Gases umso besser, je höher die Temperatur über ihrer Verflüssigungstemperatur liegt und je kleiner ihre Dichte gegenüber ihrer Dichte im flüssigen Zustand ist.**

# Ideales Gas (28)

Gültigkeit der Zustandsgleichung des idealen Gases für **reale Gase**



- Helium, Stickstoff, Sauerstoff, Wasserstoff, Luft
  - Verflüssigung unter  $-100^{\circ}\text{C}$
  - $0^{\circ}\text{C}$  / moderate Drücke → **Fast ideales Verhalten**

# Ideales Gas (29)

## Reale Gase

- Zustandsgleichung  $pV = \nu RT$   
kann nicht streng gültig sein!
  - Volumen würde bei  $p = \text{const.}$  und  $T = 0\text{ K}$  verschwinden!
  - Molekularkräfte sind **vernachlässigt**
  - Erweiterung: **Van-der-Waals-Gleichung**
    - Berücksichtigung des **Eigenvolumens**
    - Berücksichtigung der **Molekularkräfte**



$$(p + \underbrace{a \cdot \frac{\nu^2}{V^2}}_{\text{Molekularkräfte}}) \cdot (V - \underbrace{b \cdot \nu}_{\text{Eigenvolumen}}) = \nu RT$$

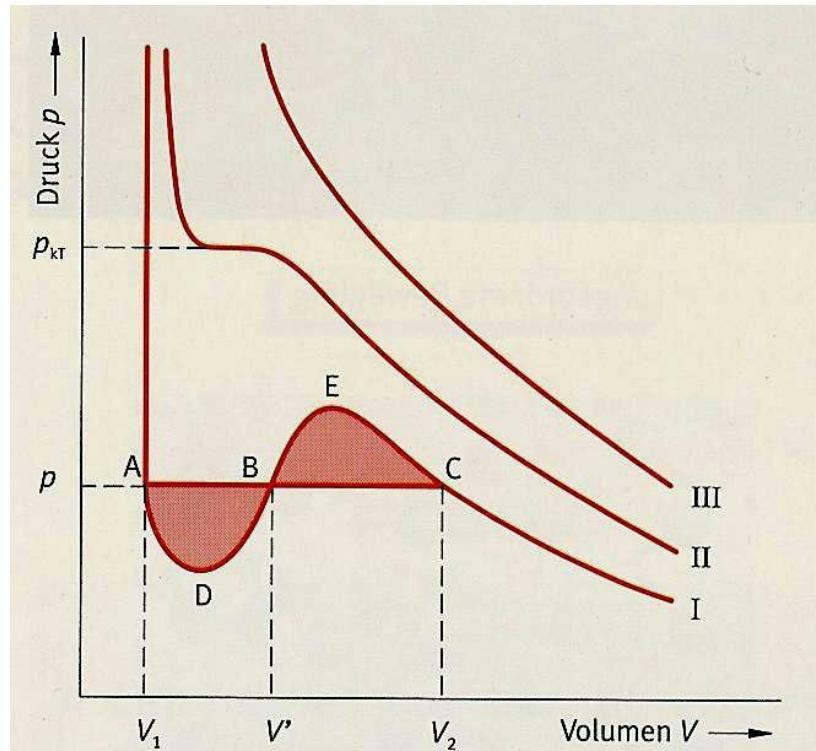
# Ideales Gas (30)

- Van-der-Waals-Gleichung

$$(p + a \cdot \frac{v^2}{V^2}) \cdot (V - b \cdot v) = v R T$$

- pV-Diagramm (rechnerisch)

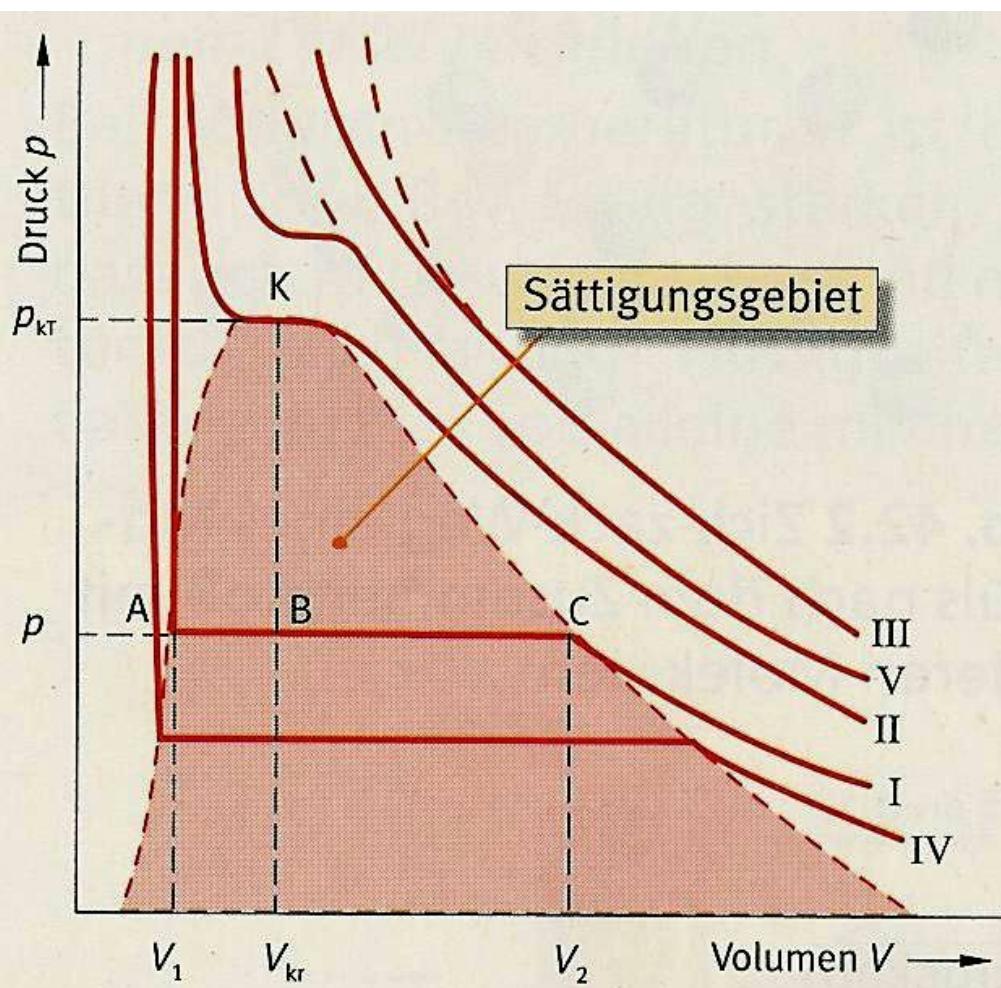
	<i>a</i>	<i>b</i>
ideal	0	0
O	1,36	0,0318
N	1,390	0,0391
H	0,244	0,0266
[ <i>a</i> ]	$10^5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^6/\text{kmol}^2$	
[ <i>b</i> ]	$\text{m}^3/\text{kmol}$	



- $T_{III}$ : ~ **ideales Gas**
- $T_{II}$ : **kritische Temperatur** - horiz. Tangente
- $T_I$ : Verlauf ADBEC physikalisch nicht sinn-voll (drei verschiedene Volumen bei gleichem Druck!).
- Experimentell: CBA - entspricht Verflüssigung!
- Steiler Anstieg unterhalb  $V_1 \rightarrow$  **Flüssigkeit**

# Ideales Gas (31)

## Van-der-Waals-Isothermen (experimentell)



- $T_{III,V}$ : Verhalten ähnlich **idealem Gas**
- $T_{II}$ : **kritische Temperatur - kritischer Punkt  $K$**  oberhalb dieser Temperatur ist eine Verflüssigung **nicht mehr möglich!**
- $T_{I,IV}$ : Verlauf durch das **Sättigungsgebiet** = Gebiet mit **Koexistenz** flüssig/gasförmig

# Ideales Gas (32)

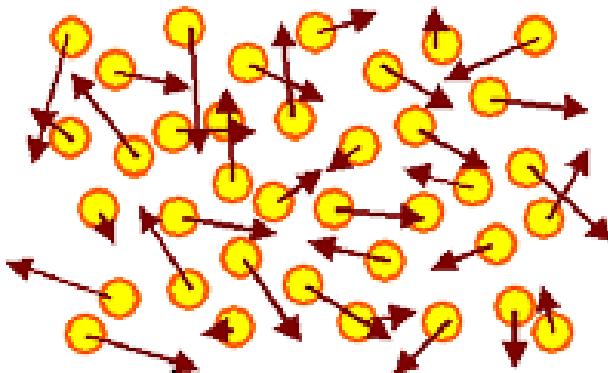
## Hausübung

- 1) Der Laguna-Nebel ist eine Wasserstoffwolke in etwa *3900 Lichtjahren* Entfernung. Das Gas wird durch Sterne im Nebel auf etwa  $7500K$  aufgeheizt. Man schätzt die Dichte auf ca.  $80 \text{ Moleküle pro cm}^3$ . Wie groß ist der Druck in der Wolke?
  
- 2) Mit modernen Vakuumpumpen erreicht man Unterdrücke bis ca.  $10^{-13}\text{bar}$ . Wie viele Moleküle enthält hier  $1\text{cm}^3$  bei  $300K$ ?

# Spezifische Wärme (1)

Warum wird zur **Temperaturerhöhung** eines Körpers **Energie** benötigt?

- **Brown'sche Bewegung**
  - Temperaturerhöhung erfordert Erhöhung der **mittleren Translationsenergie**
  - Beispiel ideales Gas:

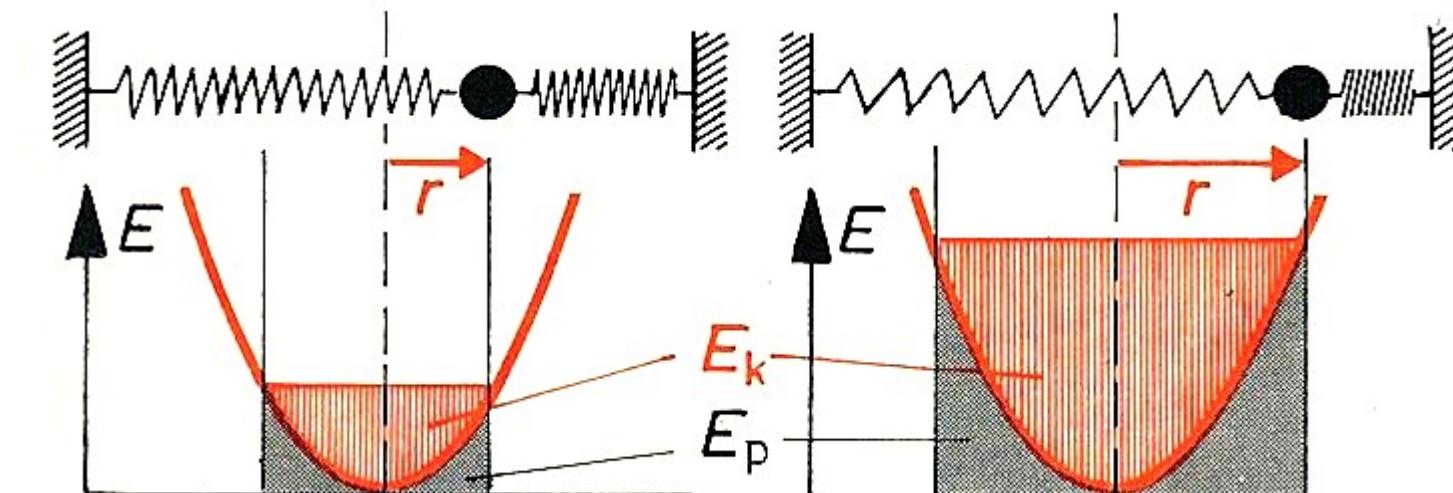


$$\bar{E}_T = \frac{3}{2} k T$$

**Mittlere Translationsenergie**  
bei der Temperatur  $T$  für 1  
Teilchen

# Spezifische Wärme (2)

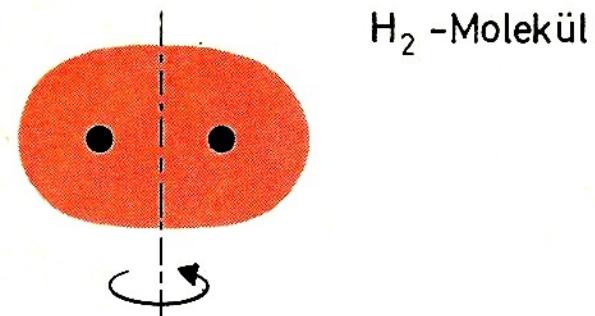
- Festkörper
  - Brown'sche Bewegung = **Schwingungen** um die **Gleichgewichtslage**
    - Mittlere **Translationsenergie**
    - Zusätzlich mittlere **potentielle Energie**



# Spezifische Wärme (3)

## Flüssigkeiten, Gase

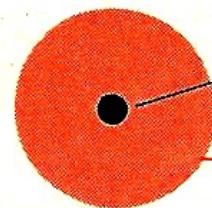
- Laufend **Stöße** der Teilchen miteinander
  - **Nicht-zentrale** Stöße → **Rotation!**
- **Rotationsenergie**
  - Nicht möglich in Festkörpern
  - **Flüssigkeiten und Gase** haben **mehr Freiheitsgrade** der Bewegung



# Spezifische Wärme (4)

## Rotationsenergie

- Einatomige Teilchen → kaum Rotationsenergie

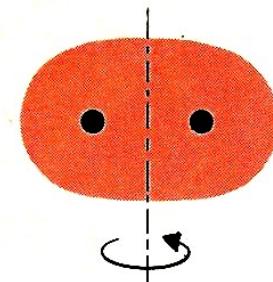


Atomkern

99,9 % der Masse

Atomhülle

0,06 % der Masse



$H_2$ -Molekül



$CO_2$ -Molekül



Schwingung  
S ruht

- Höhere Temperaturen → heftigere Stöße → mehr Rotationsenergie

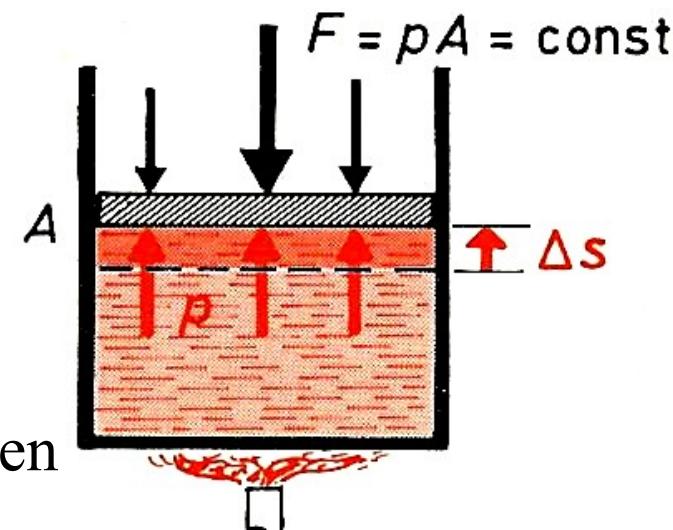
# Spezifische Wärme (5)

## Erwärmen bei konstantem Volumen

- Beispiele
  - Luft im Autoreifen
  - Gas in einer Stahlflasche

## Erwärmen bei konstantem Druck

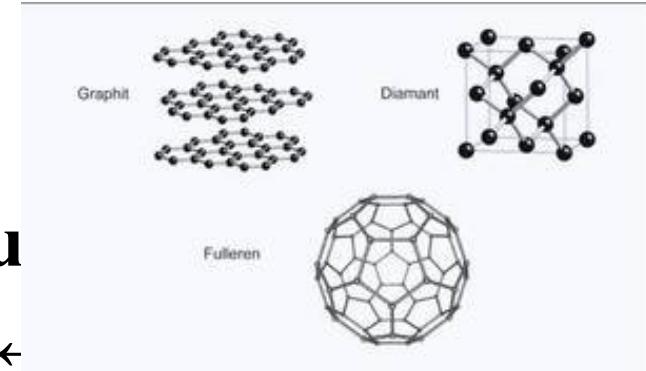
- Beispiel: Wasser / Gas in einem offenen Gefäß mit beweglichem Kolben
- **Volumsarbeiten** wird verrichtet:  $\Delta W = F \cdot \Delta s = p \cdot \Delta V$
- Muss **zusätzlich** in Form von **Wärme** zugeführt werden!



# Spezifische Wärme (6)

Phasenübergänge, Phasenmodifikationen

- Änderungen des **Aggregatzustandes**
  - **Volumsvergrößerung** → Erhöhung der **potentiellen Energie!**
  - Zudem u. U. plötzlich **zusätzliche Freiheitsgrade** möglich (z. B.: Rotation)
  - **Latente Wärmen**
- Änderungen der **Kristallstruktur**
  - Beispiel: Graphit  $\leftrightarrow$  Diamant  $\leftarrow$



# Spezifische Wärme (7)

- Ergebnis: 1. Hauptsatz der Wärmelehre

Die infolge eines Temperaturunterschiedes zugeführte Energie nennen wir

WÄRME

Sie bleibt zum Teil im Körper und dient zur

**ERHÖHUNG DER INNEREN ENERGIE**

Zum Teil wird sie abgegeben als

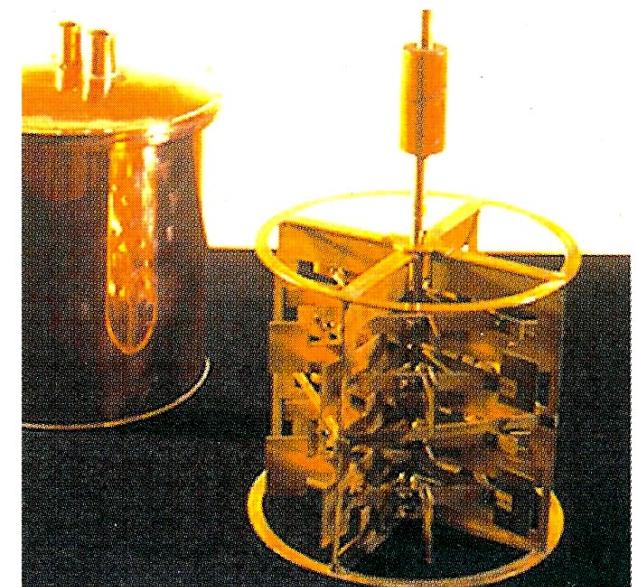
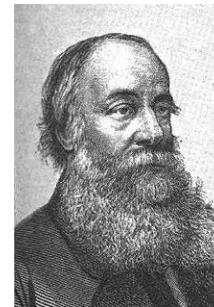
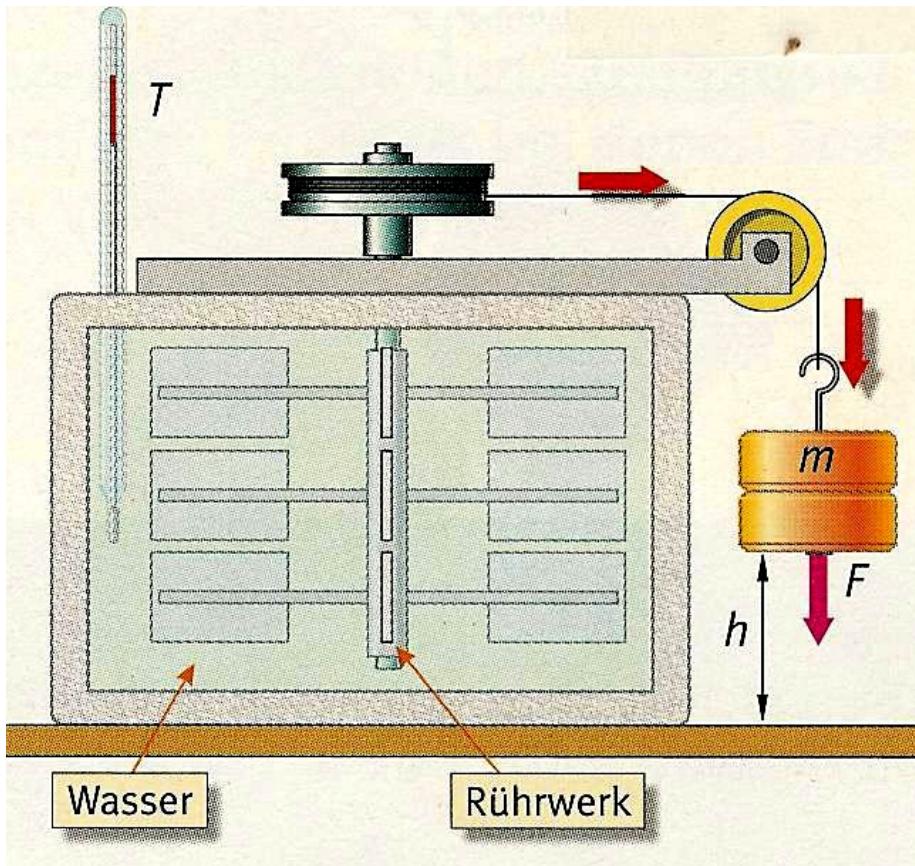
VOLUMSARBEIT

$$\Delta Q = \Delta U + p \cdot \Delta V$$

- Innere Energie
  - Translation
  - Rotation, Schwingung
  - innere potentielle Energie

# Spezifische Wärme (8)

- Wärmemessung
  - Joule-Kalorimeter



$$\Delta E_{ZU} = \Delta Q = m \cdot g \cdot \Delta h = c_p \cdot m \cdot \Delta T$$

$$c_p = \frac{\Delta Q}{m \Delta T}$$

$$[c_p] = \frac{J}{kg \cdot K}$$

spezifische Wärme bei konstantem Druck

# Spezifische Wärme (9)

- Beispiele für spezifische Wärmen:

Stoff	$c_p$ [kJ/kg·K]	$C_p$ [kJ/kmol·K]
Wasser (20°C)	4,18	75,3
Wasser (-10°C)	2,1	38,1
Erde / Gesteine	ca. 0,8	
Metalle	ca. 0,4	ca. 25
Wasserstoff	14,3	28,8
Helium	5,19	20,8

- Die spezifische Wärme  $c_p$  ist eine Stoffeigenschaft. Sie gibt an, welche Energie zur Erwärmung von **1kg** dieses Stoffes **um 1K** bei konstantem Druck nötig ist.
- Erwärmung von **1kg** Wasser um **1K** ( $^{\circ}\text{C}$ ): **4,2kJ** Energie nötig!

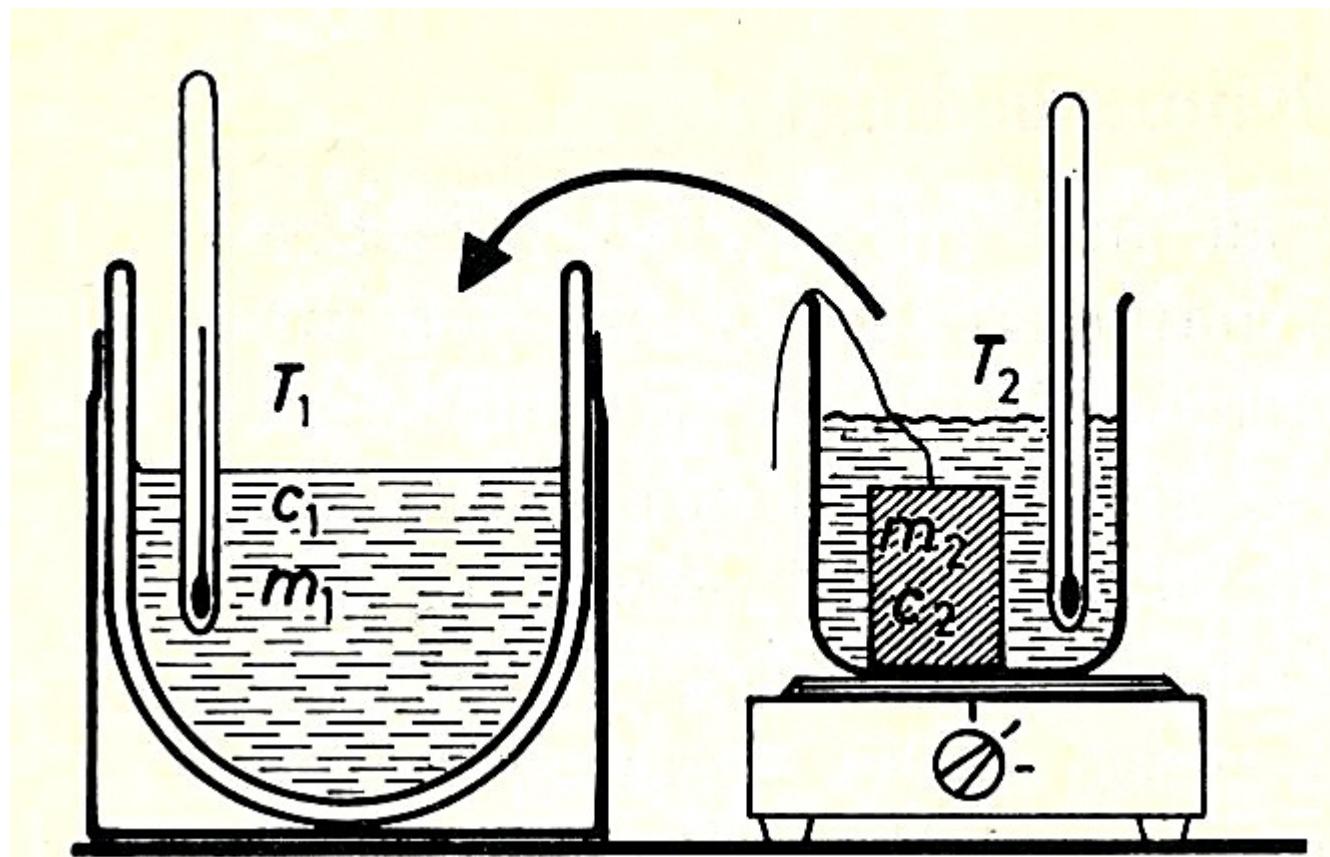
# Spezifische Wärme (10)

## Hausübung

- 1 ) Wie lange müsste eine Person ( $P = 100W$ ) am Joule'schen Apparat kurbeln, um  $1kg$  Wasser von  $14^{\circ}C$  zum Sieden zu bringen?
  
- 2) Welche Anschlussleistung benötigt ein elektrischer Durchlauferhitzer um in  $1min$   $10kg$  Wasser von  $14^{\circ}C$  auf  $50^{\circ}C$  zu erwärmen?

# Spezifische Wärme (11)

Praktische Wärmemessung  
Mischungskalorimeter

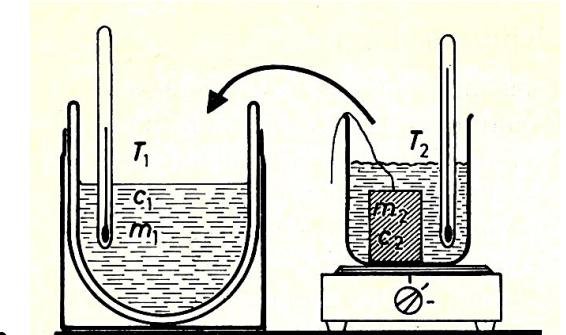


# Spezifische Wärme (12)

## Mischungskalorimeter

- **Bekannte Größen:**
  - Wassermasse  $m_1$ , Temperatur  $T_1$ , spezifische Wärme des Wassers  $c_1$
- **Zu messende Größen**
  - Masse des Testkörpers  $m_2$ , Temperaturen  $T_2$ ,  $T_m$
- **Bestimmung von  $c_2$  aus:**

$$m_1 \cdot c_1 \cdot (T_m - T_1) = m_2 \cdot c_2 \cdot (T_2 - T_m)$$



# Spezifische Wärme (13)

## Wärmequellen (exotherme Prozesse)

### Reibung, Verformung

- Beispiele:
  - Schmieden
  - Spanabhebung
  - Komprimierung von Gasen
- Umwandlung **mechanischer Energie** in Wärme

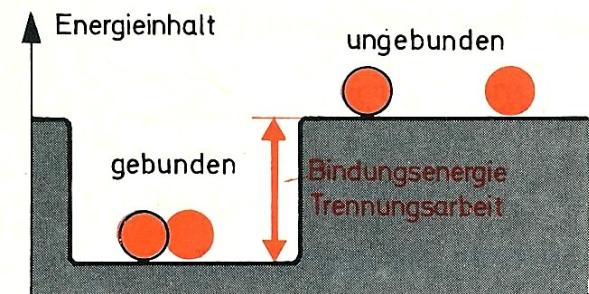
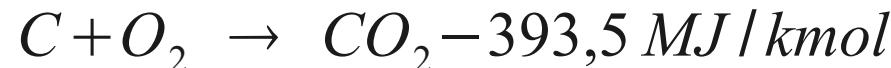


# Spezifische Wärme (14)

## Wärmequellen (exotherme Prozesse)

- **Verbrennung, Oxidation**

- Beispiel:



- Definition: **Die bei der vollständigen Verbrennung von 1kg eines Brennstoffes als Wärme abgegebene Energie wird als Heizwert  $H$  bezeichnet**
  - Umwandlung **chemischer Energie** in Wärme

Brennstoff	Heizwert in MJ/kg
Holz, trocken	18 ... 21
Braunkohle	26 ... 29
Steinkohle	29 ... 37
Spiritus	27
Dieselöl	42
Benzin	43
Wasserstoff	126
Erdgas	40 MJ/m <sup>3</sup>

# Spezifische Wärme (15)

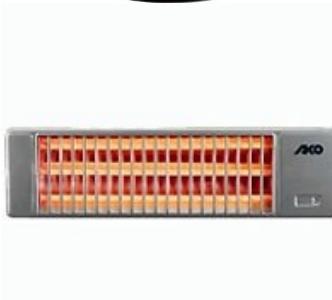
## Hausübung

Wie viel Liter Heizöl sind notwendig, um eine Wohnung einen Winter lang zu heizen, wenn der Energieverbrauch für eine Heizsaison bei  $10MWh$  liegt und mit Heizöl ( $H = 40MJ/kg$ ,  $\rho = 0,95\ kg/dm^3$ ) geheizt werden muss?

# Spezifische Wärme (16)

Wärmequellen (exotherme Prozesse)

## Elektrische Heizung



- Beispiele:
  - **Haarfön**
  - **Lötkolben**
  - **Kaffeemaschine**
  - ...
  - **Leistungsverluste**



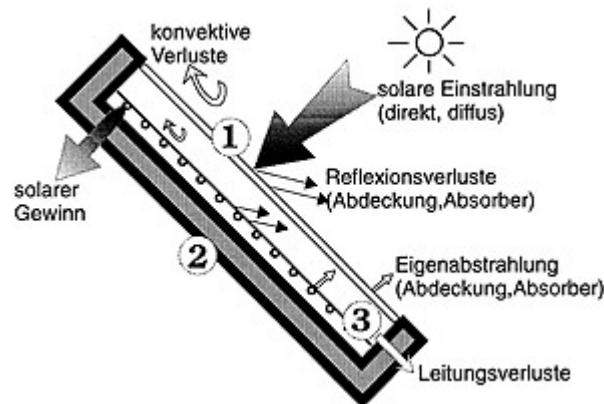
- Umwandlung **elektrischer Energie** in Wärme

# Spezifische Wärme (17)

- Wärmequellen (exotherme Prozesse)

- Strahlungswärme

- Beispiele:

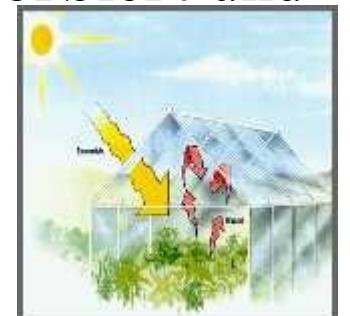


- Sonnenstrahlung → **Sonnenkollektor, Treibhaus:**

**1,35 kW/m<sup>2</sup>      Solarkonstante**

- "Handystrahlung" wärmt das Ohr....

- **Elektromagnetische Energie** wird **absorbiert** und in Wärme umgewandelt

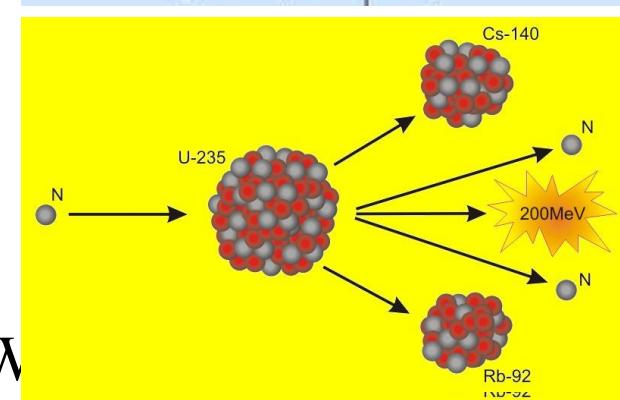
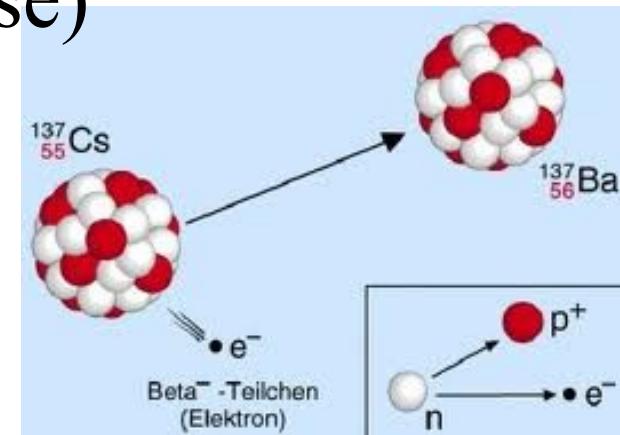
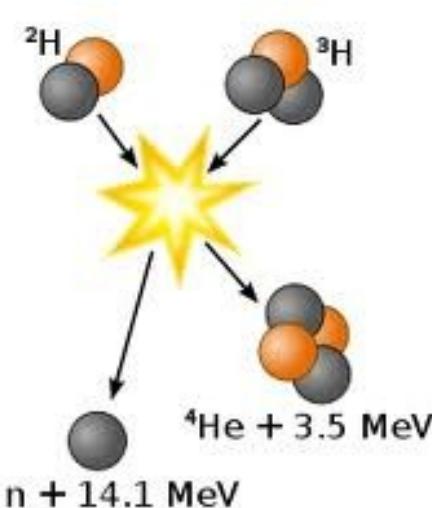


# Spezifische Wärme (18)

## Wärmequellen (exotherme Prozesse)

### Kernphysikalische Prozesse

- Radioaktiver Zerfall
  - Erdwärme
- Kernfusion
  - Sonne
- Kernspaltung
  - Atomkraftwerk
- **Kernenergie (Masse)** wird in Wärme umgesetzt



**Verschmelzung von 1 kg Wasserstoff zu Helium liefert:** (fast)  
 $10^{15} \text{ J} = 1 \text{ 000 TJ} > 2 \cdot 10^8 \text{ kWh}$

Nur für den schulinternen Gebrauch!

**Spaltung von 1 kg Uran liefert:**  
 $10^{14} \text{ J} = 100 \text{ TJ} = 25 \cdot 10^6 \text{ kWh}$

# Spezifische Wärme (19)

- Theorie der spezifischen Wärme

## Ideales Gas

- Keine zusätzlichen Freiheitsgrade

$$E_T = N \bar{E}_T = \frac{3}{2} N k T = \frac{3}{2} v R T \Rightarrow \Delta E_T = \frac{3}{2} v R \Delta T$$

$k$  = Boltzmannkonstante

$R$  = Gaskonstante

$v$  = Zahl der Mole

- Erwärmung von 1mol Gas um 1K ( $N = N_A$ ,  $v = 1$ )  
bei  $V = \text{const.}$

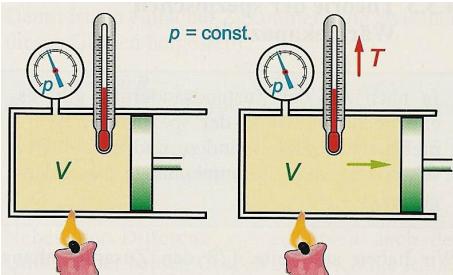
$$C_{v, \text{ideal}} = \frac{3}{2} R = 12,47 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$$

Nur für den schulinternen Gebrauch!

# Spezifische Wärme (20)

## Ideales Gas

- Erwärmung soll bei **konstantem Druck** erfolgen
  - **Volumsarbeiten** ist zu berücksichtigen



$$pV = nRT \Rightarrow V = \frac{n}{p}RT \Rightarrow \Delta V = \frac{n}{p}R\Delta T$$
$$\Rightarrow \Delta W = p\Delta V = nR\Delta T$$

- Dehnungsarbeit von **1mol** Gas bei Erwärmung um **1K**

$$\Delta W = R = 8,314 \frac{J}{mol \cdot K}$$

- Spezifische Wärme bei **konstantem Druck** (**Molwärme**):

$$C_{p,ideal} = C_{v,ideal} + R = \frac{5}{2}R = 20,79 \frac{J}{mol \cdot K}$$

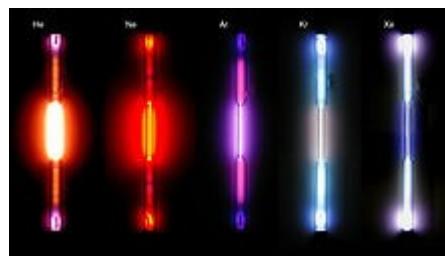
# Spezifische Wärme (21)

## Reale, einatomige Gase (Edelgase)

- Molwärme des Idealen Gases ist ein **Mindestwert**

$$C_{p,ideal} = C_{v,ideal} + R = \frac{5}{2}R = 20,79 \frac{J}{mol\ K}$$

- Wird von **Edelgasen** ziemlich genau erreicht!
  - Bestätigung, dass die Atommasse wirklich auf einen kleinen, inneren Bereich konzentriert ist
  - Praktisch **keine Rotationsanteile!**



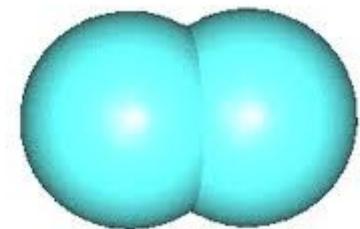
$$C_{p,1-atomig} \simeq \frac{5}{2}R = 20,79 \frac{J}{mol\ K} = C_{p,ideal}$$

# Spezifische Wärme (22)

Reale, zweiatomige Gase ( $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ , ...)

- Fast identische Molwärmen

$$C_{p,2\text{-}atomig} \simeq 29,3 \frac{J}{mol K}$$



- Zusätzlicher Anteil zur **Deckung der Rotationsenergie**:

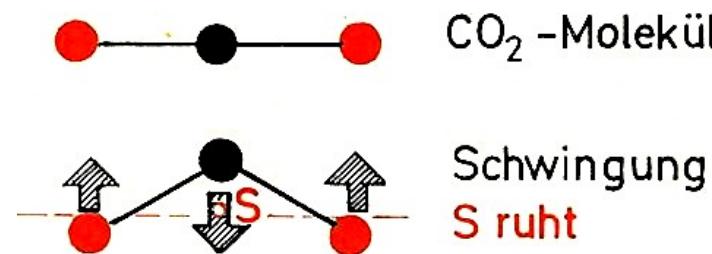
$$C_{p,2\text{-}atomig} \simeq C_{p,ideal} + C_{p,rot} = \frac{5}{2}R + R = 29,3 \frac{J}{mol K}$$

$$C_{p,2\text{-}atomig} \simeq \frac{7}{2}R = \underbrace{\frac{3}{2}R}_{Translation} + \underbrace{\frac{R}{Volumsarbeiten}}_{Rotation} + \underbrace{\frac{R}{Rotation}}$$

# Spezifische Wärme (23)

Reale, mehratomige Gase ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ -Dampf ...)

- Durchwegs **noch höhere** Molwärmen
- Zusätzliche Energie zur Deckung der **Intramolekülschwingungen** nötig



# Spezifische Wärme (24)

## Beispiele - verschiedene Gase

Stoff	$C_p$ in J/kg K	$C_p$ in J/mol K
He	5233	20,95
Ar	523	20,90
Kr	248	20,78
Xe	160	21,00
Hg-Dampf	104	20,80

Stoff	$C_p$ in J/kg K	$C_p$ in J/mol K
$H_2$	14300	28,83
$Cl_2$	473	33,54
$N_2$	1041	29,16
$O_2$	917	29,34
$CO_2$	837	36,84
$CH_4$	2219	35,60
$S0_2$	641	41,04
$NH_3$	2160	36,80

# Spezifische Wärme (25)

## Metalle

- **Fast alle Metalle haben ähnliche Molwärmen**

$$C_{p, \text{Metall}} \simeq 25 \frac{J}{\text{mol} \cdot K}$$

- **Zusätzliche Energie** zur Deckung der **mittleren potentiellen Energie** bei der Brown'schen **Schwingungen um die Gleichgewichtslagen** im Kristall erforderlich!

$$C_{p, \text{Metall}} \simeq 2 \cdot C_{v, \text{ideal}} = 3R \quad \text{Regel von Dulong-Petit}$$

- **Volumsarbeiten vernachlässigbar klein!**
- **Ausnahmen:** z. B.: Diamant

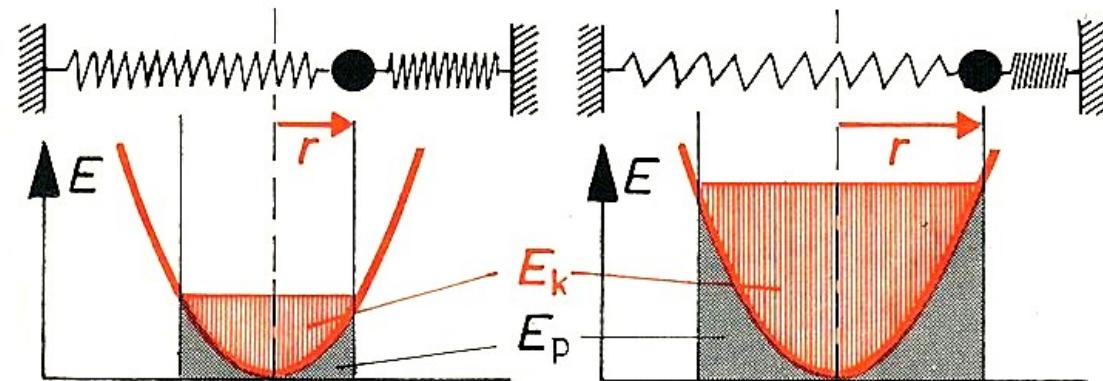
$$C_{p, \text{Diamant}} = 6,02 \frac{J}{\text{mol} \cdot K}$$

Nur für den schulinternen Gebrauch!

# Spezifische Wärme (26)

## Beispiele - Metalle

Substance	Molar C J/mol K
Aluminum	24.3
Bismuth	25.7
Copper	24.5
Gold	25.6
Lead	26.4
Silver	24.9
Tungsten	24.8
Zinc	25.2



# Wärmeübertragung (1)

Rückblick - "0." Hauptsatz:

- Kontakt von Körpern unterschiedlicher Temperatur führt zu einem **Temperaturausgleich**
- Wärme fließt dabei immer **vom wärmeren zum kälteren Körper**
- Ausgleich findet **selbstständig** statt!

Wie funktioniert Wärmetransport?

- **Drei Mechanismen:**
  - **Wärmeleitung → Brownsche Bewegung**
  - **Wärmeströmung → Materialtransport**
  - **Wärme(ab)strahlung → Elektromagnetische Strahlung**

# Wärmeübertragung (2)

## Wärmeleitung

- Wärmefluss durch einen Körper

Querschnitt  $A$

Länge  $d$

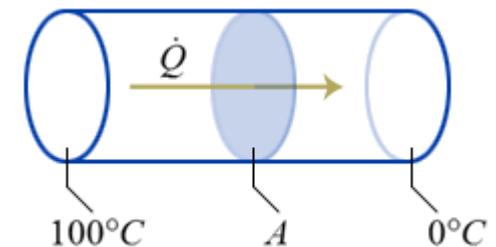
Temperaturdifferenz  $\Delta T$

Wärmemenge  $Q$

- Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$

Einheit:

$$[\lambda] = \frac{W}{m \cdot K}$$



Material	$\lambda$ [W/mK]
Kupfer	401
Messing	120
Aluminium	237
Stahl	46
Eisen	80
Holz	0,15

# Wärmeübertragung (3)

Wärmestrom  $\Phi$

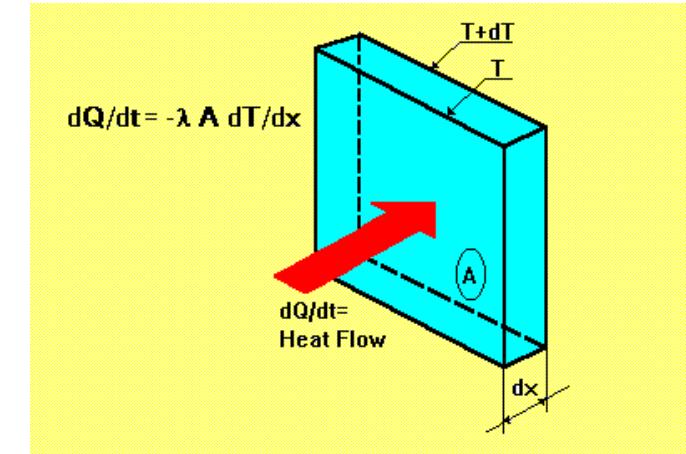
= Transportierte Wärmemenge pro Zeiteinheit

$$\Phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad [\Phi] = \frac{J}{s} = W$$

$$\Phi = \lambda \cdot \frac{A}{d} \cdot \Delta T$$

- Gilt **nur für  $\Delta T = \text{const.}$** 
  - Differentiell:

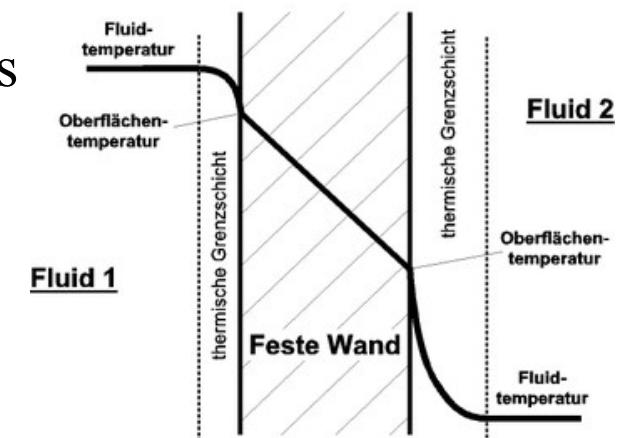
$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt}$$



# Wärmeübertragung (4)

## Wärmedurchgang

- Wärmetransport zwischen Medien
  - Beispiel: Außenwand eines Hauses
    - Wärmeübergang Innenluft - Wand
    - Wärmeleitung durch die Wand
    - Wärmeübergang Wand - Außenluft
  - Wärmeübergangszahl  $\alpha$ :
  - Wärmedurchgangskoeffizient  $u$



$$\Phi = u \cdot A \cdot \Delta T \quad u = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{d}{\lambda}} \quad [u] = \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

# Wärmeübertragung (5)

## Hausübung

Rauchgas von  $600^\circ\text{C}$  durchströmt ein gusseisernes Rohr ( $\lambda = 45\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ). Das Rohr ist  $6\text{m}$  lang hat einen (mittleren) Durchmesser von  $100\text{mm}$  und  $5\text{mm}$  Wandstärke.

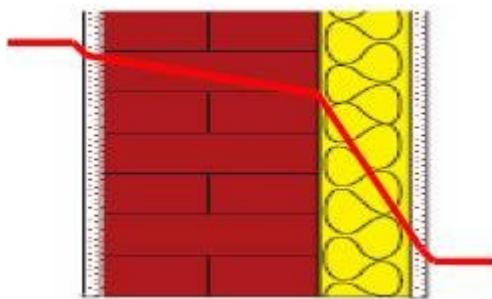
Außerhalb des Rohres befindet sich Wasser von  $151^\circ\text{C}$ . Die Wärmeübergangs-zahl innen (Rauchgas-Rohr) ist  $19\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ , die Wärmeübergangszahl außen (Rohr-Wasser) ist  $6\text{kW}/(\text{m}^2\text{K})$ .

- Wie groß ist der Wärmedurchgangskoeffizient?
- Wie groß ist der Wärmestrom?
- Wie ist der Temperaturverlauf Gas / Rohrinnenseite / Rohraußenseite / Wasser (Grenzschichten berücksichtigen!)
- Was ändert sich, wenn sich an der Außenseite des Rohres  $1\text{mm}$  Kesselstein bildet, welcher eine ca.  $400$  mal kleinere Wärmeleitfähigkeit als das Rohr hat?

# Wärmeübertragung (6)

## Wärmedämmung:

- Vermeidung von **nutzlosem Abfließen** von Energie
  - **Energiekosten** senken
- Grundsätzliches Verfahren: **viele Schichten**
  - **Gesamtwärmedurchgangskoeffizient:**

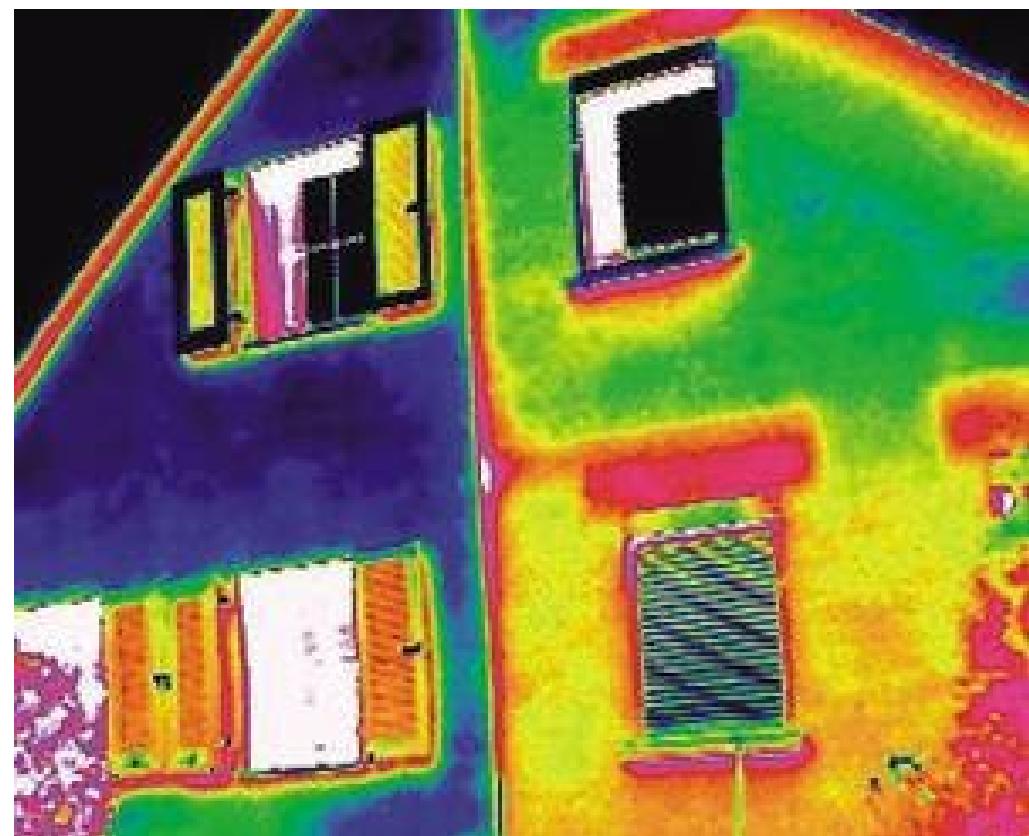


$$\frac{1}{u} = \sum \frac{1}{\alpha} + \sum \frac{d}{\lambda}$$

- Flüssigkeiten (gegenüber Gasen **großes  $\alpha$** ) vermeiden!
- **Viele dünne Schichten** → **poröses** Material
- Dicke, zusammenhängende Schichten **vermeiden**
  - **Konvektion**

# Wärmeübertragung (7)

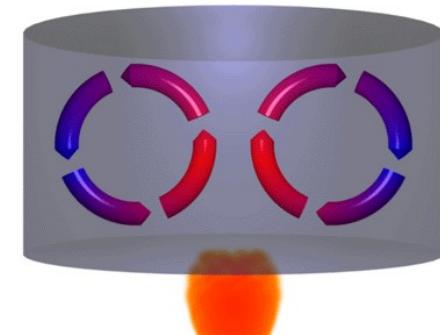
Beispiel: Halbseitig gedämmtes Haus



# Wärmeübertragung (8)

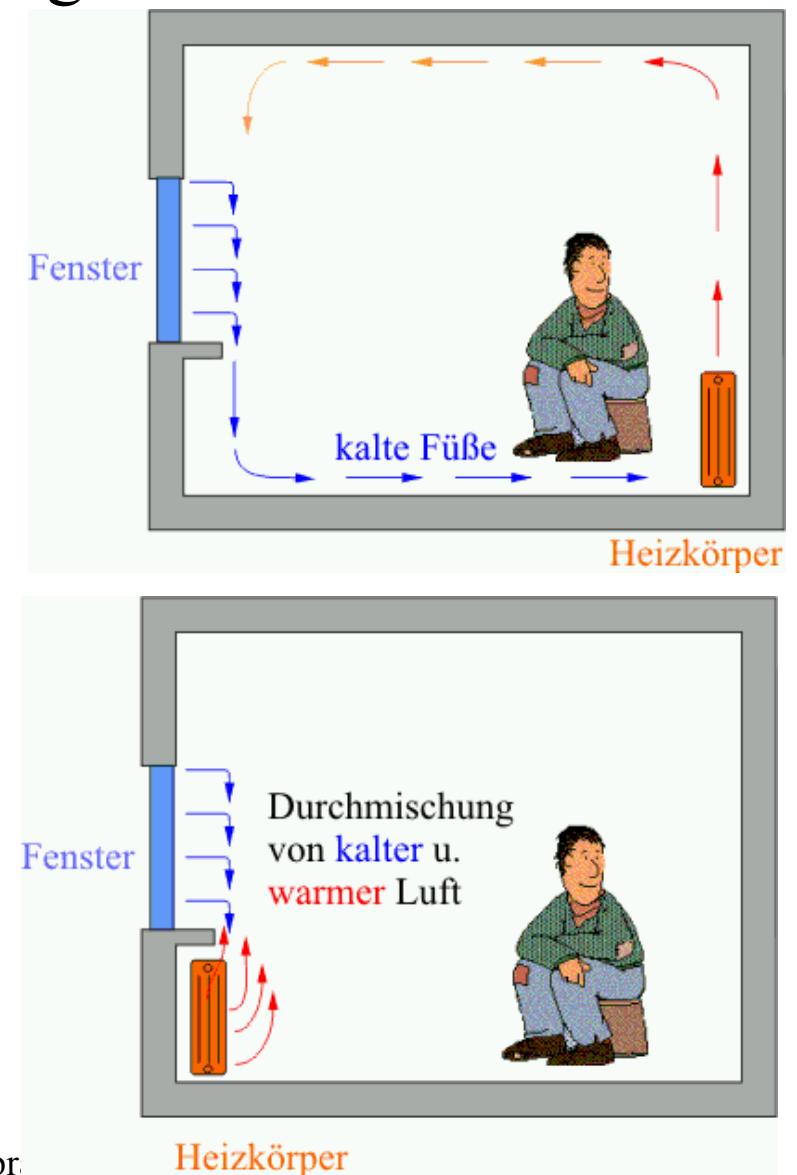
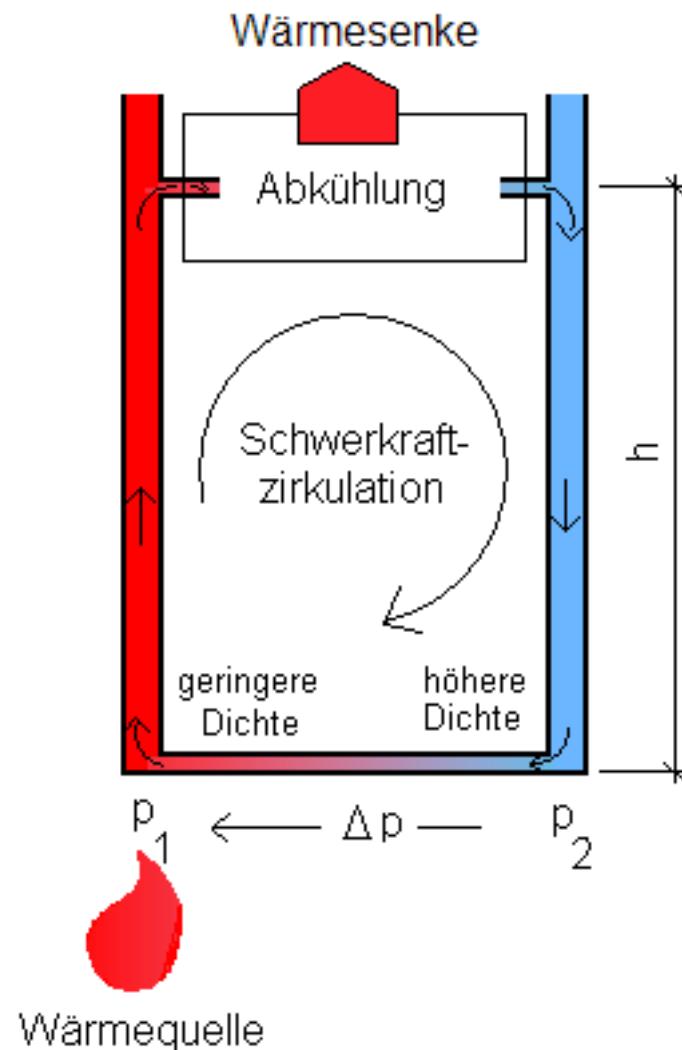
## Wärmeströmung (Konvektion)

- **Energietransport** (Wärme) durch **Materietransport**
- In der Regel nur in **Gasen und Flüssigkeiten** (**Fluiden**)
- Unterscheidung:
  - **Freie (natürliche) Konvektion**
    - Verursacht durch **Temperatur- bzw. Dichteunterschiede** im Medium
    - **Schwerkraftzirkulation**
  - **Erzwungene Konvektion**
    - Materiestrom wird durch technische Einrichtungen **aufgezwungen** bzw. **unterstützt**
    - Pumpen / Gebläse



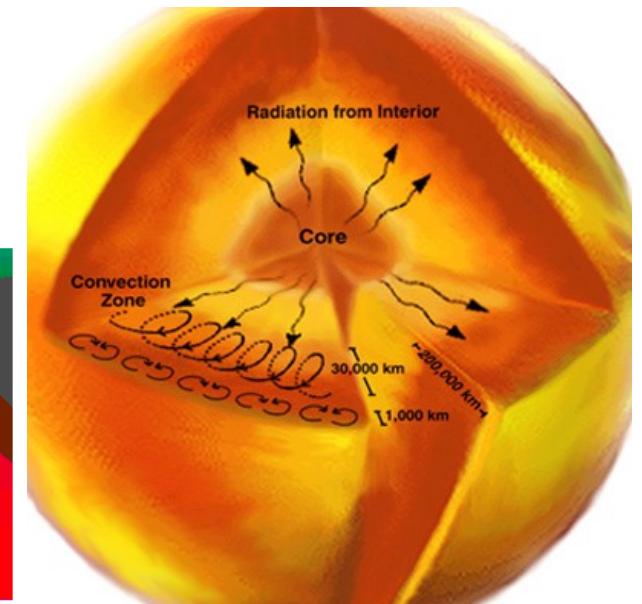
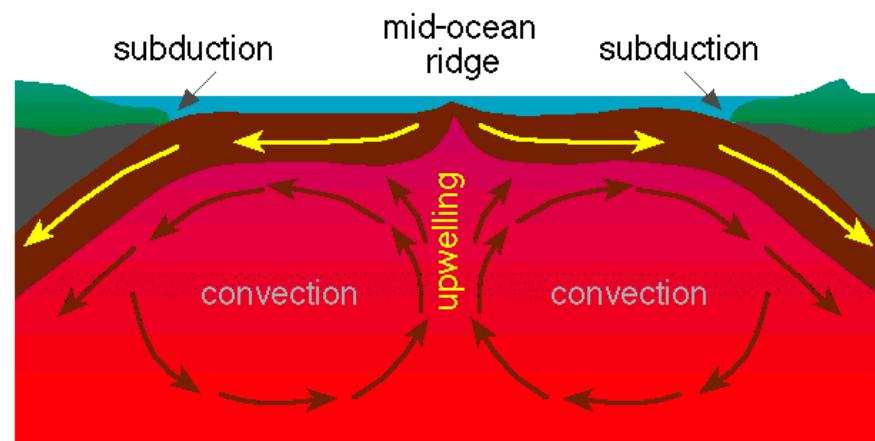
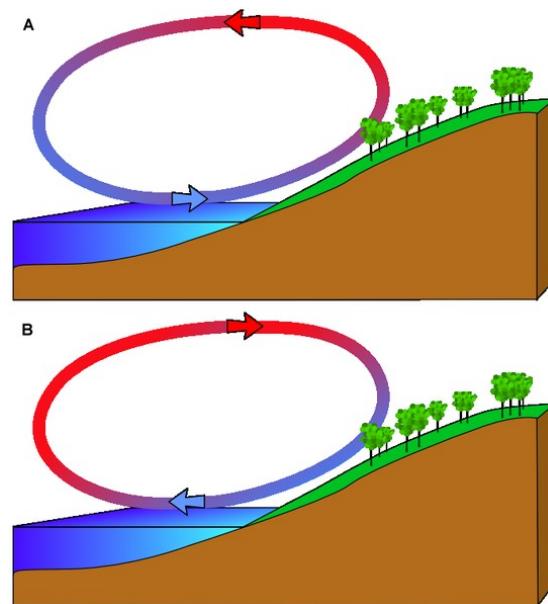
# Wärmeübertragung (9)

- Freie Konvektion - Beispiel Heizung:



# Wärmeübertragung (10)

Beispiele: Freie Konvektion in der Natur



**Land-See-Windsystem**

**Erdmantelkonvektion**

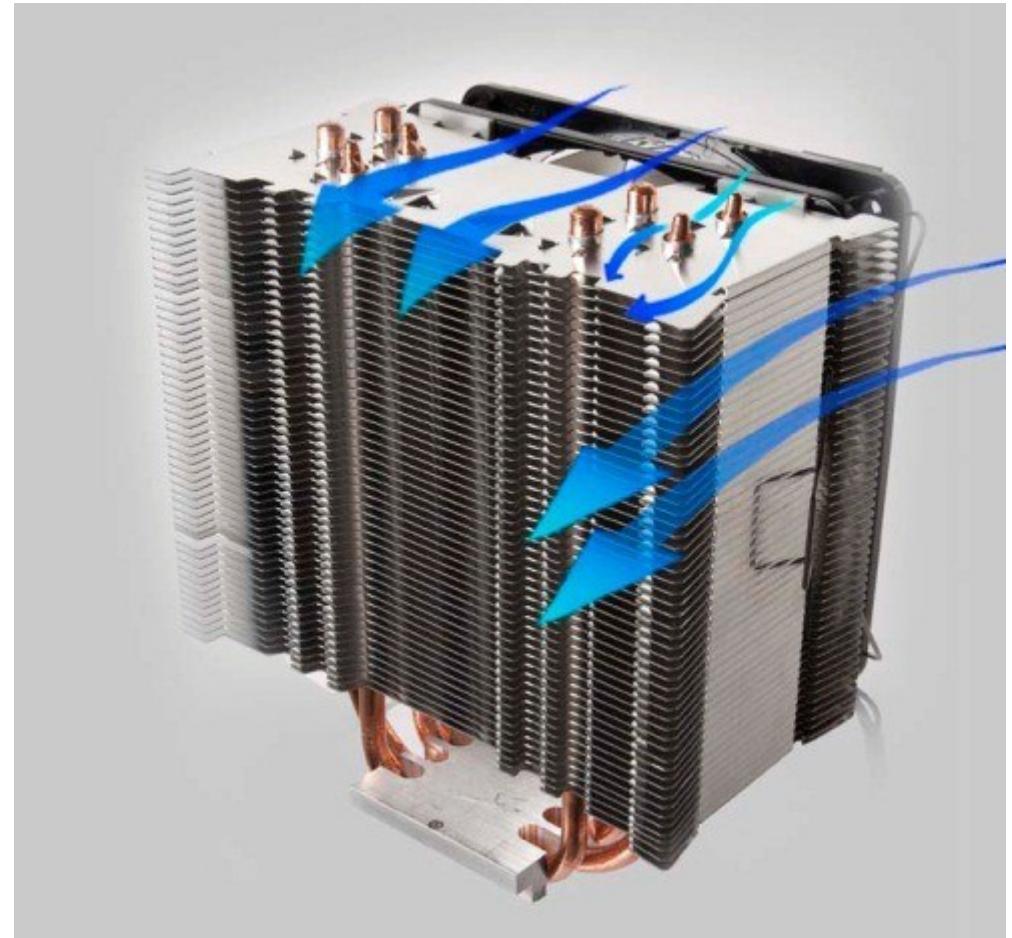
**Konvektionszonen der Sonne**

# Wärmeübertragung (11)

Beispiel: Erzwungene Konvektion

Entwärmung von Prozessoren:

Ventilator bläst kühle Luft durch  
Bleche des Kühlkörpers

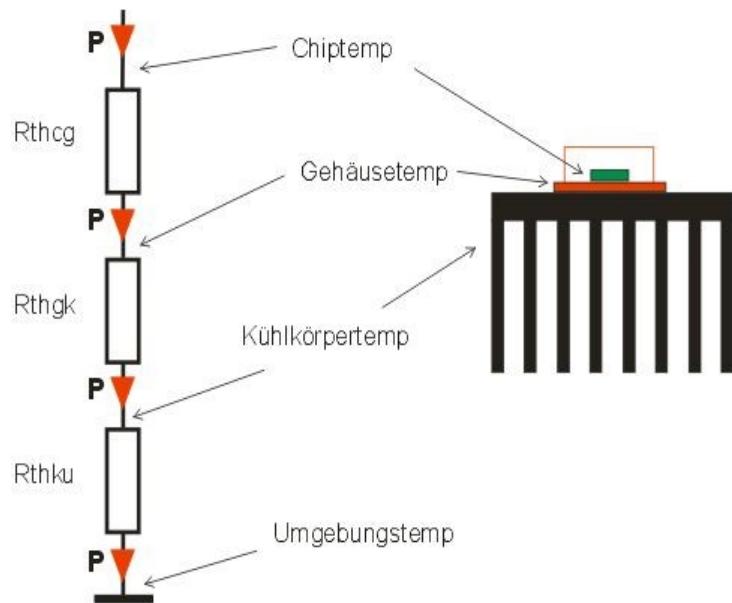


# Wärmeübertragung (12)

## Thermischer Widerstand

- Wärmestrom:
- "Ohm'sches" Gesetz der Wärmeleitung:

$$\Phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \underbrace{\lambda \cdot \frac{A}{d}}_{1/R_{th}} \cdot \Delta T$$



$$\Delta T = R_{th} \cdot \Phi$$

$$R_{th} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{d}{A} = \rho_{th} \cdot \frac{d}{A}$$

$\rho_{th}$ .....spezifischer Wärmewiderstand