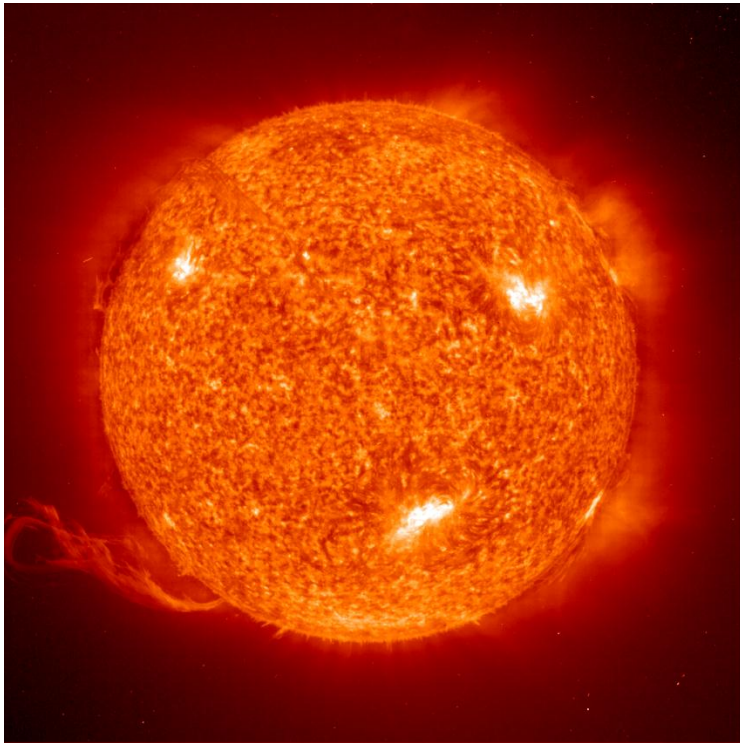


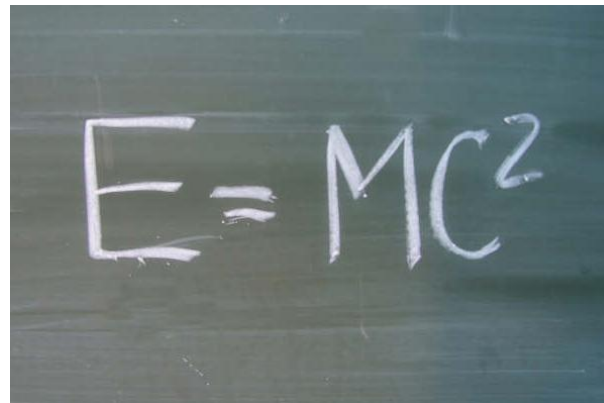
Konzeptvorlesung

1. Jahr – Block 1



ENERGIE

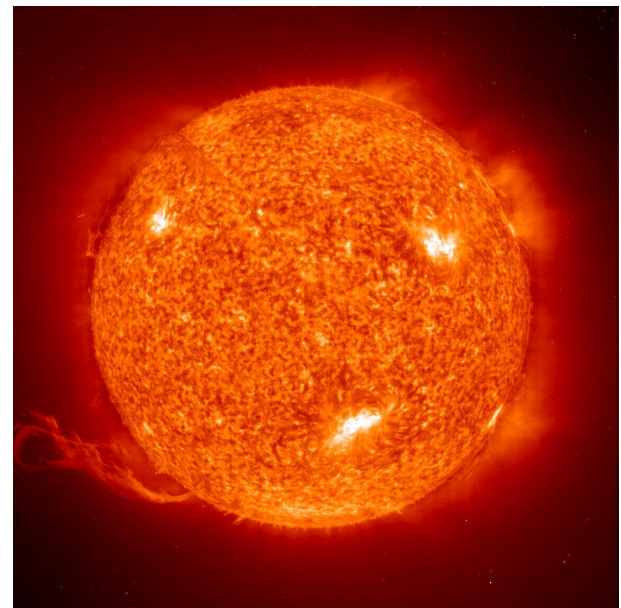
Prof. Fortunat Joos


$$E = MC^2$$

Erhaltungssatz der Energie

Die Gesamtenergie eines abgeschlossenen Systems ist eine Erhaltungsgrösse.

Leben nur möglich durch
äussere Energiezufuhr



Formen der Energie

- Bewegung
- Potentielle
- Innere Energie
- Strahlung
- Bindungsenergien (chemische, Atomkern)
- Masse

**Können ineinander
umgewandelt werden**

Potentielle Energie, Arbeit, Kraft, Leistung

Arbeit = Kraft mal Weg:

F: Kraft [Newton, N], x: Weg [m]

$$W = \int_{\vec{x}_1}^{\vec{x}_2} \vec{F}(\vec{x}) \cdot d\vec{x}$$

Potentielle Energie:

Arbeit/Energie bezüglich eines Referenzpunktes (hier x=0) [Joule, J]

$$E_{pot}(\vec{x}_i) = - \int_0^{\vec{x}_i} \vec{F} \cdot d\vec{x}$$

Leistung

(geleistete Arbeit W pro Zeitintervall, Δt)

[Watt]; [J s⁻¹]

$$P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

Beispiel: Potentielle Energie

Arbeit W um eine Masse m
von Höhe h_1 auf Höhe h_2 zu heben
(g : Erdbeschleunigung):

$$F = m g$$

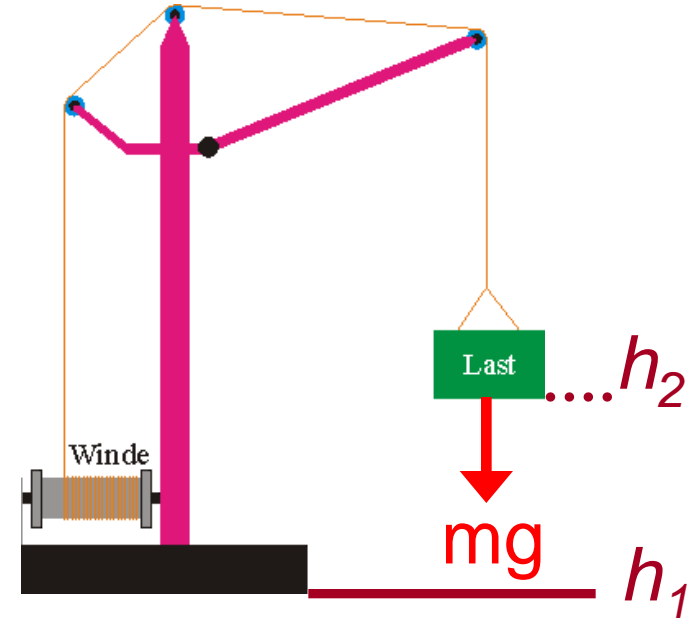
$$W = \text{Kraft} \times \text{Weg} = m g (h_2 - h_1)$$

*Arbeit = Unterschied in der
Potentiellen Energie*

$$W = E_{\text{pot}}(h_2) - E_{\text{pot}}(h_1)$$

Potentielle Energie:

$$E_{\text{pot}} = m g h$$



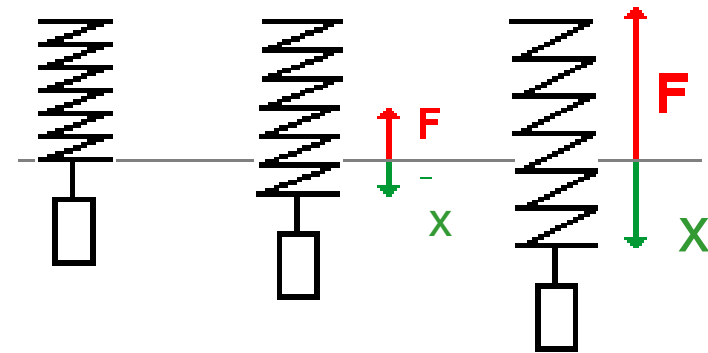
$$E_{\text{pot}}(\vec{x}_i) = - \int_0^{\vec{x}_i} \vec{F} \cdot d\vec{x}$$

Beispiel: Potentielle Energie

Auslenkung einer Feder aus der Ruhelage ($x=0$), D : Federkonstante

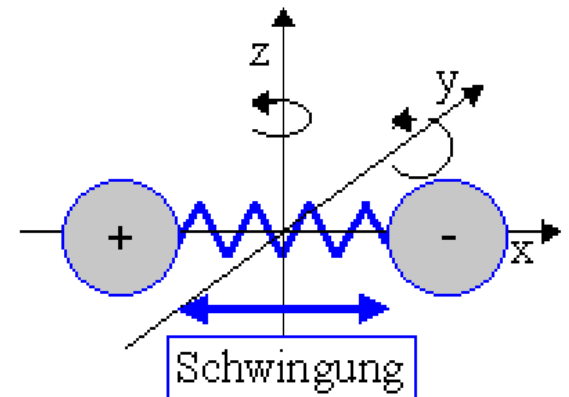
Federkraft $\vec{F} = -D \cdot \vec{x}$

Potentielle Energie der Feder mit Def. Epot: $E_{pot}(\vec{x}_i) = -\int_0^{\vec{x}_i} \vec{F} \cdot d\vec{x}$



$$E_{Feder} = \frac{D}{2} x^2$$

Analog: Auslenkung
Atome in Molekül

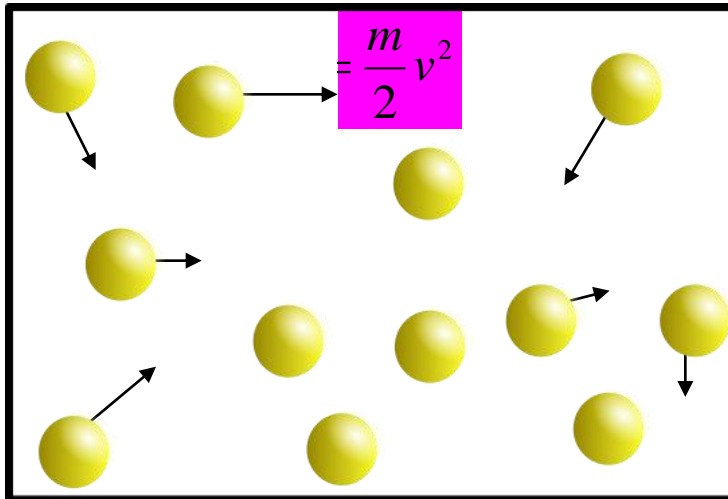


Energieformen: kinetische Energie

Kinetische Energie der Translation
(m: Masse [kg], v: Geschwindigkeit) [m s⁻¹]

$$E_{kin} = \frac{m}{2} v^2$$

v



Atome in einem
Gas haben
kinetische Energie

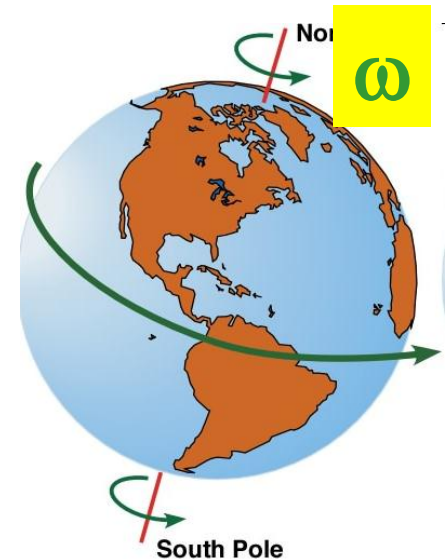
Energieformen: kinetische Energie

Kinetische Energie der Rotation

$$E_{Rot} = \frac{I}{2} \omega^2$$

ω : Winkelgeschwindigkeit [rad s⁻¹]

I : Massenträgheitsmoment [kg m²]



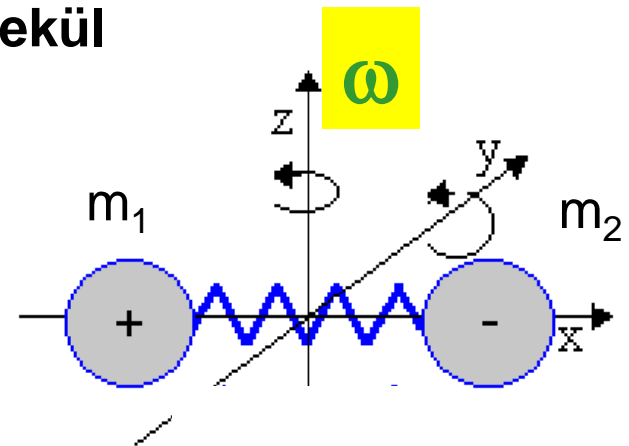
Zum Trägheitsmoment: Bsp. 2-atomiges Molekül

I : Trägheitsmoment
für n Massenpunkte:

$$I = \sum_{i=1}^n r_i^2 \cdot m_i$$

m_i : Masse des
Massenpunktes i

r_i : Abstand zur Drehachse
des Massenpunktes i



$$I_z = x_1^2 m_1 + x_2^2 m_2$$

BESTÄTIGUNG DURCH EXPERIMENT

*Kann Potentielle Energie in
Bewegungsenergie umgesetzt werden?*

*Kann Bewegungsenergie in
Potentielle Energie umgesetzt werden?*

Experiment: Energieumwandlung

$$E_{pot}(h) = mgh$$

Potentielle Energie: h

$$E_{kin} = \frac{m}{2} v^2$$

Translationsenergie

Translationsenergie

$$E_{Feder} = \frac{D}{2} x^2$$

Potentielle Energie: Feder

Reibung und Wärme

Ohne Reibung:

Erhaltung der mechan. Energie

→ $E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = \text{konstant}$

Mit Reibung:

Umwandlung in **Wärme**

→ $E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}}$ nehmen ab
Wagen kommt zum Stillstand

Bsp: Reibung

durch Auflagekraft mg

$$E_{\text{Reibung}} = F_{\text{Reibung}} \cdot s = \mu mg \cdot s$$

s : horizontale Strecke, μ : Reibungskoeffizient,
 mg : Auflagekraft, m : Masse, g : Erdbeschleunigung

Wärme und Temperatur

Wärmezufuhr Q zu einem Körper erhöht dessen **Temperatur T** [Kelvin, K].

$$Q = E_{\text{Wärme}} = c \cdot m \cdot \Delta T$$

c : Wärmekapazität (für Wasser 4.18kJ/(kg K))

m : Masse; ΔT : Temperaturunterschied



Wärmezufuhr zu einem Körper erhöht dessen **innere Energie $E_{\text{Thermisch}}$** .

$$Q = \Delta E_{\text{Thermisch}}$$

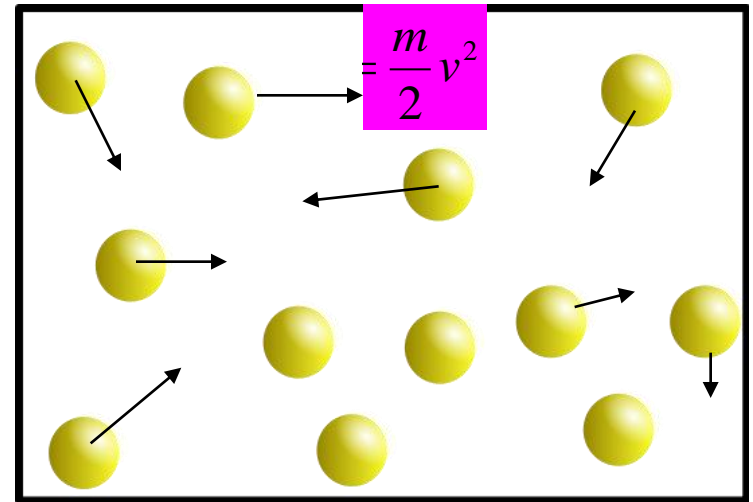
Innere Energie wird oft auch mit U bezeichnet

Wärme, Temperatur und innere Energie

Innere Energie eines einatomigen Gases

Mittlere kinetische Energie pro Atom eines idealen Gases mit der Temperatur T:

$$E_{\text{thermisch}} = \frac{3}{2} kT$$

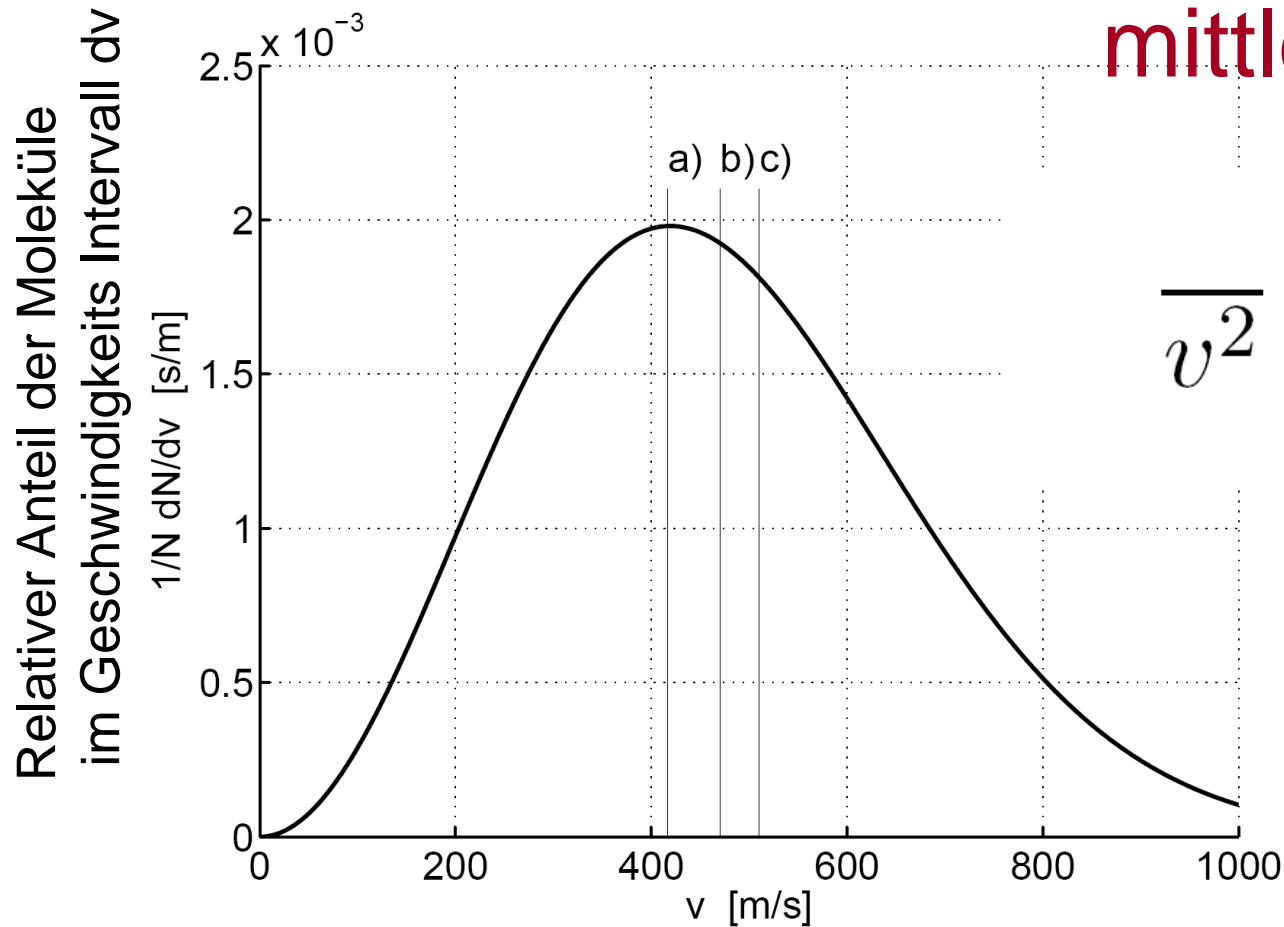


Temperatur ist ein Maß für die Bewegungsenergie der Atome/Moleküle

k: Boltzmannkonstante $k=1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T: Temperatur in K

Geschwindigkeitsverteilung der Atome eines Gases



mittlere $E_{kin} \sim T$

$$\overline{v^2} = \frac{3 k T}{m} .$$

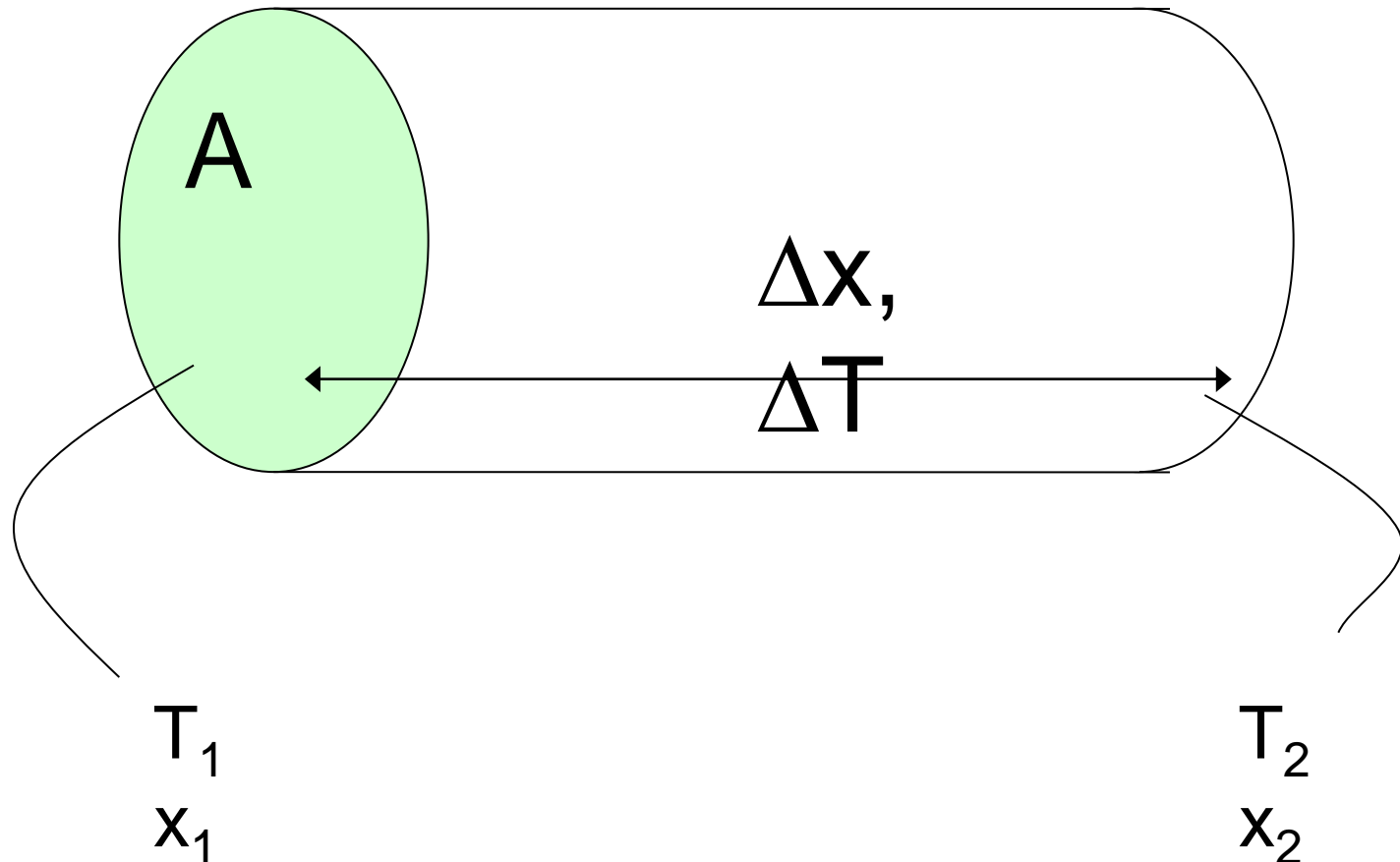
Konsequenz der Molekülbewegung und der Äquivalenz von Temperatur und kinetischer Energie der Moleküle:

Kinetische Energie der Teilchen wird durch Stöße auf benachbarte Teilchen übertragen

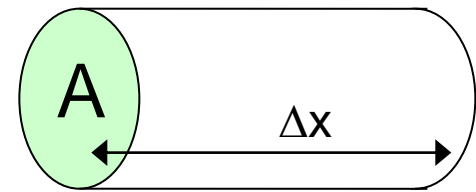
Lokales Erhitzen -> höhere Temperatur
= höhere mittlere kin. Energie der Moleküle

Übertrag von Wärme/Temperatur/kinetischer Energie durch Stöße zwischen den Molekülen

Wärmeleitung: Beschreibung auf makroskopischer Ebene



Transportgleichungen



Prozess	Ursache / Gradient	Transportierte Grösse	Transport pro Querschnittsfläche und Zeitintervall
Wärmeleitung	Temper., T $\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1}$	Wärme Q	Wärmestrom $\frac{\Delta Q}{A \Delta t} = -K \frac{\Delta T}{\Delta x}$

Ursache der Wärmeleitung sind Stösse der Moleküle

K: Wärmeleitfähigkeit [Watt/K]

Wie kann Wärme transportiert werden?

Wärmeleitung: kinetische Energie wird durch Stöße der Moleküle weitergegeben

Konvektion: Das Blut bringt Wärme in die kalten Zellen (Volumenstrom durch Herz gepumpt)

Strahlung: Körper senden Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung aus.

Leistung, P :

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4 = \frac{E_{\text{Strahlung}}}{\Delta t}$$

Übertragung auch im Vakuum möglich (Sonne-Erde)

σ : Stefan-Boltzman Konstante ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$), Δt : Zeitintervall [s]

A: Oberfläche des Körpers [m^2]; T: Oberflächentemperatur [K]



Die 3 Wärmearten:
Wärmeströmung, Wärmeleitung, Wärmestrahlung

Energie von Photonen

Die Energie der elektromagnetischen Strahlung wird in Form von Photonen transportiert

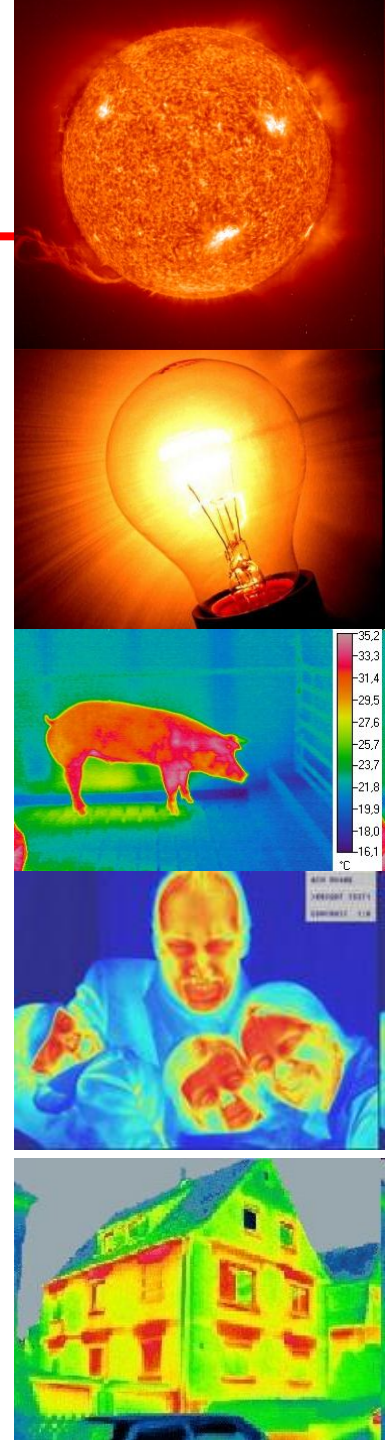
Energie eines Photons mit Frequenz f [s⁻¹] und Wellenlänge λ [m]:

$$E_{\text{Photon}} = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

h : Planck'sches Wirkungsquantum

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

c : Lichtgeschwindigkeit (im Vakuum: $3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$)



Exp: Energieumwandlung Lampe

Leistung des
elektrischen Stroms:
 $P = \text{Energie} / \Delta t = RI^2$

(R: el. Widerstand, I: el. Strom)

Licht/
elektromagnetische
Strahlung

Wärmeenergie, Q, und
Temperaturänderung ΔT

$$\Delta T = Q / (c m)$$

Phasenübergänge

Ein Körper zu schmelzen oder eine Flüssigkeit verdampfen benötigt Wärme/Energie:

$$E_{Schmelz} = Q = q_s \cdot m$$

$$E_{Verdampf} = Q = q_v \cdot m$$

Für Wasser: $q_s = 336 \text{ kJ/kg}$
 $q_v = 2256 \text{ kJ/kg}$

Spezifische Schmelzwärme, q_s , rund 7 mal kleiner als spezifische Verdampfungswärme, q_v !



Isobare Kompression/Expansion

Das komprimieren ($\Delta V < 0$) eines Gases (mit Druck p) braucht Energie (Zufuhr von Arbeit; Arbeit wird am Gas geleistet: $W > 0$)

Für $p = \text{konstant}$:
$$\Delta E_{\text{Druck}} = W = -p\Delta V$$

CO₂ Versuch:

- CO₂ strömt aus Flasche in Sack
- Beim Ausdehnen leistet das Gas Arbeit an der Umgebung ($W < 0$).
- Abkühlung wegen Energieerhaltung

Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik: Energieerhaltung

Zufuhr von Arbeit + Wärme zu einem Gas
= Zunahme der inneren Energie

$$\Delta E_{\text{innen}} = \Delta W + \Delta Q$$

$$\text{Bsp: } \quad = -p\Delta V + \Delta Q$$

Verschiedene Bezeichnungen für innere Energie:

$$U, E_{\text{innen}}, E_{\text{thermisch}}$$

ANHANG

Zur Erinnerung

Potentielle Energie eines
geladenen Kondensators
Mit Kapazität C

$$E_{\text{Kondensator}} = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

Energie ($E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}}$) eines e^-
im Bohrschen Modell des H-Atoms
(Quantenzahl $n=1,2 \dots$)

$$E_n = -13.6 \text{eV} \frac{1}{n^2}$$

Einstein's Aequivalenz von Energie und Masse

Gesamte Energie einer Masse m :

$$E = mc^2$$

Lichtgeschwindigkeit:

$c=299792456$ m/s

Entropie S

- Die Entropie S eines Systems verhält sich wie eine Zustandsvariable (Druck, Temperatur, Energie) eines Systems. Das heisst, bei einem umkehrbaren (reversiblen) Prozess bleibt S konstant.

Definition:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

Q: Wärme

T: Temperatur in K

2. Hauptsatz der Thermodynamik

In einem geschlossenen System nimmt die Entropie immer zu und erreicht das Maximum mit dem thermodynamischen Gleichgewichtszustand

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \geq 0$$

Q: zugeführte Wärme

T: Temperatur in K

Energieformen

- Kinetische
Translation,
Rotation
- Potentielle
- Innere Energie
- Wärme
- Strahlung
- Bindungsenergie
- Masse

**Können ineinander
umgewandelt werden**

Gesetze

1. Hauptsatz
**Energie-
erhaltung**
2. Hauptsatz
**Entropie-
Zunahme**

Beziehungen

- Mechanik $mgh + \frac{m}{2}v^2 + E_{Rot} + \text{Reibungsw\u00e4rme} = \text{konstant}$

- Erw\u00e4rmung $\Delta Q = c \cdot m \cdot \Delta T$

- W\u00e4rmebewegung
(Innere Energie eines 1-atom. Gas) $E_{kin} = \frac{3}{2}kT = E_{innen}$

- Energiesatz der
Thermodynamik $\Delta E_{innen} = \Delta W + \Delta Q$

-Strahlung $E_{Photon} = hf = \frac{hc}{\lambda}$

- Masse $E = mc^2$