

Physik für Studierende der Medizin im 1. Fachsemester

(PFMF-V); 09410100

Dienstag mit Freitag 8.15-9.00

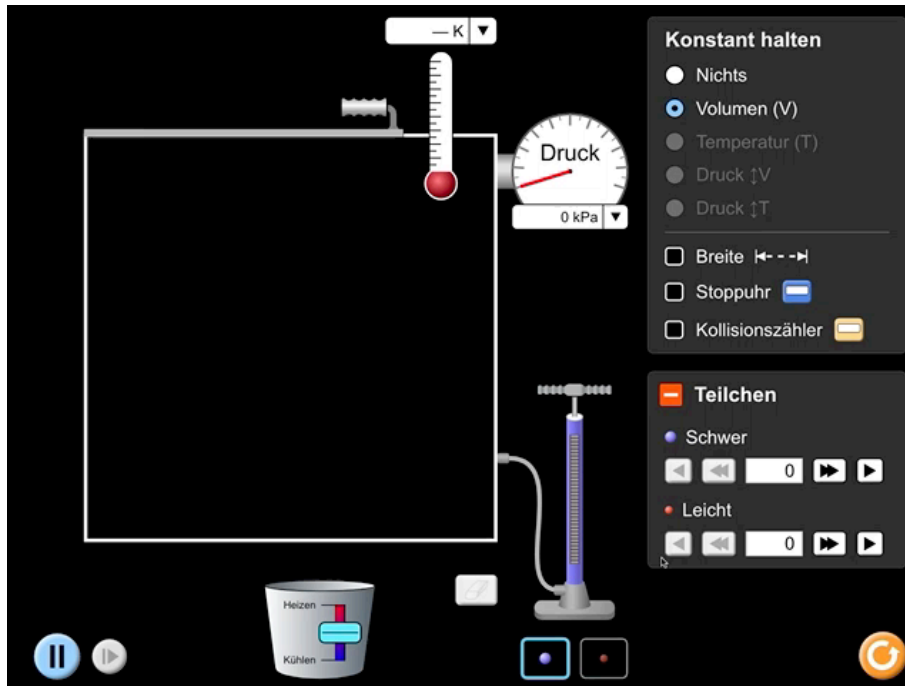
Wärmelehre Teil 2 am 27.04.2021



Dr. Simon Moser
Lehrstuhl für Exp. Physik IV
Universität Würzburg
simon.moser@physik.uni-wuerzburg.de



Wiederholung: Temperatur & Wärme



$$\langle E_{kin} \rangle = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} kT$$

k = Boltzmannkonstante;
 $k = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
 T = Temperatur in K
(Kelvin), skalare Größe
Einheit der Energie = Joule
bzw. Nm

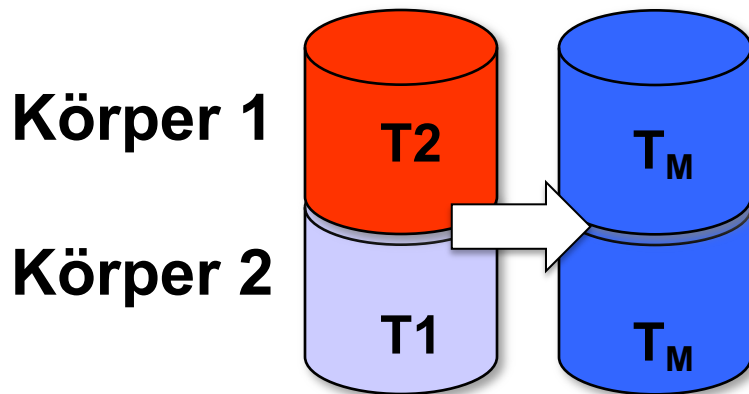
Wärme ist ungeordnete Molekülbewegung

- ① Thermische Bewegung einzelner (Gas-)Moleküle ist völlig zufällig & unabhängig
- ② Wärmeenergie ist **Bewegungsenergie** dieser ungeordneten Molekülbewegung, d.h. Wärme ist eine Form mechanischer Energie
- ③ **Temperatur** ist ein lineares Maß für den Mittelwert dieser Energie

Wiederholung: Thermisches Gleichgewicht

0. Hauptsatz der Thermodynamik:

Bringt man 2 Körper mit unterschiedlicher Temperatur in Kontakt, so nehmen sie nach einiger Zeit die gleiche Temperatur an. Der anfangs wärmere Körper kühlt sich ab und der anfangs kältere Körper wärmt sich auf. Beide Körper sind dann im **thermischen Gleichgewicht**.



$$Q_{\text{abgegeben}} = Q_{\text{aufgenommen}}$$

Richmannsche Mischungsregel:

$$T_1 < T_2$$

T_M = Mischungstemperatur

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

Wiederholung: Wärmekapazität

- ① Energiezufuhr ΔQ führt zu einer Temperaturerhöhung ΔT
- ② Temperaturanstieg ist abhängig von Stoff- und Masse

$$\Delta Q \propto \Delta T$$

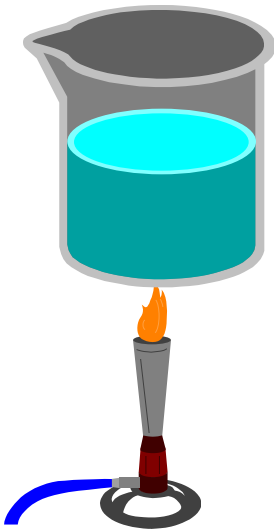
$$\Delta Q = C \cdot \Delta T$$

C = Wärmekapazität, *Einheit: J/K*

Die **Wärmekapazität C** ist ein Maß für die Wärme, die einem Körper zugeführt oder entzogen werden muss, um eine bestimmte Temperaturänderung ΔT hervorzurufen:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{Q_2 - Q_1}{T_2 - T_1}$$

Wasser & Behälter: C



Heizquelle (elektr.): ΔQ

C ist abhängig vom Stoff und seiner Masse!

Wiederholung: Wärmekapazität

Zahlenbeispiele für spezifische Wärmekapazitäten:

Stoff	$c / \text{J (kg K)}^{-1}$
Aluminium	$0,897 \times 10^3$
Kupfer	$0,385 \times 10^3$
Blei	$0,128 \times 10^3$
Wasser	$4,182 \times 10^3$
Benzol	$1,72 \times 10^3$
Quecksilber	$0,138 \times 10^3$

Hinweis: Wasser hat einen hohen c -Wert & eignet sich damit sehr gut als Wärmespeicher

Weltgrößter Wärmespeicher steht in Halle

Der neue Energiespeicher mit 40 Metern Durchmesser und 45 Metern Höhe bietet ein nutzbares Speichervolumen von 50.000 Kubikmetern. Er soll künftig Wärme speichern, die aus Überschussstrom produziert wurde.



Gase und ihre Eigenschaften

- fest/flüssige Stoffe ändern unter Einwirkung äußerer Kräfte kaum ihr Eigenvolumen
- \leftrightarrow Gase nutzen jedes Raumangebot (d.h. expandieren beliebig)
- \leftrightarrow Unter Einwirkung eines äußeren Druckes lassen sie sich bis zu einer gewissen Grenze auch beliebig komprimieren
- Gasdichte bei Normaldruck um ca. 10^3 kleiner als in der festen/flüssigen Phase:

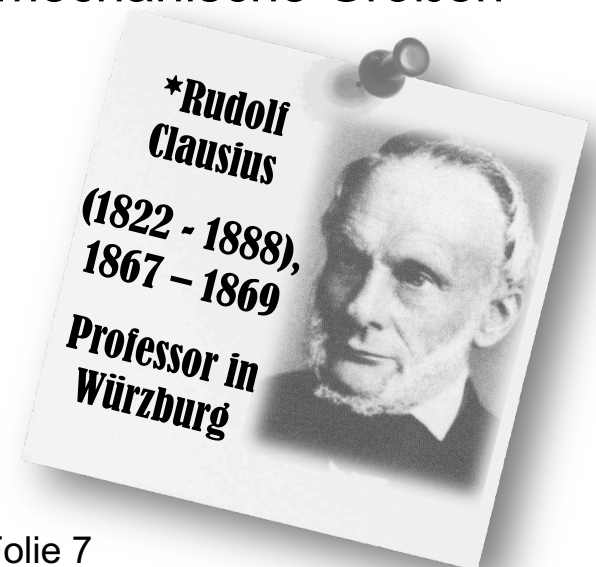
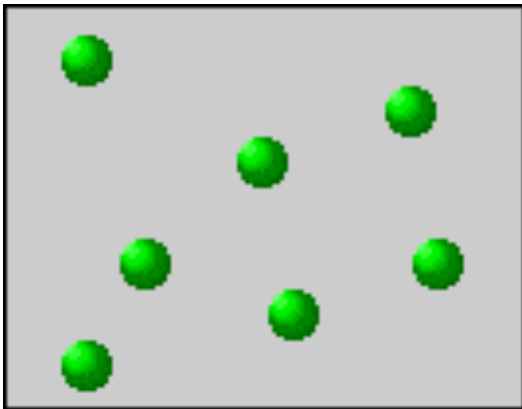
Mittlere Abstand der Teilchen ist ca. 10-mal größer:

Mittlere E_{kin} ist größer als die E_{pot} ihrer Wechselwirkung

Kinetische Gastheorie/ideales Gas

Grundlagen von *Boltzmann*, *Clausius**, *Maxwell* (19. Jhd.)

- **Kinetische Gastheorie:** Makroskopisch beobachtbare thermodynamische Eigenschaften eines Gases werden auf die Bewegung der Gasatome und deren regelmäßige Stöße zurückgeführt
- Exakte mathematische Betrachtung sehr komplex: Verwendung des vereinfachten **Modell des idealen Gases**, das aber die Grundidee und die wichtigsten physikalische Sachverhalte erfasst
- Die physikalische Größe, **Temperatur**, wird auf mechanische Größen zurückgeführt



Ideales Gas

Modellvorstellung des idealen Gases:

- ① Gasteilchen sind „punktförmig“ (kein Eigenvolumen)
- ② Gasteilchen üben keine gegenseitige Kräfte aus
- ③ Nur elastische Stöße untereinander bzw. mit der Wand
- ④ Gasteilchen führen **statistisch ungeordnete Bewegungen** aus

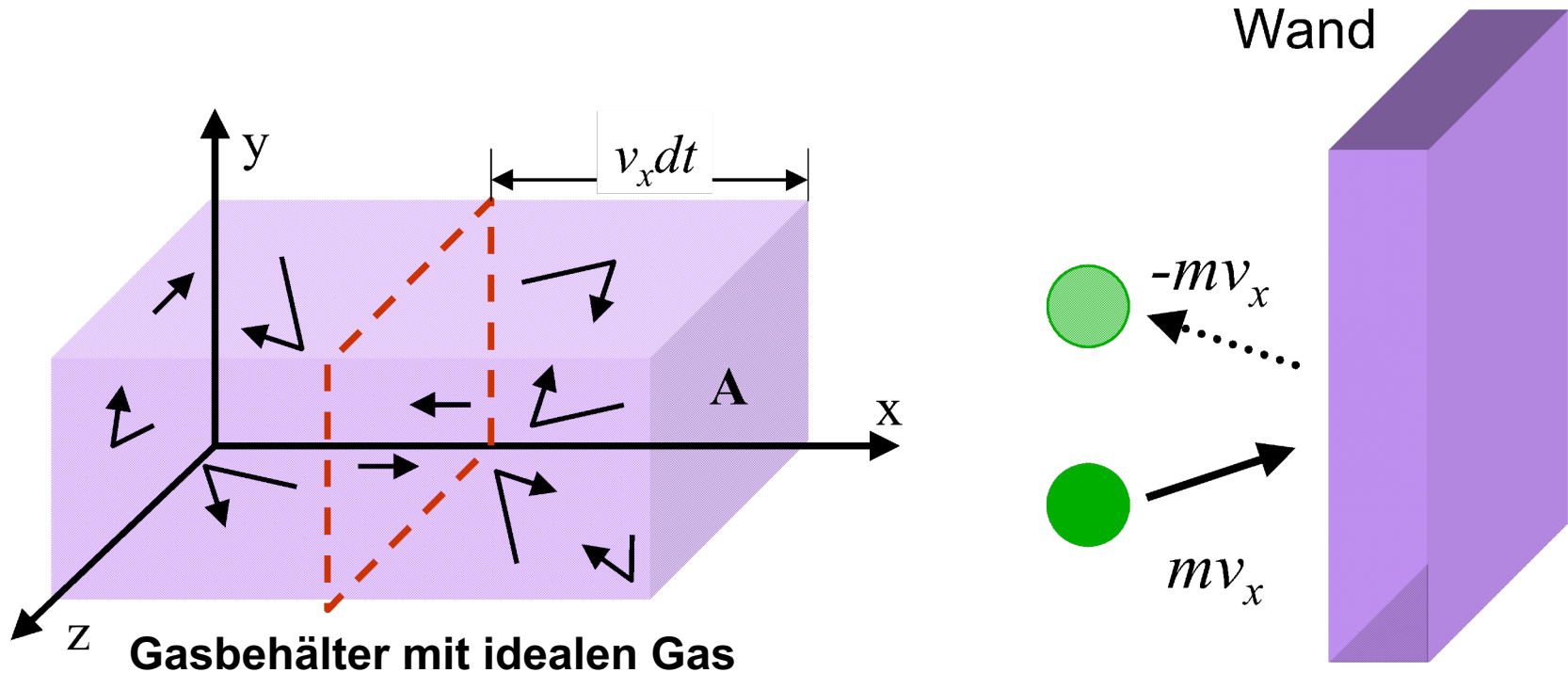
Modell hinreichend gut erfüllt für viele Gasarten bei hohen Temperaturen und niedrigem Druck !



Ideales Gas: <https://phet.colorado.edu/de/simulation/legacy/gas-properties>

Modell des idealen Gases

Der Druck P eines Gases auf die Behälterwand wird durch (elastische) Stöße der Gasteilchen ausgeübt.



Druck = Kraft/Fläche

Modell des idealen Gases

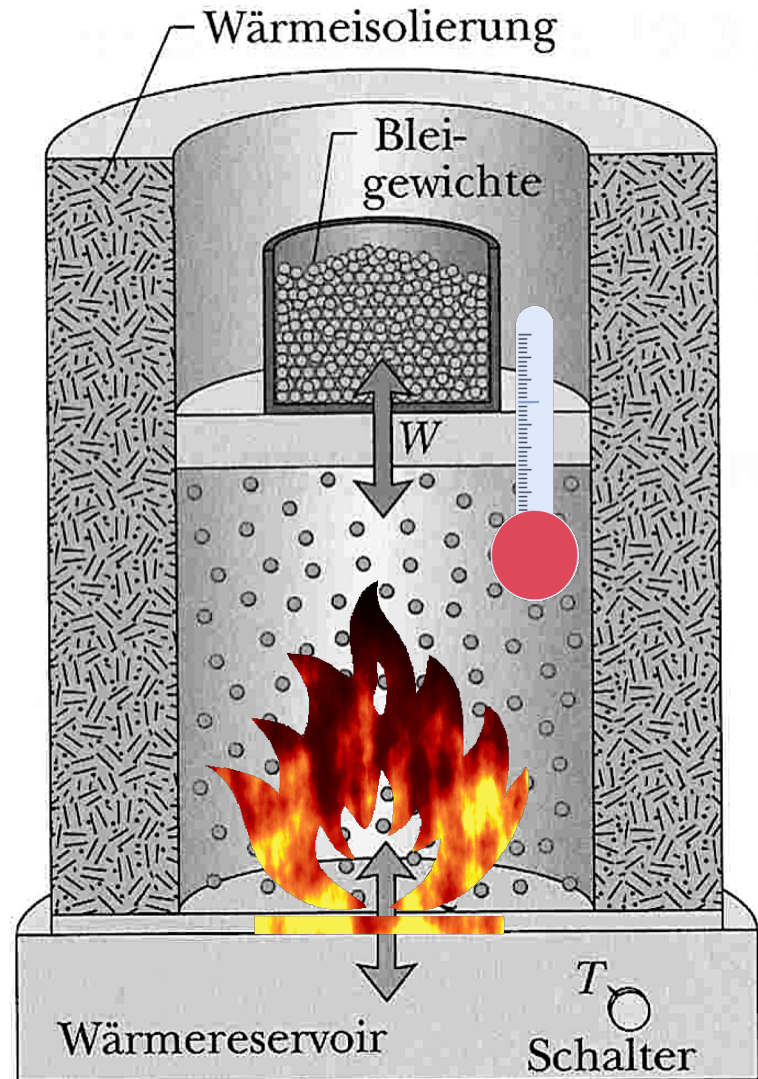
Modellvorstellung des idealen Gases:

- ① Je höher die **Temperatur T** , desto höher die mittlere Geschwindigkeit der Molekül!

$$\langle E_{\text{Bewegung}} \rangle = \frac{3}{2} kT$$

- ① Der **Druck p** eines Gases auf die Behälterwand wird durch (elastische) Stöße der Gasteilchen ausgeübt!

$$p = \frac{F}{A}$$



Zustandsgrößen von Gasen

- **Zustand eines Systems** = Gesamtheit seiner Eigenschaften, die durch äußere Bedingungen festgelegt sind
- **Zustandsgrößen** = thermodynamische Größen, die unabhängig sind von:
 - der sonstigen Beschaffenheit eines Körper
 - der Vorgeschichte:

Druck p
Volumen V
Temperatur T

- **stationärer Zustand** = Ändern sich die Eigenschaften eines Systems nicht mit der Zeit = Gleichgewichtszustand
(bestimmt durch Angabe von p , V , T)
- **Zustandsgleichung:**
 - Beschreibt den Zustand eines Gases (Substanz)
 - Liefert funktionelle Abhängigkeiten von Zustandsgrößen

Zustandsgleichung für ideale Gase

Für ein **ideales Gas** gilt folgende Beziehung (**Zustandsgleichung**):

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{const.}$$

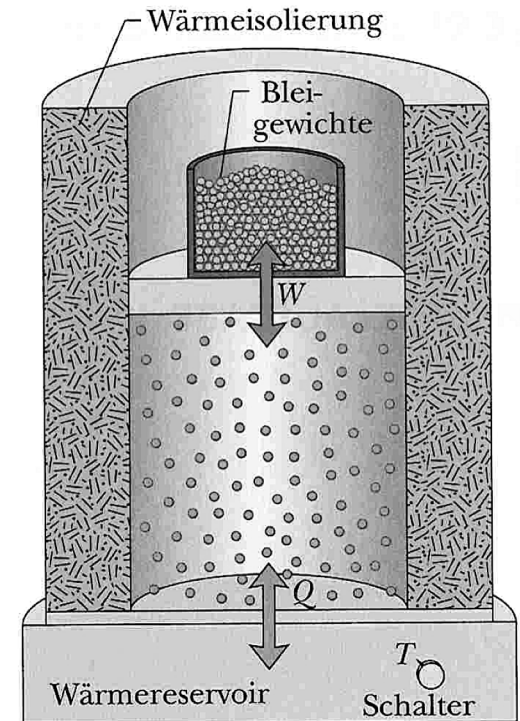
Die Proportionalitätskonstante für ein Mol Gas (= $6,022 \cdot 10^{23}$ Teilchen) ist die sogenannte **Gaskonstante R** = 8,31451 J/(K mol).

Man erhält mit ν = Stoffmenge in Mol:

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

-d.h. bei einer gegebenen Gasmenge sind die thermodynamischen Zustandsgrößen nicht unabhängig voneinander veränderbar

- Bei Gasen hängt also das vom Gas eingenommene **Volumen** sehr stark von der **Temperatur** und dem **Umgebungsdruck** ab



Zustandsgleichung für ideale Gase

- ① Um verschiedene „Gasmengen“ miteinander vergleichen zu können, wurden **Standardwerte** für Temperatur und Druck eingeführt, bei denen Volumenmessungen durchzuführen sind
- ② Dementsprechend sind Dichtewerte auch auf „**Normwerte**“ zu beziehen:

Die Normbedingungen sind:

$$1) T_N = 0^\circ \text{ C} = 273.15 \text{ K}$$

$$2) p_N = 1013 \text{ mbar} = 1013 \text{ hPa} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$$

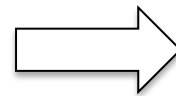


Beispiel für die Berechnung auf das „reduzierte“ Volumen:

$$\frac{p \cdot V}{T} = \frac{p_N \cdot V_N}{T_N} \Rightarrow V_N = \frac{p \cdot T_N}{T \cdot p_N} \cdot V$$

Erinnerung:

$$m = \rho \cdot V$$



$$\rho_N = \rho \cdot \frac{p_N}{T_N} \cdot \frac{T}{p}$$

bei $T_N = 273.15 \text{ K}$ & $p_N = 1013,25 \text{ mbar}$

M1 Dichte und Hydrodynamik:

Bestimmung der reduzierten Dichte der Luft



Vakuumpumpe mit aufgesetztem Glaskolben



Wiegen des Glaskolbens vor/nach Evakuierung: m



Bestimmung von Umgebungsdruck/Temperatur

$$\rho = \rho(p, T) = \frac{m}{V}$$

Dichte bei Umgebungsdruck/Temperatur

Physik für Studierende der Medizin im 1. Fachsemester

(PFMF-V); 09410100

Dienstag mit Freitag 8.15-9.00

Wärmelehre Teil 3 am 28.04.2021



Dr. Simon Moser
Lehrstuhl für Exp. Physik IV
Universität Würzburg
simon.moser@physik.uni-wuerzburg.de



Wiederholung: Ideale Gasgleichung

Zustandsgrößen = thermodynamische Größen, die unabhängig sind von:

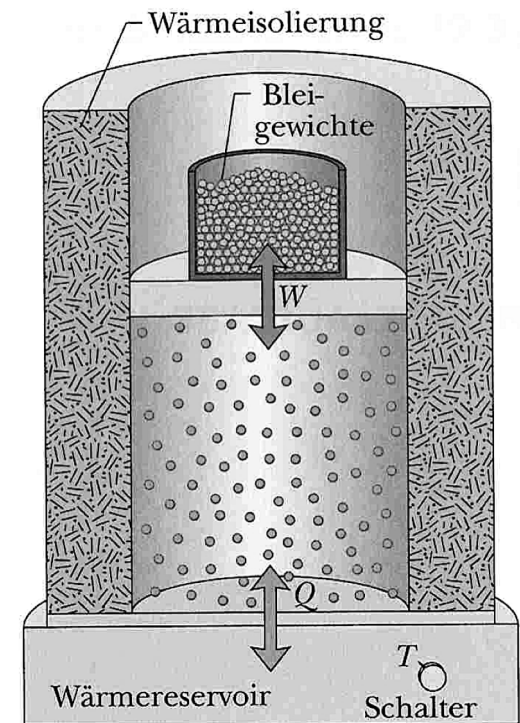
- der sonstigen Beschaffenheit eines Körper
- der Vorgeschichte:

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{const.}$$

Die Proportionalitätskonstante für ein Mol Gas
(= $6,022 \cdot 10^{23}$ Teilchen) ist die sogenannte
Gaskonstante R = 8,31451 J/(K mol).

Man erhält mit ν = Stoffmenge in Mol:

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



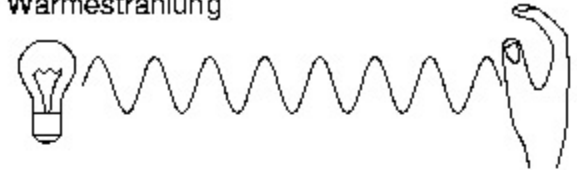
Wärmetransport

Räumliche Temperaturdifferenz führt zu Wärmetransport von Gebiet höherer Temperatur in Gebiet tieferer Temperaturen:

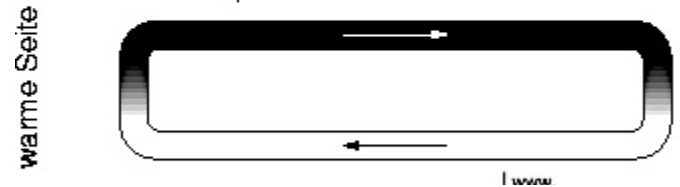
3 Prozesse des Wärmetransports:

- ① Konvektion
- ② Wärmeleitung
- ③ Wärmestrahlung

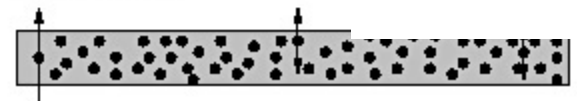
Wärmestrahlung



Stofftransport/Konvektion



Wärmeleitung



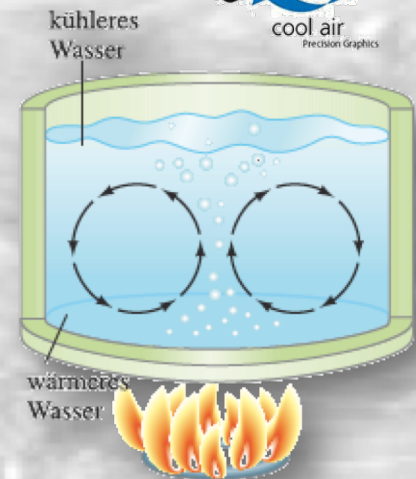
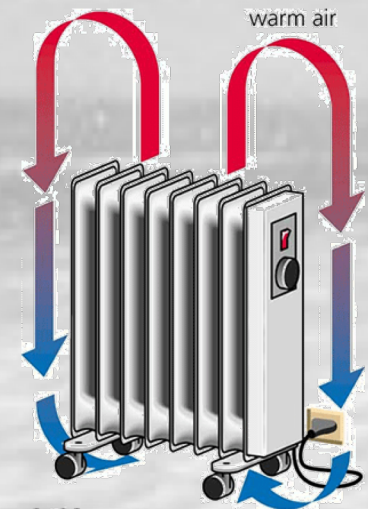
- ① Konvektion, Wärmeleitung sind an **Materie gebunden** (Gas, Flüssigkeit, Festkörper)
- ② **Wärmestrahlung** auch im **Vakuum** möglich

Konvektion

- ① Verbunden mit **Materietransport** in Flüssigkeiten & Gasen
- ② **Ursache:** Temperaturabhängigkeit der Dichte
- ③ In Festkörpern ohne Bedeutung

Temperaturdifferenz in Flüssigkeit und Gasen:

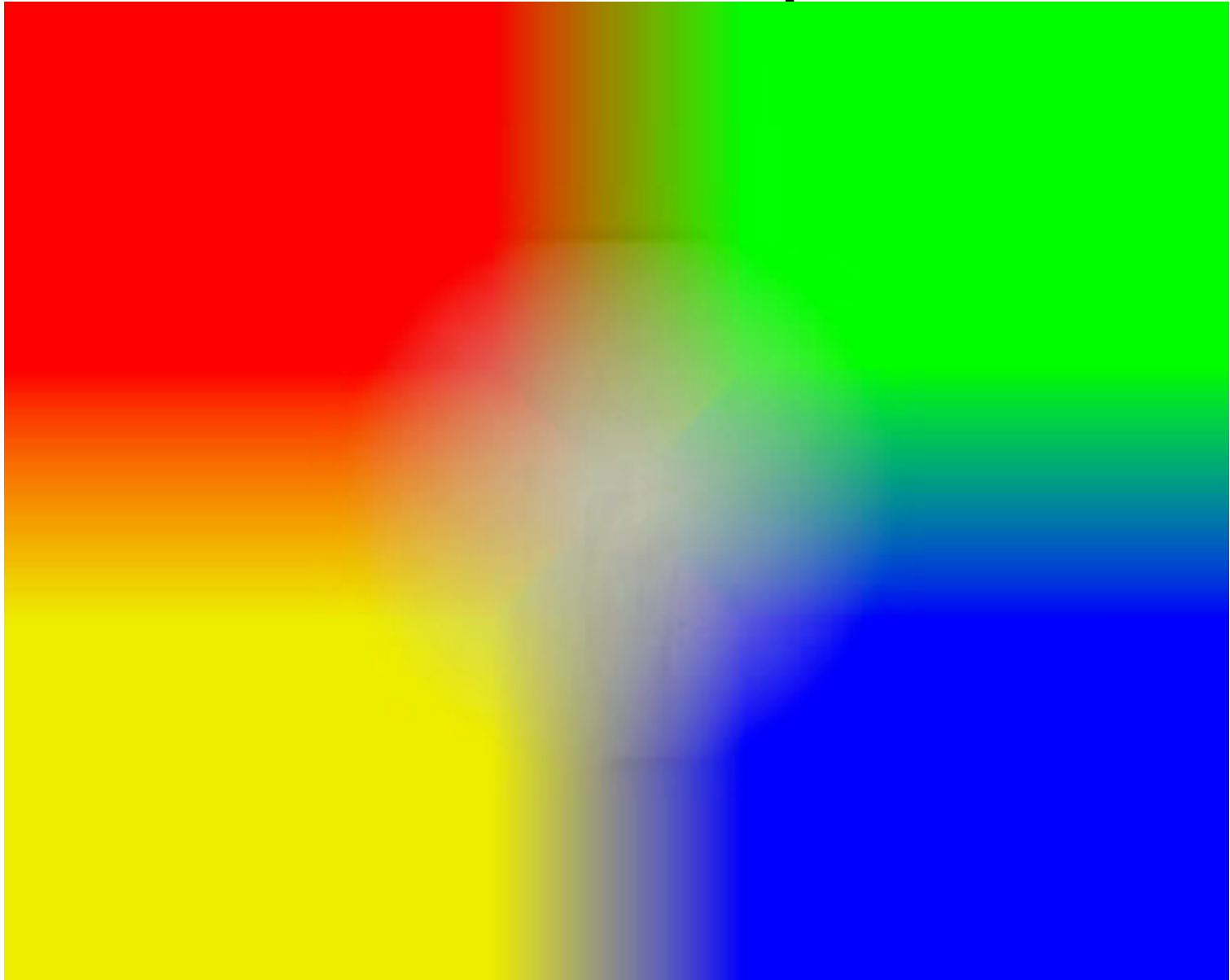
- **Dichteunterschied** (Flüssigkeit, Gase: $T \uparrow$, $\rho \downarrow$)
- Erwärmte Materie erfährt **Auftrieb**
- Konvektionsströmung in Flüssigkeit, Gasen



Insgesamt schwierig zu beschreiben durch die Beteiligung vieler Effekte: *Auftrieb*, *Viskosität*, *Wärmeleitung*, *Oberflächenspannung*

Konvektion kann durch poröse Materialien unterdrückt werden (poröse Dämmstoffe)

Konvektion: Experiment



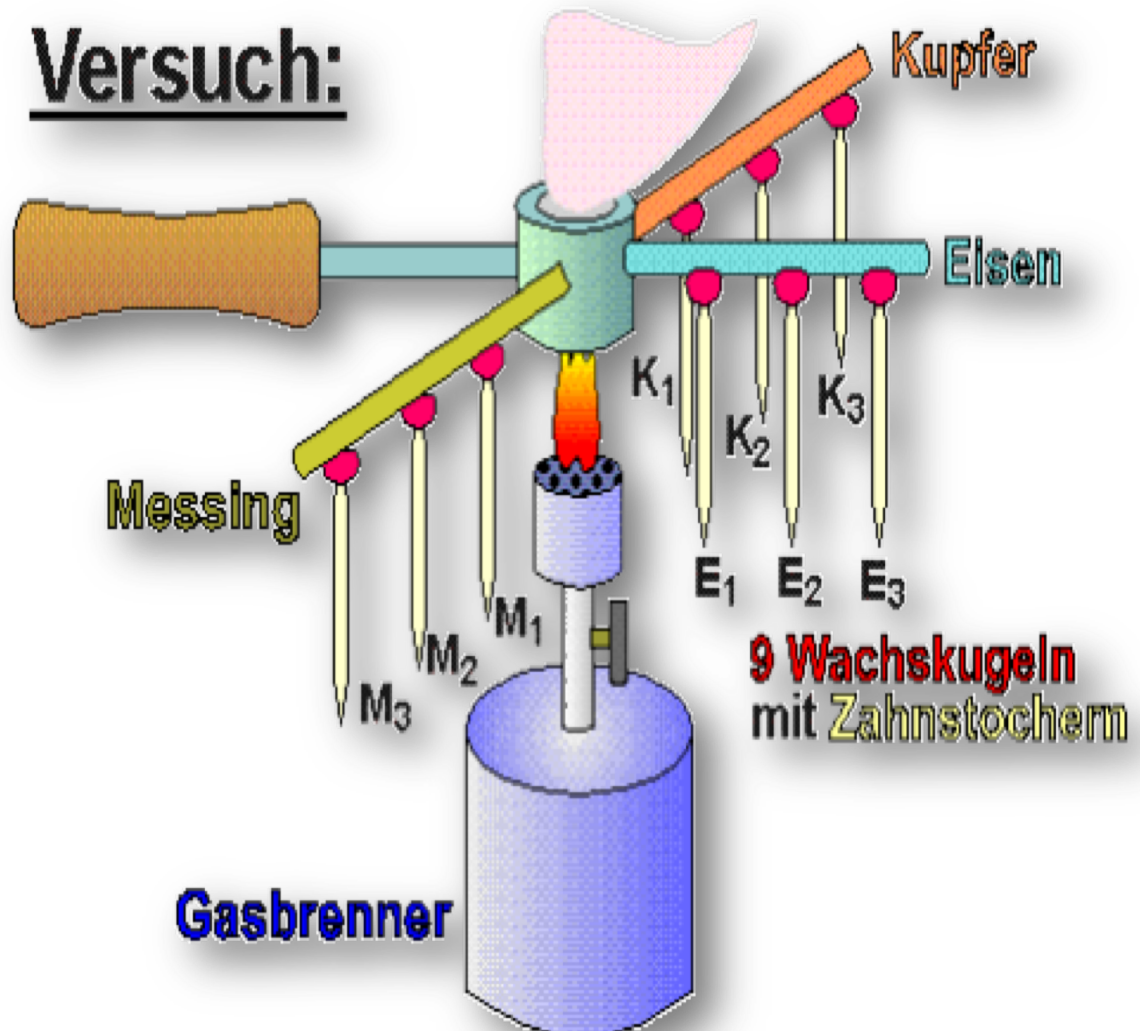
Wärmeleitung

Wärmeleitung in Festkörpern

- ① erfolgt nur in Materie
- ② kein Materietransport

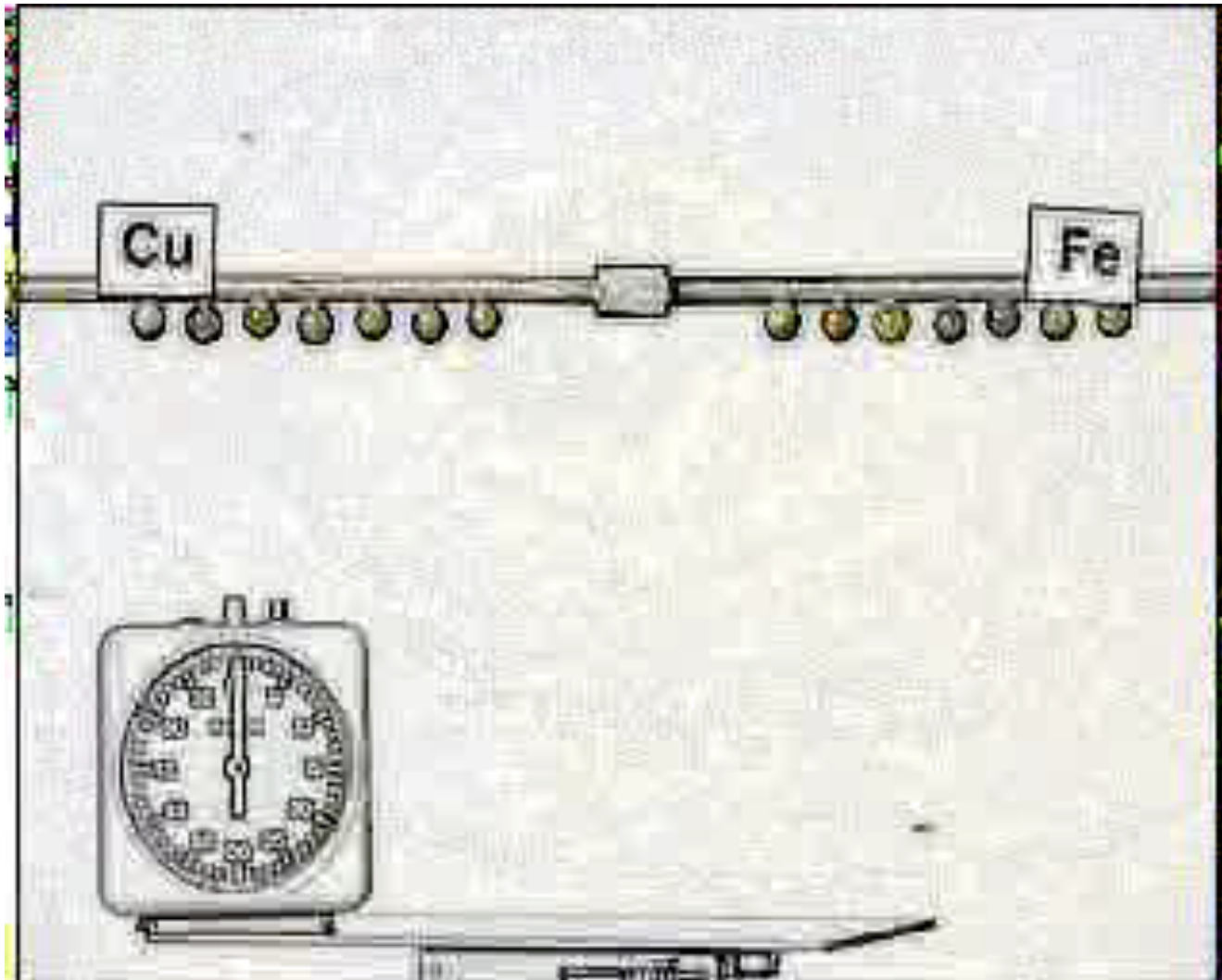
Wärmeleitfähigkeit λ :

Eisen	= 80 W/(mK)
Cu	= 393 W/(mK)
Messing	= 110 W/(mK)



Wärmeleitung

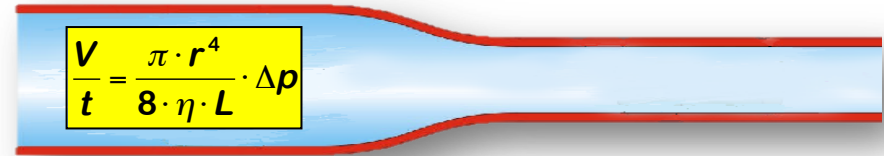
Wärmeleitung in Festkörpern



Wärm Erinnerung: Strömung durch Rohr:

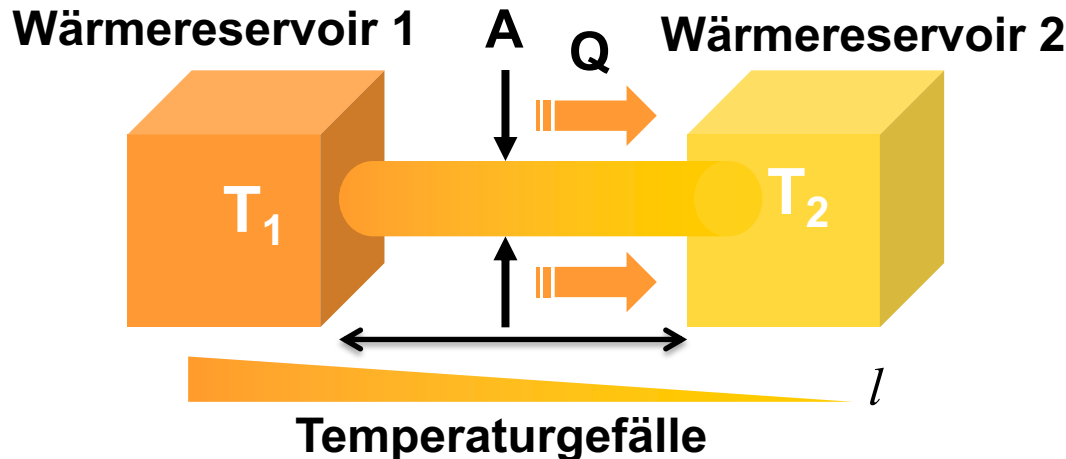
Wärmeleitung in Festkö

Wärmestrom im stationären Zu



$$\Delta Q / \Delta t = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta l} = \text{const.}$$

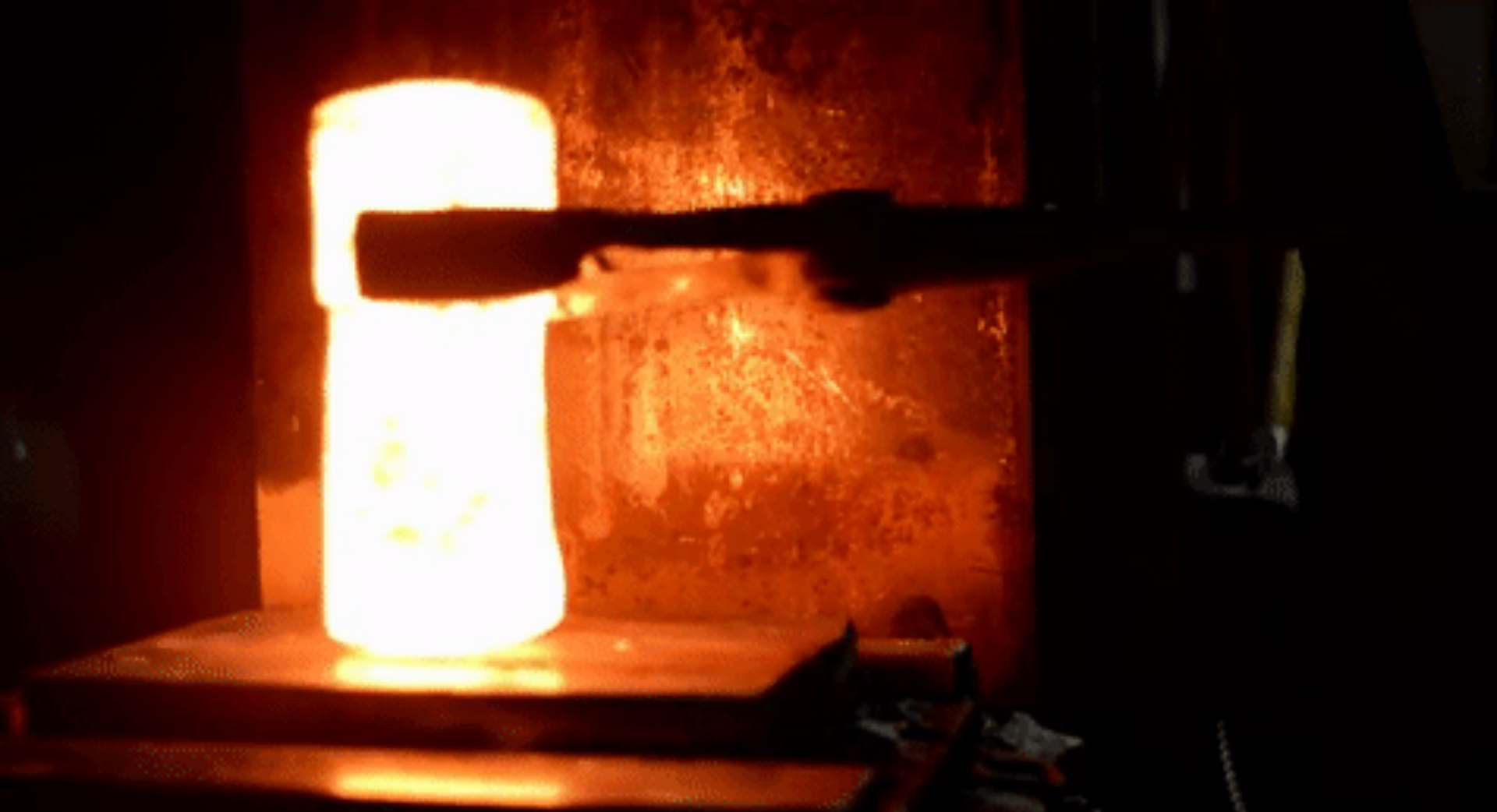
λ = Wärmeleitvermögen; Einheit: W/(m K)
 A = Querschnittsfläche
 $\Delta T / \Delta l$ = Temperaturgefälle



Silber	420
Kupfer	380
Aluminium	200
Stahl	40
Eis	2
Glas	0,84
Ziegel	0,84
Beton	0,84
Wasser	0,56
Menschliches Gewebe	0,2
Holz	0,1
Fiberglas	0,048
Kork	0,042
Wolle	0,040
Daunen	0,025
Kunststoff (Polyurethan)	0,024
Luft	0,023

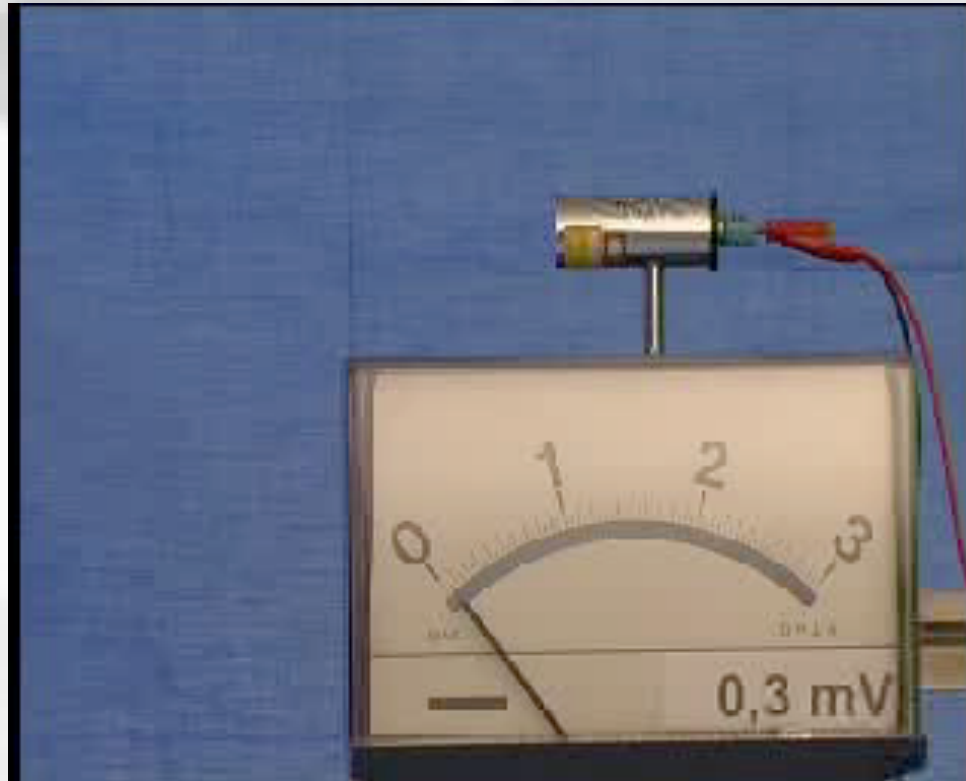
Wärmestrahlung

- ① **Fakt 1:** Jeder Körper mit der Temperatur $T > 0 \text{ K}$ strahlt fortlaufend **transversale EM-Strahlung & Wärme** (auch im Vakuum, da nicht an Materie gebunden)



Wärmestrahlung

Versuch: Mit einer Thermosäule wird die Wärmestrahlung einer Hand gemessen



Thermosäule: Elektrisches Bauelement, das therm. Energie in elektrische Energie umwandelt & aus mehreren Thermoelementen besteht

Wärmestrahlung

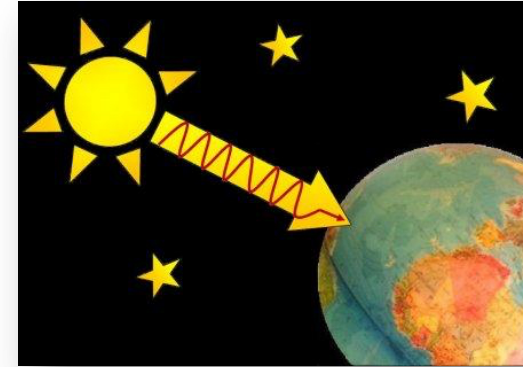
Beobachtungen:

Körper der Temperatur T strahlt Leistung ab:

P = Gesamte Strahlungsleistung = Energie/Zeit

A = Fläche

T = Temperatur des Körpers



$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = E \sigma A T^4$$

**Stefan Boltzmann
-Gesetz**

σ = Boltzmann-Konstante ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

E = Emissionsgrad; (Wertebereich: 0 – 1) = Funktion der
Oberflächenbeschaffenheit

Wiensches Verschiebungsgesetz

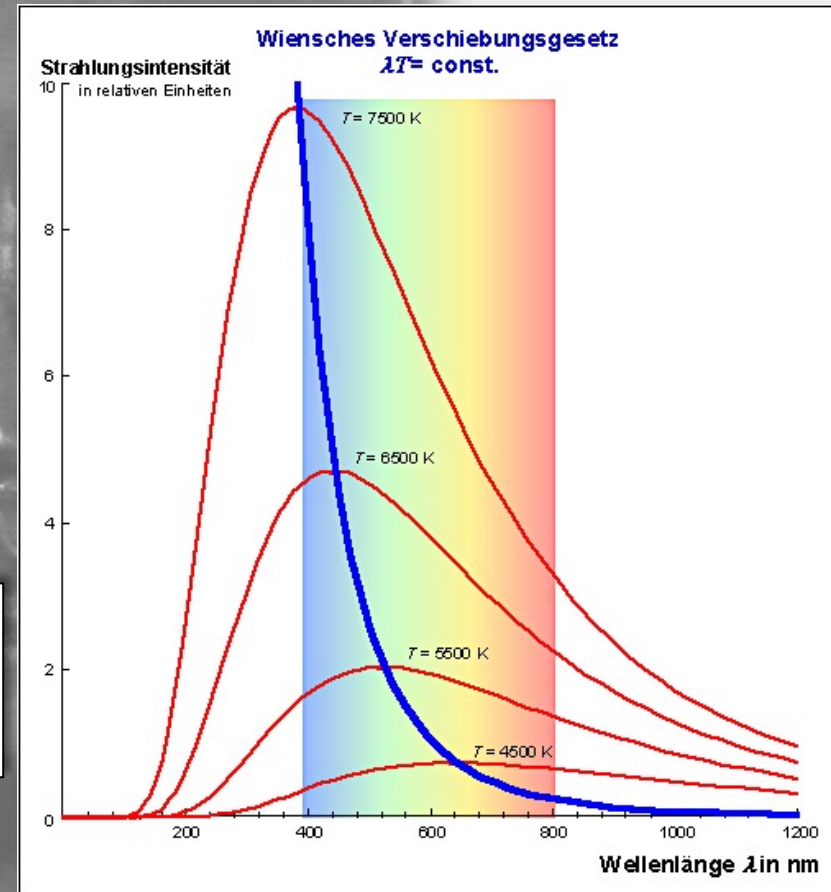
Mit steigender Temperatur verschiebt sich das Strahlungsmaximum zu kürzeren Wellenlängen λ :

Wiensches Verschiebungsgesetz:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$



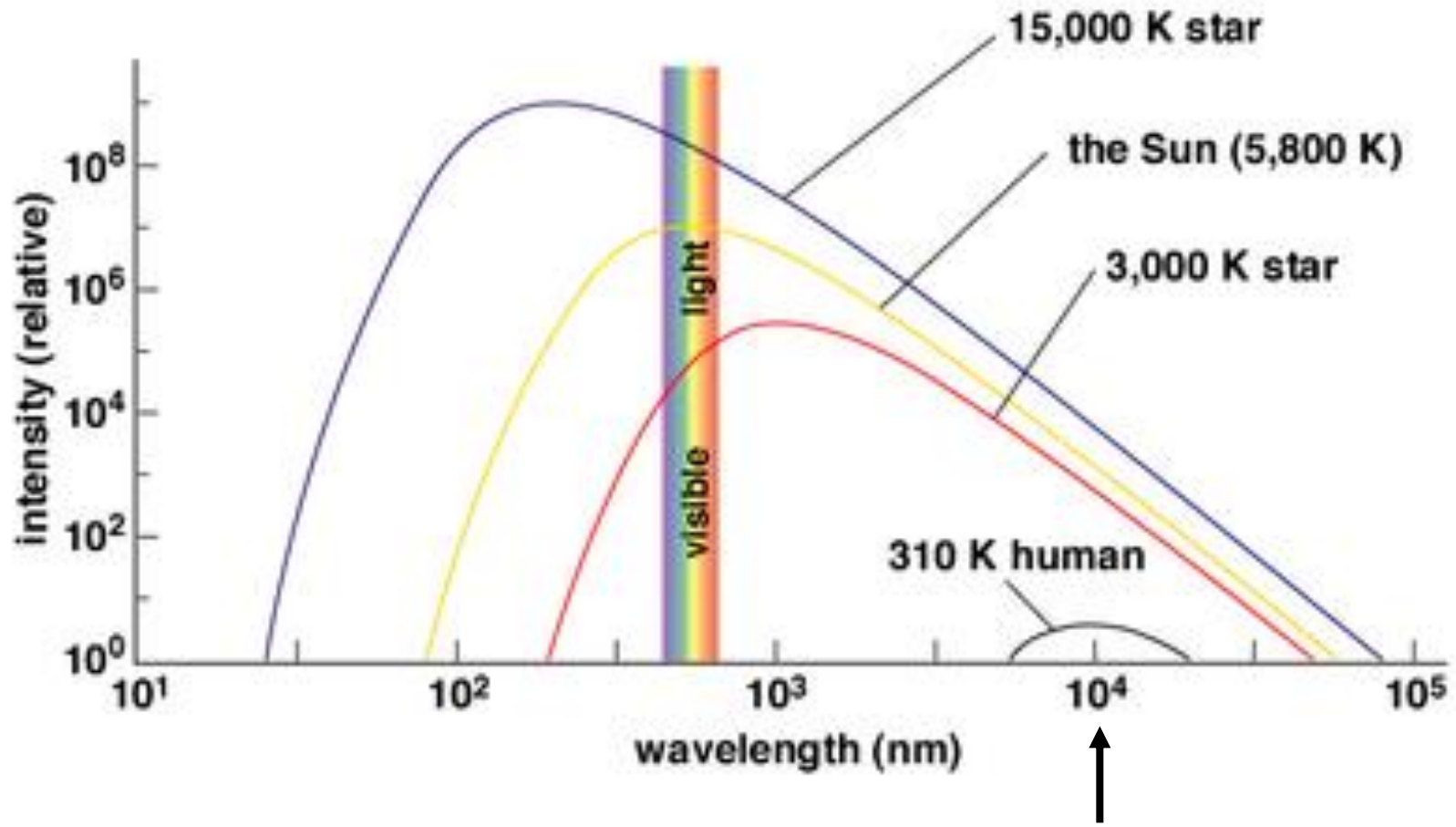
Die Temperatur an der Oberfläche der Sonne beträgt 6000 K: Daraus folgt ein λ_{max} von 480 nm



Wilhelm **Wien*** (1864 - 1928) *1900 -1920 Prof. in Würzburg (Nachfolger von W.C. Röntgen), 1911 Nobelpreis Physik

Wiensches Verschiebungsgesetz

Infrarotthermographie



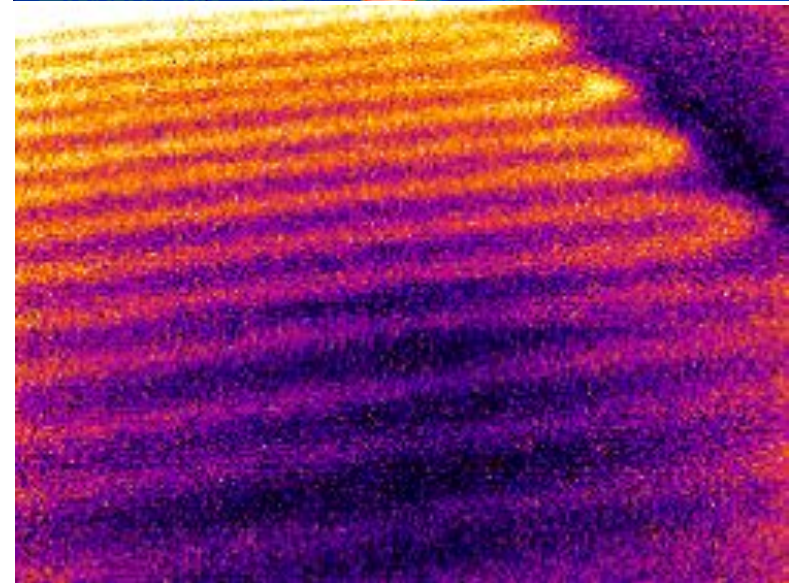
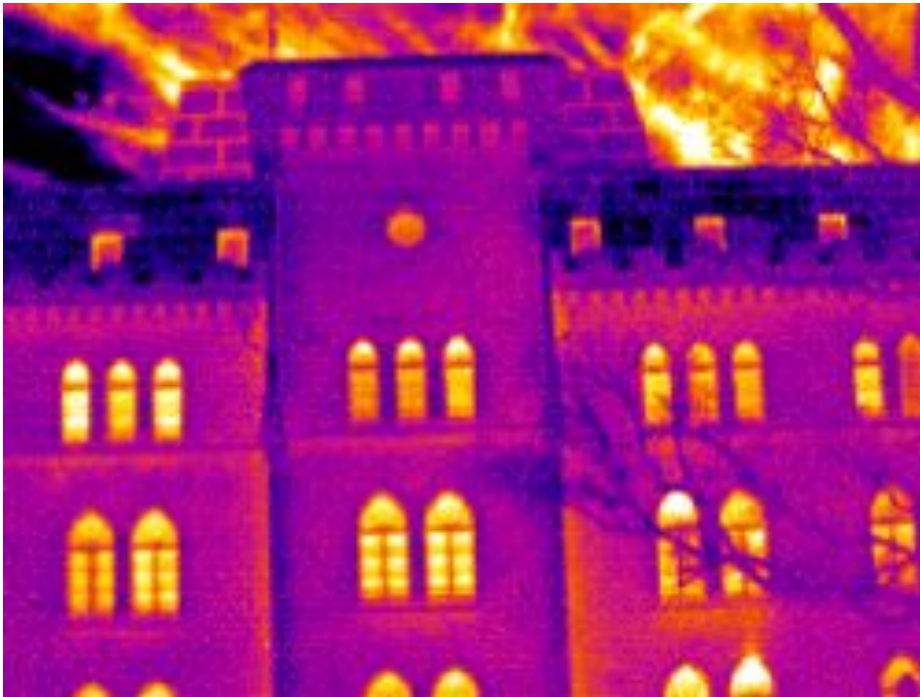
Copyright © Addison Wesley

Infrarotbereich

Infrarotthermographie

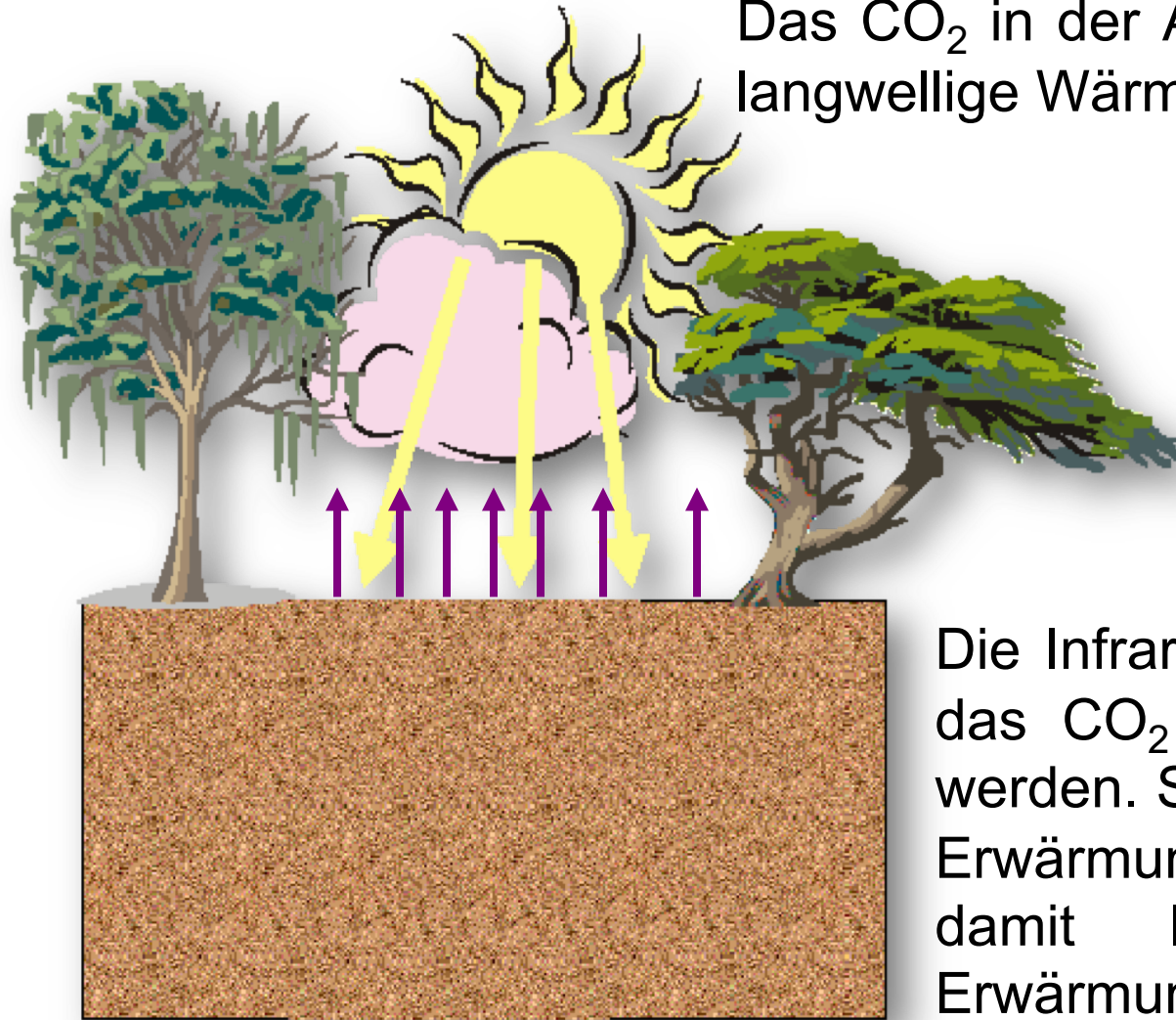


„Wärmekamera“



Wärmestrahlung

Das CO₂ in der Atmosphäre reflektiert die langwellige Wärmestrahlung der Erde



Die Infrarotstrahlung würde ohne das CO₂ in das All abgestrahlt werden. Somit kommt es zu einer Erwärmung der Atmosphäre und damit langfristig zu einer Erwärmung der Erde