700 Thermodynamik

710 *Temperatur*
720 *Wärme und Energie*
730 *Chemische Reaktionen*
740 *Wärmetransport und Transportphänomene*

um was geht es?

Eine neue Grösse: Die Temperatur T

Verhalten der Materie als Funktion der Temperatur

Energieumwandlung

Noch eine neue Grösse: Entropie S

Chemische Systeme

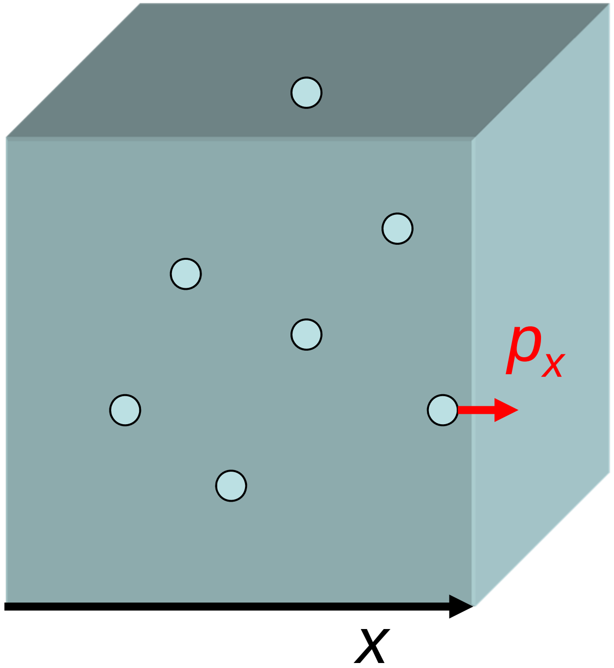
Transportphänomene: Diffusionsgleichung

711 thermische Ausdehnung von Gasen

711 Ziele

- Temperatur mikroskopisch erklären können
- Annahmen für ein ideales Gas erklären können
- Ideales Gasgesetz anwenden können

711 Theorie

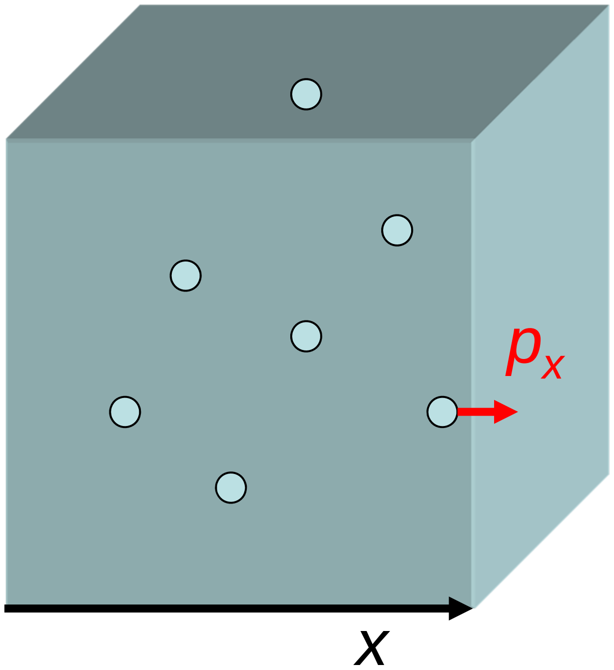


Druck

Impulsübertrag durch Stösse
``*harter Teilchen*´´

$$p = \frac{dF_x}{dA}$$

711 Theorie



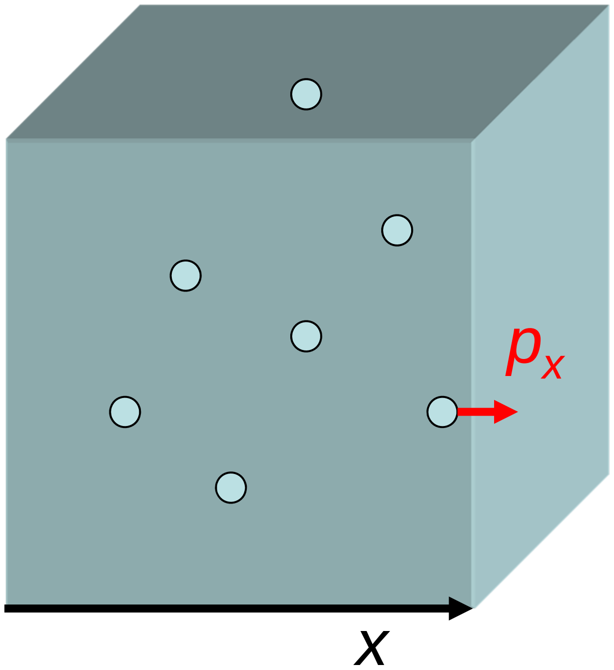
Druck

Impulsübertrag durch Stösse
``*harter Teilchen*´´

$$p = \frac{dF_x}{dA}$$

$$F_x = \frac{d(2mv_x)}{dt} = 2m\frac{dv_x}{dt}$$

711 Theorie



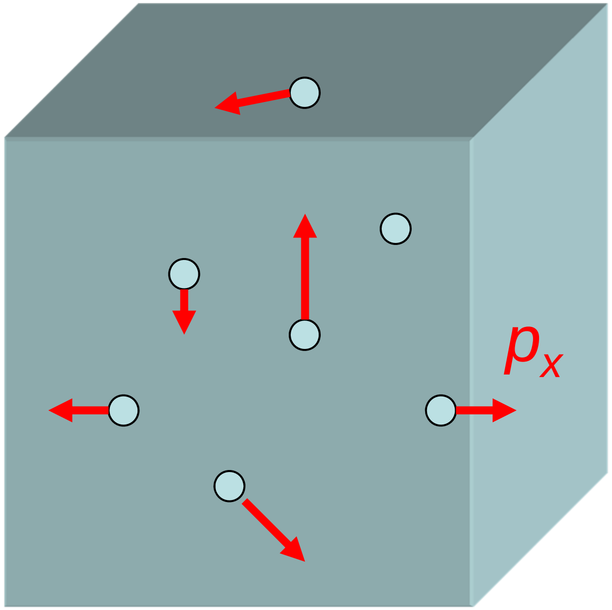
Druck

Impulsübertrag durch Stösse
``*harter Teilchen*´´

v_x = ?

$$F_x = \frac{d(2mv_x)}{dt} = 2m\frac{dv_x}{dt}$$

711 Theorie

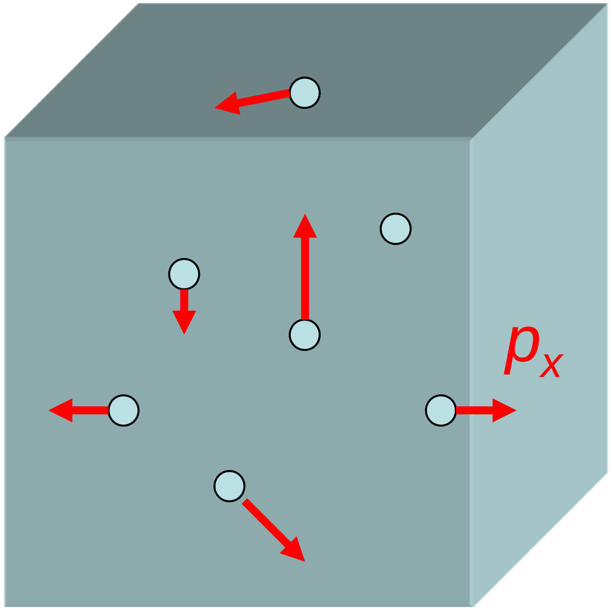


$v_x = ?$

Geschwindigkeitsverteilung $f(v)$: Anz. Teilchen dN im Intervall $v + dv$:

$$dN = N \cdot f(v) \cdot dv$$

711 Theorie

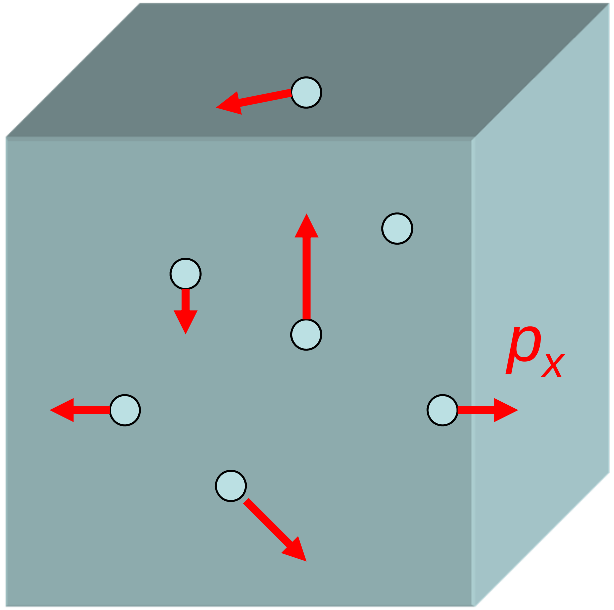


$v_x = ?$

Normierung von $f(v)$:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(v) \cdot dv = 1$$

711 Theorie

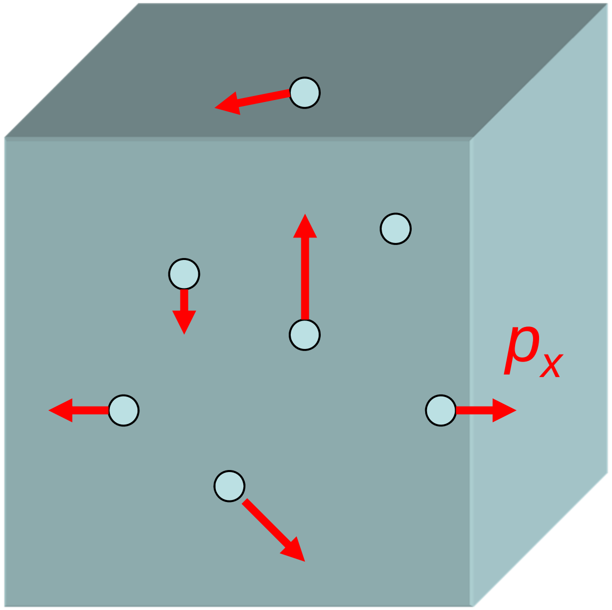


v_x = ?

Erwartungswert für v^2:

$$\langle v^2 \rangle = \int_0^\infty v^2 \cdot f(v) \cdot dv$$

711 Theorie



v_x = ?

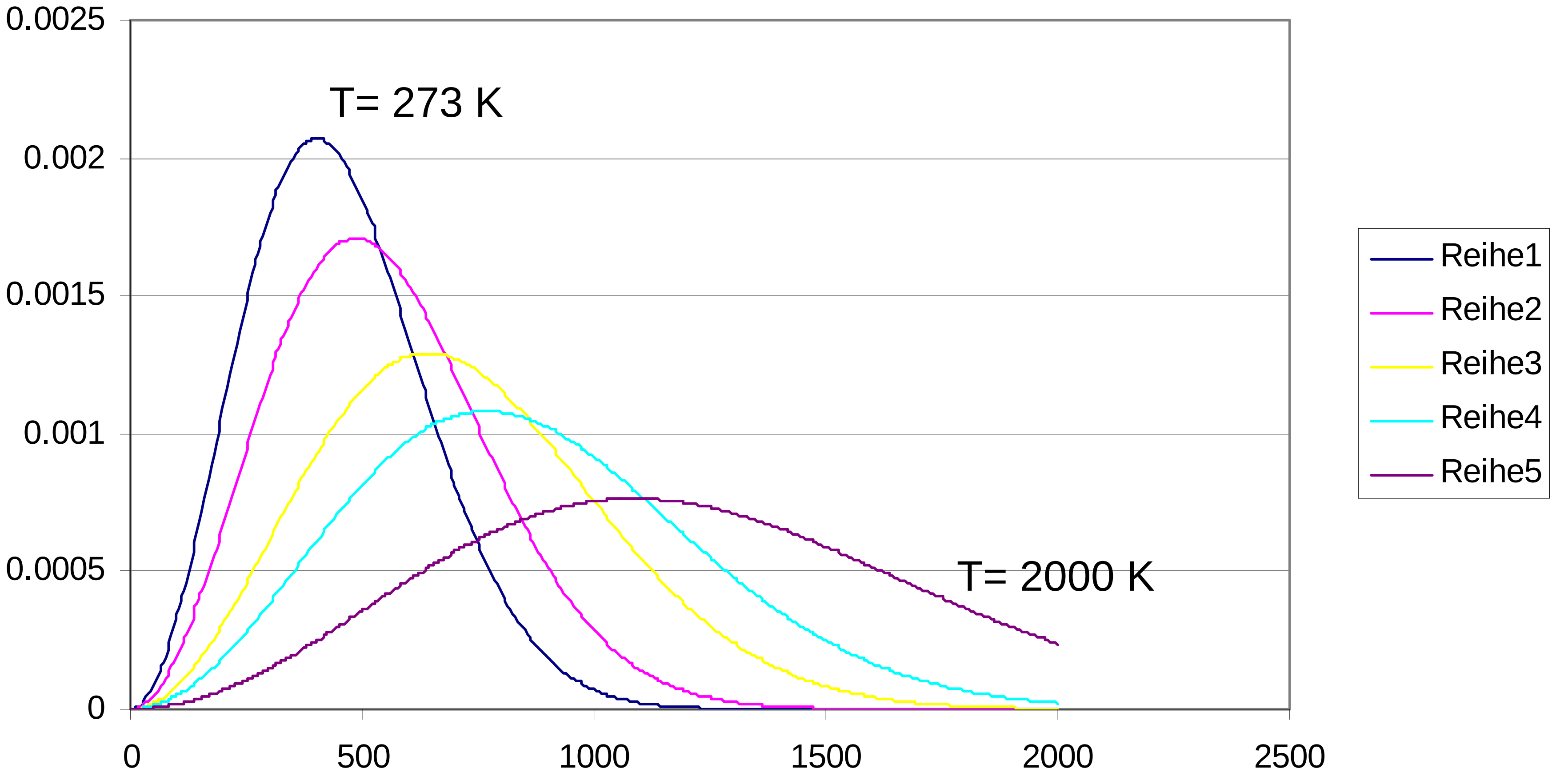
Für ideales Gas Maxwell-Boltzmann-Verteilung:

Neue Grösse: Temperatur *T*

[*T*] = Kelvin *K*

$$f(v) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{3/2} \cdot v^2 \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

$$f(v) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{3/2} \cdot v^2 \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$



711 Theorie

Erwartungswert für v^2:

$$\langle v^2 \rangle = \int_0^\infty v^2 \cdot f(v) \cdot dv = \int_0^\infty v^2 \cdot \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \left(\frac{m}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \cdot dv$$

711 Theorie

Erwartungswert für v^2:

$$\left\langle v^2 \right\rangle = \int_0^\infty v^2 \cdot f(v) \cdot dv = \int_0^\infty v^2 \cdot \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \left(\frac{m}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \cdot dv$$

$$= \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \int_0^\infty v^4 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv$$

711 Theorie

Erwartungswert für v^2:

$$\left\langle v^2 \right\rangle = \int_0^\infty v^2 \cdot f(v) \cdot dv = \int_0^\infty v^2 \cdot \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \left(\frac{m}{2kT}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \cdot dv$$

$$= \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \int_0^\infty v^4 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left[\frac{3\sqrt{\pi}}{8} \left(\frac{2kT}{m}\right)^{\frac{5}{2}}\right]$$

711 Theorie

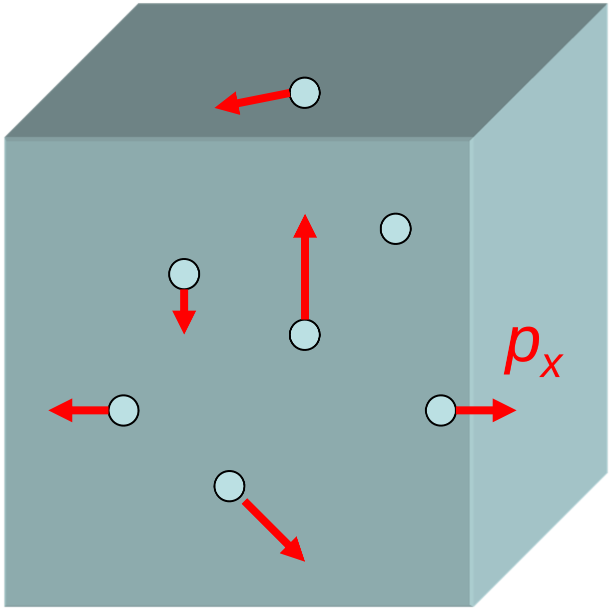
Erwartungswert für v^2:

$$\left\langle v^2 \right\rangle = \int_0^\infty v^2 \cdot f(v) \cdot dv = \int_0^\infty v^2 \cdot \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \left(\frac{m}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \cdot dv$$

$$= \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \int_0^\infty v^4 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left[\frac{3\sqrt{\pi}}{8} \left(\frac{2kT}{m} \right)^{\frac{5}{2}} \right]$$

$$= \frac{3}{2} \left(\frac{2kT}{m} \right)^{-\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{2kT}{m} \right)^{\frac{5}{2}} = \frac{3kT}{m}$$

711 Theorie

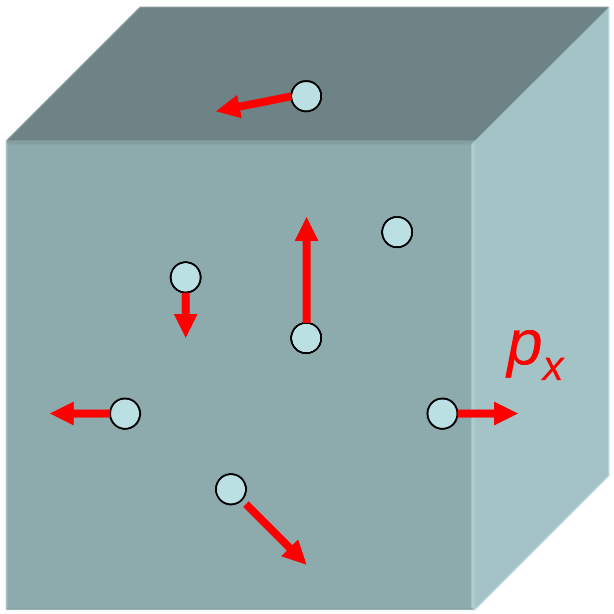


$v_x = ?$

Erwartungswert für v^2:

$$\left\langle v^2 \right\rangle = \int_0^\infty v^2 \cdot f(v) \cdot dv$$

$$\boxed{\left\langle \frac{1}{2} m v^2 \right\rangle = \frac{3}{2} kT}$$



711 Theorie

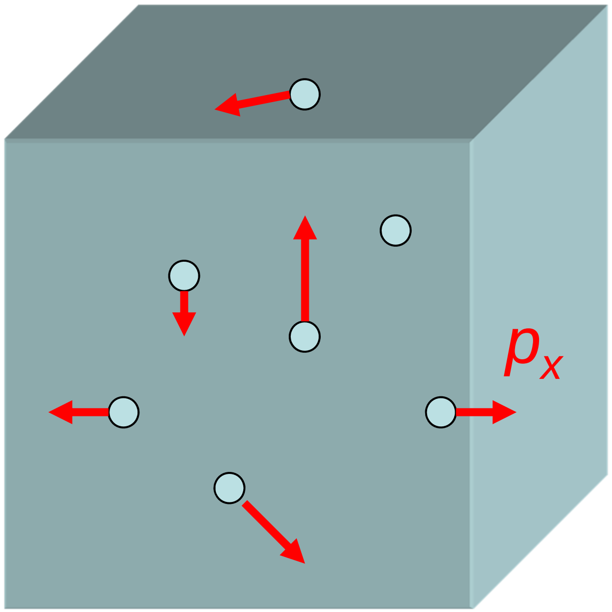
Zurück zur Frage nach dem Druck: Impuls p_x = ?

Pro Zeit: Kraft pro Fläche =

Druck p = ?

$$F_x = \frac{d(2mv_x)}{dt} = 2m\frac{dv_x}{dt}$$

711 Theorie



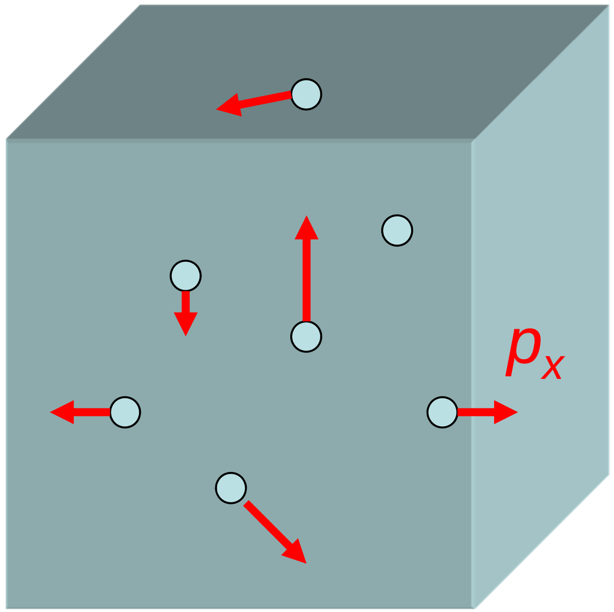
Zurück zur Frage nach dem Druck: Impuls p_x = ?

Pro Zeit: Kraft pro Fläche =

Druck p = ?

$$p = \frac{dF_x}{dA_x} = \quad \ldots ?$$

$$\boxed{p = \frac{N}{V} kT}$$



711 Theorie

Druck $p = f(N,V,T)$

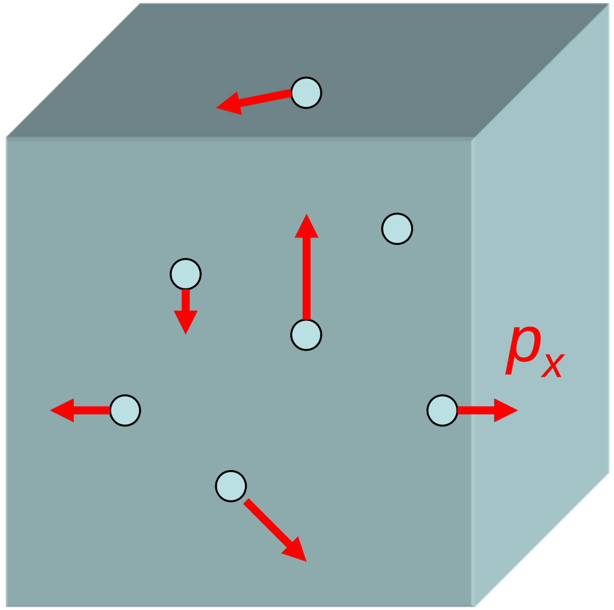
N = Anz. Teilchen

V = Volumen

T = Temperatur

$$p = \frac{N}{V} kT$$

711 Theorie



$pV = f(N,T)$

N = Anz. Teilchen

→ Chemisch besser Anz. Mol n

$R = N_A \cdot k$ (mit N_A = Avogadrozahl). $R = 6.022 \cdot 10^{23}$ (mol^{-1})$\cdot 1.38 \cdot 10^{-23}$($JK^{-1}$) = 8.31 J $mol^{-1}K^{-1}$.

$$\boxed{pV = nRT}$$

712 thermische Ausdehnung von Flüssigkeiten und Festkörpern

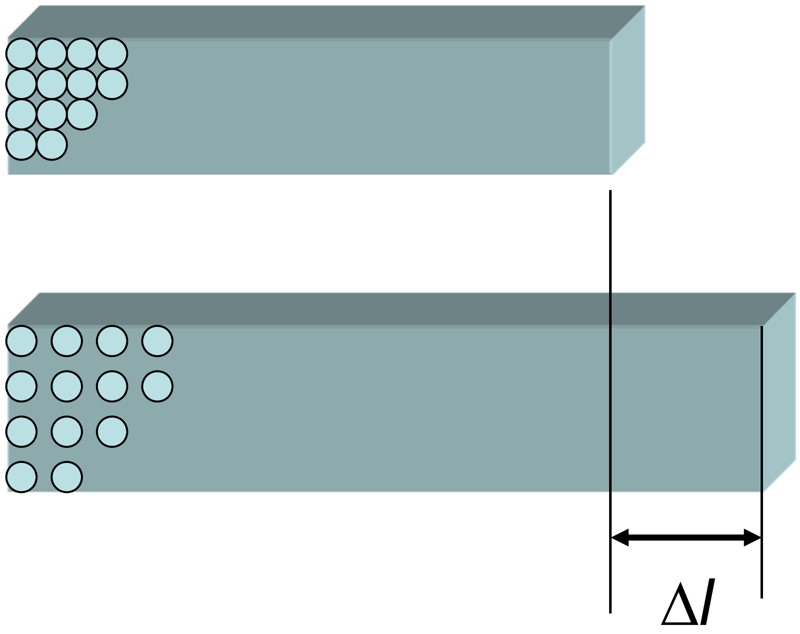
712 Ziele

- thermische Längenausdehnung von Festkörpern berechnen können
- thermische Volumenausdehnung von Festkörpern und Flüssigkeiten berechnen können
- Grundlagen eines Flüssigkeitsthermometers verstehen

712 Theorie

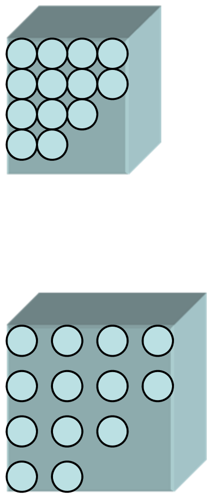
Längenausdehnung

$$\Delta l \approx \alpha l \cdot \Delta T$$



712 Theorie

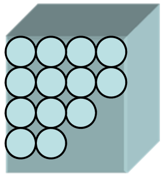
Volumenausdehnung



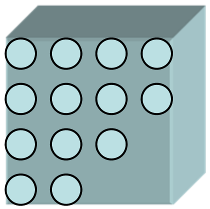
$$\Delta V \approx \gamma V \cdot \Delta T$$

712 Theorie

Für Festkörper



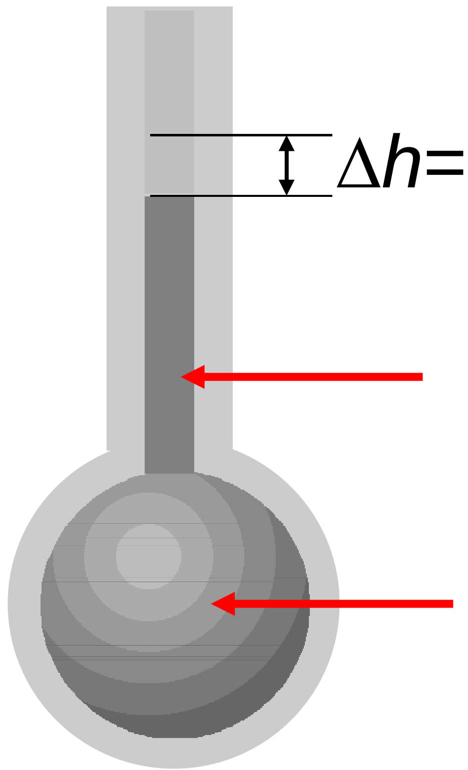
$$\gamma \approx 3\alpha$$



$$\Delta V \approx \gamma V \cdot \Delta T$$

712 Aufgaben

Flüssigkeitsthermometer



$\Delta h = f(\Delta T)$

$\Delta V = \ldots?$

$$\Delta V \approx \gamma V \cdot \Delta T$$

713 Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands

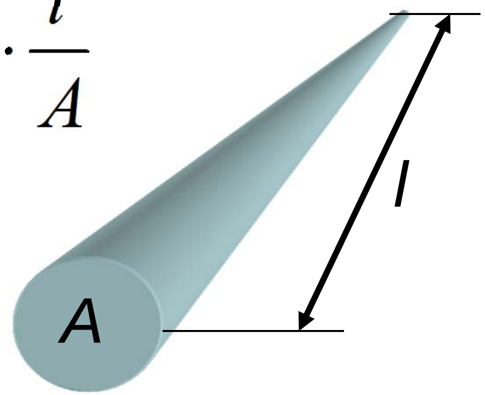
713 Ziele

- thermische Änderungen des elektrischen Widerstandes berechnen können
- Grundlagen der elektrischen Temperaturmessung verstehen

713 Theorie und Aufgaben

Temperaturabhängige Änderung des elektrischen Widerstandes *R*:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

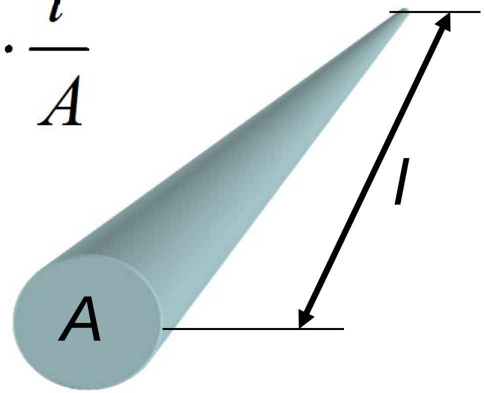


$$\Delta R \approx \alpha R \cdot \Delta T$$

713 Theorie und Aufgaben

Temperaturabhängige Änderung des elektrischen Widerstandes *R*:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$



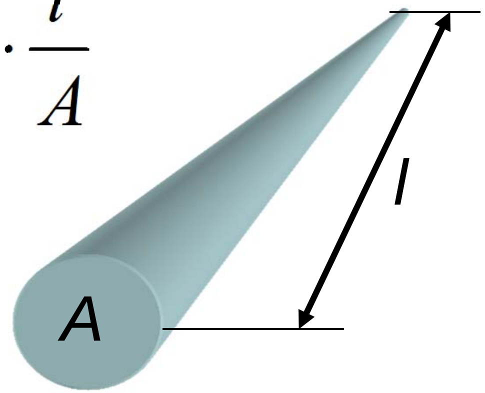
$$\Delta R \approx \alpha R \cdot \Delta T$$

$$\rightarrow \quad \frac{dR}{dT} = \alpha R$$

713 Theorie und Aufgaben

Temperaturabhängige Änderung des elektrischen Widerstandes *R*:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$



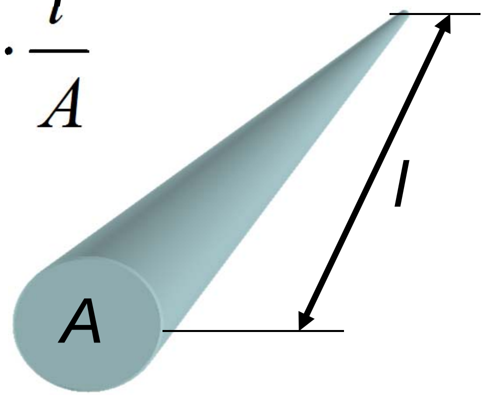
$$\frac{dR}{dT} = \alpha R$$

$$\rightarrow \quad R(T) = R(T_1) \cdot e^{\alpha (T - T_1)}$$

713 Theorie und Aufgaben

Temperaturabhängige Änderung des elektrischen Widerstandes *R*

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$



Achtung – a ist nur in einem begrenzten Temperaturbereich konstant!

$$\frac{dR}{dT} = \alpha(T)R$$

721 Wärmekapazität

721 Ziele

- Begriff Innere Energie definieren / anhand von Beispielen erklären können
- Temperaturerhöhung bei Wärmezufuhr berechnen können
- Begriff Wärmekapazität definieren und für ideale Gase / Kristalle berechnen können

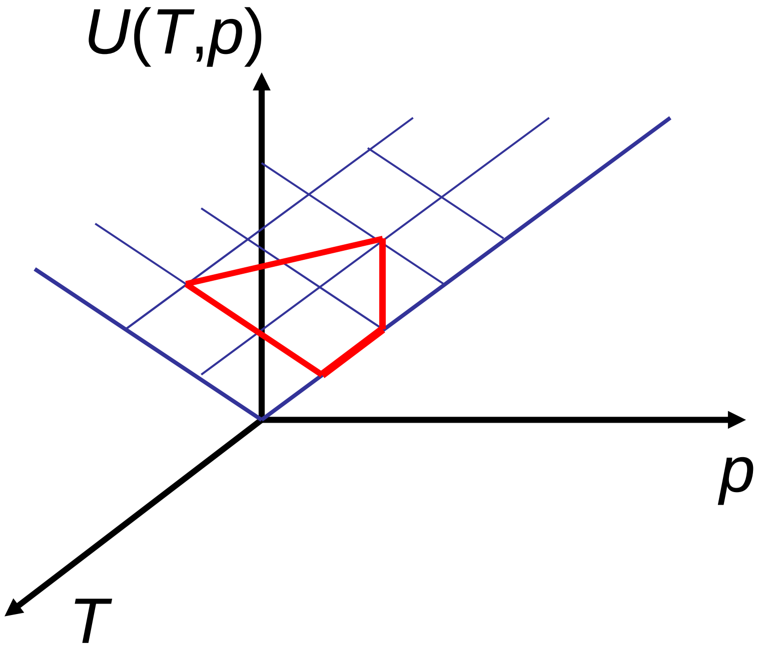
721 Theorie

Innere Energie U: Änderung durch Zufuhr von Wärme oder Arbeit

$$dU = \delta Q + \delta W$$

721 Theorie

Innere Energie U: Änderung durch Zufuhr von Wärme oder Arbeit

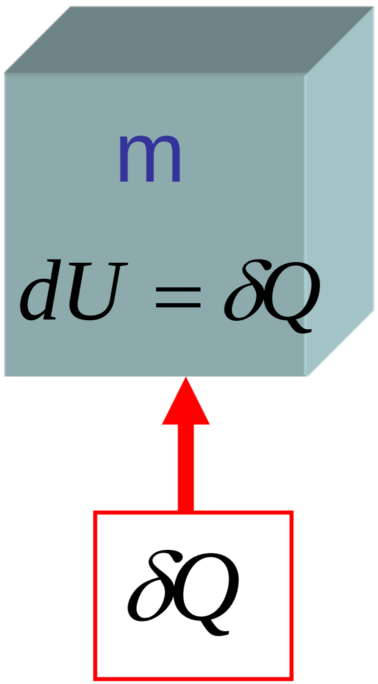


$$dU = \delta Q + \delta W$$

$$\oint dU = 0$$

721 Theorie

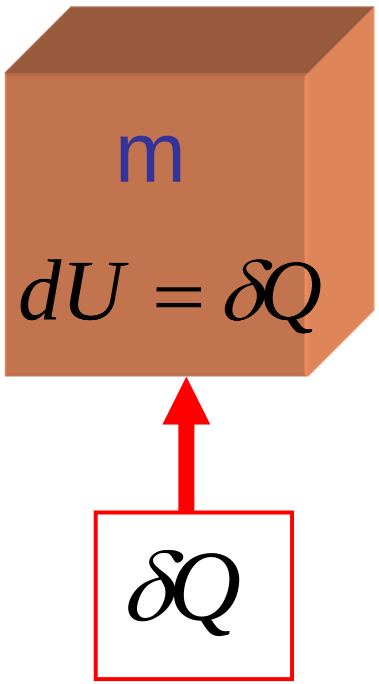
Innere Energie U: Änderung durch Zufuhr von Wärme oder Arbeit



$$dU = \delta Q + \delta W$$

721 Theorie

Innere Energie U: Änderung durch Zufuhr von Wärme oder Arbeit



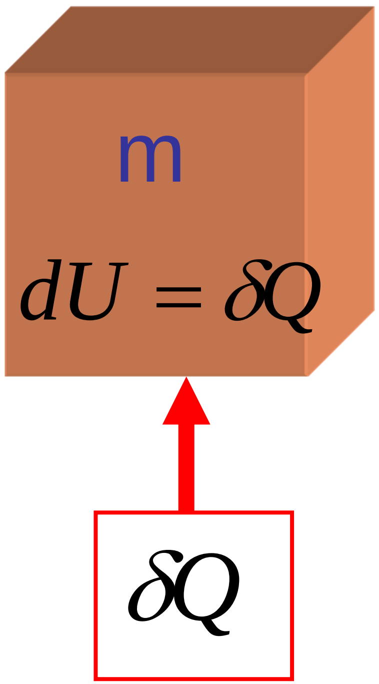
$$dU = \delta Q + \delta W$$

$$c_x = \left(\frac{\delta Q}{m \cdot dT} \right)_x$$

721 Theorie

Wärmekapazität für ideales Gas

$$\frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} RT$$

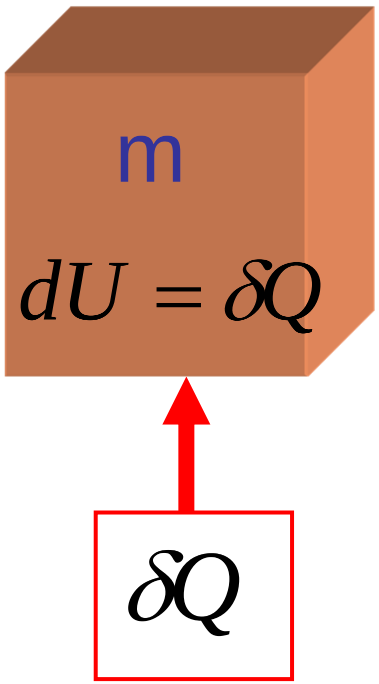


721 Theorie

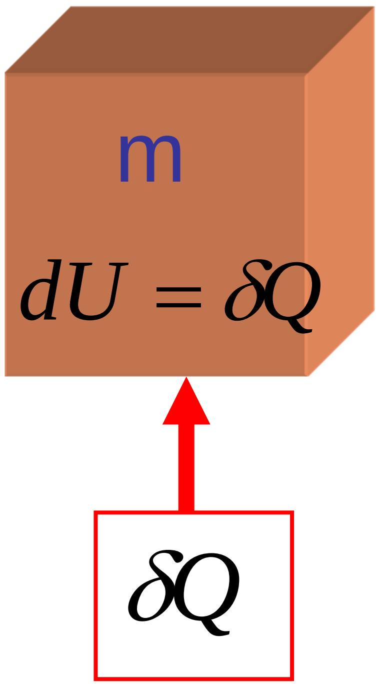
Wärmekapazität für ideales Gas

$$\frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} RT$$

$$Q = \frac{3}{2} nRT = C_V nT$$



721 Theorie



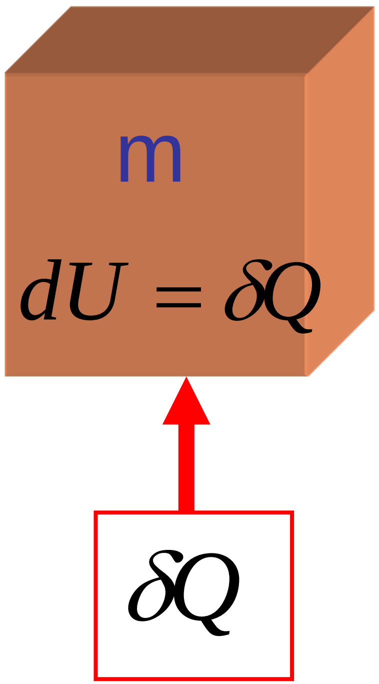
Äquipartitionstheorem:
Befindet sich ein System vieler Teichen im Gleichgewicht, entfällt auf jeden Freiheitsgrad eine Energie von

$$E = \frac{1}{2} RT$$ pro Mol bzw.

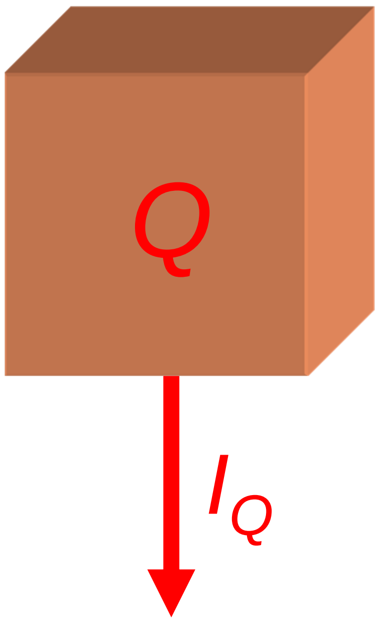
$$E = \frac{1}{2} kT$$ pro Teilchen

721 Theorie

Wärmekapazität für Kristall
(Gesetz von Dulong-Petit):



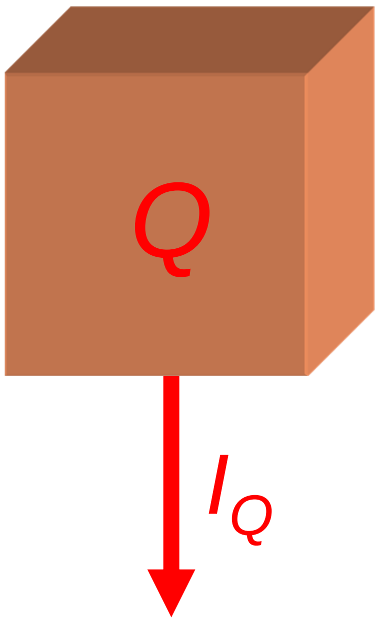
$$\boxed{C_V = 3R}$$



721 Theorie

Modellierung eines einfachen Wärmespeichersystems:

Auskühlender Körper

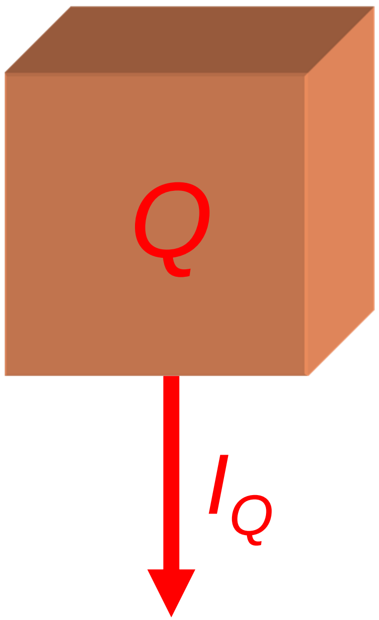


721 Theorie

Modellierung eines einfachen Wärmespeichersystems:

Auskühlender Körper

$$\frac{dQ}{dt} = -I_Q$$

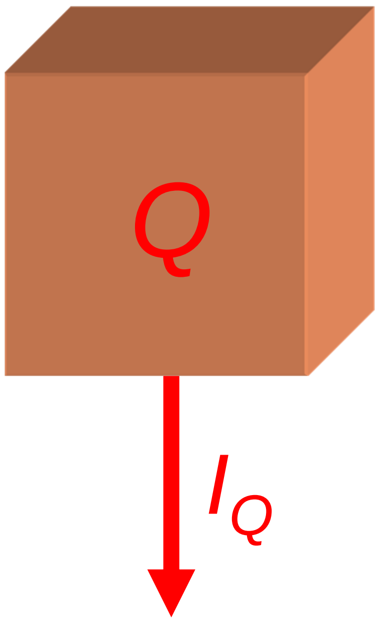


721 Theorie

Modellierung eines einfachen Wärmespeichersystems:

Auskühlender Körper

$$\frac{dQ}{dt} = -I_Q = -k \cdot (T - T_u)$$



721 Theorie

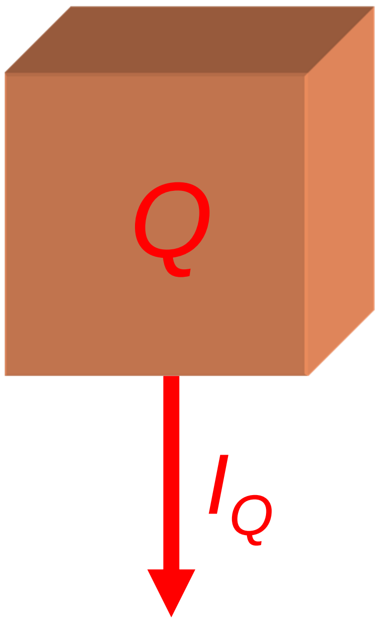
Modellierung eines einfachen Wärmespeichersystems:

Auskühlender Körper

$$\frac{dQ}{dt} = -I_Q = -k \cdot (T - T_u)$$

$$\rightarrow \frac{dT}{dt} = -\frac{k}{mc_0} \cdot (T - T_u)$$

721 Theorie



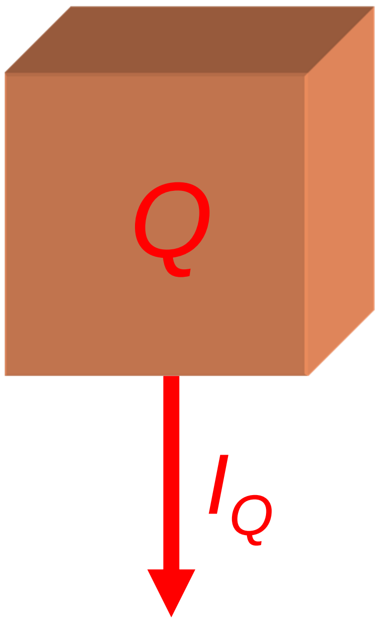
Substitution:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{k}{mc_0} \cdot (T - T_u)$$

$$T - T_u = \vartheta$$

$$\rightarrow \frac{d\vartheta}{dt} = \frac{d}{dt}\left[T - T_u\right] = \frac{dT}{dt}$$

721 Theorie



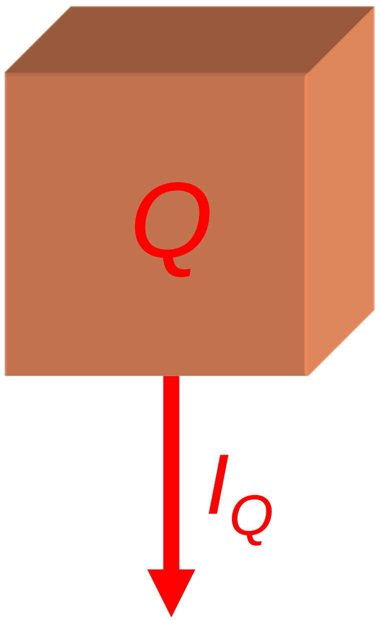
Substitution:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{k}{mc_0} \cdot (T - T_u)$$

$$T - T_u = \vartheta$$

$$\Rightarrow \frac{d\vartheta}{dt} = \frac{d}{dt}\left[T - T_u\right] = \frac{dT}{dt}$$

$$\Rightarrow \frac{d\vartheta}{dt} = -\frac{k}{mc_p} \cdot \vartheta$$

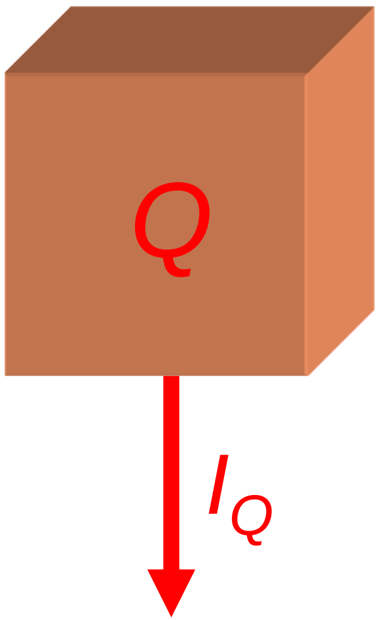


721 Theorie

Separation und Integration:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = -\frac{k}{mc_p} \cdot \vartheta$$

$$\int \frac{d\vartheta}{\vartheta} = -\frac{k}{mc_p} \cdot \int dt$$



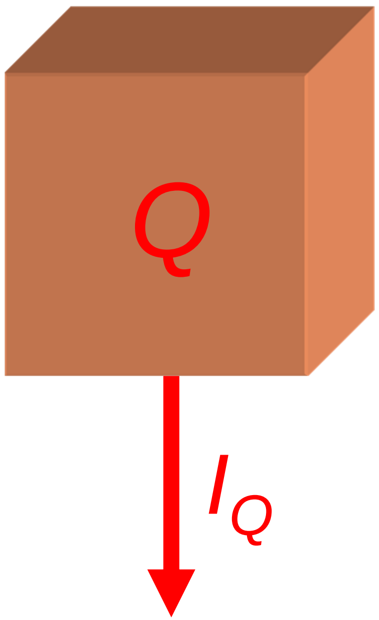
721 Theorie

Separation und Integration

$$\frac{d\vartheta}{dt} = -\frac{k}{mc_p} \cdot \vartheta$$

$$\int \frac{d\vartheta}{\vartheta} = -\frac{k}{mc_p} \cdot \int dt$$

$$= -\frac{k}{mc_p} \cdot t + const. = \ln|\vartheta|$$



721 Theorie

Separation und Integration

$$\frac{d\vartheta}{dt} = -\frac{k}{mc_p} \cdot \vartheta$$

$$\int \frac{d\vartheta}{\vartheta} = -\frac{k}{mc_p} \cdot \int dt$$

$$= -\frac{k}{mc_p} \cdot t + const. = \ln|\vartheta|$$

$$\rightarrow \quad \boxed{\vartheta(t) = \vartheta_0 \cdot e^{-\frac{k}{mc_p} \cdot t}}$$

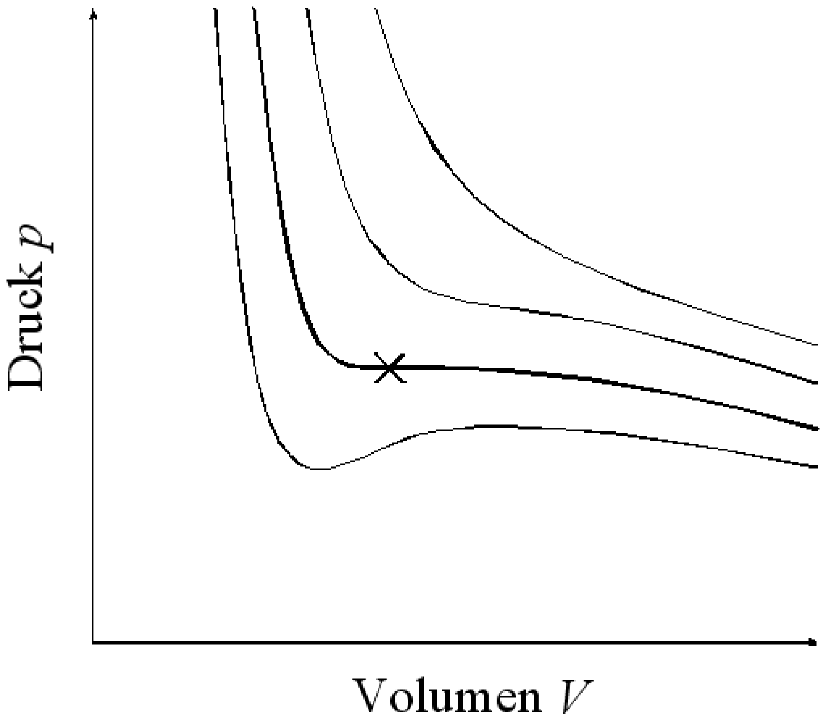
722 Phasenübergänge

722 Ziele

- Gesetz für reales Gas beschreiben können (Was bedeuten die einzelnen Terme?)
- Bedeutung des kritischen Punkt kennen
- Energie, welche in Phasenumwandlungen steckt, berechnen können

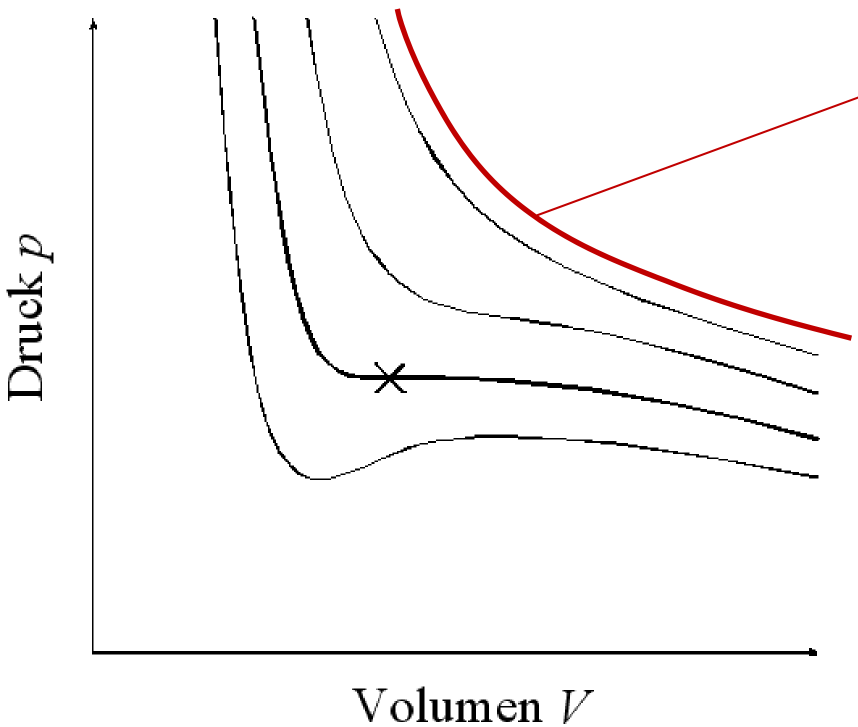
722 Theorie

reales Gas:
zwischenmolekulare Kräfte
spielen eine Rolle



722 Theorie

Isothermen

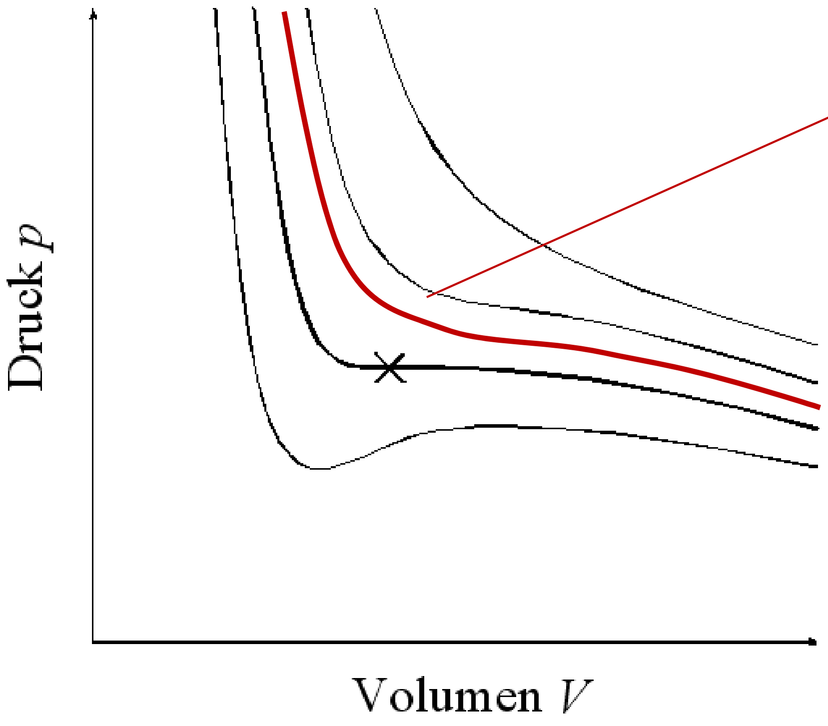


$$pV = nRT$$

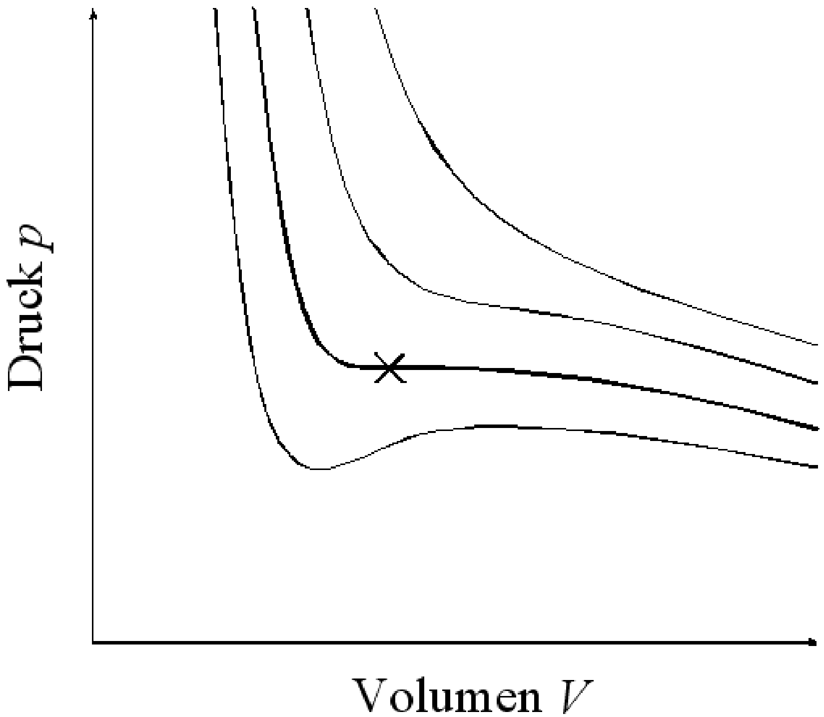
722 Theorie

Isothermen “relaes Gas”

$$(p + \ldots)(V - \ldots) = nRT$$



722 Theorie



reales Gas:
zwischenmolekulare Kräfte spielen eine Rolle

a: Kohäsionsdruck

b: Kovolumen

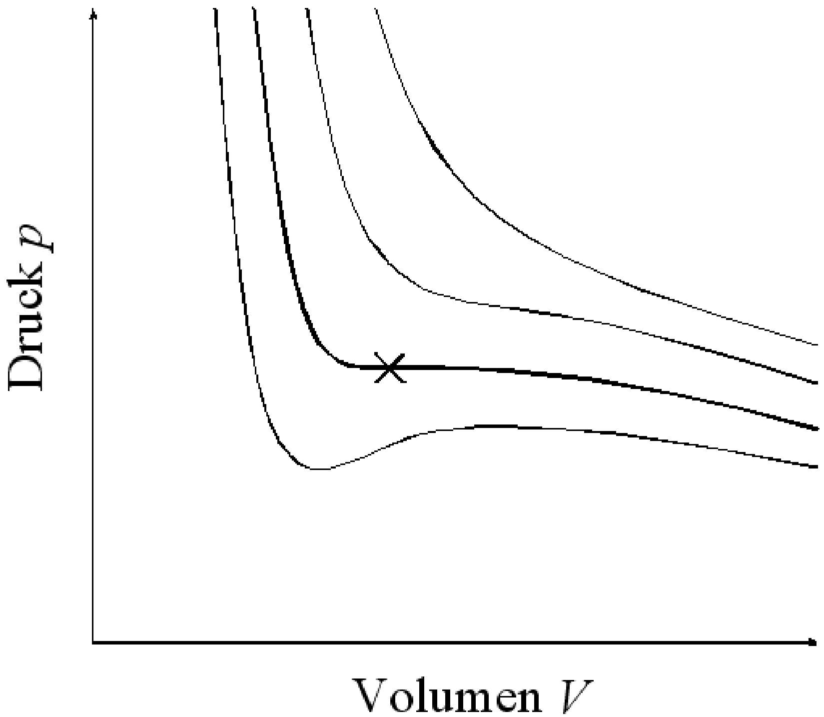
$$\left(p + \frac{an^2}{V^2}\right) \cdot (V - nb) = nRT$$

722 Theorie

$$\left(p+\frac{an^2}{V^2}\right)\cdot\left(V-nb\right)=nRT$$

Steigung der Isothermen:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_{T=const} =$$



722 Theorie

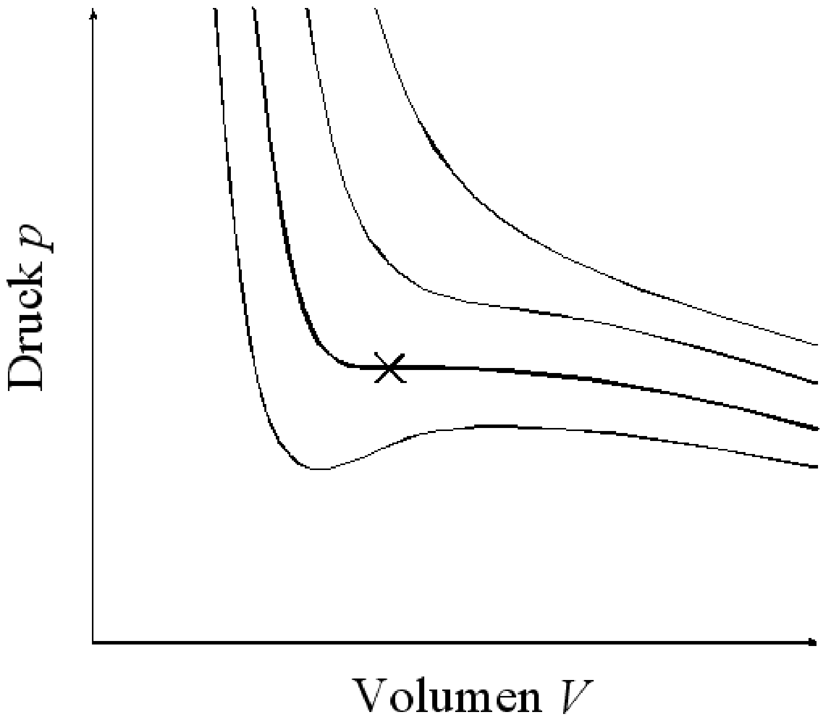
$$\left(p + \frac{an^2}{V^2}\right) \cdot (V - nb) = nRT$$

Steigung der Isothermen:

$$p(V) = \frac{nRT}{V - nb} - \frac{an^2}{V^2}$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_{T=const} =$$

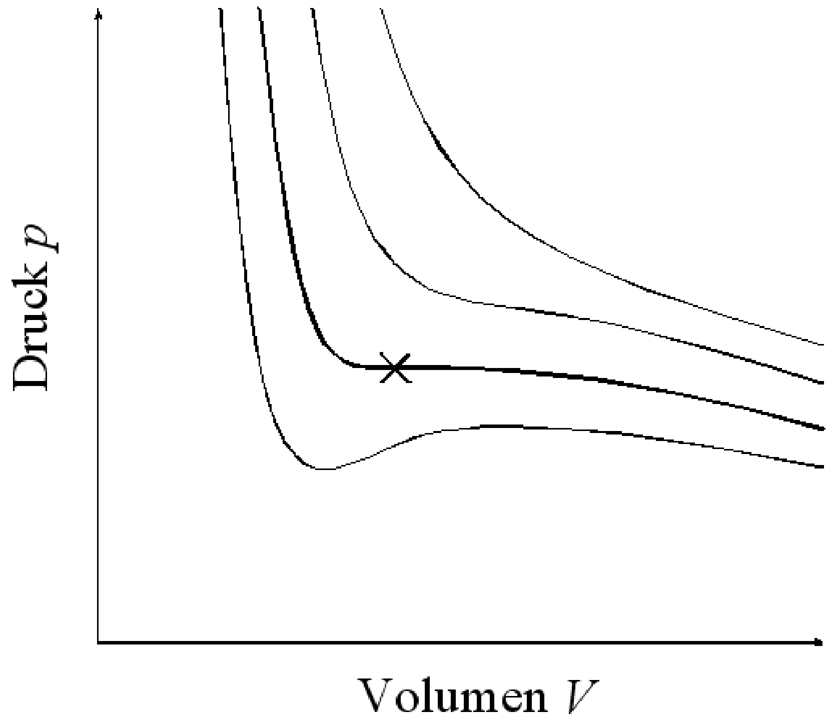
$$= \frac{\partial}{\partial V}[...]$$



722 Theorie

$$\left(p+\frac{an^2}{V^2}\right)\cdot(V-nb)=nRT$$

$$\boxed{p(V)=\frac{nRT}{V-nb}-\frac{an^2}{V^2}}$$



Steigung der Isothermen:

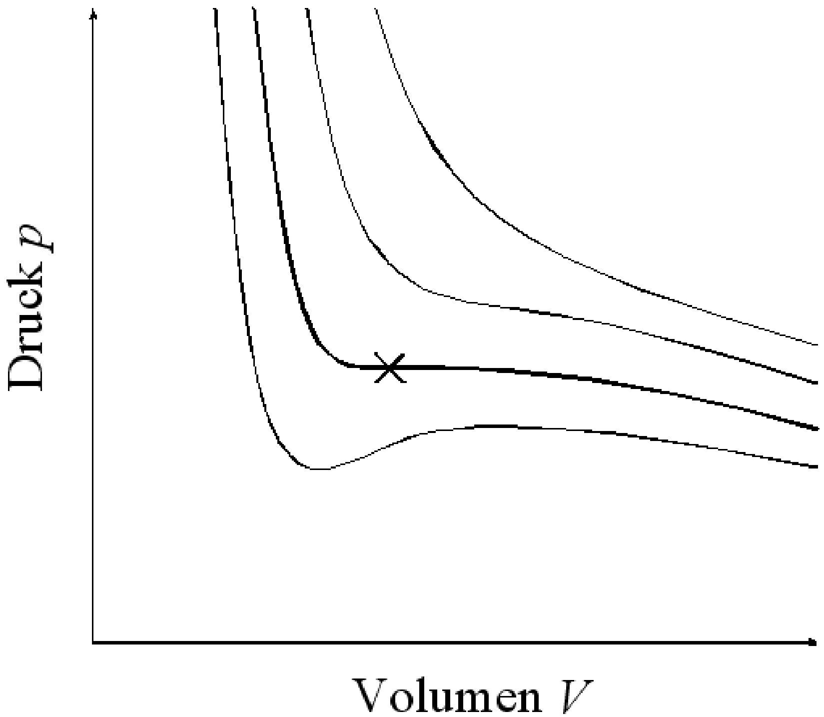
$$\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_{T=const}=$$

$$=\frac{\partial}{\partial V}[\ldots]$$

722 Theorie

$$\left(p+\frac{an^2}{V^2}\right)\cdot(V-nb)=nRT$$

$$p(V)=\frac{nRT}{V-nb}-\frac{an^2}{V^2}$$



Steigung der Isothermen:

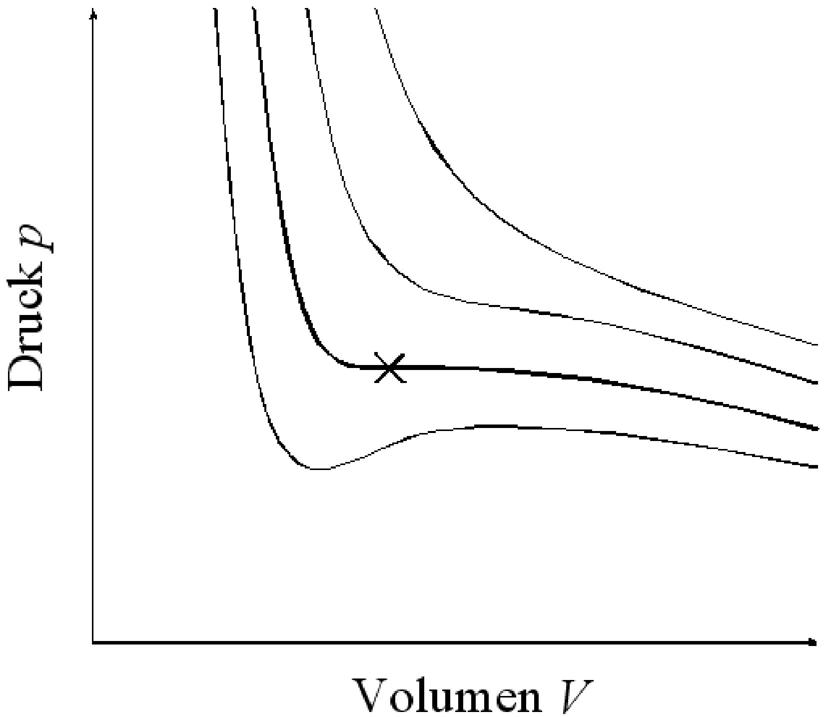
$$\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_{T=const} =$$

$$=\frac{\partial}{\partial V}\left[\frac{nRT}{V-nb}-\frac{an^2}{V^2}\right]$$

722 Theorie

$$\left(p + \frac{an^2}{V^2}\right) \cdot (V - nb) = nRT$$

$$p(V) = \frac{nRT}{V - nb} - \frac{an^2}{V^2}$$



Steigung der Isothermen:

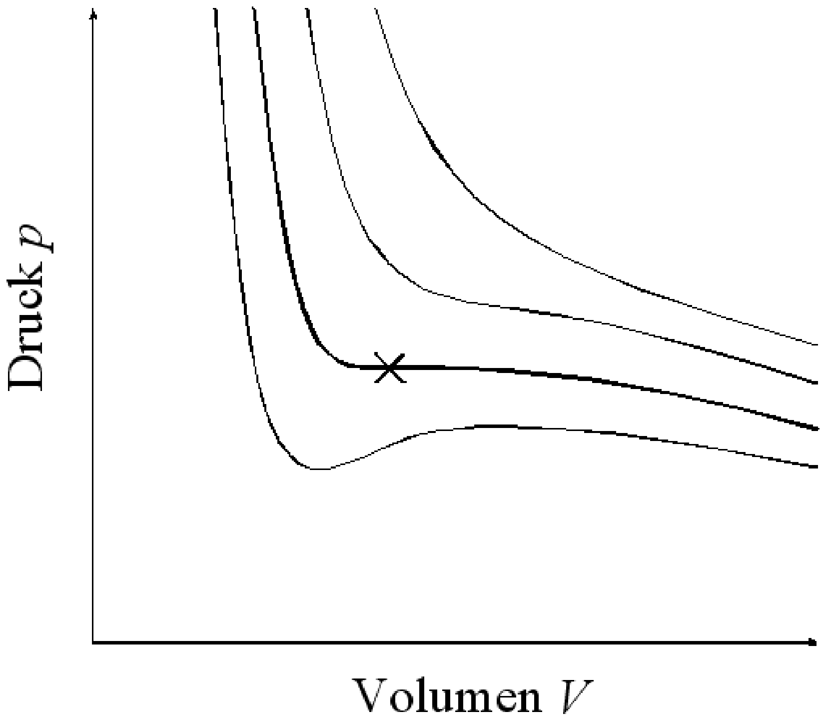
$$\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_{T=const} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial V}\left[\frac{nRT}{V - nb}\right] + \frac{2an^2}{V^3}$$

722 Theorie

$$\left(p+\frac{an^2}{V^2}\right)\cdot\left(V-nb\right)=nRT$$

$$p(V)=\frac{nRT}{V-nb}-\frac{an^2}{V^2}$$



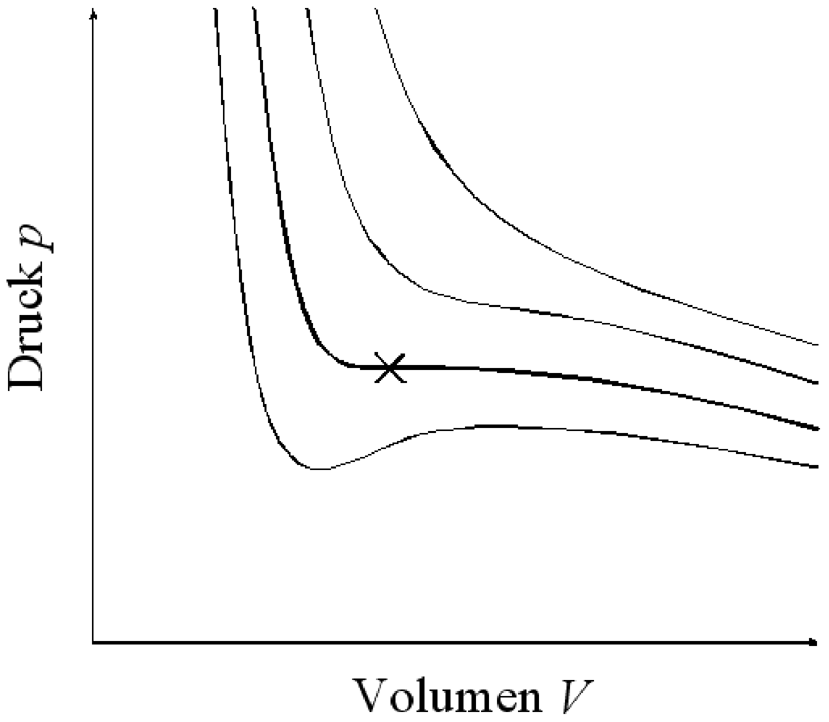
Steigung der Isothermen:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_{T=const}=$$

$$=-\frac{\partial}{\partial V}\left[V-nb\right]\cdot\frac{nRT}{(V-nb)^2}+\frac{2an^2}{V^3}$$

722 Theorie

$$\left(p + \frac{an^2}{V^2}\right) \cdot (V - nb) = nRT$$



Steigung der Isothermen:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_{T=const} =$$

$$= \frac{2an^2}{V^3} - \frac{nRT}{(V-nb)^2}$$

722 Theorie

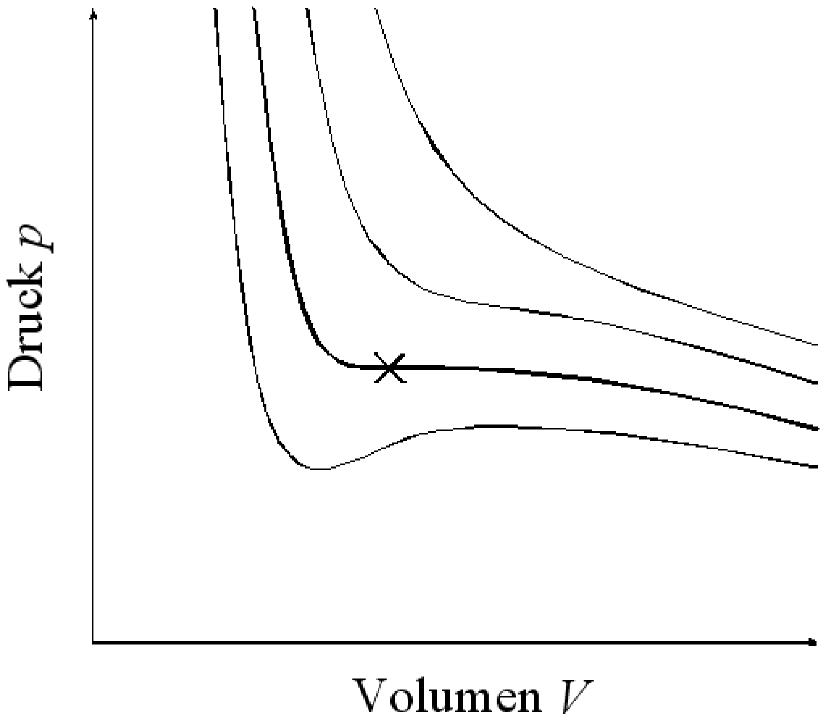
$$\left(p+\frac{an^2}{V^2}\right)\cdot\left(V-nb\right)=nRT$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_{T=const}=\frac{2an^2}{V^3}-\frac{nRT}{(V-nb)^2}$$

Bedingung für den Trippelpunkt:

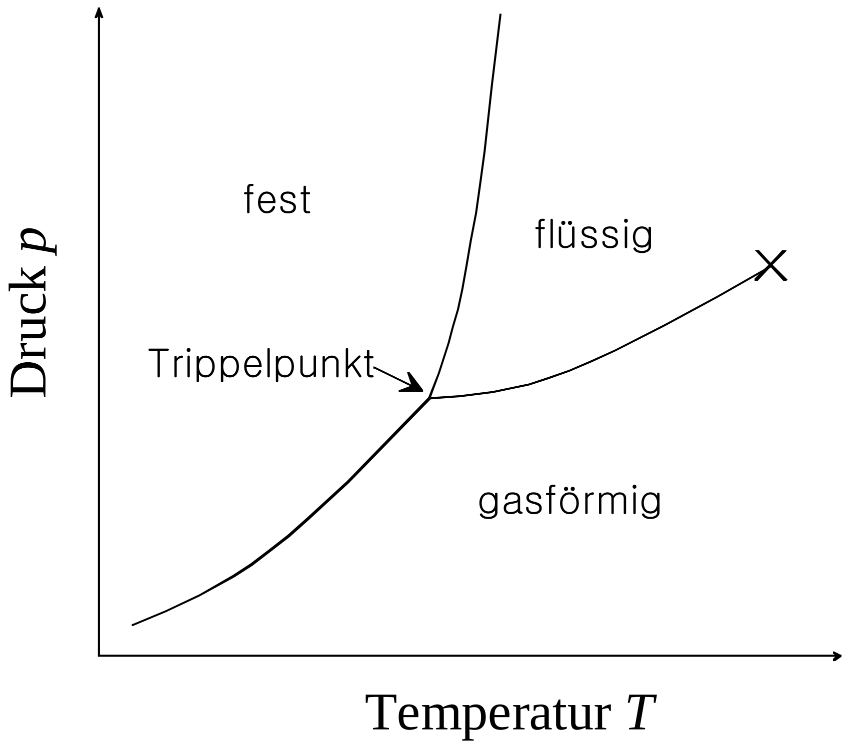
$$\frac{\partial p}{\partial V}=0$$

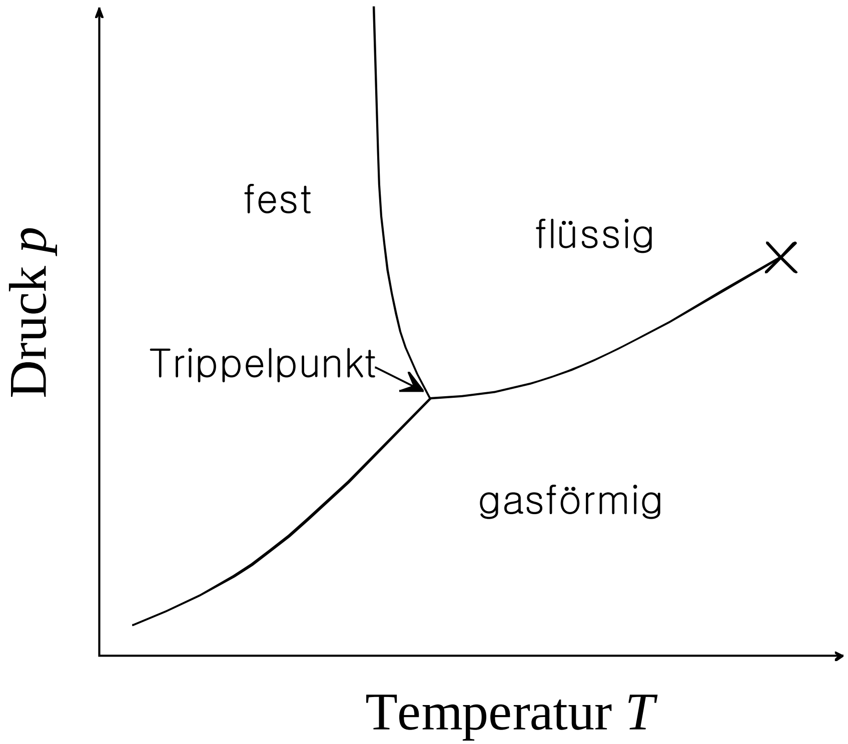
$$\frac{\partial^2 p}{\partial V^2}=0$$

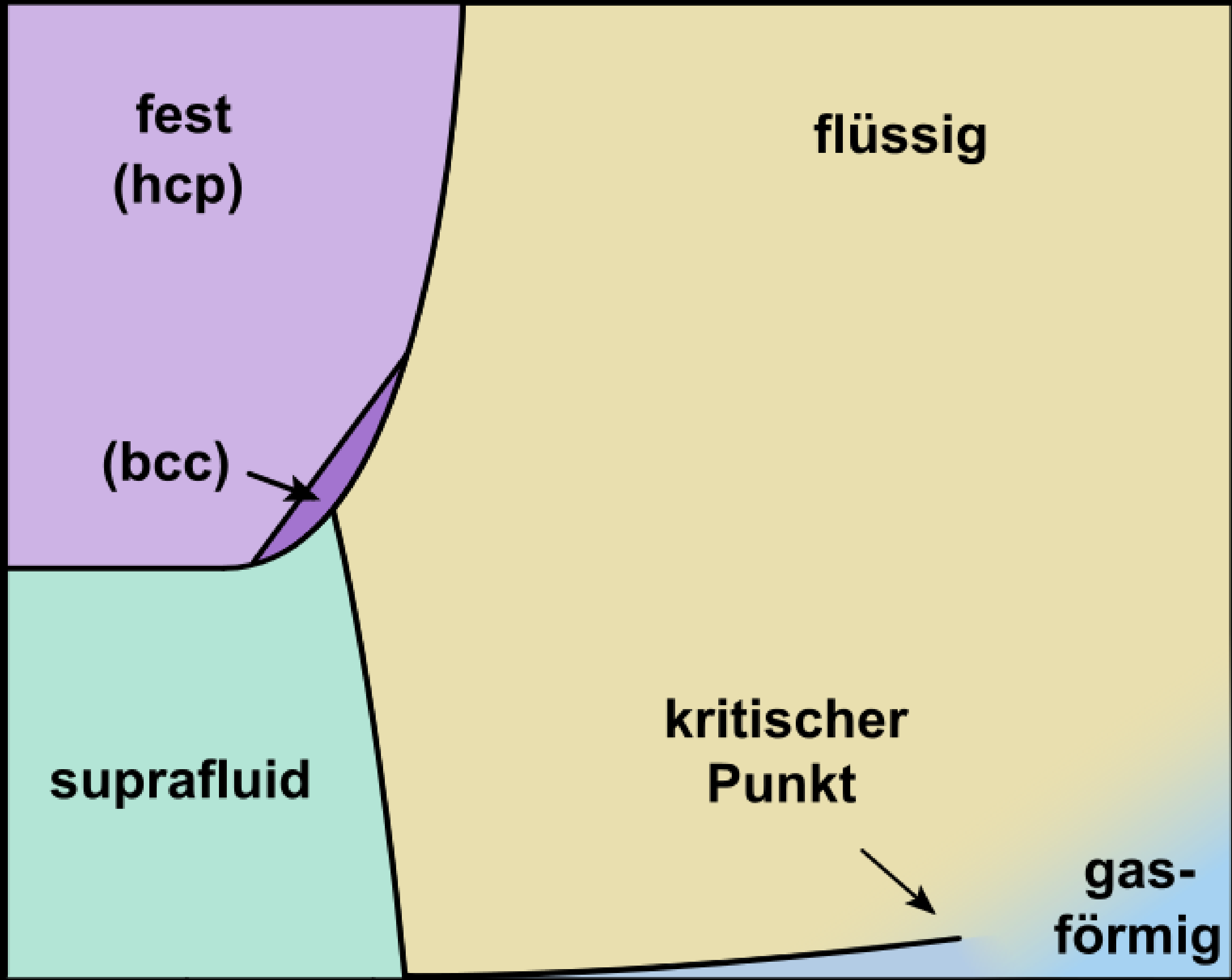


722 Theorie

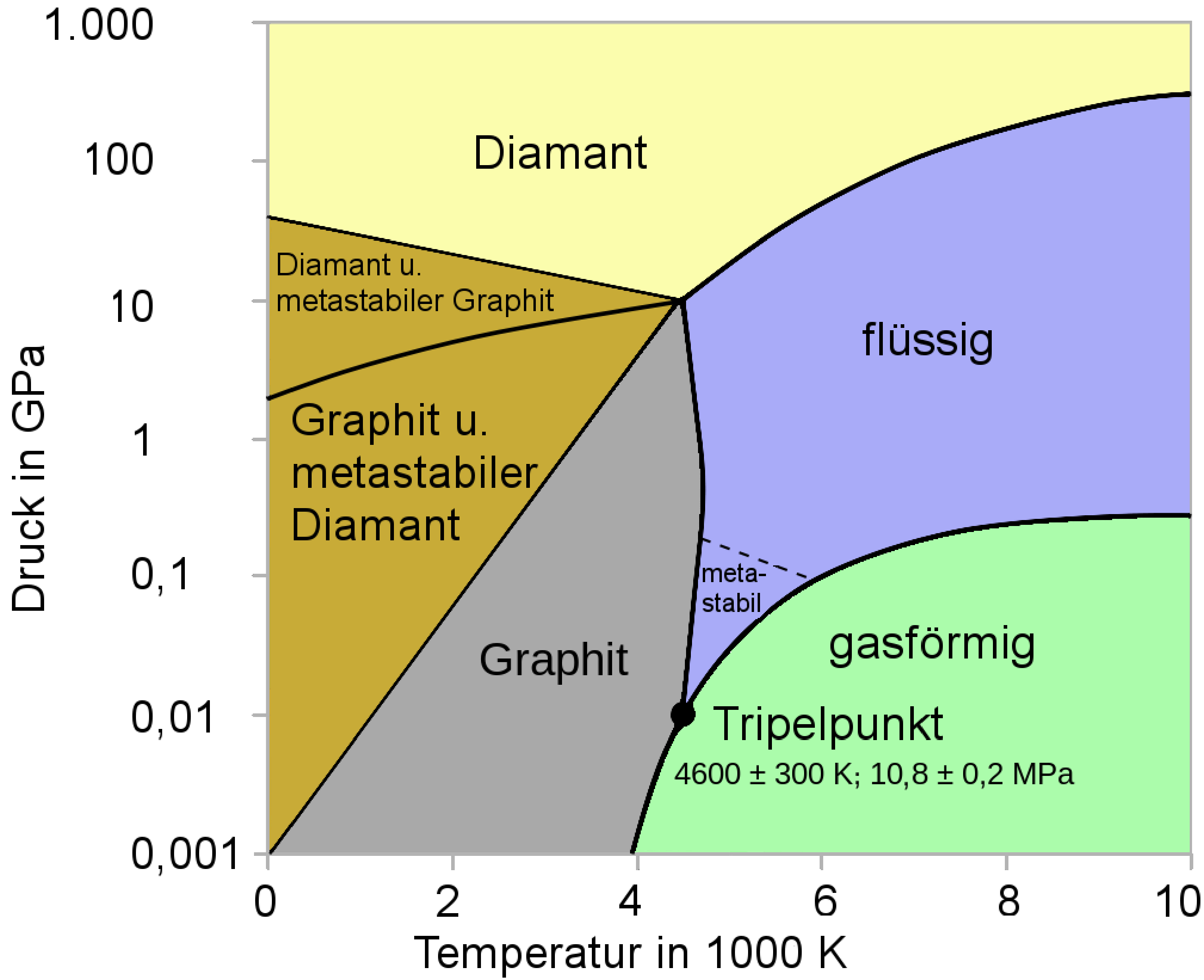
Stoffe ohne und mit Anomalie







Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Phasendiagramm#/media/File:He4_de.svg



Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phasendiagramm_des_Kohlenstoffs.png

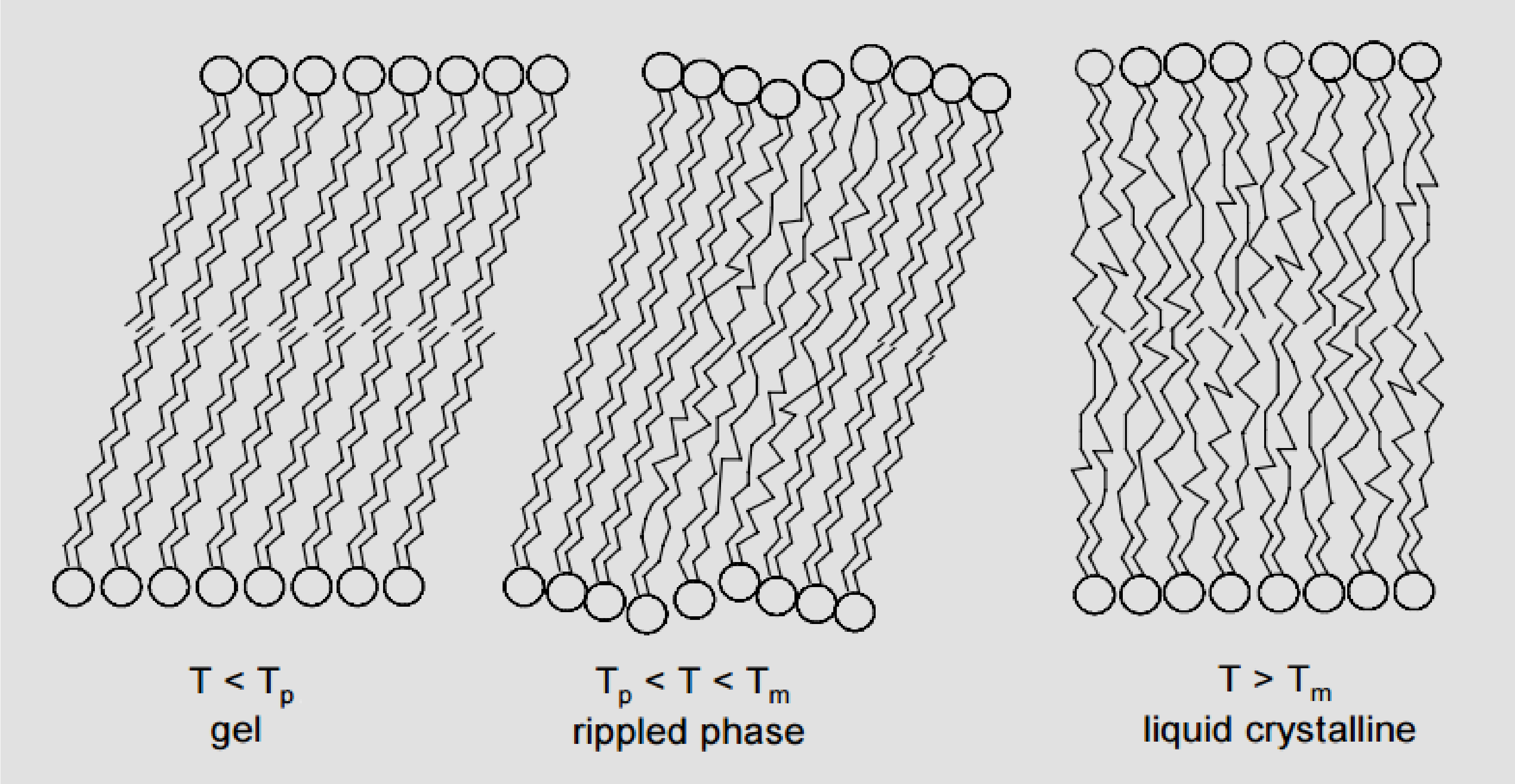
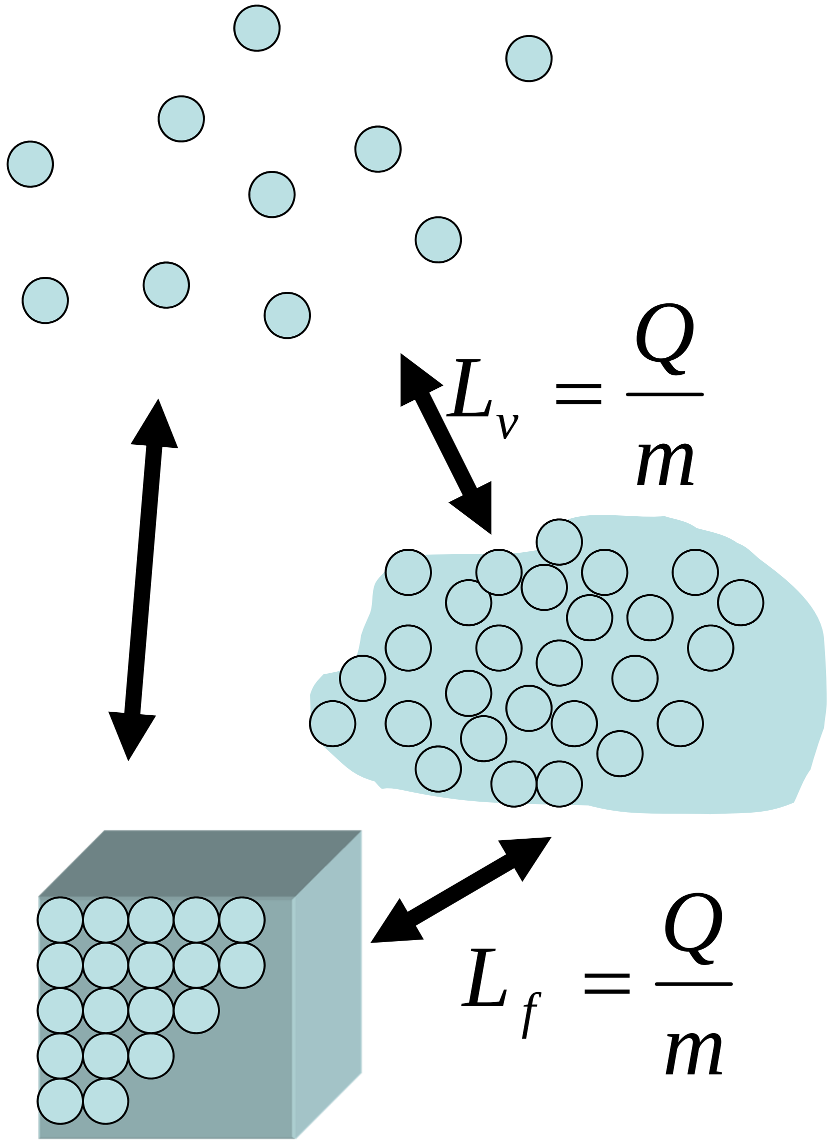


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Packung der Acylketten in einem gesättigten Phospholipid (z.B. DPPC), Gel in quasi-kristallinem Zustand ($T<T_p$) Rippled Phase ($T_p<T<T_m$) und im flüssig-kristallinen Zustand ($T>T_m$).

Hatziantoniou et al. (2005): Phasenübergänge von Lipiden und Liposomen. UserCom 1/2005, 16-18



$$L_v = \frac{Q}{m}$$

$$L_f = \frac{Q}{m}$$

722 Theorie

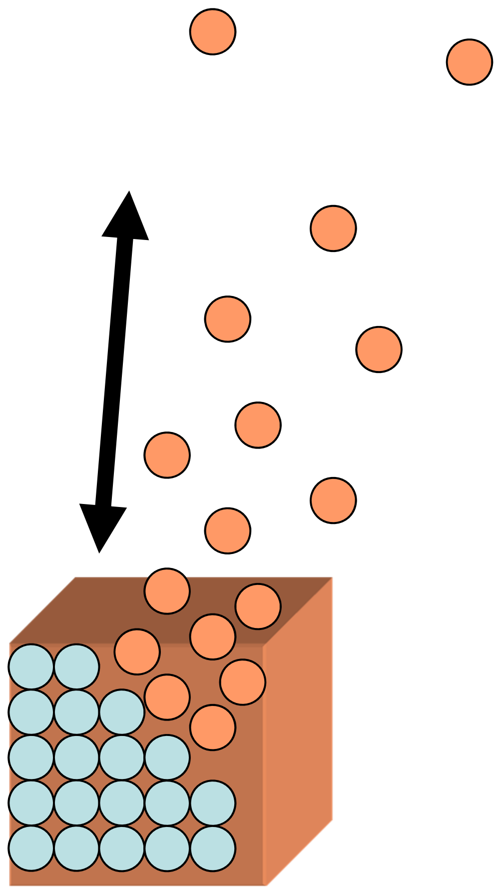
Phasenübergänge sind mit Bindungskräften assoziert:

Grössere räumliche Trennung benötigt Energie, bei Kondensation oder Bildung von Festkörpern wird Energie frei

$$Q = L_V m$$

$$Q = L_f m$$

722 Theorie



Das Konzept lässt sich auch auf chemische Umwandlungen anwenden:

Bsp. Brennwert

$$Q = Hm$$

$$Q = L_V m$$

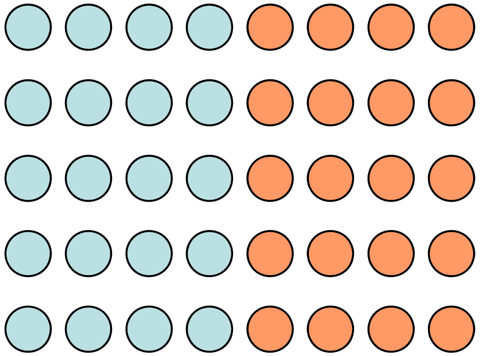
$$Q = L_f m$$

723 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik, Entropie

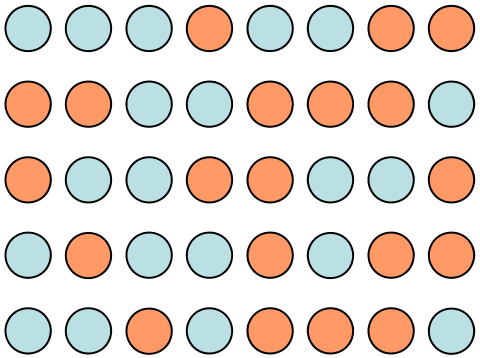
723 Ziele

- Entropie als Ordnungsmass verstehen
- thermodynamische Entropie makroskopisch definieren können
- Aus Entropiestrom Leistung berechnen können

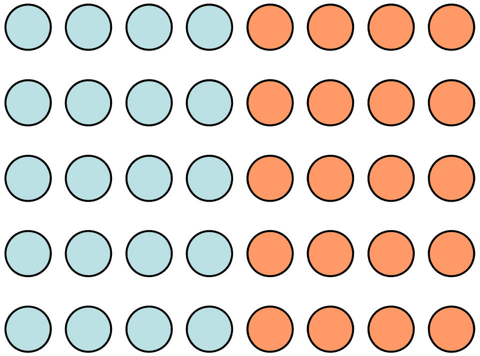
723 Theorie

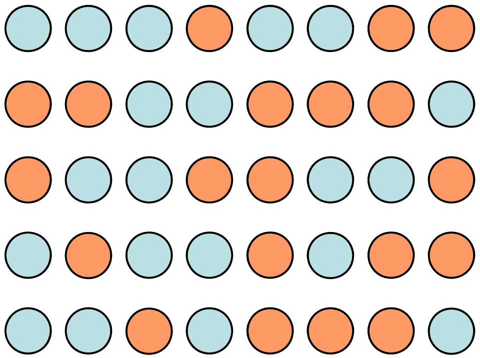


Was ist der Unterschied?



723 Theorie





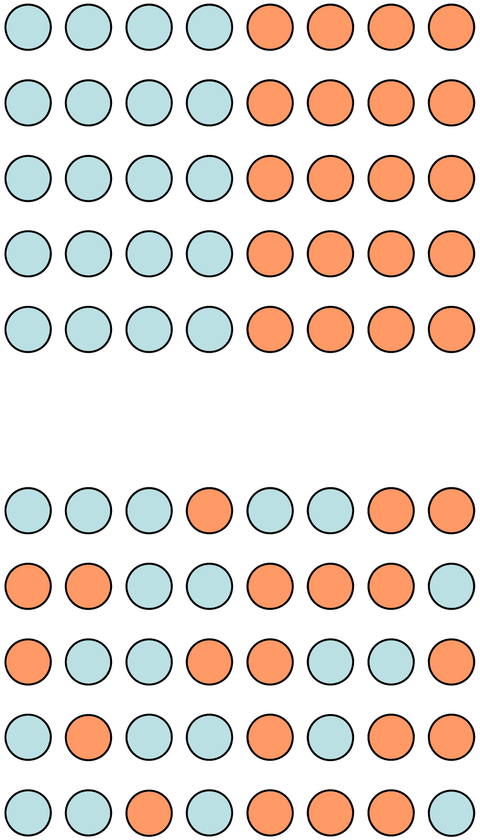
Was ist der Unterschied?

(An-) Ordnung

physikalischer Prozess:
Diffusion, Wärmeleitung

→ Diese Prozesse sind gerichtet, sie laufen spontan nur in eine Richtung!

723 Theorie

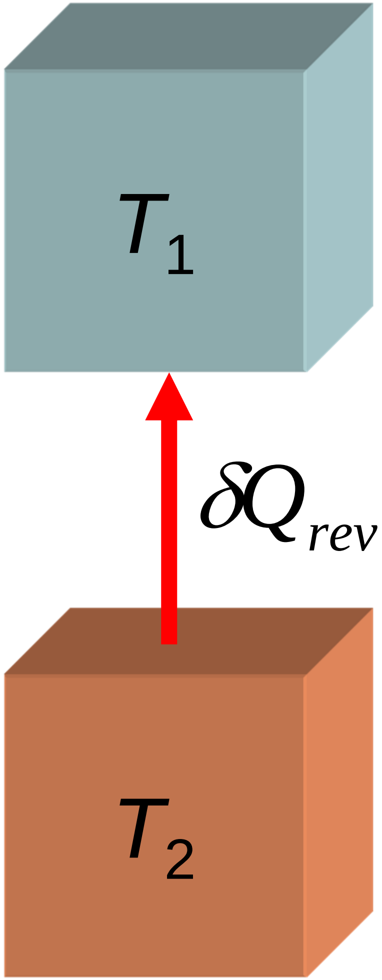


physikalisches Ordnungsmass: Entropie

Dieses Mass lässt sich mikroskopisch (statistisch-mechanisch) aus den Zuständen der einzelnen Teilchen berechnen

→ Wie die Temperatur lässt sich die Entropie nur für viele Teilchen definieren.

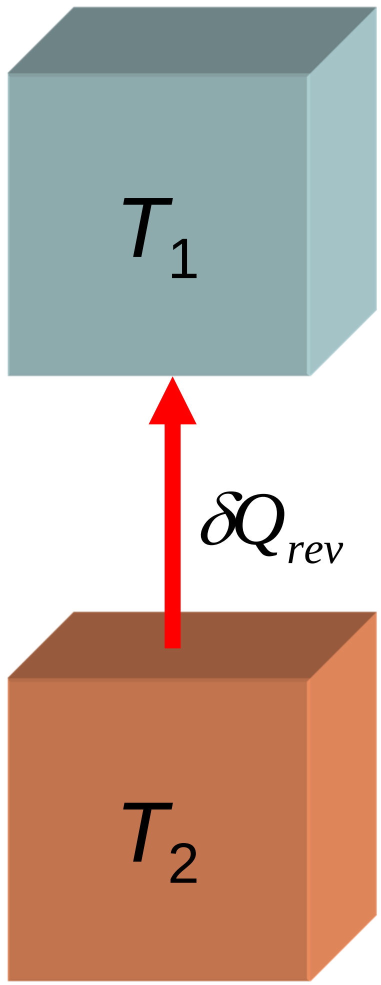
723 Theorie



Entropie S: die bei einer bestimmten Temperatur reversibel ausgetauschte Wärme δQ_{rev}

$$dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T}$$

723 Theorie

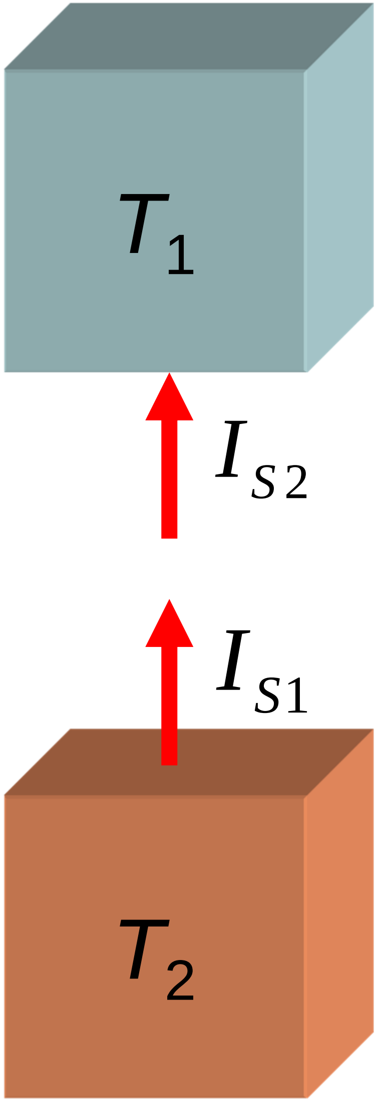


Entropie *S*: die bei einer bestimmten Temperatur reversibel ausgetauschte Wärme δQ_{rev}

$$dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T}$$

Für $T_2 > T_1$ gilt:

$$\boxed{dS_2 + dS_1 = -\frac{\delta Q_{rev}}{T_2} + \frac{\delta Q_{rev}}{T_1} > 0}$$



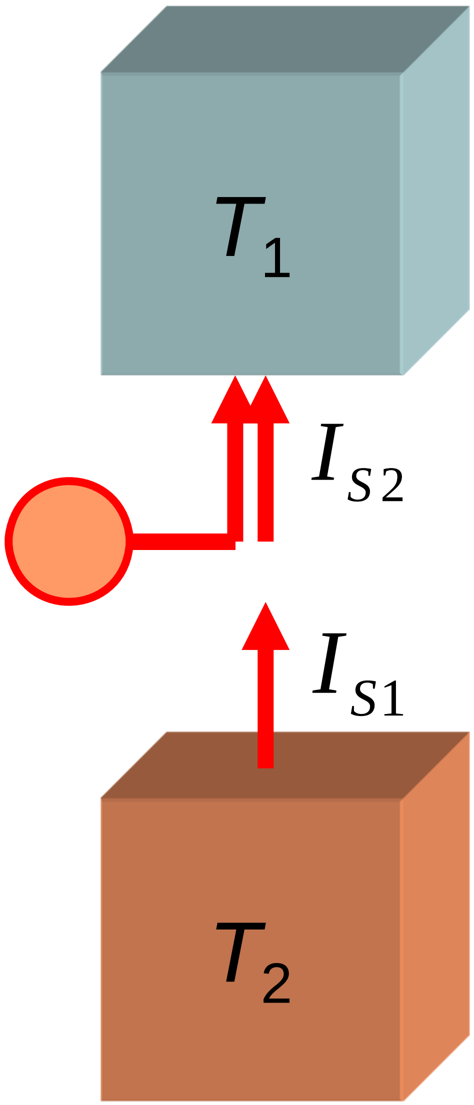
723 Theorie

Oder mit Entropiestrom I_S:

$$\left[\frac{dS}{dt}\right]_i = I_{Si} = \frac{1}{T_i} \cdot I_Q$$

Für $T_2 > T_1$ gilt:

$$\boxed{I_{S1} > I_{S2}}$$



723 Theorie

Oder mit Entropiestrom I_S:

$$\left[\frac{dS}{dt}\right]_i = I_{Si} = \frac{1}{T_i} \cdot I_Q$$

Für $T_2 > T_1$ gilt:

$$\boxed{I_{S1} > I_{S2}}$$

$$\delta Q_{rev} = TdS$$

723 Theorie

Zusammenhang zwischen Entropie und innerer Energie:

723 Theorie

$$\delta Q_{rev} = TdS$$

Zusammenhang zwischen Entropie und innerer Energie:

$$\delta W = -F \cdot ds$$

$$= -pA \cdot ds = -p \cdot dV$$

723 Theorie

Zusammenhang zwischen Entropie und innerer Energie:

$$\delta Q_{rev} = TdS$$

$$\delta W = -F \cdot ds$$

$$= -pA \cdot ds = -p \cdot dV$$

$$\rightarrow \; dU = T \cdot dS - p \cdot dV$$

723 Theorie

Zusammenhang zwischen Entropie und innerer Energie:

$$dU = T \cdot dS - p \cdot dV$$

$$\boxed{\begin{aligned} T &= \left[\frac{\partial U}{\partial S}\right]_{V,N,\ldots} \\ -p &= \left[\frac{\partial U}{\partial V}\right]_{S,N,\ldots} \end{aligned}}$$

723 Theorie

$$dU = T \cdot dS - p \cdot dV$$

Zusammenhang zwischen Entropie und innerer Energie:

$$\boxed{\begin{aligned} T &= \left[\frac{\partial U}{\partial S}\right]_{V,N,\ldots} \\ -p &= \left[\frac{\partial U}{\partial V}\right]_{S,N,\ldots} \end{aligned}}$$

	Intensive Grössen	*Extensive Grössen*
$pV = nRT$	Druck p	Volumen V
TS = *pot. Energie*	Temperatur T	Entropie S

723 Theorie

Entropiestrom und Leistung:

$$P = T \cdot \frac{dS}{dt} = T \cdot I_S$$

723 Theorie

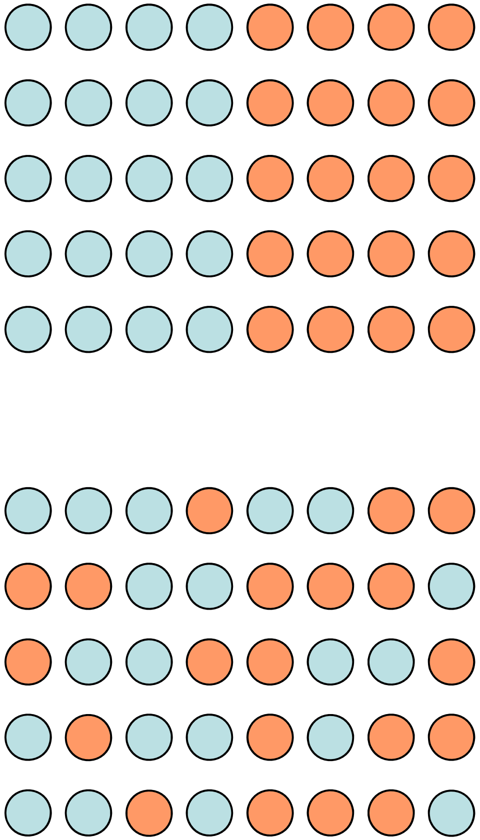
Entropiestrom und Leistung:

$$P = T \cdot \frac{dS}{dt} = T \cdot I_S$$

Tab.2. Analogien zum Entropiestrom

Mechanisch	Hydraulisch	Elektrisch	Thermisch
Potentialdifferenz ΔV	Druckdifferenz Δp	Elektr. Spannung Potentialdifferenz $U = \Delta\varphi$	Temperatur T
Massestrom $\frac{dm}{dt} = I_m$	Volumenstrom $\frac{dV}{dt} = I_V$	Ladungsstrom $\frac{dQ}{dt} = I$	Entropiestrom $\frac{dS}{dt} = I_S$
$P = \Delta V \cdot I_m$	$P = \Delta p \cdot I_V$	$P = UI$	$P = T \cdot I_S$

723 Aufgaben



Entropie als generelles Ordnungsmass?

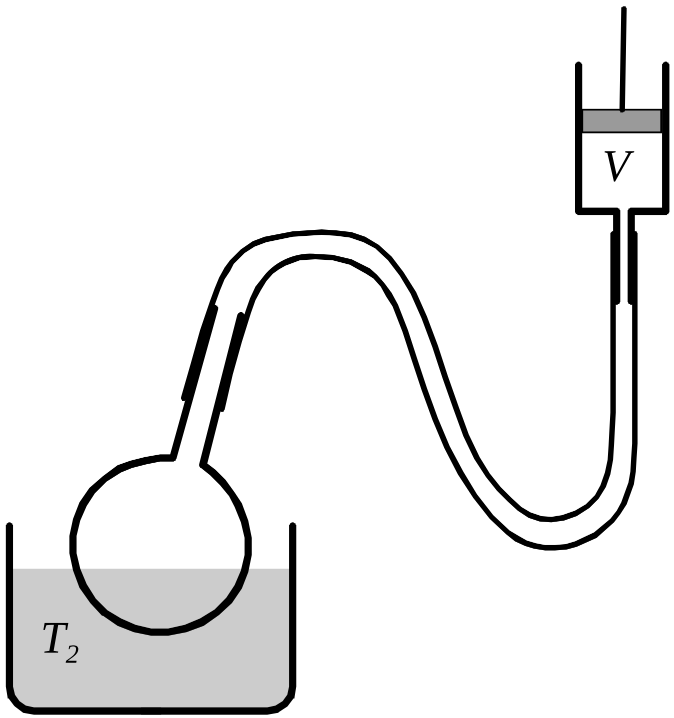
$$S = -\sum_k x_k \log x_k$$

724 Wärmekraftmaschinen

724 Ziele

- Kreisprozesse in einem pV-Diagramm darstellen können (isotherm, isobar, isochor,isentrop)
- Verrichtete Arbeit aus pV-Diagramm herauslesen können
- thermodynamischer Wirkungsgrad definieren und berechnen können

724 Theorie

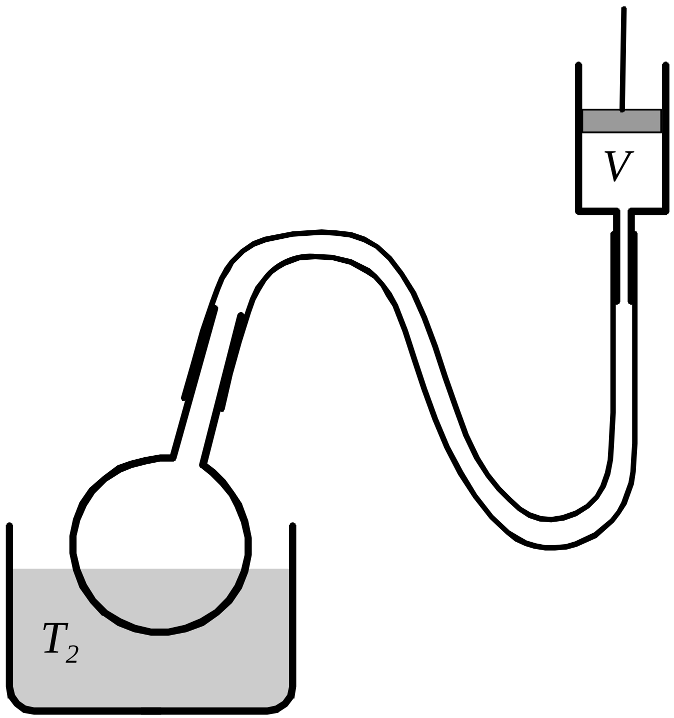


Einfaches Modell einer Wärmekraftmaschine

nicht-zyklisch arbeitend

zyklisch arbeitend, wenn Wärmebad gewechselt wird

724 Theorie



Einfaches Modell einer Wärmekraftmaschine

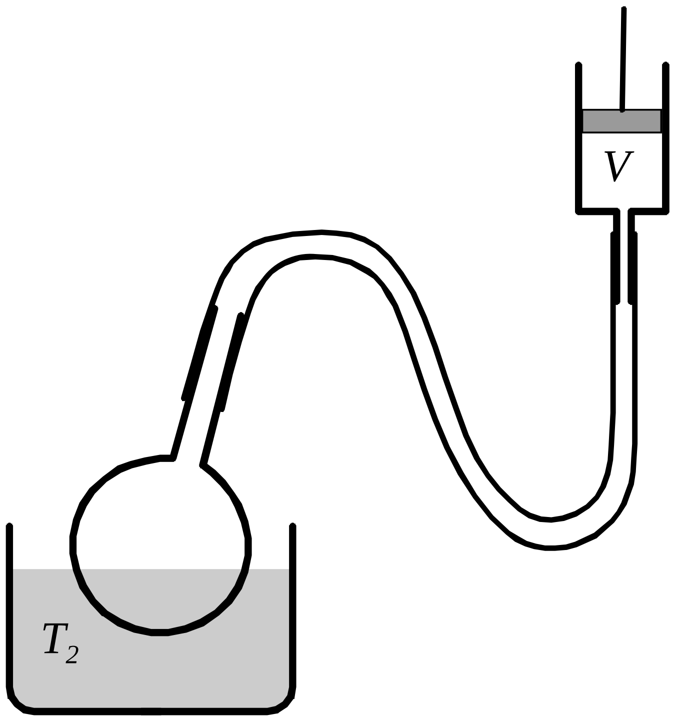
nicht-zyklisch arbeitend

zyklisch arbeitend, wenn Wärmebad gewechselt wird

$$dW = F \cdot ds$$

$$= mg \cdot dh$$

724 Theorie



Einfaches Modell einer Wärmekraftmaschine

nicht-zyklisch arbeitend

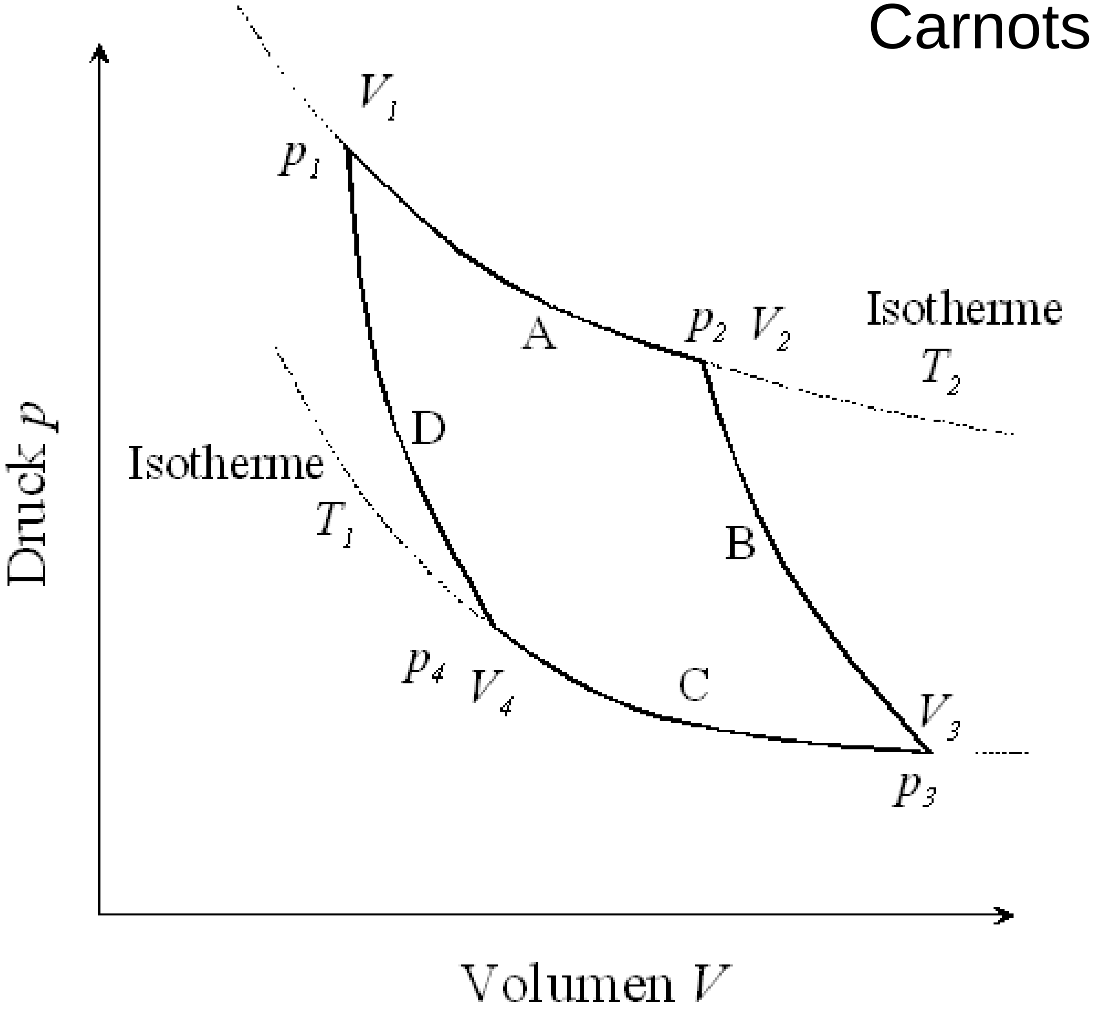
zyklisch arbeitend, wenn Wärmebad gewechselt wird

$$dW = F \cdot ds$$

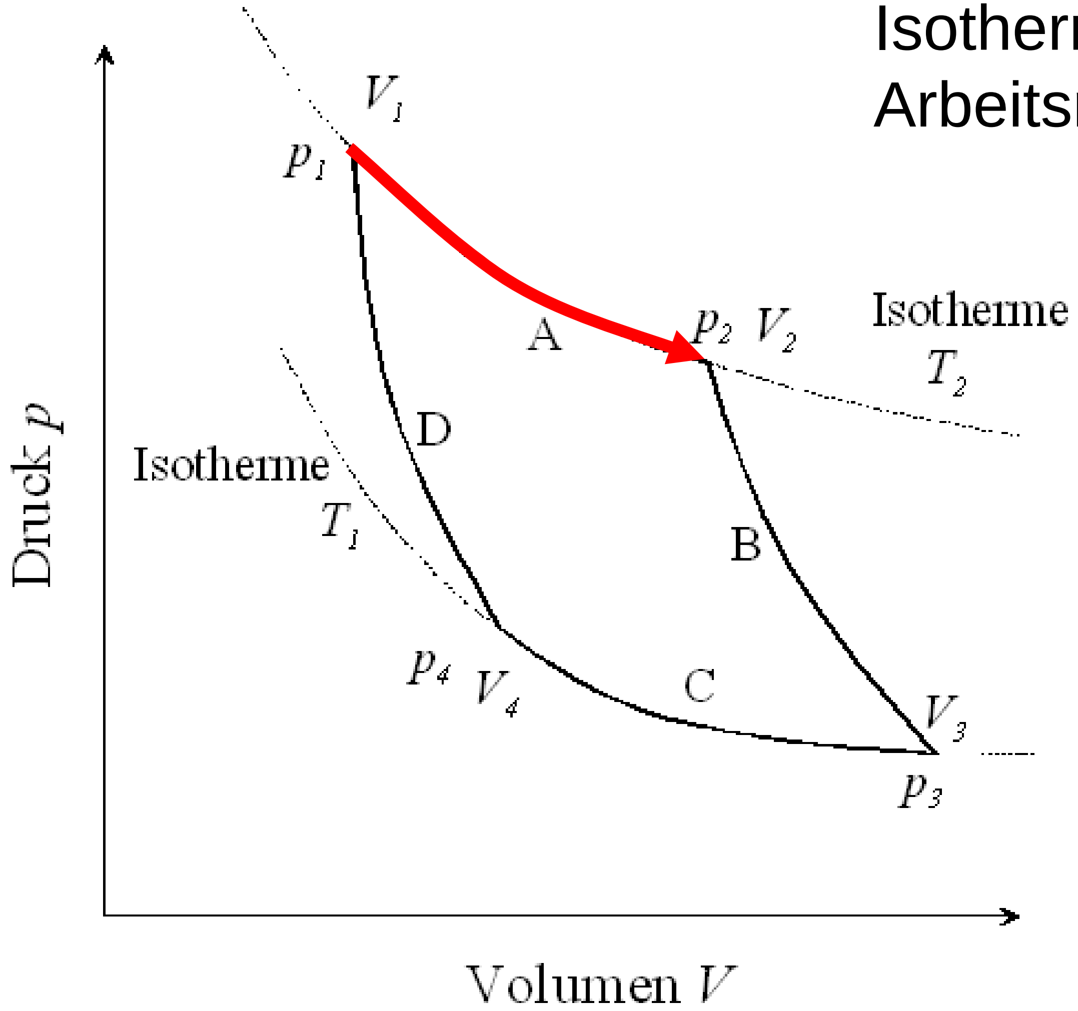
$$= mg \cdot dh = p \cdot dV$$

724 Theorie

Carnotscher Kreisprozess



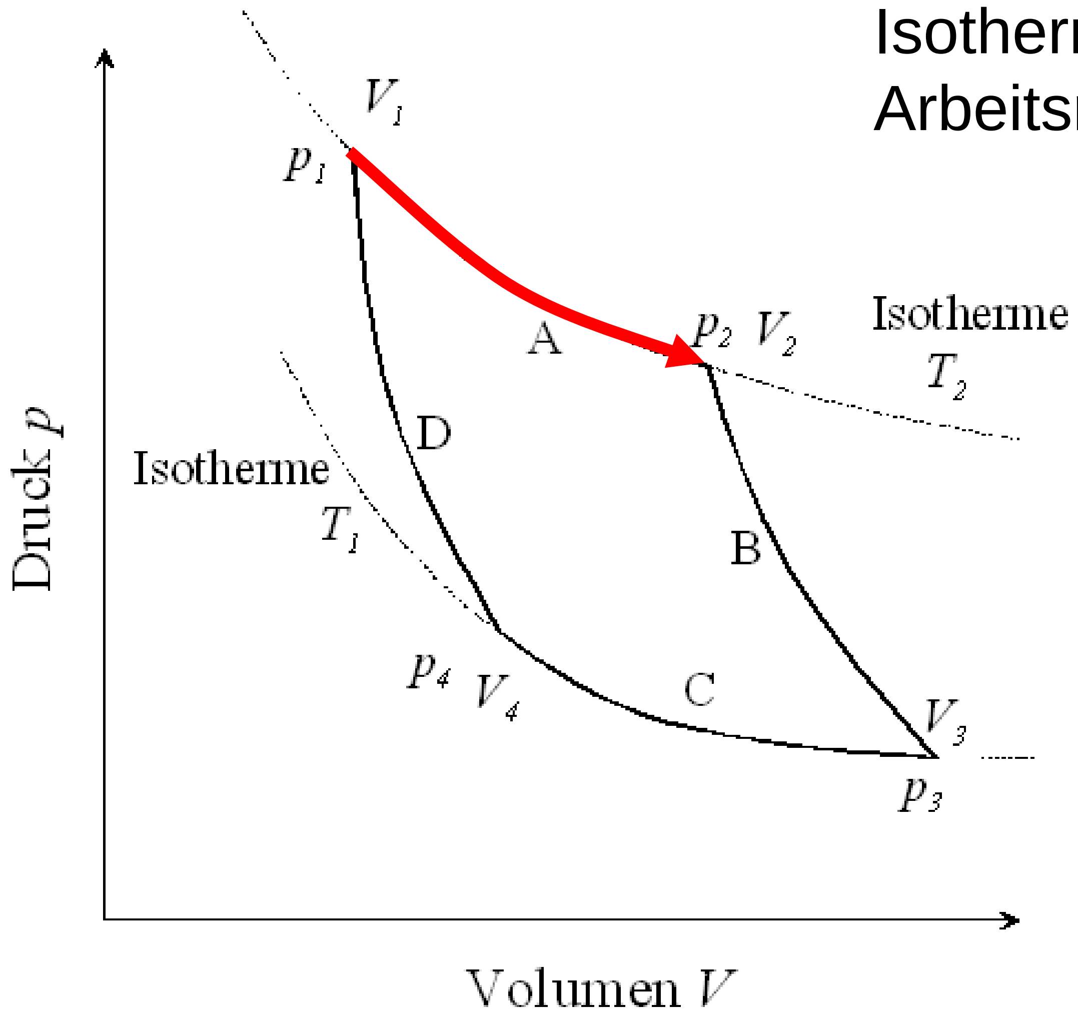
724 Theorie



Isotherme Expansion mit Arbeitsmedium ideales Gas

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2}$$

724 Theorie

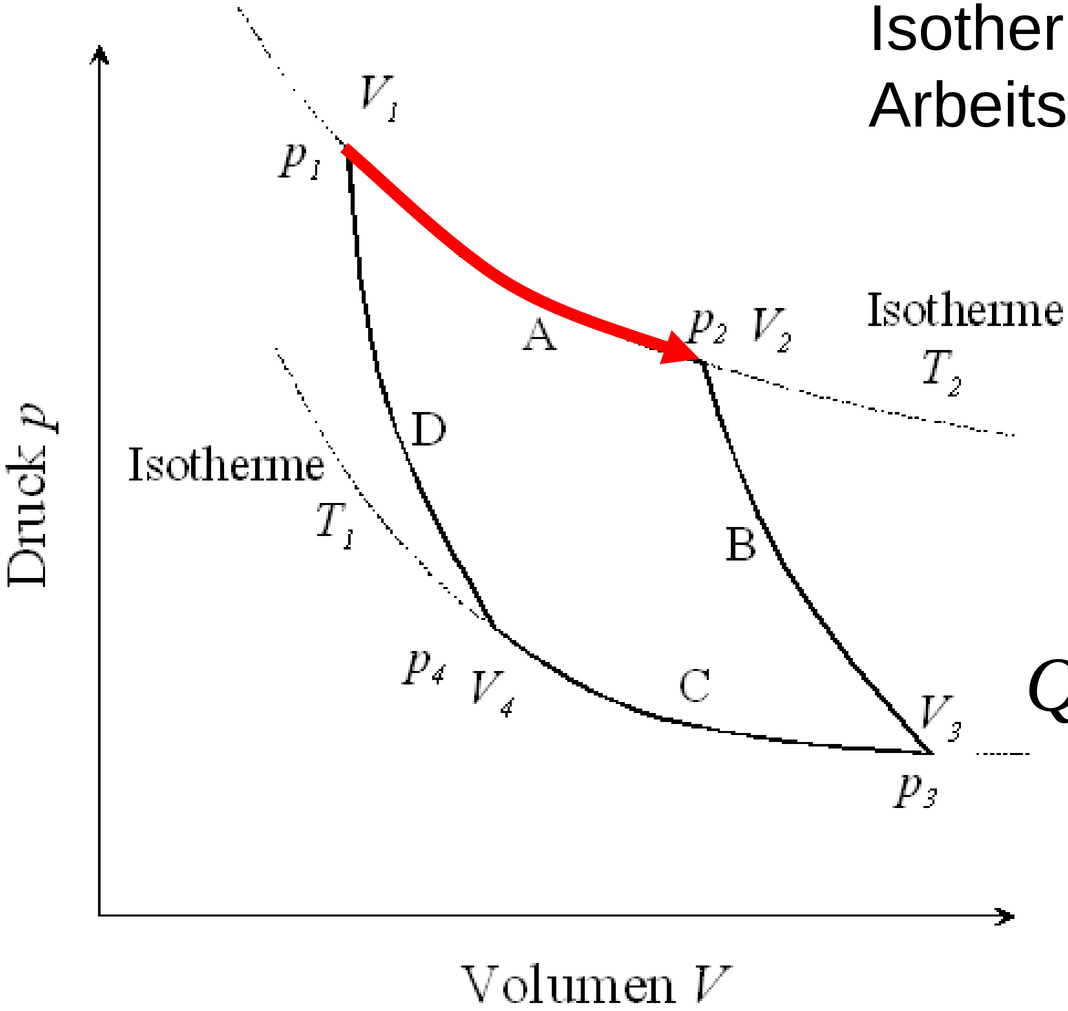


Isotherme Expansion mit Arbeitsmedium ideales Gas

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2}$$

$$\Delta U_A = W_A + Q_A = 0$$

724 Theorie



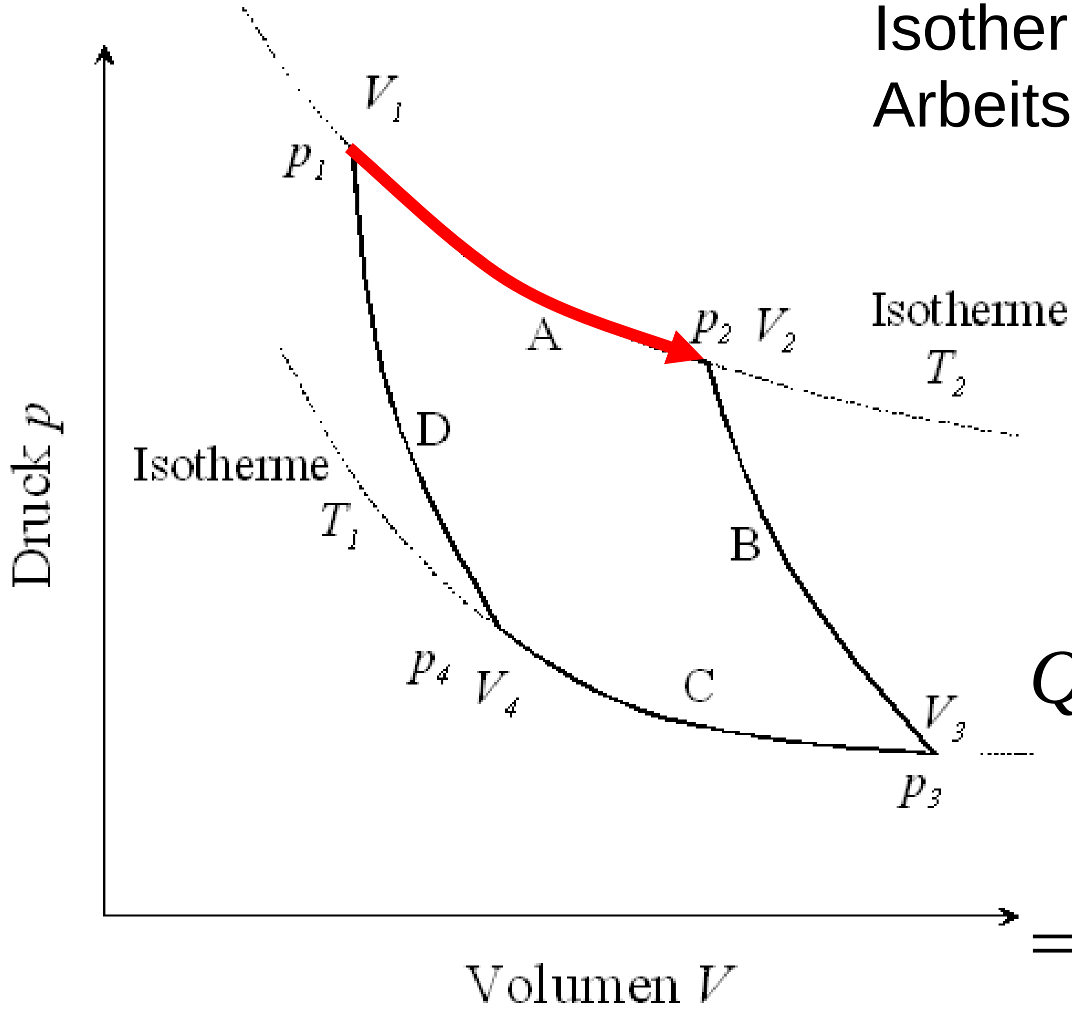
Isotherme Expansion mit Arbeitsmedium ideales Gas

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2}$$

$$\Delta U_A = W_A + Q_A = 0$$

$$Q_A = -W_A = NkT_2 \cdot \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

724 Theorie



Isotherme Expansion mit Arbeitsmedium ideales Gas

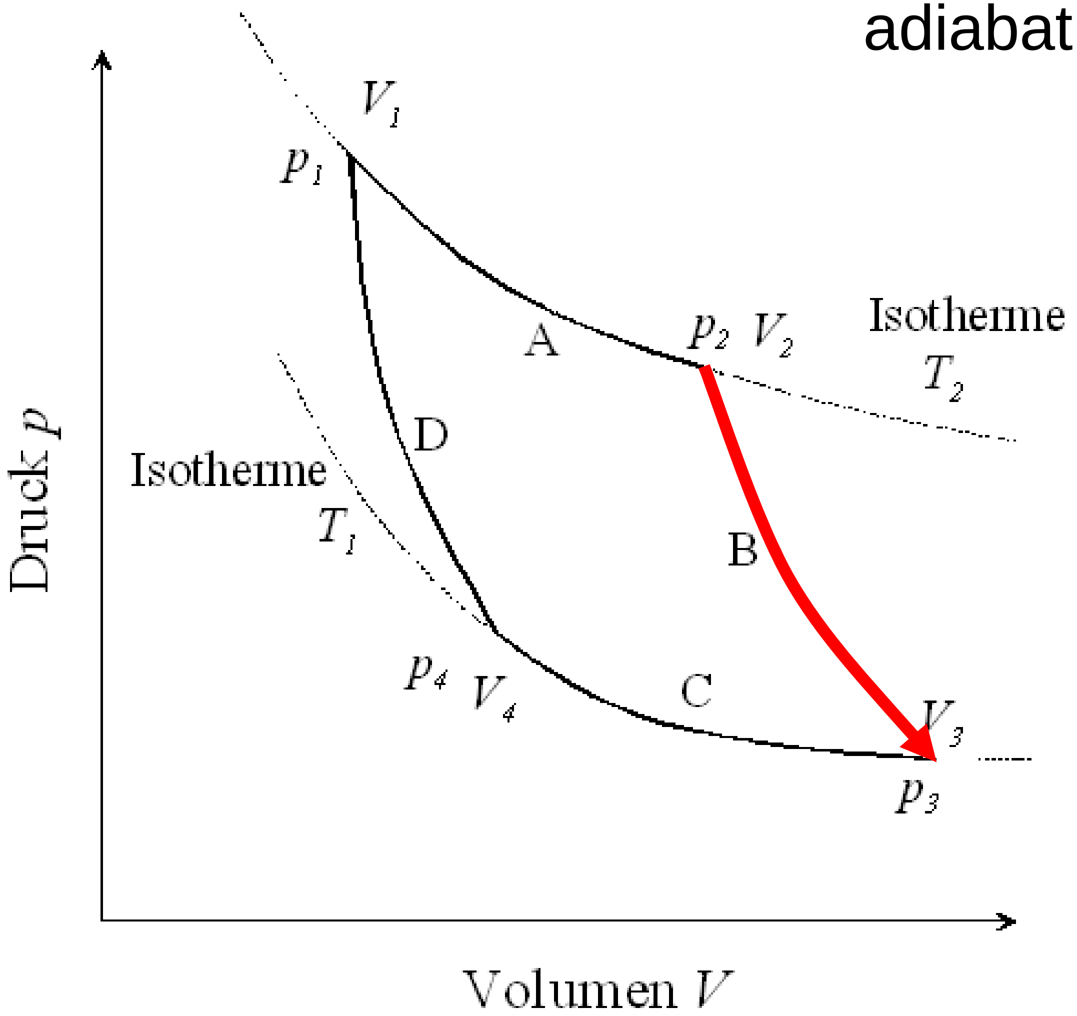
$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2}$$

$$\Delta U_A = W_A + Q_A = 0$$

$$Q_A = -W_A = NkT_2 \cdot \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

$$= NkT_2 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

724 Theorie

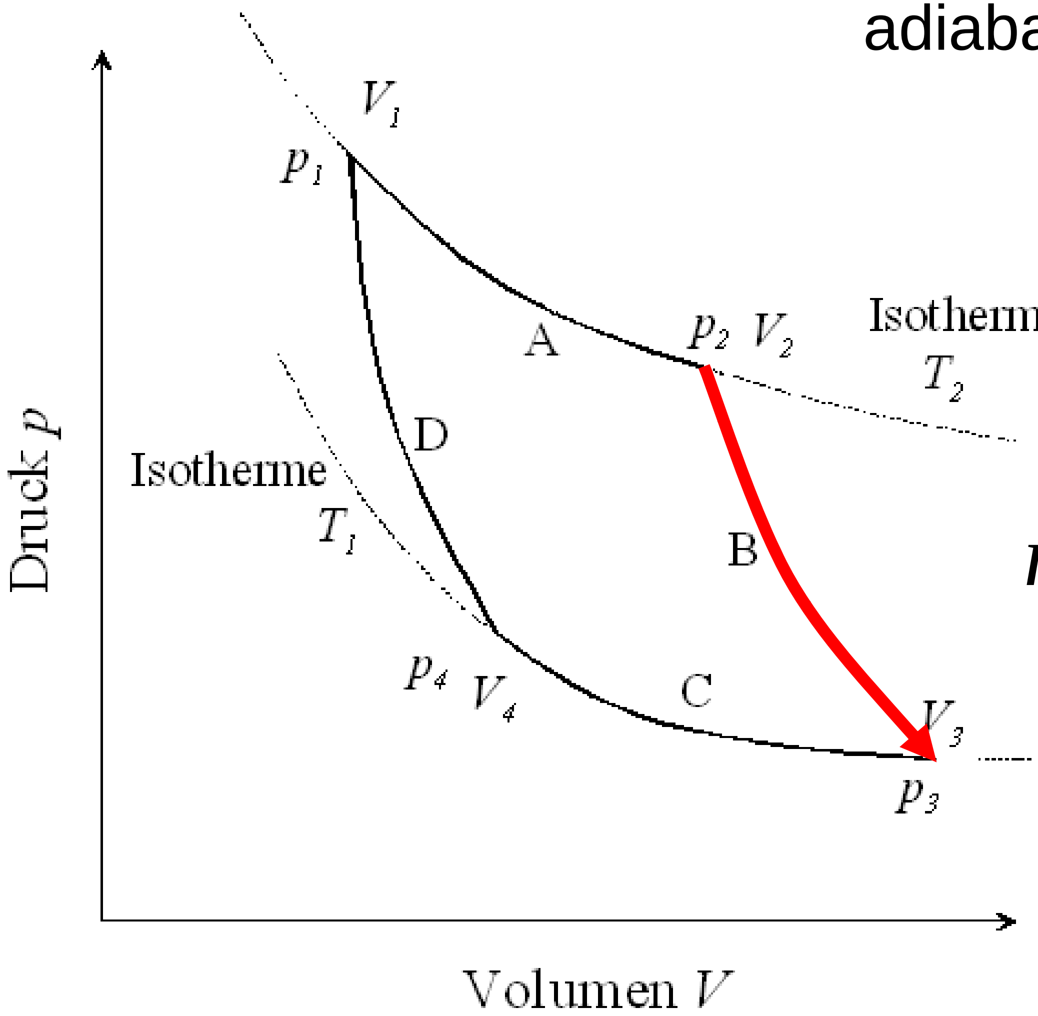


adiabatische Expansion:

$$dU = -p \cdot dV$$

$$= mc_V \cdot dT$$

724 Theorie



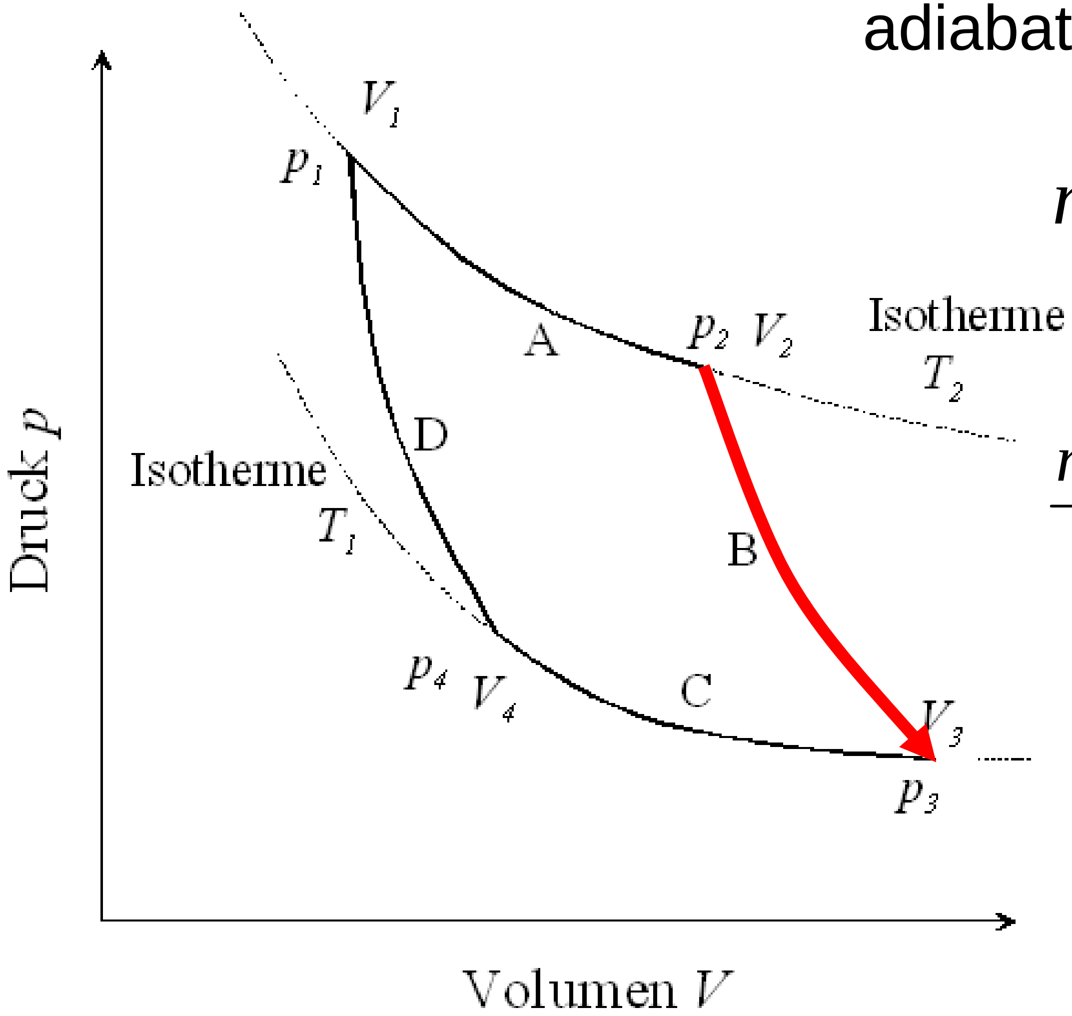
adiabatische Expansion:

$$dU = -p \cdot dV$$

$$= mc_V \cdot dT$$

$$mc_V\, dT = -\frac{NkT}{V} \cdot dV$$

724 Theorie

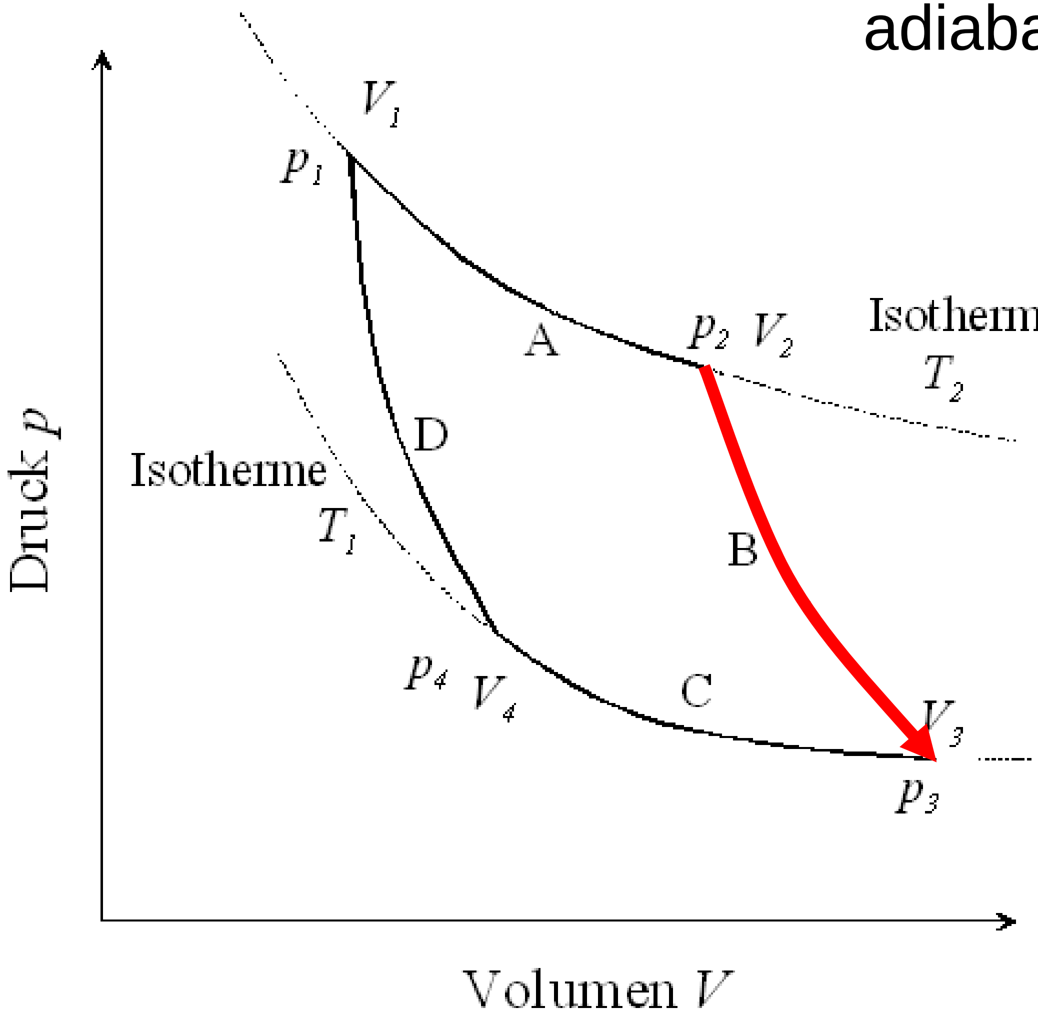


adiabatische Expansion:

$$mc_V\,dT = -\frac{NkT}{V} \cdot dV$$

$$\frac{mc_V}{Nk}\int_{T_1}^{T_2}\frac{dT}{T} = -\int_{V_3}^{V_2}\frac{dV}{V}$$

724 Theorie



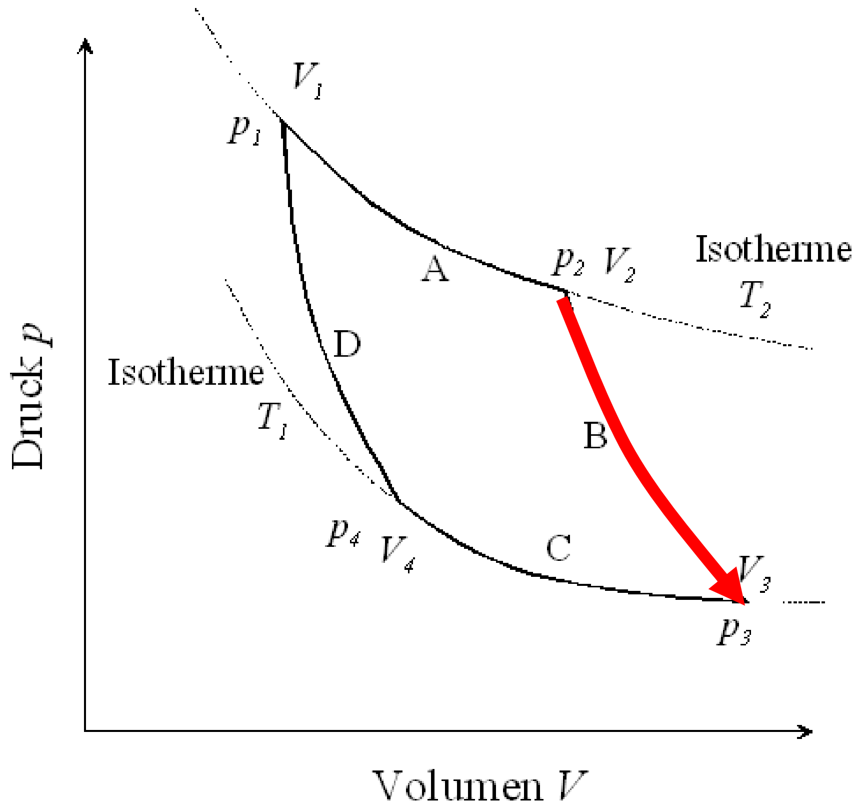
adiabatische Expansion:

$$mc_V\,dT = -\frac{NkT}{V}\cdot dV$$

$$\frac{mc_V}{Nk}\int_{T_1}^{T_2}\frac{dT}{T} = -\int_{V_3}^{V_2}\frac{dV}{V}$$

$$\Rightarrow \frac{mc_V}{Nk}\cdot\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = -\ln\left(\frac{V_2}{V_3}\right)$$

724 Theorie



adiabatische Expansion:

$$\frac{mc_V}{Nk}\cdot\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = -\ln\left(\frac{V_2}{V_3}\right)$$

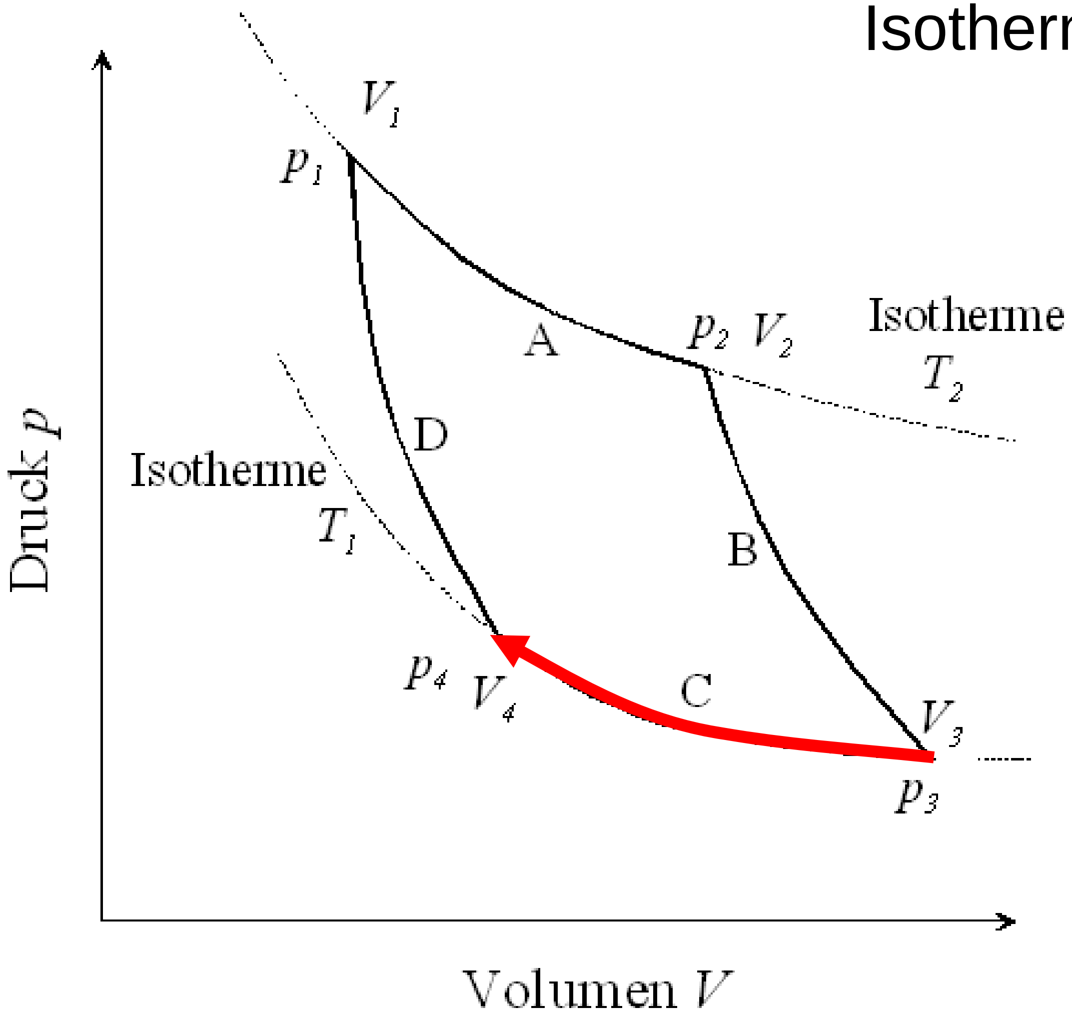
$$mc_V = \frac{3}{2}Nk$$

$$\frac{3}{2}\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \ln\left(\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{3}{2}}\right) = \ln\left(\left(\frac{V_2}{V_3}\right)^{-1}\right)$$

$$\Rightarrow \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{3}{2}} = \frac{V_3}{V_2}$$

724 Theorie

Isotherme Kompression:

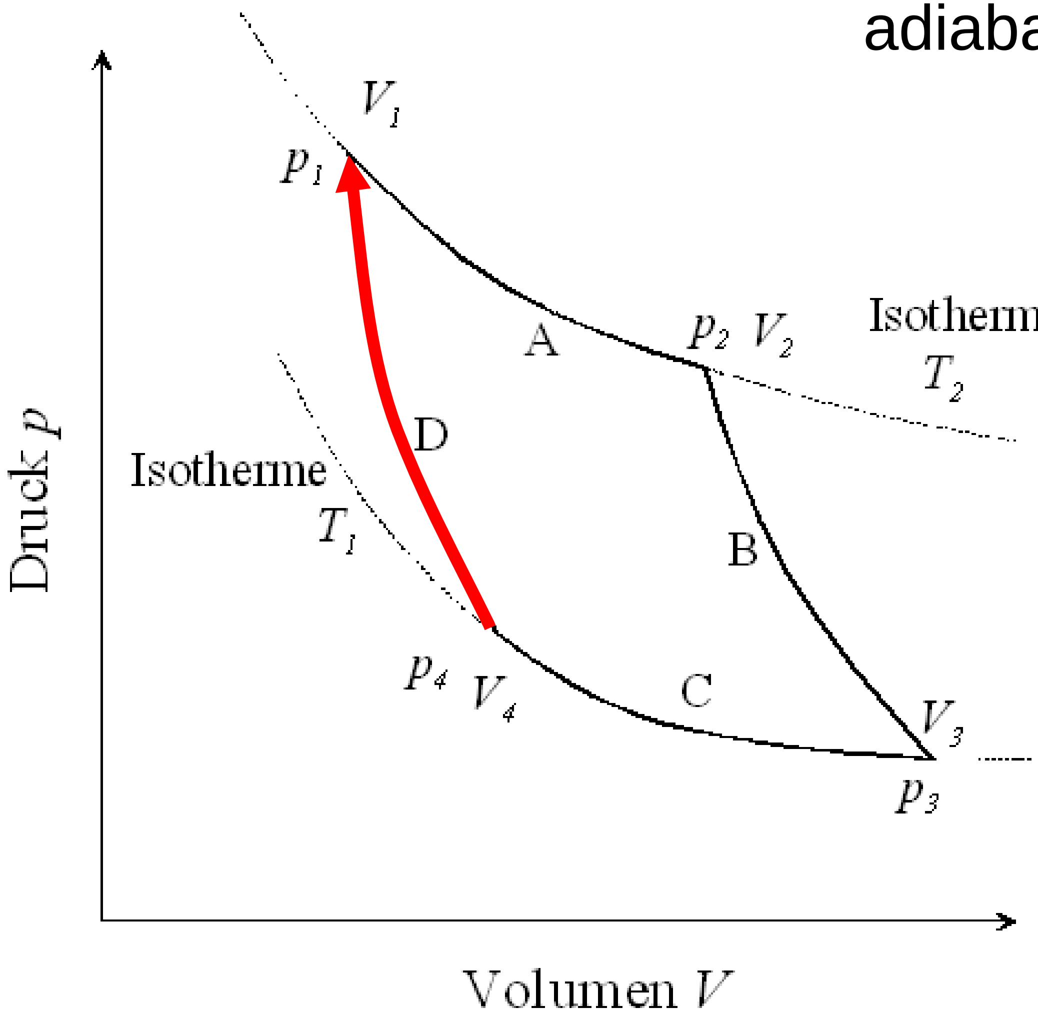


$$\frac{V_4}{V_3} = \frac{p_3}{p_4}$$

$$Q_C = NkT_1 \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$$

724 Theorie

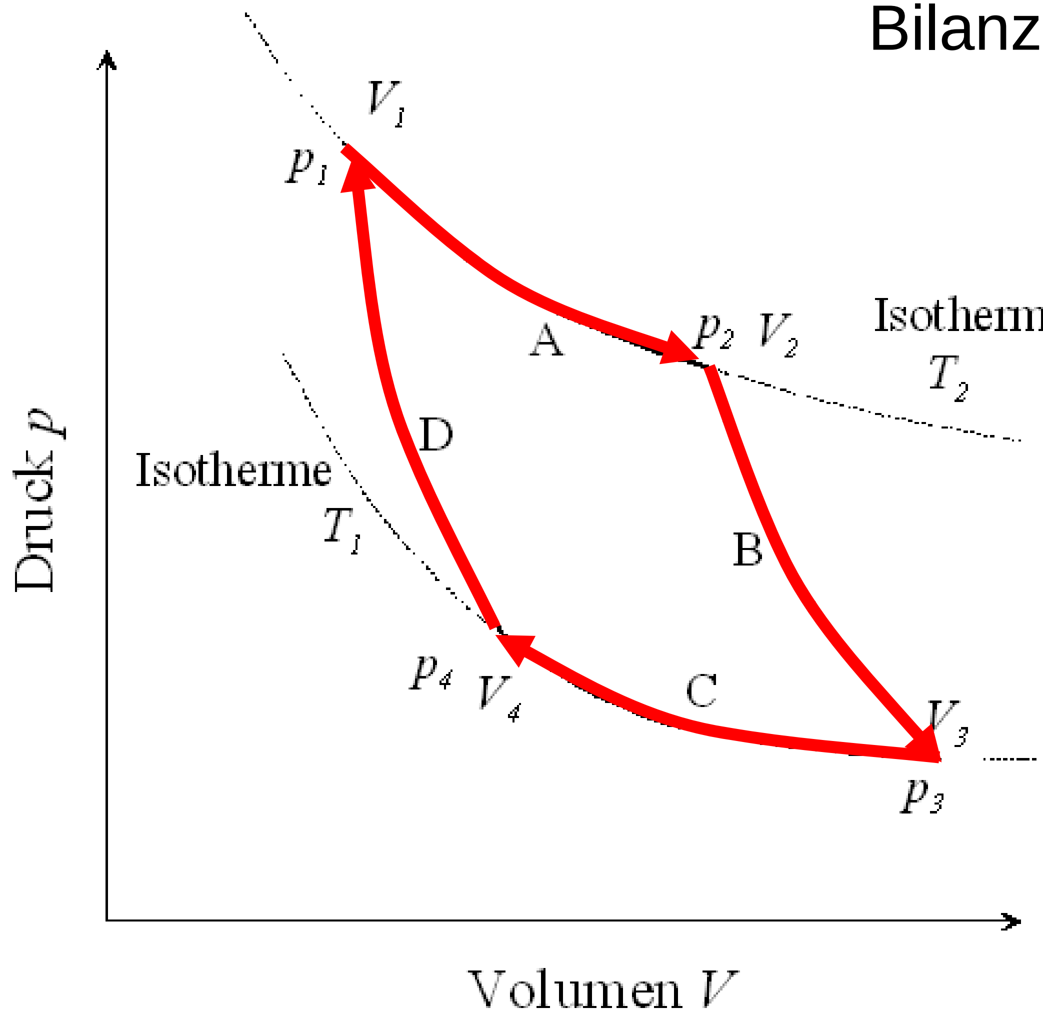
adiabatische Kompression:



$$\frac{V_1}{V_4} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$W_D = \Delta U_4$$
$$= mc_V \cdot (T_2 - T_1)$$

724 Theorie



Bilanz:

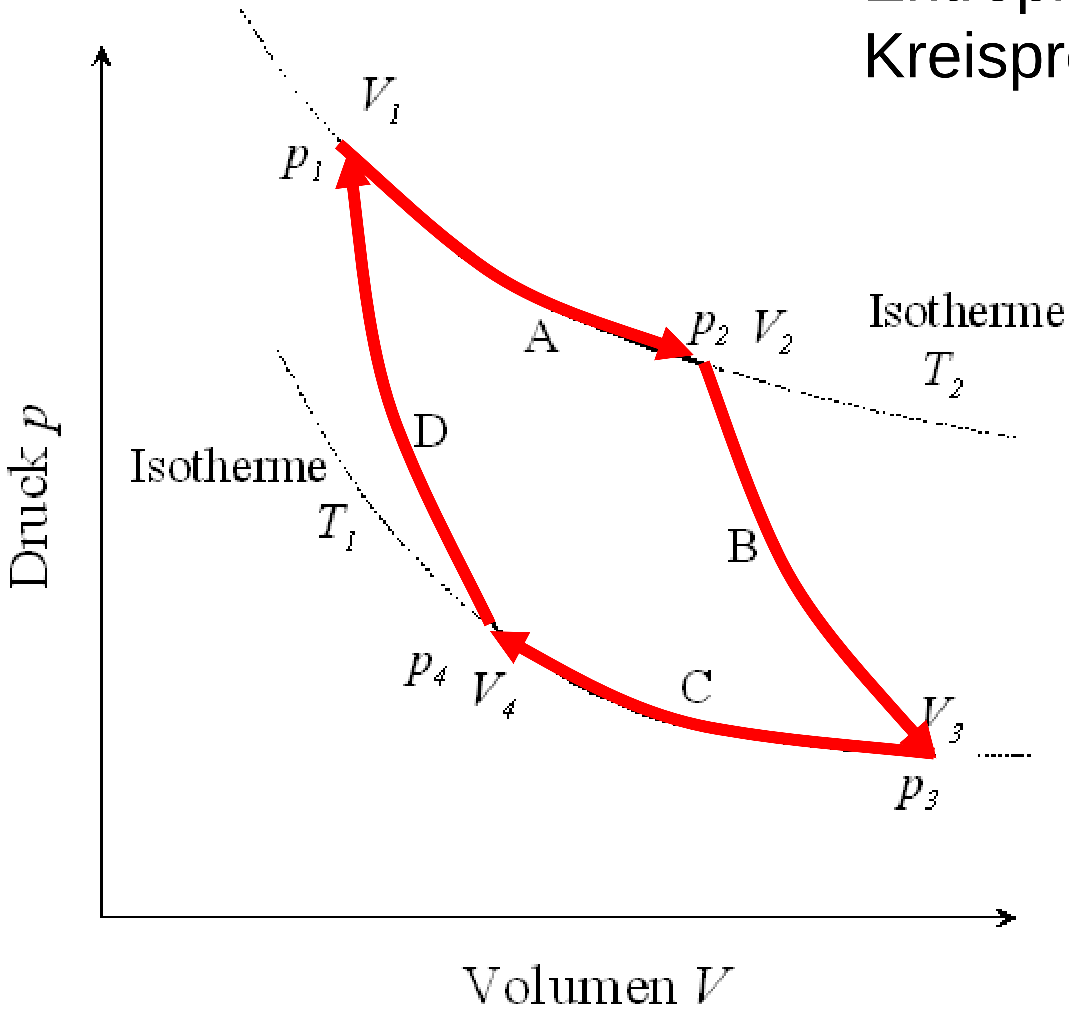
$$\Delta U_{total} = Q_A + W_A + W_B + Q_C + W_C + W_D$$

$$\boxed{\frac{Q_A}{T_2} + \frac{Q_C}{T_1} = 0}$$

724 Theorie

Entropie im Carnotschen Kreisprozess:

$$\Delta U_{total} = Q_A + W_A + W_B + Q_C + W_C + W_D$$

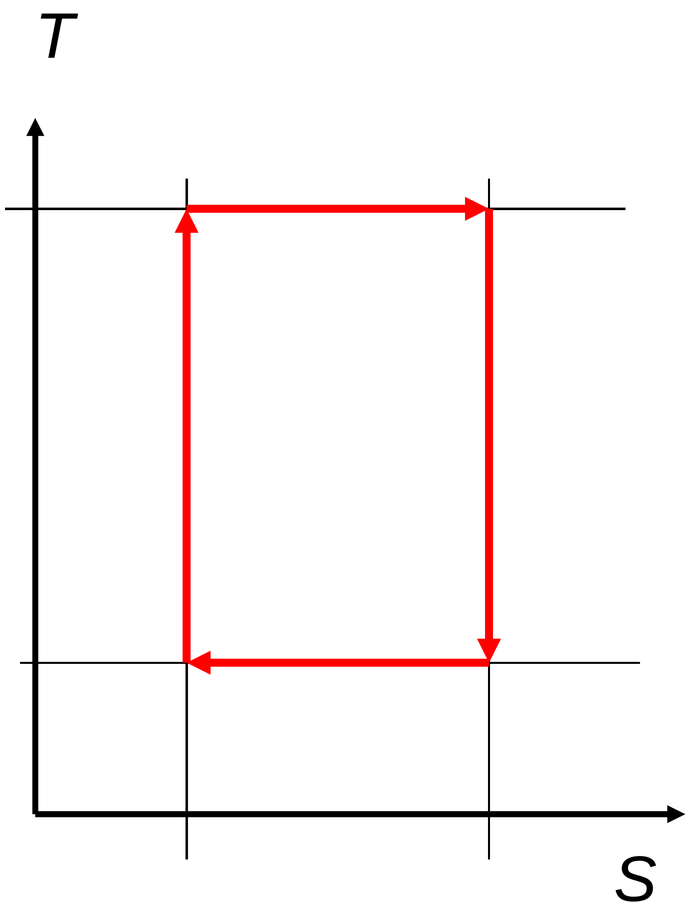


$$\boxed{\oint \frac{\delta Q_{rev}}{T} = 0}$$

724 Theorie

Entropie im Carnotschen Kreisprozess:

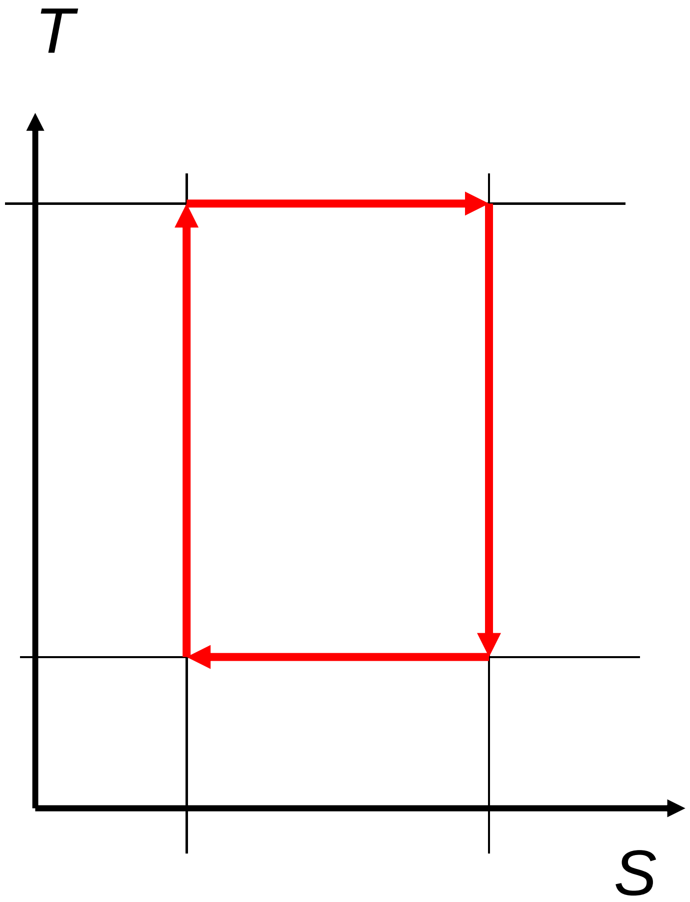
$$\Delta U_{total} = Q_A + W_A + W_B + Q_C + W_C + W_D$$



$$\boxed{\oint \frac{\delta Q_{rev}}{T} = 0}$$

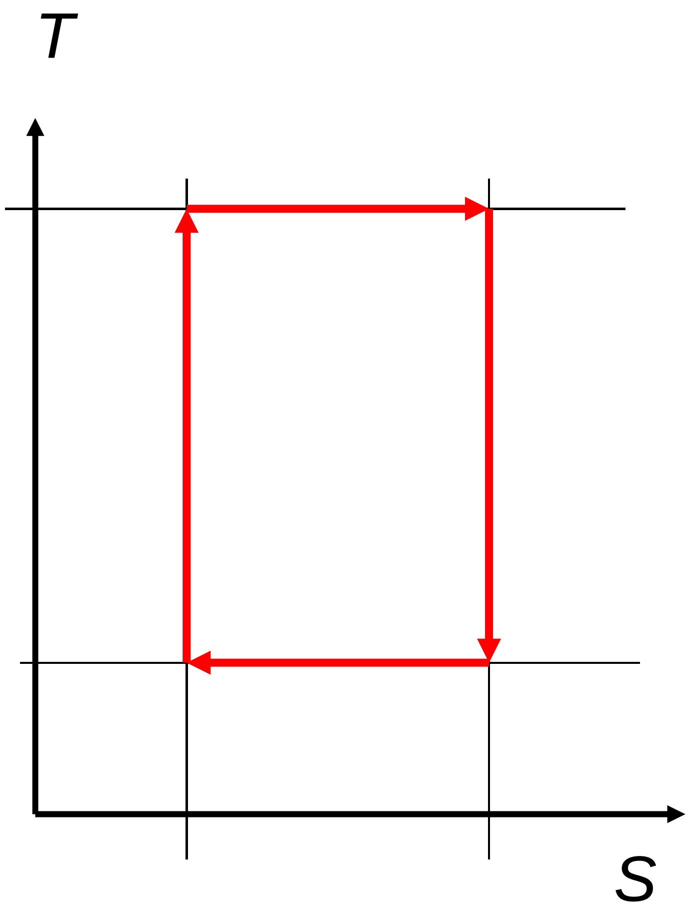
724 Theorie

Wirkungsgrad im
Carnotschen Kreisprozess:



$$\eta = \frac{|W|}{Q_A} = \frac{Q_A + Q_B}{Q_A} =$$

$$1 + \frac{Q_B}{Q_A} \boxed{= 1 - \frac{T_1}{T_2}}$$

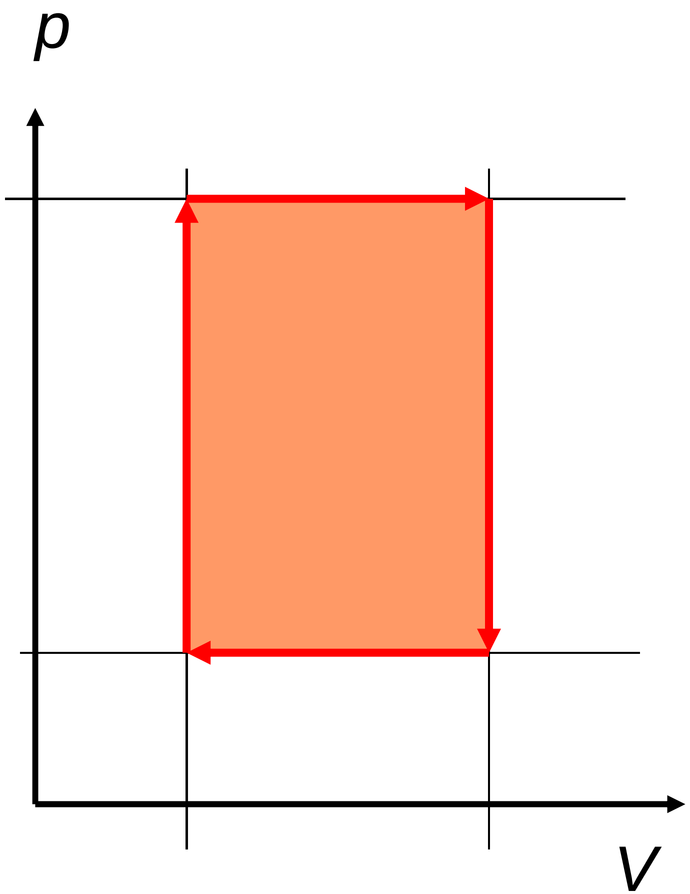


724 Theorie

Wirkungsgrad im
Carnotschen Kreisprozess
(Betrachtung Entropiestrom):

$$\eta = \left|\frac{P_{mech}}{P_{therm}}\right| = \left|\frac{P_{mech}}{T_2 \cdot I_S}\right|$$

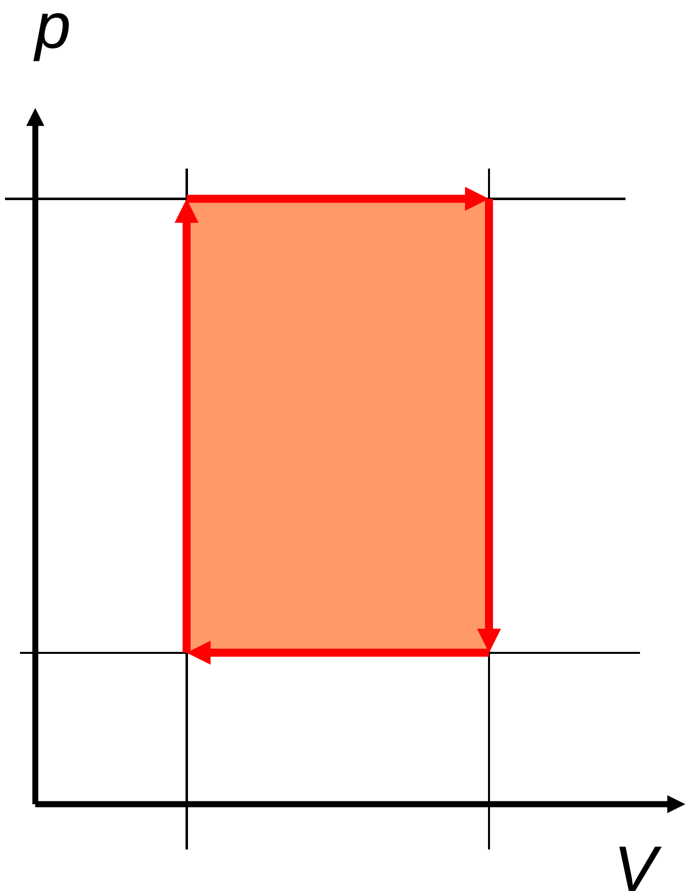
$$= \left|\frac{(T_2 - T_1) \cdot I_S}{T_2 \cdot I_S}\right|$$



724 Theorie

Anderer Kreisprozess (einfach zur Berechnung der abgegebenen Arbeit (vom Prozess umschlossene Fläche), aber nicht optimaler Wirkungsgrad)

724 Theorie



Anderer Kreisprozess (einfach zur Berechnung der abgegebenen Arbeit (vom Prozess umschlossene Fläche), aber nicht optimaler Wirkungsgrad)

$$W^{\uparrow} = \Delta p \cdot \Delta V$$

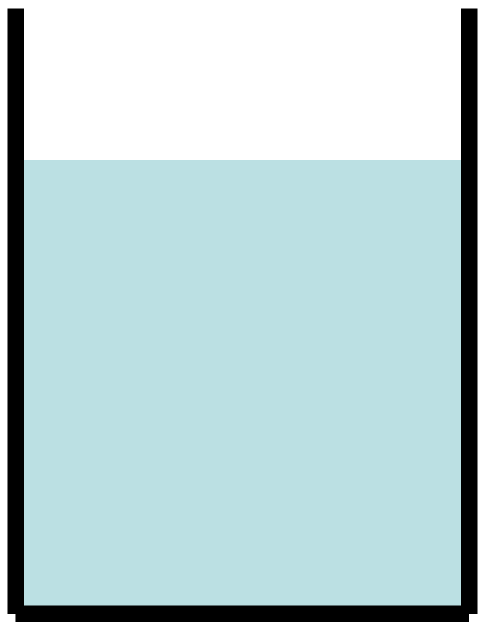
731 Reaktionsenergie und Enthalpie

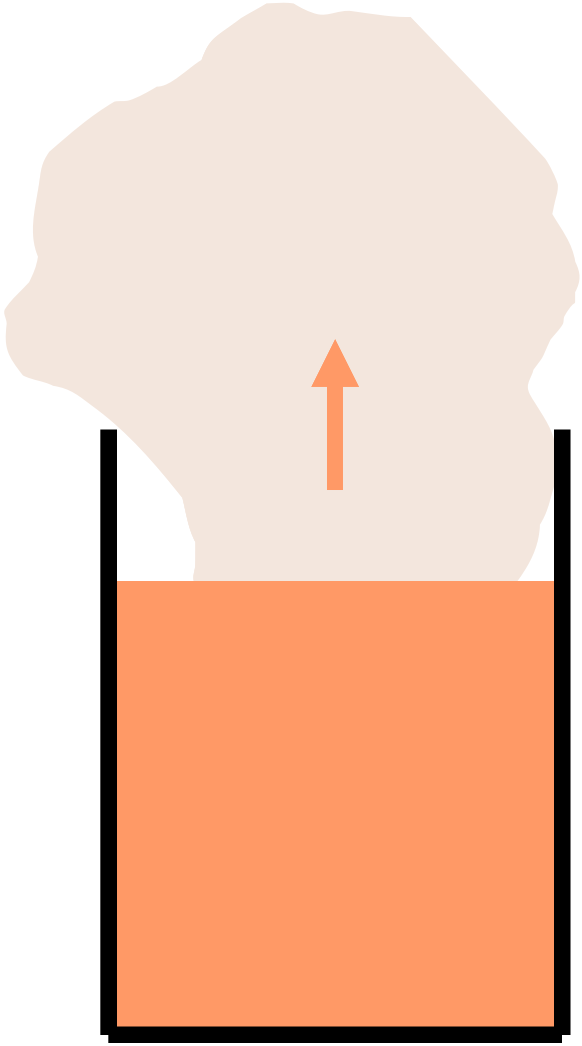
731 Ziele

- Begriffe *exotherme und endotherme Reaktion* definieren können
- Reaktionsenthalpie für einfache chemische reaktionen berechnen können
- Satz von Hess erklären können

731 Theorie

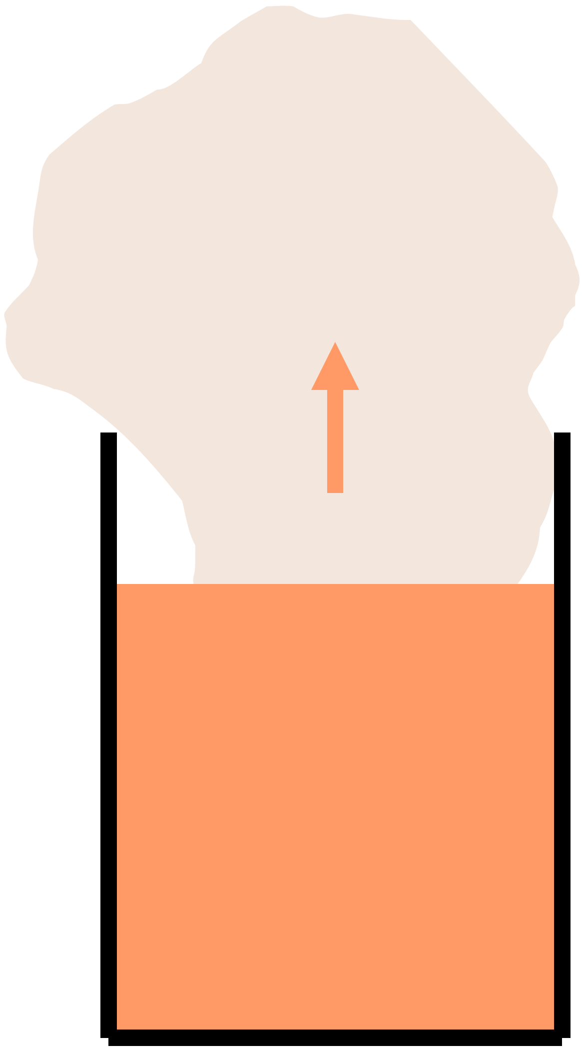
Energien bei chemischer Reaktion





731 Theorie

Energien bei chemischer Reaktion

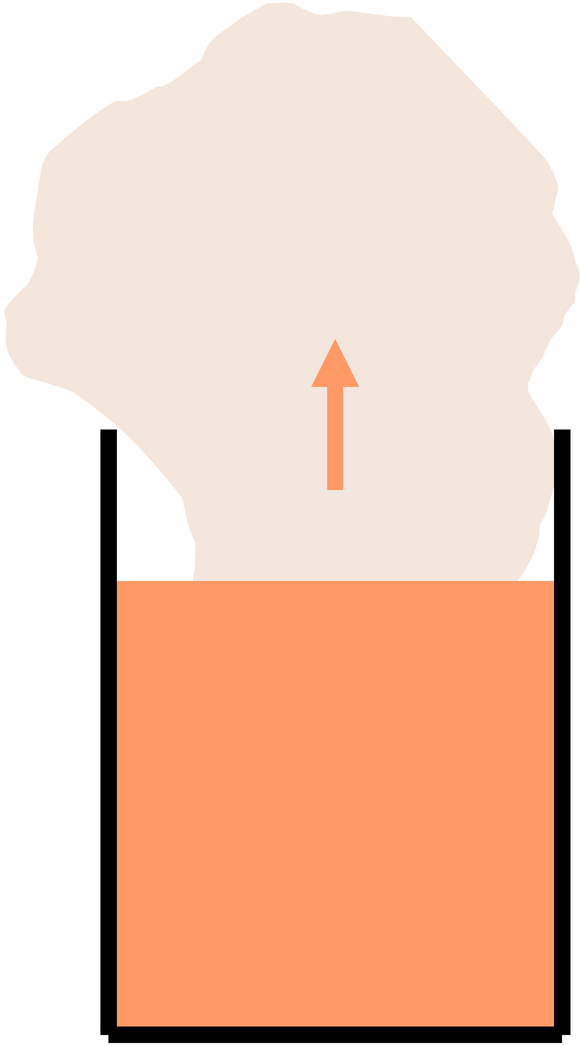


731 Theorie

Energien bei chemischer Reaktion

Def. Reaktionsenthalpie

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



731 Theorie

Energien bei chemischer Reaktion

Def. Reaktionsenthalpie

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

$$\Delta W = U_2 + p \cdot \Delta V - U_1$$

$$= \Delta H$$

731 Theorie

Berechnung über Standard-Enthalpien

$$\Delta H = \sum \Delta H_f^0(\text{Produkte}) - \sum \Delta H_f^0(\text{Reaktanden})$$

$$\Delta H = \sum \Delta H_f^0(\text{Produkte}) - \sum \Delta H_f^0(\text{Reaktanden})$$

731 Theorie

Berechnung über Standard-Enthalpien

Bindung	Bindungsenergie kJ / mol	Bindung	Bindungsenergie kJ / mol	Bindung	Bindungsenergie kJ / mol
Br-Br	193	C-O	335	I-I	151
C-C	347	Cl-Cl	243	N-H	389
C=C	619	F-F	155	N-N	159
C-H	414	H-Br	364	O-H	463
C-F	485	H-Cl	431	O-O	138
C-N	293	H-H	435	O_2	494

732 Chemische Reaktionskinetik

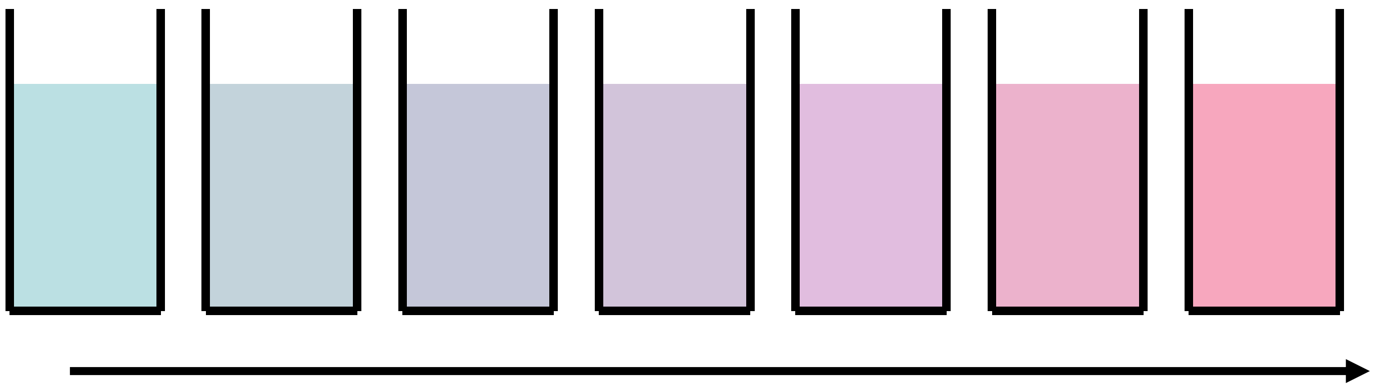
732 Ziele

- zeitlicher Verlauf von chemischen Reaktionen modellieren und simulieren können
- Reaktionen nullter, erster und zweiter Ordnung beschreiben können
- für einfache Fälle aus chemischer Reaktion kinetische Ordnung bestimmen können
- Reaktionskinetik bei enzymatischen /katalytischen Reaktionen beschreiben können

732 Theorie

Reaktionsgeschwindigkeit:

$$\dot{c} = \frac{dc}{dt}$$

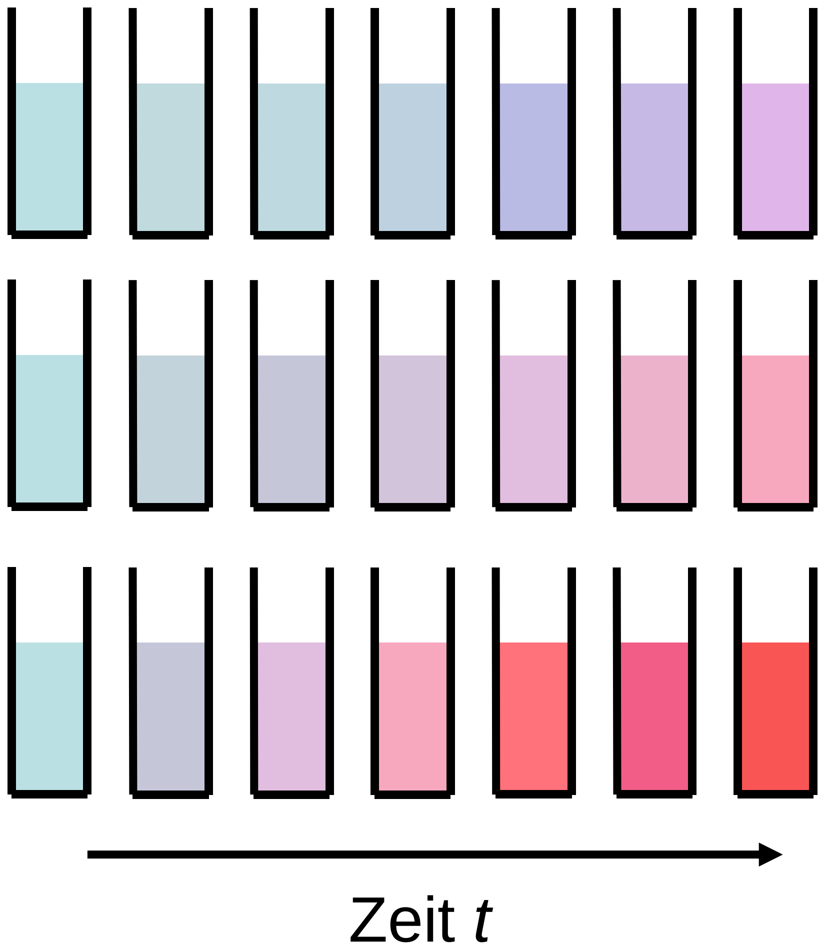


Zeit t

732 Theorie

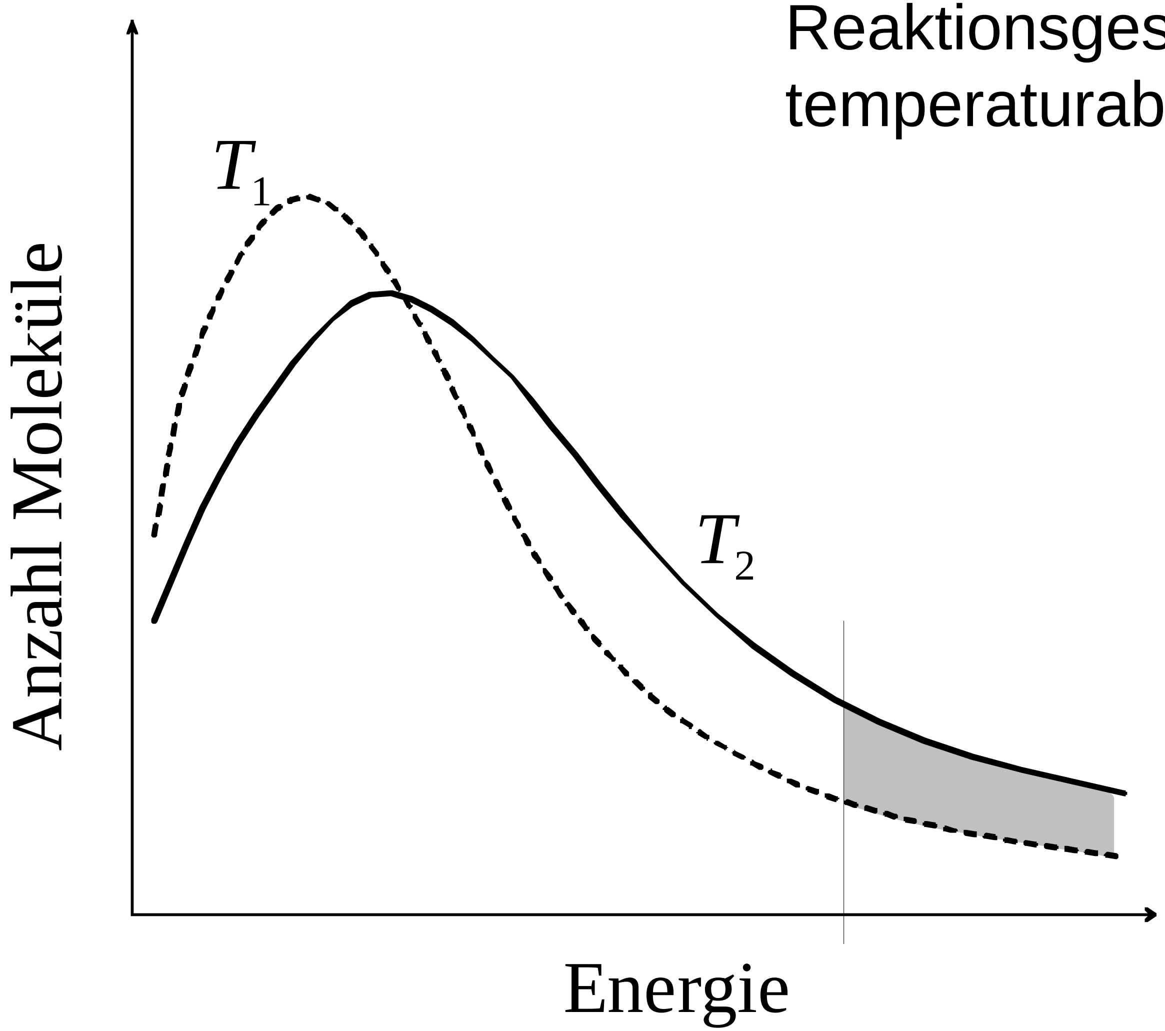
Reaktionsgeschwindigkeit ist temperaturabhängig

Ansatz: Kollisionstheorie



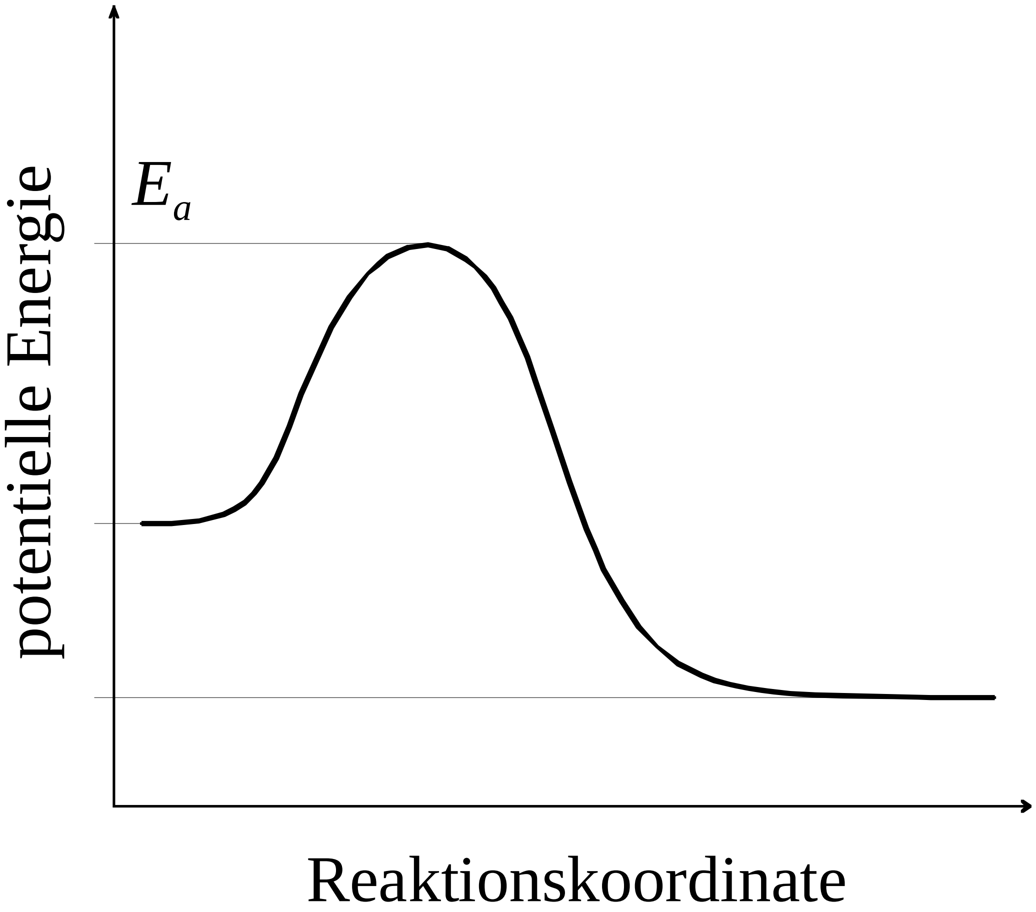
732 Theorie

Reaktionsgeschwindigkeit ist temperaturabhängig



732 Theorie

Aktivierungsenergie



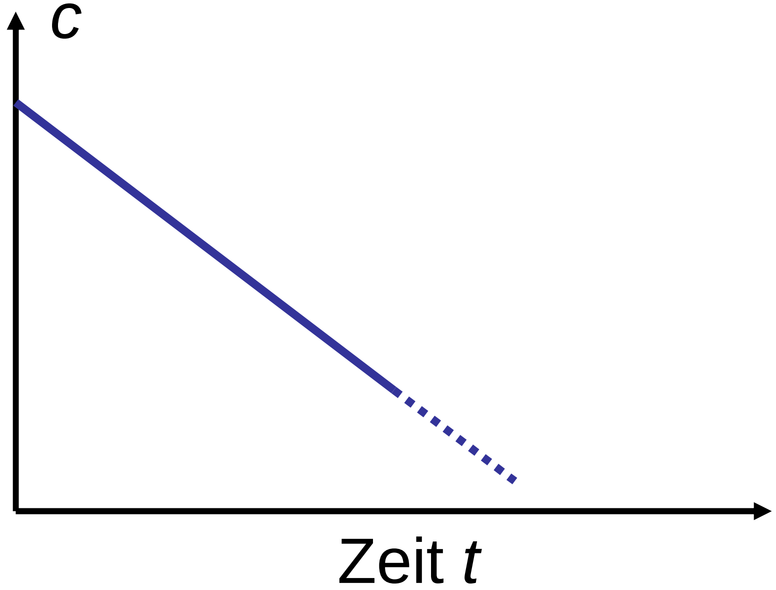
732 Theorie

Kinetik nullter Ordnung

$$\frac{dc_A}{dt} = -k$$

732 Theorie

Kinetik nullter Ordnung



$$\frac{dc_A}{dt} = -k$$

$$c_A(t) = -kt + c_A(0)$$

732 Theorie

Kinetik erster Ordnung

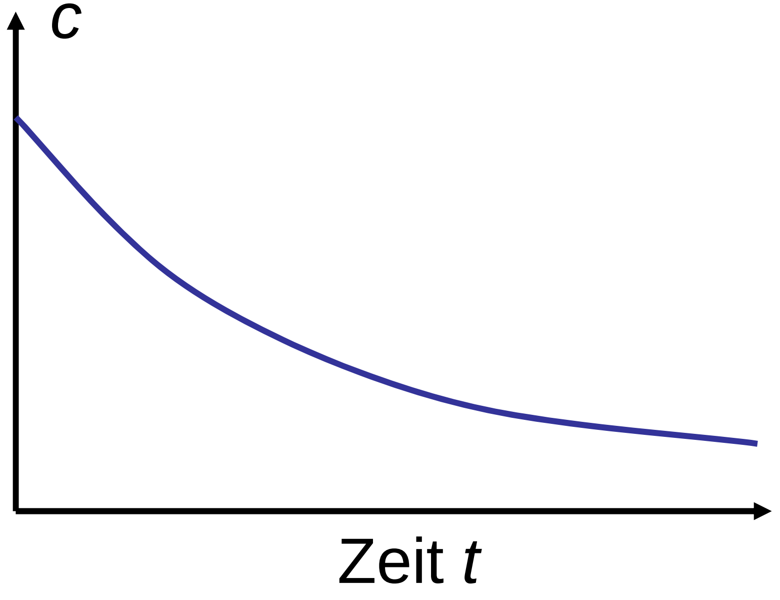
$$\frac{dc_A}{dt} = -k \cdot c_A$$

732 Theorie

Kinetik erster Ordnung

$$\frac{dc_A}{dt} = -k \cdot c_A$$

$$c_A(t) = c_0 \cdot e^{-kt}$$



732 Theorie

Kinetik zweiter Ordnung

$$\frac{dc_A}{dt} = -k \cdot c_A c_B$$

$$\frac{dc_A}{dt} = -k \cdot c_A^2$$

732 Theorie

Kinetik zweiter Ordnung

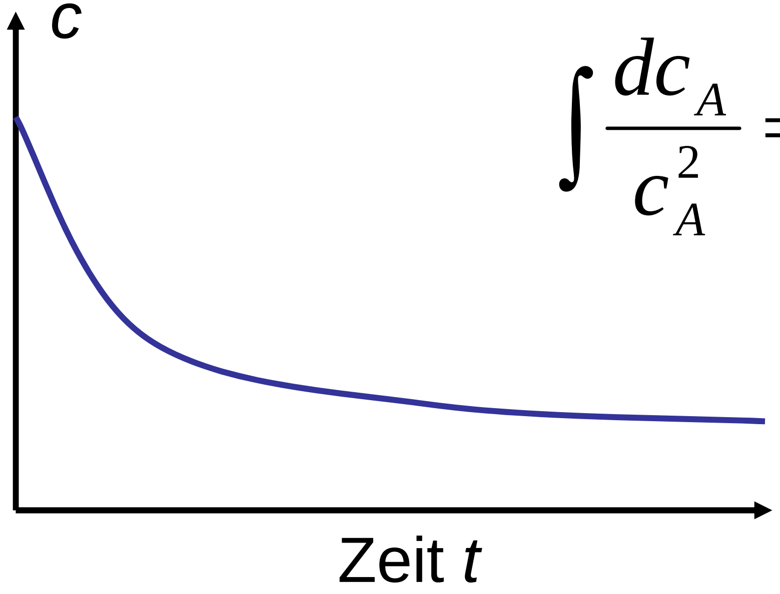
$$\frac{dc_A}{dt} = -k \cdot c_A^2$$

$$\int \frac{dc_A}{c_A^2} = -k \cdot \int dt = -kt + c = -\frac{1}{c_A}$$

732 Theorie

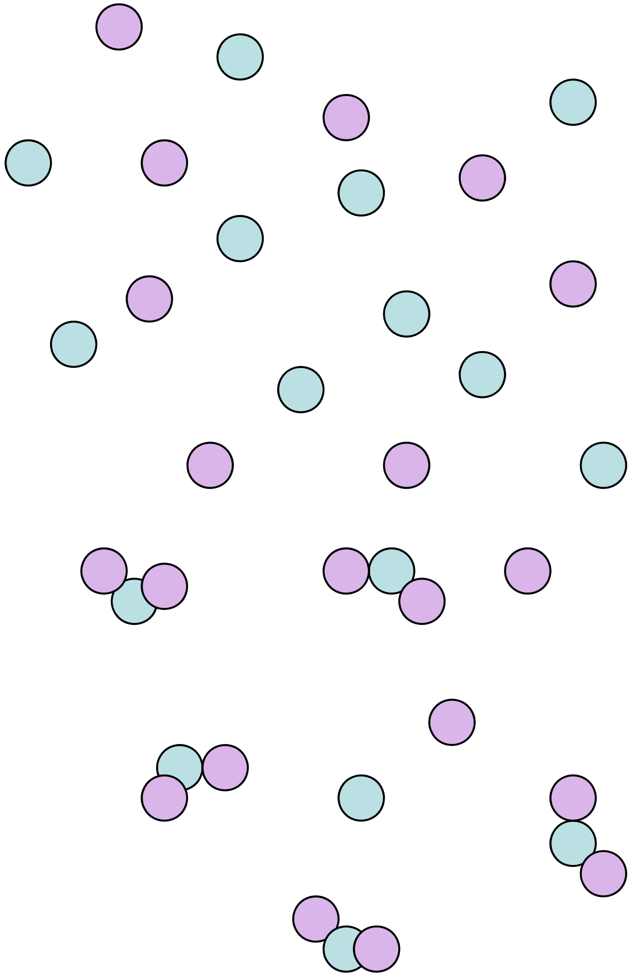
Kinetik zweiter Ordnung

$$\frac{dc_A}{dt} = -k \cdot c_A^2$$



$$\int \frac{dc_A}{c_A^2} = -k \cdot \int dt = -kt + c = -\frac{1}{c_A}$$

$$c_A(t) = \left[kt + \frac{1}{c_A(0)} \right]^{-1}$$



732 Theorie

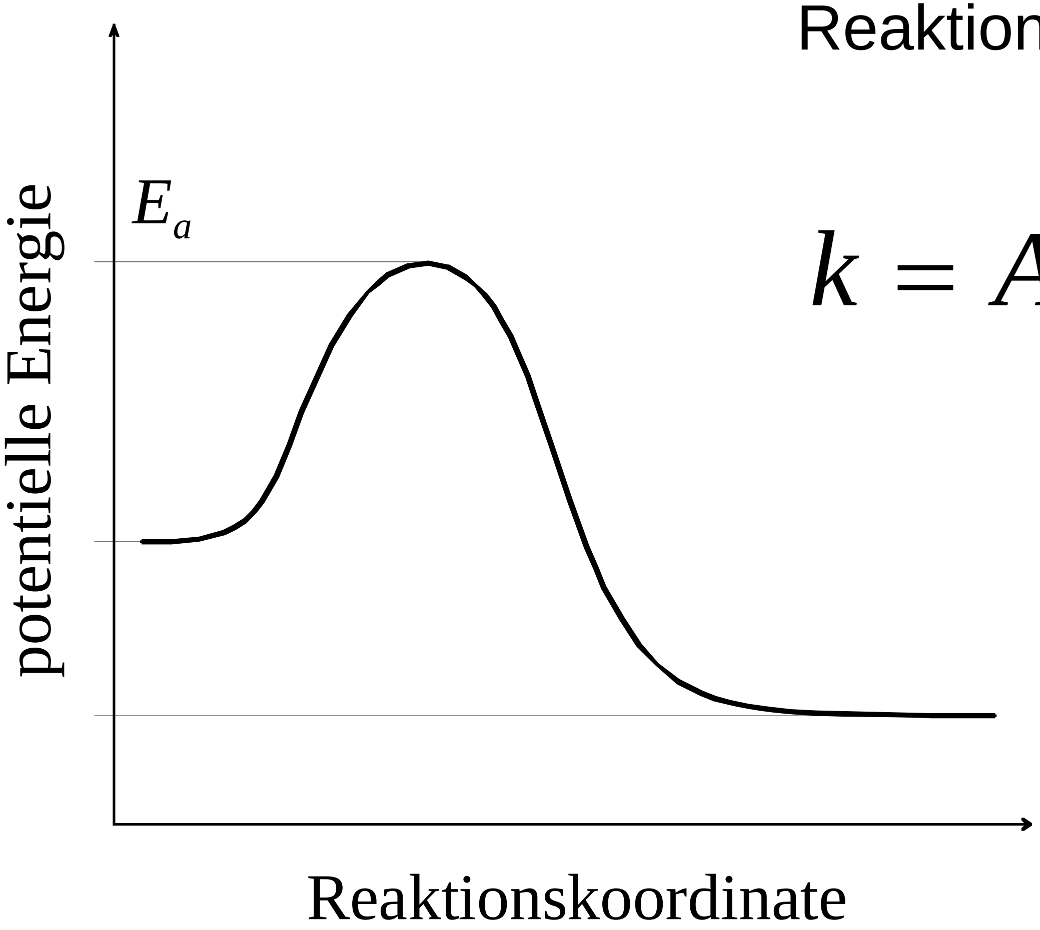
Weitere Varianten

$$A + 2B \longrightarrow \text{Produkte}$$

$$\frac{dc_A}{dt} = -k \cdot c_A c_B^2$$

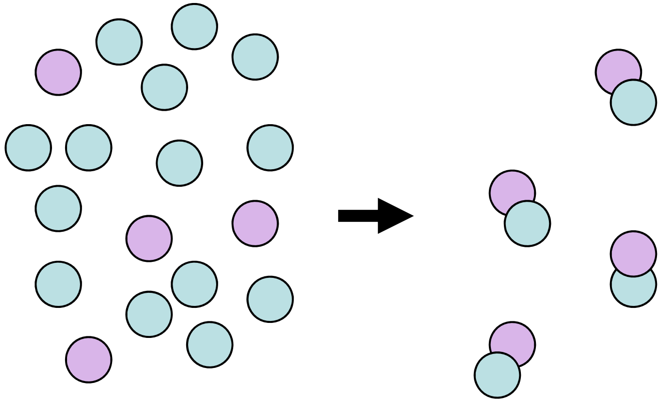
732 Theorie

Temperaturabhängigkeit der Reaktionskonstante



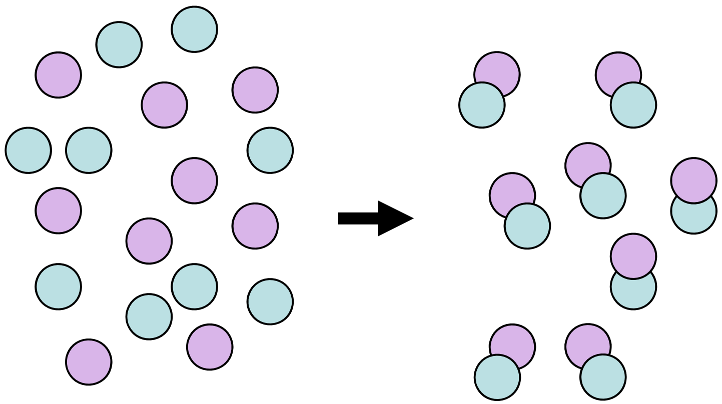
$$k = A \cdot e^{-E_a/(RT)}$$

732 Theorie

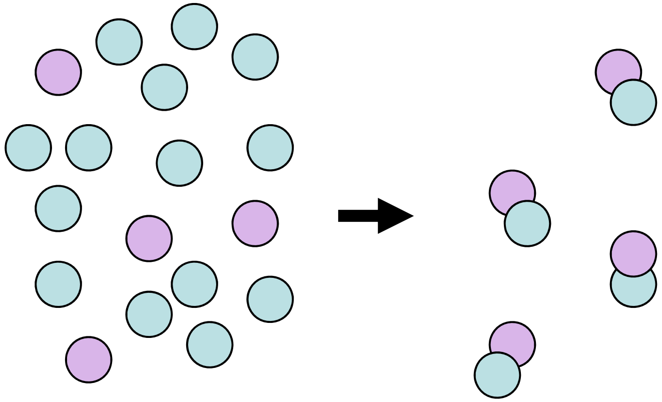


katalytische bzw. enzymatische Reaktionen

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{v_m \cdot c}{(k_m + c) \cdot V_d}$$

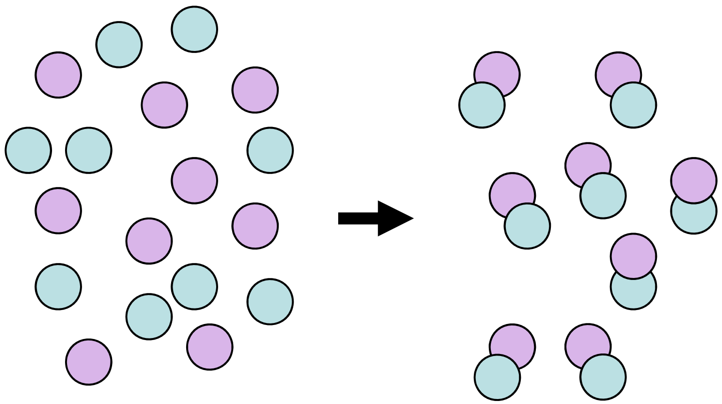


732 Theorie



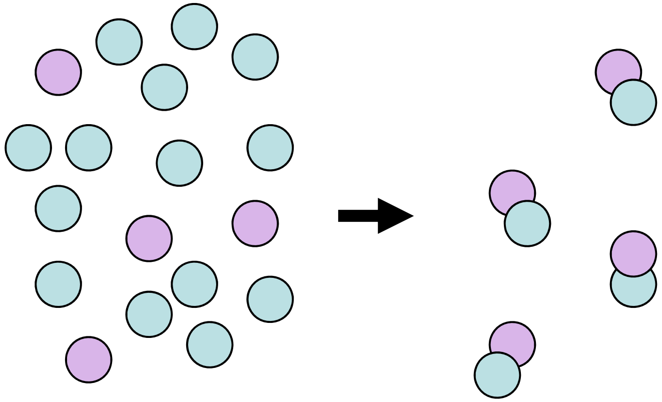
katalytische bzw.
enzymatische Reaktionen

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{v_m \cdot c}{(k_m + c) \cdot V_d}$$



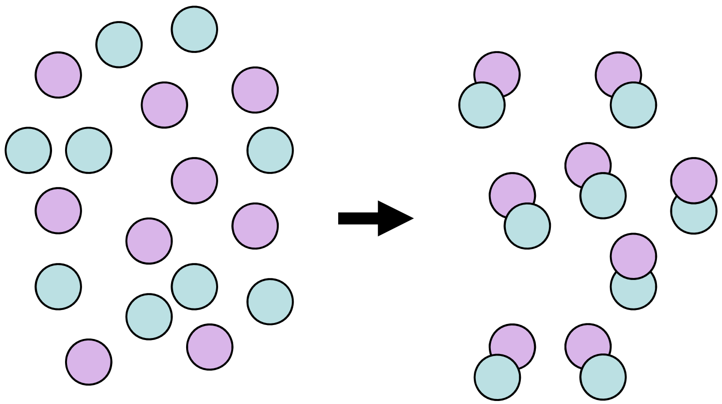
$$\lim_{c \to 0}\left(\frac{v_m \cdot c}{(k_m + c) \cdot V_d}\right) = \frac{v_m}{k_m \cdot V_d} \cdot c$$

732 Theorie



katalytische bzw.
enzymatische Reaktionen

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{v_m \cdot c}{(k_m + c) \cdot V_d}$$



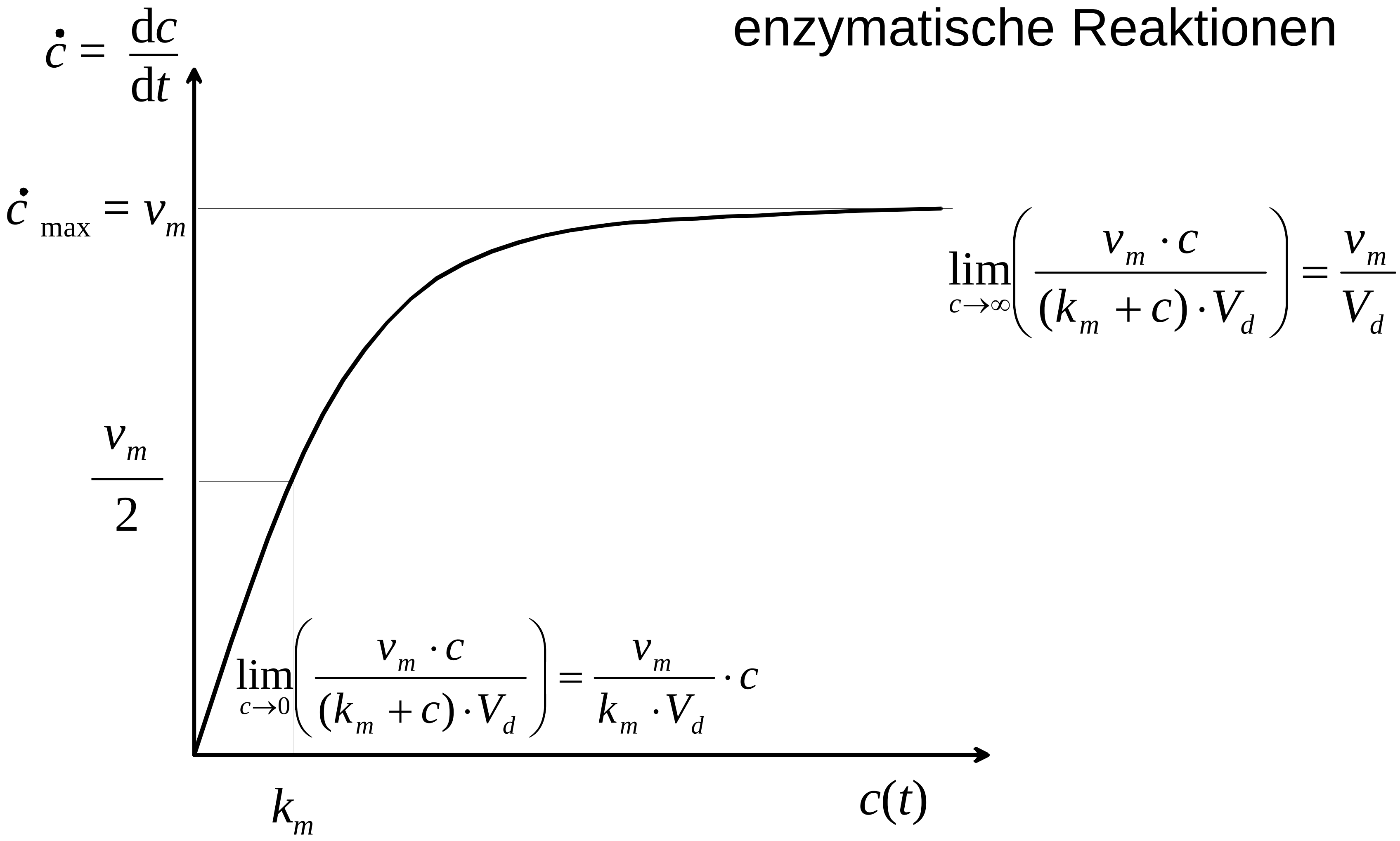
$$\lim_{c \to 0}\left(\frac{v_m \cdot c}{(k_m + c) \cdot V_d}\right) = \frac{v_m}{k_m \cdot V_d} \cdot c$$

$$\lim_{c \to \infty}\left(\frac{v_m \cdot c}{(k_m + c) \cdot V_d}\right) = \frac{v_m}{V_d}$$

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{v_m \cdot c}{(k_m + c) \cdot V_d}$$

732 Theorie

katalytische bzw.
enzymatische Reaktionen



732 Supplement

Oszillierende Reaktionen: Belousov-Zhabotinskii-Reaktion BZR:

$$A + Y \xrightarrow{k_1} X$$

$$X + Y \xrightarrow{k_2} P$$

$$A + X \xrightarrow{k_3} 2X + Z$$

$$2X \xrightarrow{k_4} Q$$

$$Z \xrightarrow{k_5} fY$$

A: BrO_3^-

X: $HBrO_2$

Y: Br^-

Z: Ce(IV)

732 Supplement

Oszillierende Reaktionen: Belousov-Zhabotinskii-Reaktion BZR

$$A + Y \xrightarrow{k_1} X$$

$$X + Y \xrightarrow{k_2} P$$

$$A + X \xrightarrow{k_3} 2X + Z$$

$$2X \xrightarrow{k_4} Q$$

$$Z \xrightarrow{k_5} fY$$

$$\frac{dX}{dt} = k_1 AY - k_2 XY + k_3 AX - 2k_4 X^2$$

$$\frac{dY}{dt} = -k_1 AY - k_2 XY + fk_5 Z$$

$$\frac{dZ}{dt} = -k_3 AX - k_5 Z$$

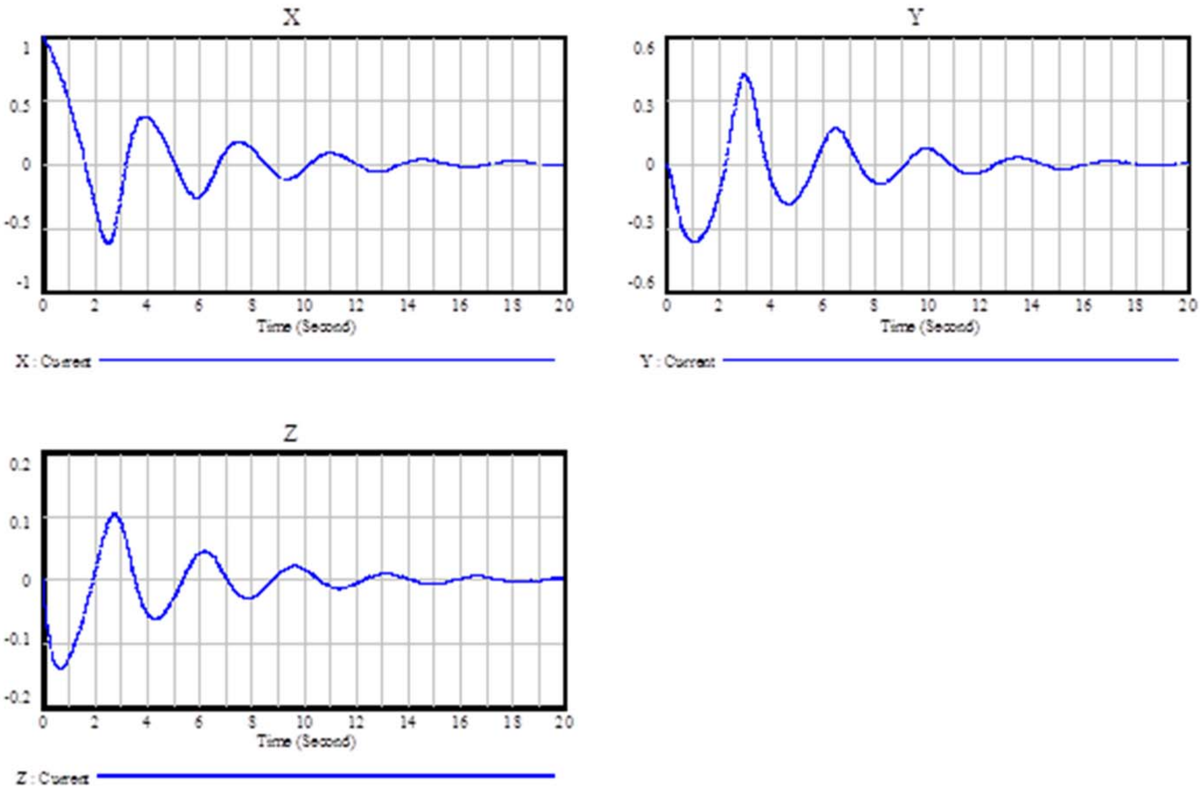
732 Supplement

$$\frac{dX}{dt} = k_1AY - k_2XY + k_3AX - 2k_4X^2$$

$$\frac{dY}{dt} = -k_1AY - k_2XY + fk_5Z$$

$$\frac{dZ}{dt} = -k_3AX - k_5Z$$

Oszillierende Reaktionen:
Belousov-Zhabotinskii-
Reaktion BZR



Oszillierende Reaktionen: Belousov-Zhabotinskii-Reaktion BZR

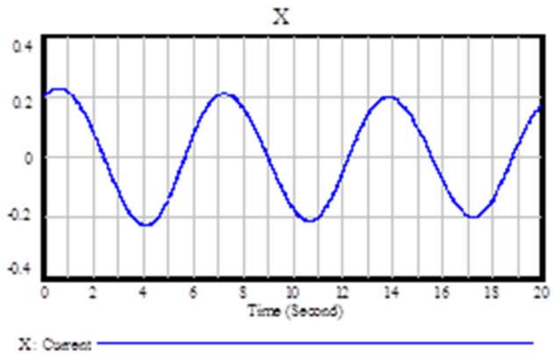


Fig.69a

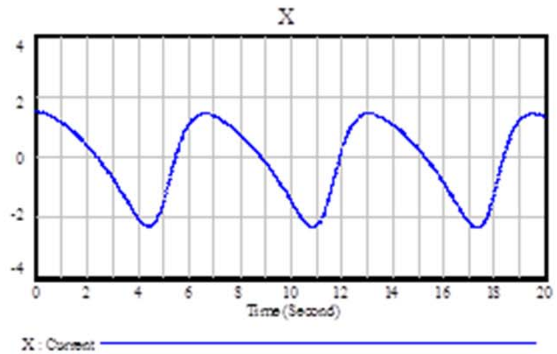


Fig.69b

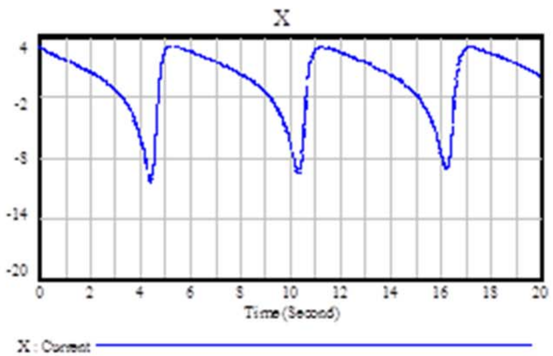


Fig.69c

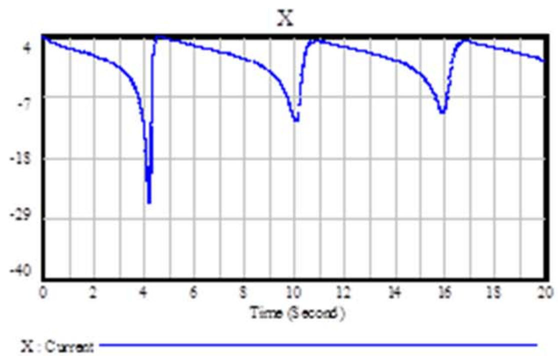


Fig.69d

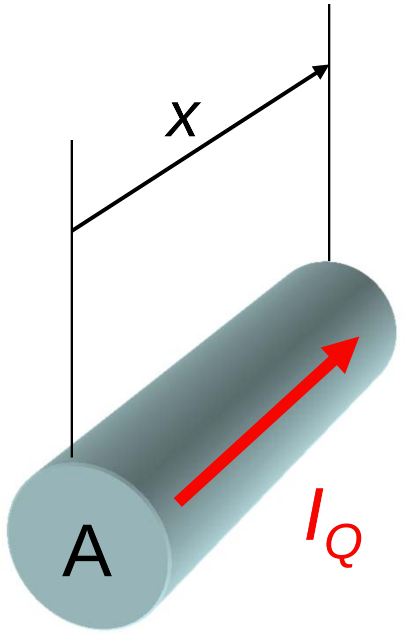
Fig.69. Oszillationsformen in Abhängigkeit des Anfangswertes X_0: (a) $X_0 = 0.2$, (b) $X_0 = 1.5$, (c) $X_0 = 3$, (d) $X_0 = 4$; $Y_0 = Z_0 = 0$, $A = 3$; $k_1 = 1\ s^{-1}$, $k_2 = 0.5\ s^{-1}$, $k_3 = 0.175\ s^{-1}$, $k_4 = 0.175\ s^{-1}$, $k_5 = 1\ s^{-1}$, $f = 4$; Nummerik: Runge-Kutta-Verfahren, $\Delta t = 10^{-3}$ s.

741 Wärmeleitung

741 Ziele

- Wärmestrom und Temperaturprofile für einfache Geometrien berechnen können
- Die physikalische Bedeutung von Gradient und Divergenz erläutern können
- Die Bedeutung der einzelnen Terme / Teile der Diffusionsgleichung beschreiben können
- Zwischen stationären und transienten Lösungen (der Diffusionsgleichung) unterscheiden können

741 Theorie

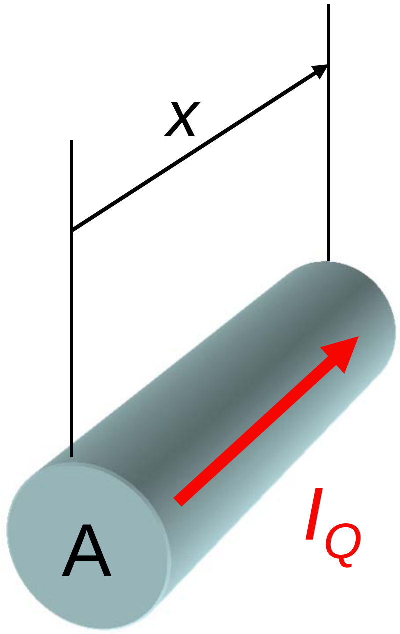


Wärmestrom / Wärmestromdichte

$$j = \frac{dQ}{dA \cdot dt}$$

$$j = -k \cdot \frac{dT}{dx}$$

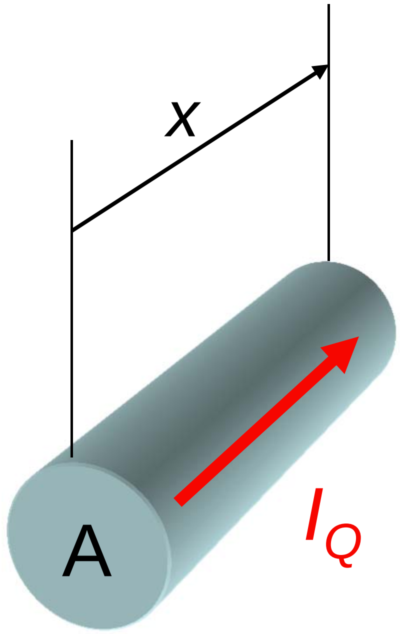
741 Theorie



Wärmestrom /
Wärmestromdichte für Stab:

$$j = -k \cdot \frac{dT}{dx}$$

$$\int_{T_1}^{T} dT = -\frac{j}{k} \cdot \int dx = -\frac{j}{k} \cdot x$$



741 Theorie

Wärmestrom /
Wärmestromdichte für Stab:

$$j = -k \cdot \frac{dT}{dx}$$

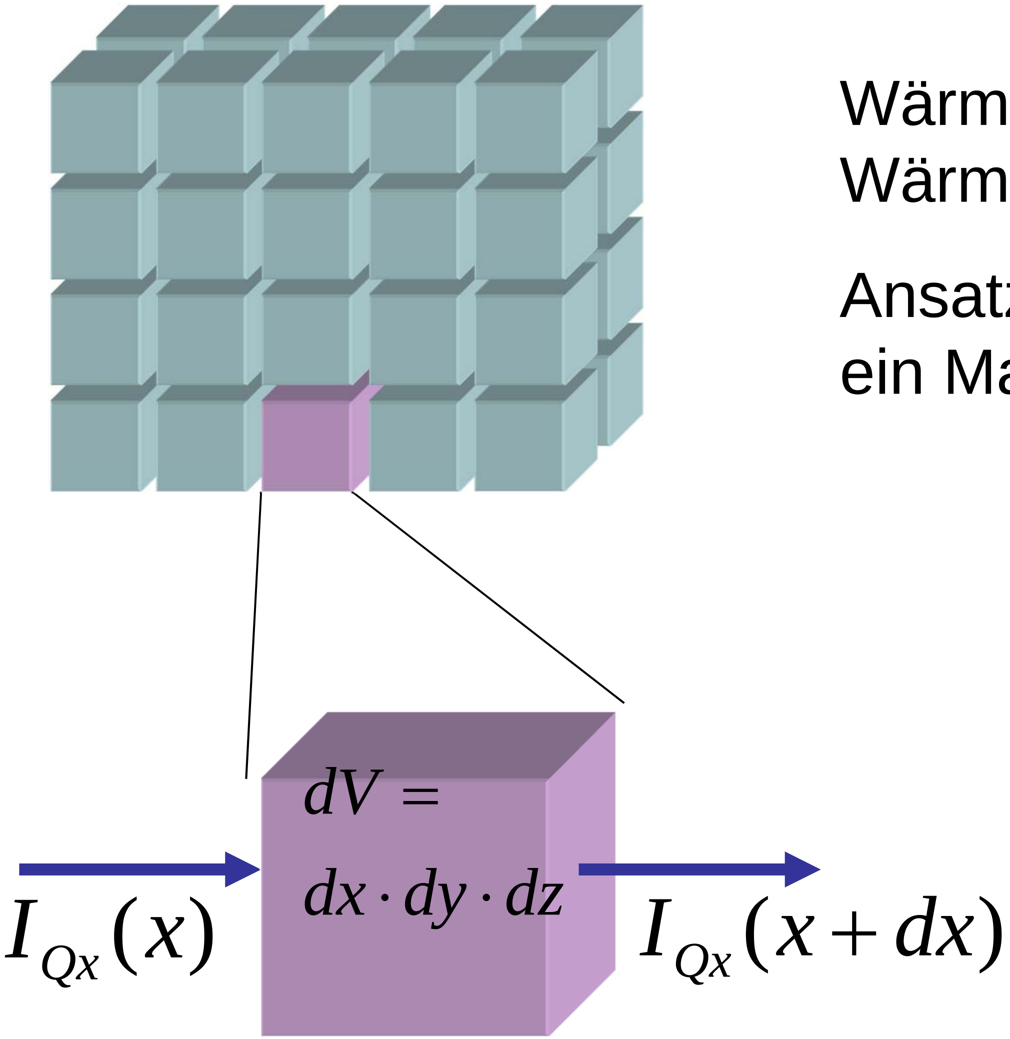
$$\int_{T_1}^{T} dT = -\frac{j}{k} \cdot \int dx = -\frac{j}{k} \cdot x$$

$$= T - T_1$$

741 Theorie

Wärmefluss in 2D und 3D: Wärmediffusion

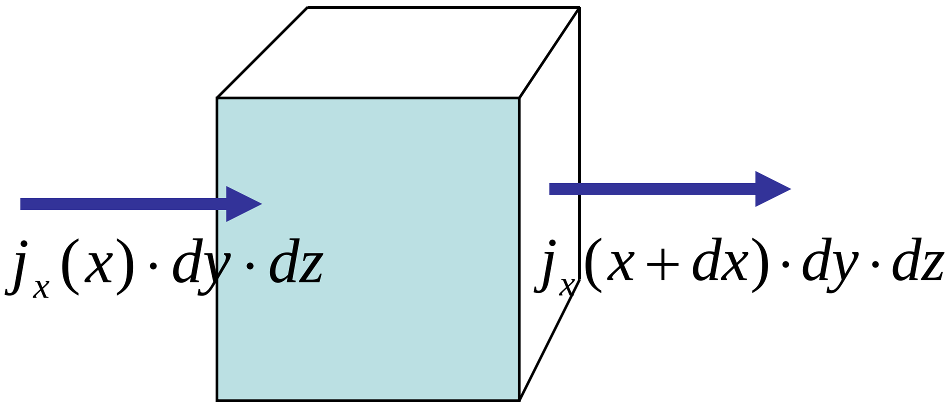
Ansatz: Wärmestrombilanz für ein Masseelement



741 Theorie

Wärmefluss in 2D und 3D: Wärmediffusion

$$dV = dx \cdot dy \cdot dz$$

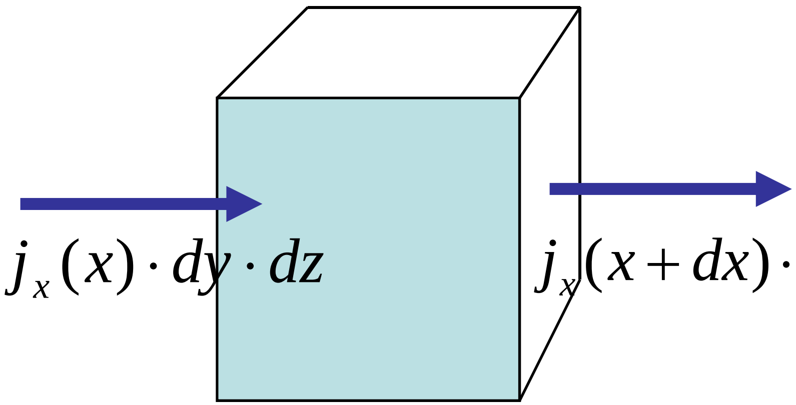


$$j_x = dQ/(dt \cdot dy \cdot dz)$$

741 Theorie

Wärmefluss in 2D und 3D:
Wärmediffusion

$$dV = dx \cdot dy \cdot dz$$

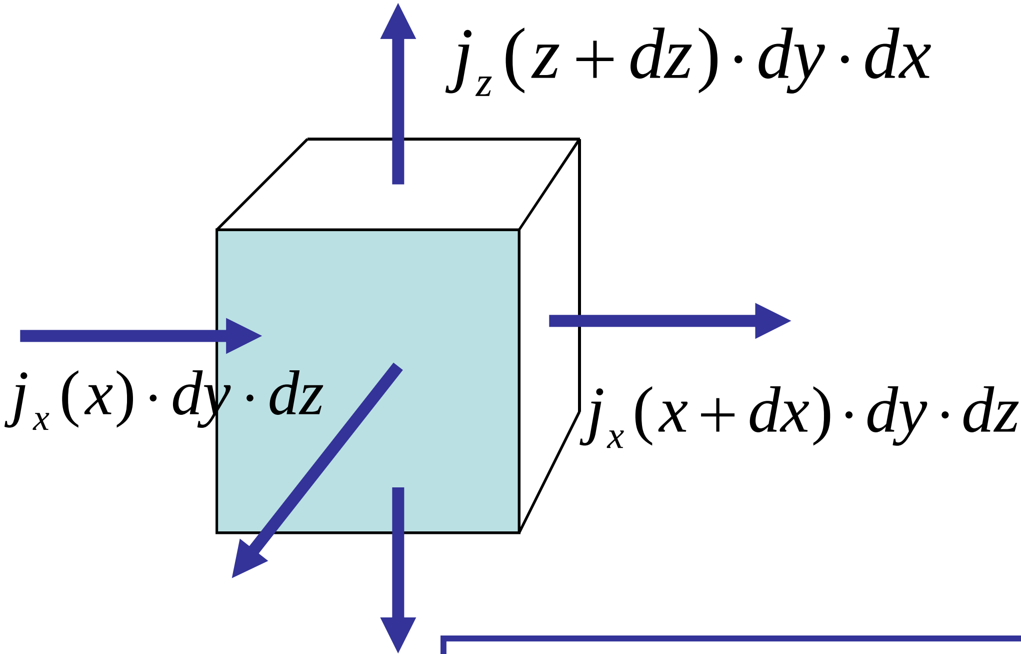


$$j_x = dQ/(dt \cdot dy \cdot dz)$$

$$\boxed{j_x(x+dx) - j_x(x) = \left(\frac{\partial j_x}{\partial x}\right) \cdot dx}$$

741 Theorie

Wärmefluss in 2D und 3D: Wärmediffusion



$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -\left(\frac{\partial j_x}{\partial x}\cdot dx\right)\cdot dy\cdot dz - \left(\frac{\partial j_y}{\partial y}\cdot dy\right)\cdot dx\cdot dz - \left(\frac{\partial j_z}{\partial z}\cdot dz\right)\cdot dy\cdot dx$$

$$= -\left(\frac{\partial j_x}{\partial x}+\frac{\partial j_y}{\partial y}+\frac{\partial j_z}{\partial z}\right)\cdot dx\cdot dy\cdot dz$$

741 Theorie

$$u = Q/V = Q/(dx \cdot dy \cdot dz)$$ Wärmedichte

$$\boxed{\begin{aligned}\frac{\partial Q}{\partial t} &= -\left(\frac{\partial j_x}{\partial x} \cdot dx\right) \cdot dy \cdot dz - \left(\frac{\partial j_y}{\partial y} \cdot dy\right) \cdot dx \cdot dz - \left(\frac{\partial j_z}{\partial z} \cdot dz\right) \cdot dy \cdot dx \\ &= -\left(\frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z}\right) \cdot dx \cdot dy \cdot dz\end{aligned}}$$

741 Theorie

$$u = Q/V = Q/(dx \cdot dy \cdot dz)$$ Wärmedichte

$$\frac{du}{dt} = -\frac{\partial j_x}{\partial x} - \frac{\partial j_y}{\partial y} - \frac{\partial j_z}{\partial z} = -\nabla \bullet \vec{j} = -div(\vec{j})$$

$$\boxed{\begin{aligned}\frac{\partial Q}{\partial t} &= -\left(\frac{\partial j_x}{\partial x} \cdot dx\right) \cdot dy \cdot dz - \left(\frac{\partial j_y}{\partial y} \cdot dy\right) \cdot dx \cdot dz - \left(\frac{\partial j_z}{\partial z} \cdot dz\right) \cdot dy \cdot dx \\ &= -\left(\frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z}\right) \cdot dx \cdot dy \cdot dz\end{aligned}}$$

741 Theorie

Zusammenhang zwischen
Wärmestromdichte und
Wärmedichte bzw.
Temperaturgradient?

$$\frac{du}{dt} = -\frac{\partial j_x}{\partial x} - \frac{\partial j_y}{\partial y} - \frac{\partial j_z}{\partial z} = -\nabla \bullet \vec{j} = -div(\vec{j})$$

741 Theorie

Zusammenhang zwischen Wärmestromdichte und Wärmedichte bzw. Temperaturgradient?

→ Ficksches Gesetz

$$\frac{du}{dt} = -\frac{\partial j_x}{\partial x} - \frac{\partial j_y}{\partial y} - \frac{\partial j_z}{\partial z} = -\nabla \bullet \vec{j} = -div(\vec{j})$$

$$\vec{j} = -k \cdot \nabla u = -k \cdot grad(u)$$

741 Theorie

$$\frac{du}{dt} = -\frac{\partial j_x}{\partial x} - \frac{\partial j_y}{\partial y} - \frac{\partial j_z}{\partial z} = -\nabla \bullet \vec{j} = -div(\vec{j})$$

$$\vec{j} = -k \cdot \nabla u = -k \cdot grad(u)$$

$$j_x = -k \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \qquad j_y = -k \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \qquad j_z = -k \cdot \frac{\partial u}{\partial z}$$

741 Theorie

$$\frac{du}{dt} = -\frac{\partial j_x}{\partial x} - \frac{\partial j_y}{\partial y} - \frac{\partial j_z}{\partial z} = -\nabla \bullet \vec{j} = -div(\vec{j})$$

$$\vec{j} = -k \cdot \nabla u = -k \cdot grad(u)$$

$$j_x = -k \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \qquad j_y = -k \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \qquad j_z = -k \cdot \frac{\partial u}{\partial z}$$

$$\boxed{\frac{\partial u}{dt} = k \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)}$$

741 Theorie

$$\boxed{\frac{\partial u}{dt} = k \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)}$$

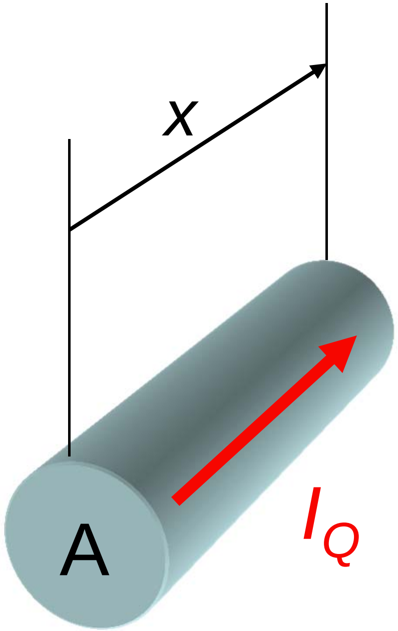
$$u = \frac{dQ}{dx \cdot dy \cdot dz} = \frac{dm \cdot c \cdot T}{dV} = \rho c T$$

$$\boxed{\frac{dT}{dt} = \frac{k}{\rho c} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{dx^2} + \frac{\partial^2 T}{dy^2} + \frac{\partial^2 T}{dz^2} \right)}$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{k}{\rho c} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{dx^2} + \frac{\partial^2 T}{dy^2} + \frac{\partial^2 T}{dz^2} \right)$$

741 Aufgaben

Lösungen für langer Stab

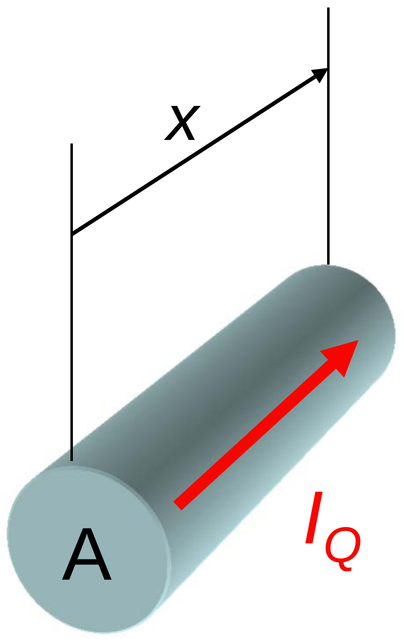


$$\frac{dT}{dt} = \frac{k}{\rho c} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{dx^2} \right)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{k}{\rho c} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{dx^2} + \frac{\partial^2 T}{dy^2} + \frac{\partial^2 T}{dz^2} \right)$$

741 Aufgaben

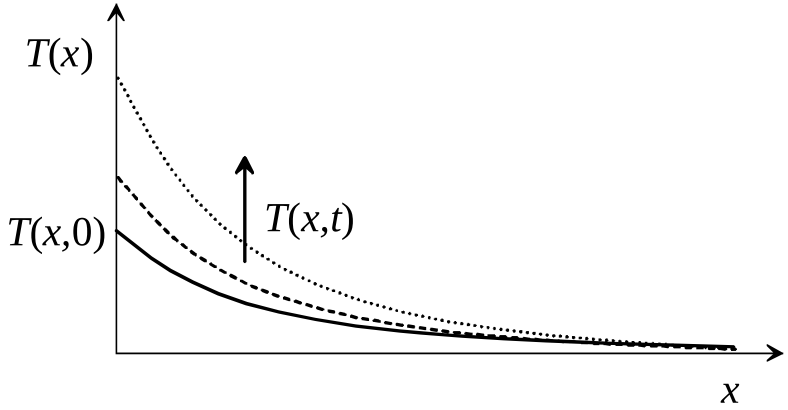
Lösungen für langer Stab

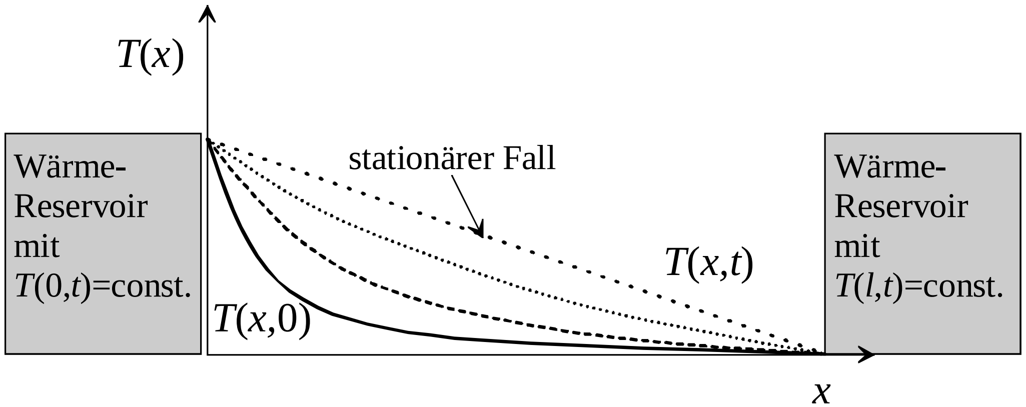


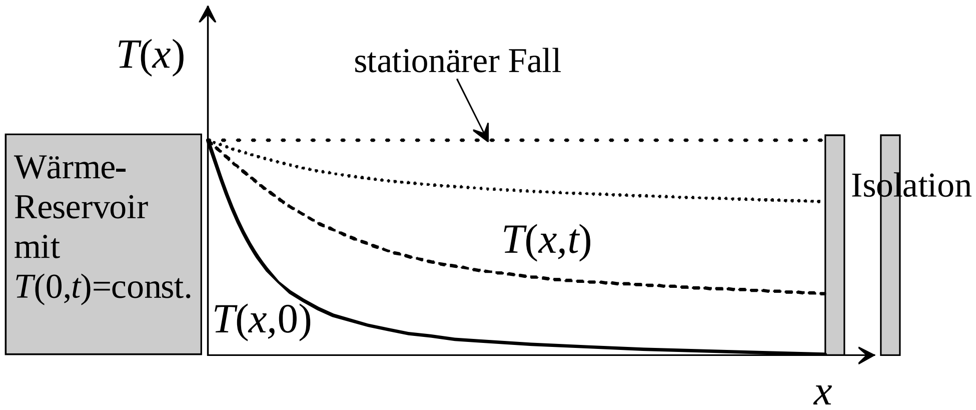
$$\frac{dT}{dt} = \frac{k}{\rho c} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{dx^2} \right)$$

$$T(x,t) = T_0 \cdot e^{\pm \lambda_1 x + \lambda_2 t}$$

741 Aufgaben







Lösungen für langer Stab

Je nach Randbedingungen

→transiente Lösungen

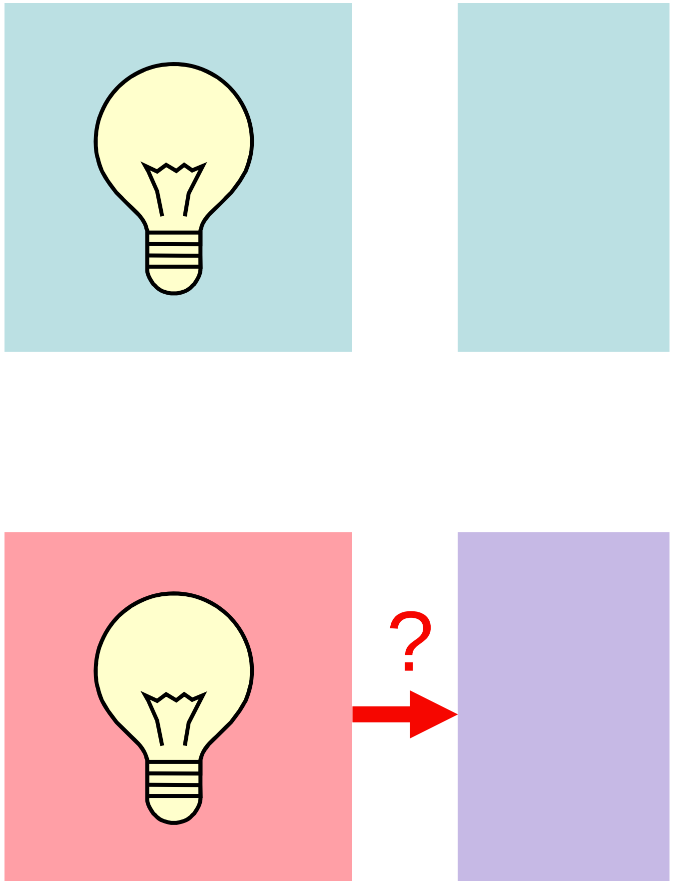
→ stationäre Lösungen

742 Wärmestrahlung

742 Ziele

- von einem Körper in Form von Wärmestrahlung abgestrahlte Leistung berechnen können
- Aussagen über Emissions-Spektrum und Temperatur machen können
- die Arten des Wärmetransportes kennen

742 Theorie



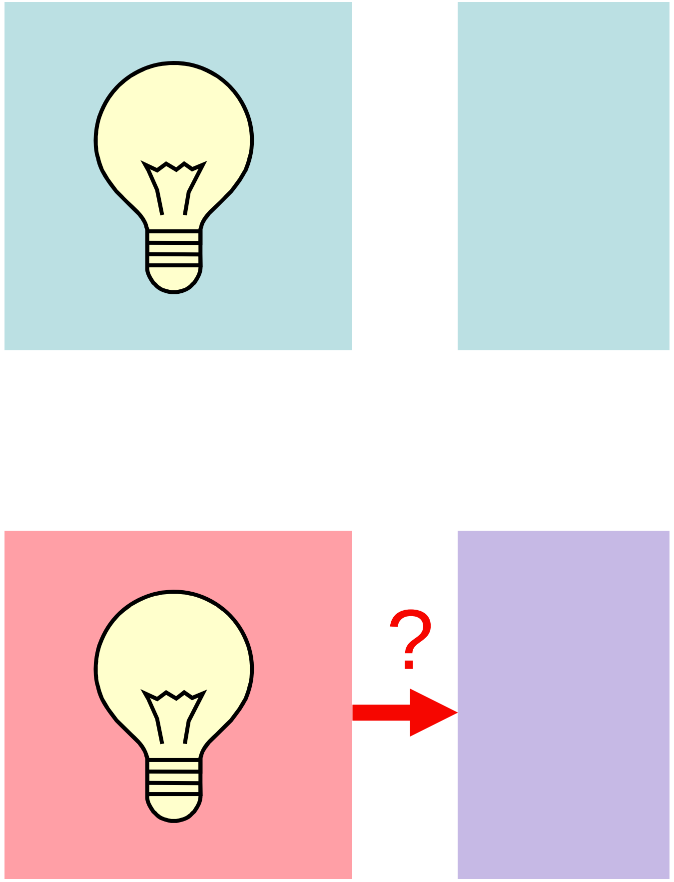
Möglichkeiten des Wärmetransports:

Konvektion: Wärme wird mit Material transportiert

Wärmeleitung (kunduktiv): Wärme wird als molekulare Schwingung durch Stösse im Medium transportiert

Strahlung (radiativ): ???

742 Theorie



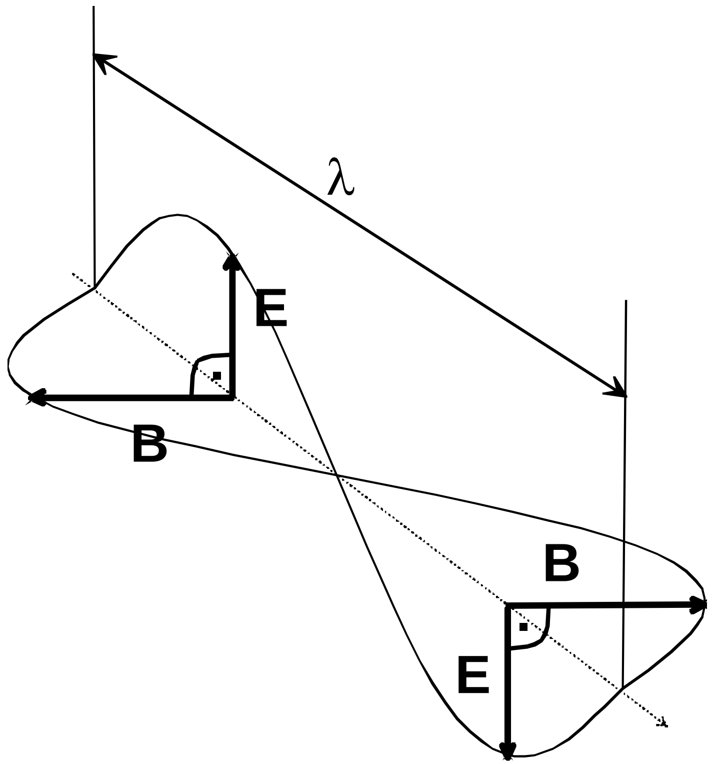
Experiment / Beobachtung

Ein heisses Objekt strahlt Wärme ab → Wärmestrahlung

Diese Strahlung geht auch durch ein Vakuum hindurch

→ Strahlung benötigt kein Medium!

742 Theorie



Experiment / Beobachtung

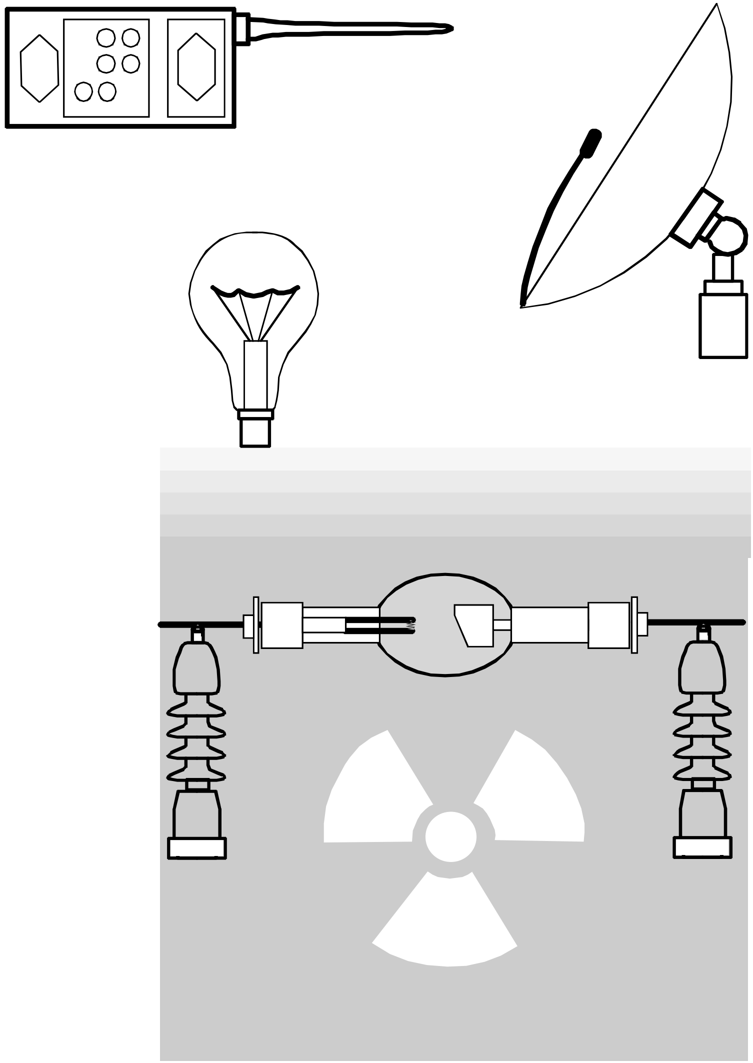
Ein heisses Objekt strahlt Wärme ab → Wärmestrahlung

Diese Strahlung geht auch durch ein Vakuum hindurch

→Strahlung benötigt kein Medium!

→ elektromagnetische Strahlung (Kap. 800 & 900)

742 Theorie



Experiment / Beobachtung

Ein heisses Objekt strahlt Wärme ab → Wärmestrahlung

Diese Strahlung geht auch durch ein Vakuum hindurch

→Strahlung benötigt kein Medium!

→ elektromagnetische Strahlung (Kap. 800 & 900)

742 Theorie

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

Wellenlänge des Strahlungsmaximums (Wiensches Verschiebungsgesetz)

742 Theorie

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

Wellenlänge des Strahlungsmaximums (Wiensches Verschiebungsgesetz)

$$P = \varepsilon \sigma A T^4$$

abgestrahlte Leistung

742 Theorie

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

Wellenlänge des Strahlungsmaximums (Wiensches Verschiebungsgesetz)

$$P = \varepsilon \sigma A T^4$$

abgestrahlte Leistung

Emissionszahlen

Material	Temperatur / °C	ε
Aluminium poliert	170	0.05
Stahl poliert	20	0.16
Kupfer oxidiert	20	0.78
Wasser	0...100	0.95