Universität Münster

Physik für Mediziner, Zahnmediziner und Pharmazeuten

Iris Niehues
Physikalisches Institut, Universität Münster

16.05.2025

living.knowledge

Thermodynamik

- beschreibt Verhalten von Systemen mit sehr vielen Teilchen (Moleküle/Atome)

Thermodynamik

- beschreibt Verhalten von Systemen mit sehr vielen Teilchen (Moleküle/Atome)
- Stoffmenge n mit der Einheit $[n] = \text{mol}$

$$1\,\text{mol} = 6,02214076 \cdot 10^{23}\ \text{Teilchen}$$

  Avogadro Zahl
- Zahl ist so groß, dass es unmöglich ist alle Teilchen einzeln zu beschreiben $\rightarrow$ neue Größen

Thermodynamik

- molare Masse M: Verhältnis zwischen Masse m und Stoffmenge n

$$M = \frac{m}{n} = N_A \cdot m_{\mathrm{Teilchen}} \qquad \text{Einheit: } [M] = \frac{[m]}{[n]} = \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{mol}}$$

  m_{Teilchen} die Masse eines Teilchens , $N_A = 6{,}02214 \cdot 10^{23}\ \mathrm{mol}^{-1}$ Avogadro-Konstante
- M ist für jeden Stoff spezifisch
  $\rightarrow$ typische Werte:
  $M_{\mathrm{H_2O}} \approx 18\ \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{mol}}$, $M_{\mathrm{H_2}} \approx 2\ \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{mol}}$.

Übungsaufgabe 8.1: Stoffmengen

Def. 1 mol und Avogadrokonstante

Definition 1 mol:

Ist die Stoffmenge, die so viel Teilchen enthält, wie in 12g des Kohlenstoffisotops ^{12}C enthalten sind $\rightarrow$ $6{,}02214 \cdot 10^{23}$ Teilchen

Def. 1 mol und Avogadrokonstante

Definition 1 mol:
Ist die Stoffmenge, die so viel Teilchen enthält, wie in 12g des Kohlenstoffisotops ^{12}C enthalten sind $\rightarrow$ $6{,}02214 \cdot 10^{23}$ Teilchen

Anzahl der Teilchen pro Mol:
$N_A = 6{,}02214 \cdot 10^{23}\,\mathrm{mol}^{-1}$ (Avogadro-Konstante)

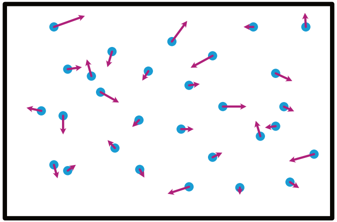
- unabhängig von der Molekül- oder Atomart!
- Atomare Masseneinheit $u = \frac{1}{N_A} = 1,660540 \cdot 10^{-27}\mathrm{kg}$

Avogadrosches Gesetz:

1 mol eines idealen Gases nimmt, unabhängig von dessen chemischer Beschaffenheit im Normalzustand ($T = T_0 = 273,15$ K und $p = p_0 = 1013,25$ hPa) das gleiche Volumen ein:
$V_{\text{mol}} = 22,414 \cdot 10^{-3}\text{m}^3\text{mol}^{-1}$ =22,4141 mol^{-1}

Gas aus Atomen/Molekülen

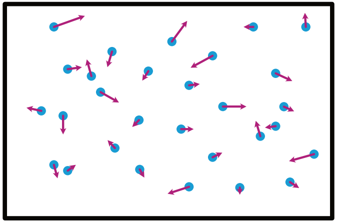
- Atome oder Moleküle sind immer in Bewegung
- Bewegung ist mit Energie verbunden



Teilchen
(Atome/Moleküle
Geschwindigkeiten

Gas aus Atomen/Molekülen

- Atome oder Moleküle sind immer in Bewegung
- Bewegung ist mit Energie verbunden



Teilchen (Atome/Moleküle
Geschwindigkeiten

- gesamte kinetische Energie: **innere Energie**

$$U = N \cdot \frac{1}{2} \cdot m \cdot \overline{v^2}$$

Einheit $[U] = \mathrm{J}$ (Joule)
$\overline{v^2}$ mittleren Geschwindigkeit der Teilchen, m Masse und N Gesamtzahl.

- Innere Energie wächst, wenn wir mehr Teilchen betrachten

Temperatur

Temperatur T:

- hängt nicht von der Anzahl der Teilchen
- beschreibt Energie eines *mittleren* Teilchens
- Einheit $[T] = \mathrm{K}$ (Kelvin)

$$\frac{3}{2} \cdot k_B \cdot T = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \overline{v^2}$$

$\frac{1}{2} m\overline{v^2}$ mittlere kinetische Energie, k_B Boltzmann Konstante $\left(k_\mathrm{B} = 1,38 \cdot 10^{-23} \, \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}} \right)$

Temperatur

Temperatur T:

- hängt nicht von der Anzahl der Teilchen
- beschreibt Energie eines *mittleren* Teilchens
- Einheit $[T] = \mathrm{K}$ (Kelvin)

$$\frac{3}{2} \cdot k_B \cdot T = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \overline{v^2}$$

$\frac{1}{2}m\overline{v^2}$ mittlere kinetische Energie, k_B Boltzmann Konstante $\left(k_\mathrm{B} = 1,38 \cdot 10^{-23}\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}}\right)$

verknüpft die Mechanik des Massenpunktes mit der Thermodynamik

$T = 0\,\mathrm{K}$ definiert den **absoluten Temperatur-Nullpunkt** mit $U = 0$

Celsius-Skala

Referenzpunkt $T = 0°\text{C}$ (Gefrierpunkt von Wasser zu Eis) beliebig gewählt

Umrechnung von Celsius in Kelvin

$$T = 0\,\mathrm{K} = -273,15°\mathrm{C}$$

Celsius-Skala

Referenzpunkt $T = 0°\text{C}$ (Gefrierpunkt von Wasser zu Eis) beliebig gewählt
Umrechnung von Celsius in Kelvin

$$T = 0\,\mathrm{K} = -273,15°\mathrm{C}$$

Die Intervalle sind gleich

$$T_2 - T_1 = x\,\mathrm{K} = x°\mathrm{C}$$

also gilt für die Umrechnung

$$T_K = T_{°C} \cdot 1\frac{\text{K}}{°\text{C}} + 273,15\,\mathrm{K}$$

1. Hauptsatz und Wärme

Die Thermodynamik beschreibt Prozesse in denen Energie umgewandelt wird
$\rightarrow$ zwei verschiedene Prozesse die innere Energie zu ändern

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

1. Hauptsatz und Wärme

Die Thermodynamik beschreibt Prozesse in denen Energie umgewandelt wird
$\rightarrow$ zwei verschiedene Prozesse die innere Energie zu ändern

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

1. Mechanische Arbeit ΔW
2. Wärme ΔQ

1. Hauptsatz und Wärme

Die Thermodynamik beschreibt Prozesse in denen Energie umgewandelt wird
$\rightarrow$ zwei verschiedene Prozesse die innere Energie zu ändern

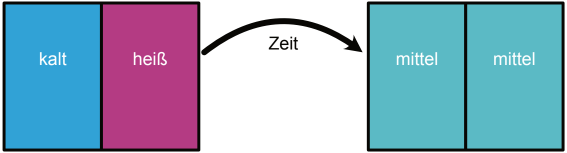
$$\Delta U = U_2 - U_1$$

1. Mechanische Arbeit ΔW
2. Wärme ΔQ

1. Hauptsatz der Thermodynamik

$$\boxed{\Delta U = \Delta Q + \Delta W}$$

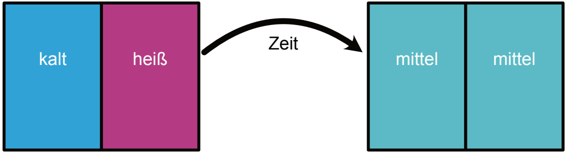
Temperaturausgleich



Übungsaufgabe 8.2: Mischtemperatur
Übungsaufgabe 8.3: Wärmeleistung

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

Temperaturausgleich



Übungsaufgabe 8.2: Mischtemperatur
Übungsaufgabe 8.3: Wärmeleistung

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

Wärmekapazität C, Einheit: $[C] = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}}$

spezifische Wärmekapazität $c = \frac{C}{m}$, Masse m, Einheit $[c] = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\,K}}$

molare Wärmekapazität $c_m = \frac{C}{n}$, molare Stoffmenge n, Einheit $[c] = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol\,K}}$

TED 20-4.12-F05

Ein Proband gibt bei leichter Tätigkeit 100W in Form von Wärme an die Umgebung ab. Das ist gerade soviel, dass sich seine Körpertemperatur nicht ändert. Die Wärmekapazität seines Körpers beträgt $180\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{K}}$.

Um welchen Betrag wäre die Körpertemperatur angestiegen, wenn bei gleicher Wärmebildung eine Stunde lang nichts von der Wärme hätte abgegeben werden können?

- A 0,2°C
- B 0,5°C
- C 2°C
- D 3°C
- E 5°C

TED 20-4.12-F05

Ein Proband gibt bei leichter Tätigkeit 100W in Form von Wärme an die Umgebung ab. Das ist gerade soviel, dass sich seine Körpertemperatur nicht ändert. Die Wärmekapazität seines Körpers beträgt $180\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{K}}$.
Um welchen Betrag wäre die Körpertemperatur angestiegen, wenn bei gleicher Wärmebildung eine Stunde lang nichts von der Wärme hätte abgegeben werden können?

A 0,2°C

B 0,5°C

C **2°C**

D 3°C

E 5°C

Mischungskalorimeter

Prüfkörper ($T_K = 50°C$) wird in ein Wasserbad ($T_W = 20°C$) eingetaucht
$\rightarrow$ Wärmeausgleich zu T_M (Mischungstemperatur)

(1)

Mischungskalorimeter

Prüfkörper ($T_K = 50°C$) wird in ein Wasserbad ($T_W = 20°C$) eingetaucht
$\rightarrow$ Wärmeausgleich zu T_M (Mischungstemperatur)

Energiebilanz: vom Körper abgegebene Wärmemenge = der von der Flüssigkeit aufgenommen Wärmemenge: $-\Delta Q_K = +\Delta Q_W$ mit $-\Delta Q_K = -c_K m_K (T_M - T_K)$

(1)

Mischungskalorimeter

Prüfkörper ($T_K = 50°C$) wird in ein Wasserbad ($T_W = 20°C$) eingetaucht
$\rightarrow$ Wärmeausgleich zu T_M (Mischungstemperatur)

Energiebilanz: vom Körper abgegebene Wärmemenge = der von der Flüssigkeit aufgenommen Wärmemenge: $-\Delta Q_K = +\Delta Q_W$ mit $-\Delta Q_K = -c_K m_K (T_M - T_K)$
$\rightarrow$ Kalorimeterformel

$$c_K m_K (T_K - T_M) = c_W m_W (T_M - T_W) \quad (1)$$

kennt man m_K, m_W c_W und misst man T_M, T_W und T_K kann man c_K bestimmen

Mischungskalorimeter

Prüfkörper ($T_K = 50°C$) wird in ein Wasserbad ($T_W = 20°C$) eingetaucht
$\rightarrow$ Wärmeausgleich zu T_M (Mischungstemperatur)

Energiebilanz: vom Körper abgegebene Wärmemenge = der von der Flüssigkeit aufgenommen Wärmemenge: $-\Delta Q_K = +\Delta Q_W$ mit $-\Delta Q_K = -c_K m_K (T_M - T_K)$
$\rightarrow$ Kalorimeterformel
$c_K m_K (T_K - T_M) = c_W m_W (T_M - T_W)$
kennt man m_K, m_W c_W und misst man T_M, T_W und T_K kann man c_K bestimmen

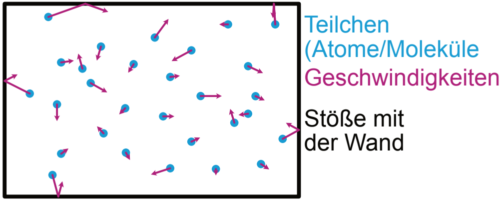
Mischung von gleichen Stoffen c_{K1},c_{K2}

$$T_M = \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2}{m_1 + m_2} \tag{1}$$

Ideales Gas

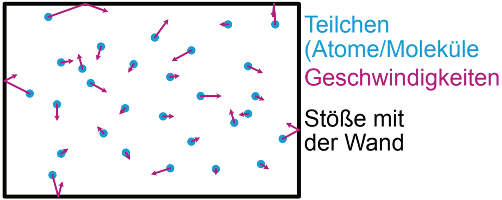
- Gas, das aus Atomen oder Molekülen besteht und in einem Volumen V ($[V] = 1\,\mathrm{m}^3$) eingeschlossen ist
- Teilchen haben eine kinetische Energie, also Impulse
- keine Stöße/Interaktion zwischen den Teilchen

Gasdruck



- kinetische Energie und Impuls müssen erhalten bleiben
- Die Reflexion der Teilchen an den Wänden des Volumens resultieren im Gasdruck

Gasdruck



- kinetische Energie und Impuls müssen erhalten bleiben
- Die Reflexion der Teilchen an den Wänden des Volumens resultieren im Gasdruck

- Druck entspricht dem Impulsübertrag pro Fläche und pro Zeit:

$$p = \frac{m \cdot v}{A \cdot t} \qquad \text{Einheit: } [p] = \frac{\mathrm{kg\,m/s}}{\mathrm{m^2\,s}} = \frac{\mathrm{kg\,m}}{\mathrm{m^2\,s^2}} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m^2}}$$

1. Boyle-Mariotte-Gesetz

$$p \sim \frac{N}{V}$$

- Druck verdoppelt sich, wenn sich die Zahl der Teilchen N verdoppelt
- Druck (Zahl der Stöße) wird kleiner, wenn das Volumen vergrößert wird

2. Gesetz von Gay-Lassac

Erhöhung der mittlere Geschwindigkeit $\overline{v}$ der Teilchen:

1. Die Stöße mit der Wand werden stärker $\rightarrow$ der Druck steigt
2. Die Teilchen stoßen in der gleichen Zeit häufiger mit der Wand $\rightarrow$ der Druck steigt

$$p \sim \overline{v}^2.$$

2. Gesetz von Gay-Lassac

Erhöhung der mittlere Geschwindigkeit $\overline{v}$ der Teilchen:

1. Die Stöße mit der Wand werden stärker $\rightarrow$ der Druck steigt
2. Die Teilchen stoßen in der gleichen Zeit häufiger mit der Wand $\rightarrow$ der Druck steigt

$$p \sim \overline{v}^2.$$

Wir wissen:

$$T = \frac{1}{3} \cdot \frac{m}{k_B} \cdot \overline{v}^2$$

Wir erhalten

$$p \sim T$$

Allgemeine Gasgleichung

$$p = k_B \cdot \frac{N}{V} \cdot T$$
$$\Leftrightarrow p \cdot V = N \cdot k_B \cdot T$$

Allgemeine Gasgleichung

$$p = k_B \cdot \frac{N}{V} \cdot T$$
$$\Leftrightarrow p \cdot V = N \cdot k_B \cdot T$$

Alternativ mit der Stoffmenge n (in mol):

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

Avogadro-Konstante N_A, universellen Gaskonstante $R = k_B \cdot N_A = 8,31\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol\,K}}$

Allgemeine Gasgleichung

Unter Normalbedingungen:

$$p = 101,3\,\mathrm{kPa}$$
$$T = 0^\circ\mathrm{C} = 273,15\,\mathrm{K}$$

Molvolumen $\frac{V}{n} = V_n = 22,4\,\frac{\mathrm{l}}{\mathrm{mol}}$ (l = Liter)

Teilchenanzahl kann über Druckmessung bestimmt werden

Übungsaufgabe 8.4: Normalbedingungen

Gesetz von Dalton und Luftzusammensetzung

Der Gesamtdruck p eines Gemisches idealer Gaser ist gleich der Summe der Partial-drücke:

$$p = \sum_i p_\mathrm{i} = \left(RT \sum_i n_\mathrm{i} / V \right) \tag{2}$$

Gesetz von Dalton und Luftzusammensetzung

Der Gesamtdruck p eines Gemisches idealer Gaser ist gleich der Summe der Partialdrücke:

$$p = \sum_i p_\mathrm{i} = \left(RT \sum_i n_\mathrm{i}/V \right) \tag{2}$$

Luftzusammensetzung:

Luft	100%	1013,25 mbar	= 101,325 kPa
N_2	78,09%	791,25 mbar	= 79,12 kPa
O_2	20,95%	212,28 mbar	= 21,23kPa
Ar	0,93%	9,42 mbar	=0,94 kPa
CO_2	0,04%	0,40mbar	=0,04 kPa

Zustandsdiagramme

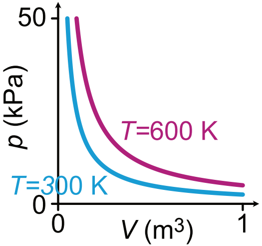
- idealen Gasgleichung
  $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$
- drei Größen die sich in einem gegebenen System mit der festgelegten Stoffmenge n ändern lassen: p, V, T
- Um das Verhalten eines Gases zu visualisieren, können wir jeweils eine Größe festhalten und die anderen beiden als Graph zeichnen $\rightarrow$ Zustandsdiagramm

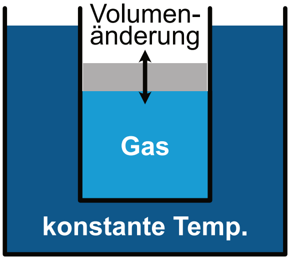
Isotherm $T = const.$

Boyle-Mariotte-Gesetz

- Darstellung im p-V-Diagramm
- $p(V) \sim \frac{T}{V}$ sind Hyperbeln

Übungsaufgabe 8.5: Ideale Gasgleichung

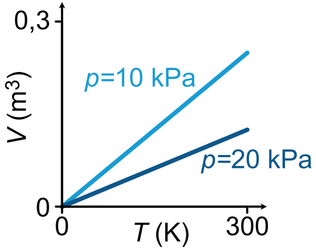


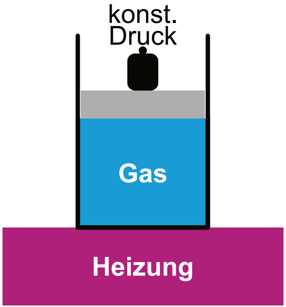


Isobar $p = const.$

- Darstellung im V-T-Diagramm
- $V(T) \sim \frac{1}{p} \cdot T$ sind Geraden

Gay-Lussacsches-Gesetz





TED 19-2.25-H97/H85

Welche Kurve der Abbildung gibt die Volumen-Temperatur- Abhängigkeit eines idealen Gases unter Druck richtig wieder?

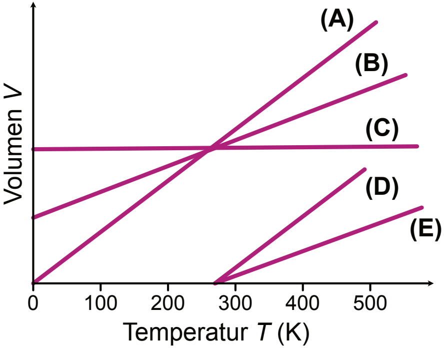
A A

B B

C C

D D

E E



TED 19-2.25-H97/H85

Welche Kurve der Abbildung gibt die Volumen-Temperatur- Abhängigkeit eines idealen Gases unter Druck richtig wieder?

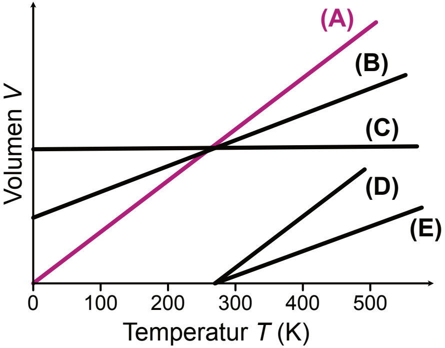
A **A**

B B

C C

D D

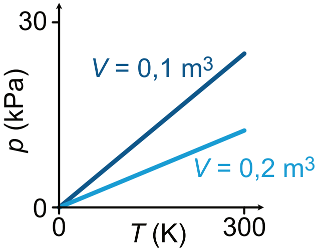
E E

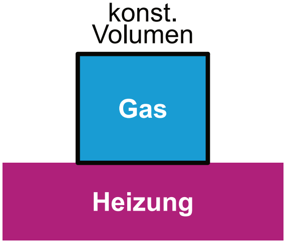


Isochor $V = const.$

- Darstellung im p-T-Diagramm
- $p(T) \sim \frac{1}{V} \cdot T$ sind Geraden

Übungsaufgabe 8.6: Luftdruck





TED 20-4.3-F03

Die drei Diagramme zeigen für ein ideales Gas jeweils den Zusammenhang zwischen zwei Zustandsgrößen Druck (p), Volumen (V) und Temperatur (T) bei konstant gehaltener dritter Größe.

Welche Antwort gibt die hierfür richtigen Beziehungen an?

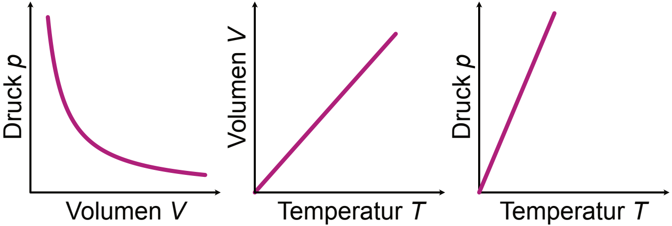
A $p \sim V$; $V \sim T$; $p \sim T$

B $p \sim V$; $V \sim 1/T$; $p \sim 1/T$

C $p \sim V$; $V \sim 1/T^2$; $p \sim T^2$

D $p \sim 1/V$; $V \sim T$; $p \sim T$

E $p \sim 1/V$; $V \sim 1/T$; $p \sim 1/T$



TED 20-4.3-F03

Die drei Diagramme zeigen für ein ideales Gas jeweils den Zusammenhang zwischen zwei Zustandsgrößen Druck (p), Volumen (V) und Temperatur (T) bei konstant gehaltener dritter Größe.

Welche Antwort gibt die hierfür richtigen Beziehungen an?

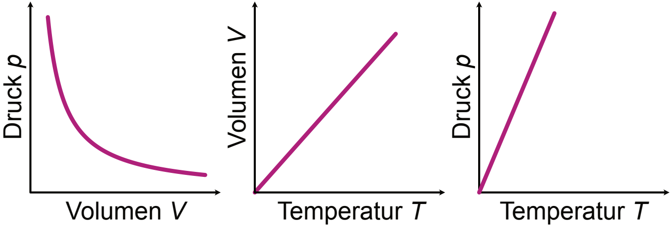
A $p \sim V$; $V \sim T$; $p \sim T$

B $p \sim V$; $V \sim 1/T$; $p \sim 1/T$

C $p \sim V$; $V \sim 1/T^2$; $p \sim T^2$

D **$p \sim 1/V$; $V \sim T$; $p \sim T$**

E $p \sim 1/V$; $V \sim 1/T$; $p \sim 1/T$



Zustandsänderung und Arbeit

innere Energie U kann sich ändern

- wenn das Gas Arbeit verrichtet $\Delta W < 0$
- Arbeit am Gas verrichtet wird $\Delta W > 0$

Zustandsänderung und Arbeit

innere Energie U kann sich ändern

- wenn das Gas Arbeit verrichtet $\Delta W < 0$
- Arbeit am Gas verrichtet wird $\Delta W > 0$

hier: Prozesse die mit einer Volumenänderung verbunden sind: $\Delta W \sim \Delta V$
Proportionalitätskonstante?

$$\frac{[\Delta W]}{[\Delta V]} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^3} = \frac{\mathrm{N\,m}}{\mathrm{m\,m}^2} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2}$$

$\rightarrow$ Druck $p = \dfrac{F}{A} \rightarrow$

$$\Delta W = -p \cdot \Delta V$$

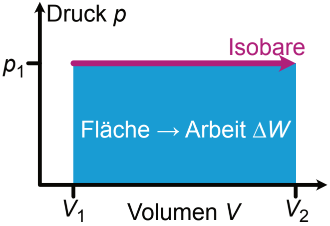
Arbeit bei isobarer Zustandsänderung

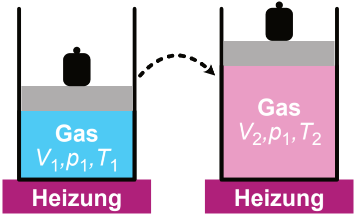
Arbeit: Fläche unter der Kurve

bei konstantem Druck vergrößert sich das Volumen $\rightarrow$Temperatur erhöht sich

$$\Delta W = -p_1 \cdot \underbrace{(V_2 - V_1)}_{>0} < 0$$

Das Gas hat Arbeit an der Masse verrichtet $\Delta W < 0$





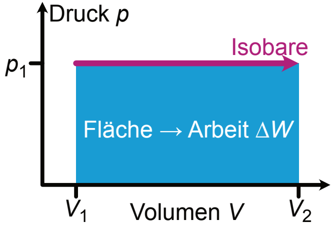
Arbeit bei isobarer Zustandsänderung

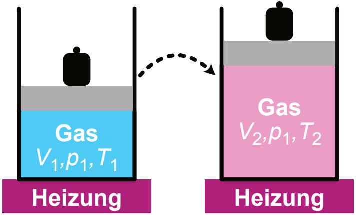
Arbeit: Fläche unter der Kurve

bei konstantem Druck vergrößert sich das Volumen $\rightarrow$Temperatur erhöht sich

$$\Delta W = -p_1 \cdot \underbrace{(V_2 - V_1)}_{>0} < 0$$

Das Gas hat Arbeit an der Masse verrichtet $\Delta W < 0$





bei gleichzeitiger Wärmezufuhr

$$\Delta Q = C \cdot \underbrace{(T_2 - T_1)}_{>0} > 0$$

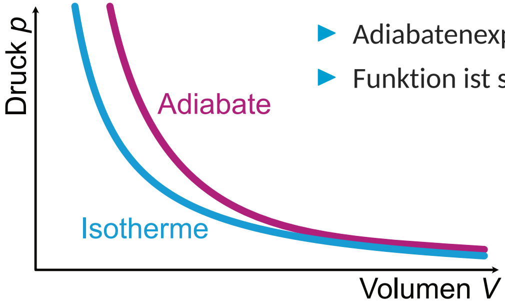
$$\Delta U = -p \cdot \Delta V + \Delta Q$$

Adiabatische Zustandsänderung

- $\Delta Q = 0$ aber $\Delta U = -p \cdot \Delta V \sim \Delta T$
- Druck hängt durch eine Potenzfunktion vom Volumen ab

$$p(V) \sim V^{-\kappa}$$

- Adiabatenexponenten κ (Luft $\kappa \approx 1,4$)
- Funktion ist steiler als eine isotherme im p-V-Diagramm



Reale Gase - van der Waals Gas

- Wechselwirkung zwischen den Teilchen
- Zustandsgleichung

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

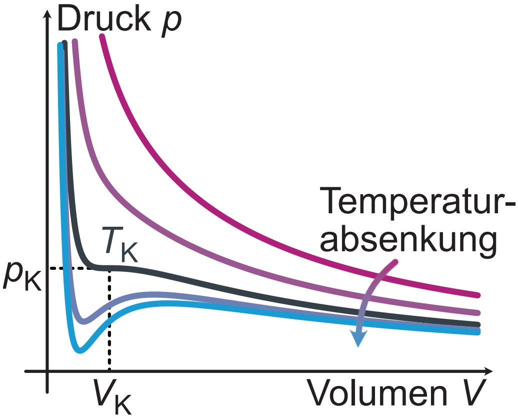
Reale Gase - van der Waals Gas

- Wechselwirkung zwischen den Teilchen
- Zustandsgleichung

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

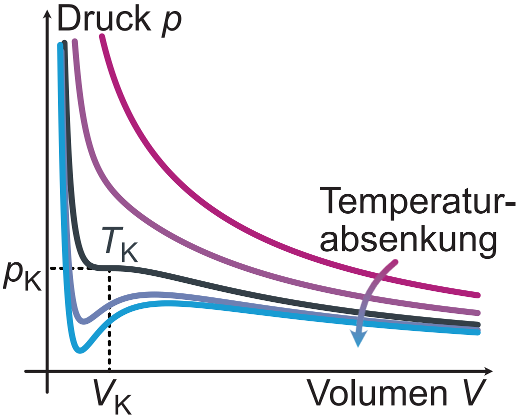
- Teilchen haben ihr eigenes Volumen b und die Wechselwirkung zwischen den Teilchen trägt zum Druck bei
- Wechselwirkung wird stärker, wenn das Volumen kleiner ist $\rightarrow$ Teilchen werden zusammengedrückt $\rightarrow$ Druck-Term $\frac{a}{V^2}$

Van-der-Waals Zustandsdiagramm



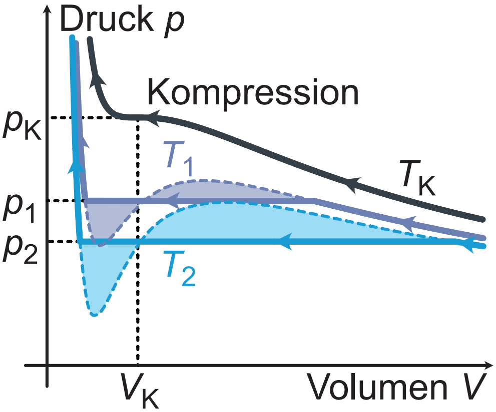
- hohe Temperaturen: Isothermen des idealen Gases

Van-der-Waals Zustandsdiagramm



- hohe Temperaturen: Isothermen des idealen Gases
- Unterhalb einer kritischen Temperatur T_K: nähern sich den Isothermen des idealen Gases nur für große und kleine Volumina an
- instabiler Bereich in dem Volumen und Druck gleichzeitig abnehmen $\rightarrow$ Phasenübergang

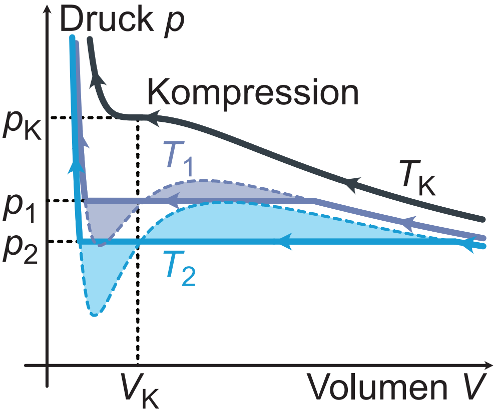
Van-der-Waals Zustandsdiagramm - Phasenübergang



unterhalb der kritischen Temperatur:

- **Phasenübergang** von gasförmig zu flüssig
- Isotherme (konstante Temperatur! T_1 bzw. T_2) verläuft im Volumenbereich isobar (konstanter Druck bei p_1 bzw. p_2)

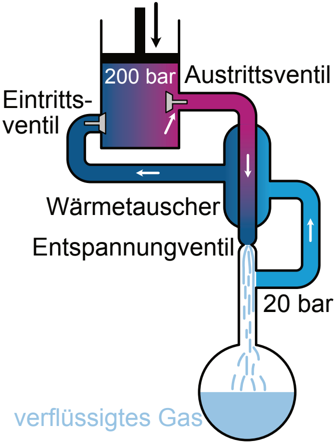
Van-der-Waals Zustandsdiagramm - Phasenübergang



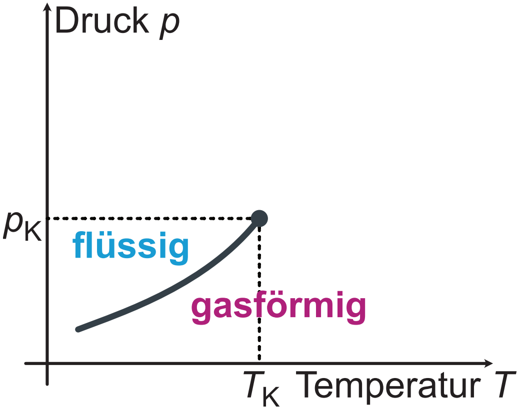
unterhalb der kritischen Temperatur:

- **Phasenübergang** von gasförmig zu flüssig
- Isotherme (konstante Temperatur! T_1 bzw. T_2) verläuft im Volumenbereich isobar (konstanter Druck bei p_1 bzw. p_2)
- **Sättigungsdampfdruck**
- Kondensation von Gas zu Flüssigkeit
- für kleine Volumina steigt der Druck rasant an $\rightarrow$ inkompressible Flüssigkeit

Lindeverfahren



Dampfdruckkurve



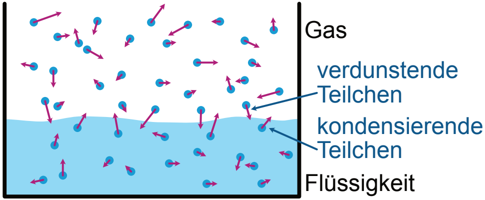
- Sättigungsdampfdruck (konstanter Druck in den Isothermen) für jede Temperatur
- beschreibt das Gleichgewicht zwischen gasförmiger Phase und Flüssigkeit
- entspricht der Phasengrenzlinie der gasförmigen Phase

Gleichgewicht Gas-Flüssigkeit

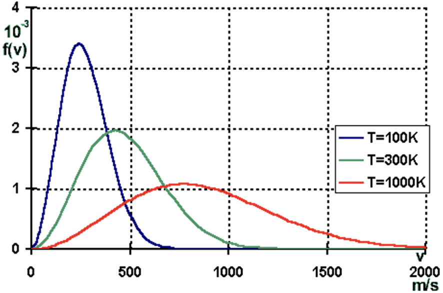
Brownsche Molekularbewegung:

es gibt immer schnelle Teilchen die die Flüssigkeit verlassen können

und langsame Teilchen die wieder in diese übergehen



Molekülgeschwindigkeiten von Stickstoff



Sättigungsdampfdruck - Definition

Der Sättigungsdampfdruck eines flüssigen Stoffes bei einer bestimmten Temperatur bezeichnet den Druck, der im thermodynamischen Gleichgewicht in einer vakuumierten Kammer über der flüssigen Phase auftritt.

In diesem Zustand koexistieren beide Phasen (Gas und Flüssigkeit) stabil nebeneinander, ohne dass eine auf Kosten der anderen wächst. Dies liegt daran, dass die Rate der Verdampfung der Flüssigkeit genau der Rate der Kondensation des Gases entspricht.

TED 18-4.43-F99/F90

Welche Aussage trifft nicht zu?
Der Dampfdruck einer Flüssigkeit

A hängt von der Menge der Flüssigkeit ab.

B hängt von der Temperatur ab.

C kann durch die Zugabe nicht-flüchtiger Komponenten vermindert werden.

D bestimmt den Siedepunkt der Flüssigkeit.

E bestimmt die Sättigungsdampfdichte.

TED 18-4.43-F99/F90

Welche Aussage trifft <u>nicht</u> zu?

Der Dampfdruck einer Flüssigkeit

A **hängt von der Menge der Flüssigkeit ab.**

B hängt von der Temperatur ab.

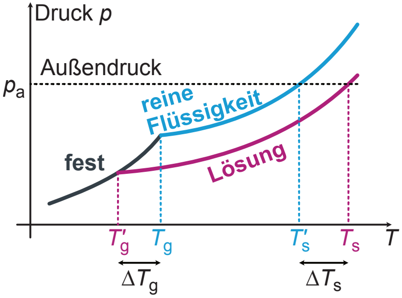
C kann durch die Zugabe nicht-flüchtiger Komponenten vermindert werden.

D bestimmt den Siedepunkt der Flüssigkeit.

E bestimmt die Sättigungsdampfdichte.

Dampfdruckerniedrigung

Prinzip von Le Chatelier (qualitativ)
Wird durch ein im GG befindliches System ein Zwang ausgeübt, so ändern sich die anderen Zustandsvariablen so, dass sie den Zwang entgegenwirken

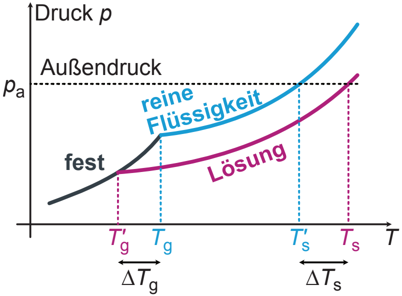


Dampfdruckerniedrigung

Prinzip von Le Chatelier (qualitativ)

Wird durch ein im GG befindliches System ein Zwang ausgeübt, so ändern sich die anderen Zustandsvariablen so, dass sie den Zwang entgegenwirken

$\rightarrow$ Lösung versucht Konzentration herabzusetzen also muss sich der Dampfdruck erniedrigen damit ein Teil des Dampfes in Flüssigkeit kondensiert.



Raoultsches Gesetz

n_L Stoffmenge des Lösungsmittels
n_s Stoffmenge des gelösten Stoffes mit $n = n_\mathrm{L} + n_\mathrm{s}$
p_D Dampfdruck des reinen Lösungsmittels

Dampfdruckerniedrigung:

$$\frac{\Delta p_\mathrm{D}}{p_\mathrm{D}} = \frac{n_\mathrm{s}}{n_\mathrm{s} + n_\mathrm{L}} \text{ verdünnte Lösung: } \frac{\Delta p_\mathrm{D}}{p_\mathrm{D}} \approx \frac{n_\mathrm{s}}{n_\mathrm{L}}$$

Raoultsches Gesetz

Siedepunkterhöhung:

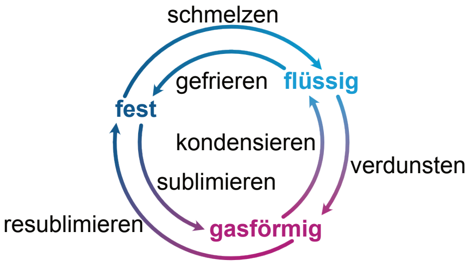
$$\Delta T_S \sim \frac{\Delta p_D}{p_D} \rightarrow \Delta T_S = \alpha_S \frac{n_S}{n_L}$$

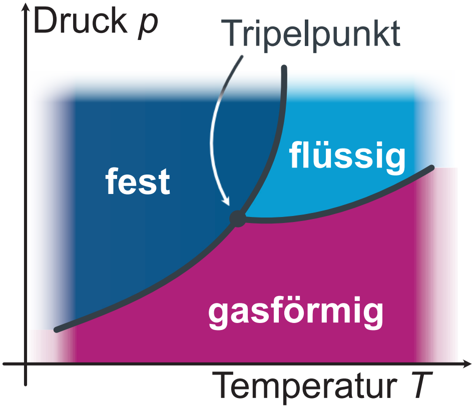
Gefrierpunktserniedrigung:

$$\Delta T_G \sim \frac{\Delta p_D}{p_D} \rightarrow \Delta T_G = \alpha_G \frac{n_S}{n_L}$$

Übungsaufgabe 8.7: Änderung des Siedepunkts
Übungsaufgabe 8.8: Änderung des Schmelzpunktes

Phasendiagramm

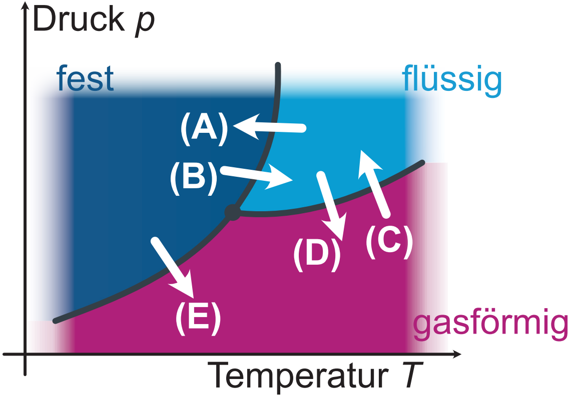




TED 20-4.40-H04

Ordnen Sie den Phasenübergang Sublimation dem zugehörigen Richtungspfeil in der Abbildung zu:

- A A
- B B
- C C
- D D
- E E



TED 20-4.40-H04

Ordnen Sie den Phasenübergang Sublimation dem zugehörigen Richtungspfeil in der Abbildung zu:

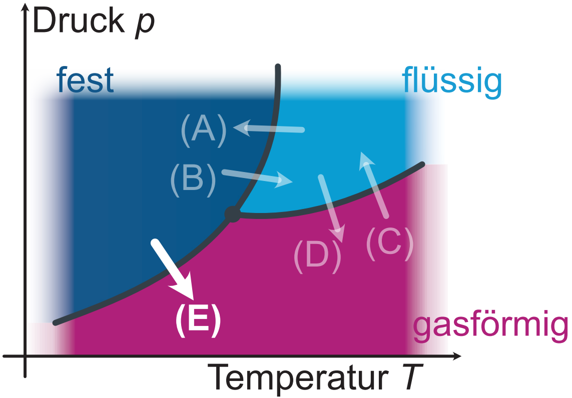
A A

B B

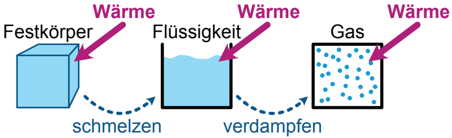
C C

D D

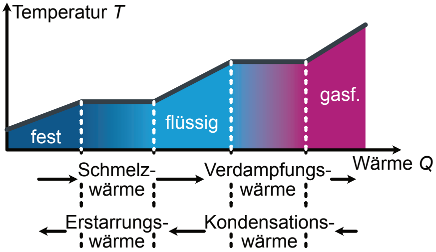
E **E**



Experiment Phasenumwandlung



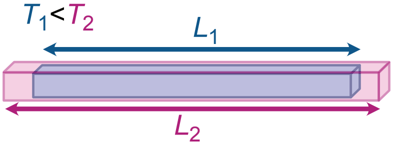
Beispiel: Eis erhitzen gleichmäßig erhitzen und die Temperatur messen



- während der Phasenumwandlung bleibt Temperatur konstant (Haltpunkt)

Übungsaufgabe 8.9: Verdampfungswärme

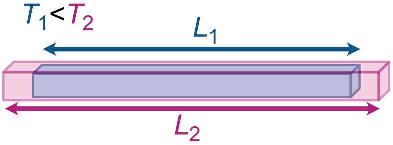
Thermische Volumen und Längenänderung



$$\frac{\Delta V}{V_0} = \gamma \cdot \Delta T$$
$$\Leftrightarrow V_1 = V_0 \cdot (1 + \gamma \cdot \Delta T)$$

Volumenausdehnungskoeffizienten γ, Einheit $[\gamma] = \frac{1}{\mathrm{K}} = \mathrm{K}^{-1}$

Thermische Volumen und Längenänderung



$$\frac{\Delta V}{V_0} = \gamma \cdot \Delta T$$
$$\Leftrightarrow V_1 = V_0 \cdot (1 + \gamma \cdot \Delta T)$$

Volumenausdehnungskoeffizienten γ, Einheit $[\gamma] = \frac{1}{\mathrm{K}} = \mathrm{K}^{-1}$

Längenänderung ΔL

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \cdot \Delta T \qquad \text{mit} \qquad \alpha = \frac{\gamma}{3}$$
$$\Leftrightarrow L_1 = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

Längenausdehnungskoeffizienten α

TED 20-3.1-F99

Das Volumen eines Körpers dehnt sich bei steigender Temperatur T nach der Gleichung $V = V_0(1 + \alpha T)$ aus.
Welche Darstellung gibt das Verhalten wieder?
(Abzissen und Ordinaten linear geteilt)

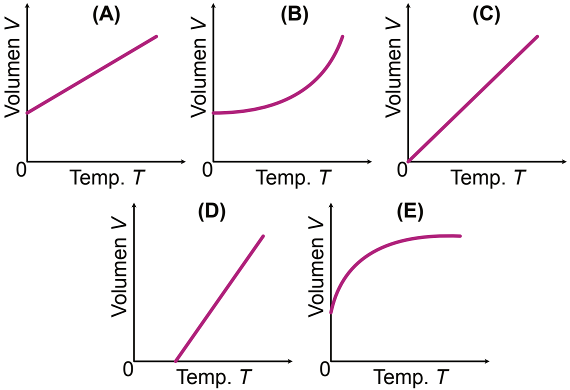
A A

B B

C C

D D

E E



TED 20-3.1-F99

Das Volumen eines Körpers dehnt sich bei steigender Temperatur T nach der Gleichung $V = V_0(1 + \alpha T)$ aus.
Welche Darstellung gibt das Verhalten wieder?
(Abzissen und Ordinaten linear geteilt)

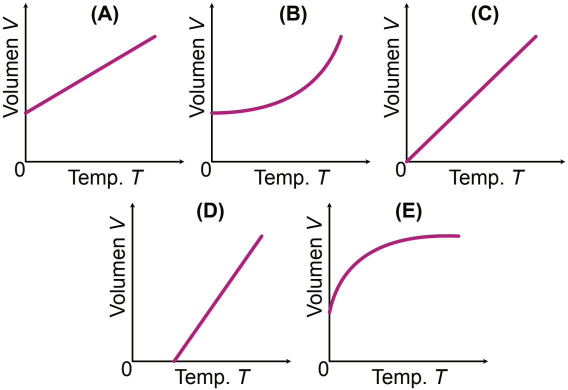
A **A**

B B

C C

D D

E E



Beispiel Eifelturm

Längenausdehnung von Winter ($T = 0°\mathrm{C} = 273,15\ \mathrm{K}$) zu Sommer ($T = 30°\mathrm{C} = 303,15\ \mathrm{K}$):

Längenausdehnungskoeffizient von Eisen $\alpha_{\mathrm{Fe}} = 11,6 \cdot 10^{-6}\ \frac{1}{\mathrm{K}}$, Höhe im Winter $V_0 = 330\ \mathrm{m}$

Beispiel Eifelturm

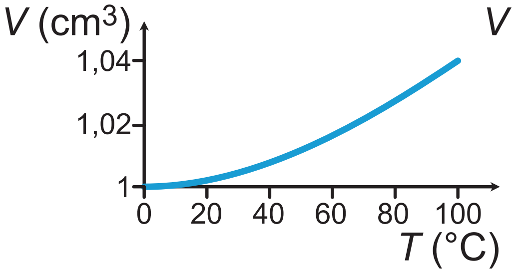
Längenausdehnung von Winter ($T = 0°\mathrm{C} = 273,15\,\mathrm{K}$) zu Sommer ($T = 30°\mathrm{C} = 303,15\,\mathrm{K}$):
Längenausdehnungskoeffizient von Eisen $\alpha_{\mathrm{Fe}} = 11,6 \cdot 10^{-6}\,\frac{1}{\mathrm{K}}$, Höhe im Winter $V_0 = 330$ m
Damit:

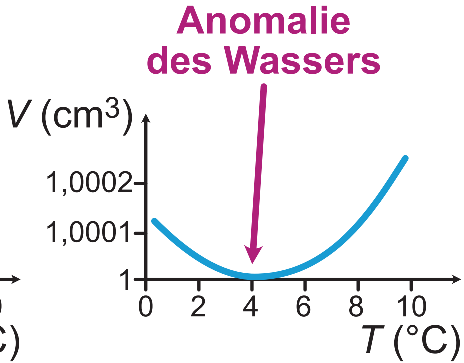
$$\begin{aligned}\Delta L = L_0 \cdot \alpha_{\mathrm{Fe}} \cdot \Delta T &= 330\text{ m} \cdot 11,6 \cdot 10^{-6}\,\frac{1}{\mathrm{K}} \cdot (303,15\,\mathrm{K} - 273,15\,\mathrm{K}) \\ &= 330\text{ m} \cdot 11,6 \cdot 10^{-6}\,\frac{1}{\color{red}{\mathrm{K}}} \cdot 30\,\color{red}{\mathrm{K}} \\ &\approx 0,11\,\mathrm{m} = 11\,\mathrm{cm}\end{aligned}$$

Der Höhenunterschied des Eifelturms zwischen Sommer und Winter ist etwa 11 cm.

Anomalie des Wasser

Temperaturabhängigkeit des Volumens von 1g Wasser bei konst. Druck





Thermische Volumenänderung bei Gasen

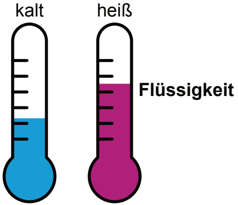
$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

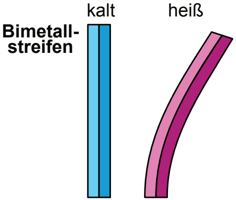
Also ist

$$\frac{\Delta V}{V_0} = n \cdot R \cdot \frac{\Delta T}{T_0}$$
$$= \gamma_{\mathrm{Gas}} \cdot \Delta T \qquad \mathrm{mit} \qquad \gamma_{\mathrm{Gas}} = \frac{n \cdot R}{T_0}$$

Damit hängt also der Ausdehnungskoeffizient stark von der Temperatur T_0 ab

Temperaturmessung durch Volumen-/Längenänderung





- Quecksilber-Thermometern: Pegel der Flüssigkeit
- Bimetallstreifen: Metalle unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten $\rightarrow$ Verbiegung

Thermometer

Flüssigkeitsthermometer:
Therm. Ausdehnung der Fl. in einer Kapillare, Genauigkeit 0,1-1°C

Festkörperthermometer:
Therm. Ausdehnung von Metallen, Genauigkeit 1-2% des Skalenbereichs

Widerstandsthermometer:
Temp. Abhängigkeit des Widerstandes, Genauigkeit 0,1-1°C

Thermoelement:
Temp. Abhängigkeit der Thermospannung, Genauigkeit 0,01-1°C

Pyrometer:
Wärmestrahlung, Genauigkeit 2-20°C

Thermometer

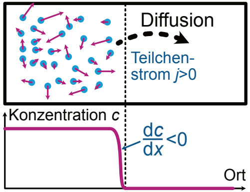
Typ	Temperaturbereich [°C]
Quecksilber	-38 bis +800
Alkohol	-110 bis +210
Pentangemisch	-200 bis +30
Metallstab	-150 bis +1000
Bimetall	-150 bis +500
Metalldraht	-250 bis +1000
Halbleiter	-273 bis +400
W-WMo	-200 bis +3000
Pyrometer	-50 bis +3500

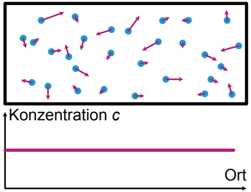
Diffusion - Transport

Teilchenstromdichte

$$j = -D \cdot \frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}x}$$

Konzentration *c*, Ort *x* , Diffusionskonstante *D*





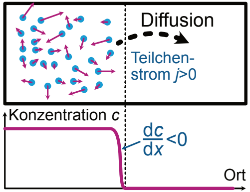
Diffusion - Transport

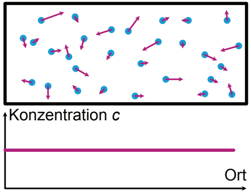
Teilchenstromdichte

$$j = -D \cdot \frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}x}$$

Konzentration *c*, Ort *x* , Diffusionskonstante *D*

1. Fick'sches Gesetz: Teilchen bewegen sich entgegen dem Konzentrationsgradienten $\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}x}$





Diffusion - Transport

Einheiten:

$$
\begin{aligned}
[c] &= \frac{1}{\mathrm{m}^3} \\
\left[\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}x}\right] &= \frac{1}{\mathrm{m}^4} \\
[j] &= \frac{1}{\mathrm{m}^2\,\mathrm{s}} \\
\Rightarrow [D] &= \frac{[j]}{\left[\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}x}\right]} = \frac{\mathrm{m}^4}{\mathrm{m}^2\,\mathrm{s}} = \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}}
\end{aligned}
$$

Diffusion - Transport

Einheiten:

$$[c] = \frac{1}{\mathrm{m}^3}$$

$$\left[\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}x}\right] = \frac{1}{\mathrm{m}^4}$$

$$[j] = \frac{1}{\mathrm{m}^2\,\mathrm{s}}$$

$$\Rightarrow [D] = \frac{[j]}{\left[\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}x}\right]} = \frac{\mathrm{m}^4}{\mathrm{m}^2\,\mathrm{s}} = \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}}$$

Typische Werte für die Diffusionskonstante sind:

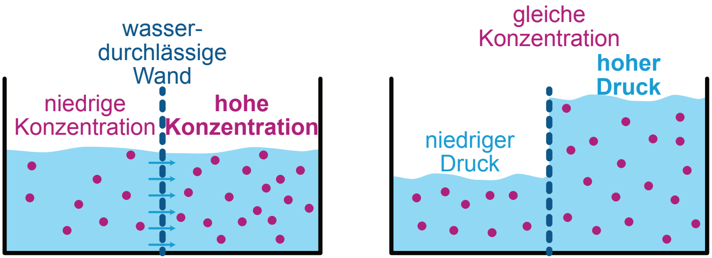
$$\text{Gase: } D \approx 10^{-5}\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}}$$

$$\text{Flüssigkeiten: } D \approx 10^{-10}\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}}$$

$$\text{Festkörper: } D \approx 10^{-20}\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}}$$

Osmose

- durch die Zellwände können die gelösten Teilchen nicht hindurch
  $\rightarrow$ direkter Konzentrationsausgleich nicht möglich
- aber die Flüssigkeit (das Wasser) kann passieren



Osmotischer Druck

- Druckunterschied zwischen den beiden Seiten

$$p_{\mathrm{osm.}} = \left(\frac{n_2}{V_2} - \frac{n_1}{V_1}\right) \cdot R \cdot T$$

mit der gelösten Stoffmenge n, der molaren Stoffmengenkonzentration $\frac{n}{V}$ und der allgemeinen Gaskonstanten R

TED 20-4.50-F03

Eine wässrige Lösung, bei der 0,3 mol osmotisch wirksame Partikel in einem Liter Wasser gelöst sind, ist duruch eine semipermeable Membran von reinem Wasser getrennt. (Die allgemeine Gaskonstante ist ca. $R = 8,3\frac{\text{Nm}}{\text{mol K}}$.)

Wie groß etwa ist der osmotische Druck zwischen der wässrigen Lösung und dem reinen Wasser bei 37°C?

A 0,8 kPa

B 8 kPa

C 80 kPa

D 0,8 MPa

E 8 MPa

TED 20-4.50-F03

Eine wässrige Lösung, bei der 0,3 mol osmotisch wirksame Partikel in einem Liter Wasser gelöst sind, ist duruch eine semipermeable Membran von reinem Wasser getrennt. (Die allgemeine Gaskonstante ist ca. $R = 8,3 \frac{\text{Nm}}{\text{mol K}}$.)

Wie groß etwa ist der osmotische Druck zwischen der wässrigen Lösung und dem reinen Wasser bei 37°C?

A 0,8 kPa

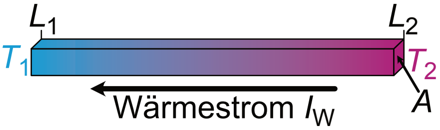
B 8 kPa

C 80 kPa

D **0,8 MPa**

E 8 MPa

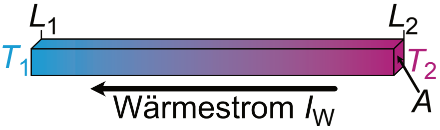
Wärmeleitung



Temperaturauszugleich: Wärmeleitfähigkeit λ, gesamte übertragene Wärme wächst

- mit der vergangenen Zeit t
- der Querschnittsfläche A
- dem Temperaturgradienten $\frac{\Delta T}{\Delta L}$

Wärmeleitung

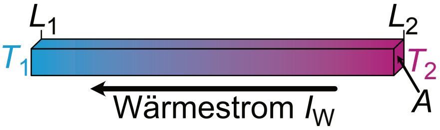


Temperaturauszugleich: Wärmeleitfähigkeit λ, gesamte übertragene Wärme wächst

- mit der vergangenen Zeit t
- der Querschnittsfläche A
- dem Temperaturgradienten $\dfrac{\Delta T}{\Delta L}$

$$Q \sim -A \cdot t \cdot \frac{\Delta T}{\Delta L} \Rightarrow \qquad Q = -\lambda \cdot A \cdot t \cdot \frac{\Delta T}{\Delta L}$$

Wärmeleitung



Wärmestrom

$$I_{\mathrm{W}} = \dot{Q} = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta L} \qquad (3)$$

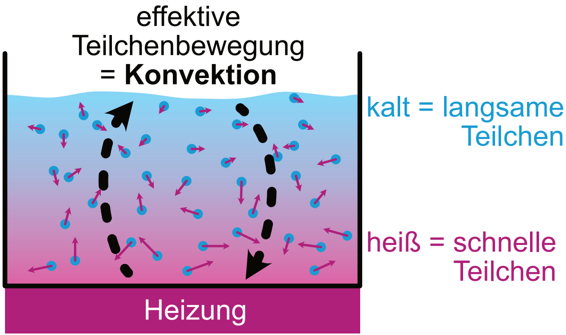
Einheit $[I_{\mathrm{W}}] = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}} = \mathrm{W}$ (Watt). Einheit der Wärmeleitfähigkeit $[\lambda] = \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K\,m}}$

Wärmeleitung Beispiele

bei 300 K in J/(smK)= W/(mK)

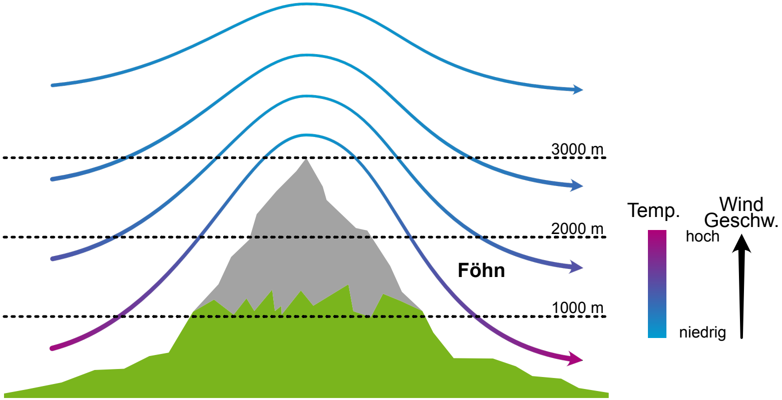
Wärmeleiter		W.-Isolatoren		Flüssigkeiten		Gase	
Aluminium	230	Glas	0,1-1,2	Ethanol	0,17	Helium	0,144
Kupfer	380	Glaswolle	0,04-0,05	Benzol	0,17	Kohlendioxid	0,014
Messing	110	Holz	0,14-0,20	Glycerin	0,29	Luft	0,023
Silber	420	Polystyrol	0,15-0,17	Quecksilber	8,37	Wasserstoff	0,173
Stahl	55	Ziegelstein	0,4-0,6	Wasser	0,59	Vakkuum	0

Konvektion



- typischerweise in Flüssigkeiten und Gasen
- zusätzlich zum Wärmetransport ein Teilchentransport

Konvektion auf der Erde



TED 20-4.47-F89

Unter Konvektion versteht man unter anderem

A Adiabatische Entspannung (Druckerniedrigung)

B Endotherme chemische Reaktionen

C Abstrahlung von Infrarot

D Wärmeleitung in Festkörpern

D Wärmeleitung durch strömende Gase oder Flüssigkeiten

TED 20-4.47-F89

Unter Konvektion versteht man unter anderem

A Adiabatische Entspannung (Druckerniedrigung)

B Endotherme chemische Reaktionen

C Abstrahlung von Infrarot

D Wärmeleitung in Festkörpern

D **Wärmeleitung durch strömende Gase oder Flüssigkeiten**

2. Hauptsatz und Entropie

zwei Arten von Prozessen

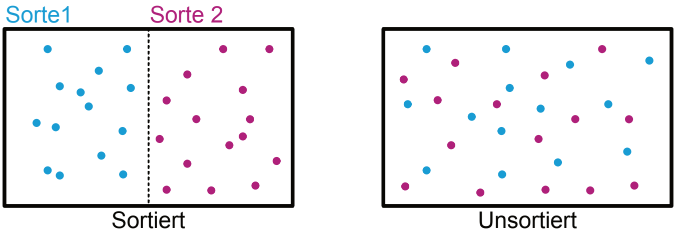
- umkehrbare $\rightarrow \text{reversibel}$
- nicht umkehrbar $\rightarrow \text{irreversibel}$: Diffusion, Wärmeleitung oder das Mischen von Teilchen

2. Hauptsatz und Entropie

zwei Arten von Prozessen

- umkehrbare $\rightarrow$ $\mathrm{reversibel}$
- nicht umkehrbar $\rightarrow$ $\mathrm{irreversibel}$: Diffusion, Wärmeleitung oder das Mischen von Teilchen

Das gemischte Gas wird sich nicht zufällig wieder sortieren $\rightarrow$ mehr Unordnung



2. Hauptsatz und Entropie

Der **2. Hautsatz der Thermodynamik** sagt uns, dass ein System von selbst dem Gleichgewichtszustand entgegen bewegt. Es versucht die *Unordnung* zu maximieren.
Neue thermodynamische Größe: **Entropie**

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

Einheit $[S] = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}}$

2. Hauptsatz und Entropie

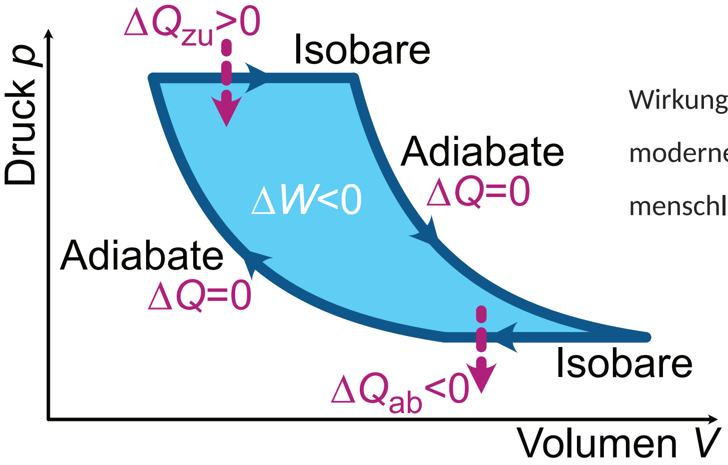
Der **2. Hautsatz der Thermodynamik** sagt uns, dass ein System von selbst dem Gleichgewichtszustand entgegen bewegt. Es versucht die *Unordnung* zu maximieren.
Neue thermodynamische Größe: **Entropie**

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

Einheit $[S] = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}}$

Damit lautet der 2. Hauptsatz:
In einem abgeschlossenen System kann die Entropie nicht verringert werden.

Kreisprozess



Wirkungsgrad $\eta = \frac{\text{Nutzarbeit } \Delta W}{\text{zugeführte Arbeit} \Delta Q}$

moderne Kraftwerke $\eta \sim 50\%$

menschliche Muskeln $\eta \sim 2\%$

3. Hauptsatz

3. Hauptsatz der Thermodynamik: absoluten Nullpunkt
Er besagt, dass dieser Punkt mit $T = 0$ K nicht erreicht werden kann. Oder anders ausgedrückt: Am absoluten Nullpunkt verschwindet die Entropie $S = 0$.

Übungsaufgabe 8.10: Hauptsätze der Thermodynamik