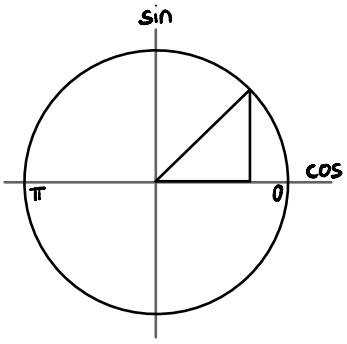
# Experimentalphysik WS 21/22

## Formelsammlung - Jakob Werner

### Grundlagen

| ° | 0 | 30 | 45 | 60 | 90 | 120 | 135 | 150 | 180 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| π | 0 | $\frac{\pi}{6}$ | $\frac{\pi}{4}$ | $\frac{\pi}{3}$ | $\frac{\pi}{2}$ | $\frac{2\pi}{3}$ | $\frac{3\pi}{4}$ | $\frac{5\pi}{6}$ | π |
| sin | 0 | $\frac{1}{2}$ | $\frac{\sqrt{2}}{2}$ | $\frac{\sqrt{3}}{2}$ | 1 | $\frac{\sqrt{3}}{2}$ | $\frac{\sqrt{2}}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 0 |
| cos | 1 | $\frac{\sqrt{3}}{2}$ | $\frac{\sqrt{2}}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 0 | $-\frac{1}{2}$ | $-\frac{\sqrt{2}}{2}$ | $-\frac{\sqrt{3}}{2}$ | -1 |
| tan | 0 | $\frac{\sqrt{3}}{3}$ | 1 | $\sqrt{3}$ | $\pm\infty$ | $-\sqrt{3}$ | -1 | $-\frac{\sqrt{3}}{3}$ | 0 |




#### Potenzrechnen

$a^n \pm b^n \neq (a+b)^n$

$a^n \cdot b^n = (a \cdot b)^n$, $a^n \cdot a^m = a^{n+m}$

$\frac{a^n}{b^n} = \left(\frac{a}{b}\right)^n$, $\frac{a^n}{a^m} = a^{n-m}$

$(a^n)^m = a^{n \cdot m}$

$a^{-n} = \frac{1}{a^n}$, $a^{\frac{1}{n}} = \sqrt[n]{a}$

#### Wurzelrechnen

$\sqrt{a} \pm \sqrt{b} \neq \sqrt{a \pm b}$

$\sqrt{a} \cdot \sqrt{b} = \sqrt{a \cdot b}$

$\frac{\sqrt{a}}{\sqrt{b}} = \sqrt{\frac{a}{b}}$

$\sqrt{a^b} = (\sqrt{a})^b$

---

#### Wichtige Ableitungen

$x^n \rightarrow n \cdot x^{n-1}$

$\frac{1}{x} \rightarrow -\frac{1}{x^2}$

$\frac{1}{x^n} = x^{-n} \rightarrow -\frac{n}{x^{n+1}}$

$\sqrt{x} = x^{\frac{1}{2}} \rightarrow \frac{1}{2\sqrt{x}}$

$\tan(x) \rightarrow \frac{1}{\cos^2(x)}$

$\ln(x) \rightarrow \frac{1}{x}$

#### Wichtige Stammfunkt.

$x \rightarrow \frac{1}{2}x^2$

$x^n \rightarrow \frac{1}{n+1}x^{n+1}$

$\frac{1}{x} \rightarrow \ln|x|$

$\frac{1}{x^n} = x^{-n} \rightarrow \frac{-1}{(n-1)x^{n-1}}$

$\sqrt{x} = x^{\frac{1}{2}} \rightarrow \frac{2}{3}x^{\frac{3}{2}}$

#### Logarithmen

$\log(a \cdot b) = \log(a) + \log(b)$

$\log\left(\frac{a}{b}\right) = \log(a) - \log(b)$

$\log(a^n) = n \cdot \log(a)$

#### binom. Formeln

$(a \pm b)^2 = a^2 \pm 2ab + b^2$

$(a+b) \cdot (a-b) = a^2 - b^2$

---

#### Vektoren:

$\cos\alpha = \frac{\langle v_1 | v_2 \rangle}{|v_1||v_2|}$, $0 \leq \alpha \leq \pi$

$a \times b = \begin{pmatrix} a_2b_3 - a_3b_2 \\ a_3b_1 - a_1b_3 \\ a_1b_2 - a_2b_1 \end{pmatrix}$

$b \times a = -a \times b$, $a \times (sb) = s(a \times b)$

$|a \times b| = |a||b| \cdot \sin\sphericalangle(a,b)$

#### Potenzen:

| h | k | M | G | T |
|---|---|---|---|---|
| $10^2$ | $10^3$ | $10^6$ | $10^9$ | $10^{12}$ |

| d | c | m | μ | n | p |
|---|---|---|---|---|---|
| $10^{-1}$ | $10^{-2}$ | $10^{-3}$ | $10^{-6}$ | $10^{-9}$ | $10^{-12}$ |

# Physikalische Größen und Messungen

## Phys. Größen

| | | |
|---|---|---|
| Grundeinheiten | Länge | Meter |
| | Zeit | Sekunde |
| | Masse | Kilogramm |
| | Stromstärke | Ampere |
| | Temperatur | Kelvin |
| | Stoffmenge | Mol |
| | Lichtstärke | Candela |

---

## Messfehler

$$X = X \pm \Delta X_{sys} \pm \Delta X_{stat}$$

**statistische Fehler**

Mittelwert: $\mu = \langle x \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i$

Standartabweichung: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \mu)^2}$

Unsicherheit von $\mu$: $\Delta\mu = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \mu)^2}$

**Fehlerfortpflanzung**

$$\Delta z = \sqrt{\left(\frac{\delta f}{\delta x} \cdot \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta y} \cdot \Delta y\right)^2}$$

**Bsp:**

Addition: $\Delta z < \Delta x + \Delta y$

Multiplikation: $\Delta z < |y| \cdot \Delta x + |x| \cdot \Delta y$

$$\frac{\Delta z}{z} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2}$$

Division: $\frac{\Delta z}{z} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2}$

# Mechanik starrer Körper

## Kinematik

$x(t) \xrightarrow{\text{ableiten}} v(t) = \dot{x}(t) \xrightarrow{\text{ableiten}} a(t) = \dot{v}(t)$

$x(t) \xleftarrow{\text{integrieren}} v(t) \xleftarrow{\text{integrieren}} a(t)$

z.B $v(t) = \int_{t_0}^{t} a(t')\,dt' + \underbrace{v(t_0)}_{\text{Startgeschw.}}$ $\qquad x(t) = \int_{t_0}^{t} v(t')\,dt' + \underbrace{x(t_0)}_{\text{Startort}}$

Freier Fall: $v(t) = -g \cdot t$ $\qquad h(t) = h_0 - \frac{1}{2} g t^2$ $\qquad \left( t^* = \sqrt{\frac{2 h_0}{g}} \right)$

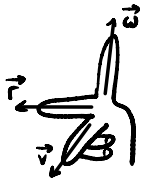
Schiefer Wurf: $x(t) = v_{0x} \cdot t$ $\qquad y(t) = v_{0y} \cdot t - \frac{1}{2} g t^2$

$v_{0x} = v_0 \cdot \cos\alpha$ $\qquad v_{0y} = v_0 \cdot \sin\alpha$

Kreisbewegung: $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ $\qquad \varphi(t) = \omega \cdot t$

$v = \omega \cdot R$ $\qquad a_z = \omega^2 \cdot R$

$\vec{\alpha} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$ $\qquad a_T = \alpha \cdot R$




---

## Kräfte

$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$

Gravitation $F_G = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$ $\qquad \left( G \approx 6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2} \right.$, $\left. r = \text{Abstand der SP} \right)$

Federkraft $F = -D \cdot x$ $\qquad$ parallel: $D = D_1 + D_2$

seriell: $\frac{1}{D} = \frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} \rightarrow D = \frac{D_1 \cdot D_2}{D_1 + D_2}$

Scheinkräfte

Trägheit: $\vec{F_T} = -m \cdot \vec{a}$

Zentrifugal: $F_z = m\omega^2 \cdot r = m \frac{v^2}{r}$

Coriolis: $\vec{F_c} = 2m \cdot \vec{v} \times \vec{\omega}$




Reibung $F_{HR}^{max} = \mu_H \cdot F_N$ , $F_{GR} = \mu_G \cdot F_N$ , $F_{RR} = \mu_R \cdot F_N$

---

## Erhaltungsgrößen

Arbeit $W = \Delta E$ $\qquad W = \vec{F} \cdot \vec{r}$

Energie $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$ $\qquad E_{elast} = \frac{1}{2} D x^2$ $\qquad E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2$

Freier Fall: $v = \sqrt{2gh}$

Leistung $P = \frac{W}{t}$ $\qquad P = F \cdot \vec{v}$

Potential $U(\vec{r}) = \frac{1}{m} W(\vec{r_0} \rightarrow \vec{r}) \leftrightarrow \vec{F}(\vec{r}) = -m \vec{\nabla} U(\vec{r})$

Impuls $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ $\qquad \Delta\vec{p} = \vec{F} \cdot \Delta t$

Rakete: $\vec{v} = -\frac{m}{M-m}\,\vec{u}$

Stöße elastisch: $v_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1 + \frac{2 m_2}{m_1 + m_2} v_2$

$v_2' = \frac{2 m_1}{m_1 + m_2} v_1 + \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} v_2$

inelastisch: $v' = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$

Drehimpuls $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = m \cdot r^2 \cdot \vec{\omega}$

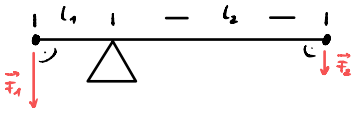
Drehmoment $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$ $\qquad \left(\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}\right)$

---

## Statik

Translation: Aufhängung am Tragseil: $F = \frac{m \cdot g}{2 \cos\alpha}$

Rotation: Hebelgesetz $F_1 = \frac{l_2}{l_1} \cdot F_2$




Schwerpunkt $\vec{r}_{SP} = \frac{1}{m}\int_K \vec{r}\, dm = \frac{1}{m}\int_K \vec{r}\,\rho(\vec{r})\, dV$

$\vec{r}_{SP} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{n} m_i \vec{r}_i$ $\qquad \vec{M} = \vec{r}_{SP} \times m\vec{g}$

Gleichgew. $|\vec{M}| = |\vec{r}_{SP}| \cdot m \cdot |\vec{g}| \cdot \sin\alpha$

Stabil: , labil: , indifferent: 

---

## Rotation

Trägheitsmoment $\vec{L} = J \cdot \vec{\omega}$ $\qquad \left(J = \int_K \rho(\vec{r})\, r_\perp^2\, dV\right)$ $\qquad \vec{M} = J \cdot \vec{\alpha}$

Punktmassen: $J = \sum_{i=1}^{N} m_i r_{i\perp}^2$

Kugel: $J = \frac{2}{5} m R^2$

Vollzylinder: $J = \frac{1}{2} m R^2$

Verschiebung $J_{neu} = J_{SP} + m \cdot d^2$

Energie $E_{rot} = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2$

Dosen auf schiefer Ebene $v = \omega R = \sqrt{\frac{2 E_{pot}}{\frac{J}{R^2} + m}}$ $\qquad E_{pot} = \frac{1}{2}\left(\frac{J}{R^2} + m\right) v^2$

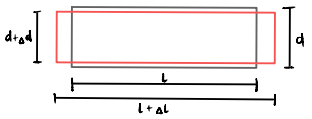
# Kontinuumsmechanik

## Elastomechanik

$$\rho = \frac{m}{V}$$

**Dehnung / Stauchung**

$$\sigma = \frac{F}{A} = E \cdot \varepsilon \qquad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \qquad \Delta l = \frac{F}{E \cdot A} l$$

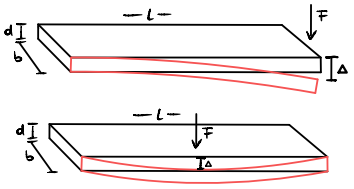



$$\frac{\Delta d}{d} = -\mu \frac{\Delta l}{l} \qquad \frac{\Delta V}{V} = (1-2\mu) \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

**Biegung**

einseitig eingespannt $\Delta = \frac{1}{E} \cdot \frac{4 l^3}{d^3 \cdot b} \cdot F$

beidseitig aufliegend $\Delta = \frac{1}{E} \cdot \frac{l^3}{4 d^3 b} \cdot F$




**Scherung**

$$\tau = G \cdot \gamma \qquad \Delta x = \frac{1}{G} \cdot \frac{F \cdot h}{A} \qquad \gamma = \frac{\Delta x}{h} = \tan(\theta)$$

**Torsion**

$$M = D \cdot \varphi \text{ (rad)} = R \cdot F \qquad D = G \cdot \frac{\pi R^4}{2l}$$

---

## Hydrostatik

rotierendes Gefäß $h(r) = \frac{\omega^2}{2g} r^2$

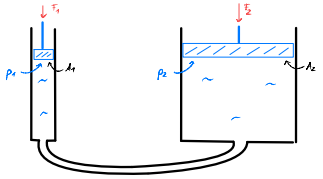
**Druck**

$$p = \frac{F}{A} \qquad 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

Schweredruck $p_s = \frac{F_G}{A} = \rho \cdot g \cdot h$

Stempeldruck $p_0 = \frac{F}{A}$

Hydraulische Presse $F_2 = F_1 \cdot \frac{A_2}{A_1}$




U-Rohr Manometer $p = p_0 + \rho \cdot g \cdot \Delta h$

U-Rohr Barometer $p = \rho \cdot g \cdot \Delta h$

Kompression $\frac{\Delta V}{V} = \frac{\rho}{K} = \varkappa \cdot p \qquad \Delta W = -p \cdot \Delta V$

**Auftrieb**

$F_A = \rho_{FL} \cdot V_K \cdot g \rightarrow F_{ges} = F_A - F_G$

Schwimmen (GG) $V_u = \frac{\rho_K}{\rho_{FL}} \cdot V \qquad V_o = \left(1 - \frac{\rho_K}{\rho_{FL}}\right) \cdot V$

**Aerostatik**

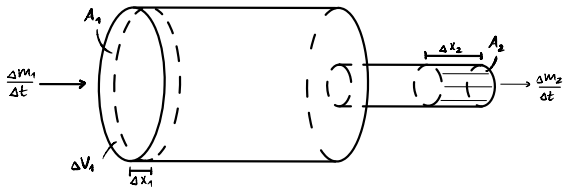
Kompression $p' \cdot V' = p \cdot V = \text{const.}$

Barometr. Höhenformel $p(z) = p_0 \cdot e^{-\left(\frac{\rho_0 \cdot p}{p_0}\right) \cdot z}$ Näherung: $p(z) = p_0 - \rho_0 g z$

(analog $\rho(z)$ mit $\rho_0$)

$h_0 = \frac{p_0}{\rho_0 \cdot g}$ : Druck fällt auf $\frac{1}{e}$ (Erde: 7750 m)

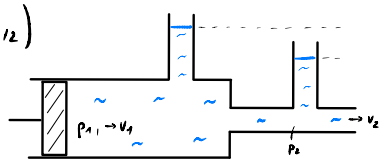
## Hydrodynamik




Kontinuitätsgl. $\rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2$

Volumenstromstärke $I = A \cdot v$ (inkompressible Fl.: $I = \text{const.}$)

Bernoulli-Effekt $\frac{1}{2}\rho v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + p_2 \quad (+\rho g h_{1/2})$




Pitot-Rohr $v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$

Tragflächen $F = \Delta p \cdot A$

Reale Strömungen Viskosität $\eta = \frac{F/A}{dv/dx}$ ($\eta = \text{const.} \Rightarrow$ Newton'sche Fl.)

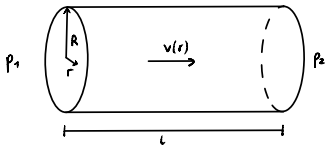
$v_0 = \frac{F}{A} \cdot \frac{D}{\eta}$ ($v(x) = v_0 \cdot \frac{x}{D} = \text{linear}$)

Stoke'sche Reibung $\vec{F}_R = -6\pi\eta \cdot R \cdot \vec{v}$ (Kugel)

→ Sinkgeschw. $v = \frac{2g(\rho_K - \rho_{Fl})}{9\eta} \cdot R^2$

im Rohr $v(r) = \frac{\Delta p}{4\eta \cdot l} \cdot (R^2 - r^2)$

$I = \frac{\pi \Delta p}{8\eta \cdot l} \cdot R^4$




Turbulenz $Re = \frac{\rho \cdot L \cdot v}{\eta}$ bei $Re \geq 1000 \Rightarrow$ Turbulenz

$F_R = \frac{\rho \cdot c_w \cdot A}{2} \cdot v^2$ ($c_w$ = Formwert)

## Schwingungen und Wellen

### Harmonische Schwingungen

$X(t) = X_0 \cdot \sin(\omega t)$ $\omega = 2\pi \cdot f$

$\ddot{X}(t) = -\omega^2 \cdot X(t)$

Federpendel $\ddot{x} = -\frac{D}{m} \cdot x$ $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D}}$ $\frac{1}{2}Dx^2 + \frac{1}{2}mv^2 = \text{const.}$

Fadenpendel $\ddot{\alpha} = -\frac{g}{l} \cdot \alpha$ $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$

$m \cdot g = D \cdot x_0$

**Dämpfung**

$\ddot{x} = -\frac{D}{m} \cdot x - \frac{\beta}{m} \cdot \dot{x}$ ($\beta$ = Dämpfungskonst. / $\gamma = \frac{\beta}{m}$ = Dämpfungsrate)

schwach ($\gamma \ll \omega_0$) $\quad x(t) = x_0 \cdot \sin(\omega t) \cdot e^{-\gamma t}$, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}$

aperiodisch ($\gamma = \omega_0$) $\quad x(t) = x_0 \cdot e^{-\gamma t}$

**Antrieb**

$F_{ext} = F_0 \cdot \sin(\omega_{ext} t)$ $\quad \ddot{x} = -\omega_0^2 x - \gamma \dot{x} + \frac{F_0}{m} \sin(\omega_{ext} \cdot t)$

$x(t) = x_0 \cdot \sin(\omega_{ext} \cdot t + \varphi)$ $\quad$ (Einschwingdauer $\tau \sim \frac{1}{\gamma}$)

$x_0(\omega_{ext}) = \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_{ext}^2) + (2\gamma\omega_{ext})^2}}$ $\quad \varphi(\omega_{ext}) = \arctan\left(\frac{2\gamma\omega_{ext}}{\omega_0^2 - \omega_{ext}^2}\right)$

---

## Harmonische Welle

**Ebene Welle**

$\vec{x}(\vec{r}, t) = \vec{x}_0 \cdot \sin(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$ $\quad \left(k = \frac{2\pi}{\lambda}\right)$

Ausbreitungsgeschw. $\quad c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f = \frac{\omega}{k}$

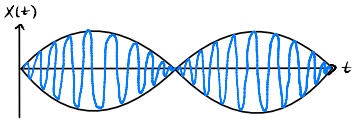
Transversalwellen: $\vec{x}_0 \perp \vec{k}$ (Seil) $\quad$ Longitudialwellen: $\vec{x}_0 \parallel \vec{k}$ (Schall)

**Interferenz**

eingespanntes Seil $\quad f_1 = \frac{c}{2L}$ (Grundfrequenz)

$f_n = f_1 \cdot n$ $\quad \lambda_n = \frac{2L}{n}$ ($n$ = Anz. Bäuche)

Schwebung $\quad T_{schw.} = \frac{2\pi}{|\omega_1 - \omega_2|} = \frac{1}{|f_1 - f_2|}$




**Schallwellen**

Ausbreitungsgeschw. $\quad c_s = \frac{1}{\sqrt{\varkappa \cdot \rho}}$

Schallschnelle $\quad v_{max} = v_0 = x_0 \cdot \omega$

Druckamplitude $\quad p_0 = v_0 \cdot \rho \cdot c_s$

Energiefluss $\quad I = \frac{E}{A \cdot t} = \frac{1}{2} \frac{p_0^2}{\rho \cdot c_s} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_s \cdot v_0^2$

Lautstärke $\quad L = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right)$ dB $\quad \left(I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}\right)$

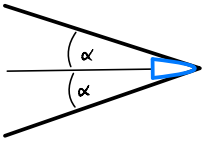
**Dopplereffekt**

bewegte Quelle $\quad f' = \frac{f}{1 - \frac{v_Q}{c_s}}$

bewegter Empfänger $\quad f' = f\left(1 + \frac{v_E}{c_s}\right)$

kombiniert $\quad f' = f \frac{1 + v_E/c_s}{1 - v_Q/c_s}$

Machzahl $\quad M_a = \frac{v_Q}{c_s} = \frac{1}{\sin\alpha}$



# Thermodynamik

$(0°C = 273{,}15\ K)$

## Grundbegriffe

Wärmeenergie $= E_{kin} + E_{rot} + E_{vib}$

**Wärmeänderung**

$\Delta Q = C \cdot \Delta T$ $(C$ = Wärmekapazität$)$

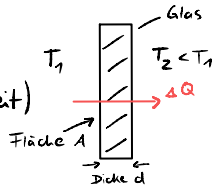
$c = \frac{C}{m} \Rightarrow \Delta Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ $(c$ = spez. Wärmekap.$)$

Thermisches Gleichgewicht: $T_1' = T_2'$

Mischtemp. $T_m = \frac{C_1 T_1 + C_2 T_2}{C_1 + C_2}$

**Wärmetransport**

Bsp. Fenster $\frac{dQ}{dt} = P = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d}$ $(\lambda$ = Wärmeleitfähigkeit$)$




**Therm. Ausdehnung**

$\Delta l = l - l_0 = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T$ $(\alpha$ = lin. Ausdehnungskoeff.$)$

$l(T) = l_0 + \Delta l = l_0 (1 + \alpha (T - T_0))$

$V(T) = V_0 + \Delta V = V_0 (1 + \gamma (T - T_0))$

---

## Ideales Gas

**Gasgleichung** $p \cdot V = N k_B T$ $(k_B$ = Boltzmann-Konst.$)$

**Innere Energie** $U = \frac{f}{2} N k_B T$ $(1$-atomiges Gas: $f = 3$, $2$-atomiges Gas: $f = 5)$

$\langle E_{kin} \rangle = \frac{3}{2} k_B T$ jeder Freiheitsgrad: $\langle E \rangle = \frac{1}{2} k_B T$

**Therm. Geschw.** $v_{th} = \sqrt{\frac{3 k_B T}{m}}$

**1. HS der TD** $\Delta U = \Delta Q + \Delta W$ $(\Delta W$ = Kompressionsarbeit$)$

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

**Zustandsänderungen**

isochor $\frac{T_1}{p_1} = \frac{T_2}{p_2}$ $C_V = \frac{f}{2} N k_B$

isobar $\frac{T_1}{V_1} = \frac{T_2}{V_2}$ $C_p = C_V + N k_B = \left(\frac{f}{2} + 1\right) N k_B$

isotherm $p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$ $\Delta Q = -\Delta W$

$\Delta W = -N k_B T \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$ (analog $\Delta Q$)

adiabatisch $\Delta W = C_V \cdot \Delta T$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\varkappa - 1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\varkappa - 1}{\varkappa}}$

# Entropie

Maß für Wahrsch. eines Makrozustands $Z$ mit $W$ Mikrozuständen:

$$S(Z) = k_B \cdot \ln(W) \qquad S_{ges} = S_1 + S_2 \quad \text{(additiv)}$$

Volumenvergrößerung $\Delta S = N \cdot k_B \cdot \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$

2. HS der TD im abgeschlossenen System: $\Delta S \geq 0$

$\Delta S = 0 \iff$ Prozess reversibel
$\Delta S > 0 \iff$ Prozess irreversibel

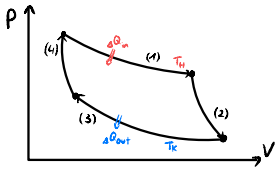
offenes System $\Delta S_1 + \Delta S_2 = 0 \iff$ reversibel $\Rightarrow \Delta S_{1/2} = \frac{\Delta Q_{1/2}}{T}$

isochor $\Delta S = C_V \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$

3. HS der TD $\lim_{T \to 0} S(T) = 0$ ($\Rightarrow 0°K$ unmögl.)

Wärmekraftmaschine Wirkungsgrad $\eta = \frac{-\Delta W}{\Delta Q_{in}}$ (max. bei $\eta_{rev}$)

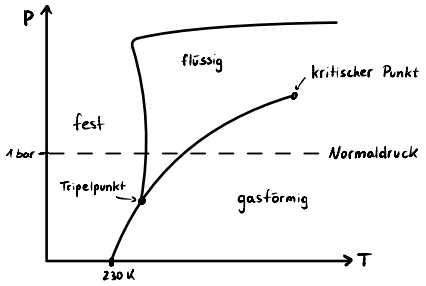
Carnot-Prozess $\eta = 1 - \frac{T_K}{T_H}$




---

## Phasenübergänge / -diagramme

Wasser




Energie $Q = m \cdot q_s$