

Formelsammlung in Physik

Inhaltsübersicht

1 Einheiten, Größenordnungen und Konstanten	2
2 Mechanik	4
2.1 Kinematik von Massenpunkten: Ort, Geschwindigkeit, Beschleunigung	4
2.2 Dynamik von Massenpunkten: Kraft, Impuls, Drehmoment, Drehimpuls	6
2.3 Hydrostatik: Druck, Dichte, Auftriebskraft	8
2.4 Hydrodynamik: Bernoulli, Hagen-Poiseuille, Viskosität	8
2.5 Mechanik des starren Körpers: Schwerpunktsatz, Trägheitsmoment, Elastizität	9
2.6 Arbeit, Energie, Leistung, Wirkungsgrad	10
2.7 Kepler'sche Gesetze	11
2.8 Analogie Translation - Rotation	11
3 Schwingungen: Harmonische, gedämpfte, erzwungene Schwingung, Pendel	12
4 Wellen: Stehende Welle, Eigenfrequenzen, Schwebung, Dopplereffekt	13
5 Optik: Brechung, Linsen, Beugung	15
6 Thermodynamik: Längenausdehnung, Wärme, Strahlung, Entropie, Gase	17
7 Elektromagnetismus	20
7.1 Elektrizität: Coulomb, \vec{E} -Feld, Spannung, Strom, Widerstand, Elektrolyse, Kapazität	20
7.2 Magnetismus: Magnetische Flussdichte, Lorentzkraft, Induktion, Spulen	23
7.3 Gleichstromkreise (DC): RC, RL, RLC Stromkreise	25
7.4 Wechselstromkreise (AC): R, L, C, Filter, Oszillatoren	26
8 Quantenphysik: De Broglie, Heisenberg, Photonenenergie, Bindungsenergie	28
9 Spezielle Relativitätstheorie: Inertialsysteme, Einstein	29
10 Kernphysik: Kernkraft, Bindungsenergie, Radioaktivität, Halbwertszeit	30
11 Tabellen	33

Griechisches Alphabet:

A α Alpha	H η Eta	N ν Nü	T τ Tau
B β Beta	Θ θ, ϑ Theta	Ξ ξ Xi	Y υ Ypsilon
Γ γ Gamma	I ι Iota	O \omicron Omikron	Φ ϕ, φ Phi
Δ δ Delta	K κ Kappa	Π π Pi	X χ Chi
E ϵ Epsilon	Λ λ Lambda	P ρ, ϱ Rho	Ψ ψ Psi
Z ζ Zeta	M μ Mü	Σ σ, ς Sigma	Ω ω Omega

1 Einheiten, Größenordnungen und Konstanten

SI-Basiseinheiten

Symbol	Bezeichnung	Einheit	
t, T	Zeit (time)	s	Sekunde
r, \vec{r}, x, s $\Delta x, \Delta y, \Delta z$	Länge, Ort, Strecke , Verschiebung	m	Meter
m	Masse (mass)	kg	Kilogramm
n	Stoffmenge	mol	Mol
I	Stromstärke (current)	A	Ampere
T, ϑ	Temperatur	K, °C	Kelvin, Grad Celsius
I_V	Lichtstärke	cd	Candela

Abgeleitete SI-Einheiten

v, \vec{v}, c	Geschwindigkeit (velocity)	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Meter pro Sekunde
p, \vec{p}	Impuls (momentum)	$\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Kilogramm · Meter pro Sekunde
a, \vec{a}, g	Beschleunigung (acceleration)	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Meter pro Quadratsekunde
F, \vec{F}	Kraft (Force)	$\text{N} = \text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Newton
A	Fläche (Area)	m^2	Quadratmeter
V	Volumen	m^3	Kubikmeter
p	Druck (pressure)	$\text{Pa} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$	Pascal
ρ	Dichte (density)	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Kilogramm pro Kubikmeter
W, E	Arbeit (Work), Energie	$\text{J} = \text{N m}$	Joule
$U, Q, \Delta Q$	Innere Energie, Wärme	$\text{J} = \text{N m}$	Joule
P	Leistung (Power)	$\text{W} = \frac{\text{J}}{\text{s}}$	Watt
f	Frequenz (frequency)	Hz	Hertz = Sekunde ⁻¹
$\omega, \vec{\omega}$	Winkelgeschwindigkeit	$\frac{1}{\text{s}}$	rad pro Sekunde
M, \vec{M}	Drehmoment (torque)	N m	Newton · Meter
L, \vec{L}	Drehimpuls (Drall)	$\text{kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Kilogramm · Quadratmeter pro Sekunde
J, I, Θ	Trägheitsmoment (Inertia)	kg m^2	Kilogramm · Quadratmeter
Q, q	Ladung (charge)	$\text{C} = \text{A s}$	Coulomb
U	Spannung (voltage)	$\text{V} = \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3 \text{A}}$	Volt
R	Widerstand (Resistance)	$\Omega = \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3 \text{A}^2}$	Ohm
C	Kapazität (Capacitance)	$\text{F} = \frac{\text{s}^4 \text{A}^2}{\text{kg m}^2}$	Farad
L	Induktivität (inductance)	$\text{H} = \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2 \text{A}^2}$	Henry
B	Magnetische Flussdichte	$\text{T} = \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \text{A}}$	Tesla

Größenordnungen, SI-Vorsätze

Bezeichnung	Symbol	Multiplikator	Bezeichnung	Symbol	Multiplikator
Tera	T	$\cdot 10^{12}$	Dezi	d	$\cdot 10^{-1} = \cdot 0.1$
Giga	G	$\cdot 10^9$	Centi	c	$\cdot 10^{-2} = \cdot 0.01$
Mega	M	$\cdot 10^6$	Milli	m	$\cdot 10^{-3} = \cdot 0.001$
Kilo	k	$\cdot 10^3 = \cdot 1000$	Mikro	μ	$\cdot 10^{-6}$
Hekto	h	$\cdot 10^2 = \cdot 100$	Nano	n	$\cdot 10^{-9}$
Deka	da	$\cdot 10^1 = \cdot 10$	Pico	p	$\cdot 10^{-12}$

Physikalische Konstanten

Konstante	Wert	Auf Seite...
Gravitationskonstante	$G = 6.674 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$	6
Lichtgeschwindigkeit	$c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$	13, 15, 29, 30
Fallbeschleunigung	$g = 9.8067 \text{ m s}^{-2}$	6, 37
Masse Elektron	$m_e = 9.1094 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	30
Masse Proton	$m_p = 1.6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	30
Masse Neutron	$m_n = 1.6748 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	30
Atommassen-Einheit	$u = 1.6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	22, 30
Elementarladung	$q_e = 1.6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	20, 22, 30
Magnetische Feldkonstante	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ V s A}^{-1} \text{ m}^{-1}$	13, 23
Elektrische Feldkonstante	$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} = 8.8542 \cdot 10^{-12} \text{ A s V}^{-1} \text{ m}^{-1}$	13, 20
Solarkonstante	$S = 1360 \text{ W m}^{-2}$	-
Hubblekonstante	$H_0 = 70.8 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$	-
Normdruck	$p_0 = 1.0133 \cdot 10^5 \text{ N m}^{-2} = 1.0133 \text{ bar}$	8, 19
Normtemperatur	$T_0 = 273.15 \text{ K} = 0^\circ \text{C}$	8, 19
Normvolumen ideales Gas	$V_0 = 22.4140 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$	8, 19
Boltzmann-Konstante	$k_B = 1.3807 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$	18
Avogadro-Konstante	$N_A = 6.0221 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	19, 22
Universelle Gaskonstante	$R = 8.3145 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	19
Planck'sches Wirkungsquantum	$h = 6.6261 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.0546 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$	28
Rydberg-Konstante	$Ry = 1.0968 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$	28
Bohr'scher Atomradius	$a_B = 5.2918 \cdot 10^{-11} \text{ m}$	28
Stefan-Boltzmann-Konstante	$\sigma = 5.6704 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$	18

Ableitungen

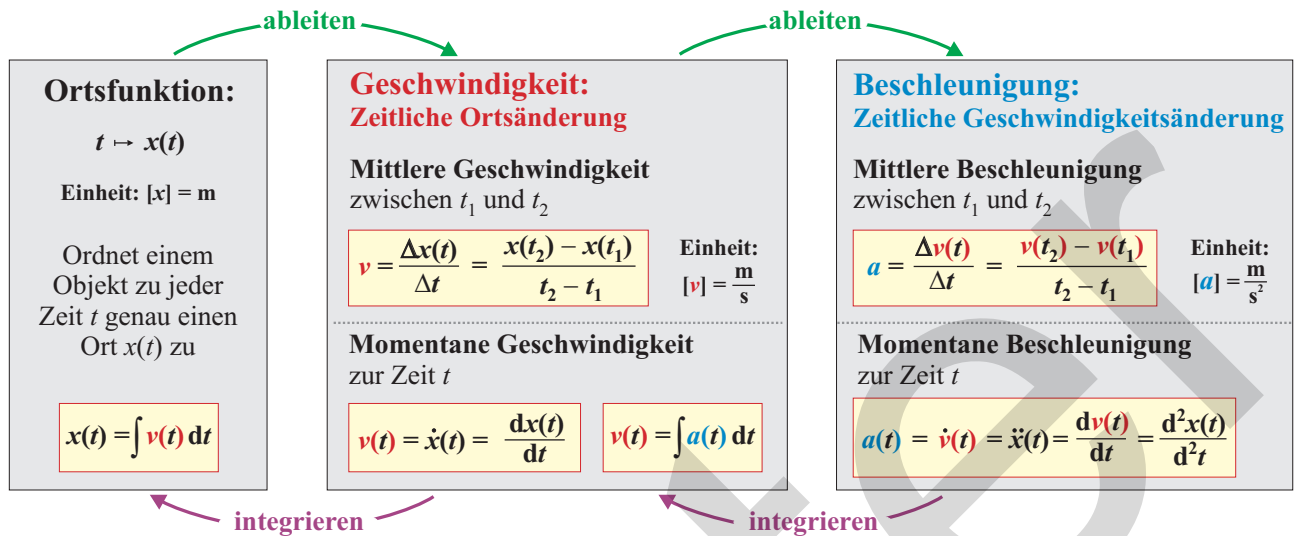
Ableitungen beschreiben wie sich eine physikalische Grösse in Abhängigkeit einer anderen **verändert**. Spezielle Bedeutung haben dabei Ableitungen nach der Zeit:

$v(t) = x'(t) = \frac{dx}{dt} = \dot{x}(t)$ In der Physik werden Ableitungen nach der Zeit mit einem **Punkt** notiert.

2 Mechanik

2.1 Kinematik von Massenpunkten

► Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung



Mehrdimensionale Bewegungen:

Ort:

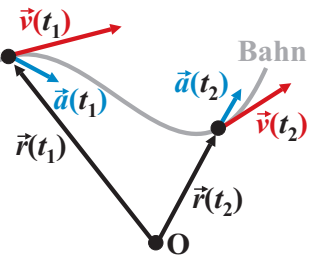
$$\vec{r}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix}$$

Geschwindigkeit:

$$\vec{v}(t) = \begin{pmatrix} v_x(t) \\ v_y(t) \\ v_z(t) \end{pmatrix}$$

Beschleunigung:

$$\vec{a}(t) = \begin{pmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \\ a_z(t) \end{pmatrix}$$



► Gleichförmige und gleichmäßig beschleunigte Bewegungen

Gleichförmige Bewegung		Gleichmäßig beschleunigte Bewegung	
Ort (Strecke): $x(t) = v \cdot t + x_0$			Ort (Strecke): $x(t) = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 + v_0 \cdot t + x_0$
Geschwindigkeit: $v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \text{konstant}$			Geschwindigkeit: $v(t) = a \cdot t + v_0$
Beschleunigung: $a = 0$			Beschleunigung: $a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \text{konstant}$

Spezielle Formeln der gleichmäßig beschleunigten Bewegung ($x_0 = 0$):

Ohne t : $x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$	Ohne a : $x(t) = \frac{1}{2} (v + v_0) t$	Speziell: $v_0 = 0$ (Bewegung aus Ruhelage) $x(t) = \frac{1}{2} a t^2$	$x = \frac{v^2}{2a}$	$x(t) = \frac{1}{2} v t$
--------------------------------------------	------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------	----------------------	--------------------------

► Galileo Galilei

- Auf der Erde fallen alle Körper „gleich schnell“, sofern vom Luftwiderstand abgesehen wird: Die Fallbeschleunigung (= Ortsfaktor) auf der Erdoberfläche beträgt $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$.
- Die Orte verhalten sich wie die Quadrate der Zeiten: $x \propto t^2$, genauer: $x(t) = \frac{1}{2} g t^2$.

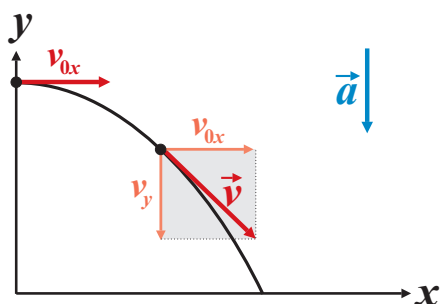
► Wurfbewegungen

Bewegungen in x und y -Richtung sind voneinander unabhängig (über die Zeit t gekoppelt).

Beschleunigung: $\vec{a} = \begin{pmatrix} 0 \\ -g \end{pmatrix}$

- Gleichförmige Bewegung in x -Richtung und
- Gleichmäßig beschleunigte Bewegung in y -Richtung.

Horizontaler Wurf



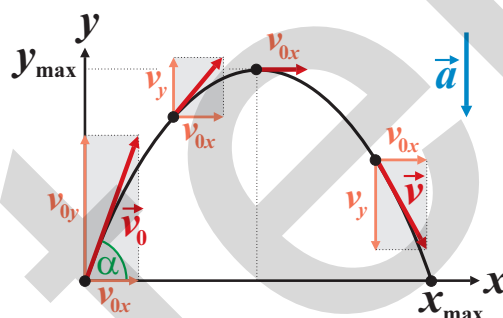
$$\vec{r}(t) = \begin{pmatrix} v_{0x} \cdot t \\ -\frac{1}{2} g \cdot t^2 \end{pmatrix}$$

$$\vec{v}(t) = \begin{pmatrix} v_{0x} \\ -g \cdot t \end{pmatrix}$$

$$y(x) = \frac{-g}{2 v_{0x}^2} \cdot x^2$$

Ort

Schiefer Wurf



$$\vec{r}(t) = \begin{pmatrix} v_0 \cdot \cos(\alpha) \cdot t \\ v_0 \cdot \sin(\alpha) \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2 \end{pmatrix}$$

$$\vec{v}(t) = \begin{pmatrix} v_0 \cdot \cos(\alpha) \\ v_0 \cdot \sin(\alpha) - g \cdot t \end{pmatrix}$$

$$y(x) = \tan(\alpha) \cdot x - \frac{g}{2 v_0^2 \cdot \cos^2(\alpha)} \cdot x^2$$

$$y_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2(\alpha)}{2g}, \quad x_{\max} = \frac{v_0^2 \sin(2\alpha)}{g}$$

Geschwindigkeit

Wurfparabel

► Kreisbewegung: Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung

- **Periodendauer T** : Zeit für eine Umdrehung.
- **Frequenz f** : Anzahl Umdrehungen pro Zeiteinheit: $f = \frac{1}{T}$ Einheit: 1 Hertz = 1 Hz = $\frac{1}{s}$

- **Winkelgeschwindigkeit ω** :

$$\omega = \frac{\text{Winkel (Bogenmass!)}}{\text{Zeit}}$$

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f$$

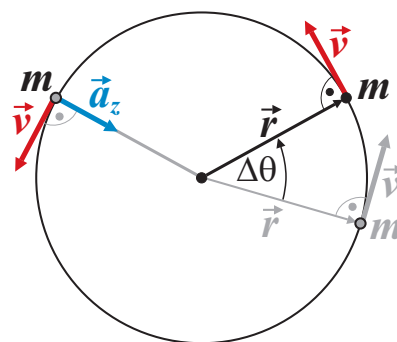
- **Bahngeschwindigkeit v** :

$$v = \frac{\text{Weg (Kreisumfang)}}{\text{Zeit (Periodendauer)}}$$

$$v = \frac{2\pi \cdot r}{T} = \omega \cdot r$$

- **Zentralbeschleunigung**: $a_z = \frac{v^2}{r} = r \cdot \omega^2$ $a_z \perp \vec{v}$,

$\Rightarrow a_z$ wirkt ausschliesslich ablenkend: $|v| = \text{konstant}$.

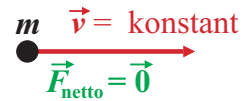


2.2 Dynamik von Massenpunkten

► Newton'sche Axiome

1. Trägheitsprinzip:

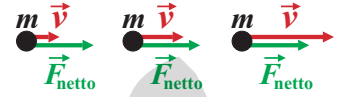
$$\vec{F}_{\text{netto}} = \sum \vec{F}_i = \vec{0} \Leftrightarrow \vec{v} = \text{konstant} \Leftrightarrow \vec{a} = \vec{0}$$



2. Bewegungsgleichung (Aktionsprinzip):

$$\text{Netto Kraft} = \text{Masse} \cdot \text{Beschleunigung} \quad \text{kurz:}$$

$$\vec{F}_{\text{netto}} = m \cdot \vec{a} \quad \text{Einheit: } [F] = 1 \text{ Newton} = 1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$



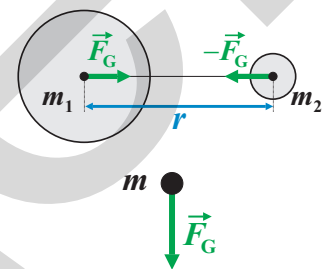
3. Wechselwirkungsprinzip: Kraft = Gegenkraft



► Mechanische Kräfte \vec{F}

- **Gravitationskraft:** $F_G = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$ Planetenmassen siehe S. 37.

$$G = 6.674 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2} : \text{Gravitationskonstante.}$$



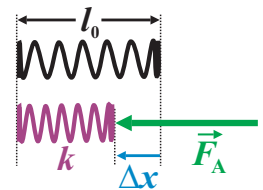
- **Gewichtskraft:** $F_G = m \cdot g$

$$g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} : \text{Fallbeschleunigung (Ortsfaktor) auf der Erde.}$$

- **Spannkraft auf eine Feder:** $F_A = k \cdot \Delta x$

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta x} = \frac{F_A}{l - l_0} : \text{Federkonstante. Einheit: } [k] = \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

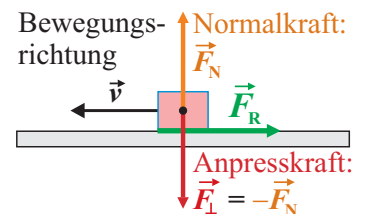
$$\text{Federn in Serie: } \frac{1}{k_{\text{tot}}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad \text{Parallel: } k_{\text{tot}} = k_1 + k_2$$



- **Reibungskraft:** $F_R = \mu \cdot F_{\perp}$

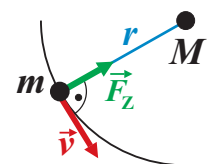
F_{\perp} : Anpresskraft, Normalkraft senkrecht zur Reibfläche.

$$\mu = \begin{cases} \mu_H : \text{Haftreibungskoeffizient} & \mu_H > \mu_G > \mu_R \\ \mu_G : \text{Gleitreibungskoeffizient} & \\ \mu_R : \text{Rollreibungskoeffizient} & \Rightarrow \text{Tabelle S. 34.} \end{cases}$$



- **Zentripetalkraft:** $F_Z = m \cdot \frac{v^2}{r} = m \cdot r \cdot \omega^2 = \frac{4\pi^2 \cdot m \cdot r}{T^2}$

Kraft, um einen Körper auf einer Kreisbahn zu halten.



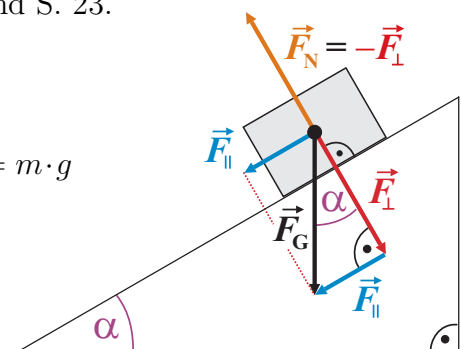
- **Auftriebskraft:** S. 8; **Reibung in Fluiden:** S. 9;
Elektrische und magnetische Kräfte: S. 20 und S. 23.

► Geneigte Ebene (Schiefe Ebene)

- **Gewichtskraft:** $\vec{F}_G = \vec{F}_{\perp} + \vec{F}_{\parallel}$, wobei $|\vec{F}_G| = F_G = m \cdot g$

- **Senkrechtkomponente:** $F_{\perp} = F_G \cdot \cos(\alpha)$

- **Parallelkomponente:** $F_{\parallel} = F_G \cdot \sin(\alpha)$



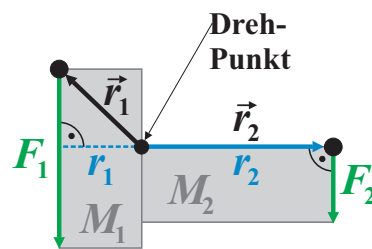
► **Drehmoment \vec{M} :** Kraft · Hebelarm, $M = r \cdot F$

Allgemein: $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$ Einheit: $[M] = \text{N} \cdot \text{m}$

Drehmoment ist Ursache für Drehbewegung: $M = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$

Hebelgesetz: $F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$

„Kraft · Kraftarm = Last · Lastarm.“



► **Gleichgewicht:** Die Summe aller $\left\{ \begin{array}{l} \text{Kräfte} \quad \vec{F}_{\text{netto}} = \sum \vec{F}_i = \vec{0} \\ \text{Drehmomente} \quad \vec{M}_{\text{netto}} = \sum \vec{M}_i = \vec{0} \end{array} \right\}$ ist Null.

► **Impuls \vec{p} :** Masse · Geschwindigkeit: $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$

Einheit: $[p] = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Der Gesamtimpuls ist eine Erhaltungsgröße: $\left\{ \begin{array}{l} \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{0} \\ \Leftrightarrow \vec{p}_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i = \text{konstant.} \end{array} \right.$



► **Drehimpuls \vec{L} (Drall)** $\vec{L} = m \cdot \vec{r} \times \vec{v}$

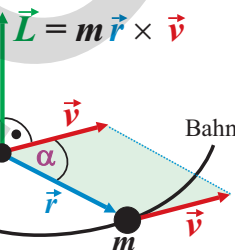
$|\vec{L}| = m \cdot r \cdot v \cdot \sin(\alpha)$ Einheit: $[L] = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

\vec{L} ist eine Erhaltungsgröße: $\vec{M}_{\text{ext}} = \vec{0} \Leftrightarrow \vec{L} = \text{konstant.}$

Drallsatz: Drehmoment = zeitliche Drehimpulsänderung:

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt} = \dot{\vec{L}}(t) \approx \frac{\Delta \vec{L}}{\Delta t}$$

Für starre Körper: $L = J \cdot \omega$ Trägheitsmoment J siehe S. 9.



► **Verallgemeinerung von $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$**

Kraft = zeitliche Impulsänderung: $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \dot{\vec{p}}(t) \approx \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$

$\vec{F} = m(t) \cdot \vec{a} + \dot{m}(t) \cdot \vec{v}$ (Produktregel), bei zeitabhängigen Massen (Rakete).

► **Stossprozesse**

Vollständig elastischer Stoß	Teilelastischer Stoß	Vollständig inelastischer Stoß
Impulserh.: $\vec{p}_{\text{tot}}^{\text{I}} = \vec{p}_{\text{tot}}^{\text{II}}$	$\vec{p}_{\text{tot}}^{\text{I}} = \vec{p}_{\text{tot}}^{\text{II}}$	$\vec{p}_{\text{tot}}^{\text{I}} = \vec{p}_{\text{tot}}^{\text{II}}$
Energieerh.: $E_{\text{kin}}^{\text{I}} = E_{\text{kin}}^{\text{II}}$	keine E -Erhaltung	$E_{\text{kin}}^{\text{I}} - E_{\text{kin}}^{\text{II}} = \frac{m_1 m_2 (v_1 - v_2)^2}{2(m_1 + m_2)}$

2.3 Hydrostatik, Druck, Dichte

► **Dichte ρ :** Masse pro Volumen $\rho = \frac{m}{V}$ Einheit: $[\rho] = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ Tabelle S. 33 ff.

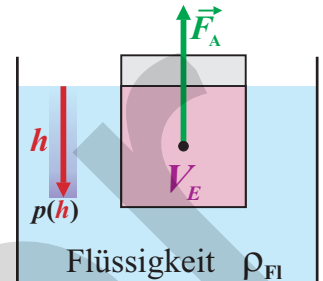
► **Druck p :** Kraft pro Fläche $p = \frac{F}{A}$ Einheit: $[p] = 1 \text{ Pascal} = 1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$,
1 bar = 10^5 Pa.

• **Hydrostatischer Druck:** Druck einer Flüssigkeits- oder Gas-Säule der Höhe h : $p(h) = \rho_{\text{Fl}} \cdot g \cdot h$ (falls ρ_{Fl} konstant).

• **Auftriebskraft:** Satz von Archimedes:

Auftriebskraft = Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit:

$$F_A = \rho_{\text{Fl}} \cdot g \cdot V_E \quad V_E : \text{Eingetauchtes Volumen.}$$

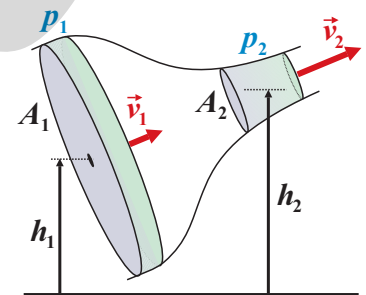


• **Barometerformel:** Luftdruck als Funktion der Höhe h über Meer: $p(h) = p_0 \cdot e^{-\frac{\rho_0}{p_0} g h}$

wobei $\left\{ \begin{array}{l} p_0 = 1.013 \cdot 10^5 \text{ Pa} : \text{Luftdruck} \\ \rho_0 = 1.293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} : \text{Luftdichte} \end{array} \right\}$ auf Meereshöhe ($T_0 = 0^\circ\text{C}$) bezeichnen (Normbedingungen).

2.4 Hydrodynamik

► **Kontinuitätsgleichung:** $\rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2$
„einfließende Masse pro Zeit = ausfließende Masse pro Zeit.“



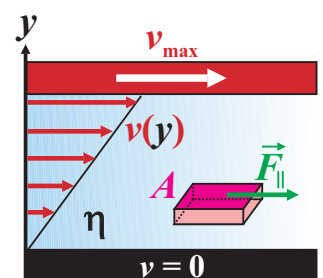
► **Gesetz von Bernoulli:** $p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h = \text{konst.}$

$$\text{oder: } p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2$$

► **Schubspannung τ und Viskosität η :**

$$\tau = \frac{\Delta F_{\parallel}}{\Delta A} = \eta \cdot \frac{\Delta v}{\Delta y} \quad \text{Einheit } [\tau] = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (\text{vgl. S. 10})$$

η : Viskosität (Zähigkeit), Einheit: $[\eta] = \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$, Tabelle S. 33.



► **Gesetz von Hagen-Poiseuille:**

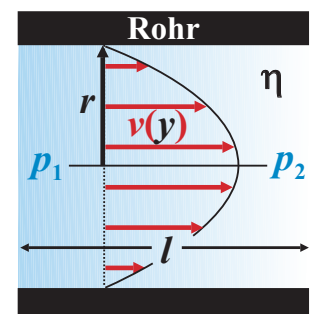
Mittlere Strömungsgeschwindigkeit \bar{v} in einem zylindrischen

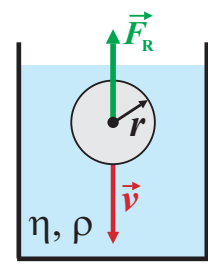
Rohr vom Radius r und einer Druckdifferenz pro Länge

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{p_2 - p_1}{l} : \quad \bar{v} = \frac{\Delta p}{l} \cdot \frac{r^2}{8 \cdot \eta}$$

Flussvolumen ΔV durch eine Querschnittsfläche pro Zeit Δt :

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \pi \cdot \frac{\Delta p}{l} \cdot \frac{r^4}{8 \cdot \eta}$$





► **Gesetz von Stokes:**

Reibungskraft bei laminarer Strömung (v klein, keine Wirbel)

$$F_R = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v \quad \eta : \text{Viskosität, vgl. S. 8, Tabelle S. 33.}$$

► **Fahrwiderstand bei turbulenter Strömung:**

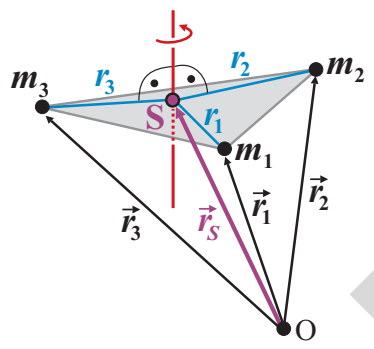
Reibungskraft bei turbulenter Strömung (Wirbelbildung, Turbulenzen, v gross)

$$F_R = \frac{1}{2} \cdot c_W \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 \quad \text{mit: } \begin{cases} A & : \text{Angeströmte Fläche} \\ \rho & : \text{Dichte der Flüssigkeit (oder des Gases)} \\ c_W & : \text{Widerstandszahl, abhängig von der Form von } A. \end{cases}$$

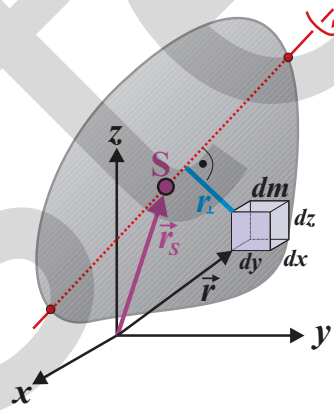
2.5 Mechanik des starren Körpers

► **Schwerpunktsatz:** Ein starrer Körper verhält sich so, als ob alle äusseren Kräfte im **Schwerpunkt S** (Massenmittelpunkt) angreifen würden.

n Massenpunkte



kontinuierlicher Körper



$$\vec{r}_S = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2 + \dots + m_n \vec{r}_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} = \frac{1}{m_{\text{tot}}} \sum_{k=1}^n m_k \cdot \vec{r}_k$$

$$\vec{r}_S = \frac{1}{m_{\text{tot}}} \int \vec{r} \cdot dm$$

► **Trägheitsmoment J:** Das Trägheitsmoment J ist ein Mass dafür, *wiev*iel Masse sich *wiew*eit von der **Drehachse** entfernt befindet.

$$J = \sum_{k=1}^n m_k \cdot r_k^2 \quad \text{Einheit: } [J] = \text{kg} \cdot \text{m}^2.$$

r_k bezeichnet den **senkrechten Abstand** des Massenpunktes m_k von der **Drehachse**.

$$J = \int r_{\perp}^2 \cdot dm = \int r_{\perp}^2 \cdot \rho dV$$

Massenelement $dm = \rho dV = \rho dx dy dz$ am Ort \vec{r} , im **senkrechten Abstand** r_{\perp} von der **Drehachse**.

Trägheitsmomente J spezieller Körper:

Quader	Zylinder	Hohlzylinder	Kugel	Satz v. Steiner
$\frac{1}{12} m (a^2 + b^2)$	$\frac{1}{2} m r^2 \quad m (\frac{r^2}{4} + \frac{h^2}{12})$	$\frac{1}{2} m (r_1^2 + r_2^2)$	$\frac{2}{5} m r^2$	$J_A = J_S + m \cdot a^2$

► Elastizität fester Körper

- **Zugspannung:** Kraft pro Fläche (wie Druck!) $\sigma = \frac{\Delta F_N}{\Delta A} = -p$ Einheit: $[\sigma] = \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

- **Hooke'sches Gesetz:** Deformation $\Delta l = l - l_0$ ist proportional zur Zugspannung: $\frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E}$

E : Elastizitätsmodul, Einheit $[E] = \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$, Tabelle S. 33.

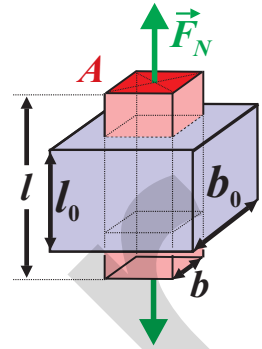
- **Querkontraktion:** Ein um $\Delta l > 0$ ausgedehnter Körper wird um $\Delta b = b - b_0 < 0$ dünner: $\frac{\Delta b}{b} = -\mu \cdot \frac{\Delta l}{l}$

μ : Poissonsche Zahl, Tabelle S. 33.

- **Volumenelastizität (Kompression):** Volumenverkleinerung ist proportional zur Zugspannung: $\frac{\Delta V}{V} = \frac{\sigma}{K}$ K : Kompressionsmodul, Einheit: $[K] = \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

Zwischen E , μ (\Rightarrow Tabelle S. 33) und K besteht der Zusammenhang $K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}$

- **Energiedichte:** Energie pro Volumen $w = \frac{\sigma^2}{2 \cdot E}$



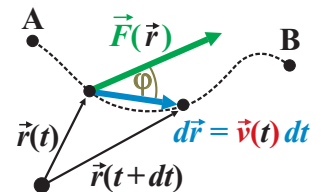
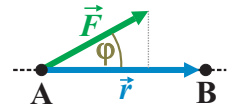
2.6 Arbeit, Energie, Leistung

- **Definition:** Arbeit = Kraft \cdot Weg: $W = \vec{F} \cdot \vec{r} = |\vec{F}| \cdot |\vec{r}| \cdot \cos(\varphi)$

Einheit: $[W] = 1 \text{ Joule} = 1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$ (Skalarprodukt).

- **Verallgemeinerung:** $W_{A \rightarrow B} = \int_{r_A}^{r_B} \vec{F}(\vec{r}(t)) \cdot d\vec{r}$ (krummlinige Bahnen)

- **Energie:** „gespeicherte“ Arbeit, Fähigkeit Arbeit zu verrichten.



► Mechanische Arbeit, Energie:

- **Hubarbeit, potentielle Energie:** $W_{\text{hub}} = E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$

h : vertikale Höhe.

- **Beschleunigungsarbeit, Kinetische Energie:** $W_{\text{besch}} = E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$

v : Geschwindigkeit.

- **Spannarbeit einer Feder:** $E_{\text{spann}} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2$ $k = \frac{\Delta F}{\Delta x}$: Federkonstante (S. 6).
 x : Auslenkung der Feder.

- **Rotationsenergie:** $E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$ ω : Winkelgeschwindigkeit (S. 5).
 J : Trägheitsmoment (S. 9).

- **Gravitationsenergie:** $E_{A \rightarrow B} = \int_{r_A}^{r_B} F_G(r) dr = G \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right)$ (S. 6)

Arbeit, um m_1 vom Ort A ($= r_A$) zum Ort B (r_B) zu bringen (r = Abstand m_1 zu m_2).

► **Energieerhaltung:** Die Gesamtenergie eines abgeschlossenen Systems bleibt erhalten:

$$E_{\text{tot}} = \text{konstant} \Leftrightarrow \frac{dE_{\text{tot}}}{dt} = \dot{E}_{\text{tot}} = 0$$

Bei mechanischen Systemen ohne Reibung: $E_{\text{tot}} = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}} + E_{\text{spann}} + E_{\text{rot}} = \text{konstant}$

► **Leistung P:** Arbeit pro Zeit: $P = \frac{W}{t}$ Einheit: $[P] = 1 \text{ Watt} = 1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}}$.

Falls **Kraft** \vec{F} und **Geschwindigkeit** \vec{v} konstant sind, gilt: $P = \vec{F} \cdot \vec{v}$ Elektrische Leistung: S. 20.

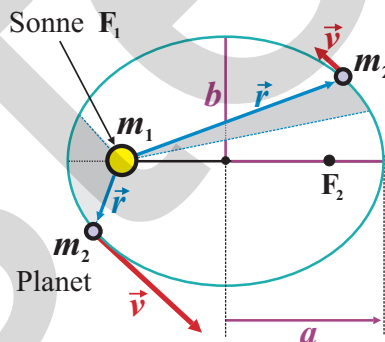
► **Wirkungsgrad η** = $\frac{\text{genutzte Energie (bzw. Leistung)}}{\text{zugeführte Energie (bzw. Leistung)}}$ $\eta = \frac{E_{\text{Nutz}}}{E_{\text{Zu}}} = \frac{P_{\text{Nutz}}}{P_{\text{Zu}}}$

2.7 Kepler'sche Gesetze

I Die Planeten beschreiben **ellipsenförmige** Bahnen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.

II Der **Radiusvektor** \vec{r} überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen: $\Leftrightarrow \vec{L} = m \cdot \vec{r} \times \vec{v} = \text{konstant}$.

III Die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich wie die Kuben der **grossen Ellipsenhalbachsen**: $\frac{T_1^2}{a_1^3} = \frac{T_2^2}{a_2^3}$ Kreisbahn: $a \approx r$.



⇒ Astronomische Daten siehe S. 37.

2.8 Analogie Translation - Rotation

Translation		Rotation
$x(t)$	Ort / Auslenkwinkel	$\theta(t)$
$v(t)$	Geschwindigkeit / Winkelgeschw.	$\omega(t)$
$a(t)$	Beschleunigung / Winkelbeschl.	$\alpha(t) = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$
m	Masse / Trägheitsmoment	J
$F(t) = m \cdot a(t)$	Kraft / Drehmoment	$M(t) = J \cdot \alpha(t)$
$p(t) = m \cdot v(t)$	Impuls / Drehimpuls	$L(t) = J \cdot \omega(t)$
$W_{\text{trans}} = F \cdot r \cdot \cos(\varphi)$	Arbeit	$W_{\text{rot}} = M \cdot \theta \cdot \cos(\varphi)$
$E_{\text{trans}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$	Energie	$E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$
$P_{\text{trans}} = F \cdot v \cdot \cos(\varphi)$	Leistung	$P_{\text{rot}} = M \cdot \omega \cdot \cos(\varphi)$

3 Schwingungen

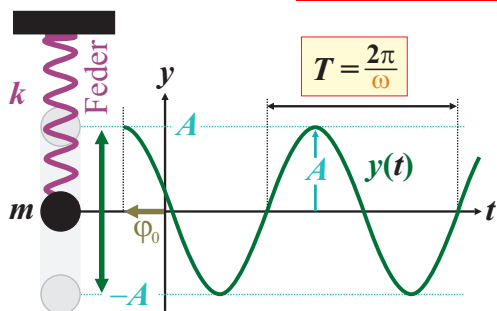
Schwingung: Zeitlich periodischer Vorgang.

- **Harmonische Schwingung, Pendel:** $\left\{ \begin{array}{l} \text{Rücktreibende Kraft } F_{\text{Rück}} \text{ ist} \\ \text{proportional zur Auslenkung } y. \end{array} \right.$

Auslenkung: $y(t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$

Geschwindigkeit: $v(t) = \dot{y}(t) = -A \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$

Beschleunigung: $a(t) = \ddot{y}(t) = -A \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0) = -\omega^2 \cdot y(t)$



A : Amplitude (max. Auslenkung)

φ_0 : Nullphasenwinkel

ω : Winkelgeschwindigkeit:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f \quad (\text{vgl. S. 5})$$

T : Periodendauer, f : Frequenz.

Federpendel	$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$	Winkelgeschwindigkeit	$\omega \approx \sqrt{\frac{g}{l}}$	Fadenpendel
	$F_{\text{Rück}} = -k \cdot y$	Kraftgesetz	$F_{\text{Rück}} \approx -\frac{mg}{l} \cdot y$	
	$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{k}{m} \cdot y = 0$	Differentialgleichung	$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{g}{l} \cdot y \approx 0$	$y(t) = l \cdot \alpha(t)$

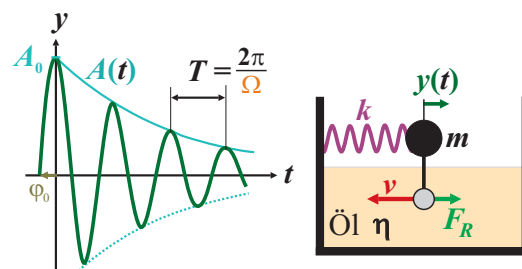
- **Gedämpfte harmonische Schwingung:**

Gilt Reibungskraft $F_R \sim v(t)$ also $F_R = -b \cdot v$

Dann: $y(t) = A(t) \cdot \cos(\Omega \cdot t + \varphi_0)$ wobei

- Zeitabhängige Amplitude: $A(t) = A_0 \cdot e^{-\frac{b}{2m} \cdot t}$

- Winkelgeschwindigkeit: $\Omega = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{b}{2m}\right)^2}$



- **Erzwungene Schwingung:**

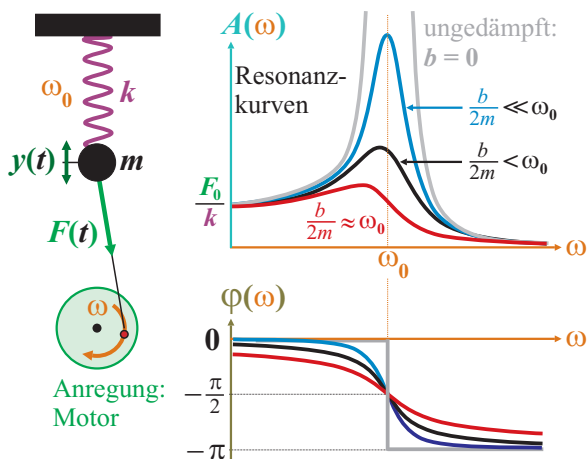
Ein gedämpfter Oszillator werde mit der Kraft $F(t) = F_0 \cdot \cos(\omega t)$ angeregt. Nach dem Einschwingvorgang gilt für die Auslenkung:

$$y(t) = A(\omega) \cdot \cos(\omega t + \varphi(\omega)) \quad \text{wobei}$$

- Amplitude: $A(\omega) = \frac{F_0}{m \cdot \sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \left(\frac{\omega b}{m}\right)^2}}$

- Nullphasenwinkel: $\varphi(\omega) = \arctan\left(\frac{\omega_0^2 - \omega^2}{\frac{\omega b}{m}}\right)$

- Q-Faktor: $Q = \frac{m \cdot \omega_0}{b}$



4 Wellen

Als **Welle** wird die räumliche Ausbreitung einer Schwingung bezeichnet. Dabei wird Energie, aber keine Masse transportiert. Speziell:

► **Harmonische Welle:** Zeitlich und räumlich periodischer Vorgang. Wellengleichung:

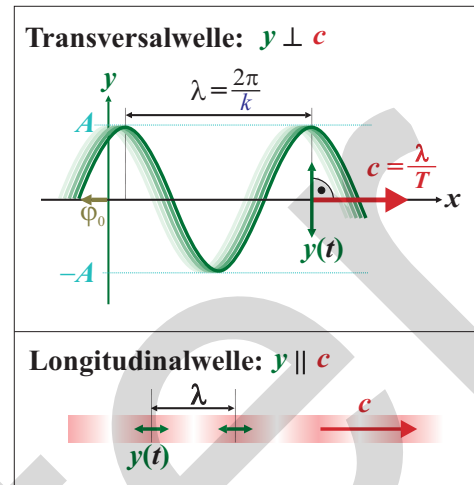
$$y(x, t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t \pm k \cdot x + \varphi_0)$$

$$y(x, t) = A \cdot \sin\left(2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} \pm \frac{x}{\lambda}\right) + \varphi_0\right)$$

„+“ = Nach links (in $-x$ Richtung) laufende Welle.
 „-“ = Nach rechts (in $+x$ Richtung) laufende Welle.

• **Wellenzahl:** $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ Einheit: $[k] = \text{m}^{-1}$
 wobei λ : Wellenlänge in m (räumliche Periode).

• **Winkelgeschwindigkeit:** $\omega = \frac{2\pi}{T}$ $[\omega] = \text{s}^{-1}$
 wobei T : Periodendauer in s (zeitliche Periode).



► **Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen:** $c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f = \frac{\omega}{k}$ Tabelle auf S. 33.

• **Druck- und Schallwellen**

Gas: $c = \sqrt{\frac{C_p}{C_v} \frac{RT}{M}}$

Symbole auf S. 17
 Luft 20 °C: $c = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Flüssigkeit: $c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$

K : Kompressionsmodul
 ρ : Dichte, S. 8

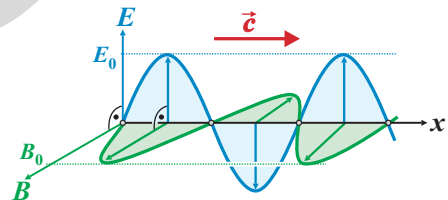
Festkörper: $c = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}$

σ : Zugspannung, S. 10
 ρ : Dichte, S. 8

• **Elektromagnetische Welle:**

$$c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}$$

Speziell: Vakuum (Luft):
 $\epsilon_r = 1$ und $\mu_r = 1$
 $c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

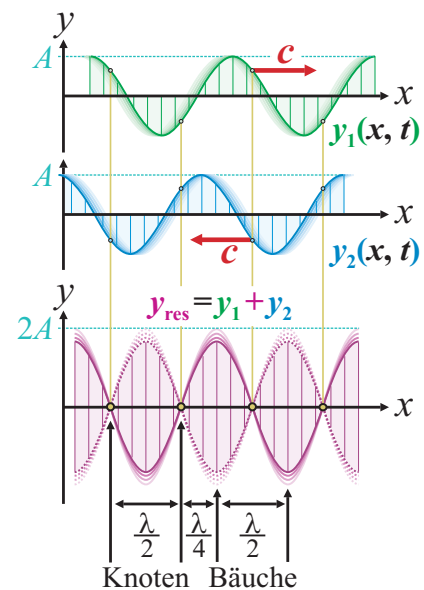
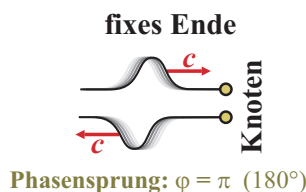
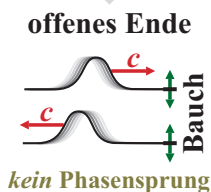


► **Stehende Welle:** Überlagerung zweier identischer Wellen mit entgegengesetzter Ausbreitungsrichtung:

$$y_{\text{res}}(x, t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x) + A \cdot \sin(\omega \cdot t + k \cdot x)$$

$$y_{\text{res}}(x, t) = \underbrace{2A \cdot \cos(k \cdot x)}_{\text{ortsabh. Ampl. } A(x)} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

• **Reflexion von Wellen:**



► **Eigenfrequenzen (Bedingung für stehende Welle):**

• Saite: $f_n = \frac{n}{2L} \cdot c$ $L = n \cdot \frac{\lambda}{2}$

Ordnung: $n = 1, 2, 3, \dots$

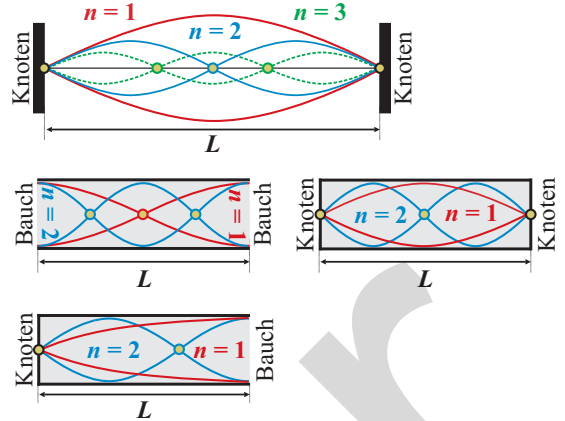
Grundschiwingung: $n = 1$

• offenes oder geschlossenes Rohr:

$f_n = \frac{c}{2L} \cdot n$ $L = n \cdot \frac{\lambda}{2}$ $n = 1, 2, 3, \dots$

• einseitig offenes Rohr:

$f_n = \frac{c}{4L} \cdot (2n - 1)$ $L = (2n - 1) \cdot \frac{\lambda}{4}$



► **Schwebung:** Überlagerung zweier Schwingungen ähnlicher Frequenzen f_1 und $f_2 = f_1 + \Delta f$.

• Resultierende Schwingung:

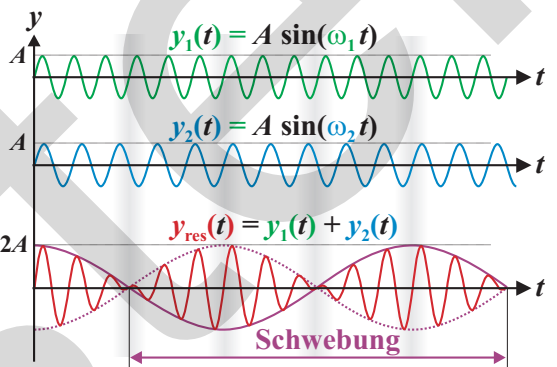
$y_{res}(t) = A \cdot \sin(\omega_1 t) + A \cdot \sin(\omega_2 t)$

$y_{res}(t) = 2A \cdot \sin\left(\left(\omega_1 + \frac{\Delta\omega}{2}\right)t\right) \cdot \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t\right)$

• Schwebungsfrequenz: $f_S = \frac{\Delta f}{2} = \frac{|f_2 - f_1|}{2}$

Hörbare Frequenz der Lautstärkeänderung:

$f_S = \Delta f = |f_2 - f_1|$



► **Dopplereffekt:**

$f_B = f_Q \cdot \frac{c \pm v_B}{c \mp v_Q}$

c : Geschwindigkeit der Welle.

v_Q : Geschwindigkeit Schallquelle.

v_B : Geschwindigkeit Beobachter.

f_Q : Frequenz Schallquelle.

f_B : Frequenz Beobachter.

<p>$f_B = f_Q \cdot \frac{c + v_B}{c}$</p>	<p>$f_B = f_Q \cdot \frac{c}{c - v_Q}$</p>
<p>$f_B = f_Q \cdot \frac{c - v_B}{c}$</p>	<p>$f_B = f_Q \cdot \frac{c}{c + v_Q}$</p>

► **Schallintensität I und Schallpegel L :**

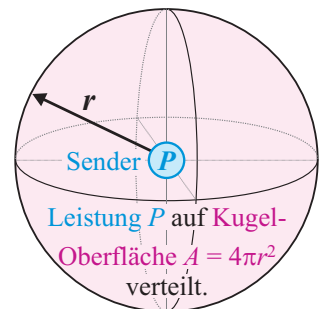
• **Schallintensität:** Für einen Sender der Leistung P einer Kugelwelle gilt für die Intensität $I(r)$ in Abhängigkeit vom Abstand r :

$I(r) = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r^2}$ Einheit: $[I] = \frac{W}{m^2}$

• **Schallintensitätspegel:**

$L = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$ Angabe in Dezibel (dB)
(für 1kHz-Sinuston)

Hörschwelle:
 $I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$



5 Optik

Licht kann als Teilchen (Photonen) oder als elektromagnetische Welle betrachtet werden. Im Vakuum (Luft) breitet sich Licht stets mit der **Lichtgeschwindigkeit** $c_0 \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ aus.

► **Brechungsindex:** $n = \frac{c_0}{c_M}$, wobei c_M die Lichtgeschwindigkeit im Material M ist.

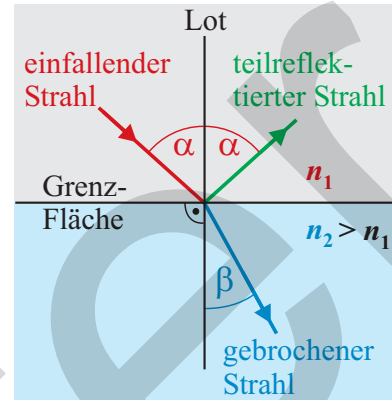
► **Brechungsgesetz (Snellius):** $\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c_1}{c_2}$

Brechungsindices siehe Tabelle S. 36.

• **Totalreflexion:** $\beta = \beta_{\max} = 90^\circ$

• **Brewsterwinkel:** $\tan(\alpha_B) = \frac{n_2}{n_1}$

Reflektierter und gebrochener Strahl stehen senkrecht aufeinander. Dann ist das Licht des reflektierten Strahls vollständig polarisiert.



► **Abbildungen mit Linsen:**

• **Brennweite f:** $\frac{1}{f} = (n - 1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$

Sammellinse (Konvexlinse): $f > 0$.
Streulinse (Konkavlinse): $f < 0$.

• **Dioptrie D:** $D = \frac{1}{f}$

Einheit: $[D] = \frac{1}{m} = \text{dpt}$ Dioptrie.

• **Hohlspiegel:** $f \approx \frac{R}{2}$

• **Parallel einfallende Strahlen** schneiden sich im Brennpunkt **F** (Focus).

• **Zentral einfallende Strahlen** werden nicht abgelenkt.

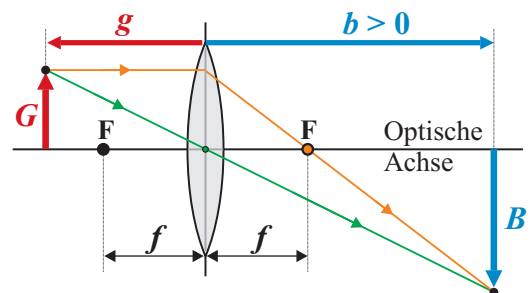
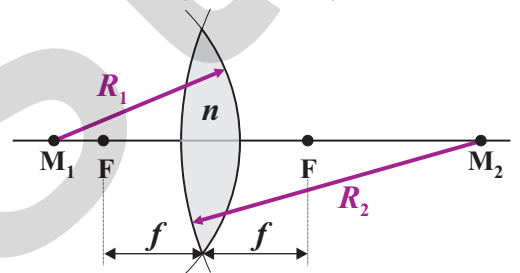
• **Linsegleichung, Abbildungsgleichung:**

$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g}$ $\left\{ \begin{array}{l} g : \text{Gegenstandsweite} \\ b : \text{Bildweite} \end{array} \right.$
reelles Bild: $b > 0$ virtuelles Bild: $b < 0$.

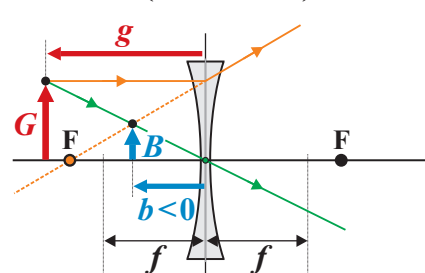
• **Abbildungsmaßstab, Vergrößerung:**

$A = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}$ $\left\{ \begin{array}{l} G : \text{Gegenstandshöhe} \\ B : \text{Bildhöhe} \end{array} \right.$

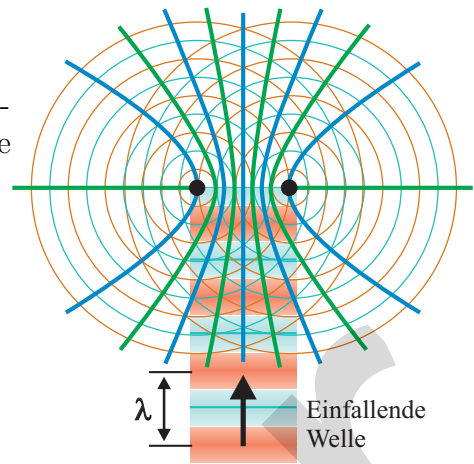
Sammellinse (Konvexlinse)



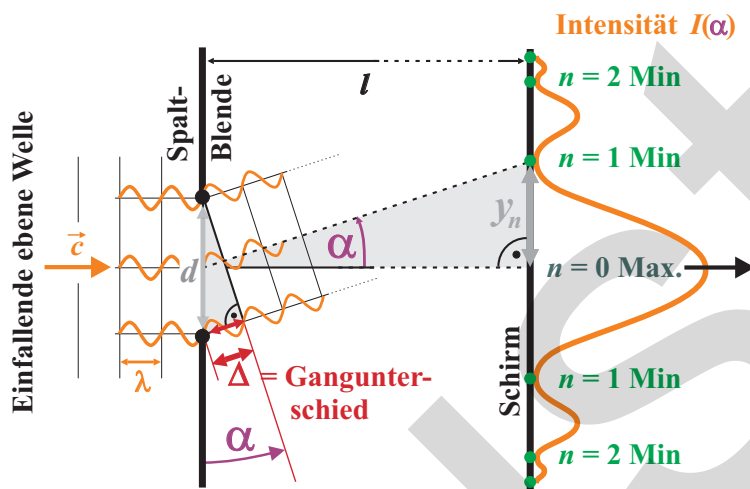
Streulinse (Konkavlinse)



- ▶ **Huygens'sches Prinzip:** Jeder Punkt einer Wellenfront kann als Ausgangspunkt einer Elementarwelle (Kreis- oder Kugelwelle) betrachtet werden. Die Lage einer neuen Wellenfront ergibt sich als Überlagerung sämtlicher Elementarwellen.
- ▶ **Beugung:** Ablenkung von Wellen (Licht- Wasser- oder Schallwellen) an einem Hindernis: Eindringen von Wellen in den geometrischen Schattenraum von Hindernissen.



- **Beugung am Spalt:**



Bedingung für **Minima**:

$$\Delta = d \cdot \sin(\alpha) = n \cdot \lambda$$

Ordnung: $n = 1, 2, \dots$

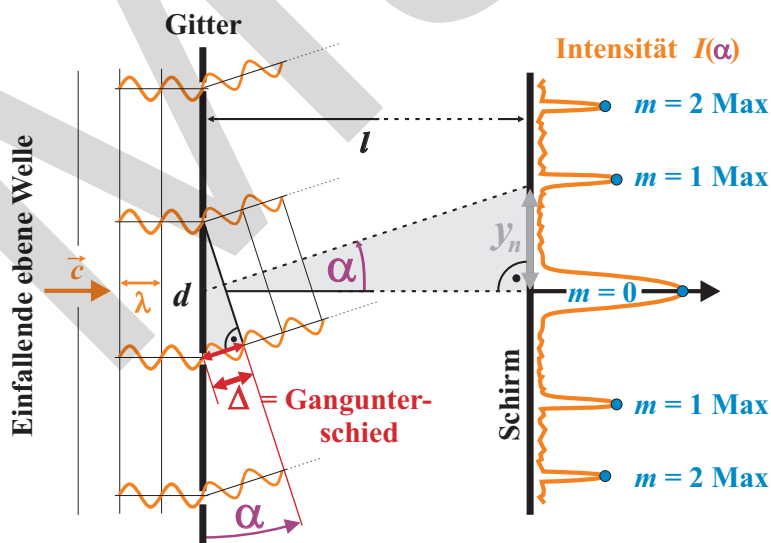
d : Spaltabstand.

Intensitätsverteilung:

$$I(\alpha) = I_0 \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)}{\left(\frac{\phi}{2}\right)^2} \quad \text{mit}$$

$$\phi(\alpha) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \sin(\alpha)$$

- **Beugung am Gitter (bzw. Doppelspalt):**



Bedingung für **Maxima**:

$$\Delta = d \cdot \sin(\alpha) = m \cdot \lambda$$

Ordnung: $m = 0, 1, 2, \dots$

d : Gitterkonstante.

6 Thermodynamik

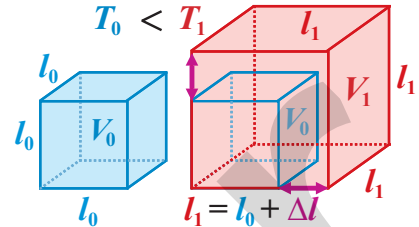
- **Temperatur T :** Mass für mittlere E_{kin} der Teilchen. Einheit: $[T] = 1 \text{ Kelvin} = 1 \text{ K}$.
Celsius-Temperatur $\vartheta = T - 273.15 \text{ K}$ Temperaturdifferenz: $\Delta\vartheta = \Delta T = T_1 - T_0$.

- **Längenausdehnung:** $\Delta l = l_1 - l_0 = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T$

α : Längenausdehnungskoeffizient: Tabelle S. 34.

- **Volumenausdehnung:** $\Delta V = V_1 - V_0 \approx \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta T$

$\gamma \approx 3\alpha$: Volumenausdehnungskoeffizient: Tabelle S. 34.



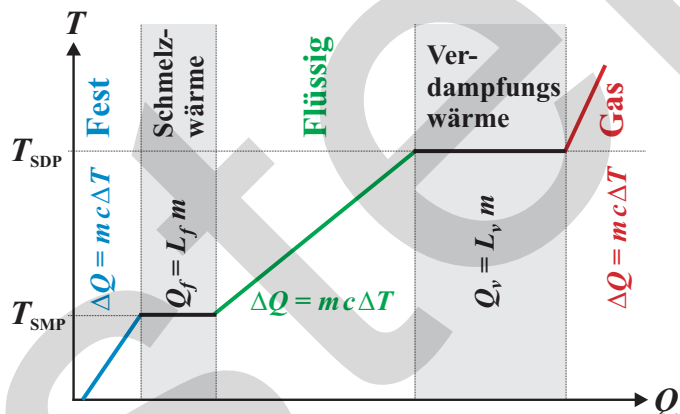
- **Innere Energie U :** Energie der thermischen Bewegung der Teilchen.
Einheit: $[U] = 1 \text{ Joule} = 1 \text{ J}$.

Wärme Q : Einheit: $[Q] = 1 \text{ J}$.

- **Wärmemenge:** $\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T$

c : spezifische Wärmekapazität,
Einheit $[c] = \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ Tabelle S. 34.

m : Masse in kg.



- **Verbrennungswärme:** $Q = m \cdot H$ H : Heizwert, Tabelle S. 35.

- **Schmelzwärme (Erstarrungswärme):** $Q = L_f \cdot m$

L_f : spezifische Schmelz- bzw. Erstarrungswärme, Einheit: $[L_f] = \frac{\text{J}}{\text{kg}}$ Tabelle S. 34.

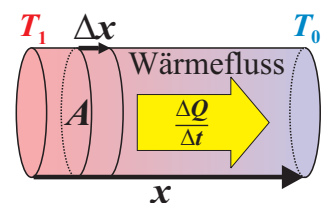
- **Verdampfungswärme (Kondensationswärme):** $Q = L_v \cdot m$

L_v : spez. Verdampfungs- bzw. Kondensationswärme, Einheit: $[L_v] = \frac{\text{J}}{\text{kg}}$ Tabelle S. 34.

- **Wärmeleitfähigkeit:** $\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}$

λ : Wärmeleitfähigkeit, Einheit: $[\lambda] = \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ Tabelle S. 34.

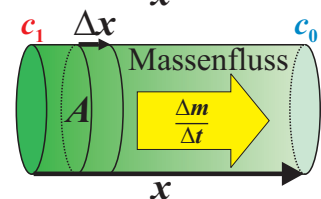
A : Querschnittsfläche, $\frac{\Delta T}{\Delta x}$: Temperaturgradient.



- **Diffusion:** $\frac{\Delta m}{\Delta t} = -D \cdot A \cdot \frac{\Delta c}{\Delta x}$ (Fick'sches Gesetz)

D : Diffusionskonstante, Einheit: $[D] = \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

A : Querschnittsfläche $\frac{\Delta c}{\Delta x}$: Konzentrationsgradient.



► **Mittlere kinetische Energie:** $\overline{E_{\text{kin}}} = \frac{f}{2} \cdot k_B \cdot T = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{\text{eff}}^2$ mit

$v_{\text{eff}} = \sqrt{f \cdot \frac{k_B \cdot T}{m}}$ und der Boltzmann-Konstante $k_B = 1.3807 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$

f : Anzahl Freiheitsgrade: $\begin{cases} \text{einatomige Teilchen: } f = 3 \\ \text{zweiatomige Teilchen: } f = 5 \text{ (3 Transl. \& 2 Rot.)} \end{cases}$

► **Druck in einem Gas:** $p = \frac{1}{3} \cdot \frac{N \cdot m \cdot v_{\text{eff}}^2}{V}$ mit $\begin{cases} N : \text{Anzahl Moleküle} \\ m : \text{Masse eines Moleküls} \\ V : \text{Volumen des Behälters} \end{cases}$

► **Stefan-Boltzmann:** Abgestrahlte Wärme pro Zeit: $\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$ mit

ε : Emissionsgrad, $\varepsilon = 1$ für idealen Schwarzkörper.

$\sigma = 5.6704 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$: Stefan-Boltzmann Konstante.

A : Oberfläche des strahlenden Körpers der Temperatur T .

► **Entropie:** „Mass für die Unordnung eines Systems.“ Einheit: $[S] = \frac{\text{J}}{\text{K}}$

• **Thermodynamisch:** $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$

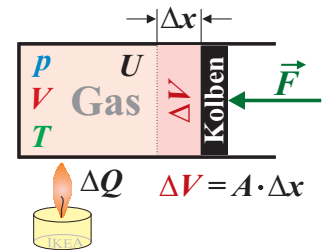
• **Statistisch:** $S = k_B \cdot \ln(P)$ P : Anzahl Zustände bei konstanter Gesamtenergie und konstanter Teilchenzahl.

1. Hauptsatz (Energieerhaltung):

Eine Änderung der inneren Energie U eines Stoffes kann durch Zufuhr von Wärme oder durch Zufuhr von mechanischer Arbeit erreicht werden: $\Delta U = \Delta Q + \Delta W$

Kompressionsarbeit: $\Delta W = -p \cdot \Delta V$ falls $p = \text{konstant}$.

Allgemein: $W_{12} = - \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV$ (siehe S. 19)



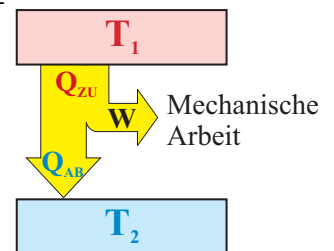
2. Hauptsatz (Wärmearbeitsmaschinen, Wärmeenergiemaschinen):

• Wärme kann nicht von selbst von einem Körper niedriger Temperatur auf einen Körper höherer Temperatur übergehen.

• Wärme kann nicht vollständig in Arbeit umgewandelt werden:

$W = Q_{\text{ZU}} - Q_{\text{AB}}$

• Der bestmögliche Wirkungsgrad einer Wärmearbeitsmaschine ist der Carnot-Wirkungsgrad. \Rightarrow Siehe S. 19.



► **Wirkungsgrad:** $\eta = \frac{W_{\text{Nutz}}}{W_{\text{ZU}}} = \frac{W_{\text{Nutz}}}{Q_{\text{ZU}}} = \frac{P_{\text{Nutz}}}{P_{\text{ZU}}}$ (vgl. auch S. 11, 19)

► Zustandsgleichung ideales Gas:

$$\frac{pV}{T} = nR = \text{konstant} \Leftrightarrow \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

Spezialfälle:

$$T = \text{konst.} \quad (\text{isotherm})$$

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

(Boyle-Mariotte)

$$V = \text{konst.} \quad (\text{isochor})$$

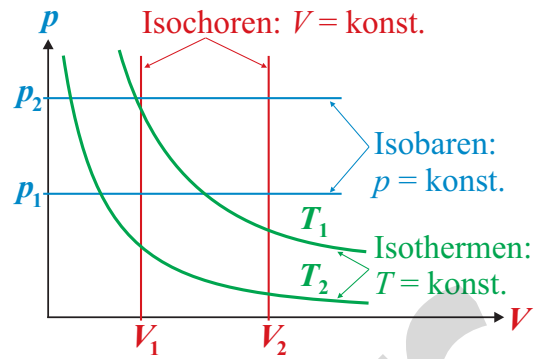
$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

(Amontons)

$$p = \text{konst.} \quad (\text{isobar})$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

(Gay-Lussac)



p : Druck in Pa.

V : Volumen in m^3 .

T : Temperatur in K.

Universelle Gaskonstante:

$$R = k_B \cdot N_A = 8.31 \frac{\text{J}}{\text{molK}}$$

vgl. S. 35

$n = \frac{m}{M}$: Anzahl Mol, wobei: $\begin{cases} m & : \text{Masse in kg} \\ M & : \text{Molmasse in } \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \end{cases}$

► Van der Waals Gas (reales Gas):

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

mit $\begin{cases} a & : \text{Kohäsionsdruck} \\ b & : \text{Kovolumen} \end{cases}$ Tabelle S. 35.

► **Adiabaten:** $\Delta Q = 0$, d.h. kein Wärmeaustausch. Sei C_p die molare Wärmekapazität eines Gases bei konstantem Druck und C_V die molare Wärmekapazität bei konstantem Volumen. Dann: $C_p - C_V = R$ und $\kappa = \frac{C_p}{C_V}$, $\kappa \approx 1.4$ für Luft. Tabelle S. 35.

Dann gilt zusätzlich zur Zustandsgleichung des Gases das **Poisson'sche Gesetz:**

$$p \cdot V^\kappa = \text{konstant}$$

$$\text{Daraus folgen: } T \cdot V^{\kappa-1} = \text{konstant}$$

$$\text{und } T^\kappa \cdot p^{1-\kappa} = \text{konstant}$$

► Carnot Kreisprozess:

$1 \rightarrow 2$: $\begin{cases} \text{Isotherme} \\ \text{Expansion:} \end{cases}$

$$Q_{ZU} = n \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

$2 \rightarrow 3$: $\begin{cases} \text{Adiabatische} \\ \text{Expansion:} \end{cases}$

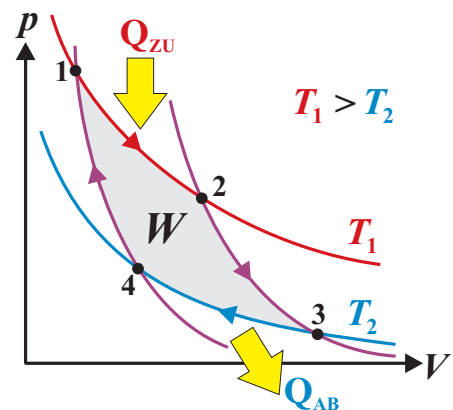
$$\Delta U = n \cdot C_V \cdot (T_2 - T_1)$$

$3 \rightarrow 4$: $\begin{cases} \text{Isotherme} \\ \text{Kompression:} \end{cases}$

$$Q_{AB} = n \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$$

$4 \rightarrow 1$: $\begin{cases} \text{Adiabatische} \\ \text{Kompression:} \end{cases}$

$$\Delta U = n \cdot C_V \cdot (T_1 - T_2)$$



Der (theoretisch) bestmögliche Wirkungsgrad einer Wärmearbeitsmaschine ist der

Carnot-Wirkungsgrad $\eta_C = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{|Q_{AB}|}{|Q_{ZU}|}$

(vgl. auch S. 11, 18)

bitte ausschneiden

7 Elektromagnetismus

7.1 Elektrizität

► **Elektrische Ladung:** $Q = (N_+ - N_-) \cdot e$ mit $\left\{ \begin{array}{l} N_+ : \text{Anz. positive} \\ N_- : \text{Anz. negative} \end{array} \right\}$ Ladungen.

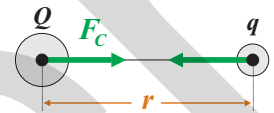
• Einheit: $[Q] = 1 \text{ Coulomb} = 1 \text{ C} = \{\text{Ladung von } 6.25 \cdot 10^{18} \text{ Protonen}\}$.

• **Elementarladung:** $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ **Elektronenladung:** $q = -e$

► **Coulomb'sches Gesetz:**

Kraft F_C zwischen zwei Punktladungen q und Q im Abstand r :

$$F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q \cdot Q}{r^2} \quad \epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}}{\text{Vm}} : \text{Dielektrizitätskonst.}$$

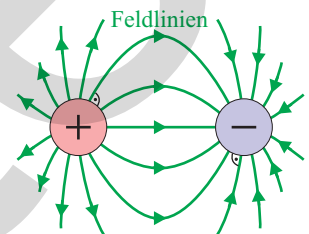


Gleiche Ladungen stossen sich ab, ($F_C > 0$), ungleiche ziehen sich an ($F_C < 0$).

► **Elektrisches Feld E :**

Elektrisches Feld = Kraft pro Ladung: $E = \frac{F_C}{q}$

Quelle des elektrischen Feldes sind Ladungen. Elektrische Feldlinien schneiden sich nie und stehen stets senkrecht zur Leiteroberfläche. Die Kraft \vec{F}_C ist tangential zu den Feldlinien.



► **Spannung, Potentialdifferenz U :**

Vom elektrischen Feld E an der Ladung q verrichtete Verschiebearbeit W :

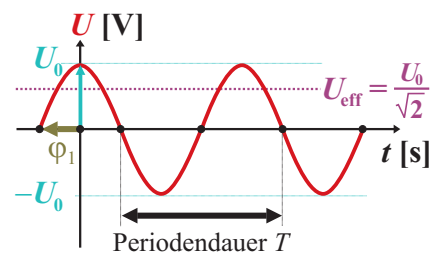
Spannung = Arbeit pro Ladung: $U = \frac{W}{q}$ Einheit: $[U] = 1 \text{ Volt} = 1 \text{ V} = 1 \frac{\text{J}}{\text{C}}$

• **Wechselspannung:** $U(t) = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_1)$

U_0 : Scheitelspannung (Amplitude)

$\omega = \frac{2\pi}{T}$: Winkelgeschwindigkeit (vgl. S. 12).

φ_1 : Nullphasenwinkel (vgl. S. 12).



• **Effektivspannung:** $U_{\text{eff}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$ zur Wechselspannung äquivalente Gleichspannung.

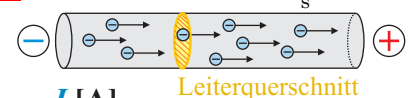
► **Stromstärke I :** Bewegte Ladung ΔQ pro Zeit Δt durch einen Leiterquerschnitt:

Stromstärke = Ladung pro Zeit: $I = \frac{dQ}{dt} = \dot{Q}(t) \approx \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ Einheit: $[I] = 1 \text{ Ampere}$
 $1 \text{ A} = 1 \frac{\text{C}}{\text{s}}$

• **Technische Stromrichtung:**

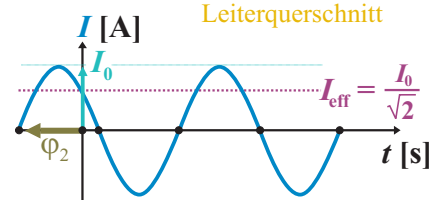
„Positive Ladungen“ fließen von $\oplus \rightarrow \ominus$,

„reelle Stromrichtung“: Elektronen fließen von $\ominus \rightarrow \oplus$.



• **Wechselstrom:** $I(t) = I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_2)$

Bezeichnungen analog zur Wechselspannung (oben).

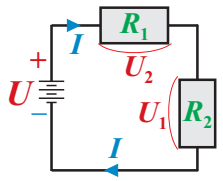
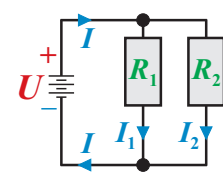


► **Widerstand R , Ohm'sches Gesetz:**

Widerstand = Spannung pro Strom: $R = \frac{U}{I}$ Einheit: $[R] = 1 \text{ Ohm} = 1 \Omega = 1 \frac{\text{V}}{\text{A}}$

Ohm'sches Gesetz: $U = R \cdot I$ Für konstanten Widerstand R gilt $U \sim I$.

Allgemeine Definition: $R = \frac{dU}{dI} = U'(I) \approx \frac{\Delta U}{\Delta I}$ = Steigung im U - I -Diagramm.

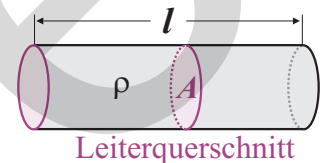
<p>Serienschaltung:</p>  <p>Ersatzwiderstand:</p> $R_{\text{tot}} = R_1 + R_2 + \dots$ <p>Maschenregel:</p> $U = U_1 + U_2 + \dots$	<p>Parallelschaltung:</p>  <p>Ersatzwiderstand:</p> $R_{\text{tot}} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \right)^{-1}$ <p>Knotenregel:</p> $I = I_1 + I_2 + \dots$
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

► **Spezifischer Widerstand ρ :**

Widerstand R eines Drahtes der Länge l und der

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

ρ : spezifischer Widerstand in $\Omega \cdot m$, Tabelle S. 36.



► **Wechselstromwiderstand Z, X :** (Impedanz, Blindwiderstand, Wirkwiderstand)

Bei Wechselströmen kann der Widerstand *frequenzabhängig* werden. Tritt zwischen einer **Wechselspannung** $U(t) = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_1)$ und dem **Wechselstrom** $I(t) = I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_2)$ eine Phasendifferenz $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \neq 0$ auf, dann unterscheidet man:

- **Blindwiderstand:** $X = \frac{U_0}{I_0} \cdot \sin(\varphi)$ *Blindwiderstände wandeln elektrische Energie nicht in thermische oder andere Energieformen um: Kapazitäten S. 22, Induktivitäten S. 24.*
- **Wirkwiderstand:** $R = \frac{U_0}{I_0} \cdot \cos(\varphi)$ *Wirkwiderstände wandeln elektrische Energie in thermische oder andere Energieformen um (S. 21).*
- **Impedanz:** $Z = \frac{U_0}{I_0} = \sqrt{R^2 + X^2}$ *Gesamter Wechselstromwiderstand (S. 26).*

► **Elektrische Leistung P und Arbeit W :**

Leistung = Spannung mal Strom: $P = U \cdot I$ Einheit: $[P] = 1 \text{ Watt} = 1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot \text{A}$

• Andere Formeln: $P = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}$ (vgl. S. 11, Wirkungsgrad auf S. 11, 18).

• Wirkleistung: $P_W = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T U(t) \cdot I(t) dt = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos(\varphi)$ mit

$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$: Phasenverschiebung zwischen $I(t)$ und $U(t)$. $U_{\text{eff}}, I_{\text{eff}}$ siehe S. 20.

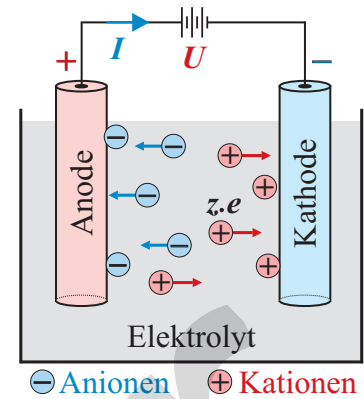
Arbeit = Leistung mal Zeit: $W = U \cdot I \cdot t$ Einheit: $[W] = 1 \text{ Joule} = 1 \text{ W s}$
1 kWh = $3.6 \cdot 10^6 \text{ J}$.

► **Elektrolyse, Ionenstrom:**

An einer Elektrode abgesetzte Masse m in Folge eines **Ionenstroms** in einem Elektrolyten:

$$m = \frac{M \cdot Q}{z \cdot N_A \cdot e} \quad \text{mit:}$$

- M : molare Masse in $\frac{\text{kg}}{\text{mol}}$
- $Q = I \cdot t$: totale Ladung in C
- z : Ionenwertigkeit
- $N_A = 6.022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$: Avogadrozahl
- $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$: Elementarladung.



► **Kapazität C, Kondensatoren (Ladungsspeicher):**

Kapazität = Ladung pro **Spannung**: $C = \frac{Q}{U}$ Einheit: $[C] = 1 \text{ Farad} = 1 \text{ F} = 1 \frac{\text{C}}{\text{V}}$.

- **Plattenkondensator:** $C = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$ mit $\begin{cases} A : \text{Plattenfläche} \\ d : \text{Plattenabstand} \end{cases}$

$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}}{\text{Vm}}$: elektrische Feldkonstante.
 ϵ_r : Dielektrizitätskonstante (Tabelle S. 36), $\epsilon_r = 1$ für Luft (Vakuum).

- Elektr. Feld im Plattenkondensator: $E = \frac{U}{d}$

- **Gespeicherte Energie:** $W = \frac{1}{2} C \cdot U^2$

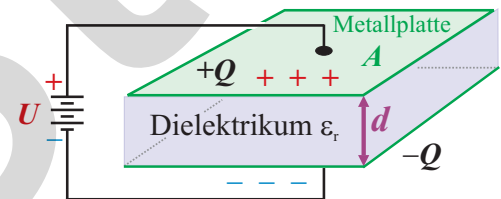
- **Blindwiderstand:** $X_C = -\frac{1}{\omega \cdot C}$ (vgl. S. 21.)

- **Serieschaltung:** $C_{\text{tot}} = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \right)^{-1}$

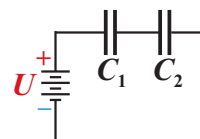
(gleiche Ladung Q auf allen Kondensatoren)

- **Parallelschaltung:** $C_{\text{tot}} = C_1 + C_2 + \dots$

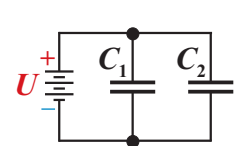
(gleiche **Spannung** U über allen Kondensatoren)



Serie:



Parallel:



⇒ Impedanz, Blindwiderstand, Gleichstromkreise und Wechselstromkreise siehe S. 25, 26.

7.2 Magnetismus

► Magnetische Flussdichte \vec{B} :

Die **magnetische Flussdichte \vec{B}** (Magnetfeld) übt Kraft auf bewegte Ladungen und magnetisierbare Stoffe (v.a. auf die ferromagnetischen Elemente Fe, Co und Ni) aus.

Einheit: $[\vec{B}] = 1 \text{ Tesla} = 1 \text{ T} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$.

- Magnetische Feldlinien sind stets geschlossen (Wirbelfeld) und sind quellenfrei: Es gibt keine magnetische Monopole.
- Quelle der magnetischen Flussdichte sind **Ströme** (bewegte Ladungen). Im Fall von Permanentmagneten sind dies atomare Kreisströme innerhalb des Materials.

- **Magnetische Flussdichte** im Abstand r eines **stromdurchflossenen** Leiters: $B(r) = \mu_0 \mu_r \cdot \frac{I}{2\pi r}$

- Magnetische Feldkonstante: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$

μ_r : Permeabilitätszahl, Tabelle S. 36.
für Vakuum (Luft) gilt $\mu_r = 1$.

- **Magnetische Flussdichte (Magnetfeld)**...

...im Zentrum eines **Kreisstromes I** (Spule mit einer Windung) mit **Radius r** :

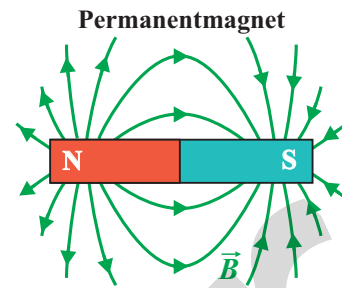
$$B = \mu_0 \mu_r \cdot \frac{I}{2 \cdot r}$$

...im Inneren einer **Spule** (Länge l , Durchmesser d) mit N Windungen:

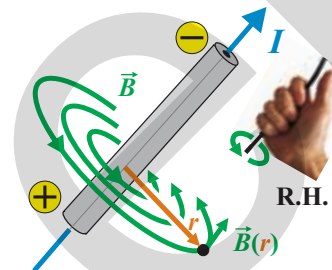
$$B = \mu_0 \mu_r \cdot \frac{N \cdot I}{\sqrt{l^2 + d^2}}$$

Für lange Spulen $l \gg d$ gilt:

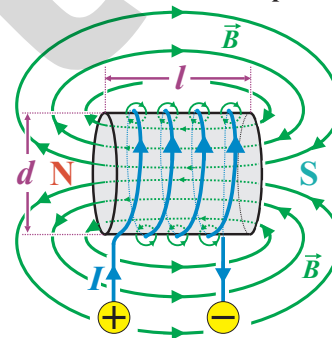
$$B \approx \mu_0 \mu_r \cdot \frac{N \cdot I}{l}$$



Stromdurchflossener Leiter



Stromdurchflossene Spule



- **Lorentzkraft:** Kraft \vec{F}_L auf bewegte Ladung q der Geschwindigkeit \vec{v} im \vec{B} -Feld: $\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$

- $\vec{F}_L \perp \vec{B}$ und $\vec{F}_L \perp \vec{v}$.

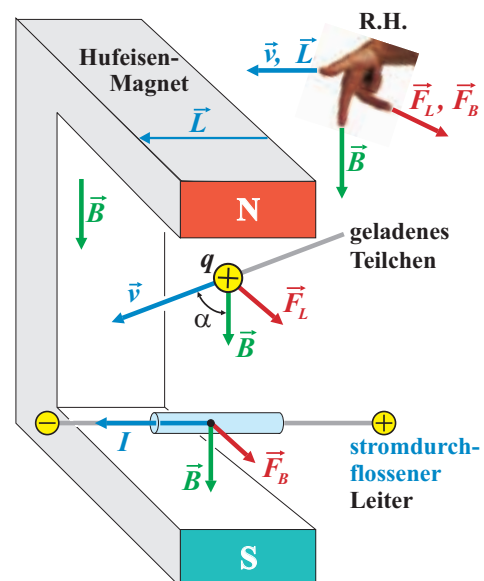
- Betrag: $F_L = q \cdot v \cdot B \cdot \sin(\alpha)$ $\alpha = \angle(\vec{v}, \vec{B})$.

- **Lorentz-Gleichung:** $\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$

- **Biot-Savart-Kraft:** Kraft \vec{F}_B auf stromführenden Leiter (Länge \vec{L}) im \vec{B} -Feld: $\vec{F}_B = I \cdot \vec{L} \times \vec{B}$

- $\vec{F}_B \perp \vec{B}$ und $\vec{F}_B \perp I, \vec{L}$.

- Betrag: $F_B = I \cdot L \cdot B \cdot \sin(\alpha)$ $\alpha = \angle(\vec{L}, \vec{B})$.



► **Magnetischer Fluss Φ_M :**

Magnetische Flussdichte mal Fläche.

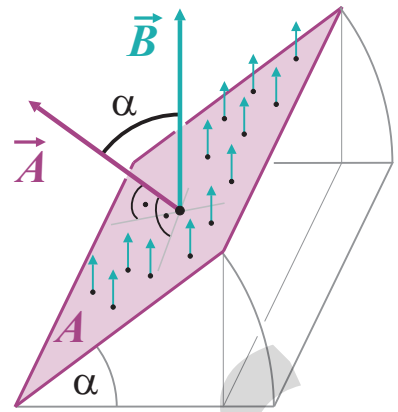
Anschaulich: „Anzahl“ Feldlinien, welche eine (durch einen Leiter begrenzte) Fläche durchqueren. Im homogenen B -Feld gilt:

$$\Phi_M = \vec{B} \cdot \vec{A} = B \cdot A \cdot \cos(\alpha) \quad \alpha = \angle(\vec{B}, \vec{A})$$

Einheit: $[\Phi] = 1 \text{ Weber} = 1 \text{ Wb} = 1 \text{ V} \cdot \text{s}$.

Spezialfall: (B -Feld) \perp (Fläche A)

$$\Rightarrow \vec{B} \parallel \vec{A} \Rightarrow \Phi_M = B \cdot A$$



► **Induktionsgesetz U_{ind} :**

- **Induktionsspannung:** Negative zeitliche Änderung des magnetischen Flusses (in Leiterschleife / Spule):

$$U_{\text{ind}} = - \frac{d\Phi_M}{dt} = - \dot{\Phi}_M(t) \approx - \frac{\Delta\Phi_M}{\Delta t}$$

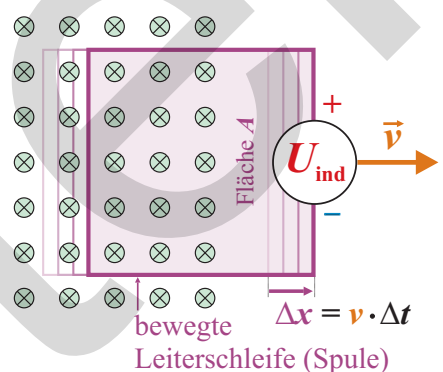
- **Induzierte Spannung in einer Spule:**

$$U_{\text{ind}} = -N \cdot \frac{\Delta\Phi_M}{\Delta t} \quad N : \text{Windungszahl der Spule.}$$

- Spezialfall: (Fläche A) \perp (B -Feld):

$$U_{\text{ind}} = -N \cdot \left(A \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t} + B \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t} \right)$$

$\otimes = \vec{B}$ -Feld in Papierebene hinein



► **Lenz'sche Regel:**

Die Induktionsspannung U_{ind} ist stets so gerichtet, dass sie ihrer Ursache entgegenwirkt.

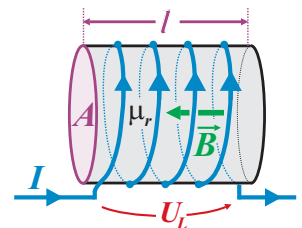
► **Induktivität L , Spule, Selbstinduktion:**

- Definition: $L = \frac{N \cdot \Phi_M}{I}$ Einheit: 1 Henry = 1 H = 1 $\frac{\text{Vs}}{\text{A}}$

- Induktivität einer Spule (Solenoid) der Länge l und der Querschnittsfläche A : $L = \mu_0 \mu_r \cdot \frac{N^2 \cdot A}{l}$

- **Blindwiderstand:** $X_L = \omega \cdot L$ (vgl. S. 21.)

- Induzierte Spannung U_L durch eine zeitliche Stromänderung hervorgerufen: $U_L = L \cdot \frac{dI}{dt} = L \cdot \dot{I}(t) \approx L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$



► **Energie einer stromdurchflossenen Spule:** $E_M = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$

► **Energiedichte der magnetischen Flussdichte:**

Energiedichte = Energie pro Volumen

$$w_M = \frac{1}{2 \mu_0 \mu_r} \cdot B^2$$

Einheit: $[w_M] = \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$

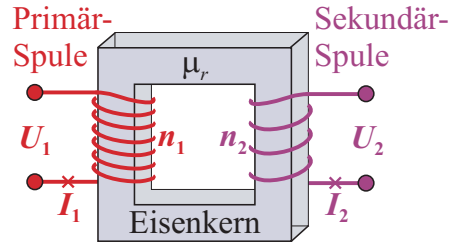
► **Transformator (Spannungswandler):**

Zwei magnetisch gekoppelte Spulen: $\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$

Energieerhaltung beim idealen (verlustfreien)

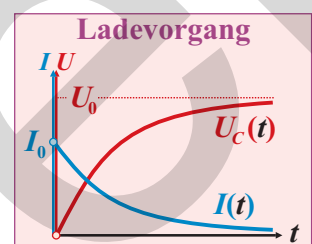
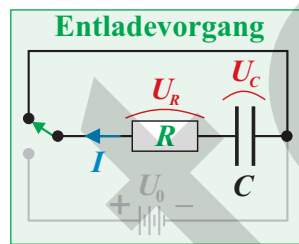
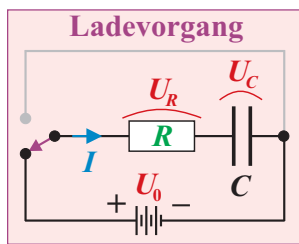
Transformator: $U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$

⇒ Spulen siehe S. 23, S. 24.



7.3 Gleichstromkreise (DC)

► **RC-Stromkreis: Lade- und Entladevorgang einer Kapazität**



Diff. Gl.: $R \cdot \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = U_0$

Diff. Gl.: $R \cdot \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = 0$

Ladung: $Q(t) = C U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{RC} t}\right)$

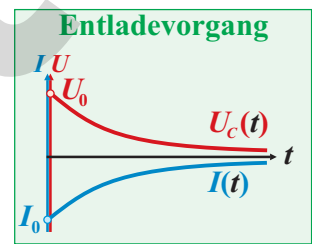
Ladung: $Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\frac{1}{RC} t}$

Strom: $I(t) = \frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{1}{RC} t}$

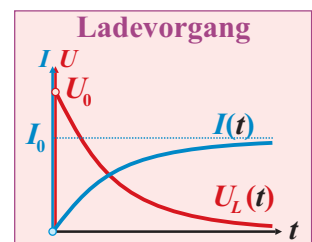
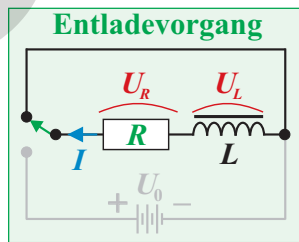
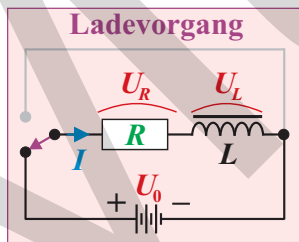
Strom: $I(t) = -\frac{Q_0}{RC} \cdot e^{-\frac{1}{RC} t}$

Spannung: $U_C(t) = U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{RC} t}\right)$

Spannung: $U_C(t) = \frac{Q_0}{C} \cdot e^{-\frac{1}{RC} t}$



► **RL-Stromkreis**



Diff. Gl.: $L \cdot \frac{dI}{dt} + I \cdot R = U_0$

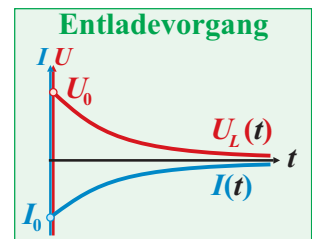
Diff. Gl.: $L \cdot \frac{dI}{dt} + I \cdot R = 0$

Strom: $I(t) = \frac{U_0}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{R}{L} t}\right)$

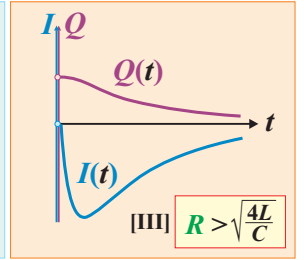
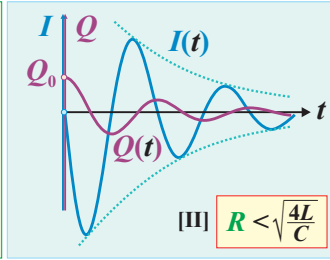
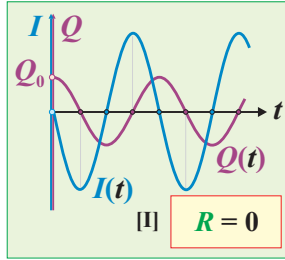
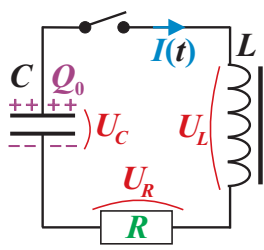
Strom: $I(t) = -\frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{R}{L} t}$

Spannung: $U_L(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{R}{L} t}$

Spannung: $U_L(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{R}{L} t}$



► RLC-Stromkreis: gedämpfter harmonischer Schwingkreis



Differentialgleichung: $L \cdot \frac{d^2 Q}{dt^2} + R \cdot \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = 0$

Strom: $I(t) = \frac{dQ(t)}{dt}$

I] $R = 0 \Rightarrow I(t) = -Q_0 \cdot \omega_0 \cdot \sin(\omega_0 t)$

$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$

II] $R^2 < \frac{4L}{C} \Rightarrow I(t) = -Q_0 \cdot \frac{\omega_0^2}{\omega} \cdot e^{-\frac{R}{2L}t} \cdot \sin(\omega t)$

$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$

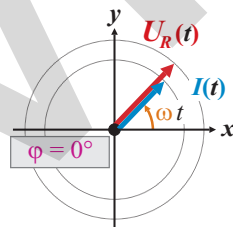
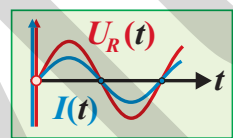
III] $R^2 > \frac{4L}{C} \Rightarrow I(t) = -Q_0 \cdot \frac{\omega_0^2}{\omega} \cdot e^{-\frac{R}{2L}t} \cdot \sinh(\omega t)$

$\omega = \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$

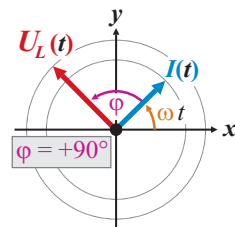
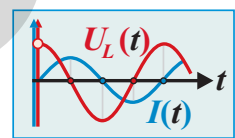
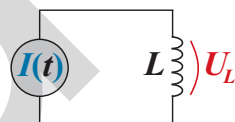
7.4 Wechselstromkreise (AC)

► Einzelne R, L, C an einer Wechselstromquelle $I(t) = I_0 \cdot \sin(\omega t)$

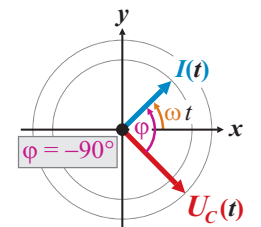
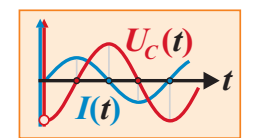
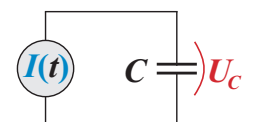
Widerstand R



Induktivität L



Kondensator C



Spannung: $U(t) = U_0 \cdot \sin(\omega t)$

$U(t) = U_0 \cdot \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$

$U(t) = U_0 \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$

Blindwiderstand: $(X_R = 0)$

$X_L = \frac{U_0}{I_0} = \omega \cdot L$

$X_C = \frac{U_0}{I_0} = -\frac{1}{\omega \cdot C}$

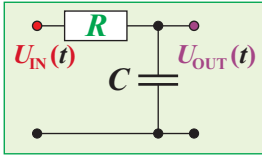
Mittlere Leistung: $\bar{P} = R I_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{2} R I_0^2$

$\bar{P} = 0$

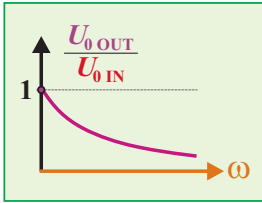
$\bar{P} = 0$

► RC und LC Filter $U_{IN}(t) = U_0 \cdot \sin(\omega t)$

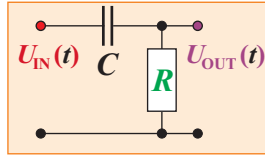
RC Tiefpass



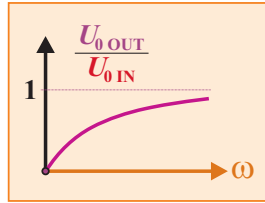
$$\frac{U_{0\text{OUT}}}{U_{0\text{IN}}} = \frac{1}{\omega RC + 1}$$



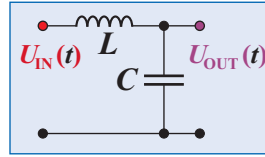
RC Hochpass



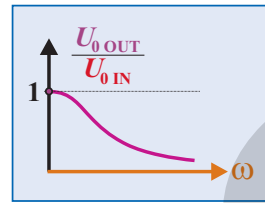
$$\frac{U_{0\text{OUT}}}{U_{0\text{IN}}} = \frac{\omega RC}{\omega RC + 1}$$



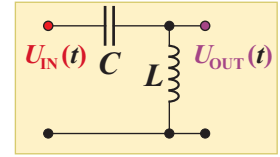
LC Tiefpass



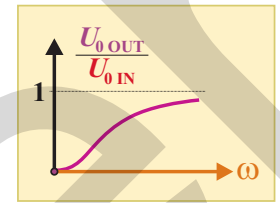
$$\frac{U_{0\text{OUT}}}{U_{0\text{IN}}} = \frac{1}{\omega^2 LC + 1}$$



LC Hochpass

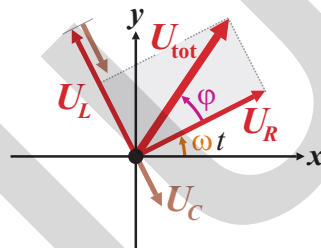
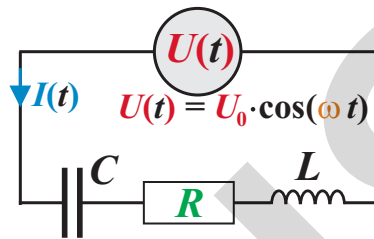


$$\frac{U_{0\text{OUT}}}{U_{0\text{IN}}} = \frac{\omega^2 LC}{\omega^2 LC + 1}$$

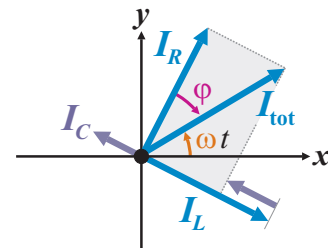
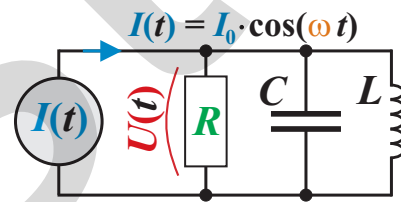


► RLC-Schwingkreis (Oszillator)

RLC-Serienschwingkreis



RLC-Parallelschwingkreis



Impedanz: $Z(\omega) = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$

Spannung: (vorgegeben, siehe Graphik)

Strom: $I(t) = I_0(\omega) \cdot \cos(\omega t - \varphi(\omega))$

Amplitude: $I_0(\omega) = \frac{U_0}{Z(\omega)}$

Nullphase: $\varphi(\omega) = \arctan\left(\frac{1}{R} \cdot (\omega L - \frac{1}{\omega C})\right)$

$$Z(\omega) = \left(\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2\right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$U(t) = U_0(\omega) \cdot \cos(\omega t - \varphi(\omega))$$

(vorgegeben, siehe Graphik)

$$U_0(\omega) = Z(\omega) \cdot I_0$$

$$\varphi(\omega) = \arctan\left(R \cdot \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)\right)$$

⇒ Resonanz kann am Serien- und am Parallelresonanzkreis beobachtet werden, in Analogie zur mechanischen Resonanz, vgl S. 12.

Resonanzbedingung: $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$

Resonanzfrequenz: $f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$

8 Quantenphysik

► **De Broglie-Wellenlänge:** $\lambda = \frac{h}{p}$ (Materiewellen: Teilchen-Wellen Äquivalenz)

mit $\begin{cases} p = m \cdot v & : \text{ Impuls (vgl. S. 7).} \\ \lambda & : \text{ Wellenlänge (vgl. S. 13).} \\ h = 6.6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js} & : \text{ Planck'sches Wirkungsquantum.} \end{cases}$

► **Energie eines Photons:** $E = h \cdot f = \hbar \cdot \omega$ $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.05 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

► **Heisenberg'sche Unschärferelation:**

- Ort und Impuls können nicht gleichzeitig beliebig genau gemessen werden:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad \Delta x, \Delta p : \text{ Orts- bzw. Impulsunschärfe.}$$

- Energie und Zeit können nicht gleichzeitig beliebig genau gemessen werden:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad \Delta E, \Delta t : \text{ Energie- bzw. Zeitunschärfe.}$$

► **Schrödingergleichung:** $-\frac{\hbar^2}{2m} \cdot \frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} + E_{\text{pot}}(x) \cdot \Psi(x) = E_{\text{tot}} \cdot \Psi(x)$

► **Bohr'sches Atommodell:**

- **Bahnradien:** Für Wasserstoff:

$$R_n = \frac{\epsilon_0 \hbar^2}{\pi m_e q_e^2} \cdot n^2 = a_B \cdot n^2$$

$a_B = 5.2918 \cdot 10^{-11} \text{ m}$: Bohr'scher Atomradius.

Allgemein: $R_n \approx \frac{4\pi\epsilon_0^2 \hbar^2}{m_e q_e^2 Z} \cdot n^2$

Z : Kernladungszahl (Ordnungszahl).

- **Bindungsenergie:** Für Wasserstoff:

$$E_n = -\frac{m_e q_e^4}{32 \pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2} = E_1 \cdot \frac{1}{n^2}$$

$E_1 = -13.6 \text{ eV}$: Grundenergie.

Allgemein: $E_n \approx -\frac{m_e q_e^4 Z^2}{32 \pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}$

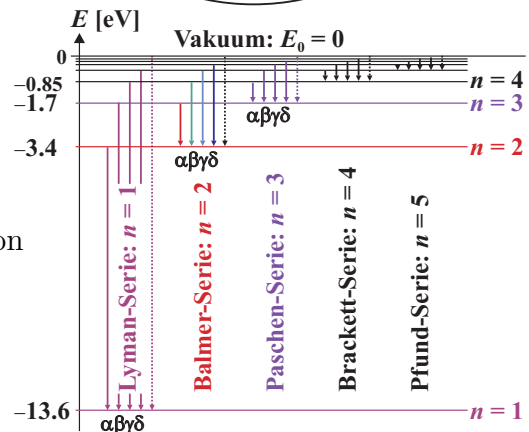
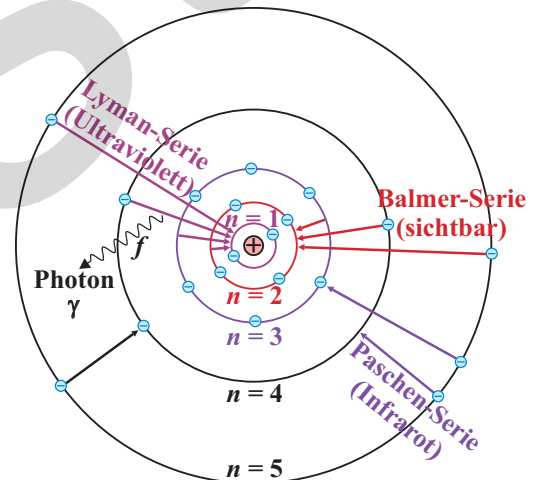
$n = 1, 2, 3, \dots$: Hauptquantenzahl.

- **Frequenzbedingung:**

$$h \cdot f = |E_n - E_m| \quad \begin{matrix} E_n < E_m \Rightarrow \text{Absorption} \\ E_n > E_m \Rightarrow \text{Emission} \end{matrix}$$

- **Austrittsarbeit:** Arbeit, um ein Elektron aus einem Atom zu lösen.

$$W_A = h \cdot f - \frac{1}{2} m v^2 \quad (\text{Tabelle S. 36})$$



⇒ Elektromagnetisches Spektrum S. 37.

9 Spezielle Relativitätstheorie (SRT)

► **Inertialsystem (IS):** Koordinatensystem, in dem sich jedes Objekt mit Masse, auf das keine äussere Kraft wirkt, gleichförmig geradlinig bewegt oder in Ruhe bleibt. (Im Inertialsystem besitzt das newtonsche Trägheitsgesetz von S. 6 uneingeschränkte Gültigkeit).

► **Galilei-Transformation:**

Übergang von einem Inertialsystem zu einem anderen:

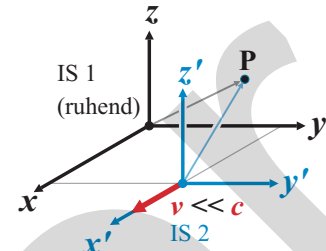
$$x' = x - vt \quad (\text{Bewegung in } x\text{-Richtung})$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t \quad \text{Die Zeit ist in allen Systemen gleich.}$$

Die Gesetze der klassischen Mechanik sind Galilei-invariant, diejenigen der Maxwell'schen Elektrodynamik aber nicht.



► **Einstein'sche Postulate:**

- **Relativitätsprinzip:** Die Naturgesetze nehmen in allen Inertialsystemen die gleiche Form an. Es gibt kein ausgezeichnetes, spezielles Inertialsystem.
- **Konstanz der Lichtgeschwindigkeit:** In jedem Inertialsystem hat die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum stets den Wert $c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

► **Lorentz-Transformation:** Relativistischer Übergang von einem ruhenden IS zu einem mit v in x -Richtung bewegten IS:

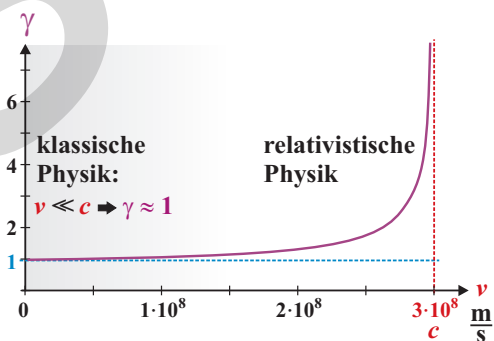
$$x' = \gamma \cdot (x - v \cdot t)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \gamma \left(t - \frac{v \cdot x}{c^2} \right)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



► **Konsequenzen aus der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit:**

• **Zeitdilatation:** Ruht ein Beobachter, geht jede relativ zu ihm mit v bewegte Uhr aus seiner Sicht langsamer. Er misst somit ein grösseres Zeitintervall Δt als das Zeitintervall Δt_0 (Eigenzeit), welches die bewegte Uhr anzeigt. Es gilt: $\Delta t = \gamma \cdot \Delta t_0$

• **Längenkontraktion:** Ruht ein Beobachter, erscheinen relativ zu ihm mit v bewegte Körper aus seiner Sicht kürzer. Er misst somit eine kürzere Länge Δl , als die Länge Δl_0 (Eigenlänge), welche für den Körper in Ruhe gemessen wird. Der Effekt tritt nur in Richtung der relativen Bewegung v auf, quer dazu ändert sich nichts. Es gilt: $\Delta l = \frac{1}{\gamma} \cdot \Delta l_0$

• **Relativistische Masse:** $m = \gamma \cdot m_0$

Relativistischer Impuls: $p = \gamma \cdot m_0 \cdot v$

• **Ruheenergie:** $E_0 = m_0 \cdot c^2$

Gesamtenergie: $E = m \cdot c^2 = E_0 + E_{\text{kin}}$

10 Kernphysik

Nukleon:	Proton	Neutron	Elektron
Masse:	$m_P = 1.6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$m_N = 1.6748 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$m_e = 9.1094 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Ladung:	$q_P = +1.6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$q_N = 0$	$q_e = -1.6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

► Kernradius, Kernkraft, Bindungsenergie:

- **Kernradius:** $r \approx 1.2 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{A}$

$1.2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$: Nukleonenradius.

$A = Z + N$: Massenzahl.

Z : Ordnungszahl (Anzahl Protonen).

N : Anzahl Neutronen im Kern.

- **Kernkraft (starke Wechselwirkung):** Kurzreichweitige anziehende Kraft, welche die Kerne entgegen der Coulomb'schen Abstossung zusammenhält.

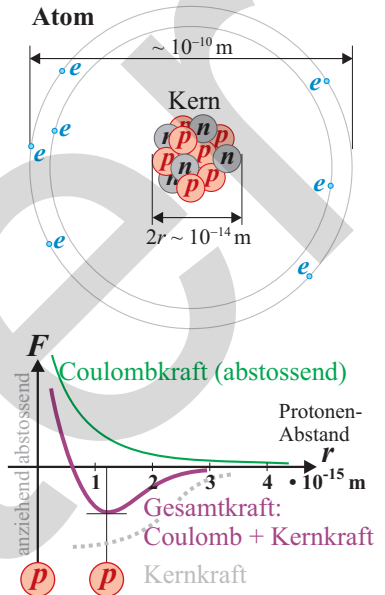
- **Bindungsenergie E_B** eines Kerns der Atommasse M_A :

$$E_B = (Z \cdot m_P + Z \cdot m_e + N \cdot m_N - M_A) \cdot c^2$$

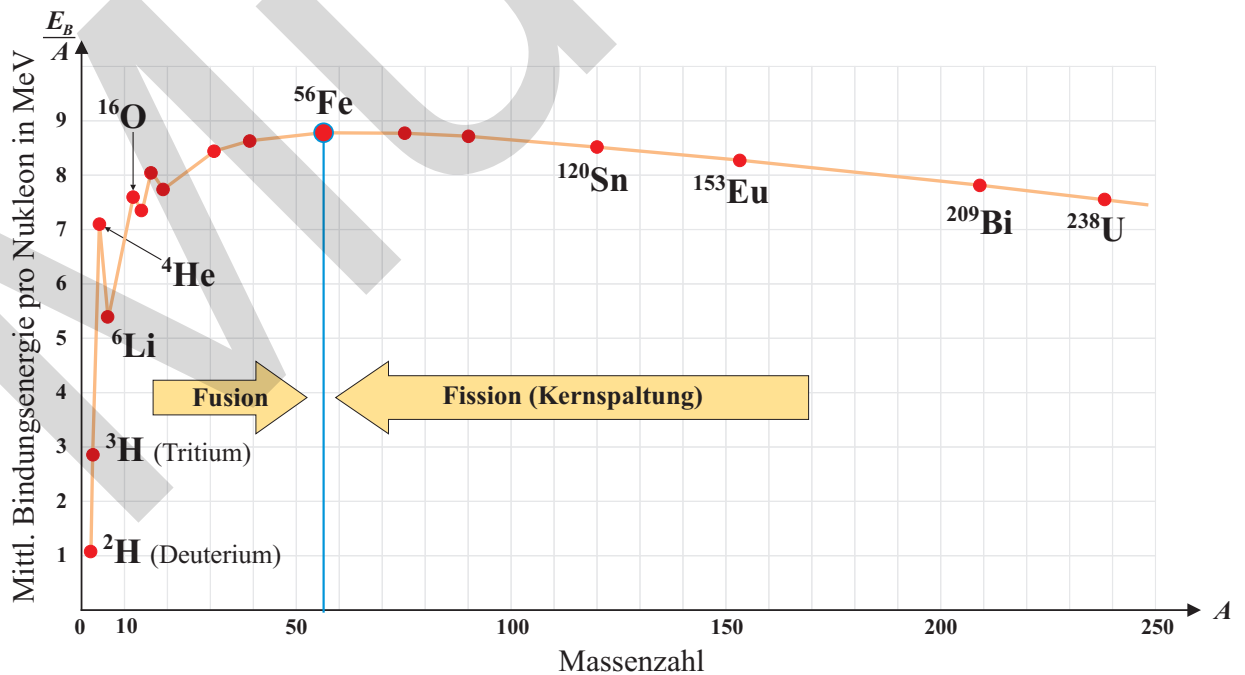
$c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$: Lichtgeschwindigkeit.

Energieeinheit in der Kernphysik ist das Elektronvolt:

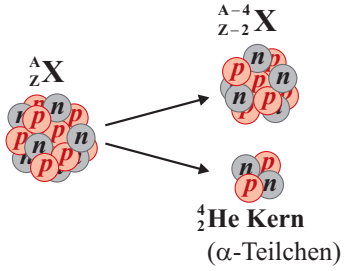
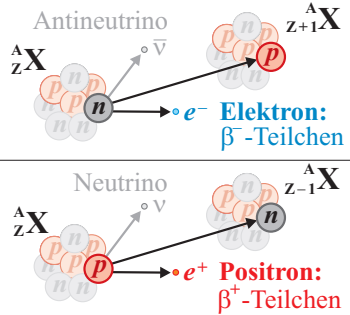
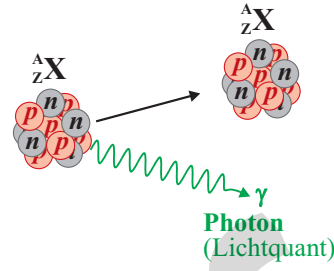
$1 \text{ eV} = 1.6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ oder $1 \text{ MeV} = 1.6022 \cdot 10^{-13} \text{ J}$.



Bindungsenergie $\frac{E_B}{A}$ pro Nukleon in Abhängigkeit der Massenzahl $A = Z + N$:



► **Radioaktivität:** Zerfall / Umwandlung eines instabilen Atomkerns A_ZX : (vgl. S. 32.)

α -Zerfall	β^- , β^+ -Zerfall	γ -Zerfall
 <p>${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X + {}^4_2\text{He Kern} \text{ (}\alpha\text{-Teilchen)}$</p>	 <p>${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}X + e^- + \bar{\nu} + E_{\text{kin}}$ ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}X + e^+ + \nu + E_{\text{kin}}$</p>	 <p>${}^A_ZX \rightarrow {}^A_ZX + \gamma + E_{\text{kin}}$</p>

Energiebilanz: $E_{\text{kin}} = (\sum m_{\text{Produkte}} - m_{\text{Mutterkern}}) \cdot c^2$

Neutrinos und Photonen haben eine vernachlässigbare Masse.

Zerfallsgesetz: $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$

$\left\{ \begin{array}{l} N(t) : \text{Anzahl Kerne zur Zeit } t \\ N_0 : \text{Anzahl Kerne zur Zeit } t = 0 \\ \lambda : \text{Zerfallskonstante [s}^{-1}\text{]} \end{array} \right.$

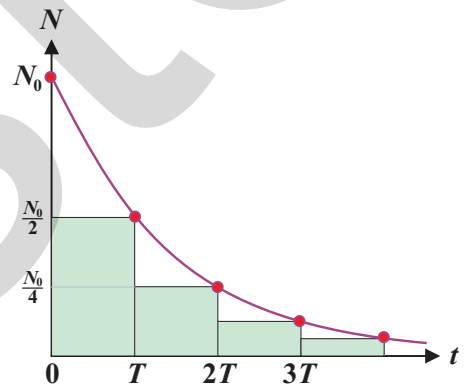
• **Halbwertszeit:** $T = \frac{\ln(2)}{\lambda}$ Zeit bis die Hälfte der vorhandenen Kerne zerfallen sind. Tabelle S. 32.

• **Mittlere Lebensdauer eines Kerns:**

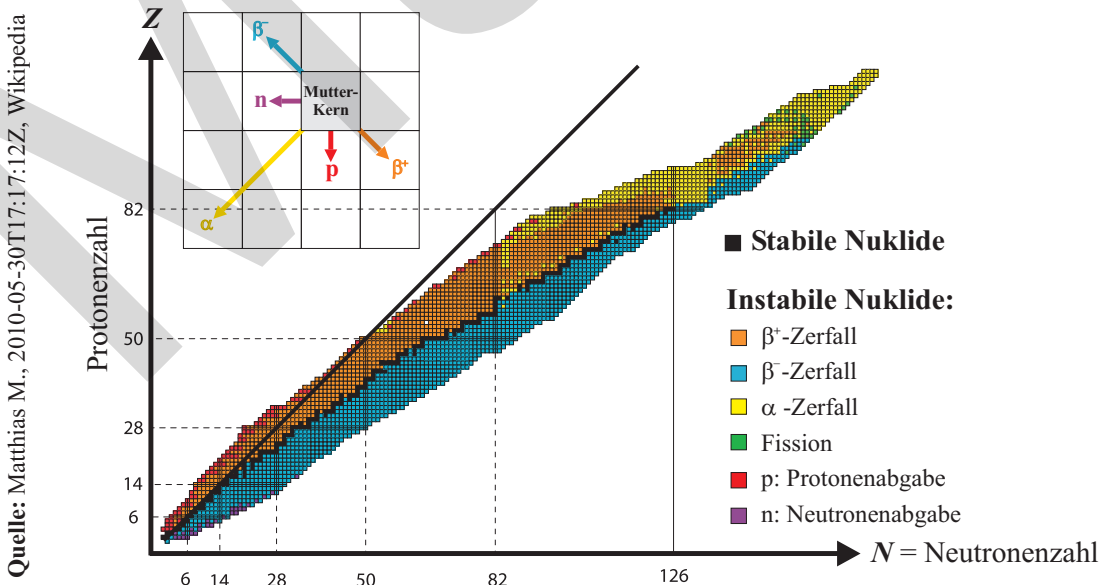
$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{\ln(2)}$

• **Aktivität:** $A(t) = \frac{N(t)}{\tau} = \lambda \cdot N(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$

Einheit: $[A(t)] = \text{s}^{-1} = \text{Bq} = \text{Bequerel}$.



Nuklidkarte: Übersicht über stabile und instabile Isotope (vgl. S. 32).



Instabile Isotope

Isotop	Symbol	Atomare Masse*	Zerfallsart	Halbwertszeit
Tritium	${}^3_1\text{H} = \text{T}$	3.016049	β^-	12.33 Jahre
Beryllium	${}^7_4\text{Be}$	7.016929	e^- -Einfang; γ	53.12 Tage
Kohlenstoff	${}^6_{11}\text{C}$	11.011434	β^+ , e^- -Einfang	20.39 Min.
Kohlenstoff	${}^{14}_6\text{C}$	14.0003242	β^-	5730 Jahre
Stickstoff	${}^{13}_7\text{N}$	13.005739	β^+	9.965 Min.
Sauerstoff	${}^{15}_8\text{O}$	15.003065	β^+ ; e^- -Einfang	122.24 s
Natrium	${}^{22}_{11}\text{Na}$	21.994437	β^+ ; e^- -Einfang; γ	2.6019 Jahre
Silizium	${}^{31}_{14}\text{Si}$	30.975363	β^- ; γ	157.3 Min.
Phosphor	${}^{31}_{15}\text{P}$	31.973907	β^-	14.262 Tage
Schwefel	${}^{35}_{16}\text{S}$	34.969032	β^-	87.32 Tage
Kalium	${}^{40}_{19}\text{K}$	39.963999	β^- ; β^+ ; γ ; e^- -Einfang	$1.28 \cdot 10^9$ Jahre
Kobalt	${}^{60}_{27}\text{Co}$	59.930791	β^- ; γ	5.2714 Jahre
Strontium	${}^{90}_{38}\text{Sr}$	89.907737	β^-	28.79 Jahre
Indium	${}^{115}_{49}\text{In}$	114.903878	β^- ; γ	$4.41 \cdot 10^{14}$ Jahre
Jod	${}^{131}_{53}\text{I}$	130.906124	β^- ; γ	8.0207 Tage
Osmium	${}^{191}_{76}\text{Os}$	190.960927	β^- ; γ	15.4 Tage
Blei	${}^{210}_{82}\text{Pb}$	209.984173	β^- ; γ ; α	22.3 Jahre
Wismut	${}^{211}_{83}\text{Bi}$	210.987258	α ; γ , β^-	2.14 Min.
Polonium	${}^{210}_{84}\text{Po}$	209.982857	α ; γ	138.376 Tage
Radon	${}^{222}_{86}\text{Rn}$	222.017570	α ; γ	3.8235 Tage
Radium	${}^{226}_{88}\text{Ra}$	226.025402	α ; γ	1600 Jahre
Thorium	${}^{232}_{90}\text{Th}$	232.038050	α ; γ	$1.405 \cdot 10^{10}$ Jahre
Uran	${}^{235}_{92}\text{U}$	235.043923	α ; γ	$7.038 \cdot 10^8$ Jahre
Uran	${}^{236}_{92}\text{U}$	236.045561	α ; γ	$2.342 \cdot 10^7$ Jahre
Uran	${}^{238}_{92}\text{U}$	238.050782	α ; γ	$4.468 \cdot 10^9$ Jahre
Uran	${}^{239}_{92}\text{U}$	239.054287	β^- ; γ	23.45 Min.
Plutonium	${}^{239}_{94}\text{Pu}$	239.052157	α ; γ	24110 Jahre
Plutonium	${}^{244}_{94}\text{Pu}$	244.064197	α	$8.08 \cdot 10^7$ Jahre

* Die Atomare Masse in [u] gilt für das neutrale Atom, einschliesslich den Z Elektronen.

11 Tabellen

Mechanische Daten

Feste Stoffe

ρ : Dichte

E : Elastizitätsmodul

σ : Zugfestigkeit

μ : Poisson-Zahl

c : Schallgeschwindigkeit

Stoff	ρ in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	E in $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$	σ in $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$	μ -	c in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Aluminium	2700	$7.1 \cdot 10^{10}$	$7.1 \cdot 10^7$	0.34	5240
Blei	11340	$\approx 1.4 \cdot 10^{10}$	-	0.44	1250
Eisen	7860	$\approx 2.19 \cdot 10^{11}$	$2.0 \cdot 10^8$	0.28	5170
Gold	19290	$8.2 \cdot 10^{10}$	-	0.42	3240
Kupfer	8920	$1.2 \cdot 10^{11}$	$2.2 \cdot 10^8$	0.35	3900
Messing	8470	$1.1 \cdot 10^{11}$	$2.9 \cdot 10^8$	0.35	3420
Nickel	8900	$2.14 \cdot 10^{10}$	$4.4 \cdot 10^8$	0.31	-
Platin	21450	$1.7 \cdot 10^{11}$	$1.4 \cdot 10^8$	0.39	-
Quarzglas	2200	$9.4 \cdot 10^{10}$	-	0.17	≈ 5000
Silber	10500	$8 \cdot 10^{10}$	$1.6 \cdot 10^8$	0.37	-
Wolfram	19300	$4.1 \cdot 10^{10}$	-	0.29	5460
Zink	7140	-	-	0.25	-
Zinn	7290	$4.0 \cdot 10^9$	-	0.33	-
Eis	917	$\approx 9.1 \cdot 10^9$	-	0.33	3250

Flüssige Stoffe

ρ : Dichte

K : Kompressionsmodul

η : Viskosität
(bei 20°C)

c : Schallgeschwindigkeit

Stoff	ρ in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	K in $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$	η in $\frac{\text{Ns}}{\text{m}^2=\text{Pa}\cdot\text{s}}$	c in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Aceton	791	-	$3.06 \cdot 10^{-4}$	1190
Benzin	≈ 750	$\approx 1.26 \cdot 10^9$	$\approx 0.65 \cdot 10^{-3}$	≈ 1295
Benzol	879	$11.25 \cdot 10^{10}$	$0.60 \cdot 10^{-3}$	1326
Ethanol	789	$9.1 \cdot 10^8$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	1170
Glycerin	1261	$26.6 \cdot 10^{10}$	1.48	1923
Öl	≈ 900	$16 \cdot 10^8$	-	-
Petroleum	850	-	$0.65 \cdot 10^{-3}$	1522
Quecksilber	13546	$253 \cdot 10^{10}$	$1.55 \cdot 10^{-3}$	1430
Wasser	998	$2.2 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{-3}$	1483

Gase

ρ : Dichte
(Normbedingungen)

η : Viskosität
(Normbedingungen)

c : Schallgeschwindigkeit

Stoff	ρ in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	η in $\frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$	c in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Argon	1.784	$2.29 \cdot 10^{-7}$	-
Butan	2.732	$7.5 \cdot 10^{-6}$	-
Freon	5.51	-	-
Helium	0.1785	-	1005
Kohlendioxid	1.977	$1.5 \cdot 10^{-7}$	268
Luft	1.293	$1.86 \cdot 10^{-7}$	344
Methan	0.717	$1.12 \cdot 10^{-7}$	445
Neon	0.9	-	-
Sauerstoff	1.429	-	326
Stickstoff	1.25	-	337
Wasserstoff	0.0899	-	1310

Haft- und Gleitreibungszahlen :

Stoff	μ_H	μ_G	μ_R
Holz auf Holz	0.6	0.4	-
Stahl auf Stahl	0.15	0.1	≈ 0.002
Gummi auf Teer	1.0	0.6	≈ 0.02
Stahl auf Eis	0.027	0.014	-

Thermische Daten

Feste Stoffe

α : Linearer Ausdehnungskoeffizient L_f : Spezifische Schmelzwärme
 c : Spezifische Wärmekapazität λ : Wärmeleitfähigkeit
 T_{SMP} : Schmelzpunkt (bei Normdruck)

Stoff	α in $\frac{1}{K}$	c in $\frac{J}{kgK}$	T_{SMP} in $^{\circ}C$	L_f in $\frac{J}{kg}$	λ in $\frac{W}{mK}$
Aluminium	$23.8 \cdot 10^{-6}$	896	660.1	$3.97 \cdot 10^5$	239
Blei	$31.3 \cdot 10^{-6}$	129	327.4	$0.23 \cdot 10^5$	34.8
Eisen	$12.0 \cdot 10^{-6}$	450	1535	$2.77 \cdot 10^5$	80
Gold	$14.3 \cdot 10^{-6}$	129	1063	$0.64 \cdot 10^5$	312
Kupfer	$16.8 \cdot 10^{-6}$	383	1083	$2.05 \cdot 10^5$	390
Messing	$18 \cdot 10^{-6}$	380	905	$1.6 \cdot 10^5$	79
Nickel	$12.8 \cdot 10^{-6}$	448	1453	$3.03 \cdot 10^5$	81
Platin	$9.0 \cdot 10^{-6}$	133	1769	$1.11 \cdot 10^5$	70.1
Quarzglas	$4.5 \cdot 10^{-7}$	710	1610		1.36
Silber	$19.7 \cdot 10^{-6}$	235	960.8	$1.045 \cdot 10^5$	428
Wolfram	$4.3 \cdot 10^{-6}$	134	3380	$1.92 \cdot 10^5$	177
Zink	$26.3 \cdot 10^{-6}$	385	419.5	$1.11 \cdot 10^5$	112
Zinn	$27.0 \cdot 10^{-6}$	227	231.9	$0.596 \cdot 10^5$	64
Eis	$37.0 \cdot 10^{-6}$	2100	0	$3.338 \cdot 10^5$	2.2

Flüssige Stoffe

γ : Volumen- Ausdehnungskoeffizient L_f : Spezifische Schmelzwärme
 c : Spezifische Wärmekapazität L_v : Spezifische Verdampfungswärme
 T_{SMP} : Schmelzpunkt (bei Normdruck) λ : Wärmeleitfähigkeit
 T_{SDP} : Siedepunkt (bei Normdruck)

Stoff	γ in $\frac{1}{K}$	c in $\frac{J}{kgK}$	T_{SMP} in $^{\circ}C$	T_{SDP} in $^{\circ}C$	L_f in $\frac{J}{kg}$	L_v in $\frac{J}{kg}$	λ in $\frac{W}{mK}$
Aceton	$1.49 \cdot 10^{-3}$	2160	-94.86	56.25	$9.8 \cdot 10^4$	$5.25 \cdot 10^5$	0.162
Benzin	$\approx 1.0 \cdot 10^{-3}$	≈ 2020	≈ -45	-	-	-	0.140
Benzol	$1.23 \cdot 10^{-3}$	1725	5.53	80.1	$1.28 \cdot 10^5$	$3.94 \cdot 10^5$	0.148
Ethanol	$1.1 \cdot 10^{-3}$	2430	-114.5	78.33	$1.08 \cdot 10^5$	$8.4 \cdot 10^5$	0.165
Glycerin	$5.0 \cdot 10^{-4}$	2390	18.4	290.5	$2.01 \cdot 10^5$	$8.54 \cdot 10^5$	0.285
Quecksilber	$1.84 \cdot 10^{-4}$	139	-38.87	356.58	$1.18 \cdot 10^4$	$2.85 \cdot 10^5$	8.2
Wasser	$2.07 \cdot 10^{-4}$	4182	0	100	$3.338 \cdot 10^5$	$2.256 \cdot 10^6$	0.598

Gase

- c_p : Spezifische Wärmekapazität bei $p = \text{Konstant}$ T_{SMP} : Schmelzpunkt (Normdruck)
 C_p : Molare Wärmekapazität bei $p = \text{Konstant}$ T_{SDP} : Siedepunkt (Normdruck)
 $\kappa = \frac{C_p}{C_V}$: Isentropenexponent a, b : Van-der-Waals Konstanten

Stoff	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$	C_p in $\frac{\text{J}}{\text{mol K}}$	κ -	T_{SMP} in $^{\circ}\text{C}$	T_{SDP} in $^{\circ}\text{C}$	a in $\frac{\text{Nm}^4}{\text{mol}^2}$	b in $\frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$
Argon	523	20.9	1.67	-189.38	-185.88	0.423	$3.71 \cdot 10^{-5}$
Freon	502	60.7	1.14	-158.2	-29.8	0.837	$7.75 \cdot 10^{-5}$
Helium	5230	20.9	1.63	-	-268.94	0.0034	$2.36 \cdot 10^{-5}$
Kohlendioxid	837	36.8	1.293	-	-78.45	0.366	$4.28 \cdot 10^{-5}$
Luft	1005	29.1	1.402	-	-191.4	0.135	$3.65 \cdot 10^{-5}$
Methan	2219	35.6	1.308	-182.5	-161.4	0.229	$4.28 \cdot 10^{-5}$
Neon	1031	20.8	1.64	-248.61	-246.06	0.0217	$1.74 \cdot 10^{-5}$
Sauerstoff	917	29.3	1.398	-218.79	-182.97	0.138	$3.17 \cdot 10^{-5}$
Stickstoff	1038	29.1	1.401	-210.0	-195.82	0.137	$3.87 \cdot 10^{-5}$
Wasserdampf	1863	33.6	1.33	0	100	0.553	$3.04 \cdot 10^{-5}$
Wasserstoff	14320	28.9	1.41	-259.2	-252.77	0.0248	$2.66 \cdot 10^{-5}$

Heizwerte

Stoff	H in $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$
Steinkohle (Anthrazit)	$31 \cdot 10^6$
Braunkohle (hart)	$\approx 17 \cdot 10^6$
Holz (trocken)	$\approx 16 \cdot 10^6$
Holzkohle	$\approx 31 \cdot 10^6$
Erdöl	$\approx 41 \cdot 10^6$
Benzin, Diesel, Heizöl	$\approx 42 \cdot 10^6$

Stoff	H in $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$
Ethanol	$27 \cdot 10^6$
Erdgas	$\approx 35 \cdot 10^6$
Methan	$35.9 \cdot 10^6$
Ethan	$64.5 \cdot 10^6$
Stadtgas	$\approx 20 \cdot 10^6$
Wasserstoff	$10.8 \cdot 10^6$

Elektrische, magnetische und optische Daten

Elektrische Leiter (Metalle)

ρ : Spezifischer Widerstand (bei 20°C) μ_r : magnetische Permeabilität
 α : Temperaturkoeffizient W_A : Austrittsarbeit

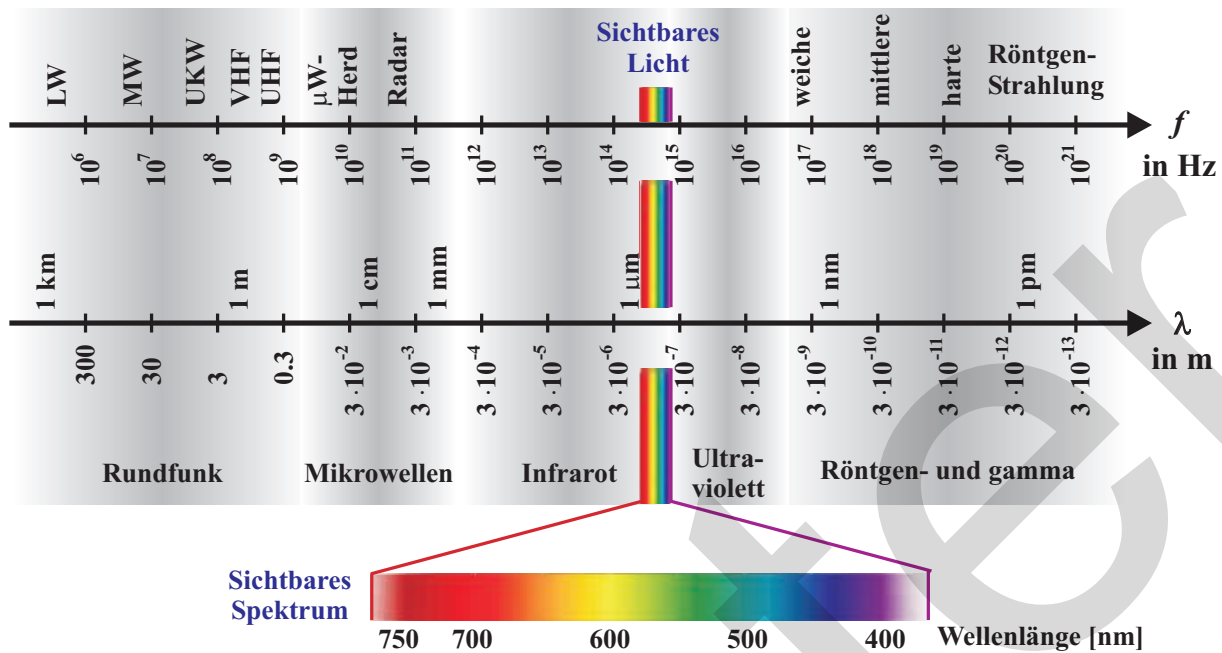
Stoff	ρ in $\Omega \cdot \text{m}$	α in $\frac{1}{\text{K}}$	μ_r -	W_A in eV
Aluminium	$2.82 \cdot 10^{-8}$	$+4.29 \cdot 10^{-3}$	$1 + 2.1 \cdot 10^{-5}$ (Paramagn.)	4.2
Blei	$2.2 \cdot 10^{-7}$	$+3.9 \cdot 10^{-3}$	Diamagnetisch	-
Cäsium				1.87
Eisen	$1 \cdot 10^{-7}$	$+5 \cdot 10^{-3}$	≈ 5800 (Ferromagnet)	-
Germanium	0.14	-	-	-
Gold	$2.2 \cdot 10^{-8}$	$+4 \cdot 10^{-3}$	$1 - 3.4 \cdot 10^{-5}$ (Diamagn.)	4.83
Kalium	-	-	-	2.15
Kupfer	$1.7 \cdot 10^{-8}$	$+6.8 \cdot 10^{-3}$	$1 - 6.4 \cdot 10^{-6}$ (Diamagn.)	4.84
Messing	$7 \cdot 10^{-8}$	$+2 \cdot 10^{-3}$		-
Nickel	$7.8 \cdot 10^{-8}$	$+6 \cdot 10^{-3}$	≈ 1120 (Ferromagnet)	5.09
Platin	$1 \cdot 10^{-7}$	$+3 \cdot 10^{-3}$	$1 + 2.8 \cdot 10^{-4}$ (Paramagn.)	5.3
Silber	$1.59 \cdot 10^{-8}$	$+3.8 \cdot 10^{-3}$	-	4.43
Wolfram	$5.3 \cdot 10^{-8}$	$+4.8 \cdot 10^{-3}$	-	4.57
Zink	$5.8 \cdot 10^{-8}$	$+3.7 \cdot 10^{-3}$	-	4.34

Elektrische Isolatoren, transparente Stoffe

ρ : Spezifischer Widerstand (bei 20°C) n : Brechungszahl (gegen Vakuum)
 ϵ_r : Dielektrizitätszahl

Stoff	ρ in $\Omega \cdot \text{m}$	ϵ_r -	n -
Silicium (rein)	$1.7 \cdot 10^4$		-
Glimmer	$5 \cdot 10^{14}$	7	-
Salz (NaCl)	-		1.54
Quarzglas	$3 \cdot 10^{14}$	4	1.46
Diamant	-		2.42
Plexiglas	$1 \cdot 10^{13}$	3.4	1.5
Paraffin	$3 \cdot 10^{16}$	2.1	-
Teflon	$1 \cdot 10^{13}$	2	-
Benzol	-	2.3	1.49
Ethanol	-	-	1.36
Glycerin	-		1.47
Wasser	-	80	1.33
Eis	-		1.31
Luft	-	1.0006	1.000272

Elektromagnetisches Spektrum



Astronomische Daten

- m : Masse des Himmelskörpers
 r : Radius des Himmelskörpers
 T_U : Umlaufzeit um Kraftzentrum
 a, R : grosse Bahnhalbachse bzw. Umlaufradius
 T_{Rot} : Umlaufzeit Eigendrehung
 g : Fallbeschleunigung (Ortsfaktor)
 v_F : Fluchtgeschwindigkeit

Himmels-Körper	m in kg	r in m	T_U in Tagen	a bzw. R in m	T_{Rot}	g in $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	v_F in $\frac{\text{km}}{\text{s}}$
Merkur	$3.31 \cdot 10^{23}$	$2.425 \cdot 10^6$	87.969	$5.79 \cdot 10^{10}$	58.65 d	3.63	4.2
Venus	$4.87 \cdot 10^{24}$	$6.070 \cdot 10^6$	224.701	$1.082 \cdot 10^{11}$	243 d	8.60	10.3
Erde	$5.98 \cdot 10^{24}$	$6.378 \cdot 10^6$	365.256	$1.496 \cdot 10^{11}$	23.93 h	9.81	11.2
Mars	$6.42 \cdot 10^{23}$	$3.395 \cdot 10^6$	686.98	$2.279 \cdot 10^{11}$	24.63 h	3.74	5.0
Jupiter	$1.90 \cdot 10^{27}$	$7.13 \cdot 10^7$	4332.57	$7.783 \cdot 10^{11}$	9.48 h	25.9	61
Saturn	$5.69 \cdot 10^{26}$	$6.01 \cdot 10^7$	10759.22	$1.429 \cdot 10^{12}$	10.23 h	11.3	37
Uranus	$8.69 \cdot 10^{25}$	$2.56 \cdot 10^7$	30685.40	$2.875 \cdot 10^{12}$	17.2 h	9.0	22
Neptun	$1.03 \cdot 10^{26}$	$2.43 \cdot 10^7$	60189	$4.504 \cdot 10^{12}$	15.8 h	11.5	24
Mond	$7.35 \cdot 10^{22}$	$1.74 \cdot 10^6$	27.32	$3.844 \cdot 10^8$		1.622	2.38
Sonne	$1.99 \cdot 10^{30}$	$6.96 \cdot 10^8$	-	-	-	273.98	617.7

Index

- Adiabate, 19
- Aktivität, 31
- Amontons, 19
- Amplitude, 12, 13, 20, 27
- Anode, 22
- Arbeit, Energie, 10, 11, 21, 28, 29
- Atom, Atomkern, 28, 30
- Auftrieb, 8
- Auslenkung, Elongation, 12, 13
- Austrittsarbeit, 28
- Avogadrozahl, 19, 22

- B**arometerformel, 8
- Bernoulli, 8
- Beschleunigung, 4
- Beugung, 16
- Bildhöhe, -Weite, 15
- Bindungsenergie, 28, 30
- Biot-Savart-Kraft, 23
- Blindwiderstand, 21, 22, 24, 26
- Bohr'sches Atommodell, 28
- Boltzmann-Konstante, 18
- Boyle-Mariotte, 19
- Brechungsgesetz, 15
- Brennpunkt, 11, 15
- Brewsterwinkel, 15

- C**arnot Kreisprozess, 19
- Celsius, 17
- Coulomb'sches Gesetz, 20

- D**e Broglie-Wellenlänge, 28
- Dichte, 8, 33
- Differentialgleichung, 12
- Diffusion, 17
- Dioptrie, 15
- Dopplereffekt, 14
- Drehimpuls, Drallsatz, 7
- Drehmoment, 7
- Druck, 8, 18, 19

- E**ffektivspannung, Effektivstrom, 20, 21
- Eigenfrequenz, 14
- Einstein'sche Postulate, 29
- Elastizitätsmodul, 10, 33
- Elektrisches Feld, 20
- Elektrisches Potential, 20
- Elektrizität, 20
- Elektrolyse, 22
- Elektromagnetische Welle, 13
- Elementarladung, 20
- Elementarwellen, 16
- Ellipse, 11, 37
- Elongation, Auslenkung, 12, 13
- Energie, Arbeit, 10, 11, 21, 28–30
- Energieerhaltung, 11
- Entropie, 18
- Erstarrungswärme, 17

- F**allbeschleunigung, 5, 6
- Feder, Federkonstante, 6, 10, 12
- Filter (R-L-C), 27
- Fluid (Flüssigkeit), 8
- Fluid (Flüssigkeit, Gas), 8
- Frequenz, 5, 12, 13, 27, 28

- G**alilei-Transformation, 29
- Galileo Galilei, 5
- Gasgleichung, 19
- Gay-Lussac, 19
- Gedämpfte harm. Schwingung, 12
- Gegenstandshöhe, -Weite, 15
- Geschwindigkeit, 4–8, 10, 12, 13
- Gewichtskraft, 6
- Gitter (Optik), 16
- Gleichförmige Bewegung, 4
- Gleichspannung, Gleichstrom, 20
- Gravitationskraft, 6
- Grundfrequenz, Grundschiwingung, 14

- H**agen-Poiseuille, 8
- Halbwertszeit, 31
- Hangabtriebskraft, 6
- Harmonische Schwingung, 12
- Harmonische Welle, 13
- Hauptsätze (Thermodyn.), 18
- Hebelgesetz, 7
- Heisenberg'sche Unschärferelation, 28
- Heizwert, 17, 35
- Hohlspiegel, 15
- Hooksches Gesetz, 10
- Horizontaler Wurf, 5
- Hubarbeit, 10
- Huygens'sches Prinzip, 16
- Hydrodynamik, 8
- Hydrostatischer Druck, 8

- I**deales Gas, 19
- Impedanz, 21, 26, 27
- Impuls, 7, 28, 29
- Induktionsgesetz, 24
- Induktivität, 24, 26
- Inertialsystem, 29
- Innere Energie, 17, 18
- Isotope, 31

- K**apazität, 22
- Kathode, 22
- Kelvin, 17
- Kepler'sche Gesetze, 11
- Kernphysik, Kernkraft, 30
- Kinetische Energie, 10, 18
- Kirchhoff'sche Gesetze, 21
- Knotenregel, 21
- Kompression, 10, 18
- Kompressionsmodul, 10, 33
- Kondensationswärme, 17, 34

Kondensator, 22, 26
 Konkav- Konvexlinse, 15
 Kontinuitätsgleichung, 8
 Kraft, 6–9, 23
 Kreisbewegung, 5

Längenausdehnung, 17, 34
 Längenkontraktion, 29
 Ladung, 20, 22, 26, 30
 Leistung, 11, 21
 Lenzsche Regel, 24
 Lichtgeschwindigkeit, 13, 15, 29
 Linsengleichung, 15
 Longitudinalwelle, 13
 Lorentz-Transformation, 29
 Lorentzkraft, 23
 Luft (Druck, Dichte), 8

Magnetfeld (Magn. Flussdichte), 23
 Magnetischer Fluss, 24
 Maschenregel, 21
 Masse (relativistisch), 29
 Materiewellen, 28
 Molmasse, 19

Neutron, Neutrino, 30, 31
 Normalkraft, 6
 Normbedingungen, 8
 Nukleon, 30
 Nuklidkarte, 31

Ohmsches Gesetz, 21
 Optik, 15
 Ort, 4
 Ortsfaktor, 5, 6
 Oszillator, 12, 27

Parallel, 6, 21, 22
 Periodendauer, 5, 6, 12, 13, 20
 Phase, 12, 13, 20, 27
 Photon, 28, 31
 Planeten, 11, 37
 Plattenkondensator, 22
 Poisson-Zahl, 10, 33
 Potentielle Energie, 10
 Proton, 30

Quantenphysik, 28
 Querkontraktion, 10

R-L-C-Stromkreise, 25–27
 Radioaktivität, 31
 Reflexion, 13, 15
 Reibungskraft, 6, 9, 12, 34
 Relativitätstheorie, 29
 Resonanz, 12, 27
 RLC-Schwingkreis, 27
 Rotationsenergie, 10

Saite, 14
 Sammellinse, 15
 Schallgeschwindigkeit, 13, 33

Schallintensität, 14
 Scheitelspannung, Scheitelstrom, 20, 21, 27
 Schiefe Ebene, 6
 Schiefer Wurf, 5
 Schmelzpunkt, 34
 Schmelzwärme, 17, 34
 Schrödingergleichung, 28
 Schubspannung, 8
 Schwebung, 14
 Schwerpunkt, 9
 Schwingkreis, RLC, 27
 Schwingung, 12
 Serie, 6, 21, 22
 Siedepunkt, 34
 Spalt (Optik), 16
 Spannarbeit, Feder, 10
 Spannkraft, 6
 Spannung, 20
 Spezifische Schmelz-, Verdampfungswärme, 17, 34
 Spezifische Wärmekapazität, 17, 34
 Spezifischer Widerstand, 21
 Spule, Induktivität, 24
 Stefan-Boltzmann, 18
 Stehende Welle, 13, 14
 Steiner, Satz von, 9
 Stossprozesse, 7
 Streulinse, 15
 Stromkreise (R, L, C), 25–27
 Stromstärke, 20–23

Temperatur, Thermodynamik, 17–19
 Totalreflexion, 15
 Trägheitsmoment, 9
 Transformator, 25
 Transversalwelle, 13

Van der Waals Gas, 19
 Verbrennungswärme, 17, 34
 Verdampfungswärme, 17, 34
 Vergrößerung, 15
 Viskosität, 8, 33
 Volumen, Volumenausdehnung, 8, 10, 17–19
 Volumenausdehnung, 34

Wärme, -kapazität, -leitung, 17, 34
 Wärmearbeitsmaschine, 18
 Wärmekapazität, 17, 34
 Wärmestrahlung, 18
 Wasserstoff, 28
 Wechselstrom, Wechselspannung, 20, 21, 26, 27
 Wellen, 13
 Widerstand, 21
 Winkelgeschwindigkeit, 5, 6, 12, 13, 20
 Wirkungsgrad, 11, 18, 19
 Wirkwiderstand, Wirkleistung, 21
 Wurfbewegungen, Wurfparabel, 5

Zeitdilatation, 29
 Zentralkraft, Zentralbeschleunigung, 5, 6
 Zugspannung, Zugfestigkeit, 10, 33

Periodensystem

1a

Wasserstoff		
1	2.2	-259.3 -252.9
H₁		
+1, -1		
1.00794		

2a

Lithium		Beryllium	
2	0.97 180.5	2	1.47 1287
8	1342	8	2471
Li₃		Be₄	
+1		+2	
6.941		9.0122	

Natrium		Magnesium	
2	1.01 97.8	2	1.23 650
8	883	8	1090
Na₁₁		Mg₁₂	
+1		+2	
22.9898		24.3050	

3b

4b

5b

6b

7b

8b

8b

Kalium		Calcium		Scandium	
2	0.91 63.38	2	1.04 842	2	1.20 1541
8	759	8	1484	8	2836
K₁₉		Ca₂₀		Sc₂₁	
+1		+2		+3	
39.0983		40.078		44.9559	

Titan		Vanadium		Chrom		Mangan		Eisen		Kobalt	
2	1.32 1668	2	1.45 1910	2	1.56 1907	2	1.60 1246	2	1.64 1538	2	1.70 1495
8	3287	8	3407	8	2671	8	2061	8	2861	8	2927
Ti₂₂		V₂₃		Cr₂₄		Mn₂₅		Fe₂₆		Co₂₇	
+2, +3, +4		+2 bis +5		+2, +3, +6		+2, +3, +4		+2, +3		+2, +3	
47.867		50.9415		51.9961		54.9380		55.845		58.933	

Rubidium		Strontium		Yttrium	
2	0.89 39.31	2	0.99 777	2	1.11 1522
8	688	8	1382	8	3345
Rb₃₇		Sr₃₈		Y₃₉	
+1		+2		+3	
85.4678		87.62		88.906	

Zirkon		Niob		Molybdän		Technetium		Ruthenium		Rhodium	
2	1.22 1855	2	1.23 2477	2	1.30 2623	2	1.36 2157	2	1.42 2334	2	1.45 1964
8	4409	8	4744	8	4639	8	4265	8	4150	8	3695
Zr₄₀		Nb₄₁		Mo₄₂		Tc₄₃		Ru₄₄		Rh₄₅	
+4		+3, +5		+6		+4, +6, +7		+3		+3	
91.224		92.906		95.94		[98]		101.07		102.906	

Caesium		Barium		Lanthan	
2	0.86 28.44	2	0.97 727	2	1.10 918
8	671	8	1897	8	3464
Cs₅₅		Ba₅₆		La₅₇	
+1		+2		+3	
132.905		137.327		138.906	

Hafnium		Tantal		Wolfram		Rhenium		Osmium		Iridium	
2	1.23 2333	2	1.33 3017	2	1.40 3422	2	1.46 3186	2	1.52 3033	2	1.55 2446
8	4603	8	5458	8	5555	8	5596	8	5012	8	4428
Hf₇₂		Ta₇₃		W₇₄		Re₇₅		Os₇₆		Ir₇₇	
+4		+5		+2, +3, +6		+4, +6, +7		+3, +4		+3, +4	
178.49		180.948		183.84		186.207		190.23		192.217	

Francium		Radium		Actinium	
2	0.86 27	2	0.97 700	2	1.051
8	-	8	3198	8	3198
Fr₈₇		Ra₈₈		Ac₈₉	
+1		+2		+3	
[223]		[226]		[227]	

Rutherfordium		Dubnium		Seaborgium		Bohrium		Hassium		Meitnerium	
2	-	2	-	2	-	2	-	2	-	2	-
8	-	8	-	8	-	8	-	8	-	8	-
Rf₁₀₄		Db₁₀₅		Sg₁₀₆		Bh₁₀₇		Hs₁₀₈		Mt₁₀₉	
+4		+4		+4		+4		+4		+4	
[261]		[262]		[266]		[264]		[264]		[268]	

Cerium		Praseodym		Neodym		Promethium		Samarium		Europium	
2	- 798	2	- 931	2	- 1021	2	- 1042	2	- 1074	2	- 822
8	3443	8	3520	8	3074	8	3000	8	1794	8	1596
Ce₅₈		Pr₅₉		Nd₆₀		Pm₆₁		Sm₆₂		Eu₆₃	
+3, +4		+3		+3		+3		+2, +3		+2, +3	
140.116		140.908		144.24		[145]		150.36		151.96	

Lanthaniden

Thorium		Protactin		Uran		Neptunium		Plutonium		Americium	
2	- 1750	2	- 1572	2	- 1135	2	- 644	2	- 640	2	- 1176
8	4788	8	-	8	4131	8	-	8	3228	8	2011
Th₉₀		Pa₉₁		U₉₂		Np₉₃		Pu₉₄		Am₉₅	
+4		+5, +4		+3 bis +6		+3 bis +6		+3 bis +6		+3 bis +6	
232.038		231.036		238.029		[237]		[244]		[243]	

Actiniden

Thorium		Protactin		Uran		Neptunium		Plutonium		Americium	
2	- 1750	2	- 1572	2	- 1135	2	- 644	2	- 640	2	- 1176
8	4788	8	-	8	4131	8	-	8	3228	8	2011
Th₉₀		Pa₉₁		U₉₂		Np₉₃		Pu₉₄		Am₉₅	
+4		+5, +4		+3 bis +6		+3 bis +6		+3 bis +6		+3 bis +6	
232.038		231.036		238.029		[237]		[244]		[243]	

EN: Elektronegativität
 E_Z: Element der Ordnungszahl Z
 K, L, ...: Elektronen-Konfiguration

SMP: Schmelzpunkt in °C
 SDP: Siedepunkt in °C
 OX: Oxidationszahlen
 At. Gew.: Atomgewicht in u

Element			
K	EN	SMP	SDP
L			
M			
N			
O			
P			
Q			
E_Z			
OX			
At. gew.			