

## Gemeinsame Abituraufgabenpools der Länder

# Aufgaben für die Fächer Mathematik, Chemie und Physik

## Mathematisch-naturwissenschaftliche Formelsammlung

Als Hilfsmittel für die Bearbeitung der Aufgaben des Pools für die Fächer Mathematik, Chemie und Physik ist – neben dem jeweiligen digitalen Hilfsmittel – eine mathematisch-naturwissenschaftliche Formelsammlung vorgesehen, die nur die im vorliegenden Dokument enthaltenen Inhalte hat.<sup>1</sup>

Das Dokument stellt keine Formelsammlung im klassischen Sinn dar; insbesondere werden im Allgemeinen Voraussetzungen für die Gültigkeit von Formeln nicht genannt und im Abschnitt zum Fach Mathematik Bezeichnungen nicht erklärt.

---

<sup>1</sup> Die Möglichkeit der Verwendung anderer Formeldokumente im Unterricht wird durch diese Formelsammlung nicht berührt.

## Inhaltsverzeichnis

---

Inhaltsverzeichnis	2
1 Mathematik	3
1.1 Grundlagen	3
1.2 Analysis	5
1.3 Analytische Geometrie/Lineare Algebra	6
1.4 Stochastik	7
2 Chemie	9
2.1 Allgemeine Formeln	9
2.2 Gleichgewichtsreaktionen	10
2.3 Protonenübergänge	10
2.4 Elektronenübergänge	12
2.5 Energetische und kinetische Aspekte chemischer Reaktionen	13
2.6 Qualitative Analyse – Chromatografie	14
2.7 Quantitative und instrumentelle Analyse	14
3 Physik	15
3.1 Mechanik	15
3.2 Elektrizitätslehre und Magnetismus	24
3.3 Optik	34
3.4 Quantenphysik und Materie	36
3.5 Wärmelehre	38
3.6 Spezielle Relativitätstheorie	40
3.7 Kernphysik	41
3.8 Astrophysik	43
4 Anhang	47
4.1 Größen, Einheiten und ihre Beziehungen untereinander	47
4.2 Astronomische Entfernungsangaben	50
4.3 Vorsätze bei Einheiten	50
4.4 Tabellierte Werte	50

# 1 Mathematik

## 1.1 Grundlagen

### Ähnlichkeit zweier Dreiecke

Die folgenden Aussagen zu zwei Dreiecken sind äquivalent:

- ◆ Die Dreiecke sind ähnlich.
- ◆ Die Größen der Winkel des einen Dreiecks stimmen mit den Größen der Winkel des anderen Dreiecks überein.
- ◆ Die Verhältnisse der Seitenlängen des einen Dreiecks stimmen mit den Verhältnissen der Seitenlängen des anderen Dreiecks überein.

### Binomische Formeln

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

$$a^2 - 2ab + b^2 = (a - b)^2$$

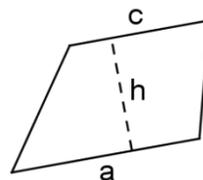
$$a^2 - b^2 = (a + b) \cdot (a - b)$$

### Maße von Figuren

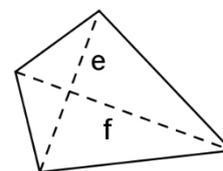
Dreieck  
 $A = \frac{1}{2} \cdot g \cdot h$

Parallelogramm<sup>2</sup>  
 $A = g \cdot h$

Trapez  
 $A = \frac{1}{2} \cdot (a + c) \cdot h$



Drachenviereck  
 $A = \frac{1}{2} \cdot e \cdot f$



Kreis  
 $A = \pi \cdot r^2$   
 $U = 2\pi \cdot r$

### Maße von Körpern

Prisma  
 $V = A_G \cdot h$

Pyramide  
 $V = \frac{1}{3} \cdot A_G \cdot h$

Zylinder  
 $V = A_G \cdot h$   
 für gerade Zylinder:  
 $A_O = 2 \cdot A_G + 2\pi \cdot r \cdot h$

Kegel  
 $V = \frac{1}{3} \cdot A_G \cdot h$   
 für gerade Kegel:  
 $A_O = A_G + \pi \cdot r \cdot m$   
 (m: Abstand der Spitze vom  
 Rand der Grundfläche)

Kugel  
 $V = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3$   
 $A_O = 4\pi \cdot r^2$

<sup>2</sup> Ein Parallelogramm mit vier gleich langen Seiten wird als Raute bezeichnet.

## Potenzen und Logarithmen

$$a^r \cdot b^r = (a \cdot b)^r$$

$$a^r \cdot a^s = a^{r+s}$$

$$(a^r)^s = a^{r \cdot s}$$

$$a^{\frac{m}{n}} = \sqrt[n]{a^m} = (\sqrt[n]{a})^m$$

$$\frac{a^r}{b^r} = \left(\frac{a}{b}\right)^r$$

$$\frac{a^r}{a^s} = a^{r-s}$$

$$a^{-r} = \frac{1}{a^r}$$

$$\log_a (b \cdot c) = \log_a b + \log_a c$$

$$\log_a \frac{b}{c} = \log_a b - \log_a c$$

$$\log_a b^r = r \cdot \log_a b$$

## Quadratische Gleichung

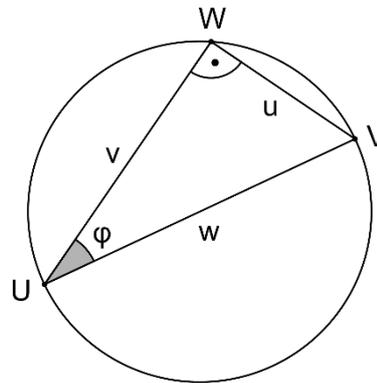
$x_1 = -\frac{p}{2} - \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}$  und  $x_2 = -\frac{p}{2} + \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}$  sind die Lösungen der Gleichung  $x^2 + px + q = 0$ .

## Rechtwinkliges Dreieck

$$\diamond \sin \varphi = \frac{u}{w}$$

$$\cos \varphi = \frac{v}{w}$$

$$\tan \varphi = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \frac{u}{v}$$



### ◆ Satz des Pythagoras

Wenn ein Dreieck rechtwinklig ist, dann gilt für die Längen  $u$  und  $v$  der beiden Katheten und die Länge  $w$  der Hypotenuse  $u^2 + v^2 = w^2$ .

Wenn für die Längen  $u$ ,  $v$  und  $w$  der Seiten eines Dreiecks  $u^2 + v^2 = w^2$  gilt, dann hat dieses Dreieck einen rechten Winkel, der der Seite mit der Länge  $w$  gegenüber liegt.

### ◆ Satz des Thales

Wenn ein Dreieck beim Eckpunkt  $W$  einen rechten Winkel hat, dann liegt  $W$  auf dem Kreis, der den Mittelpunkt der gegenüberliegenden Seite als Mittelpunkt hat und durch die beiden anderen Eckpunkte verläuft.

Wenn der Eckpunkt  $W$  eines Dreiecks auf dem Kreis liegt, der den Mittelpunkt der gegenüberliegenden Seite als Mittelpunkt hat und durch die beiden anderen Eckpunkte verläuft, dann hat dieses Dreieck bei  $W$  einen rechten Winkel.

## Symbole in Verbindung mit Mengen

$$\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$$

$$\mathbb{R}^+ = \{x \in \mathbb{R} \mid x > 0\}$$

$$[a; b] = \{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x \leq b\}$$

$$\mathbb{Z} = \{\dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots\}$$

$$\mathbb{R}_0^+ = \{x \in \mathbb{R} \mid x \geq 0\}$$

$$]a; b[ = \{x \in \mathbb{R} \mid a < x < b\}$$

$$A \cap B = \{x \mid x \in A \wedge x \in B\}$$

$$A \cup B = \{x \mid x \in A \vee x \in B\}$$

$$A \setminus B = \{x \mid x \in A \wedge x \notin B\}$$

## Trigonometrie

$$\sin(-\varphi) = -\sin \varphi$$

$$\sin(\varphi - 90^\circ) = -\cos \varphi$$

$$(\sin \varphi)^2 + (\cos \varphi)^2 = 1$$

$$\cos(-\varphi) = \cos \varphi$$

$$\cos(\varphi - 90^\circ) = \sin \varphi$$

## Winkelmaße

Beträgt die Größe eines Winkels im Gradmaß  $360^\circ$ , so beträgt sie im Bogenmaß  $2\pi$ .

## 1.2 Analysis

### Ableitung

$$f'(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h}$$

### Ableitungen ausgewählter Funktionen

Term der Funktion	Term der Ableitungsfunktion
$x^r$	$r \cdot x^{r-1}$
$\sin x$	$\cos x$
$\cos x$	$-\sin x$
$e^x$	$e^x$
$\ln x$	$\frac{1}{x}$
$-x + x \cdot \ln x$	$\ln x$

### Ableitungsregeln

Term der Funktion	Term der Ableitungsfunktion
$k \cdot u(x)$	$k \cdot u'(x)$
$u(x) + v(x)$	$u'(x) + v'(x)$
$u(x) \cdot v(x)$	$u'(x) \cdot v(x) + u(x) \cdot v'(x)$
$u(v(x))$	$u'(v(x)) \cdot v'(x)$

## Ableitung von Integralfunktionen

Für  $I(x) = \int_a^x f(t) dt$  gilt  $I'(x) = f(x)$ .

## Bestimmtes Integral

Ist  $F$  eine Stammfunktion von  $f$ , so gilt  $\int_a^b f(x) dx = [F(x)]_a^b = F(b) - F(a)$ .

## Grenzwerte

Ist  $p(x)$  ein Polynom, so gilt  $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{p(x)}{e^x} = 0$ .

Ist  $p(x)$  ein nicht konstantes Polynom, so gilt  $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\ln x}{p(x)} = 0$ .

Ist  $p(x)$  ein Polynom ohne konstanten Summanden, so gilt  $\lim_{x \rightarrow 0} (p(x) \cdot \ln x) = 0$ .

## Rotationskörper

$$V = \pi \cdot \int_a^b (f(x))^2 dx$$

## Schneiden und Berühren zweier Funktionsgraphen

Die Graphen zweier Funktionen  $f$  und  $g$  schneiden sich in einem Punkt genau dann, wenn sie diesen Punkt gemeinsam haben.

Die Graphen zweier Funktionen  $f$  und  $g$  berühren sich in einem Punkt genau dann, wenn sie diesen Punkt gemeinsam und dort die gleiche Steigung haben.

## Zueinander senkrechte Geraden

Zwei Geraden mit den Steigungen  $m_1$  und  $m_2$  sind genau dann senkrecht zueinander, wenn  $m_1 \cdot m_2 = -1$  gilt.

## 1.3 Analytische Geometrie/Lineare Algebra

### Skalarprodukt

$$\vec{a} \circ \vec{b} = a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3$$

$$\vec{a} \circ \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos \varphi$$

$$\vec{a} \circ \vec{a} = |\vec{a}|^2$$

## Ebenen

- ◆ Parameterform:  $\vec{x} = \vec{a} + \lambda \cdot \vec{u} + \mu \cdot \vec{v}$
- ◆ Koordinatenform:  $n_1x_1 + n_2x_2 + n_3x_3 + k = 0$
- ◆ Normalenform:  $\vec{n} \circ (\vec{x} - \vec{a}) = 0$

## 1.4 Stochastik

### Bedingte Wahrscheinlichkeit und stochastische Unabhängigkeit

$$P_A(B) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)}$$

Die folgenden Aussagen zu Ereignissen A und B sind äquivalent:

- ◆ A und B sind stochastisch unabhängig.
- ◆  $P_B(A) = P(A)$
- ◆  $P_A(B) = P(B)$

### Binomialkoeffizient

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

### Zufallsgrößen

- ◆ Für eine Zufallsgröße X mit den Werten  $x_1, x_2, \dots, x_n$  gilt:

- ◆ Erwartungswert:  $E(X) = \sum_{i=1}^n x_i \cdot P(X = x_i)$

- ◆ Varianz:  $\text{Var}(X) = \sum_{i=1}^n (x_i - E(X))^2 \cdot P(X = x_i)$

- ◆ Standardabweichung:  $\sqrt{\text{Var}(X)}$

- ◆ Für eine binomialverteilte Zufallsgröße X gilt:

- ◆  $P_p^n(X = k) = \binom{n}{k} \cdot p^k \cdot (1-p)^{n-k}$

- ◆ Erwartungswert:  $\mu = n \cdot p$

- ◆ Standardabweichung:  $\sigma = \sqrt{n \cdot p \cdot (1-p)}$

- ◆ Dichtefunktion einer normalverteilten Zufallsgröße:  $\varphi(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2}$

## Sigma-Regeln

Ist  $X$  eine normalverteilte Zufallsgröße, so gilt:

- ◆  $P(\mu - \sigma \leq X \leq \mu + \sigma) \approx 68,3\%$
- ◆  $P(\mu - 1,64\sigma \leq X \leq \mu + 1,64\sigma) \approx 90,0\%$
- ◆  $P(\mu - 1,96\sigma \leq X \leq \mu + 1,96\sigma) \approx 95,0\%$
- ◆  $P(\mu - 2\sigma \leq X \leq \mu + 2\sigma) \approx 95,4\%$
- ◆  $P(\mu - 2,58\sigma \leq X \leq \mu + 2,58\sigma) \approx 99,0\%$
- ◆  $P(\mu - 3\sigma \leq X \leq \mu + 3\sigma) \approx 99,7\%$

## Prognoseintervall und Konfidenzintervall

Für eine binomialverteilte Zufallsgröße gilt näherungsweise:

- ◆ Prognoseintervall:  $\left[ p - c \cdot \sqrt{\frac{p \cdot (1-p)}{n}}; p + c \cdot \sqrt{\frac{p \cdot (1-p)}{n}} \right]$
- ◆ Die Gleichung  $|h - p| = c \cdot \sqrt{\frac{p \cdot (1-p)}{n}}$  liefert die beiden Grenzen eines Konfidenzintervalls für den Wert von  $p$ .

## Signifikanztest

Wird die Nullhypothese irrtümlich abgelehnt, so bezeichnet man dies als Fehler erster Art. Das Signifikanzniveau ist der Wert, den die Wahrscheinlichkeit für den Fehler erster Art nicht überschreiten soll.

Wird die Nullhypothese irrtümlich nicht abgelehnt, so bezeichnet man dies als Fehler zweiter Art.

## 2 Chemie

---

### 2.1 Allgemeine Formeln

---

#### Avogadro-Konstante

$$N_A = \frac{N}{n}$$

$N_A$ : Avogadro-Konstante;  
 $N$ : Anzahl der Teilchen;  $n$ : Stoffmenge

#### Molare Masse

$$M = \frac{m}{n}$$

$M$ : molare Masse;  $m$ : Masse;  
 $n$ : Stoffmenge

#### Molares Volumen

$$V_m = \frac{V}{n}$$

$V_m$ : molares Volumen;  $V$ : Volumen;  
 $n$ : Stoffmenge

#### Allgemeine Gasgleichung

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

$p$ : Druck;  $V$ : Volumen;  $n$ : Stoffmenge;  
 $R$ : ideale Gaskonstante;  $T$ : Temperatur

#### Stoffmengenkonzentration

$$c(A) = \frac{n(A)}{V(\text{Lsg})}$$

$c(A)$ : Stoffmengenkonzentration der Teilchen A;  
 $n(A)$ : Stoffmenge der Teilchen A;  
 $V(\text{Lsg})$ : Volumen der Lösung

#### Massenkonzentration

$$\beta(A) = \frac{m(A)}{V(\text{Lsg})}$$

$\beta(A)$ : Massenkonzentration des Bestandteils A;  
 $m(A)$ : Masse des Bestandteils A;  
 $V(\text{Lsg})$ : Volumen der Lösung

#### Massenanteil

$$\omega(A) = \frac{m(A)}{m(\text{Gem})}$$

$\omega(A)$ : Massenanteil des Bestandteils A;  
 $m(A)$ : Masse des Bestandteils A;  
 $m(\text{Gem})$ : Masse des Gemisches

## Volumenanteil

$$\varphi(A) = \frac{V(A)}{V(A) + V(B)}$$

$\varphi(A)$ : Volumenanteil des Bestandteils A;  
 $V(A)$ : Volumen des Bestandteils A;  
 $V(B)$ : Volumen des Bestandteils B

## 2.2 Gleichgewichtsreaktionen

### Massenwirkungsgesetz

Für eine allgemeine Reaktion  $aA + bB \rightleftharpoons cC + dD$  gilt:

$$K_c = \frac{c^c(C) \cdot c^d(D)}{c^a(A) \cdot c^b(B)}$$

$K_c$ : Gleichgewichtskonstante;  
 $c$ : Stoffmengenkonzentration;  
 $a, b, c, d$ : stöchiometrische Koeffizienten

### Löslichkeitsprodukt

Für  $A_m B_n \rightleftharpoons m A^{n+} + n B^{m-}$  gilt:

$$K_L = c^m(A^{n+}) \cdot c^n(B^{m-})$$

$$pK_L = -\lg\{K_L\}$$

$K_L$ : Löslichkeitsprodukt;  
 $c(A^{n+})$ : Stoffmengenkonzentration des Kations;  
 $n$ : Anzahl der positiven Ladungen, stöchiometrischer Koeffizient;  
 $c(B^{m-})$ : Stoffmengenkonzentration des Anions;  
 $m$ : Anzahl der negativen Ladungen, stöchiometrischer Koeffizient;  
 $\{K_L\}$ : Zahlenwert von  $K_L$

## 2.3 Protonenübergänge

### Ionenprodukt des Wassers

$$K_W = c(H_3O^+) \cdot c(OH^-)$$

$$pK_W = -\lg\{K_W\}$$

$$pK_W = pH + pOH$$

$K_W$ : Ionenprodukt des Wassers;  
 $\{K_W\}$ : Zahlenwert von  $K_W$ ;  
 $c$ : Stoffmengenkonzentration

### pH-Wert und pOH-Wert

$$\text{pH} = -\lg\{c(\text{H}_3\text{O}^+)\}$$

$$\text{pOH} = -\lg\{c(\text{OH}^-)\}$$

$c$  : Stoffmengenkonzentration;

$\{c(\text{H}_3\text{O}^+)\}$  : Zahlenwert von  $c(\text{H}_3\text{O}^+)$ ;

$\{c(\text{OH}^-)\}$  : Zahlenwert von  $c(\text{OH}^-)$

### Säurekonstante und Säureexponent

Für  $\text{HA} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{A}^- + \text{H}_3\text{O}^+$  gilt:

$$K_S = \frac{c(\text{H}_3\text{O}^+) \cdot c(\text{A}^-)}{c(\text{HA})}$$

$K_S$  : Säurekonstante;

$c$  : Stoffmengenkonzentration

$$\text{p}K_S = -\lg\{K_S\}$$

$\text{p}K_S$  : Säureexponent;

$\{K_S\}$  : Zahlenwert von  $K_S$

### Basenkonstante und Basenexponent

Für  $\text{H}_2\text{O} + \text{B} \rightleftharpoons \text{OH}^- + \text{HB}^+$  gilt:

$$K_B = \frac{c(\text{OH}^-) \cdot c(\text{HB}^+)}{c(\text{B})}$$

$K_B$  : Basenkonstante;

$c$  : Stoffmengenkonzentration

$$\text{p}K_B = -\lg\{K_B\}$$

$\text{p}K_B$  : Basenexponent;

$\{K_B\}$  : Zahlenwert von  $K_B$

### Oxonium-Ionen-Konzentration und pH-Wert

- ◆ Oxonium-Ionen-Konzentration in sauren Lösungen

$$c(\text{H}_3\text{O}^+) \approx -\frac{K_S}{2} + \sqrt{\left(\frac{K_S}{2}\right)^2 + K_S \cdot c_0(\text{HA})}$$

$c$  : Stoffmengenkonzentration;

$K_S$  : Säurekonstante;

$c_0$  : Anfangskonzentration

- ◆ pH-Wert bei vollständiger Protolyse

$$\text{pH} \approx -\lg\{c_0(\text{HA})\}$$

$c_0$  : Anfangskonzentration;

$\{c_0(\text{HA})\}$  : Zahlenwert von  $c_0(\text{HA})$

- ◆ pH-Wert bei unvollständiger Protolyse

$$\text{pH} \approx \frac{1}{2} \cdot (\text{p}K_S - \lg\{c_0(\text{HA})\})$$

$\text{p}K_S$  : Säureexponent;

$\{c_0(\text{HA})\}$  : Zahlenwert von  $c_0(\text{HA})$

- ◆ pH-Wert von Pufferlösungen (Henderson-Hasselbalch-Gleichung)

$$\text{pH} = \text{p}K_S + \lg \frac{c(\text{A}^-)}{c(\text{HA})}$$

$\text{p}K_S$  : Säureexponent;  
 $c$  : Stoffmengenkonzentration

## 2.4 Elektronenübergänge

### Berechnung der Zellspannung

$$\Delta E = E(\text{K}) - E(\text{A})$$

$\Delta E$  : Zellspannung;  
 $E(\text{K})$  : Potenzial der Kathoden-Halbzelle;  
 $E(\text{A})$  : Potenzial der Anoden-Halbzelle

### Nernst-Gleichung

Für ein konjugiertes Redoxpaar  $\text{Red} \rightleftharpoons \text{Ox} + z\text{e}^-$  gilt bei  $T = 298,15\text{K}$  :

$$E = E^\circ + \frac{0,059\text{V}}{z} \cdot \lg \frac{\{c(\text{Ox})\}}{\{c(\text{Red})\}}$$

Red : reduzierte Form; Ox : oxidierte Form;  
 $E$  : Potenzial des Redoxpaares;  
 $E^\circ$  : Standardpotenzial des Redoxpaares;  
 $z$  : Anzahl der übertragenen Elektronen;  
 $c(\text{Ox})$  : Konzentration der oxidierten Form;  
 $\{c(\text{Ox})\}$  : Zahlenwert von  $c(\text{Ox})$ ;  
 $c(\text{Red})$  : Konzentration der reduzierten Form;  
 $\{c(\text{Red})\}$  : Zahlenwert von  $c(\text{Red})$

### Faraday-Gleichung

$$n = \frac{I \cdot t}{z \cdot F}$$

$n$  : Stoffmenge;  $I$  : elektrische Stromstärke;  
 $t$  : Zeit;  
 $z$  : Anzahl der übertragenen Elektronen;  
 $F$  : Faraday-Konstante

### Elektrolyse

$$U_Z = E(\text{A}) + \eta(\text{A}) - (E(\text{K}) + \eta(\text{K}))$$

$U_Z$  : Zersetzungsspannung;  
 $E(\text{A})$  : Potenzial der Anoden-Halbzelle;  
 $E(\text{K})$  : Potenzial der Kathoden-Halbzelle;  
 $\eta(\text{A})$  : Überspannung der Anoden-Halbzelle;  
 $\eta(\text{K})$  : Überspannung der Kathoden-Halbzelle

## 2.5 Energetische und kinetische Aspekte chemischer Reaktionen

### Mittlere Reaktionsgeschwindigkeit

Für eine allgemeine Reaktion  $A \rightarrow B$  gilt:

$$\bar{v} = -\frac{\Delta c(A)}{\Delta t} = +\frac{\Delta c(B)}{\Delta t}$$

$\bar{v}$  : mittlere Reaktionsgeschwindigkeit;  
 $\Delta c(A)$  : Änderung der Stoffmengenkonzentration des Eduktes A;  
 $\Delta c(B)$  : Änderung der Stoffmengenkonzentration des Produktes B;  
 $\Delta t$  : Zeitintervall

### Erster Hauptsatz der Thermodynamik

Für geschlossene Systeme gilt:

$$\Delta U = Q + W$$

Bei konstantem Druck gilt:

$$\Delta H = Q_p$$

$\Delta U$  : Änderung der inneren Energie eines geschlossenen Systems;  
 $Q$  : Wärme;  $W$  : Volumenarbeit;  
 $\Delta H$  : Änderung der Enthalpie

### Volumenarbeit

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

$W$  : Volumenarbeit;  $p$  : Druck;  
 $\Delta V$  : Änderung des Volumens

### Kalorimetrie

Im geschlossenen System gilt bei konstantem Druck unter Vernachlässigung der Temperaturänderung des Kalorimeters:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

$Q$  : Wärme;  
 $c$  : spezifische Wärmekapazität der Kalorimeterflüssigkeit;  
 $m$  : Masse der Kalorimeterflüssigkeit;  
 $\Delta T$  : Änderung der Temperatur der Kalorimeterflüssigkeit

Enthalpie bezogen auf 1 mol der Teilchen X:

$$\Delta_r H = -\frac{Q}{n(X)}$$

$\Delta_r H$  : Reaktionsenthalpie;  
 $Q$  : Wärme;  
 $n(X)$  : umgesetzte Stoffmenge der Teilchen X

### Änderung der Enthalpie

Für eine allgemeine Reaktion  $aA + bB \rightarrow cC + dD$  bei  $T = 298,15\text{K}$  und  $p = 101,325\text{kPa}$  gilt:

$$\Delta H = \left[ n_c \cdot \Delta_f H^\circ (C) + n_d \cdot \Delta_f H^\circ (D) \right] - \left[ n_a \cdot \Delta_f H^\circ (A) + n_b \cdot \Delta_f H^\circ (B) \right]$$

$\Delta H$ : Änderung der Enthalpie;  
 $\Delta_f H^\circ$ : Standardbildungsenthalpie;  
 $n_a, n_b, n_c, n_d$ : Stoffmengen im stöchiometrischen Verhältnis

### Änderung der Entropie

Für eine allgemeine Reaktion  $aA + bB \rightarrow cC + dD$  bei  $T = 298,15\text{K}$  und  $p = 101,325\text{kPa}$  gilt:

$$\Delta S = \left[ n_c \cdot S^\circ (C) + n_d \cdot S^\circ (D) \right] - \left[ n_a \cdot S^\circ (A) + n_b \cdot S^\circ (B) \right]$$

$\Delta S$ : Änderung der Entropie;  
 $S^\circ$ : Standardentropie;  
 $n_a, n_b, n_c, n_d$ : Stoffmengen im stöchiometrischen Verhältnis

### Gibbs-Helmholtz-Gleichung

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

$\Delta G$ : Änderung der freien Enthalpie;  
 $\Delta H$ : Änderung der Enthalpie;  
 $T$ : Temperatur;  
 $\Delta S$ : Änderung der Entropie

## 2.6 Qualitative Analyse – Chromatografie

$$R_f = \frac{S}{F}$$

$R_f$ : Retentionsfaktor;  
 $S$ : Abstand Startlinie-Substanzfleck;  
 $F$ : Abstand Startlinie-Laufmittelfront

## 2.7 Quantitative und instrumentelle Analyse

### Lambert-Beer'sches-Gesetz

$$E_\lambda = \varepsilon_\lambda \cdot c \cdot d$$

$E_\lambda$ : Extinktion bei der Wellenlänge  $\lambda$ ;  
 $\varepsilon_\lambda$ : molarer Extinktionskoeffizient bei der Wellenlänge  $\lambda$ ;  
 $c$ : Stoffmengenkonzentration;  
 $d$ : Schichtdicke der Messküvette

### Optische Aktivität

$$\alpha = [\alpha]_\lambda^g \cdot \beta \cdot \ell$$

$\alpha$ : Drehwinkel;  
 $[\alpha]_\lambda^g$ : spezifischer Drehwinkel bei der Temperatur  $g$  und der Wellenlänge  $\lambda$ ;  
 $\beta$ : Massenkonzentration;  
 $\ell$ : Probenrohlänge

## 3 Physik

### 3.1 Mechanik

#### Newton'sche Gesetze und Kräfteaddition

- ◆ 1. Newton'sches Gesetz (Trägheitsprinzip, Trägheitsgesetz)

Unter der Bedingung  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots = \vec{0}$   
gilt:  $\vec{v} = \text{konstant}$

$\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots$ : äußere Kräfte, die auf einen Körper (ein System) wirken;  
 $\vec{v}$ : Geschwindigkeit

- ◆ 2. Newton'sches Gesetz (Grundgleichung der Mechanik)

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

$$F \cdot \Delta t = m \cdot \Delta v$$

$\vec{F}$ : Kraft;  $m$ : Masse;  $\vec{a}$ : Beschleunigung;  
 $t$ : Zeit;  
 $v$ : Geschwindigkeit

- ◆ 3. Newton'sches Gesetz (Reaktionsprinzip, Wechselwirkungsgesetz)

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

$\vec{F}$ : Kraft

- ◆ Betrag der Gesamtkraft bei der Addition zweier Kräfte

$$F_{\text{ges}} = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2 \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot \cos \alpha}$$

$F_{\text{ges}}$ : Betrag der Gesamtkraft;  $F_1, F_2$ : Beträge der Einzelkräfte;  $\alpha$ : Winkel zwischen den Kräften

#### Kräfte der Mechanik

- ◆ Gewichtskraft

$$F_G = m \cdot g$$

$F_G$ : Gewichtskraft;  $m$ : Masse;  
 $g$ : Fallbeschleunigung (Ortsfaktor) am Ort des Körpers

- ◆ Radialkraft, Zentripetalkraft

$$F_r = \frac{m \cdot v^2}{r} = m \cdot \omega^2 \cdot r$$

$F_r$ : Radialkraft, Zentripetalkraft;  $m$ : Masse;  
 $v$ : Bahngeschwindigkeit;  $r$ : Radius;  
 $\omega$ : Winkelgeschwindigkeit

- ◆ Federspannkraft (Hooke'sches Gesetz)

$$F_S = D \cdot s$$

$F_S$ : Federspannkraft;  
 $D$ : Federhärte, Richtgröße;  
 $s$ : Dehnung der Feder

- ◆ Reibungskraft

$$F_R = \mu \cdot F_N$$

$F_R$ : Reibungskraft;  $\mu$ : Reibungszahl;  
 $F_N$ : Normalkraft

◆ Newton'scher Strömungswiderstand

$$F_W = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot \rho \cdot v^2$$

$F_W$  : Widerstandskraft;  $c_w$  : Widerstandsbeiwert;  $A$  : Querschnittsfläche des Körpers senkrecht zur Strömung;  $\rho$  : Dichte des umströmenden Mediums;  
 $v$  : Relativgeschwindigkeit zwischen Körper und Medium

◆ Stokes'scher Strömungswiderstand

$$F_W = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$$

$F_W$  : Widerstandskraft;  $\eta$  : Viskosität des umströmenden Mediums;  $r$  : Radius;  
 $v$  : Geschwindigkeit

◆ Auftriebskraft

$$F_A = \rho \cdot g \cdot V$$

$F_A$  : Auftriebskraft;  $\rho$  : Dichte der Flüssigkeit/des Gases;  $g$  : Fallbeschleunigung (Ortsfaktor) am Ort des Körpers;  $V$  : vom Körper verdrängtes Volumen

## Bewegungen

◆ eindimensionale Bewegungen

◆ mittlere Geschwindigkeit

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

$\bar{v}$  : mittlere Geschwindigkeit;  $s$  : Ort;  $t$  : Zeit

◆ momentane Geschwindigkeit

$$v(t) = \frac{ds}{dt} = \dot{s}(t)$$

$v$  : Geschwindigkeit;  $s$  : Ort;  $t$  : Zeit

◆ mittlere Beschleunigung

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$\bar{a}$  : mittlere Beschleunigung;  
 $v$  : Geschwindigkeit;  $t$  : Zeit

◆ momentane Beschleunigung

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \dot{v}(t)$$

$a$  : Beschleunigung;  $v$  : Geschwindigkeit;  
 $t$  : Zeit

◆ gleichförmige Bewegung

$$s(t) = v \cdot t + s_0$$

$$v = \text{konstant}$$

$$a = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$s$  : Ort;  $s_0$  : Anfangsort bei  $t = 0 \text{ s}$ ;  
 $v$  : Geschwindigkeit;  $t$  : Zeit;  
 $a$  : Beschleunigung

◆ gleichmäßig beschleunigte Bewegung

$$s(t) = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 + v_0 \cdot t + s_0$$

$$v(t) = a \cdot t + v_0$$

$s$  : Ort;  $s_0$  : Anfangsort bei  $t = 0 \text{ s}$ ;  
 $a$  : Beschleunigung;  $t$  : Zeit;

$a = \text{konstant}$

◆ beliebig beschleunigte Bewegung

$$s(t) = s_0 + \int_{t_0}^t v(t) dt$$

$$v(t) = v_0 + \int_{t_0}^t a(t) dt$$

$v_0$ : Anfangsgeschwindigkeit bei  $t = 0$  s;  
 $v$ : Geschwindigkeit

$s$ : Ort;  $s_0$ : Anfangsort bei  $t = t_0$ ;  
 $v$ : Geschwindigkeit;  $t$ : Zeit;  
 $v_0$ : Anfangsgeschwindigkeit bei  $t = t_0$ ;  
 $a$ : Beschleunigung

◆ gleichförmige Kreisbewegung

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

$$v = \omega \cdot r$$

$\omega = \text{konstant}$

$$a_r = \frac{v^2}{r} = \omega^2 \cdot r$$

$\omega$ : Winkelgeschwindigkeit;  
 $\Delta\varphi$ : überstrichener Winkel;  
 $\Delta t$ : benötigte Zeit;  $T$ : Umlaufdauer;  
 $f$ : Frequenz;  
 $v$ : Bahngeschwindigkeit;  $r$ : Radius;  
 $a_r$ : Radialbeschleunigung

◆ Wurfbewegungen

◆ senkrechter Wurf

$$y(t) = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + v_0 \cdot t + y_0$$

$$v_y(t) = -g \cdot t + v_0$$

$$a_y = -g$$

$y$ : Ort;  $g$ : Fallbeschleunigung (Ortsfaktor) am Ort des Körpers;  $t$ : Zeit;  
 $v_0$ : Anfangsgeschwindigkeit bei  $t = 0$  s;  
 $y_0$ : Anfangsort bei  $t = 0$  s;  $v_y$ : vertikale Geschwindigkeit;  $a_y$ : vertikale Beschleunigung

◆ waagerechter Wurf

$$x(t) = v_0 \cdot t; \quad y(t) = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + y_0$$

$$v_x = v_0; \quad v_y(t) = -g \cdot t$$

$$a_x = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}; \quad a_y = -g$$

$x$ : x-Koordinate des Ortes;  $v_0$ : horizontale Anfangsgeschwindigkeit bei  $t = 0$  s;  $t$ : Zeit;  
 $y$ : y-Koordinate des Ortes;  $g$ : Fallbeschleunigung (Ortsfaktor) am Ort des Körpers;  
 $y_0$ : y-Koordinate des Ortes bei  $t = 0$  s;  
 $v_x, v_y$ : Geschwindigkeitskomponente;  
 $a_x, a_y$ : Beschleunigungskomponente

◆ schräger Wurf

$$x(t) = v_0 \cdot t \cdot \cos \alpha$$

$$y(t) = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + v_0 \cdot t \cdot \sin \alpha + y_0$$

$$v_x = v_0 \cdot \cos \alpha$$

$$v_y(t) = -g \cdot t + v_0 \cdot \sin \alpha$$

$$a_x = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$a_y = -g$$

$x$ : x-Koordinate des Ortes;  $v_0$ : Anfangsgeschwindigkeit bei  $t = 0$  s;  $t$ : Zeit;  $\alpha$ : Abwurfwinkel;  $y$ : y-Koordinate des Ortes;  
 $g$ : Fallbeschleunigung (Ortsfaktor) am Ort des Körpers;  $y_0$ : y-Koordinate des Ortes bei  $t = 0$  s;  $v_x, v_y$ : Geschwindigkeitskomponente;  $a_x, a_y$ : Beschleunigungskomponente

## Dichte und Druck

### ◆ Dichte

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

$\rho$ : Dichte;  $m$ : Masse;  $V$ : Volumen

### ◆ Druck

$$p = \frac{F_{\perp}}{A}$$

$p$ : Druck;  $F_{\perp}$ : Kraftkomponente senkrecht auf  $A$ ;  $A$ : Flächeninhalt

### ◆ Schweredruck in Flüssigkeiten

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

$p$ : Druck;  $\rho$ : Dichte der Flüssigkeit;  
 $g$ : Fallbeschleunigung (Ortsfaktor) am Ort des Körpers;  $h$ : Höhe der Flüssigkeitssäule

## Kraftumformende Einrichtungen

### ◆ schiefe Ebene

$$F_H = F_G \cdot \sin \alpha$$

$$F_N = F_G \cdot \cos \alpha$$

$$\frac{F_H}{F_G} = \frac{h}{\ell}$$

$F_H$ : Hangabtriebskraft;  $F_G$ : Gewichtskraft;  
 $\alpha$ : Neigungswinkel der Ebene gegenüber der Horizontalen;  $F_N$ : Normalkraft;  
 $h$ : Höhe der schiefen Ebene;  
 $\ell$ : Länge der schiefen Ebene

### ◆ Hebelgesetz

$$M_1 = M_2$$

$$F_1 \cdot \ell_1 = F_2 \cdot \ell_2$$

$M$ : Drehmoment;  $F$ : Kraft auf Hebelarm;  
 $\ell$ : Länge des Hebelarms

### ◆ Rollen, (lineare) Flaschenzüge

$$F_Z = \frac{1}{n} \cdot F_L$$

$$s_Z = n \cdot s_L$$

$F_Z, F_L$ : Zug- bzw. Lastkraft;  $s_Z, s_L$ : Zug- bzw. Lastweg;  $n$ : Anzahl der tragenden Seile/Seilstücke

## Mechanische Energie

### ◆ kinetische Energie der Translation (Bewegungsenergie)

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$E$ : Energie;  $m$ : Masse;  $v$ : Geschwindigkeit

### ◆ kinetische Energie der Rotation (Rotationsenergie)

$$E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$$

$E$ : Energie;  $J$ : Trägheitsmoment;  $\omega$ : Winkelgeschwindigkeit

### ◆ potenzielle Energie im homogenen Gravitationsfeld (Lageenergie)

$$E = F_G \cdot h = m \cdot g \cdot h$$

$E$ : Energie;  $F_G$ : Gewichtskraft;  
 $h$ : Höhe des Körpers über dem Bezugspunkt;  $m$ : Masse;  $g$ : Fallbeschleunigung (Ortsfaktor)

- ◆ Energie einer idealen (Hooke'schen) Feder (Spannenergie)

$$E = \frac{1}{2} \cdot D \cdot s^2$$

$E$  : Energie;  $D$  : Federhärte, Richtgröße;  
 $s$  : Dehnung der Feder

### Mechanische Arbeit

- ◆ mechanische Arbeit  $W$

$$W = \Delta E$$

$W$  : Arbeit;  $\Delta E$  : Energiedifferenz

- ◆ Zusammenhang zwischen Arbeit, Kraft und zurückgelegtem Weg

Für  $F = \text{konstant}$  und  $\vec{F} \parallel \Delta \vec{s}$  gilt:

$$W = \Delta E = F \cdot \Delta s$$

$W$  : Arbeit;  $\Delta E$  : Energiedifferenz;  $F$  : Kraft;  
 $s$  : Ort

Wenn die Kraft- und Wegvektoren den Winkel  $\alpha$  einschließen, gilt für  $F = \text{konstant}$  :

$$W = \Delta E = F \cdot \Delta s \cdot \cos \alpha$$

$W$  : Arbeit;  $\Delta E$  : Energiedifferenz;  
 $F$  : Kraft;  $s$  : Ort;  
 $\alpha$  : Winkel zwischen  $\vec{F}$  und  $\Delta \vec{s}$

Für eine vom Ort  $s$  abhängige Kraft  $\vec{F}(s)$  gilt unter der Bedingung  $\vec{F} \parallel d\vec{s}$  :

$$W = \Delta E = \int_{s_1}^{s_2} F(s) ds$$

$W$  : Arbeit;  $\Delta E$  : Energiedifferenz;  $F$  : Kraft;  
 $s$  : Ort

### Leistung und Wirkungsgrad

- ◆ mittlere Leistung (Energiestromstärke)

$$\bar{P} = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

$\bar{P}$  : mittlere Leistung (Energiestromstärke);  
 $E$  : Energie;  $t$  : Zeit

- ◆ momentane Leistung (Energiestromstärke)

$$P(t) = \frac{dE}{dt}$$

$$P(t) = F \cdot v(t)$$

$P$  : Leistung (Energiestromstärke);  
 $E$  : Energie;  $t$  : Zeit;  $F$  : Kraft;  $v$  : Ge-  
 schwindigkeit

- ◆ Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_{\text{nutz}}}{P_{\text{zu}}} = \frac{\Delta E_{\text{nutz}}}{\Delta E_{\text{zu}}}$$

$\eta$  : Wirkungsgrad;  
 $P_{\text{nutz}}$  : Betrag der abgegebenen, genutzten  
 Leistung;  
 $P_{\text{zu}}$  : Betrag der aufgewandten, zugeführten  
 Leistung;  
 $E_{\text{nutz}}$  : Betrag der abgegebenen, genutzten  
 Energie;  
 $E_{\text{zu}}$  : Betrag der aufgewandten, zugeführten  
 Energie

## Energieerhaltungssatz

$$E_{\text{ges}} = E_1 + E_2 + \dots = \text{konstant}$$

$E_{\text{ges}}$ : Gesamtenergie eines abgeschlossenen Systems;

$E_1, E_2, \dots$ : Einzelenergien innerhalb des Systems

## Gravitation

- ◆ Newton'sches Gravitationsgesetz

$$F_G = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

$F_G$ : Gravitationskraft;  $G$ : Gravitationskonstante;  $m_1, m_2$ : Massen;  $r$ : Abstand der Massen

- ◆ potenzielle Energie im Gravitationsfeld

$$E = -G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r}$$

$E$ : Energie;  $G$ : Gravitationskonstante;  $m_1, m_2$ : Massen;  $r$ : Abstand der Massen

- ◆ Gravitationsfeldstärke

$$g = \frac{F_G}{m}$$

$g$ : Gravitationsfeldstärke;  $F_G$ : Gravitationskraft;  $m$ : Masse des Probekörpers

## Impuls

- ◆ Impuls eines Körpers

$$\begin{aligned} \vec{p} &= m \cdot \vec{v} \\ \Delta p &= F \cdot \Delta t \\ \vec{F}(t) &= \frac{d\vec{p}}{dt} = \dot{\vec{p}}(t) \end{aligned}$$

$\vec{p}$ : Impuls;  $m$ : Masse;  $\vec{v}$ : Geschwindigkeit;  $\vec{F}$ : Kraft;  $t$ : Zeit

- ◆ Impulserhaltungssatz

$$\vec{p}_{\text{ges}} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots = \text{konstant}$$

$\vec{p}_{\text{ges}}$ : Gesamtimpuls eines abgeschlossenen Systems;

$\vec{p}_1, \vec{p}_2, \dots$ : Einzelimpulse des Systems

- ◆ Drehimpuls eines Körpers

$$L = J \cdot \omega$$

$L$ : Drehimpuls;  $J$ : Trägheitsmoment;  $\omega$ : Winkelgeschwindigkeit

- ◆ Drehimpulserhaltungssatz

$$\vec{L}_{\text{ges}} = \vec{L}_1 + \vec{L}_2 + \dots = \text{konstant}$$

$\vec{L}_{\text{ges}}$ : Gesamtdrehimpuls eines abgeschlossenen Systems;

$\vec{L}_1, \vec{L}_2, \dots$ : Einzeldrehimpulse des Systems

## Rotation starrer Körper

### ◆ Drehmoment

Unter der Bedingung  $\vec{r} \perp \vec{F}$  gilt:

$$M = r \cdot F$$

$M$  : Drehmoment;  $r$  : Radius;  $F$  : Kraft

### ◆ Trägheitsmoment

$$J = \sum_i m_i \cdot r_i^2$$

$J$  : Trägheitsmoment;  $m_i$  : Masse des  $i$ -ten Massenpunkts;  $r_i$  : Abstand des  $i$ -ten Massenpunkts von der Drehachse

## Zentrale gerade Stöße

### ◆ vollkommen unelastischer Stoß

Geschwindigkeit nach dem Stoß:

$$u = \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2}$$

$u$  : gemeinsame Geschwindigkeit nach dem Stoß;  $m_1, m_2$  : Massen der Stoßpartner;  $v_1, v_2$  : Geschwindigkeiten der Stoßpartner vor dem Stoß

### ◆ vollkommen elastischer Stoß

Geschwindigkeit nach dem Stoß:

$$u_1 = \frac{(m_1 - m_2) \cdot v_1 + 2m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2}$$

$$u_2 = \frac{(m_2 - m_1) \cdot v_2 + 2m_1 \cdot v_1}{m_1 + m_2}$$

$u_1, u_2$  : Geschwindigkeiten der Stoßpartner nach dem Stoß;  $m_1, m_2$  : Massen der Stoßpartner;  $v_1, v_2$  : Geschwindigkeiten der Stoßpartner vor dem Stoß

## Schwingungen

### ◆ beschreibende Größen der Schwingung

$$T = \frac{1}{f}$$

$$f = \frac{n}{t}$$

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

$T$  : Periodendauer;  $f$  : Frequenz;  
 $n$  : Anzahl der Perioden;  $t$  : Zeit;  
 $\omega$  : Kreisfrequenz

### ◆ mechanische harmonische Schwingungen

#### ◆ Kraftgesetz der harmonischen Schwingung

$$\vec{F}(\vec{s}) = -D \cdot \vec{s}$$

$\vec{F}$  : Kraft;  $D$  : Richtgröße, z. B. Federhärte;  
 $\vec{s}$  : Auslenkung

#### ◆ Bewegungsgleichungen der ungedämpften harmonischen Schwingung

$$s(t) = s_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Bei Vorliegen eines Nullphasenwinkels gilt:

$s$  : Auslenkung, Elongation;  
 $s_{\max}$  : Amplitude;  
 $\omega$  : Kreisfrequenz;  $t$  : Zeit;  
 $\varphi_0$  : Nullphasenwinkel;  $v$  : Geschwindigkeit;  
 $a$  : Beschleunigung

$$\begin{aligned}
 s(t) &= s_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) \\
 v(t) &= s_{\max} \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0) \\
 a(t) &= -s_{\max} \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)
 \end{aligned}$$

- ◆ Differenzialgleichung der ungedämpften harmonischen Schwingung

$$\begin{aligned}
 \ddot{s}(t) + \frac{D}{m} \cdot s(t) &= 0 \\
 \frac{d^2s}{dt^2} + \frac{D}{m} \cdot s &= 0
 \end{aligned}$$

$s$ : Auslenkung;  $D$ : Richtgröße, z. B. Federhärte;  $m$ : Masse

- ◆ gedämpfte harmonische Schwingung (geschwindigkeitsproportionale, schwache Dämpfung)

Für einen bei  $t = 0$  s ausgelenkten Schwinger gilt:

$$\begin{aligned}
 s(t) &= s_{\max} \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \cos(\omega_D \cdot t) \\
 \text{mit: } \omega_D &= \sqrt{\omega^2 - \delta^2}
 \end{aligned}$$

$s$ : Auslenkung;  $s_{\max}$ : Anfangsamplitude;  $\delta$ : Abklingkoeffizient;  $t$ : Zeit;  $\omega_D$ : Kreisfrequenz der gedämpften Schwingung;  $\omega$ : Kreisfrequenz der ungedämpften Schwingung

- ◆ Differenzialgleichung der gedämpften harmonischen Schwingung

$$\begin{aligned}
 \ddot{s}(t) + 2\delta \cdot \dot{s}(t) + \frac{D}{m} \cdot s(t) &= 0 \\
 \frac{d^2s}{dt^2} + 2\delta \cdot \frac{ds}{dt} + \frac{D}{m} \cdot s &= 0
 \end{aligned}$$

$s$ : Auslenkung;  $\delta$ : Abklingkoeffizient;  $D$ : Richtgröße, z. B. Federhärte;  $m$ : Masse

- ◆ Periodendauer von Pendeln

- ◆ Federpendel

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{D}}$$

$T$ : Periodendauer;  $m$ : Masse;  $D$ : Federhärte, Richtgröße

- ◆ Fadenpendel (in Kleinwinkelnäherung)

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\ell}{g}}$$

$T$ : Periodendauer;  $\ell$ : Pendellänge;  $g$ : Fallbeschleunigung (Ortsfaktor) am Ort der Schwingung

## Wellen

- ◆ Ausbreitungsgeschwindigkeit

$$c = \lambda \cdot f$$

$c$ : Ausbreitungsgeschwindigkeit;  $\lambda$ : Wellenlänge;  $f$ : Frequenz

- ◆ harmonische Welle

- ◆ Wellenfunktion der harmonischen Welle

$$y(x, t) = y_{\max} \cdot \sin\left(2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right)$$

$y$ : Auslenkung;  $y_{\max}$ : Amplitude;  $t$ : Zeit;  $T$ : Periodendauer;  $x$ : Ort;  $\lambda$ : Wellenlänge

- ◆ Differenzialgleichung der harmonischen Welle

$$\ddot{y}(x,t) - c^2 \cdot y''(x,t) = 0$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - c^2 \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0$$

$y$  : Auslenkung;  $x$  : Ort;  $t$  : Zeit;  $c$  : Ausbreitungsgeschwindigkeit

- ◆ Wellenfunktion einer stehenden harmonischen Welle

$$y(x,t) = 2y_{\max} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{x}{\lambda}\right) \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{t}{T}\right)$$

$y$  : Auslenkung;  $x$  : Ort;  $t$  : Zeit;  
 $y_{\max}$  : Amplitude der einander entgegenlaufenden Wellen;  $\lambda$  : Wellenlänge;  $T$  : Periodendauer

- ◆ stehende Wellen bei zwei festen (zwei losen) Enden

$$\lambda_k = \frac{2\ell}{(k+1)}$$

Grundschiwingung:  $k = 0$

Oberschwingungen:  $k = 1, 2, 3, \dots$

$\lambda_k$  : Wellenlänge;  
 $\ell$  : Länge des Wellenträgers

- ◆ stehende Wellen bei einem festen und einem losen Ende

$$\lambda_k = \frac{2\ell}{\left(k + \frac{1}{2}\right)}$$

Grundschiwingung:  $k = 0$

Oberschwingungen:  $k = 1, 2, 3, \dots$

$\lambda_k$  : Wellenlänge;  
 $\ell$  : Länge des Wellenträgers

## Akustik

- ◆ akustischer Dopplereffekt bei bewegtem Sender und bewegtem Empfänger

Die oberen Vorzeichen gelten jeweils für Annäherung, die unteren Vorzeichen für Entfernungszunahme.

$$f_E = f_0 \cdot \frac{c \pm v_E}{c \mp v_S}$$

$f_E$  : vom Empfänger gemessene Frequenz;  
 $f_0$  : vom Sender abgestrahlte Frequenz;  
 $c$  : Schallgeschwindigkeit;  
 $v_E$  : Geschwindigkeit des Empfängers;  
 $v_S$  : Geschwindigkeit der Schallquelle

- ◆ Schalldruck

$$p_{\text{ges}} = p_n + p \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$p_{\text{ges}}$  : Gesamtdruck;  
 $p_n$  : Normaldruck im Medium (konstant);  
 $p$  : Schalldruckamplitude;  $\omega$  : Kreisfrequenz;  $t$  : Zeit

- ◆ Intensität einer Schallwelle in einem verlustfreien akustischen Medium

$$I = \frac{P}{A} = \frac{p^2}{2\rho \cdot c}$$

$I$  : Schallintensität;  $P$  : Schalleistung;  
 $A$  : Flächeninhalt;  $p$  : Schalldruck;  
 $\rho$  : Dichte des Mediums;  $c$  : Schallgeschwindigkeit im Medium

◆ Schallintensitätspegel

$$L_I = 10 \text{ dB} \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

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

$L_I$ : Schallintensitätspegel;  
 $I$ : Schallintensität;  
 $I_0$ : Bezugswert der Schallintensität

◆ Schalldruckpegel

$$L_p = 20 \text{ dB} \cdot \lg\left(\frac{p_{\text{eff}}}{p_0}\right)$$

$$\text{mit: } p_0 = 20 \mu\text{Pa}$$

$L_p$ : Schalldruckpegel;  
 $p_0$ : Bezugswert des Schalldrucks;  $p_{\text{eff}}$ : Effektivwert des Schalldrucks

### 3.2 Elektrizitätslehre und Magnetismus

#### Stromstärke, Spannung, Widerstand, Ladung

◆ mittlere elektrische Stromstärke

$$\bar{I} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

$\bar{I}$ : mittlere elektrische Stromstärke;  
 $Q$ : elektrische Ladung;  
 $t$ : Zeit

◆ momentane elektrische Stromstärke und elektrische Ladung

$$I(t) = \frac{dQ}{dt} = \dot{Q}(t)$$

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt$$

$I$ : elektrische Stromstärke;  
 $Q$ : elektrische Ladung;  
 $t$ : Zeit

◆ elektrischer Widerstand

$$R = \frac{U}{I}$$

$R$ : elektrischer Widerstand;  
 $U$ : elektrische Spannung;  
 $I$ : elektrische Stromstärke

◆ Widerstand eines elektrischen Leiters

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

$R$ : elektrischer Widerstand;  
 $\rho$ : spezifischer Widerstand;  
 $\ell$ : Länge des Leiters;  
 $A$ : Querschnittsfläche des Leiters

#### Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen

◆ Reihenschaltung

$$I_{\text{ges}} = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

$$U_{\text{ges}} = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

$I_{\text{ges}}$ : Gesamtstromstärke;  
 $I_1, I_2, \dots$ : Einzelstromstärken;  
 $U_{\text{ges}}$ : Gesamtspannung;

$U_1, U_2, \dots$ : Einzelspannungen;  
 $R_{\text{ges}}$ : Gesamtwiderstand;  
 $R_1, R_2, \dots$ : Einzelwiderstände

◆ Parallelschaltung

$$I_{\text{ges}} = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

$$U_{\text{ges}} = U_1 = U_2 = \dots = U_n$$

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

$I_{\text{ges}}$ : Gesamtstromstärke;  $I_1, I_2, \dots$ : Einzelstromstärken;  
 $U_{\text{ges}}$ : Gesamtspannung;  $U_1, U_2, \dots$ : Einzelspannungen;  
 $R_{\text{ges}}$ : Gesamtwiderstand;  $R_1, R_2, \dots$ : Einzelwiderstände

### Kirchhoff'sche Gesetze

◆ 1. Kirchhoff'sches Gesetz (Knotenregel)

$$\sum I_{\text{zu}} = \sum I_{\text{ab}}$$

$I_{\text{zu}}$ : Stärken der in den Knoten zufließenden Ströme;  $I_{\text{ab}}$ : Stärken der aus dem Knoten abfließenden Ströme

◆ 2. Kirchhoff'sches Gesetz (Maschenregel)

$$\sum U_i = 0$$

$U_i$ : Einzelspannungen in einer Masche

### Elektrische Leistung und Energie

◆ elektrische Leistung

$$P = U \cdot I$$

$P$ : elektrische Leistung;  
 $U$ : elektrische Spannung;  
 $I$ : elektrische Stromstärke

◆ elektrisch übertragene Energie

$$\Delta E = P \cdot \Delta t$$

$E$ : Energie;  
 $P$ : elektrische Leistung;  $t$ : Zeit

◆ Energiedifferenz eines geladenen Teilchens beim Durchlaufen einer elektrischen Spannung

$$\Delta E = q \cdot U$$

$E$ : Energie;  $q$ : Ladung des Teilchens;  
 $U$ : elektrische Spannung

### Elektrisches Feld

◆ Kraft zwischen Punktladungen (Coulomb'sches Gesetz)

$$F_C = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

$F_C$ : Coulomb-Kraft;  
 $\epsilon_0$ : elektrische Feldkonstante;  
 $\epsilon_r$ : Dielektrizitätszahl;  $Q_1, Q_2$ : Ladungen;  
 $r$ : Abstand der Ladungen voneinander

◆ elektrische Feldstärke

allgemein:  $E = \frac{F_{\text{el}}}{q}$

Im homogenen Feld eines

Plattenkondensators gilt:  $E = \frac{U}{d}$

Im Radialfeld einer Punktladung gilt:

$$E = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot \frac{Q}{r^2}$$

$E$  : elektrische Feldstärke;  
 $F_{\text{el}}$  : elektrische Kraft;  $q$  : Probeladung;  
 $U$  : elektrische Spannung;  
 $d$  : Abstand der Kondensatorplatten;  
 $\epsilon_0$  : elektrische Feldkonstante;  
 $\epsilon_r$  : Dielektrizitätszahl;  
 $Q$  : felderzeugende Ladung;  
 $r$  : Abstand von der Ladung  $Q$

◆ elektrische Flussdichte

$$D = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E$$

$D$  : elektrische Flussdichte;  
 $\epsilon_0$  : elektrische Feldkonstante;  
 $\epsilon_r$  : Dielektrizitätszahl;  
 $E$  : elektrische Feldstärke im Vakuum

◆ Flächenladungsdichte

$$\sigma = \frac{Q}{A}$$

$$\sigma = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E$$

$\sigma$  : Flächenladungsdichte;  
 $Q$  : Ladung;  $A$  : Fläche;  
 $\epsilon_0$  : elektrische Feldkonstante;  
 $\epsilon_r$  : Dielektrizitätszahl;  
 $E$  : elektrische Feldstärke im Vakuum

◆ Potenzial im elektrischen Feld

allgemein:  $\varphi = \frac{E}{q}$

Im homogenen Feld eines Plattenkonden-

sators gilt:  $\varphi = \frac{U}{d} \cdot s$

Im Radialfeld einer punktförmigen Ladung

gilt:  $\varphi = -\frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot \frac{Q}{r}$

$\varphi$  : elektrisches Potenzial;  $E$  : Energie;  
 $q$  : Probeladung;  $\epsilon_0$  : elektrische Feldkon-  
 stante;  $\epsilon_r$  : Dielektrizitätszahl;  $U$  : elektri-  
 sche Spannung;  $d$  : Abstand der Konden-  
 satorplatten;  $s$  : Abstand von der negativen  
 Platte;  $Q$  : felderzeugende Ladung;  $r$  : Ab-  
 stand von der Ladung  $Q$

◆ elektrische Spannung als Potenzialdifferenz

$$U = \varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi$$

$U$  : elektrische Spannung zwischen den Or-  
 ten  $P_1$  und  $P_2$ ;  $\varphi_1, \varphi_2$  : elektrisches Poten-  
 zial am Ort 1 bzw. 2

## Wechselstromkreis

◆ Spannung im Wechselstromkreis

Für eine sinusförmige Wechselspannung  
 gilt:

$$U(t) = U_{\text{max}} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

$U$  : Momentanwert der elektrischen Span-  
 nung;  
 $U_{\text{max}}$  : Scheitelwert der elektrischen Span-  
 nung;

$\omega$  : Kreisfrequenz;  $t$  : Zeit;  $U_{\text{eff}}$  : Effektivwert der elektrischen Spannung

◆ Stromstärke im Wechselstromkreis

Für einen sinusförmigen Wechselstrom bei der Wechselspannung

$$U(t) = U_{\text{max}} \cdot \sin(\omega \cdot t) \text{ gilt:}$$

$$I(t) = I_{\text{max}} \cdot \sin(\omega \cdot t + \Delta\varphi)$$

$$I_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

$U$  : Momentanwert der elektrischen Spannung;

$U_{\text{max}}$  : Scheitelwert der elektrischen Spannung;

$I$  : Momentanwert der elektrischen Stromstärke;

$I_{\text{max}}$  : Scheitelwert der elektrischen Stromstärke;

$\omega$  : Kreisfrequenz;  $t$  : Zeit;

$\Delta\varphi$  : Phasenverschiebung zwischen  $U$  und  $I$ ;

$I_{\text{eff}}$  : Effektivwert der elektrischen Stromstärke

◆ Widerstände im Wechselstromkreis

◆ kapazitiver und induktiver Widerstand im Wechselstromkreis

Für eine sinusförmige Wechselspannung gilt:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$X_L = \omega \cdot L$$

$$\text{mit: } \Delta\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$$

Am Kondensator eilt der Strom der Spannung voraus.

An der Spule läuft der Strom der Spannung nach.

$X_C$  : kapazitiver Widerstand;

$\omega$  : Kreisfrequenz;  $C$  : Kapazität;  $X_L$  : induktiver Widerstand;  $L$  : Induktivität;

$\Delta\varphi$  : Phasenverschiebung zwischen  $U$  und  $I$

◆ Reihenschaltung aus kapazitivem, induktiven und Ohm'schen Widerstand

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$Z$  : Impedanz (Scheinwiderstand);

$R$  : Ohm'scher Widerstand;  $X_L$  : induktiver Widerstand;  $X_C$  : kapazitiver Widerstand

◆ Leistung im Wechselstromkreis

$$P_S = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$$

$$P_W = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos \Delta\varphi$$

$$P_B = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \sin \Delta\varphi$$

$P_S$  : Scheinleistung;

$U_{\text{eff}}$  : Effektivwert der elektrischen Spannung;  $I_{\text{eff}}$  : Effektivwert der elektrischen Stromstärke;

$P_W$  : Wirkleistung;  $\Delta\varphi$  : Phasenverschiebung zwischen  $U$  und  $I$ ;

$P_B$  : Blindleistung

## Kondensator

- ◆ Kapazität eines Kondensators

$$C = \frac{Q}{U}$$

Für den Plattenkondensator gilt:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

$C$  : Kapazität des Kondensators;  
 $Q$  : Ladung des Kondensators;  
 $U$  : elektrische Spannung;  
 $\epsilon_0$  : elektrische Feldkonstante;  
 $\epsilon_r$  : Dielektrizitätszahl;  
 $A$  : Flächeninhalt einer Platte;  
 $d$  : Abstand der Kondensatorplatten

- ◆ Energie des geladenen Kondensators (elektrische Feldenergie)

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

$E$  : Energie;  
 $C$  : Kapazität des Kondensators;  
 $U$  : elektrische Spannung

- ◆ Aufladen und Entladen eines Kondensators über einen Ohm'schen Widerstand

Aufladen eines Kondensators:

$$U_C(t) = U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}}\right)$$

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$$

$$Q(t) = Q_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}}\right)$$

Entladen eines Kondensators:

$$U_C(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$$

$$I(t) = -I_0 \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$$

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$$

$U_C$  : elektrische Spannung am Kondensator;  
 $U_0$  : Quellenspannung beim Aufladen bzw. elektrische Spannung am Kondensator zu Beginn des Entladevorgangs;  $t$  : Zeit;  
 $R$  : Ohm'scher Widerstand;  
 $C$  : Kapazität des Kondensators;  
 $I$  : elektrische Stromstärke;  
 $I_0$  : elektrische Stromstärke zu Beginn des Auf- bzw. Entladevorgangs;  $Q$  : Ladung des Kondensators;  $Q_0$  : Ladung des Kondensators am Ende des Aufladevorgangs bzw. zu Beginn des Entladevorgangs

- ◆ Differenzialgleichung zur Beschreibung des Aufladevorgangs

$$\dot{Q}(t) + \frac{1}{R \cdot C} \cdot Q(t) = \frac{U_0}{R}$$

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{1}{R \cdot C} \cdot Q = \frac{U_0}{R}$$

$Q$  : Ladung des Kondensators;  
 $R$  : Ohm'scher Widerstand;  
 $C$  : Kapazität des Kondensators;  
 $U_0$  : Quellenspannung beim Aufladen;  
 $t$  : Zeit

- ◆ Differenzialgleichung zur Beschreibung des Entladevorgangs

$$\dot{Q}(t) + \frac{1}{R \cdot C} \cdot Q(t) = 0$$

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{1}{R \cdot C} \cdot Q = 0$$

$Q$  : Ladung des Kondensators;  
 $R$  : Ohm'scher Widerstand;  
 $C$  : Kapazität des Kondensators;  
 $t$  : Zeit

◆ Reihen- und Parallelschaltung von Kondensatoren

◆ Reihenschaltung

$$Q_{\text{ges}} = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n$$

$$U_{\text{ges}} = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

$$\frac{1}{C_{\text{ges}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

$Q_{\text{ges}}$ : Gesamtladung;  $Q_1, Q_2, \dots$ : Einzella-  
dungen;  $U_{\text{ges}}$ : Gesamtspannung;  
 $U_1, U_2, \dots$ : Einzelspannungen;  $C_{\text{ges}}$ : Ge-  
samtkapazität;  $C_1, C_2, \dots$ : Einzelkapazitä-  
ten

◆ Parallelschaltung

$$Q_{\text{ges}} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$$

$$U_{\text{ges}} = U_1 = U_2 = \dots = U_n$$

$$C_{\text{ges}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

$Q_{\text{ges}}$ : Gesamtladung;  $Q_1, Q_2, \dots$ : Einzella-  
dungen;  $U_{\text{ges}}$ : Gesamtspannung;  
 $U_1, U_2, \dots$ : Einzelspannungen;  
 $C_{\text{ges}}$ : Gesamtkapazität;  $C_1, C_2, \dots$ : Einzel-  
kapazitäten

## Magnetisches Feld

◆ magnetische Flussdichte

$$B = \frac{F}{l \cdot s}$$

Außerhalb eines geraden stromdurchflos-  
senen Leiters gilt:

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

Innerhalb einer stromdurchflossenen lang-  
gestreckten Spule gilt:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N \cdot I}{\ell}$$

$B$ : magnetische Flussdichte;  
 $F$ : Kraft auf den stromdurchflossenen Lei-  
ter;  $I$ : elektrische Stromstärke;  
 $s$ : wirksame Länge des Leiters im Magnet-  
feld;  $\mu_0$ : magnetische Feldkonstante;  
 $\mu_r$ : Permeabilitätszahl des Mediums;  
 $r$ : Abstand vom Leiter;  $N$ : Windungszahl  
der Spule;  $\ell$ : Länge der Spule

◆ magnetische Feldstärke

Innerhalb einer stromdurchflossenen lang-  
gestreckten Spule gilt:

$$H = N \cdot \frac{I}{\ell}$$

Außerhalb eines geraden stromdurchflos-  
senen Leiters gilt:

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot r}$$

$H$ : magnetische Feldstärke;  $F$ : Kraft auf  
den stromdurchflossenen Leiter;  $N$ : Win-  
dungszahl der Spule;  $\ell$ : Länge der Spule;  
 $I$ : elektrische Stromstärke;  $r$ : Abstand vom  
Leiter

◆ Lorentz-Kraft auf bewegte Ladungsträger

allgemein:  $\vec{F}_L = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$

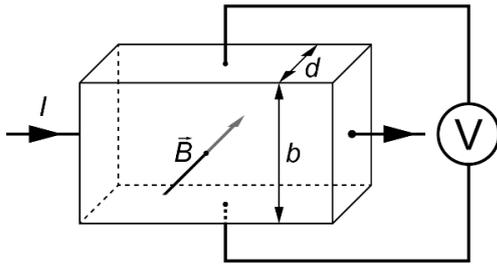
$$F_L = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

Unter der Bedingung  $\vec{v} \perp \vec{B}$  gilt:

$$F_L = q \cdot v \cdot B$$

$F_L$ : Lorentz-Kraft;  $q$ : Ladung;  
 $v$ : Geschwindigkeit;  $B$ : magnetische Fluss-  
dichte;  $\alpha$ : Winkel zwischen Geschwindig-  
keit und magnetischer Flussdichte

◆ Hall-Spannung



$$U_H = R_H \cdot \frac{I \cdot B}{d}$$

$$U_H = b \cdot v \cdot B$$

$$R_H = \frac{1}{n \cdot q}$$

$U_H$  : Hall-Spannung;  $R_H$  : Hall-Konstante;  
 $I$  : elektrische Stromstärke durch das Plättchen;

$B$  : magnetische Flussdichte;

$d$  : Dicke des Plättchens;

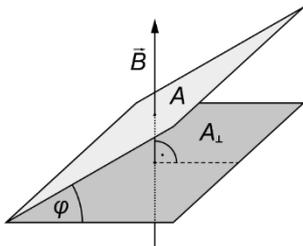
$b$  : Breite des Plättchens;

$v$  : Geschwindigkeit der Ladungsträger durch das Plättchen;

$n$  : Ladungsträgerdichte;  $q$  : Ladung des Ladungsträgers

## Induktion

◆ magnetischer Fluss



$$\Phi = B \cdot A_{\perp} = B \cdot A \cdot \cos \varphi$$

$\Phi$  : magnetischer Fluss;

$B$  : magnetische Flussdichte;

$A_{\perp}$  : wirksamer Flächeninhalt;

$A$  : Flächeninhalt;

$\varphi$  : Winkel zwischen Fläche und wirksamer Fläche

◆ Induktionsgesetz

Für eine Leiterschleife gilt:

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

Für eine Spule gilt:

$$U_{\text{ind}} = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Induktion durch Änderung der magnetischen Flussdichte bei  $A_{\perp} = \text{konstant}$ :

$$U_{\text{ind}} = -N \cdot A_{\perp} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t}$$

$$U_{\text{ind}}(t) = -N \cdot A_{\perp} \cdot \frac{dB}{dt} = -N \cdot A_{\perp} \cdot \dot{B}(t)$$

Induktion durch Änderung des wirksamen Flächeninhalts bei  $B = \text{konstant}$ :

$$U_{\text{ind}} = -N \cdot B \cdot \frac{\Delta A_{\perp}}{\Delta t}$$

$$U_{\text{ind}}(t) = -N \cdot B \cdot \frac{dA_{\perp}}{dt} = -N \cdot B \cdot \dot{A}_{\perp}(t)$$

$U_{\text{ind}}$  : induzierte Spannung;

$\Phi$  : magnetischer Fluss;  $t$  : Zeit;  $N$  : Windungszahl der Spule;

$A_{\perp}$  : wirksamer Flächeninhalt;  $B$  : magnetische Flussdichte;

$\ell$  : wirksame Länge des Leiters;

$v$  : Geschwindigkeit des Leiters

Induktionsspannung am bewegten Leiter im homogenen Magnetfeld:

Unter der Bedingung  $\vec{v} \perp \vec{B}$  gilt:

$$U_{\text{ind}} = -B \cdot \ell \cdot v$$

## Transformator

- ◆ Verhältnis der Spannungen eines unbelasteten idealen Transformators

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$U_1$ : elektrische Spannung an der felderzeugenden Spule (Primärspule);  $U_2$ : elektrische Spannung an der Induktionsspule (Sekundärspule);

$N_1$ : Windungszahl der felderzeugenden Spule (Primärspule);  $N_2$ : Windungszahl der Induktionsspule (Sekundärspule)

- ◆ Verhältnis der Ströme eines stark belasteten idealen Transformators (Kurzschlussfall)

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

$I_1$ : elektrische Stromstärke durch die felderzeugende Spule (Primärspule);  $I_2$ : elektrische Stromstärke durch die Induktionsspule (Sekundärspule);  $N_1$ : Windungszahl der felderzeugenden Spule (Primärspule);

$N_2$ : Windungszahl der Induktionsspule (Sekundärspule)

## Spule

- ◆ Induktivität einer langgestreckten Spule

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot A}{\ell}$$

$L$ : Induktivität;

$\mu_0$ : magnetische Feldkonstante;

$\mu_r$ : Permeabilitätszahl des Mediums;

$N$ : Windungszahl der Spule;

$A$ : Querschnittsfläche der Spule;

$\ell$ : Länge der Spule

- ◆ Selbstinduktionsspannung einer Spule

$$U_{\text{ind}} = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

allgemein:

$$U_{\text{ind}}(t) = -L \cdot \frac{dI}{dt} = -L \cdot \dot{I}(t)$$

$U_{\text{ind}}$ : induzierte Spannung;  $L$ : Induktivität;

$I$ : elektrische Stromstärke;  $t$ : Zeit

- ◆ Energie der stromdurchflossenen Spule (magnetische Feldenergie)

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

$E$ : Energie;  $L$ : Induktivität;  $I$ : elektrische Stromstärke

◆ Schaltvorgänge an einer Spule

Einschaltvorgang:

$$I(t) = I_0 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$$

Ausschaltvorgang:

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

$I$ : elektrische Stromstärke;

$I_0$ : elektrische Stromstärke durch die Spule am Ende bzw. zu Beginn des Schaltvorgangs;  $R$ : Ohm'scher Widerstand;  $L$ : Induktivität der Spule;  $t$ : Zeit

◆ Differenzialgleichung zur Beschreibung des Ausschaltvorgangs

$$\dot{I}(t) + \frac{R}{L} \cdot I(t) = 0$$

$$\frac{dI}{dt} + \frac{R}{L} \cdot I = 0$$

$I$ : Stromstärke;  $t$ : Zeit;

$R$ : Ohm'scher Widerstand;

$L$ : Induktivität der Spule

◆ Differenzialgleichung zur Beschreibung des Einschaltvorgangs

$$\dot{I}(t) + \frac{R}{L} \cdot I(t) = \frac{U_0}{L}$$

$$\frac{dI}{dt} + \frac{R}{L} \cdot I = \frac{U_0}{L}$$

$I$ : Stromstärke;  $t$ : Zeit;

$R$ : Ohm'scher Widerstand;

$L$ : Induktivität der Spule;

$U_0$ : Quellenspannung beim Einschalten

## Elektromagnetische Schwingungen

◆ Periodendauer einer ungedämpften elektromagnetischen Schwingung im Schwingkreis (Thomson'sche Schwingungsgleichung)

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$$

$T$ : Periodendauer;  $L$ : Induktivität;

$C$ : Kapazität

◆ Schwingungsgleichungen der ungedämpften harmonischen elektromagnetischen Schwingung

Für einen bei  $t = 0$  s geladenen Kondensator gilt:

$$U(t) = U_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$I(t) = -I_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$Q(t) = Q_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$U$ : elektrische Spannung;

$U_{\max}$ : maximale auftretende elektrische Spannung;  $\omega$ : Kreisfrequenz;  $t$ : Zeit;

$I$ : elektrische Stromstärke;

$I_{\max}$ : maximale auftretende elektrische

Stromstärke;  $Q$ : Ladung des Kondensators;

$Q_{\max}$ : maximale Ladung des Kondensators

◆ Differenzialgleichung der ungedämpften harmonischen elektromagnetischen Schwingung

$$\ddot{Q}(t) + \frac{1}{L \cdot C} \cdot Q(t) = 0$$

$$\frac{d^2Q}{dt^2} + \frac{1}{L \cdot C} \cdot Q = 0$$

$Q$ : Ladung des Kondensators;  $t$ : Zeit;

$L$ : Induktivität;  $C$ : Kapazität

◆ gedämpfte harmonische elektromagnetische Schwingung (Schwingfall)

Für einen bei  $t = 0$  s geladenen Kondensator gilt:

$$Q(t) = Q_{\max} \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \cos(\omega_D \cdot t)$$

$$\text{mit: } \omega_D = \sqrt{\omega^2 - \delta^2}$$

$Q$  : Ladung des Kondensators;  
 $Q_{\max}$  : maximale Ladung des Kondensators;  
 $\delta$  : Abklingkoeffizient;  $t$  : Zeit;  
 $\omega_D$  : Kreisfrequenz der gedämpften Schwingung;  
 $\omega$  : Kreisfrequenz der ungedämpften Schwingung

◆ Differenzialgleichung der gedämpften harmonischen elektromagnetischen Schwingung

$$\ddot{Q}(t) + 2\delta \cdot \dot{Q}(t) + \frac{1}{L \cdot C} \cdot Q(t) = 0$$

$$\frac{d^2 Q}{dt^2} + 2\delta \cdot \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{L \cdot C} \cdot Q = 0$$

$$\text{mit: } \delta = \frac{R}{2L}$$

$Q$  : Ladung des Kondensators;  $t$  : Zeit;  
 $\delta$  : Abklingkoeffizient;  $L$  : Induktivität;  
 $C$  : Kapazität;  $R$  : Ohm'scher Widerstand

◆ Grundfrequenz eines Dipols

$$f = \frac{c}{2\ell}$$

$f$  : Frequenz;  
 $c$  : Ausbreitungsgeschwindigkeit;  
 $\ell$  : Länge des Dipols

## Elektromagnetische Wellen

◆ Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen im Vakuum

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

$c$  : Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen im Vakuum;  
 $\mu_0$  : magnetische Feldkonstante;  $\epsilon_0$  : elektrische Feldkonstante

◆ Intensität ungedämpfter elektromagnetischer Wellen

$$I = \frac{P}{A}$$

$$I = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \epsilon_0 \cdot E_{\max}^2$$

$$I = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \frac{1}{\mu_0} \cdot B_{\max}^2$$

$I$  : Intensität;  $P$  : Leistung;  
 $A$  : Flächeninhalt;  
 $c$  : Ausbreitungsgeschwindigkeit;  
 $\epsilon_0$  : elektrische Feldkonstante;  
 $E_{\max}$  : maximale elektrische Feldstärke des elektrischen Felds der Welle;  
 $\mu_0$  : magnetische Feldkonstante;  $B_{\max}$  : maximale magnetische Flussdichte des magnetischen Felds der Welle

## 3.3 Optik

**Geometrische Optik**

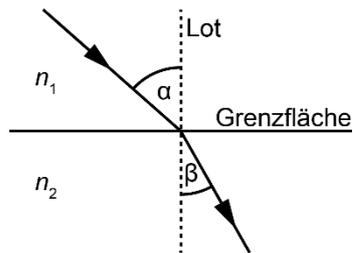
## ♦ Reflexionsgesetz

$$\alpha = \alpha'$$

$\alpha$  : Einfallswinkel;  
 $\alpha'$  : Reflexionswinkel

## ♦ Brechung

## ♦ Brechungsgesetz



$$n_2 > n_1$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c_1}{c_2}$$

$\alpha$  : Einfallswinkel;  $\beta$  : Brechungswinkel;  
 $n_1, n_2$  : Brechzahlen der optischen Medien;  
 $c_1, c_2$  : Lichtgeschwindigkeiten in den optischen Medien

## ♦ Brechzahl

$$n = \frac{c_{\text{Vakuum}}}{c_{\text{Medium}}}$$

$n$  : Brechzahl des optischen Mediums;  
 $c_{\text{Vakuum}}$  : Vakuumlichtgeschwindigkeit;  
 $c_{\text{Medium}}$  : Lichtgeschwindigkeit im optischen Medium

## ♦ Grenzwinkel der Totalreflexion

$$\sin \alpha_G = \frac{n_2}{n_1}$$

$\alpha_G$  : Grenzwinkel der Totalreflexion;  
 $n_1, n_2$  : Brechzahlen der optischen Medien

## ♦ Abbildungsgleichung für dünne Linsen und für Spiegel

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

$f$  : Brennweite;  $g$  : Gegenstandsweite;  
 $b$  : Bildweite

## ♦ Abbildungsmaßstab für dünne Linsen und für Spiegel

$$A = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$

$A$  : Abbildungsmaßstab;  $B$  : Bildgröße;  
 $G$  : Gegenstandsgröße;  
 $b$  : Bildweite;  $g$  : Gegenstandsweite

## Wellenoptik

### ◆ Interferenz

#### ◆ Doppelspalt

Für Maxima gilt:

$$\frac{k \cdot \lambda}{g} = \sin \alpha_k$$

$$k = 0, 1, 2, \dots$$

Für Minima gilt:

$$\frac{(2k-1) \cdot \frac{\lambda}{2}}{g} = \sin \alpha_k$$

$$k = 1, 2, 3, \dots$$

$\lambda$  : Wellenlänge;  $g$  : Spaltmittenabstand;  
 $\alpha_k$  : Winkel, unter dem das Maximum bzw. Minimum  $k$ -ter Ordnung erscheint

#### ◆ Gitter

Für Hauptmaxima gilt:

$$\frac{k \cdot \lambda}{g} = \sin \alpha_k$$

$$k = 0, 1, 2, \dots$$

$\lambda$  : Wellenlänge;  $g$  : Spaltmittenabstand;  
 $\alpha_k$  : Winkel, unter dem das Hauptmaximum  $k$ -ter Ordnung erscheint

#### ◆ Einzelspalt

Für Minima gilt:

$$\frac{k \cdot \lambda}{d} = \sin \alpha_k$$

$$k = 1, 2, 3, \dots$$

Für Maxima ab der ersten Ordnung gilt (Näherung):

$$\frac{(2k+1) \cdot \frac{\lambda}{2}}{d} = \sin \alpha_k$$

$$k = 1, 2, 3, \dots$$

$\lambda$  : Wellenlänge;  $d$  : Spaltbreite;  
 $\alpha_k$  : Winkel, unter dem das Maximum bzw. Minimum  $k$ -ter Ordnung erscheint

#### ◆ Bragg-Beziehung

$$2d \cdot \sin \varphi_k = k \cdot \lambda$$

$$k = 1, 2, 3, \dots$$

$d$  : Netzebenenabstand;  $\varphi_k$  : Glanzwinkel (zur Netzebene);  $\lambda$  : Wellenlänge

#### ◆ Rayleigh'sches Kriterium der Auflösung

$$\alpha_k = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{d}$$

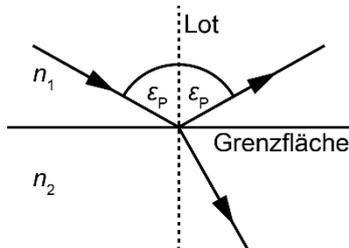
$\lambda$  : Wellenlänge;  $d$  : Durchmesser der Öffnung;  
 $\alpha_k$  : kritischer Winkel, bei dem die beiden Quellen gerade noch getrennt wahrgenommen werden

◆ Durchlässigkeit beim linearen Polarisationsfilter

$$\frac{I}{I_0} = (\cos \varphi)^2$$

$I$ : Intensität der durchgelassenen Welle;  
 $I_0$ : Intensität der einlaufenden Welle;  
 $\varphi$ : Winkel zwischen der Schwingungsrichtung des einfallenden Lichts und der Polarisationsachse des Filters

◆ Brewster-Gesetz zur Polarisation des Lichts, senkrecht zur Zeichenebene



$$n_1 < n_2$$

$$\tan \varepsilon_p = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$\varepsilon_p$ : Polarisationswinkel (Einfallswinkel);  
 $c_1, c_2$ : Lichtgeschwindigkeit im optischen Medium;  
 $n_1, n_2$ : Brechzahlen der optischen Medien

### 3.4 Quantenphysik und Materie

#### Quantenobjekte

◆ Energie eines Photons

$$E = h \cdot f$$

$E$ : Energie;  
 $h$ : Planck'sches Wirkungsquantum;  
 $f$ : Frequenz des Photons

◆ Energiebilanz beim Fotoeffekt

$$E_{\text{kin,max}} = h \cdot f - W_A$$

$E_{\text{kin,max}}$ : maximale kinetische Energie der Fotoelektronen;  
 $h$ : Planck'sches Wirkungsquantum;  
 $f$ : Frequenz des Photons;  $W_A$ : Auslösearbeit

◆ Impuls eines Photons

$$p = \frac{E}{c}$$

$p$ : Impuls;  $E$ : Energie;  $c$ : Lichtgeschwindigkeit

◆ Wellenlänge eines Quantenobjekts (de-Broglie-Wellenlänge)

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

$\lambda$ : Wellenlänge;  
 $h$ : Planck'sches Wirkungsquantum;  
 $p$ : Impuls des Quantenobjekts

◆ Compton-Effekt

$$\Delta\lambda = \lambda_C \cdot (1 - \cos\varphi)$$

$$\text{mit: } \lambda_C = \frac{h}{m \cdot c}$$

$\Delta\lambda$  : Änderung der Wellenlänge;  
 $\lambda_C$  : Compton-Wellenlänge;  
 $\varphi$  : Streuwinkel (Winkel zwischen der Richtung des eingestrahnten und der Richtung des gestreuten Photons);  
 $h$  : Planck'sches Wirkungsquantum;  
 $m$  : Masse des Quantenobjekts;  
 $c$  : Lichtgeschwindigkeit

◆ Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi}$$

$\Delta x$  : Ortsunbestimmtheit;  
 $\Delta p_x$  : Impulsunbestimmtheit;  
 $h$  : Planck'sches Wirkungsquantum

◆ Energie-Zeit-Unbestimmtheitsrelation

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

$\Delta E$  : Energieunbestimmtheit;  
 $\Delta t$  : Zeitunbestimmtheit;  
 $h$  : Planck'sches Wirkungsquantum

◆ zeitunabhängige Schrödingergleichung

$$\psi_n''(x) = \frac{8\pi^2 \cdot m}{h^2} \cdot (E_{\text{pot}}(x) - E_n) \cdot \psi_n(x)$$

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

Lösung für den Potenzialtopf mit unendlich hohen Wänden:

$$\psi_n(x) = A_n \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n}{L} \cdot x\right) \text{ für } 0 < x < L,$$

$$\text{sonst: } \psi_n(x) = 0$$

$\psi$  : Wellenfunktion;  $m$  : Masse;  
 $h$  : Planck'sches Wirkungsquantum;  
 $x$  : Ort;  $E_{\text{pot}}$  : potenzielle Energie;  
 $E_n$  : Energiewerte;  $A_n$  : Normierungsfaktor;  
 $L$  : Länge des Potenzialtopfes

## Atomhülle

◆ Frequenzbedingung für Übergänge zwischen den diskreten Energieniveaus

$$h \cdot f = E_m - E_n = \Delta E$$

$$n, m = 1, 2, 3, \dots$$

$h$  : Planck'sches Wirkungsquantum;  
 $f$  : Frequenz;  $E_m, E_n$  : Energieniveaus;  
 $\Delta E$  : Energiedifferenz

◆ Spektrallinien des Wasserstoffatoms

$$f = c \cdot R_H \cdot \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

$$n, m = 1, 2, 3, \dots$$

$$m > n$$

$f$  : Frequenz;  
 $c$  : Vakuumlichtgeschwindigkeit;  
 $R_H$  : Rydberg-Konstante des Wasserstoffatoms

- ◆ Energieniveaus des Wasserstoffatoms (ohne Korrektur des mitbewegten Kerns)

$$E_n = -\frac{m_e \cdot e^4}{8\varepsilon_0^2 \cdot h^2} \cdot \frac{1}{n^2} = -13,6 \text{ eV} \cdot \frac{1}{n^2}$$

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

$E_n$ : Energieniveau des Wasserstoffatoms;  
 $m_e$ : Elektronenmasse;  $e$ : Elementarladung;  
 $\varepsilon_0$ : elektrische Feldkonstante;  
 $h$ : Planck'sches Wirkungsquantum

- ◆ Energieniveaus eines Ein-Elektronen-Atoms (ohne Korrektur des mitbewegten Kerns)

$$E_n = -\frac{m_e \cdot e^4}{8\varepsilon_0^2 \cdot h^2} \cdot \frac{Z^2}{n^2} = -13,6 \text{ eV} \cdot \frac{Z^2}{n^2}$$

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

$E_n$ : Energieniveau eines Ein-Elektronen-Atoms;  
 $m_e$ : Elektronenmasse;  
 $e$ : Elementarladung;  
 $\varepsilon_0$ : elektrische Feldkonstante;  
 $h$ : Planck'sches Wirkungsquantum;  
 $Z$ : Ordnungszahl

- ◆ Moseley-Gesetz für die  $K_\alpha$ -Linie eines Röntgenspektrums

$$E_{K_\alpha} = 13,6 \text{ eV} \cdot \frac{3}{4} \cdot (Z - 1)^2$$

$E_{K_\alpha}$ : Energie des beim  $K_\alpha$ -Übergang emittierten Photons;  
 $Z$ : Ordnungszahl

- ◆ Energie im eindimensionalen Potenzialtopf mit unendlich hohen Wänden

$$E_n = \frac{h^2}{8m \cdot L^2} \cdot n^2$$

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

Im Inneren gilt:  $E_{\text{pot}} = 0 \text{ eV}$

$E_n$ : Energieniveau;  
 $h$ : Planck'sches Wirkungsquantum;  
 $m$ : Masse des Quantenobjekts;  
 $L$ : Länge des Potenzialtopfes

- ◆ Materiewellenlänge bei stationären Zuständen im eindimensionalen Potenzialtopf

$$\lambda_n = 2 \cdot \frac{L}{n}$$

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

$\lambda_n$ : Materiewellenlänge;  
 $L$ : Länge des Potenzialtopfes

### 3.5 Wärmelehre

#### Grundgleichung der Wärmelehre

$$Q = \Delta E = c \cdot m \cdot \Delta T$$

$Q$ : aufgenommene bzw. abgegebene Wärme;  
 $E$ : Energie;  $c$ : spezifische Wärmekapazität;  
 $m$ : Masse;  $T$ : Temperatur

#### Entropieänderung

$$\Delta S = \frac{Q_{\text{rev}}}{T}$$

$S$ : Entropie;  $Q_{\text{rev}}$ : reversibel aufgenommene bzw. abgegebene Wärme;  
 $T$ : Temperatur

### Hauptsätze der Wärmelehre

◆ 1. Hauptsatz

$$\Delta U = Q + W$$

$U$  : innere Energie;  $Q$  : Wärme;  $W$  : Arbeit

◆ 2. Hauptsatz

$$\Delta S \geq 0$$

$S$  : Entropie

### Zustandsgleichung für ideale Gase

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{konstant}$$

$p$  : Druck;  $V$  : Volumen;  $T$  : Temperatur

### Thermisches Verhalten von Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen

◆ Aggregatzustandsänderungen

◆ Verdampfungswärme

$$Q_V = q_V \cdot m$$

$Q_V$  : Verdampfungswärme;  $q_V$  : spezifische Verdampfungswärme;  $m$  : Masse

◆ Schmelzwärme

$$Q_S = q_S \cdot m$$

$Q_S$  : Schmelzwärme;  $q_S$  : spezifische Schmelzwärme;  $m$  : Masse

◆ Wärmeleitung

$$Q = \Delta E = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d} \cdot \Delta t$$

$Q$  : Wärme;  $E$  : Energie;  
 $\lambda$  : Wärmeleitfähigkeitskoeffizient;  
 $A$  : Flächeninhalt;  
 $T$  : Temperatur;  $d$  : Dicke/Länge des Körpers;  $t$  : Zeit

◆ Thermische Längenänderung

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T$$

$l$  : Länge;  
 $\alpha$  : Längenausdehnungskoeffizient;  
 $l_0$  : Ausgangslänge;  $T$  : Temperatur

◆ Thermische Volumenänderung

$$\Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta T$$

$V$  : Volumen;  
 $\gamma$  : Volumenausdehnungskoeffizient;  
 $V_0$  : Ausgangsvolumen;  $T$  : Temperatur

## 3.6 Spezielle Relativitätstheorie

**Galilei-Transformation**

$$S \rightarrow S'$$

$$x' = x - v \cdot t$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

$$S' \rightarrow S$$

$$x = x' + v \cdot t$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = t'$$

$x, y, z$  : Koordinaten im Inertialsystem S;  
 $x', y', z'$  : Koordinaten im Inertialsystem S';  
 $t, t'$  : Zeiten in den jeweiligen Systemen;  
 $v$  : Relativgeschwindigkeit der Inertialsysteme S und S'

**Lorentz-Faktor**

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$\gamma$  : Lorentz-Faktor;  
 $v$  : Relativgeschwindigkeit der Inertialsysteme S und S';  $c$  : Lichtgeschwindigkeit

**Lorentz-Transformation**

$$S \rightarrow S'$$

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

$$y' = y$$

$$z' = z$$

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

$$S' \rightarrow S$$

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

$$y = y'$$

$$z = z'$$

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

$x, y, z$  : Koordinaten im Inertialsystem S;  
 $x', y', z'$  : Koordinaten im Inertialsystem S';  
 $t, t'$  : Zeiten in den jeweiligen Systemen;  
 $v$  : Relativgeschwindigkeit der Inertialsysteme S und S' zueinander;  
 $\gamma$  : Lorentz-Faktor;  
 $c$  : Lichtgeschwindigkeit

**Zeitdilatation**

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t_0$$

$\Delta t$  : Zeitdauer, die ein Beobachter aus seinem Ruhesystem S für einen Vorgang misst;  $\gamma$  : Lorentz-Faktor;  
 $\Delta t_0$  : Zeitdauer, in der im dazu mit der Relativgeschwindigkeit  $v$  bewegten Bezugssystem S' ein Vorgang abläuft

**Längenkontraktion**

$$l = \frac{l_0}{\gamma}$$

$l$  : Länge eines im bewegten Bezugssystem S' ruhenden Stabes, die ein Beobachter aus seinem Ruhesystem S misst;  
 $l_0$  : Länge eines im bewegten Bezugssystem S' ruhenden Stabes, im bewegten Bezugssystem S' gemessen;  
 $\gamma$  : Lorentz-Faktor

**Impuls**

$$p = \gamma \cdot m \cdot v$$

$p$  : Impuls;  $\gamma$  : Lorentz-Faktor;  $m$  : Masse;  
 $v$  : Geschwindigkeit

**Energie**

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

$E$  : Energie;  $\gamma$  : Lorentz-Faktor;  $m$  : Masse;  
 $c$  : Lichtgeschwindigkeit;  $E_0$  : Ruheenergie;  
 $E_{\text{kin}}$  : kinetische Energie

**Energie-Impuls-Beziehung**

$$E^2 = c^2 p^2 + E_0^2$$

$E$  : Energie;  $c$  : Lichtgeschwindigkeit;  
 $p$  : Impuls;  $E_0$  : Ruheenergie

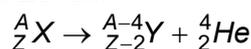
**3.7 Kernphysik**
**Nukleonen**

$$A = Z + N$$

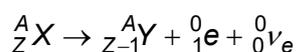
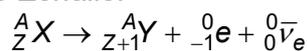
$A$  : Nukleonenzahl, Massenzahl;  
 $N$  : Neutronenzahl;  $Z$  : Protonenzahl, Kernladungszahl

**Freisetzung von  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -Strahlung**

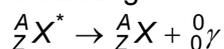
$\alpha$ -Zerfall:



$\beta$ -Zerfälle:



$\gamma$ -Strahlung:



$A$  : Massenzahl;  $Z$  : Protonenzahl, Kernladungszahl;  
 $X, Y$  : Elementsymbol;  
 $X^*$  : angeregtes Nuklid;  
 $\bar{\nu}_e$  : Elektron-Antineutrino;  $\nu_e$  : Elektron-Neutrino

**Aktivität einer radioaktiven Substanz**

$$A(t) = -\dot{N}(t) = -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N(t)$$

$A$  : Aktivität;  
 $N$  : Anzahl der noch nicht zerfallenen Kerne;  $\lambda$  : Zerfallskonstante

### Zerfallsgesetz

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

$$N(t) = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

$$\text{mit: } T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

$N$ : Anzahl der zur Zeit  $t$  noch nicht zerfallenen Kerne;  $N_0$ : Anzahl der ursprünglich vorhandenen Kerne;  $\lambda$ : Zerfallskonstante;  $t$ : Zeit;  $T_{1/2}$ : Halbwertszeit

### Absorptionsgesetz

$$z(d) = z_0 \cdot e^{-\mu \cdot d} = z_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{d}{D_{1/2}}}$$

$z$ : Zählrate (hinter einem Absorber der Dicke  $d$ );  $z_0$ : Zählrate (ohne Absorber, gleicher Ort);  $\mu$ : Schwächungskoeffizient;  $D_{1/2}$ : Halbwertsdicke

### Energiedosis

$$D = \frac{E}{m}$$

$D$ : Energiedosis;  
 $E$ : aufgenommene Energie;  $m$ : Masse

### Äquivalentdosis

$$H = D \cdot q$$

$H$ : Äquivalentdosis;  $D$ : Energiedosis;  
 $q$ : Qualitätsfaktor

### Effektive Dosis

$$E = w_{T_1} \cdot H_{T_1} + w_{T_2} \cdot H_{T_2} + \dots$$

$E$ : Effektive Dosis;  
 $w_{T_1}, w_{T_2}, \dots$ : Gewebe-Wichtungsfaktoren;  
 $H_{T_1}, H_{T_2}, \dots$ : Organ-Äquivalentdosen

### Bindungsenergie des Kerns

$$E_B = \Delta m \cdot c^2$$

$$\text{mit: } \Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_K$$

$E_B$ : Bindungsenergie;  
 $\Delta m$ : Massendefekt;  $c$ : Lichtgeschwindigkeit;  $Z$ : Protonenzahl, Kernladungszahl;  
 $m_p$ : Protonenmasse;  $N$ : Neutronenzahl;  
 $m_n$ : Neutronenmasse;  $m_K$ : Kernmasse

### Freierwerdende Energie bei Kernreaktionen (Q-Wert)

$$Q = \Delta E = (m_{\text{vor}} - m_{\text{nach}}) \cdot c^2$$

$Q$ : Q-Wert der Kernreaktion;  $E$ : Energie;  
 $m_{\text{vor}}$ : Masse vor der Kernreaktion;  
 $m_{\text{nach}}$ : Masse nach der Kernreaktion;  
 $c$ : Lichtgeschwindigkeit

## Kernradius

$$r_K \approx 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ m} \cdot \sqrt[3]{A}$$

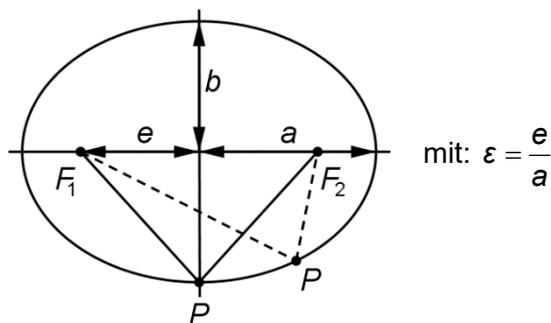
$r_K$ : Kernradius;  $A$ : Massenzahl

## 3.8 Astrophysik

### Kepler'sche Gesetze

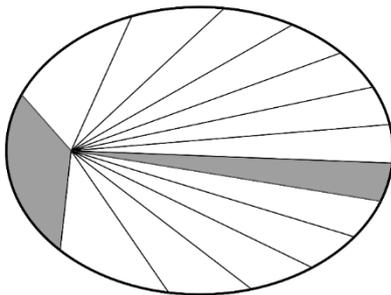
#### ◆ 1. Kepler'sches Gesetz

Die Planeten bewegen sich auf Ellipsenbahnen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.



$a$ ,  $b$ : große bzw. kleine Halbachse;  
 $e$ : lineare Exzentrizität;  
 $F_1$ ,  $F_2$ : Brennpunkte;  
 $P$ : Planet;  $\varepsilon$ : numerische Exzentrizität

#### ◆ 2. Kepler'sches Gesetz



$$\frac{\Delta A}{\Delta t} = \text{konstant}$$

$A$ : Flächeninhalt der vom Leitstrahl überstrichene Fläche;  
 $t$ : Zeit

#### ◆ 3. Kepler'sches Gesetz

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

$T_1, T_2$ : Umlaufzeiten der Objekte beim Umlauf um den Zentralkörper;  
 $a_1, a_2$ : große Halbachsen der Objekte beim Umlauf um den Zentralkörper

## Bewegung im Gravitationsfeld

#### ◆ Bahngeschwindigkeit eines Körpers auf einer Keplerellipse

$$v = \sqrt{G \cdot M \cdot \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}$$

$v$ : Bahngeschwindigkeit;  $G$ : Gravitationskonstante;  $M$ : Masse des Zentralkörpers;  
 $r$ : Abstand vom Zentralkörper;  
 $a$ : große Halbachse der Bahnellipse

◆ Zweikörperproblem

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot (m_1 + m_2)}$$

mit:  $a = a_1 + a_2$

$T$ : Umlaufzeit;  $a_1, a_2$ : große Halbachsen der Himmelskörper (gemeinsamer Schwerpunkt);

$G$ : Gravitationskonstante;  $m_1, m_2$ : Massen

◆ Schwerpunktsatz

$$m_1 \cdot a_1 = m_2 \cdot a_2$$

$m_1, m_2$ : Massen;

$a_1, a_2$ : große Halbachsen der Himmelskörper (gemeinsamer Schwerpunkt)

◆ Umlaufzeiten

$$\frac{1}{T_{\text{sid}}} = \frac{1}{T_{\text{Erde}}} \pm \frac{1}{T_{\text{syn}}}$$

$T_{\text{sid}}$ : siderische Umlaufzeit;

$T_{\text{Erde}}$ : Umlaufzeit der Erde;

$T_{\text{syn}}$ : synodische Umlaufzeit

◆ Kreisbahngeschwindigkeit

$$v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}$$

$v$ : Geschwindigkeit;  $G$ : Gravitationskonstante;  $M$ : Masse des Zentralkörpers;

$r$ : Abstand vom Mittelpunkt des Zentralkörpers

◆ Fluchtgeschwindigkeit

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{r}}$$

$v$ : Geschwindigkeit;  $G$ : Gravitationskonstante;  $M$ : Masse des Zentralkörpers;

$r$ : Abstand vom Mittelpunkt des Zentralkörpers

### Schwarzschild-Radius eines schwarzen Lochs

$$R_S = \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2}$$

$R_S$ : Radius des Ereignishorizonts des schwarzen Lochs;  $G$ : Gravitationskonstante;  $M$ : Masse des schwarzen

Lochs;  $c$ : Lichtgeschwindigkeit

### Strahlungsgesetze

◆ Bestrahlungsstärke

$$E = \frac{\Phi}{4\pi \cdot r^2}$$

$E$ : Bestrahlungsstärke;  $\Phi$ : Strahlungsleistung, Leuchtkraft;  $r$ : Abstand vom Körper

◆ Empirische Masse-Leuchtkraft-Beziehung (Näherung)

$$L \sim M^3$$

$L$ : Leuchtkraft eines Hauptreihensterns;

$M$ : Masse des Sterns

◆ Stefan-Boltzmann-Gesetz für schwarze Strahler

$$\Phi = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

$\Phi$ : Strahlungsleistung, Leuchtkraft;

$\sigma$ : Stefan-Boltzmann-Konstante;

$A$  : Flächeninhalt der abstrahlenden Fläche;  
 $T$  : Temperatur

- ◆ Wien'sches Verschiebungsgesetz

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

$\lambda_{\max}$  : Wellenlänge des Maximums der spektralen Verteilung der Strahlungsintensität;  $T$  : Temperatur;  
 $b$  : Wien'sche Verschiebungskonstante

## Entfernung und Helligkeit

- ◆ Trigonometrische Parallaxe  $p$  in Bogensekunden

$$\frac{r}{1 \text{ pc}} = \frac{1''}{p}$$

$r$  : Entfernung des Sterns;  
 $p$  : trigonometrische Parallaxe

- ◆ Eigenbewegung

$$v_t = \mu \cdot r$$

$v_t$  : Tangentialgeschwindigkeit;  
 $\mu$  : Winkelgeschwindigkeit des Sterns (Eigenbewegung);  
 $r$  : Entfernung des Sterns

- ◆ Beziehung zwischen den scheinbaren Helligkeiten  $m_1$  und  $m_2$  zweier Sterne

$$m_1 - m_2 = -2,5 \cdot \lg \left( \frac{E_1}{E_2} \right)$$

$m_1, m_2$  : scheinbare Helligkeiten;  
 $E_1, E_2$  : Bestrahlungsstärken

- ◆ Beziehung zwischen den absoluten Helligkeiten  $M_1$  und  $M_2$  zweier Sterne

$$M_1 - M_2 = -2,5 \cdot \lg \left( \frac{L_1}{L_2} \right)$$

$M_1, M_2$  : absolute Helligkeiten;  
 $L_1, L_2$  : Leuchtkräfte

- ◆ Entfernungsmodul eines Sternes

$$m - M = 5 \cdot \lg \left( \frac{r}{10 \text{ pc}} \right)$$

$m$  : scheinbare Helligkeit;  
 $M$  : absolute Helligkeit;  
 $r$  : Abstand zwischen Stern und Beobachter

- ◆ Empirische Perioden-Helligkeits-Beziehung bei Cepheiden

$$M = -1,84 - 2,24 \cdot \lg \left( \frac{p}{1 \text{ d}} \right)$$

$M$  : mittlere absolute Helligkeit;  
 $p$  : Periodendauer des  $\delta$ -Cephei-Sternes

- ◆ Hubble-Beziehung

$$v = H_0 \cdot r$$

$v$  : Radialgeschwindigkeit einer weit entfernten Galaxie;  $H_0$  : Hubble-Parameter;  
 $r$  : Entfernung

**Nichtrelativistische Näherung des optischen Doppler-Effekts**

$$\frac{\Delta f}{f} \approx \pm \frac{v}{c}$$

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \approx \pm \frac{v}{c}$$

$f$  : Frequenz;

$v$  : Relativgeschwindigkeit von Sender und Empfänger;

$c$  : Lichtgeschwindigkeit;  $\lambda$  : Wellenlänge

## 4 Anhang

### 4.1 Größen, Einheiten und ihre Beziehungen untereinander

Größe	Formelzeichen	Name der Einheit	Einheitenzeichen	Beziehungen zwischen den Einheiten
Aktivität	$A$	Becquerel	Bq	$1\text{Bq} = \frac{1}{\text{s}}$
Äquivalentdosis	$H$	Sievert	Sv	$1\text{Sv} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$
Arbeit	$W$	Joule	J	$1\text{J} = 1\text{Nm} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$
Beschleunigung	$a$		$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	
Bestrahlungsstärke	$E$		$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	
Dichte	$\rho$		$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,001 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Drehmoment	$M$		Nm	$1\text{Nm} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$
Drehimpuls	$L$		Nm · s	$1\text{Nm} \cdot \text{s} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}}$
Druck	$p$	Pascal Bar	Pa bar	$1\text{Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$ $1\text{bar} = 10^5 \text{Pa}$
effektive Dosis	$E$	Sievert	Sv	$1\text{Sv} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$
elektrische Feldstärke	$E$		$\frac{\text{V}}{\text{m}}$	$1 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{C}}$
elektrische Flussdichte	$D$		$\frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$	
elektrische Ionenäquivalentleitfähigkeit	$\Lambda_{\text{eq}}$		$\frac{\text{S} \cdot \text{cm}^2}{\text{mol}}$	
elektrische Kapazität	$C$	Farad	F	$1\text{F} = 1 \frac{\text{C}}{\text{V}} = 1 \frac{\text{A}^2 \cdot \text{s}^4}{\text{kg} \cdot \text{m}^2}$
elektrische Ladung	$Q$	Coulomb	C	$1\text{C} = 1\text{As}$

elektrische Leitfähigkeit	$\kappa$		$\frac{S}{m}$	$1 \frac{S}{m} = \frac{1}{\Omega \cdot m}$
elektrischer Leitwert	$G$	Siemens	S	$1S = \frac{1}{\Omega} = 1 \frac{A}{V}$
elektrische Spannung	$U$	Volt	V	$1V = 1 \frac{W}{A} = 1 \frac{J}{C} = 1 \frac{kg \cdot m^2}{s^3 \cdot A}$
elektrische Stromstärke	$I$	Ampere	A	
elektrischer Widerstand	$R$	Ohm	$\Omega$	$1\Omega = 1 \frac{V}{A} = 1 \frac{kg \cdot m^2}{s^3 \cdot A^2}$
elektrisches Potenzial	$\varphi$	Volt	V	$1V = 1 \frac{W}{A} = 1 \frac{J}{C} = 1 \frac{kg \cdot m^2}{s^3 \cdot A}$
elektrochemisches Potenzial	$E$	Volt	V	$1V = 1 \frac{W}{A} = 1 \frac{J}{C} = 1 \frac{kg \cdot m^2}{s^3 \cdot A}$
Energie	$E$	Joule Elektronenvolt Kilokalorie Kilowattstunde	J eV kcal kWh	$1J = 1Nm = 1Ws = 1 \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$ $1eV = 1,602176634 \cdot 10^{-19} J$ $1kcal = 4,184 kJ$ $1kWh = 3600 kJ$
Energiedosis	$D$	Gray	Gy	$1Gy = 1 \frac{J}{kg}$
Enthalpie	$H$	Joule	J	$1J = 1Nm = 1 \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$
freie Enthalpie	$G$	Joule	J	$1J = 1Nm = 1 \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$
Entropie	$S$		$\frac{J}{K}$	
Flächeninhalt	$A$		$m^2$	
Flächenladungsdichte	$\sigma$		$\frac{As}{m^2}$	
Frequenz	$f$	Hertz	Hz	$1Hz = 1 \frac{1}{s}$
Geschwindigkeit	$v$		$\frac{m}{s}$	
Helligkeit	$m, M$	Magnitude	mag	
Impuls	$p$		$\frac{kg \cdot m}{s}$	

Induktivität	$L$	Henry	H	$1\text{H} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{A}^2}$
Intensität	$I$		$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	
innere Energie	$U$	Joule	J	$1\text{J} = 1\text{Nm} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$
Kraft	$F$	Newton	N	$1\text{N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$
Kreisfrequenz	$\omega$		$\frac{1}{\text{s}}$	
Länge	$l$	Meter	m	
Leistung	$P$	Watt	W	$1\text{W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3}$
magnetische Feldstärke	$H$		$\frac{\text{A}}{\text{m}}$	
magnetischer Fluss	$\phi$	Weber	Wb	$1\text{Wb} = 1\text{V} \cdot \text{s}$
magnetische Flussdichte	$B$	Tesla	T	$1\text{T} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \cdot \text{A}}$
Masse	$m$	Kilogramm atomare Masseinheit	kg u	$1\text{u} = 1,66053906660 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Schalldruckpegel	$L_p$	Dezibel	dB	
Schallintensitätspegel	$L_I$	Dezibel	dB	
spezifische Wärmekapazität	$c$		$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	
Stoffmenge	$n$	Mol	mol	
Temperatur	$T$ $\vartheta$	Kelvin Grad Celsius	K °C	$0\text{°C} \hat{=} 273,15\text{ K}$
Trägheitsmoment	$J$		$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	
Viskosität	$\eta$		$\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$	
Volumen	$V$	Kubikmeter Liter	$\text{m}^3$ $\ell, \text{L}$	$1\text{m}^3 = 1000\text{ L}$
Wärme	$Q$	Joule	J	$1\text{J} = 1\text{Nm} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$

Wellenlänge	$\lambda$	Meter	m	
Winkelgeschwindigkeit	$\omega$		$\frac{1}{s}$	
Zeit	$t$	Sekunde	s	

#### 4.2 Astronomische Entfernungsangaben

- ◆  $1 \text{ Lj} = 9,4607 \cdot 10^{15} \text{ m}$
- ◆  $1 \text{ AE} = 1,4960 \cdot 10^{11} \text{ m}$
- ◆  $1 \text{ pc} = 3,0857 \cdot 10^{16} \text{ m}$

#### 4.3 Vorsätze bei Einheiten

Vorsatz	Zeichen	Faktor, mit dem die Einheit multipliziert wird	Vorsatz	Zeichen	Faktor, mit dem die Einheit multipliziert wird
Exa	E	$10^{18}$	Dezi	d	$10^{-1}$
Peta	P	$10^{15}$	Zenti	c	$10^{-2}$
Tera	T	$10^{12}$	Milli	m	$10^{-3}$
Giga	G	$10^9$	Mikro	$\mu$	$10^{-6}$
Mega	M	$10^6$	Nano	n	$10^{-9}$
Kilo	k	$10^3$	Piko	p	$10^{-12}$
Hekto	h	$10^2$	Femto	f	$10^{-15}$
Deka	da	$10^1$	Atto	a	$10^{-18}$

#### 4.4 Tabellierte Werte

##### Naturkonstanten und Näherungswerte wichtiger Größen

- ◆ Avogadro-Konstante:  $N_A = 6,02214076 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$  (definiert)
- ◆ Elementarladung:  $e = 1,602176634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  (definiert)
- ◆ elektrische Feldkonstante:  $\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 \cdot c^2} = 8,8541878128 \cdot 10^{-12} \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{m}}$
- ◆ Faraday-Konstante:  $F = 96485,33212 \dots \frac{\text{C}}{\text{mol}}$  (definiert)
- ◆ Gravitationskonstante:  $G = 6,67430 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$

- ◆ Hubble-Parameter:  $H_0 = 68 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}$
- ◆ ideale Gaskonstante:  $R = 8,314462618... \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$  (definiert)
- ◆ magnetische Feldkonstante:  $\mu_0 = 1,256637 \cdot 10^{-6} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}$
- ◆ Normgröße der Normalfallbeschleunigung, Ortsfaktor:  
 $g = 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  (definiert)
- ◆ Planck'sches Wirkungsquantum:  $h = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  (definiert)
- ◆ Rydberg-Konstante:  $R_H = 1,096776 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{m}}$  (Wasserstoffatom)
- ◆ Stefan-Boltzmann-Konstante:  $\sigma = 5,670374419... \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$  (definiert)
- ◆ Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  (definiert)
- ◆ Wien'sche Verschiebungskonstante:  $b = 2,897771955... \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$  (definiert)

### Elektron, Proton, Neutron, $\alpha$ -Teilchen

- ◆ Elektron
  - ◆ Masse:  $m_e = 9,1093837015 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
  - ◆ Ladung:  $q_e = -1 e$
- ◆ Proton
  - ◆ Masse:  $m_p = 1,67262192369 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
  - ◆ Ladung:  $q_p = 1 e$
- ◆ Neutron
  - ◆ Masse:  $m_n = 1,67492749804 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
  - ◆ Ladung:  $q_n = 0 \text{ C}$
- ◆  $\alpha$ -Teilchen
  - ◆ Masse:  $m_\alpha = 6,6446573357 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
  - ◆ Ladung:  $q_\alpha = 2 e$

## Teilchen des Standardmodells

### ◆ Tabelle der Quarks

Teilchen	Symbol	Ladung in e	Masse in $\frac{eV}{c^2}$
Up	$u$	+ 2/3	$2,16 \cdot 10^6$
Down	$d$	- 1/3	$4,67 \cdot 10^6$
Charm	$c$	+ 2/3	$1,27 \cdot 10^9$
Strange	$s$	- 1/3	$93,4 \cdot 10^6$
Top	$t$	+ 2/3	$1,73 \cdot 10^{11}$
Bottom	$b$	- 1/3	$4,18 \cdot 10^9$

### ◆ Tabelle der Leptonen

Teilchen	Symbol	Ladung in e	Masse in $\frac{eV}{c^2}$
Elektron	$e^-$	-1	$511,00 \cdot 10^3$
Elektron-Neutrino	$\nu_e$	0	< 1,1
Myon	$\mu^-$	-1	$105,66 \cdot 10^6$
Myon-Neutrino	$\nu_\mu$	0	< $0,19 \cdot 10^6$
Tauon	$\tau^-$	-1	$1,7769 \cdot 10^9$
Tauon-Neutrino	$\nu_\tau$	0	< $18,2 \cdot 10^6$

## Festgelegte Bedingungen

### ◆ molares Volumen idealer Gase bei $p = 101,325 \text{ kPa}$

◆  $V_m = 22,414 \frac{\text{L}}{\text{mol}}$  bei  $T = 273,15 \text{ K}$

◆  $V_m = 24,466 \frac{\text{L}}{\text{mol}}$  bei  $T = 298,15 \text{ K}$

### ◆ Wasser

◆ Ionenprodukt:  $K_W = 1,0 \cdot 10^{-14} \frac{\text{mol}^2}{\text{L}^2}$  bei  $T = 298,15 \text{ K}$

◆ spezifische Wärmekapazität:  $c_W = 4,183 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$  bei  $T = 298,15 \text{ K}$  und  $p = 101,325 \text{ kPa}$

**Dichte**

## ♦ Dichte fester Stoffe bei 25 °C

Stoff	$\rho$ in $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Stoff	$\rho$ in $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Aluminium	2,70	Holz (lufttrocken) Eiche	0,6 ... 0,9
		Kiefer	0,3 ... 0,7
		Ebenholz	1,1 ... 1,3
Beton	2,3	Kork	0,2 ... 0,35
Blei	11,34	Kupfer	8,96
Diamant	3,51	Magnesium	1,74
Eis (bei 0 °C)	0,917	Marmor	2,6 ... 2,8
Eisen	7,86	Papier	0,7 ... 1,2
Glas (Fensterglas)	2,4... 2,6	Porzellan	2,2 ... 2,4
Glas (Quarzglas)	2,20	Sandstein	2,1 ... 2,4
Gold	19,3	Silber	10,50
Granit	2,6 ... 2,8	Stahl	7,8
Graphit	2,26	Zink	7,14
Hartgummi	1,2 ... 1,8	Zinn	7,30

## ♦ Dichte von Flüssigkeiten bei 25 °C

Stoff	$\rho$ in $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Stoff	$\rho$ in $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Aceton (Propanon)	0,79	Petroleum	0,81
Benzin	0,68 ... 0,72	Quecksilber	13,53
Dieselmotorenkraftstoff	0,84 ... 0,88	Schwefelsäure (50 %)	1,397
Erdöl	0,73 ... 0,94	schweres Wasser	1,10
Ethanol	0,79	Spiritus	0,83
Glycerin	1,26	Wasser destilliert Meerwasser	1,00 1,02

## ♦ Dichte von Gasen bei 0 °C und 101,3 kPa

Stoff	$\rho$ in $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Stoff	$\rho$ in $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Ammoniak	0,00077	Ozon	0,00215
Chlor	0,00322	Propan	0,00201
Erdgas (trocken)	0,0007	Sauerstoff	0,00143
Helium	0,00018	Stickstoff	0,00125

Kohlenstoffdioxid	0,00198	Wasserstoff	0,00009
Luft (trocken)	0,00129	Xenon	0,00585
Methan	0,00072		

### Dielektrizitätszahl

bei 20 °C

Stoff	$\epsilon_r$	Stoff	$\epsilon_r$
Bernstein	2,8	Paraffin	2,3
Glas	5 ... 16	Polystyrol	2,6
Bariumtitanat (BaTiO <sub>3</sub> )	100 ... 1000	Porzellan	4,5 ... 6,5
Calciumtitanat (CaTiO <sub>3</sub> )	150 ... 180	Transformatoröl	2,5
Luft	1,0006	Vakuum	1
Hartpapier	3,5 ... 5	Wasser	81

### Permeabilitätszahl (relative Permeabilität)

bei 20 °C

diamagnetische Stoffe		paramagnetische Stoffe		ferromagnetische Stoffe	
Stoff	$\mu_r$	Stoff	$\mu_r$	Stoff	$\mu_r$
Antimon	0,999884	Aluminium	1,00002	Cobalt	80 ... 200
Gold	0,999971	Chrom	1,00028	Dynamoblech	200 ... 3000
Quecksilber	0,999966	Eisen(III)-chlorid	1,003756	Eisen	250 ... 680
Wasser	0,999986	Luft	1,00000037	Nickel	280 ... 2500
Zink	0,999986	Platin	1,0002	Sonderlegierungen	bis 900000

### Spezifischer elektrischer Widerstand

bei 20 °C

♦ Metalle

Metall	$\rho$ in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	Metall	$\rho$ in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$
Aluminium	0,028	Kupfer	0,0172
Blei	0,21	Quecksilber	0,96
Eisen	0,10	Silber	0,016

Gold	0,022	Wolfram	0,055
Konstantan	0,50	Zinn	0,11

◆ Kohle und Widerstandslegierungen

Material	$\rho$ in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	Material	$\rho$ in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$
Bogenlampenkohle	60...80	Manganin	0,43
Bürstenkohle	40...100	Nickelin	0,43
Chromnickel	1,1	Stahlguss	0,18
Leitungskupfer	0,0178		

◆ Halbleiter und Isolatoren

Material	$\rho$ in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	Material	$\rho$ in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$
Bernstein	bis $10^8$	Porzellan	bis $10^{18}$
Holz, trocken	$10^{11} \dots 10^{15}$	Quarzglas	$10^{13} \dots 10^{15}$
Kupferoxid	$10^3 \dots 10^8$	Silicium	$10^{-1} \dots 10^5$
Polyvinylchlorid PVC	$10^{14} \dots 10^{15}$	Transformatoröl	$10^{12} \dots 10^{15}$
Polyethen PE	$10^{12}$	Wasser (destilliert)	$10^{10}$

## Brechzahlen

Die Brechzahlen beziehen sich auf den Übergang der gelben Natriumlinien ( $\lambda = 589,3 \text{ nm}$ ) aus dem Vakuum in den angegebenen Stoff.

Stoff	Brechzahl $n$	Stoff	Brechzahl $n$
Diamant	2,417	Augenlinse	1,40...1,41
Eis	1,31	Glycerin	1,474
Flintglas, leicht	1,608	Hornhaut	1,376
Flintglas, schwer	1,754	Kammerwasser	1,336
Kronglas, leicht	1,515	Luft	1,0003
Kronglas, schwer	1,615	Wasser	1,333
Quarzglas	1,459		

**Hall-Konstante**

Stoff	$R_H$ in $\frac{\text{m}^3}{\text{C}}$	Stoff	$R_H$ in $\frac{\text{m}^3}{\text{C}}$
Aluminium	$-3,5 \cdot 10^{-11}$	Indiumantimonid	$+7 \cdot 10^{-4}$
Bismut	$+5 \cdot 10^{-7}$	Kupfer	$-5,2 \cdot 10^{-11}$
Cadmium	$+5,9 \cdot 10^{-11}$	Palladium	$-8,6 \cdot 10^{-11}$
Germanium n-dotiert	$+5,6 \cdot 10^{-3}$	Platin	$-2,0 \cdot 10^{-11}$
Germanium p-dotiert	$+6,6 \cdot 10^{-3}$	Silber	$-8,9 \cdot 10^{-11}$
Gold	$-7,2 \cdot 10^{-11}$	Zink	$+6,4 \cdot 10^{-11}$

**Auslösearbeit**

Metall	$W_A$ in eV	Metall	$W_A$ in eV
Aluminium	4,20	Eisen	4,67
Barium	2,52	Magnesium	3,66
Cadmium	4,08	Platin	5,64
Caesium	1,95	Wolfram	4,55
Calcium	2,87	Zink	3,95
Gold	5,47	Zinn	4,42

**Längenausdehnungs- und Volumenausdehnungskoeffizienten**

## ♦ Längenausdehnungskoeffizienten

Stoff	$\alpha$ in $\frac{10^{-6}}{\text{K}}$	Stoff	$\alpha$ in $\frac{10^{-6}}{\text{K}}$
Aluminium	23,1	Polyethen PE	200
Beton	12	Polyvinylchlorid PVC	80
weißes Floatglas	8,7	Stahl	11,7
Kupfer	16,5		

## ♦ Volumenausdehnungskoeffizienten

Stoff	$\gamma$ in $\frac{10^{-3}}{\text{K}}$ bei 20 °C	Stoff	$\gamma$ in $\frac{10^{-3}}{\text{K}}$ bei 20 °C
Benzin	1,00	Wasser	0,18
Ethanol	1,10		

## Spezifische Wärmekapazitäten

### ◆ feste Stoffe

Stoff	spezifische Wärmekapazität $c$ in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	Stoff	spezifische Wärmekapazität $c$ in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Aluminium	0,90	Mauerwerk	≈ 0,86
Beton	0,92	Platin	0,13
Diamant	0,50	Porzellan	≈ 0,84
Fensterglas	0,17	Quarzglas	0,73
Gold	0,13	Silber	0,24
Graphit	0,71	Stahl	≈ 0,47
Holz (Eiche)	2,39	Wolfram	0,13
Kupfer	0,38	Zink	0,39
Magnesium	1,02	Zinn	0,23

### ◆ Flüssigkeiten

Stoff	spezifische Wärmekapazität $c$ in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	Stoff	spezifische Wärmekapazität $c$ in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Benzol	1,70	Petroleum	2,00
Ethanol	2,42	Quecksilber	0,14
Glycerin	2,39	Wasser	4,183

### ◆ Gase

Stoff	spezifische Wärmekapazität $c_V$ bei konstantem Volumen in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	spezifische Wärmekapazität $c_P$ bei konstantem Druck in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Ammoniak	1,56	2,05
Helium	3,22	5,24
Kohlenstoffdioxid	0,65	0,85
Luft	0,72	1,01
Propan	1,36	1,55
Sauerstoff	0,65	0,92
Stickstoff	0,75	1,04
Wasserdampf	1,40	1,86
Wasserstoff	10,13	14,28

**Schmelztemperatur und spezifische Schmelzwärme**

Stoff	Schmelztemperatur $\vartheta_s$ (bei 101,325 kPa) in °C	spezifische Schmelzwärme $q_s$ in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
Aluminium	660,3	397
Blei	327,5	26
Eis	0	334
Ethanol	-114,1	108
Gold	1064,2	65
Helium	-270 (bei 2,6 MPa)	
Kupfer	1084,6	205
Magnesium	650	382
Methanol	-97,53	69
Platin	1768,4	113
Quecksilber	-38,83	11,3
Sauerstoff	-218,79	
Silber	961,78	104
Silizium	1414	142
Stahl	723 - 1536	
Stickstoff	-210,0	
Wasser	0	334
Wasserstoff	-259,34	59
Wolfram	3422	192
Zink	419,53	111
Zinn	231,93	59

**Siedetemperatur und spezifische Verdampfungswärme**

Stoff	Siedetemperatur $\vartheta_v$ (bei 101,325 kPa) in °C	spezifische Verdampfungswärme $q_v$ in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
Ammoniak	-33,33	1370
Aceton	56,05	520
Ethanol	78,29	842
Glycerin	290	853
Helium	-268,93	25

Kohlenstoffdioxid	-79 (Subl.)	574
Methanol	64,6	1102
Sauerstoff	-182,95	213
Stickstoff	-195,79	198
Wasser	100	2260
Wasserstoff	-252,87	455

### Schallgeschwindigkeiten

Feste Stoffe	$v$ in $\frac{m}{s}$	Flüssigkeiten und Gase	$v$ in $\frac{m}{s}$
Aluminium	5100	Wasser bei 4 °C	1400
Beton	3800	Helium	1020
Blei	1300	Kohlenstoffdioxid	260
Holz (Eiche)	4100	Luft bei 0 °C	332
Eis bei -4 °C	3230	Luft bei 10 °C	338
Glas	4000 ... 5000	Wasser bei 20 °C	1483
Granit	3950	Luft bei 20 °C	343
Kork	500	Stickstoff	348
Kupfer	3900	Wasserstoff	1280
Marmor	3800		
Messing	3400		
PVC, weich	80		
PVC, hart	1700		
Stahl	5100		
Ziegel	3600		

### Daten zum Sonnensystem

#### ◆ Daten der Sonne

Masse	$1,9894 \cdot 10^{30}$ kg
Mittlerer Radius	$6,9570 \cdot 10^5$ km
Mittlere Dichte	$1,4 \frac{g}{cm^3}$
Rotationsdauer am Äquator	25 d
Oberflächentemperatur	$5,8 \cdot 10^3$ K
Leuchtkraft	$3,846 \cdot 10^{26}$ W

Solarkonstante	$1,361 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$
Absolute Helligkeit	4,83
Scheinbare Helligkeit	-26,74
Fallbeschleunigung (Ortsfaktor) an der Oberfläche	$274 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

◆ Daten der Erde

Große Halbachse	$1,4960 \cdot 10^8 \text{ km} = 1 \text{ AE}$
Umlaufzeit	$365,2563 \text{ d} = 31558149,54 \text{ s}$
Numerische Exzentrizität der Bahn	0,017
Masse	$5,974 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
Mittlerer Radius	$6,371 \cdot 10^3 \text{ km}$
Mittlere Dichte	$5,5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Fallbeschleunigung (Ortsfaktor) an der Oberfläche (Mittel-europa)	$9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Neigung der Rotationsachse gegen die Bahnebene	$23,44^\circ$
Siderische Rotationsdauer	23,9345 h

◆ Daten des Erdmondes

Große Halbachse	$3,844 \cdot 10^5 \text{ km}$
Siderische Umlaufzeit	27,32 d
Synodische Umlaufzeit	29,53 d
Numerische Exzentrizität der Bahn	0,055
Bahnneigung gegen die Ekliptik	$5,1^\circ$
Masse	$7,349 \cdot 10^{22} \text{ kg}$
Mittlerer Radius	1737 km
Mittlere Dichte	$3,3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Fallbeschleunigung (Ortsfaktor) an der Oberfläche	$1,62 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Neigung der Rotationsachse gegen die Bahnebene	$6,68^\circ$
Siderische Rotationsdauer	27,32 d

◆ Daten der Planeten

	<b>Merkur</b>	<b>Venus</b>	<b>Erde</b>	<b>Mars</b>	<b>Jupiter</b>	<b>Saturn</b>	<b>Uranus</b>	<b>Neptun</b>
Große Halbachse in AE	0,387	0,723	1	1,52	5,20	9,58	19,2	30,1

Numerische Exzentrizität der Bahn	0,21	0,0067	0,017	0,094	0,049	0,057	0,046	0,011
Bahnneigung gegen die Ekliptik	7,0°	3,4°	0	1,9°	1,3°	2,5°	0,77°	1,8°
Siderische Umlaufzeit in a	0,2408	0,6152	1	1,881	11,86	29,46	84,01	164,8
Masse in Erdmassen	0,0553	0,815	1	0,107	318	95,2	14,5	17,1
Mittlerer Radius in 10 <sup>3</sup> km	2,44	6,05	6,371	3,39	69,9	58,2	25,4	24,6
Mittlere Dichte in $\frac{g}{cm^3}$	5,4	5,2	5,5	3,9	1,3	0,69	1,3	1,6
Fallbeschleunigung an der Oberfläche in $\frac{m}{s^2}$	3,7	8,9	9,8	3,7	24,8	10,4	8,9	11,2
Neigung der Rotationsachse gegen die Bahnebene	0,010°	177,4°	23,44°	25,2°	3,1°	26,7°	97,8°	28,3°
Neigung der Bahnebene zur Ekliptik	7,0°	3,4°	0	1,9°	1,3°	2,5°	0,77°	1,8°
Siderische Rotationsdauer (ggf. am Äquator) in h	1407,6	5832,5	23,934	24,62	9,93	10,66	17,24	16,11

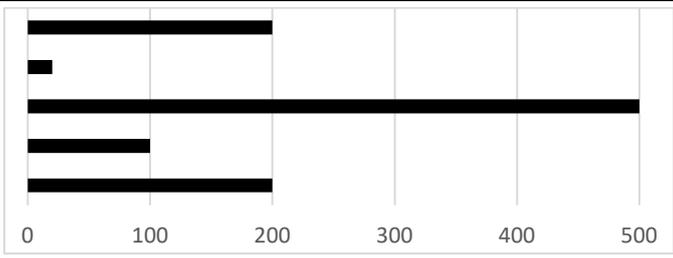
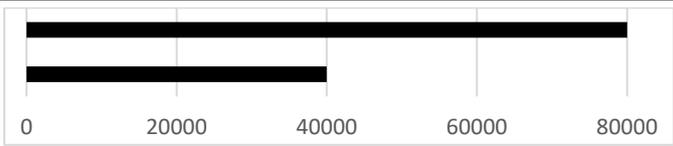
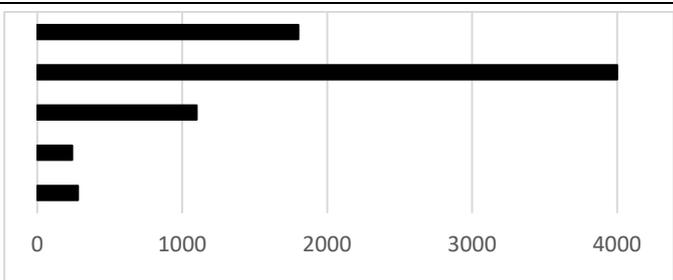
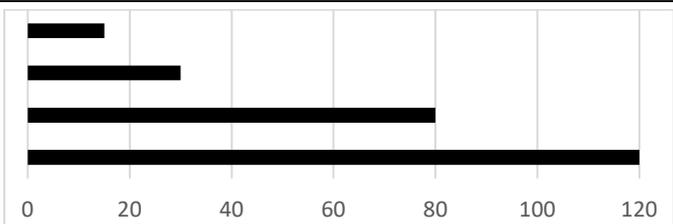
#### Gewebe-Wichtungsfaktoren $w_T$

Organ	$w_T$
Rotes Knochenmark, Dickdarm, Lunge, Magen, Brust, übrige Organe und Gewebe	je 0,12
Keimdrüsen	0,08
Blase, Speiseröhre, Leber, Schilddrüse	je 0,04
Haut, Knochenoberfläche, Gehirn, Speicheldrüse	je 0,01

#### Typische Werte für Qualitätsfaktoren $q$

Strahlungsart	$q$
$\alpha$	20
n	5 - 20
$\beta, \gamma$	1

**Wellenlängen ausgewählter Spektrallinien**

Element	$\lambda$ in nm	relative Intensität
Helium	447,15 492,19 587,56 667,82 706,52	
Natrium	589,00 589,59	
Quecksilber	404,66 435,83 546,07 576,96 579,07	
Wasserstoff (Balmer-Serie)	410,17 ( $H_\delta$ ) 434,05 ( $H_\gamma$ ) 486,13 ( $H_\beta$ ) 656,27 ( $H_\alpha$ )	

**Säureexponent  $pK_S$  und Basenexponent  $pK_B$** 

$pK_S$	Säure	konjugierte Base	$pK_B$
-11	HI	$I^-$	25
-10	$HClO_4$	$ClO_4^-$	24
-9	HBr	$Br^-$	23
-7	HCl	$Cl^-$	21
-3	$H_2SO_4$	$HSO_4^-$	17
-1,37	$HNO_3$	$NO_3^-$	15,37
0	$H_3O^+$	$H_2O$	14,00
1,25	HOOC-COOH	HOOC-COO $^-$	12,75
1,85	$H_2SO_3$	$HSO_3^-$	12,15
1,99	$HSO_4^-$	$SO_4^{2-}$	12,01

2,16	$\text{H}_3\text{PO}_4$	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	11,84
2,22	$[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$	$[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})]^{2+}$	11,78
3,20	HF	$\text{F}^-$	10,80
3,25	$\text{HNO}_2$	$\text{NO}_2^-$	10,75
3,75	HCOOH	$\text{HCOO}^-$	10,25
3,81	$\text{HOOC-COO}^-$	$^- \text{OOC-COO}^-$	10,19
4,75	$\text{CH}_3\text{COOH}$	$\text{CH}_3\text{COO}^-$	9,25
4,97	$[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$	$[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})]^{2+}$	9,03
6,35	$\text{H}_2\text{CO}_3$	$\text{HCO}_3^-$	7,65
7,05	$\text{H}_2\text{S}$	$\text{HS}^-$	6,95
7,20	$\text{HSO}_3^-$	$\text{SO}_3^{2-}$	6,80
7,21	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	$\text{HPO}_4^{2-}$	6,79
8,96	$[\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$	$[\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})]^+$	5,04
9,21	HCN	$\text{CN}^-$	4,79
9,25	$\text{NH}_4^+$	$\text{NH}_3$	4,75
10,33	$\text{HCO}_3^-$	$\text{CO}_3^{2-}$	3,67
12,32	$\text{HPO}_4^{2-}$	$\text{PO}_4^{3-}$	1,68
14,00	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{OH}^-$	0
19	$\text{HS}^-$	$\text{S}^{2-}$	-5
23,00	$\text{NH}_3$	$\text{NH}_2^-$	-9
24,00	$\text{OH}^-$	$\text{O}^{2-}$	-10

### Säure-Base-Indikatoren

Indikator	pH-Bereich des Farbumschlags	Farbänderung
Thymolblau	1,2 - 2,8	rot-gelb
Methylorange	3,0 - 4,4	rot-gelborange
Bromkresolgrün	3,8 - 5,4	gelb-blau
Methylrot	4,2 - 6,2	rot-gelb
Lackmus	5,0 - 8,0	rot-blau
Bromthymolblau	6,0 - 7,6	gelb-blau
Thymolblau	8,0 - 9,6	gelb-blau
Phenolphthalein	8,2 - 10,0	farblos-purpur

Thymolphthalein	9,3 - 10,5	farblos-blau
Alizarin R	10,0 - 12,1	hellgelb-rotbraun

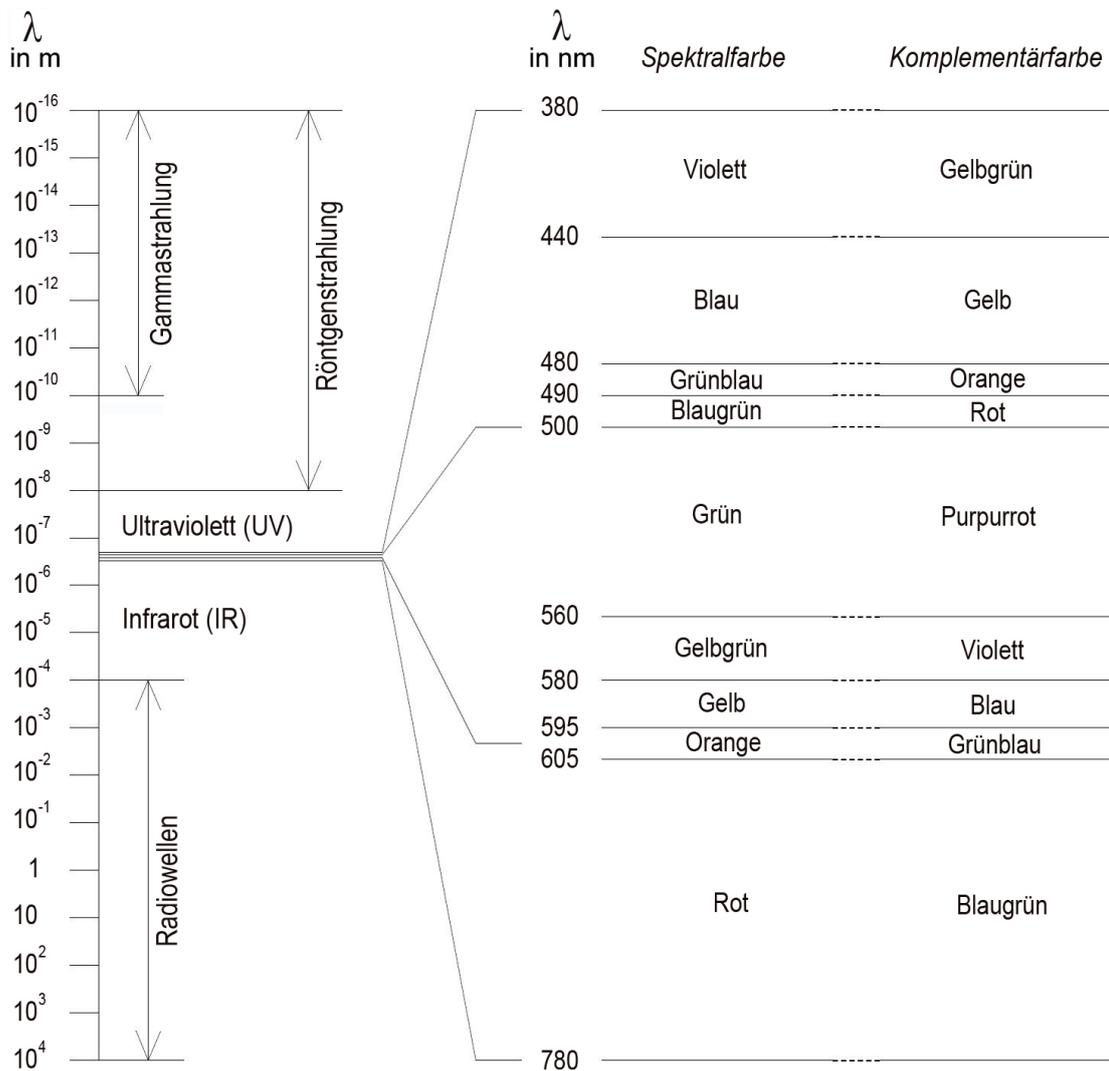
### Standardpotenziale

bei  $T = 298,15\text{K}$ ,  $p = 101,325\text{kPa}$  und  $c = 1 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$

reduzierte Form	$\rightleftharpoons$	oxidierte Form $+ z \cdot e^-$	Standardpotenzial $E^\circ$ in V
Li	$\rightleftharpoons$	$\text{Li}^+ + e^-$	-3,04
Na	$\rightleftharpoons$	$\text{Na}^+ + e^-$	-2,71
Mg	$\rightleftharpoons$	$\text{Mg}^{2+} + 2e^-$	-2,37
Al	$\rightleftharpoons$	$\text{Al}^{3+} + 3e^-$	-1,66
Mn	$\rightleftharpoons$	$\text{Mn}^{2+} + 2e^-$	-1,19
$\text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	$\rightleftharpoons$	$2\text{H}_2\text{O} + 2e^-$	-0,83 (pH = 14)
Zn	$\rightleftharpoons$	$\text{Zn}^{2+} + 2e^-$	-0,76
Cr	$\rightleftharpoons$	$\text{Cr}^{3+} + 3e^-$	-0,74
$\text{S}^{2-}$	$\rightleftharpoons$	$\text{S} + 2e^-$	-0,48
Fe	$\rightleftharpoons$	$\text{Fe}^{2+} + 2e^-$	-0,45
Ni	$\rightleftharpoons$	$\text{Ni}^{2+} + 2e^-$	-0,26
Sn	$\rightleftharpoons$	$\text{Sn}^{2+} + 2e^-$	-0,14
Pb	$\rightleftharpoons$	$\text{Pb}^{2+} + 2e^-$	-0,13
$\text{H}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons$	$2\text{H}_3\text{O}^+ + 2e^-$	0,00 (pH = 0)
$\text{Cu}^+$	$\rightleftharpoons$	$\text{Cu}^{2+} + e^-$	+0,15
Cu	$\rightleftharpoons$	$\text{Cu}^{2+} + 2e^-$	+0,34
$4\text{OH}^-$	$\rightleftharpoons$	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^-$	+0,40 (pH = 14)
Cu	$\rightleftharpoons$	$\text{Cu}^+ + e^-$	+0,52
$2\text{I}^-$	$\rightleftharpoons$	$\text{I}_2 + 2e^-$	+0,54
$\text{Fe}^{2+}$	$\rightleftharpoons$	$\text{Fe}^{3+} + e^-$	+0,77
Ag	$\rightleftharpoons$	$\text{Ag}^+ + e^-$	+0,80
$2\text{Br}^-$	$\rightleftharpoons$	$\text{Br}_2 + 2e^-$	+1,07
Pt	$\rightleftharpoons$	$\text{Pt}^{2+} + 2e^-$	+1,18
$6\text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons$	$\text{O}_2 + 4\text{H}_3\text{O}^+ + 4e^-$	+1,23 (pH = 0)
$2\text{Cl}^-$	$\rightleftharpoons$	$\text{Cl}_2 + 2e^-$	+1,36
Au	$\rightleftharpoons$	$\text{Au}^{3+} + 3e^-$	+1,50
$2\text{F}^-$	$\rightleftharpoons$	$\text{F}_2 + 2e^-$	+2,87



## Spektrum der elektromagnetischen Strahlung



## Kernmassen ausgewählter Nuklide

Kernmassen ausgewählter Nuklide

Z	Nuklid	$m_K$ in u
1	H 1	1,007276
	H 2	2,013553
	H 3	3,015501
2	He 3	3,014932
	He 4	4,001506
3	Li 6	6,013477

	Li 7	7,014358
4	Be 9	9,009989
	Be 10	10,011340
5	B 10	10,010194
		11,006562
6	C 12	11,996708
		13,000063
		14,999950

7	N 14	13,999234
		15,996269
		16,002262
8	O 15	14,998677
		16,990526
		17,994743
		18,994771

## Atommassen ausgewählter Nuklide

Atommassen ausgewählter Nuklide

Z	Nuklid	$m_a$ in u
1	H 1	1,007825
	H 2	2,014102
	H 3	3,016049
2	He 3	3,016029
	He 4	4,002603
3	Li 6	6,015123

	Li 7	7,016005
4	Be 9	9,012182
	Be 10	10,013534
5	B 10	10,012937
		11,009305
6	C 12	12,000000
		13,003355
		14,003242
7	N 14	14,003074

		15,000109
		16,006102
8	O 15	15,003066
		16,994915
		17,999132
		18,999161
9	F 19	18,998403
10	Ne 20	19,992440
		20,993847

		22	21,991385
11	Na	22	21,994438
		23	22,989769
		24	23,990963
		25	24,989954
12	Mg	24	23,985042
		25	24,985837
		26	25,982593
13	Al	27	26,981539
14	Si	28	27,976927
		29	28,976495
		30	29,973770
15	P	30	29,978315
		31	30,973762
		32	31,973908
16	S	32	31,972071
		33	32,971459
		34	33,967867
		35	34,969032
		36	35,967081
17	Cl	35	34,968853
		37	36,965903
		38	37,968010
18	Ar	36	35,967545
		38	37,962732
		39	38,964314
		40	39,962383
		41	40,964501
		42	41,963046
19	K	39	38,963707
		40	39,963998
		41	40,961825
		42	41,962402
20	Ca	40	39,962591
		42	41,958618
		43	42,958766
		44	43,955481
		45	44,956186
		46	45,953688
21	Sc	45	44,955907
22	Ti	46	45,952626
		47	46,951757
		48	47,947941
		49	48,947870
		50	49,944786
23	V	51	50,943958
24	Cr	51	50,944765
		52	51,940505
		53	52,940646
		54	53,938877
25	Mn	55	54,938043
26	Fe	54	53,939608
		55	54,938291
		56	55,934936
		57	56,935392
		58	57,933274
		59	58,934873
		60	59,934070
27	Co	55	54,941996
		56	55,939838
		57	56,936290
		58	57,935751

		59	58,933194
		60	59,933816
28	Ni	58	57,935342
		60	59,930785
		61	60,931055
		62	61,928345
		64	63,927966
29	Cu	63	62,929597
		65	64,927789
		66	65,928869
30	Zn	64	63,929142
		65	64,929241
		66	65,926034
		67	66,927127
		68	67,924844
31	Ga	69	68,925574
		71	70,924703
32	Ge	70	69,924249
		72	71,922076
		73	72,923459
		74	73,921178
		76	75,921403
33	As	75	74,921595
34	Se	74	73,922476
		76	75,919214
		77	76,919914
		78	77,917309
		80	79,916522
35	Br	79	78,918338
		81	80,916288
		82	81,916802
36	Kr	78	77,920366
		80	79,916378
		82	81,913481
		83	82,914127
		84	83,911498
		85	84,912527
		86	85,910611
		89	88,917835
		92	91,926173
37	Rb	85	84,911790
		94	93,926395
38	Sr	84	83,913419
		86	85,909261
		87	86,908877
		88	87,905612
		90	89,907728
		92	91,911038
		94	93,915356
		96	95,921719
		98	97,928693
39	Y	89	88,905838
		90	89,907142
		95	94,912820
		96	95,915909
40	Zr	90	89,904699
		91	90,905640
		92	91,905035
		94	93,906313
		95	94,908040
41	Nb	93	92,906373
		95	94,906831

42	Mo	92	91,906807
		94	93,905084
		95	94,905837
		96	95,904675
		97	96,906017
		98	97,905404
		100	99,907468
43	Tc	97	96,906361
		99	98,906250
44	Ru	96	95,907589
		98	97,905287
		99	98,905930
		100	99,904210
		101	100,905573
		102	101,904340
		104	103,905425
45	Rh	103	102,905494
46	Pd	102	101,905632
		104	103,904030
		105	104,905079
		106	105,903480
		108	107,903892
		110	109,905173
47	Ag	107	106,905092
		109	108,904756
48	Cd	106	105,906460
		110	109,903007
		111	110,904184
		114	113,903365
		116	115,904763
49	In	113	112,904060
50	Sn	114	113,902780
		115	114,903345
		116	115,901743
		118	117,901607
		120	119,902203
		122	121,903445
		124	123,905280
51	Sb	121	120,903811
		123	122,904215
52	Te	120	119,904066
		122	121,903045
		124	123,902818
		125	124,904431
		126	125,903312
		130	129,906223
53	I	123	122,905590
		127	126,904473
		131	130,906126
54	Xe	124	123,905885
		126	125,904297
		128	127,903531
		129	128,904781
		130	129,903509
		131	130,905084
		132	131,904155
		134	133,905393
		138	137,914146
55	Cs	133	132,905452
		134	133,906719
		135	134,905977
		136	135,907311

		137	136,907089
		138	137,911017
		140	139,917284
56	Ba	130	129,906326
		132	131,905061
		134	133,904508
		135	134,905688
		136	135,904576
		137	136,905827
		138	137,905247
		144	143,922955
57	La	139	138,906363
58	Ce	136	135,907129
		138	137,905994
		140	139,905448
59	Pr	141	140,907660
60	Nd	142	141,907729
		143	142,909820
		145	144,912579
		146	145,913122
		148	147,916899
61	Pm	145	144,912755
62	Sm	144	143,911999
		150	149,917282
		152	151,919739
		154	153,922216
63	Eu	151	150,919857
		153	152,921237
64	Gd	154	153,920873
		155	154,922629
		156	155,922130
		157	156,923967
		158	157,924111
		160	159,927061
65	Tb	159	158,925354
66	Dy	156	155,924284
		158	157,924415
		160	159,925204
		161	160,926939
		162	161,926805
		163	162,928737
		164	163,929181
67	Ho	165	164,930329
68	Er	162	161,928787
		164	163,929208
		166	165,930301
		167	166,932056
		168	167,932378
		170	169,935472
69	Tm	169	168,934219
70	Yb	168	167,933891
		170	169,934767
		171	170,936332
		172	171,936387
		173	172,938216
		174	173,938868
		176	175,942575
71	Lu	175	174,940777
72	Hf	176	175,941410
		177	176,943230
		178	177,943708
		179	178,945826

		180	179,946560
73	Ta	181	180,947999
74	W	180	179,946713
		182	181,948206
		183	182,950224
		185	184,953421
		186	185,954365
75	Re	185	184,952958
		187	186,955752
76	Os	187	186,955750
		188	187,955837
		189	188,958146
		190	189,958445
		192	191,961479
77	Ir	191	190,960592
		193	192,962924
78	Pt	192	191,961043
		194	193,962683
		195	194,964794
		196	195,964955
		198	197,967897
79	Au	197	196,966570
		198	197,968244
80	Hg	196	195,965833
		198	197,966769
		199	198,968281
		200	199,968327
		201	200,970303
		202	201,970644
		204	203,973494
81	Tl	203	202,972344
		204	203,973863
		205	204,974427
		207	206,977419
		208	207,982018
82	Pb	204	203,973044
		205	204,974482
		206	205,974465
		207	206,975897
		208	207,976652
		209	208,981090
		210	209,984188
		211	210,988735
		212	211,991896
		214	213,999804
83	Bi	209	208,980399
		210	209,984120
		211	210,987269
		212	211,991285
		213	212,994384
		214	213,998711
84	Po	210	209,982874
		211	210,986653
		212	211,988868
		213	212,992857
		214	213,995201
		215	214,999418
		216	216,001913
		218	218,008971
85	At	217	217,004718
86	Rn	219	219,009479
		220	220,011392

		222	222,017576
87	Fr	221	221,014254
88	Ra	223	223,018501
		224	224,020210
		225	225,023611
		226	226,025408
		228	228,031069
89	Ac	225	225,023229
		227	227,027751
		228	228,031020
90	Th	227	227,027703
		228	228,028740
		229	229,031761
		230	230,033132
		231	231,036303
		232	232,038054
		233	233,041580
		234	234,043600
91	Pa	231	231,035883
		233	233,040247
		234	234,043306
92	U	233	233,039634
		234	234,040950
		235	235,043928
		236	236,045566
		237	237,048728
		238	238,050787
		239	239,054292
		240	240,056592
93	Np	237	237,048172
94	Pu	238	238,049558
		239	239,052162
		240	240,053812
		241	241,056850
		242	242,058741
		244	244,064204
95	Am	241	241,056827
		242	242,059547

Auszug aus der Nuklidkarte

95														
94														
93														
92														
91						Pa216 105 ms α: 7,948 γ: 0,134	Pa217 3,8 ms α: 8,337 γ: 0,466	Pa218 113 μs α: 9,616 γ: 0,92	Pa219 53 ns α: 9,90	Pa220 0,78 μs α: 9,65	Pa221 5,9 μs α: 9,08	Pa222 4,3 ms α: 8,21	Pa223 6,5 ms α: 8,01	Pa224 0,95 s α: 7,555
90			Th213 0,14 s α: 7,69	Th214 0,10 s α: 7,68 γ: 0,134	Th215 1,2 s α: 7,392 γ: 0,134	Th216 26,0 ms α: 7,923 γ: 0,629	Th217 252 μs α: 9,261 γ: 0,822	Th218 0,1 μs α: 9,67	Th219 1,05 μs α: 9,34	Th220 9,7 μs α: 8,79	Th221 1,68 ms α: 8,15	Th222 2,24 ms α: 7,980	Th223 0,66 s α: 7,324 γ: 0,390	
89	Ac209 90 ms α: 7,59	Ac210 0,35 s α: 7,46	Ac211 0,25 s α: 7,481	Ac212 0,93 s α: 7,38	Ac213 0,80 s α: 7,36	Ac214 8,2 s α: 7,215 γ: 0,139	Ac215 0,17 s α: 7,600	Ac216 0,44 ms α: 9,029 γ: 0,083	Ac217 69 ns α: 9,65	Ac218 1,1 μs α: 9,205	Ac219 11,8 μs α: 8,664	Ac220 26 ms α: 7,85 γ: 0,134	Ac221 52 ms α: 7,65	Ac222 5,0 s α: 7,009
88	Ra208 1,3 s α: 7,133	Ra209 4,6 s α: 7,003	Ra210 3,7 s α: 7,003	Ra211 13 s α: 6,907	Ra212 13,0 s α: 6,899 γ: 0,110	Ra213 2,74 min α: 6,624 γ: 0,110	Ra214 2,46 s α: 7,137	Ra215 1,67 ms α: 8,700 γ: 0,834	Ra216 0,18 μs α: 9,349	Ra217 1,6 μs α: 8,99	Ra218 25,6 μs α: 8,39	Ra219 10 ms α: 7,679 γ: 0,316	Ra220 23 ms α: 7,46 γ: 0,465	Ra221 28 s α: 6,613 γ: 0,149
87	Fr207 14,8 s α: 6,767	Fr208 58,6 s α: 6,636 γ: 0,636	Fr209 50,0 s α: 6,648	Fr210 3,18 min α: 6,543 γ: 0,644	Fr211 3,10 min α: 6,535 γ: 0,540	Fr212 20,0 min α: 6,262 γ: 1,274	Fr213 34,6 s α: 6,775	Fr214 5,0 ms α: 8,426	Fr215 0,09 μs α: 9,36	Fr216 0,70 μs α: 9,01	Fr217 16 μs α: 8,315	Fr218 1,0 ms α: 7,867	Fr219 21 ms α: 7,312	Fr220 27,4 s α: 6,68 γ: 0,045
86	Rn206 5,67 min α: 6,260 γ: 0,498	Rn207 9,3 min α: 6,133 γ: 0,345	Rn208 24,4 min α: 6,138 γ: 0,427	Rn209 28,5 min α: 6,039 γ: 0,408	Rn210 2,4 h α: 6,040 γ: 0,458	Rn211 14,6 h α: 5,783 γ: 0,674	Rn212 24 min α: 6,264	Rn213 19,5 ms α: 8,088 γ: 540	Rn214 0,27 μs α: 9,037	Rn215 2,3 μs α: 8,67	Rn216 45 μs α: 8,05	Rn217 0,54 μs α: 7,740	Rn218 35 ms α: 7,133	Rn219 3,96 s α: 6,819 γ: 0,271
85	At205 26,2 min α: 5,902 γ: 0,719	At206 29,4 min α: 5,703 γ: 0,701	At207 1,8 h α: 5,759 γ: 0,815	At208 1,63 h α: 5,640 γ: 0,686	At209 5,4 h α: 5,647 γ: 0,545	At210 8,3 h α: 5,524 γ: 1,181	At211 7,22 h α: 5,867	At212 314 ms α: 7,68 γ: 0,063	At213 0,11 μs α: 9,08	At214 0,56 μs α: 8,819	At215 0,1 ms α: 8,026	At216 0,3 ms α: 7,804	At217 32,3 ms α: 7,069	At218 2 s α: 6,694
84	Po204 3,53 h α: 5,377 γ: 0,884	Po205 1,66 h α: 5,22 γ: 0,872	Po206 8,8 d α: 5,2233 γ: 1,032	Po207 5,84 h α: 5,116 γ: 0,992	Po208 2,898 a α: 5,1152	Po209 102 a α: 4,881	Po210 138,38 d α: 5,30438	Po211 0,516 s α: 7,450	Po212 0,3 μs α: 8,785	Po213 4,2 μs α: 8,376	Po214 164 μs α: 7,6869	Po215 1,78 ms α: 7,3862	Po216 0,15 s α: 6,7783	Po217 1,53 s α: 6,543
83	Bi203 11,76 h β: 1,4 γ: 0,820	Bi204 11,22 d α: 0,899 γ: 1,764	Bi205 15,31 d α: 1,764 γ: 0,803	Bi206 6,24 d α: 1,764 γ: 0,803	Bi207 31,55 a α: 1,764 γ: 0,803	Bi208 3,68E5 a α: 1,764 γ: 0,803	Bi209 1,9E19 a α: 1,317 γ: 2,615	Bi210 5,013 d α: 4,649 β: 1,2	Bi211 2,17 min α: 6,6229 γ: 0,351	Bi212 60,60 min α: 6,051 β: 2,3 γ: 0,727	Bi213 45,59 min α: 5,87 β: 1,4 γ: 0,440	Bi214 19,9 min α: 5,450 β: 1,5 γ: 0,609	Bi215 7,7 min α: 5,450 β: 1,5 γ: 0,294	Bi216 7,7 min α: 5,450 β: 1,5 γ: 0,294
82	Pb202 5,25E4 a γ: 0,279	Pb203 51,9 h α: 0,279	Pb204 1,4E17 a α	Pb205 1,5E7 a α	Pb206 stabil	Pb207 stabil	Pb208 stabil	Pb209 3,253 h β: 0,6	Pb210 22,3 a α: 3,72 β: 0,02 γ: 0,047	Pb211 36,1 min β: 1,4 γ: 0,405	Pb212 10,64 h β: 0,3 γ: 0,239	Pb213 10,2 min β: 0,7 γ: 0,352	Pb214 26,8 min β: 0,7 γ: 0,352	
81	Tl201 73,1 h γ: 0,167	Tl202 12,23 d γ: 0,440	Tl203 stabil	Tl204 3,78 a β: 0,8	Tl205 stabil	Tl206 4,20 min β: 1,5	Tl207 4,77 min β: 1,4	Tl208 3,053 min β: 1,8 γ: 2,615	Tl209 2,16 min β: 1,8 γ: 1,567	Tl210 1,3 min β: 1,9 γ: 0,800				
80	Hg200 stabil	Hg201 stabil	Hg202 stabil	Hg203 46,59 d β: 0,2 γ: 0,279	Hg204 stabil	Hg205 5,2 min β: 1,5 γ: 0,204	Hg206 8,15 min β: 1,5 γ: 0,305							
79	Au199 3,139 d β: 0,3 γ: 0,158	Au200 48,4 min β: 2,3 γ: 0,368	Au201 26,4 min β: 1,3 γ: 0,543	Au202 28 s β: 3,5 γ: 0,440	Au203 60 s β: 2,0 γ: 0,218	Au204 39,8 s γ: 0,437								
78	Pt198 stabil	Pt199 30,8 min β: 1,7 γ: 0,543	Pt200 12,5 h β: 0,6 γ: 0,076	Pt201 2,5 min β: 2,7 γ: 1,706										
77	Ir197 8,9 min β: 2,0 γ: 0,470	Ir198 8 s β: 4,0 γ: 0,507												
120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	

			Am232 1,31 min		Am234 2,32 min		Am236 3,6 min α: 6,15 γ: 0,719	Am237 73 min α: 6,04 γ: 0,280	Am238 1,63 h α: 5,94 γ: 0,963	Am239 11,9 h α: 5,774 γ: 0,278	Am240 50,8 h α: 5,378 γ: 0,988	Am241 432,2 a α: 5,486 γ: 0,060	Am242 16 h β: 0,7	Am243 7370 a α: 5,275 γ: 0,075	95	
				Pu232 34,1 min α: 6,60 γ: 0,235	Pu233 20,9 min α: 6,31 γ: 0,371	Pu234 8,8 h α: 6,202 γ: 0,327	Pu235 25,3 min α: 5,85 γ: 0,049	Pu236 2,658 a α: 5,768 γ: 0,060	Pu237 45,2 d α: 5,334 γ: 0,060	Pu238 87,74 a α: 5,499 γ: 0,029	Pu239 2,41E4 a α: 5,157 γ: 0,029	Pu240 6563 a α: 5,168 γ: 0,029	Pu241 14,35 a α: 4,896 β: 0,02	Pu242 3,75E5 a α: 4,901 γ: 0,029	94	
Np227 51 s α: 7,68	Np228 61,4 s	Np229 4,0 min α: 6,890	Np230 4,6 min α: 6,66 γ: 0,371	Np231 48,8 min α: 6,28 γ: 0,371	Np232 14,7 min α: 6,28 γ: 0,327	Np233 36,2 min α: 5,54 γ: 1,559	Np234 4,4 d α: 5,025 γ: 1,559	Np235 396,1 d α: 5,025 β: 2,3	Np236 1,54E5 a α: 5,025 β: 2,3	Np237 2,14E6 a α: 4,790 γ: 0,029	Np238 2,117 d β: 1,2 γ: 0,984	Np239 2,355 d β: 0,4 γ: 0,106	Np240 65 min β: 0,9 γ: 0,566	Np241 13,9 min β: 1,3 γ: 0,175	93	
U226 0,28 s α: 7,555 γ: 0,182	U227 1,1 min α: 6,86 γ: 0,247	U228 9,1 min α: 6,68 γ: 0,247	U229 58 min α: 6,362 γ: 0,123	U230 20,8 d α: 5,888 γ: 0,026	U231 4,2 d α: 5,456 γ: 0,026	U232 68,9 a α: 5,320 γ: 0,026	U233 1,59E5 a α: 4,824 γ: 0,026	U234 2,46E5 a α: 4,775 γ: 0,026	U235 7,04E8 a α: 4,398 γ: 0,186	U236 2,34E7 a α: 4,494 γ: 0,186	U237 6,75 d β: 0,2 γ: 0,060	U238 6,75 d β: 0,2 γ: 0,060	U239 23,5 min β: 1,2 γ: 0,075	U240 14,1 h β: 0,4 γ: 0,044	92	
Pa225 1,8 s α: 7,25	Pa226 1,8 min α: 6,86 γ: 0,065	Pa227 38,3 min α: 6,465 γ: 0,065	Pa228 22 h α: 6,078 γ: 0,911	Pa229 1,50 d α: 5,580 β: 0,5 γ: 0,952	Pa230 17,4 d α: 5,345 β: 0,5 γ: 0,952	Pa231 3,28E4 a α: 5,014 γ: 0,027	Pa232 1,31 d β: 0,3 γ: 0,969	Pa233 27,0 d β: 0,3 γ: 0,312	Pa234 1,17 min β: 2,3 γ: 0,312	Pa235 24,2 min β: 1,4 γ: 0,128	Pa236 9,1 min β: 2,0 γ: 0,642	Pa237 8,7 min β: 1,4 γ: 0,854	Pa238 2,3 min β: 1,7 γ: 1,015	Pa239 2,3 min β: 1,7 γ: 1,015	91	
Th224 1,04 s α: 7,17 γ: 0,177	Th225 8,72 min α: 6,482 γ: 0,321	Th226 31 min α: 6,336 γ: 0,111	Th227 18,72 d α: 6,038 γ: 0,236	Th228 1,913 a α: 5,423 γ: 0,084	Th229 7890 a α: 4,845 γ: 0,194	Th230 7,54E4 a α: 4,687 γ: 0,026	Th231 25,5 h β: 0,3 γ: 0,026	Th232 1,41E10 a α: 4,013 γ: 0,026	Th233 22,3 min β: 1,2 γ: 0,087	Th234 24,10 d β: 0,2 γ: 0,063	Th235 7,1 min β: 1,4 γ: 0,417	Th236 37,5 min β: 1,0 γ: 0,111			90	
Ac223 2,10 min α: 6,647	Ac224 2,9 h α: 6,142 γ: 0,216	Ac225 10,0 d α: 5,830 γ: 0,100	Ac226 29 h α: 5,34 β: 0,9 γ: 0,230	Ac227 21,773 a α: 4,953 β: 0,4 γ: 0,04	Ac228 6,13 h β: 1,2 γ: 0,911	Ac229 62,7 min β: 1,1 γ: 0,165	Ac230 122 s β: 2,7 γ: 0,455	Ac231 7,5 min γ: 0,282	Ac232 119 s γ: 0,665						89	
Ra222 38 s α: 6,559 γ: 0,324	Ra223 11,43 d α: 5,7162 γ: 0,269	Ra224 3,66 d α: 5,6854 γ: 0,241	Ra225 14,8 d β: 0,3 γ: 0,040	Ra226 1600 a α: 4,7843 γ: 0,186	Ra227 42,2 min β: 1,3 γ: 0,027	Ra228 5,75 a β: 0,04	Ra229 4,0 min β: 1,8	Ra230 93 min β: 0,8 γ: 0,072							88	
Fr221 4,9 min α: 6,341 γ: 0,218	Fr222 14,2 min β: 1,8 γ: 0,206	Fr223 21,8 min α: 5,34 β: 1,1 γ: 0,05	Fr224 3,3 min β: 2,6 γ: 0,216	Fr225 4,0 min β: 1,6 γ: 0,182	Fr226 48 s β: 3,2 γ: 0,254	Fr227 2,47 min β: 1,8 γ: 0,090	Fr228 39 s γ: 0,474	Fr229 50,2 s γ: 0,310							87	
Rn220 55,6 s α: 6,288	Rn221 26 min α: 6,037 β: 0,8 γ: 0,186	Rn222 3,825 d α: 5,48948	Rn223 23,2 min γ: 0,593	Rn224 1,78 h γ: 0,281	Rn225 4,5 min	Rn226 7,4 min									86	
At219 9,9 min α: 6,27															85	
Po218 3,05 min α: 6,0024															84	
															83	
															82	
															81	
															80	
															79	
α - Zerfall Fr220 27,5 s α: 6,68 γ: 0,045		β <sup>-</sup> - Zerfall At210 8,3 h α: 5,524 γ: 1,181		β <sup>-</sup> - Zerfall Pb212 10,64 h β: 0,3 γ: 0,239	← Halbwertszeit ← Energie in MeV											78
					Die farbigen Flächen zeigen die vorherrschenden Zerfallsarten an											77
134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148		

8						O13 8,58 ms β: 16,7	O14 70,59 s β: 1,8 γ: 2,313	O15 2,03 min β: 1,7	O16 stabil	O17 stabil	O18 stabil	O19 27,1 s β: 3,3 γ: 0,197	O20 13,5 s β: 2,8 γ: 1,057
7						N12 11,0 ms β: 16,4 γ: 4,439	N13 9,96 min β: 1,2	N14 stabil	N15 stabil	N16 7,13 s β: 4,3 γ: 6,129	N17 4,17 s β: 3,2 γ: 0,871	N18 0,63 s β: 9,4 γ: 1,982	N19 329 ms β: 0,096
6				C9 126,5 ms β: 15,5	C10 19,3 s β: 1,9 γ: 0,718	C11 20,38 min β: 1,0	C12 stabil	C13 stabil	C14 5730 a β: 0,2	C15 2,45 s β: 4,5 γ: 5,298	C16 0,747 s β: 4,7	C17 193 ms β: 1,375	C18 92 ms β: 2,614
5				B8 770 ms β: 14,1		B10 stabil	B11 stabil	B12 20,20 ms β: 13,4 γ: 4,439	B13 17,33 ms β: 13,4 γ: 3,684	B14 13,8 ms β: 14,0 γ: 6,090	B15 10,4 ms β		B17 5,1 ms β
4				Be7 53,29 d γ: 0,478		Be9 stabil	Be10 1,6E6 a β: 0,6	Be11 13,8 s β: 11,5 γ: 2,125	Be12 23,6 ms β: 11,7		Be14 4,35 ms β		
3				Li6 stabil	Li7 stabil	Li8 840,3 ms β: 12,5	Li9 176,3 ms β: 13,6		Li11 8,5 ms β: 18,5 γ: 3,368				
2		He3 stabil	He4 stabil		He6 806,7 ms β: 3,5		He8 119 ms β: 9,7 γ: 0,981						
1	H1 stabil	H2 stabil	H3 12,323 a β: 0,02										
0		n1 10,25 min β: 0,8											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12