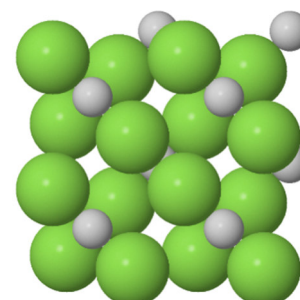
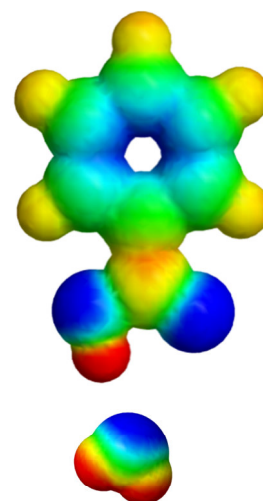


# Formeln und Daten

---

Si-Vorsätze	2
Griechisches Alphabet, Unicode-Zeichen	2
Naturkonstanten	3
Umrechnung von Einheiten	4
Formeln	5
• Diverse	5
• Organische Chemie	7
• Gleichgewicht	8
• Thermodynamik	10
• Elektrochemie	13
• Säure/Base-Chemie	16
• Quantenchemie	21
• Mathematik und Geometrie	23
Atomare Dimensionen	24
Orbitale	25
Nuklidkarte	28
Elektromagnetische Strahlung	30
Atom- und Ionenradien, Normalpotential der Elementarstoffe	32
Energien	
• Ionisierungs-Energien	33
• Elektronen-Affinitäten	33
• Bindungs- und Verbrennungs-Energien	34
• Gitter-Energien und Hydratations-Energien	35
Gleichgewichts-Reaktionen	
• Umschlagbereiche von Säure/Base-Indikatoren	36
• Säure/Base-Reihe für wässrige Lösungen	37
• Redox-Reihe: Standard-Reduktions-Potentiale	40
• Redox-Reihe: Reduktions-Potentiale bei neutralem pH	41
• Löslichkeitsprodukte schwerlöslicher Salze	42
• Komplexbildungskonstanten	44
• Lösen von Gasen in Wasser	46
• Thermodynamische Daten	48
Organische Chemie	
• Organische Nomenklatur	50
• IR-Spektren	52
• Kohlenhydrate	56
• Lipide	58
• L-Aminosäuren	60
• Nukleinsäuren	62
• Isomerie	64
Daten zur Erde	68
• Erde, Meer	68
• Atmosphäre	69
• Nachgewiesene Energievorräte und Umsätze:	72
Physiologie	
• Atmung und Gärung	73
• Menschlicher Körper: Umsatz und Energiespeicher	75
• Glycolyse	75
Eigenschaften konzentrierter Lösungen	76
Namen von Ionen und kleinen Molekülen	77



## SYMBOLS

### Si-Vorsätze: Dezimale Teile / Vielfache

Potenz	Vorsilbe	Symbol	Potenz	Vorsilbe	Symbol
$10^{-1}$	Dezi	d	10	Deka	da
$10^{-2}$	Zenti	c	$10^2$	Hekto	h
$10^{-3}$	Milli	m	$10^3$	Kilo	k
$10^{-6}$	Mikro	$\mu$	$10^6$	Mega	M
$10^{-9}$	Nano	n	$10^9$	Giga	G
$10^{-12}$	Piko	p	$10^{12}$	Tera	T
$10^{-15}$	Femto	f	$10^{15}$	Peta	P
$10^{-18}$	Atto	a	$10^{18}$	Exa	E
$10^{-21}$	zepto	z	$10^{21}$	Zetta	Z
$10^{-24}$	yocto	y	$10^{24}$	Yotta	Y

### Griechisches Alphabet (Unicode eingeben und alt+c)

Buchstabe		Name	Buchstabe		Name
klei n	gross		klein	gross	
α 03B1	A 0391	alpha	ν 03BD	N 039D	nü
β, β 03B2, 03D0	B 0392	beta	ξ 03BE	Ξ 039E	xi
γ 03B3	Γ 0393	gamma	ο 03BF	Ο 039F	omicron
δ, δ 03B4, 1D715	Δ 0394	delta	π 03C0	Π 03A0	pi
ε, € 03B5, 03F5	E 0395	epsilon	ρ 03C1	Ρ 03A1	rho
ζ 03B6	Z 0396	zeta	ς, σ 03C2, 03C3	Σ 03A3	sigma
η 03B7	H 0397	eta	τ 03C4	Τ 03A4	tau
θ, θ 03B8, 03D1	Θ 0398	theta	υ 03C5	Υ 03A5	upsilon
ι 03B9	I 0399	iota	φ, φ 03D5, 03C6	Φ 03A6	phi
κ, κ 03BA, 03F0	K 039A	kappa	χ 03C7	Χ 03A7	chi
λ 03BB	Λ 039B	lambda	ψ 03C8	Ψ 03A8	psi
μ 03BC	M 039C	mü	ω 03C9	Ω 03A9	omega

### Einige Unicodezeichen (Cambria math / Segoe UI emoji / MS Gothic )

$\pm$	B1, 2213	$\updownarrow$	21C5	$\alpha$	221D	$\int$	222B	$\approx$	2248	$\<$	2702
$\cdot$	B7 \cdot dot	$\uparrow$	2191	$\approx$	2248	$\textcircled{A}$	24B6	$\neq$	2259	$\textcircled{A}$	2620
$\times$	D7 \times	$\downarrow$	2193	$\neq$	2259	$\textcircled{B}$	2780	$\equiv$	2260	$\textcircled{C}$	1F50D
$\textcircled{A}$	00C5	$\leftrightarrow$	21D4	$\equiv$	2260	$\textcircled{D}$	278A	$\leq$	2264	$\textcircled{E}$	2601
$\ell$	2113	$\rightleftharpoons$	21D4	$\leq$	2264	$\textcircled{F}$	2751	$\geq$	2265	$\textcircled{G}$	1F30F
$\leftarrow$	2190	$\supset$	21D4	$\geq$	2265	$\textcircled{H}$	2612	$\oplus$	2295	$\textcircled{I}$	1F440
$\uparrow$	2191	$\supseteq$	21D4	$\oplus$	2295	$\textcircled{J}$	261E	$\ominus$	2296	$\textcircled{L}$	1F44C
$\rightarrow$	2192	$\supsetneq$	21D4	$\ominus$	2296	$\textcircled{K}$	2622	$\oslash$	2298	$\textcircled{M}$	1F453
$\downarrow$	2193	$\supsetneq$	21D4	$\oslash$	2298	$\textcircled{L}$	263A	$\infty$	221E	$\textcircled{N}$	1F4A1
$\leftrightarrow$	2194	$\supsetneq$	21D4	$\infty$	221E	$\textcircled{O}$	270E	$\dagger$	2021	$\textcircled{P}$	1F4A7
$\curvearrowright$	21BB	$\supsetneq$	21D4	$\dagger$	2021	$\textcircled{Q}$	2713	$\times$	2717	$\textcircled{R}$	262F
$\rightleftarrows$	21C4	$\supsetneq$	21D4	$\times$	2717	$\textcircled{S}$	2717			$\textcircled{T}$	1F518

Kleines l mit Serife: Schriftart Trebuchet

## KONSTANTEN

Name	Symbol	Zahlenwert	Einheit
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	c	$2.997925 \cdot 10^8$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Avogadrosche Zahl	$N_A$	$6.022025 \cdot 10^{23}$	$\text{mol}^{-1}$
Anzahl Formeleinheiten pro Mol			
Elementarladung	e	$1.6021917 \cdot 10^{-19}$	C
Ladung eines Protons			
Faraday-Konstante	$\mathcal{F} = N_A \cdot e$	96'485.3399(24)	$\text{J} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ ( $\text{C} \cdot \text{mol}^{-1}$ )
Ladung eines Mols Protonen			
Plancksches Wirkungsquantum	$h$ $\hbar = h/(2\pi)$ $h \cdot c$ (*)	$6.626196 \cdot 10^{-34}$ $1.0546 \cdot 10^{-34}$ 1240	$\text{J} \cdot \text{s}$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) eV nm
Elektrische Feldkonstante	$\epsilon_0$	$8.854186 \cdot 10^{-12}$	$\text{C} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
Magnetische Feldkonstante	$\mu_0$	$1.256637 \cdot 10^{-6}$	$\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
Universelle Gaskonstante	R	8.314472	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ( $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
In anderen Einheiten		8314 0.08205746	$\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ $\text{atm} \cdot \text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Boltzmann-Konstante	$k_B$	$1.380655 \cdot 10^{-23}$	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$
Absoluter Temperatur-Nullpunkt	$T_0$	- 273.15	°C
Ruhemasse eines Elektrons	$m(e^-)$	$9.109544 \cdot 10^{-31}$	kg
Gesamtenergie eines Elektrons		0.511	MeV
Ruhemasse eines Protons	$m(p^+)$	$1.672654 \cdot 10^{-27}$	kg
Gesamtenergie eines Protons		940	MeV
Ruhemasse eines Neutrons	$m(n^0)$	$1.674960 \cdot 10^{-27}$	kg

(\*) c = Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

## UMRECHNUNG VON EINHEITEN

### Strecke

1 Zoll	= 1 Inch (in)	= 2.54 cm
1 Fuss (foot)	= 12 Inch	= 0.3048 m
1 yard	= 0.9144 m	
1 (Land)-Meile	= 1609.344 m	
1 Å (Ångström)	= 100 pm	= 10 <sup>-10</sup> m
1 a <sub>0</sub> (Bohr-Radius)	= 52.918 pm = 5.291772·10 <sup>-11</sup> m	

### Volumen

1 Gallone (gal)	= 4.54609 L
1 (petrol) barrel (bl oder bbl)	= 159.113 L

### Druck

1 Pa	= 1 N m <sup>-2</sup>	
1 bar	= 10 <sup>5</sup> Pa (Pascal)	
1 atm	= 101'325 Pa	= 1.013 bar
1 Torr	= 1 mm Hg	= 133 Pa
Normdruck = 1 atm	= 1.013·10 <sup>5</sup> Pa = 1.013 bar = 1013 mbar = 1013 hPa = 101.3 kPa = 760 Torr	

### Temperatur

T(K)	= θ (°C) + 273.15
------	-------------------

### Molare Grössen

1 mol	≐ 6.022·10 <sup>23</sup> Teilchen
1 u (unit) pro Teilchen	≐ 1 g mol <sup>-1</sup>

### Leistung

1 W	= 1 J s <sup>-1</sup>
1 PS	= 735.5 W

### Energie

1 J	= 1 kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	= 1 Nm (Newton-Meter) = 1 Ws (Watt-Sekunde) = 1 V·C
E <sub>[eV]</sub>	= E <sub>[J]</sub> / 1.602·10 <sup>-19</sup>	= E <sub>[J]</sub> / e <sub>rel</sub> e <sub>rel</sub> = e / 1C = 1.602 ·10 <sup>-19</sup>
E <sub>[J/mol]</sub>	= E <sub>[J]</sub> ·N <sub>A</sub>	= E <sub>[eV]</sub> ·F <sub>rel</sub> F <sub>rel</sub> = F / 1C = 96485
⇒	1 eV pro Teilchen = 96.485 kJ/mol = 96484 C/(mol e <sup>-</sup> ) · 1 J/C (denn V = J/C)	
	1 eV ist die Energie, die eine Elementarladung (Proton) beim Durchlaufen einer Spannung von 1 V umsetzt.	
1 a.u. (atomic unit)	= 4.3597·10 <sup>-18</sup> J = 27.211 eV (Doppelte Ionisierungsenergie von H-Atomen)	
1 kWh	= 3.600·10 <sup>6</sup> J = 3.600 MJ	
1 Kalorie (cal)	= 4.1868 J (Bei Nahrungsmitteln bedeutet „Kalorie“ manchmal kcal = 4'186.8 J)	
1 kg ÖE (Öleinheit, oe Oil equivalent)	= 41.868 MJ = 10'000 kcal	
1 kg SKE (Steinkohleeinheit)	= 29.31 MJ	
1 kT (Kilotonne TNT, Trinitrotoluol)	= 4.184 · 10 <sup>12</sup> J = 4.184 TJ	

### Radioaktivität

1 Ci (Curie)	= 3.7·10 <sup>10</sup> Bq = 3.7·10 <sup>10</sup> radioaktive Zerfälle pro Sekunde
1 Gy (Gray)	= 1 J absorbierte radioaktive Strahlung pro kg Körpergewicht = 100 rd (rad)
1 Sv = 1 J γ-Strahlungs-Äquivalent pro kg Körpergewicht (gleiche biolog. Wirksamkeit)	= 100 rem

## FORMELN

### Diverse

### Coulomb-Gesetz

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

F	: Anziehungs- (negatives Vorzeichen) bzw. Abstossungskraft (positives Vorzeichen) in N
Q <sub>1</sub> und Q <sub>2</sub>	: Ladungen der beiden Körper in C
ε <sub>0</sub>	: Elektrische Feldkonstante
r	: Abstand der Ladungsschwerpunkte der beiden geladenen Körper in m
k <sub>C</sub>	≈ 9.0 · 10 <sup>9</sup> $\frac{N m^2}{C^2}$

### Gleichung idealer Gase

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

p	: Druck in Pa
V	: Volumen in m <sup>3</sup>
n	: molare Stoffmenge („Teilchenzahl“ in mol)
R	: Universelle Gaskonstante
T	: Absolute Temperatur in K

### Normdruck (Ø auf Meereshöhe):

p <sub>Norm</sub>	= 1.013·10 <sup>5</sup> Pa = 1.013 bar
	= 1013 mbar = 1013 hPa = 1.000 atm

### Molares Volumen von Gasen

Aus der idealen Gasgleichung ergeben sich für Normdruck folgende molaren Gasvolumina:

V <sub>M</sub> (0°C)	= 22.4 L mol <sup>-1</sup>
V <sub>M</sub> (25°C)	= 24.5 L mol <sup>-1</sup>
V <sub>M</sub> (100°C)	= 30.6 L mol <sup>-1</sup>

Partialdruck p<sub>i</sub> und molare Konzentration

$$c_{molar} = \frac{n}{V} = \frac{p_i}{R \cdot T}$$

### Grundgleichung der Stöchiometrie

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

n	: molare Stoffmenge („Teilchenzahl“ in mol)
m	: Absolute Masse in g
M	: Molare Masse in g · mol <sup>-1</sup>

### Konzentrationen, Dichte

$$c_{molar} = \frac{n}{V}$$

$$c_{massen} = \frac{m}{V} = c_{molar} \cdot M$$

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

c <sub>molar</sub>	: molare Konzentration in mol L <sup>-1</sup>
	Teilchenzahl in mol
c <sub>massen</sub>	: Massenkonzentration in g L <sup>-1</sup>
ρ	: Dichte in g mL <sup>-1</sup>

## Elektromagnetische Wellen und Energie

$$E = h \cdot \nu$$

$$c = \lambda \cdot \nu$$

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

E	:	Energie der elektromagnetischen Welle in J
h	:	Plancksches Wirkungsquantum
$\nu$	:	Frequenz der elektromagnetischen Welle in $s^{-1}$
c	:	Lichtgeschwindigkeit
$\lambda$	:	Wellenlänge der elektromagnetischen Welle in m

## Fotospektrometer

Lambert-Beersches Gesetz:

$$E_{\lambda} = -\log_{10} \left( \frac{I_1}{I_0} \right) = \epsilon_{\lambda} \cdot c \cdot d$$

$E_{\lambda}$	:	Extinktion der Probe bei der Wellenlänge $\lambda$ (auch: Absorbanz, englisch: absorbance).
c	:	Konzentration der absorbierenden Substanz (gewöhnlich in mol/L)
$\epsilon_{\lambda}$	:	Extinktionskoeffizient der absorbierenden Substanz (auch: Absorptionskoeffizient), z.B. molarer Extinktionskoeffizient ( $L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$ ).
$I_0$	:	Intensität des einfallenden Lichtes (Leistung pro Fläche)
$I_1$	:	Intensität des transmittierten Lichtes
d	:	Schichtdicke des durchstrahlten Körpers

**Transmissionsgrad:**  $T = \frac{I_1}{I_0}$  Manchmal Angabe in Prozent

**Absorptionsgrad:**  $\alpha = 1 - T = \frac{I_0 - I_1}{I_0}$  In der Probe absorbierte Anteil der eingestrahlten Energie

## Löse-Energie von Salzen

$$\Delta E_{\text{Löse}} = \Delta E_{\text{Hydratation}} - \Delta E_{\text{Gitter}}$$

$\Delta E_{\text{Löse}}$	:	Löse-Energie (bzw. Löse-Enthalpie) in $kJ \cdot mol^{-1}$
$\Delta E_{\text{Hydratation}}$	:	Hydratations-Energie (Hydratations-Enthalpie) in $kJ \cdot mol^{-1}$
$\Delta E_{\text{Gitter}}$	:	Gitter-Energie (Bzw. Gitter-Enthalpie) in $kJ \cdot mol^{-1}$

## Organische Chemie

### Drehung des polarisierten Lichtes

$$[\alpha]_D^{20} = \frac{\alpha}{d \cdot c}$$

$[\alpha]_D^{20}$	:	Spezifische Drehung bei 20°C mit der Natrium-D-Linie in °
$\alpha$	:	Drehwinkel der Probe in °
d	:	Schichtdicke der Probe in dm
c	:	Konzentration der Probe in $g \cdot mL^{-1}$ Lösung

## Gleichgewicht

### Reaktionslaufzahl (=Umsatzvariable) und Reaktionsgeschwindigkeit

**Berechnung der Reaktionsgeschwindigkeit RG aus Konzentrationsänderungen:** Die Reaktionslaufzahl  $\xi$  („xi“) gibt an, wie viele molare Formelumsätze einer Reaktion abgelaufen sind („wie viele mol mal eine Reaktion abgelaufen ist“).  $\xi_L$  sei die Reaktionslaufzahl in einem Liter Probe.

$$\xi = \frac{\Delta n_i}{\nu_i} \qquad \xi_L = \frac{\Delta[i]}{\nu_i} \qquad RG = \frac{\xi_L}{\Delta t}$$

$\xi$	:	Reaktionslaufzahl = Umsatzvariable in mol
$\xi_L$	:	Reaktionslaufzahl in einem Liter Lösung in mol L <sup>-1</sup>
$\Delta n_i$	:	Stoffmengenänderung des Reaktanden i (Zunahme oder Abnahme der Teilchensorte in mol)
$\nu_i$	:	Stöchiometrischer Koeffizient des Reaktanden i gemäss Reaktionsgleichung. Die Koeffizienten der Edukte weisen ein negatives Vorzeichen auf (die der Edukte nimmt ja im Verlauf der Reaktion ab), obwohl man dies sonst meistens nicht schreibt (vgl. auch unten Formel für Q).
$\Delta[i]$	:	Konzentrationsänderung des Reaktanden i in mol · L <sup>-1</sup>
RG	:	Reaktionsgeschwindigkeit in mol · L <sup>-1</sup> · s <sup>-1</sup>
$\Delta t$	:	Betrachtete Reaktionszeit in s

Berechnung der RG aus Konzentrationen und Geschwindigkeitskonstanten:

Für eine Reaktion **a A + b B + ..... → Produkte**, die in einem elementaren Reaktionsschritt abläuft, gilt:

$$RG = k_{\text{Reaktion}} \cdot [A]^a \cdot [B]^b \cdot \dots$$

Die Geschwindigkeitskonstante  $k_{\text{Reaktion}}$  ist abhängig von Reaktionsmechanismus und Reaktionsbedingungen (Temperatur, Lösemittel, ...)

**RG-Regel: (Reaktionsgeschwindigkeit-Temperatur-Regel):** Wird die Temperatur um 10°C erhöht, so laufen chemische Reaktionen normalerweise zwei bis vier mal schneller ab.

## Reaktionsquotient Q und Massenwirkungsgesetz (MWG)

Für eine Reaktion



Beträgt der Reaktionsquotient stets (auch wenn kein Gleichgewicht herrscht):

$$Q = \frac{\{X\}^x \cdot \{Y\}^y \cdot \{Z\}^z \cdot \dots}{\{A\}^a \cdot \{B\}^b \cdot \{C\}^c \cdot \dots} = \{A\}^{-a} \cdot \{B\}^{-b} \cdot \dots \cdot \{X\}^x \cdot \{Y\}^y \cdot \dots = \prod_i \{R\}^{\nu_i}$$

Nur im Gleichgewicht gilt das Massenwirkungsgesetz MWG (=Gleichgewichtsbedingung):

$$Q_{\text{Glgw}} = K = 10^{-pK}$$

$\Pi$	:	Produkt-Zeichen
a, b, c (x, y, z)	:	Stöchiometrische Koeffizienten der Edukte (bzw. Produkte)
A, B, C (X, Y, Z)	:	Formeln der Edukte (bzw. Produkte)
R, {R}, $\nu_R$	:	Teilchensorte, Aktivität und Koeffizient des Reaktanden R, wobei Produkte einen positiven Koeffizienten aufweisen, Edukte hingegen einen negativen, da ihre Konzentration ja im Verlauf der Reaktion abnimmt.
K	:	Gleichgewichtskonstante der Reaktion (meist tabellierte Werte)
pK	:	Negativer Zehnerlogarithmus von K: $pK = -\log_{10}(K)$ . Oft werden anstelle von K der besseren Übersichtlichkeit halber die pK-Werte tabelliert
{i}	:	Aktivität der Teilchensorte i: Aus praktischen Gründen und in guter Näherung: <ul style="list-style-type: none"> <li>Für gelöste Teilchen: Konzentration <math>[i] = c_{\text{molar}}</math> in mol · L<sup>-1</sup></li> <li>Für Gase: <b>Partialdruck p(i) in atm</b> (1 atm = 1.013 · 10<sup>5</sup> Pa = Normdruck)</li> <li>Für näherungsweise reine feste oder flüssige Stoffe in ihrer eigenen Phase (z.B. Feststoffe, Lösemittel): <b>Molenbruch = molarer Stoffmengenanteil. Dieser ist bei Reinstoffen 1.</b></li> </ul>

## Thermodynamik

### Thermodynamische Grössen

- **Innere Energie U:** Jede **unabhängige Bewegungsrichtung** eines Teilchens heisst Freiheitsgrad. Die durchschnittliche kinetische Energie beträgt bei der Temperatur T für jeden Freiheitsgrad, der kontinuierlich Energie aufnehmen kann ( $k_B$  = Boltzmannkonstante; R = universelle Gaskonstante):
  - Pro Teilchen:  $E_{\text{kin, Teilchen}} = \frac{1}{2} k_B \cdot T$
  - Pro Mol: molare kinetische Energie:  $E_{\text{kin, molar}} = \frac{1}{2} R \cdot T$
  - **Schwingungs-Freiheitsgrade** enthalten zusätzlich zur kinetischen auch noch gleich viel potentielle Energie und daher insgesamt die doppelte molare Energie:  $E_{\text{Schwingung}} = R \cdot T$ .
- Molare innere Energie U idealer Gase ohne Schwingungen:
  - **Einatomige Teilchen** bewegen sich unabhängig in 3 Raumrichtungen:  $U = 3 \cdot \frac{1}{2} R \cdot T = \frac{3}{2} nRT$
  - **Lineare Moleküle** drehen sich zudem unabhängig in 2 Raumrichtungen:  $U = \frac{5}{2} nRT$
  - **Nicht lineare Moleküle** drehen sich unabhängig in 3 Raumrichtungen:  $U = \frac{6}{2} nRT$
- Schwingungen werden bei normalen Temperaturen aus quantenmechanischen Gründen nur bei massereichen Atomen und Molekülgruppen angeregt. Wenn die Schwingungen kontinuierlich Energie aufnehmen, beträgt die molare innere Energie in allen Gasen pro Atom  $3/2 nRT$ .
- Die **Wärmekapazität** eines Gases ist die Zunahme der Inneren Energie plus Ausdehnungsarbeit.
- **Entropie S:** Die Entropie hat verschiedene Bedeutungen:
  - Entropie ist ein Mass für die *Wahrscheinlichkeit* bzw. *das statistische Gewicht* eines Zustandes:

$$\text{Entropie: } S = k_B \cdot \ln(\Omega) \quad \text{bzw.} \quad \text{molare Entropie: } S = R \cdot \ln(\Omega)$$

wobei  $\Omega$  die Anzahl makroskopisch **unterscheidbarer**, zugänglicher Realisierungsmöglichkeiten (Mikrozustände) eines makroskopisch charakterisierten Zustandes ist.

- Bei *reinem Wärmeaustausch* oder bei *reversiblen Vorgängen* ist  $\Delta S$  der Quotient aus der *mit der Umgebung ausgetauschten Wärme*  $\Delta Q$  durch die Temperatur T:

$$\text{Entropiezunahme: } \Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad \text{bzw. bei komplizierte Vorgängen} \quad \Delta S = \frac{\Delta Q_{\text{rev}}}{T}$$

- Wenn Systeme miteinander ins Gleichgewicht gelangen, wird die Gesamtentropie maximiert.
- **Enthalpie H:** Wenn einem System Energie zugeführt wird, so ändert sich oft nicht nur die innere Energie U, sondern oft auch das Volumen V der Probe, Umgebungsluft wird also z.B. gegen den Luftdruck p weggedrückt. In diesem Wegdrücken wird ebenfalls Energie gespeichert. Die Enthalpie umfasst beide Energieformen: innere Energie und Ausdehnungsarbeit:

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

Enthalpisch günstig = exotherm sind Reaktionen, bei denen insgesamt chemische Energie und in der Ausdehnung des Gases gespeicherte Energie in thermische Energie (oder mechanische, elektrische) umgewandelt wird. Denn dabei erhöht sich die Anzahl Realisierungsmöglichkeiten (Entropie) im System (System wird heiss) oder der Umgebung (Wärme  $\Delta Q$  fliesst in die Umgebung)

- **Freie Enthalpie = Gibbs-Energie G:** Berechnung siehe Gibbs/Helmholtz-Gleichung.
  - Die Gibbs-Energie drückt den kombinierten Effekt von Enthalpie, Entropie und Temperatur auf die Gleichgewichtslage aus und erlaubt die Berechnung der Gleichgewichtskonstanten.
  - $\Delta G_R$  ist diejenige hochwertige Energie (elektrisch, mechanisch, in Nano-Maschinen), die bei einer chemischen Reaktion pro molarem Formelumsatz maximal genutzt werden kann (negatives Vorzeichen) oder mindestens aufgewendet werden muss.
- **Temperatur T:** Die Temperatur besagt, wie viel Wärme ein Körper aufnehmen muss, damit sich die Entropie um einen bestimmten Betrag ändert:  $T = \Delta Q / \Delta S$ . Tauschen zwei Körper gleicher Temperatur Wärme aus, so sinkt die Anzahl Realisierungsmöglichkeiten im einen Körper gleich stark, wie sie im anderen steigt, so dass sich die Entropie des Gesamtzustandes nicht ändert. Die Temperatur ist eigentlich der Umrechnungsfaktor von (thermischer) Energie in Entropie; sie ermöglicht daher die Umrechnung von Energien in Wahrscheinlichkeiten und umgekehrt.

### Enthalpie, Entropie und freie Enthalpie einer Reaktion

$$\Delta H^\circ_R = x \cdot H^\circ_{f,X} + y \cdot H^\circ_{f,Y} + \dots - a \cdot H^\circ_{f,A} - b \cdot H^\circ_{f,B} - \dots$$

$$\Delta H^\circ_R = \sum_{i=1}^m (\nu_i \cdot H^\circ_{f,i})$$

$\Delta H^\circ_R$  : Reaktions-Enthalpie bei Standard-Bedingungen

A,B,X,Y : Edukte (A,B) und Produkte (X,Y) mit den Koeffizienten a,b,x,y

i : Laufzahl für die Reaktanden

m : Anzahl unterschiedliche Reaktanden gemäss Reaktionsgleichung

$\nu$  : Stöchiometrischer Koeffizient des jeweiligen Reaktanden (i) gemäss Reaktionsgleichung, wobei die **Koeffizienten der Edukte negativ** sind.

$H^\circ_f$  : Standard-Bildungsenthalpie (f: engl. formation = Bildung) des jeweiligen Reaktanden (i) unter Standard-Bedingungen ( $^\circ$ ) (**Tabellierte Werte**).

$$\text{Analog gilt: } \Delta S^\circ_R = \sum_i (\nu_i \cdot S^\circ_i) \quad \text{und} \quad \Delta G^\circ_R = \sum_i (\nu_i \cdot G^\circ_{f,i})$$

### Gibbs/Helmholtz-Gleichung

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

bzw.

$$\Delta G_R = \Delta H_R - T \cdot \Delta S_R$$

G : Gibbs-Energie (Freie Enthalpie)

H : Enthalpie

S : Entropie

$\Delta G_R$  : Reaktions-Gibbs-Energie (Freie Reaktions-Enthalpie)

$\Delta H_R$  : Reaktions-Enthalpie

$\Delta S_R$  : Reaktions-Entropie

T : Absolute Temperatur in K

Bei **isotherm** geführter **Reaktion** ist die aus Tabellenwerten berechnete  $\Delta S_R$  die Entropiezunahme im System,  $-\Delta H_R/T$  die Entropiezunahme in der Umgebung:  $\Delta S_{\text{tot}} = -\Delta H_R + -\Delta S_R \cdot T$ .

Im **Gleichgewicht** ist  $\Delta G_R = 0$  und damit  $\Delta H_R = T \cdot \Delta S_R$ . Nahe beim Gleichgewicht ist  $\Delta H_R$  gleich der mit der Umgebung ausgetauschten Wärme -  $\Delta H_R = Q_{\text{rev}} = T \cdot \Delta S_{\text{Umgebung}}$ , so dass im System gleich viel Entropie erzeugt wird ( $\Delta S_R$ ) wie ausserhalb verschwindet ( $-\Delta H_R/T$ ) und der Vorgang reversibel ist.

### Umwandlungs-Temperatur

Wenn bei  $\Delta H_R$  und  $\Delta S_R$  dasselbe Vorzeichen haben (wenn die eine günstig und die andere ungünstig ist), gibt es eine Temperatur, bei der das entsprechende Gleichgewicht «in der Mitte liegt»:

$$K = 1 \quad \Leftrightarrow \Delta G_R = 0 = \Delta H_R - T \Delta S_R \quad \Leftrightarrow \Delta H_R = T \Delta S_R$$

$$T = \frac{\Delta H_R}{\Delta S_R}$$

**Umwandlungs-Temperatur in K**

Bei tieferen Temperaturen herrscht die enthalpisch günstigere Form vor, darüber die entropisch günstigere. Durchläuft das System diese Temperatur, so verschiebt sich das Gleichgewicht von der einen zu anderen Seite bzw. die eine Form wird in die andere umgewandelt bzw. der Vorgang läuft ab.

## Freie Enthalpie und Gleichgewicht

Wenn ein Stoff A verdünnt wird, so nimmt die molare Entropie A zu, denn die gelösten Teilchen erhalten durch die Verdünnung ja mehr Anordnungsmöglichkeiten (die Zunahme heisst Lösungs-Entropie oder „Mischungs-Entropie“). Daher hängt die molare freie Enthalpie des Stoffes A (auch *chemisches Potential*  $\mu$  genannt) von seiner Aktivität  $\{A\}$  ab:

$$\Delta G_A = \mu = \Delta G_A^0 + R \cdot T \cdot \ln(\{A\})$$

Die Elektrochemische Potentialdifferenz  $\bar{\mu}$  von Ionen mit Ladung  $z_i$  ist ihre chemische Potentialdifferenz plus die beim Durchlaufen der Spannung  $\Delta E$  umgesetzte molare Energie:  $\Delta \bar{\mu} = \Delta \mu + z_i \cdot F \cdot \Delta E$

Für die Reaktionsenthalpie einer Reaktion ergibt sich daraus:

$$\Delta G_R = \sum_i (v_i \cdot G_{f,i}) = \sum_i (v_i \cdot (G_{f,i}^0 + RT \ln(\{i\}))) = \Delta G_R^0 + RT \cdot \ln(Q)$$

### Gleichgewicht

Im **dynamischen Gleichgewicht** ist  $\Delta G_R = 0$ , denn es lässt sich weder mit der Hin- noch mit der Rückreaktion nutzbare Energie gewinnen. Zudem ist im Gleichgewicht  $Q = K$ . Es gilt also:

$$\Delta G_R = 0 = \Delta G_R^0 + RT \cdot \ln(K)$$

$$\Delta G_R = -R \cdot T \cdot \ln(K)$$

$$\text{bzw. } K = e^{\frac{-\Delta G_R}{R \cdot T}} = e^{\left(\frac{-\Delta H_R}{R \cdot T} + \frac{\Delta S_R}{R}\right)}$$

$\Delta G_R$	:	Reaktions-Gibbs-Energie (Freie Reaktions-Enthalpie)
$R$	:	Universelle Gaskonstante
$T$	:	Absolute Temperatur in K (Kelvin)
$K$	:	Gleichgewichtskonstante nach Massenwirkungsgesetz

Im **osmotischen Gleichgewicht** ist die für das Einströmen eines Mols Lösemittel L gegen die Druckdifferenz benötigte mechanische Energie gleich der Abnahme von  $\Delta G_L$ :

Für ein Lösemittel L mit einem kleinen relativen molarem Stoffmengenanteil  $x_G$  an gelösten Teilchen  $x_G = \frac{n_G}{(n_G + n_L)}$  beträgt die freie molare Enthalpie näherungsweise  $\Delta G_L \approx \Delta G_A^0 - R \cdot T \cdot x_G$ , so dass der Osmotische Druck  $p$  zur Konzentration proportional ist:

$$p \cdot V_{\text{molar},L} = |\Delta(\Delta G)| = RT x_G \quad \Leftrightarrow \quad p = RT \frac{x_G}{V_{\text{molar},L}} \approx R \cdot T \cdot [G]$$

## Energie und Gleichgewichts-Lage

Aus  $\Delta G = -RT \ln(K)$  bzw. aus der Nernst-Gleichung (unten) folgt für 25°C:

Für  $\Delta G_R = 0$  ist  $K = 1$ , das Gleichgewicht liegt also in der Mitte  
 für jede Senkung von  $\Delta G_R$  um 5.7 kJ mol<sup>-1</sup>  
 für jede Erhöhung der Entropie um 19 J/mol/K  
 bzw. für jede Erhöhung von  $\Delta E_R$  um 0.059/ $z_e$  V  
 nimmt  $K$  um den Faktor 10 zu,  $pK$  also um eine Einheit ab

## Elektrochemie

### Grössen und Symbole

$z$	Ionenwertigkeit, Ladungszahl	Teilchenladung oder Anzahl verschobener Elementarladungen pro Formelumsatz
$z_e$	Ladungszahl	Anzahl verschobener Elektronen pro Formelumsatz
$q, \Delta q$	Ladungsmenge	Verschobene Ladung. [C] = [A·s] (Coulomb = Ampère · Sekunden) [A] (Ampère)
$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ $U = \Delta E = \frac{\Delta W}{\Delta q}$	Strom  Spannung, elektrischer Potentialunterschied	[V] = [J·C <sup>-1</sup> ] (Volt = Joule pro Coulomb) Die Spannung entspricht der Energie W, die pro verschobene Ladung umgesetzt wird.
$R = \frac{U}{I}$ $P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = I \cdot U = I^2 \cdot R = U^2 / R$	Elektrischer Widerstand  Leistung	[Q] = [V · A <sup>-1</sup> ] (Ohm) [W] (Watt)
$n$	Molare Menge	Umgesetzte Menge einer Teilchensorte. [mol]
$m$	Wägbare Masse	Umgesetzte Masse [g]
$M$	Molare Masse	[g mol <sup>-1</sup> ]
$\Delta t$	Zeit	Verstrichene Zeit [s]
$F = e \cdot N_A$	Faraday-Konstante	Ladung von einem Mol Protonen 96485 C mol <sup>-1</sup>

### Grundgesetz der Elektrolyse

$$q = -n \cdot z_e \cdot N_A \cdot e = -\frac{m}{M} \cdot z_e \cdot F$$

$$m = \frac{-M \cdot I \cdot \Delta t}{z_e \cdot F}$$

## Energieumsatz eines elektrochemischen Prozesses

$$\Delta W = \Delta G = \Delta q \cdot U = U \cdot I \cdot \Delta t = n \cdot z \cdot F \cdot U$$

$\Delta W = \Delta G_R$  ist die maximale mechanisch oder elektrisch nutzbare Energie, die der Prozess liefert, wenn die Ladung  $\Delta q = n \cdot z \cdot F$  durch die Spannung  $U$  bewegt wird (oder die aufgewendet werden muss, um die Ladung zu verschieben). Bei Redox-Reaktionen folgt daraus für die *freie Reaktionsenthalpie eines molaren Formelumsatzes*  $\Delta G_R$  folgende Beziehung, wobei die negative Ladung der Elektronen zu einem negativen Vorzeichen führt:

$$\Delta G_R = -z_e \cdot F \cdot \Delta E$$

## Normalpotential $\Delta E_R^0$ einer Redoxreaktion

Das Normalpotential oder Standard-Potential einer Reduktions-Reaktion ist die Spannung, die man zwischen den Halbzellen (des galvanischen Elementes) misst, wenn **Normbedingungen** herrschen und alle Reaktanden in Standardkonzentration vorliegen, also die **Aktivität 1** aufweisen.

$$\Delta E_R^0 = E_H^0 \text{ Reduktion} - E_H^0 \text{ Oxidation}$$

$E_H^0$  sind die Standard-Reduktions-Potentiale (=Standard-Redox-Potentiale) der Halbreaktionen oder Halbzellen, also die Spannungen, die die entsprechenden Halbzellen gegenüber der Standard-Wasserstoff-Elektrode ergeben:

$E_{H,Reduktion}^0$	Standard-Reduktions-Potential, bei dem die verschobenen Elektronen am Schluss vorliegen, (indem sie von der entsprechenden Halbzelle bzw. Redox-Paar aufgenommen werden) also <ul style="list-style-type: none"> <li><math>E_H^0</math> der Reduktions-Halbreaktion</li> <li><math>E_H^0</math> des Redox-Paares des Oxidationsmittels der Hinreaktion</li> </ul>
$E_{H,Oxidation}^0$	Standard-Reduktions-Potential, bei dem die verschobenen Elektronen zu Beginn vorliegen, also <ul style="list-style-type: none"> <li><math>E_H^0</math> der Oxidations-Halbreaktion</li> <li><math>E_H^0</math> des Redox-Paares des Reduktionsmittels der Hinreaktion</li> </ul>

Ein gutes Oxidationsmittel in einer Halbzelle ergibt gegenüber der Standard-Wasserstoff-Zelle ein stark positives Potential (es entfernt ja Elektronen und ergibt so positive Ladung), sein Standard-Redox-Potential ist also stark positiv.

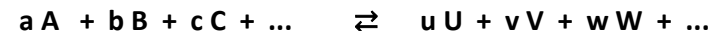
Je positiver das Standard-Redox-Potential einer Halbzelle ist, desto höher ist der Drang des Oxidationsmittels, andere Teilchen zu oxidieren und dabei selbst reduziert zu werden. Deshalb nennt man das Potential auch Standard-*Reduktions*-Potential.

Reaktionen mit einem positiven  $\Delta E_R^0$  sind bei Normbedingungen energetisch günstig und laufen spontan ab, denn die Elektronen fließen von einem negativen Potential hin zu einem positiven Potential ( $\triangleq$  von einem negativ geladenen Bereich hin zu einem positiv geladenen).

## Nernst-Gleichung

Die Nernst-Gleichung ergibt den Zusammenhang zwischen dem Standard-Redox-Potential  $\Delta E_R^0$ , das sich aus Tabellenwerten berechnen lässt, dem tatsächlich gemessenen Potential  $\Delta E_R$  und dem Reaktionsquotienten aus Edukt- und Produkt-Konzentrationen

Die Nernst-Gleichung lautet für eine Redox-Reaktion, bei der  $z_e$  Elektronen umgesetzt werden:



$$\Delta E_R = \Delta E_R^0 - \frac{R \cdot T}{z_e \cdot F} \cdot \ln \left( \frac{\{U\}^u \cdot \{V\}^v \cdot \{W\}^w \cdot \dots}{\{A\}^a \cdot \{B\}^b \cdot \{C\}^c \cdot \dots} \right) = \Delta E_R^0 - \frac{R \cdot T}{z_e \cdot F} \cdot \ln(Q)$$

a, b, c (u, v, w) :	Stöchiometrische Koeffizienten der Edukte (bzw. Produkte)
A, B, C (U, V, W) :	Formeleinheiten der Edukte (bzw. Produkte)
$z_e$ :	Molare Menge übertragener Elektronen (bzw. neg. Ladung) pro molarem Formelumsatz
$\Delta E_R$ :	Aktuelles Redox-Potential der Reaktion (messbare Spannung zwischen Halbzellen)
$\Delta E_R^0$ :	Normalpotential gemäss Redox-Reihe in V (bei Standardkonzentrationen)
R :	Universelle Gaskonstante ( $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
T :	Absolute Temperatur in K (Kelvin)
F :	Faraday-Konstante ( $96'487 \text{ J} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ )
{i} :	Aktivität des Reaktanden i

Bei 25°C lässt sich der Ausdruck vereinfachen zu:

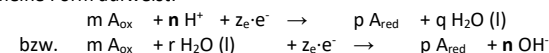
$$\Delta E_R = \Delta E^0 - \frac{0.0592}{z} \cdot \log_{10}(Q)$$

Herrscht in einem Reaktionsansatz ein Gleichgewicht, so gilt

$$\Delta E_R = 0 \Rightarrow Q_{\text{Glgw}} = K = e^{\frac{z_e \cdot F \cdot \Delta E_R^0}{RT}}$$

## Spezielle Fälle

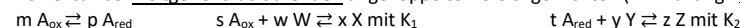
Für die Nernst-Gleichung einer Reduktion, bei der  $n H^+$  abgegeben werden, die also folgende allgemeine Form aufweist:



ergibt sich bei 25°C für einen **bestimmten pH**:

$$E_H = E_H^0 - \frac{0.059}{z_e} \log_{10} \left( \frac{[A_{\text{red}}]^m}{[A_{\text{ox}}]^p} \right) - 0.059 \frac{n}{z_e} \cdot (pH - pH_{\text{Norm}})$$

Korrektur bei weitgehend ablaufenden angekoppelten Gleichgewichten (z.B. Fällung:  $K = 1/K_L$ ):



$$E_H(\text{mit Kopplung}) = E_H(\text{ohne Kopplung}) - \frac{0.059}{z_e} \cdot \frac{m}{s} \cdot \log_{10}(K_1) + \frac{0.059}{z_e} \cdot \frac{p}{t} \cdot \log_{10}(K_2)$$

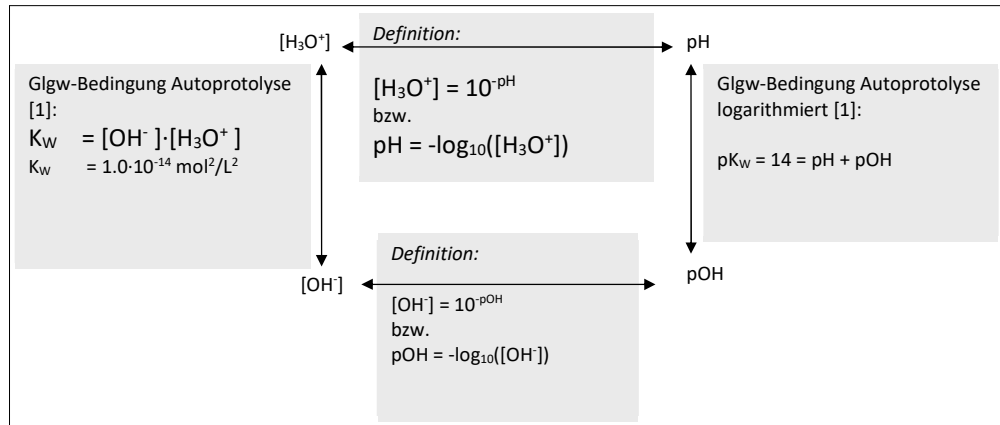


## Säure/Base-Chemie

### Autoprotolyse

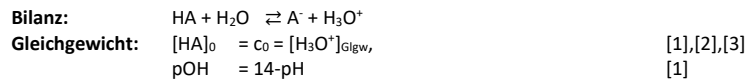


Gleichgewichts-Bedingung (Ionenprodukt des Wassers):

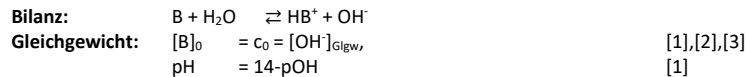


### pH der wässrigen Lösungen starker Säuren und Basen

#### pH der wässrigen Lösung einer starken Säure

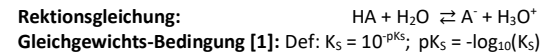


#### pH der wässrigen Lösung einer starken Base



## Schwache Säuren und Basen in wässriger Lösung

### Schwache Säuren in wässriger Lösung: Säurekonstante $K_S$



Massenwirkungsgesetz: Logarithmierte Form (Hendersson-Hasselbalch):

$$K_S = \frac{[\text{A}^-] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{HA}]}$$

$$\text{pH} = \text{p}K_S + \log_{10} \left( \frac{[\text{A}^-]}{[\text{HA}]}\right)$$

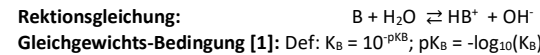
Relative Anteile der Base ( $f_{A^-}$ ) und der Säure ( $f_{HA}$ ):

$$f_{A^-} = \frac{K_S}{[\text{H}_3\text{O}^+] + K_S} \quad f_{A^-} = \frac{10^{\text{pH} - \text{p}K_S}}{1 + 10^{\text{pH} - \text{p}K_S}} \quad f_{HA} = 1 - f_{A^-}$$

Dissoziationsgrad  $\alpha$  = relativer Anteil der deprotonierten Spezies an der Gesamtmenge:

$$\alpha = \frac{[\text{A}^-]_{\text{Glwg}}}{[\text{HA}]_0} = \frac{[\text{A}^-]_{\text{Glwg}}}{c_0}$$

### Schwache Basen in wässriger Lösung: Basenkonstante $K_B$



Massenwirkungsgesetz: Logarithmierte Form:

$$K_B = \frac{[\text{HB}^+] \cdot [\text{OH}^-]}{[\text{B}]}$$

$$\text{pOH} = \text{p}K_B + \log_{10} \left( \frac{[\text{HB}^+]}{[\text{B}]}\right)$$

$$\text{Basenkonstante und Säurekonstante: } \text{p}K_B + \text{p}K_S = 14$$

### Gleichgewichtskonstanten beliebiger Säure/Base-Reaktionen [1]

Reaktionsgleichung:  $\text{HA} + \text{B}^- \rightleftharpoons \text{A}^- + \text{HB}$

$$\text{Gleichgewichtsbedingung: } K = \frac{[\text{A}^-] \cdot [\text{HB}]}{[\text{HA}] \cdot [\text{B}^-]} = \frac{[\text{A}^-] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+] \cdot [\text{HB}]}{[\text{HA}] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+] \cdot [\text{B}^-]} = \frac{K_{S,HA}}{K_{S,HB}}$$

$$K = \frac{K_{S,HA}}{K_{S,HB}} \Rightarrow \text{Logarithmiert: } \text{p}K = \text{p}K_{S,HA} - \text{p}K_{S,HB} \quad K = 10^{-\text{p}K}$$

Hinweis: um mit  $\text{OH}^-$  und  $\text{H}_3\text{O}^+$  auf die richtigen Resultate zu kommen, muss angenommen werden:

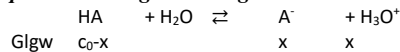
- $\text{p}K_S (\text{H}_3\text{O}^+) = 0$  (und nicht -1.74 wie in manchen Tabellen) **und**  $\text{p}K_S (\text{H}_2\text{O}) = 14$
- Die Aktivität von Wasser wird **immer 1** gesetzt:  $\{\text{H}_2\text{O}\} = 1$ .

## pH-Werte der wässrigen Lösungen schwacher Säuren und Basen

### Für pH < 6 oder pH > 8:

Die höher konzentrierte Ionensorte ( $\text{H}_3\text{O}^+$  oder  $\text{OH}^-$ ) stammt nur zu einem vernachlässigbar kleinen Teil aus der Autoprotolyse. Seine Konzentration wird daher unter Vernachlässigung der Autoprotolyse berechnet. Die Konzentration des anderen, tiefer konzentrierten Ions ergibt sich dann aus der Autoprotolyse.

### pH der wässrigen Lösung einer schwachen Säure: Allgemeiner Fall



Gleichgewichts-Bedingung:

$$K_S = \frac{x^2}{(c_0 - x)}$$

Analog für **schwache Base**:  $K_S \Leftrightarrow K_B$  und  $\text{H}_3\text{O}^+ \Leftrightarrow \text{OH}^-$

### pH der wässrigen Lösung einer schwachen Säure: Formel für Abschätzung [4]

$$\text{pH} = \frac{\text{p}K_S - \log(c_0)}{2}$$

[1],[2],[4]

Analog für **schwache Base**:  $\text{p}K_S \Leftrightarrow \text{p}K_B$  und  $\text{pH} \Leftrightarrow \text{pOH}$

### Spezielle Fälle

#### Wässrige Lösung einer mehrprotonigen schwachen Säure $\text{H}_2\text{A}$

Wird  $\text{H}_2\text{A}$  in genug hoher Konzentration gelöst, so sinkt der pH durch die Dissoziation des ersten  $\text{H}^+$  so tief, dass man für die Berechnung des pH die Abspaltung weiterer  $\text{H}^+$  vernachlässigen darf (als einprotonige schwache Säure behandeln).

Da näherungsweise alle  $\text{H}_3\text{O}^+$  in der Lösung aus dieser Reaktion stammen, sind die Konzentrationen von  $\text{H}_3\text{O}^+$  und  $\text{HA}^-$  gleich gross, so dass sich für die Konzentration des zweifach deprotonierten Anions ergibt:  $[\text{A}^{2-}] \approx K_{S2}$ . [1],[2],[4]

#### pH-Wert der Lösung eines Ampholyten in Wasser: Abschätzung bei genug grosser Konz.

Der Ampholyt HA reagiert mit sich selber ( $2 \text{HA} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{A}^+ + \text{A}^-$ ). Dabei entstehen gleich viele  $\text{A}^-$  wie  $\text{H}_2\text{A}^+$ -Teilchen. Der pH-Wert muss daher gleich weit weg von beiden  $\text{p}K_S$ -Werten liegen, also im arithmetischen Mittel:

$$\text{pH} = \frac{\text{p}K_{S1} + \text{p}K_{S2}}{2} \quad \text{wobei} \quad \text{p}K_{S1} = \text{p}K_S (\text{H}_2\text{A}^+/\text{HA}) \quad \text{und} \quad \text{p}K_{S2} = \text{p}K_S (\text{HA}/\text{A}^-)$$

#### pH-Wert einer Pufferlösung: Abschätzung für nicht zu kleine Konzentrationen

Wenn in wässriger Lösung sowohl eine schwache Säure HA als auch ihre konjugierte Base  $\text{A}^-$  gelöst werden, so kann man näherungsweise annehmen, Säure und Base reagierten nur zu einem sehr kleinen Teil, so dass ihre Konzentrationen näherungsweise unverändert bleiben. Man setzt also folgende Gleichgewichtskonzentrationen in die Hendersson Hasselbalch-Gleichung ein:

$$[\text{HA}]_{\text{Glgw}} = [\text{HA}]_0 \quad \text{und} \quad [\text{A}^-]_{\text{Glgw}} = [\text{A}^-]_0 \quad [1],[2],[4]$$

## Titration

### Berechnung der Probekonzentration aus dem Titransvolumen

$c_P$  = Probekonzentration,  $c_T$  = Titranskonzentration,  $V_P$  = Probevolumen,  $V_T$  = Titransvolumen beim Äquivalenzpunkt (ÄP). Vorsicht: bei mehrprotonigen Säuren und Basen beziehen sich die Konzentrationen auf die freigesetzten oder aufgenommenen  $\text{H}^+$ !

Bis zum Äquivalenzpunkt werden gleich viele mol Titrans zugegeben, wie ursprünglich mol Säure in der Probe war:  $n(\text{Titrans}) = n(\text{Probe})$ . Daraus lassen sich folgende Formeln ableiten:

$$c_P \cdot V_P = c_T \cdot V_T \quad \text{und} \quad c_P = c_T \cdot \frac{V_T}{V_P}$$

### Näherung für pH-Werte während der Titration einer starken Säure

Näherung: Neutralisation zwischen Säure und Base läuft vollständig ab (Vernachlässigung der Autoprotolyse).

$$n(\text{H}_3\text{O}^+) = c_P \cdot V_P \quad n(\text{OH}^-) = c_T \cdot V_T \quad V_{\text{Total}} = V_P + V_T$$

Vor dem Äquivalenzpunkt ist  $n(\text{H}_3\text{O}^+) > n(\text{OH}^-)$ , danach  $n(\text{OH}^-) > n(\text{H}_3\text{O}^+)$

$$c = \frac{c_P \cdot V_P - c_T \cdot V_T}{V_P + V_T} \quad \text{Falls } c > 0: c = [\text{H}_3\text{O}^+] \quad \text{Falls } c < 0: c = [\text{OH}^-]$$

Gibt man also zu einer starken Säure **90%** der zur Neutralisation notwendigen Base  $V_T$ , **so sinkt die  $\text{H}_3\text{O}^+$ -Konzentration näherungsweise auf 10% und der pH erhöht sich um 1 Einheit**, gibt man **99% von  $V_T$**  zu, so sinkt die  **$\text{H}_3\text{O}^+$ -Konzentration auf 1% und der pH erhöht sich um 2 Einheiten**, etc.

### Titrationsskurve einer schwachen Säure: Pufferkurven-Näherung

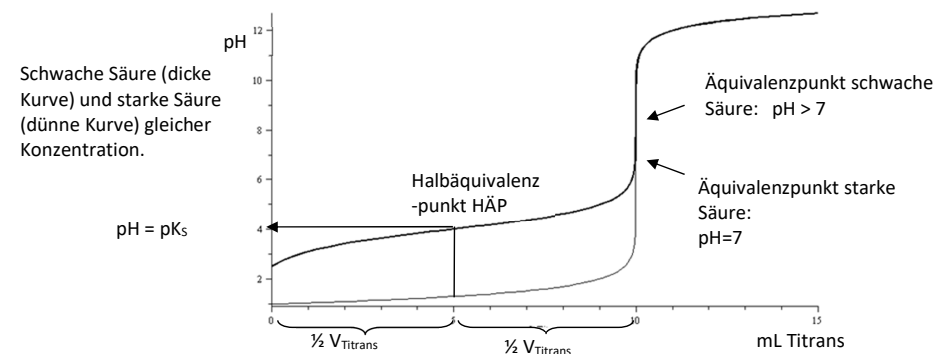
Bei der Titration einer schwachen Säure kann die Pufferkurve vor dem Äquivalenzpunkt näherungsweise als Pufferkurve betrachtet werden (100% Säureform beim Start, 50% Base- und Säureform bei Halbtitration und 100% Basenform beim Äquivalenzpunkt). Einzelne Punkte werden mit Hilfe der Hendersson/Hasselbalch-Gleichung berechnet. Diese Näherung stimmt gut bei der Halbtitration und wird nahe bei Start und Äquivalenzpunkt sehr ungenau.

Beim **Halbäquivalenzpunkt HÄP** liegen gleich viel HA wie  $\text{A}^-$  vor:  $[\text{HA}] = [\text{A}^-] = x$ :

$$K_S = \frac{[\text{A}^-] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{HA}]} = \frac{x \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]}{x} = [\text{H}_3\text{O}^+]$$

$$\text{p}K_S = \text{pH}$$

### Titrationsskurve

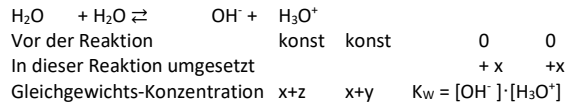


## pH-Werte bei Titrationsen: Berechnung mit gekoppelten Glg [1]

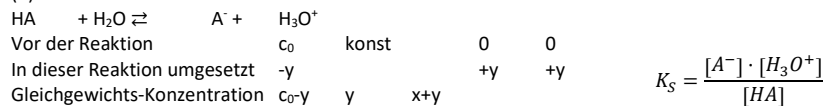
Gedanklich lässt man die Gleichgewichte der Autoprotolyse, die Dissoziation und die Laugezugabe sich gleichzeitig einstellen. Man startet also jeweils ohne Produkte.

Hiweis: Stürzt der TI ab bzw. hört nicht mehr auf zu rechnen, so kann ein Reset mit der Tastenkombination ([2nd]+[6], [F1]), [2nd]+[Hand]+[ON] oder [2nd]+[Lock]+[ON] helfen.

### (1) Autoprotolyse



### (2) Dissoziation der Säure



### (3) Zugabe der Lauge bzw. OH<sup>-</sup>

Insgesamt zugegebene Menge: +z

Gleichgewichts-Konzentration x+z

Dabei ist z = mol zugetropfte OH<sup>-</sup> pro **Probe**volumen.

$$z = \frac{n(\text{OH}^-)}{V_{\text{total}}} = c_{\text{Titans}} \frac{V_{\text{Titans}}}{V_{\text{Probe}} + V_{\text{Titans}}}$$

### Varianten:

a) Berechnung für eine Lösung einer schwachen Säure ohne Titrans-Zugabe z=0.

b) Äquivalenzpunkt einer Titration: z = c<sub>0</sub>

c) Abschätzung einer Titrationskurve: Die Volumenänderung durch die Titranszugabe wird vernachlässigt. Dadurch wird V<sub>total</sub> ≈ V<sub>Probe</sub> Statt V<sub>Probe</sub> + V<sub>Titans</sub>.

## Getroffene Näherungen bei den Formeln zu Säure/Base-Reaktionen:

[1] Das Massenwirkungsgesetz ist gültig, die Konzentration des Lösungsmittels Wasser bleibt unverändert, seine Aktivität (=reaktionswirksame Konzentration) wird daher 1 gesetzt.

[2] Die Autoprotolyse kann vernachlässigt werden.

[3] Die Reaktion der starken Säure oder Base mit Wasser läuft näherungsweise vollständig ab.

[4] Die Konzentration der gelösten schwachen Säure(n) oder Base(n) nimmt bei der Gleichgewichtseinstellung nur vernachlässigbar wenig ab.

## Quantenchemie

### Grundlagen

Impuls	p	= m·v	
Kinetische Energie	E <sub>kin</sub>	= $\frac{m \cdot v^2}{2}$ =	= $\frac{p^2}{2 \cdot m}$
Wellenlänge	λ		
Periode	T		
Frequenz	f	= $\frac{1}{T}$	
Phasengeschwindigkeit	c	= λ·f = $\frac{\lambda}{T}$	Geschwindigkeit von Wellenbergen

Im Allgemeinen haben Wellenpakete eine andere Geschwindigkeit (Gruppengeschwindigkeit) als Wellenberge (Phasengeschwindigkeit), bei elektromagnetischen Wellen sind Wellenberge und ganze Pakete allerdings gleich schnell.

### Bohr-Modell und Wasserstoff-Atomorbitale:

Energie einer Bahn bzw. eines Wasserstoff-Atomorbitals:

$$E = -\frac{1}{n^2} \cdot \frac{m_e \cdot e^4}{8 \cdot \epsilon_0^2 \cdot h^2}, \quad \text{wobei } \frac{m_e \cdot e^4}{8 \cdot \epsilon_0^2 \cdot h^2} = 2.179 \cdot 10^{-18} \text{ J} = 13.6 \text{ eV}$$

Bei einem Sprung von Bahn mit n<sub>1</sub> auf Bahn n<sub>2</sub> umgesetzte Energie (Positive Energie bedeutet Anregung, negative Energie Emission von Energie):

$$\Delta E = \frac{m_e \cdot e^4}{8 \cdot \epsilon_0^2 \cdot h^2} \cdot \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad \text{wobei } \frac{m_e \cdot e^4}{8 \cdot \epsilon_0^2 \cdot h^2} = 2.179 \cdot 10^{-18} \text{ J} = 13.6 \text{ eV}$$

### De Broglie-Gleichungen:

p	= h/λ	Erste de Broglie-Gleichung
E <sub>total</sub>	= h/T = h·f	Zweite de Broglie-Gleichung

Daraus folgt für elektromagnetische Strahlung (Licht) mit c = Lichtgeschwindigkeit:

$$E_{[\text{J}], \text{ pro Teilchen}} = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad E_{[\text{J mol}^{-1}]} = h \cdot f \cdot N_A = \frac{h \cdot c \cdot N_A}{\lambda}$$

$$E_{[\text{eV}]} = \frac{h \cdot f}{e_{\text{rel}}} \cdot c = \frac{h \cdot c}{\lambda e_{\text{rel}}} \quad e_{\text{rel}} = e / 1\text{C} = 1.602 \cdot 10^{-19}$$

## Heisenbergsche Unschärferelation

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h$$

## Linearer Potentialtopf

Hauptquantenzahlen  $n=1,2,3,\dots$  = Anzahl Maxima bei  $|\psi|^2$

Unendlich tiefer Potentialtopf:

Wellenlängen  $\lambda = 2L/n$   $n = 1,2,3,\dots$

Der Impuls und die kinetische Energie der Quanten im linearen Potentialtopf ergeben sich aus der ersten de Broglie-Gleichung:

**Impuls:**

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{n \cdot h}{2 \cdot L}$$

**Kinetische Energie:**

$$E_{\text{kin}} = \frac{p^2}{2 \cdot m} = \frac{n^2 \cdot h^2}{8 L^2 \cdot m}$$

## Schrödinger-Gleichung

Die Wellenfunktion (Zustandsfunktion)  $\phi(\vec{r}, t)$  eines Quants an der Stelle  $\vec{r}$  (x,y,z) zur Zeit t beträgt:

$$i\hbar \frac{\partial \phi(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial^2 \phi(\vec{r}, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi(\vec{r}, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi(\vec{r}, t)}{\partial z^2} \right) + V(\vec{r}, t) \cdot \phi(\vec{r}, t)$$

- $i^2 = -1$   
 $\hbar = h/2\pi$  = Planck'sche Konstante  
 $m$  = Masse des Quants  
 $V$  = potentielle Energie  
 $E$  = Gesamtenergie

Für stehende Wellen („stationäre Zustände“) gilt die zeitunabhängige Schrödingergleichung.

- Term I ist ein Mass für die Gesamt-Energie,
- Term II ist ein Mass für die kinetische und
- Term III für die potentielle Energie. Term II ist zudem ein (verzerrtes) Mass für die Krümmung (verschwindet bei Krümmung = 0 und nimmt mit der Krümmung zu)

$$\underbrace{E \phi(\vec{r})}_{\text{I}} = -\underbrace{\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial^2 \phi(\vec{r})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi(\vec{r})}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi(\vec{r})}{\partial z^2} \right)}_{\text{II}} + \underbrace{V(\vec{r}, t) \cdot \phi(\vec{r})}_{\text{III}}$$

## Mathematik und Geometrie

### Kreis und Kugel

Kreisumfang	$U = 2 \cdot \pi \cdot r$
Kreisfläche	$A = \pi \cdot r^2$
Kugeloberfläche	$S = 4 \cdot \pi \cdot r^2$
Kugelvolumen	$V = \frac{4}{3} \pi r^3$

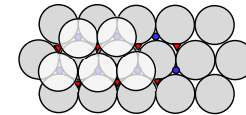
$$\pi = 3.14159265\dots$$

### Dichteste Kugelpackung und Gitterlücken

Der Raumfüllungsgrad einer dichtesten Kugelpackung beträgt  $\frac{\pi}{3\sqrt{2}} \approx 0.74048 \approx 74\%$ .

Packt man Kugeln also so eng wie irgend möglich zusammen, füllen sie den Raum zu rund 74%.

In einer dichtesten Kugelpackung treten verschiedene Arten von Lücken auf: Jede Kugel selber besetzt eine Kuboktaeder-Lücke (wenn die erste und dritte Schicht zueinander versetzt sind), und zwischen den Kugeln zweier Schichten treten jeweils Tetraeder- und Oktaederlücken auf.



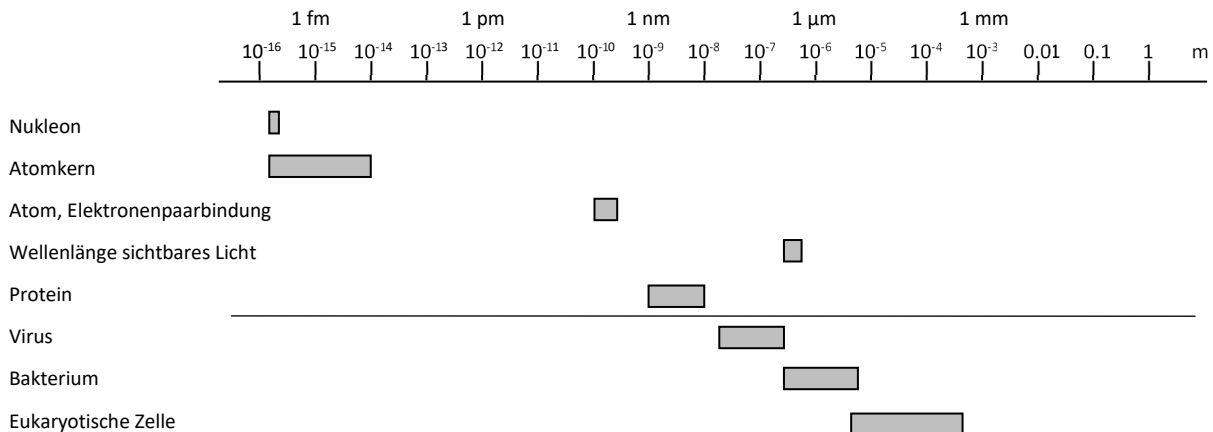
- Tetraederlücke
- ▼ Oktaederlücke

Die Koordinationszahl KZ gibt an, wie viele unmittelbare Nachbarn eine Kugel in einer Lücke hat. Das Radienverhältnis gibt an, welchen maximalen Radius eine Kugel in einer Lücke aufweisen kann, wenn die umgebenden Kugeln den Radius 1 aufweisen (Bzw. Verhältnis der Radien der Lücken-Kugeln und der Umgebungs-Kugeln).

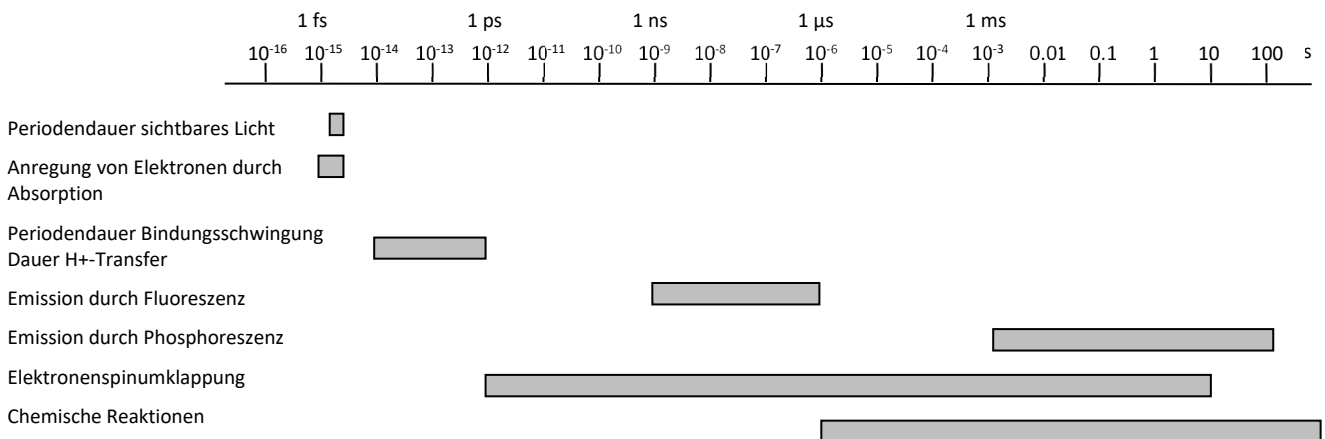
Lücke		KZ	Radienverhältnis
Tetraederlücke		4	0.225
Oktaeder-Lücke (quadratisch planar)		6 (4)	0.414
Würfel-Lücke		8	0.732
Kuboktaeder-Lücke		12	1.000

# ATOMARE DIMENSIONEN

## Typische Ausdehnungen in Meter



## Typische Zeiten in Sekunden

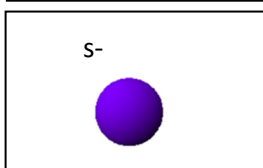
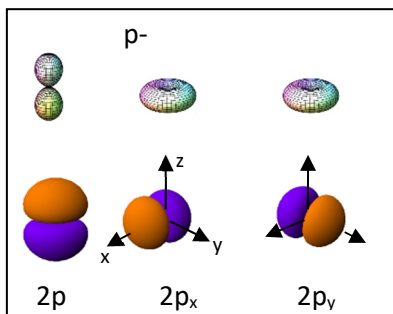
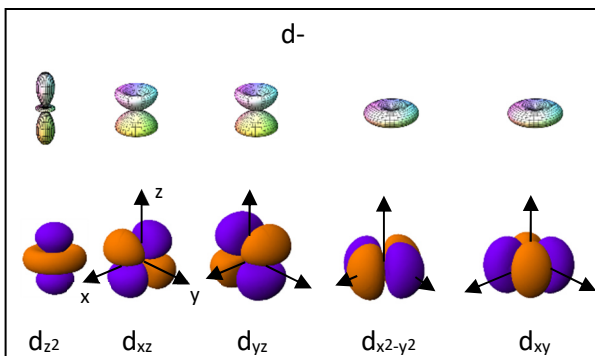
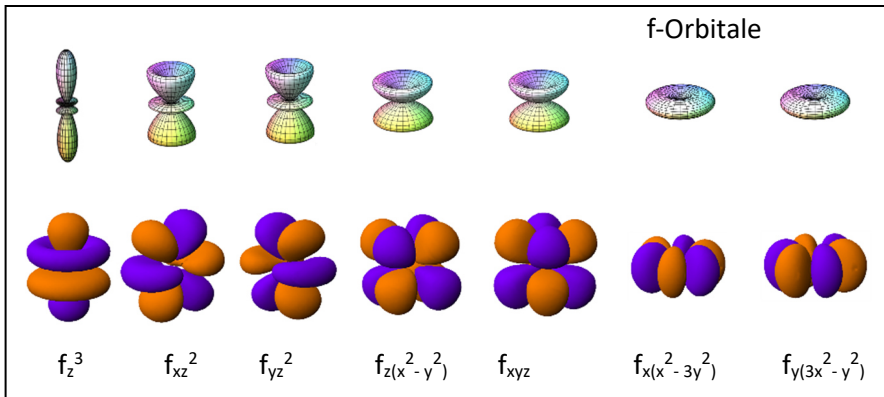


## Typische Energien

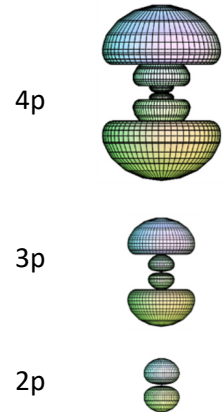
Ruheenergie eines Nukleons:	940'000'000	eV	= $90.7 \cdot 10^9$	kJ/mol
Ruheenergie eines Elektrons:	511'000	eV	= $49.3 \cdot 10^6$	kJ/mol
Spaltung Kovalenzbindung:	3 - 4.5	eV	= 289 - 434	kJ/mol
Photonen des sichtbaren Lichts:	1.7-3.1	eV	= 164 - 300	kJ/mol
Hydrolyse von ATP zu ADP + Phosphat	0.52	eV	= 50	kJ/mol
Schwingungen von Bindungen:	0.1 – 0.4	eV	= 9.6 - 40	kJ/mol
Spaltung Wasserstoffbrücke:	0.1	eV	= 10	kJ/mol
Spaltung von Van der Waals - Wechselwirkungen (kleine Moleküle):	0.01	eV	= 1	kJ/mol
Kinetische Energie eines Teilchens pro Freiheitsgrad bei 20 °C:	0.013	eV	= 1.3	kJ/mol
Kinetische Energie eines Teilchens pro Freiheitsgrad pro 100 K:	0.00431	eV	= 0.416	kJ/mol

# ELEKTRONENBAHNEN, ORBITALE

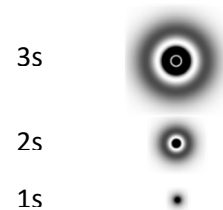
## Atom-Orbitale



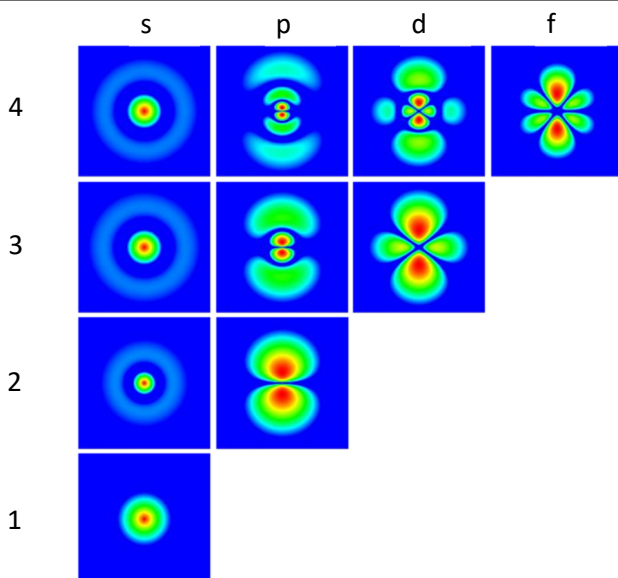
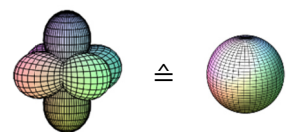
Räumliche Darstellung  
Der Ladungsverteilung von p-  
Orbitalen: Flächen gleicher  
Ladungsdichte



Ladungsverteilung in s-  
Orbitalen:  
Ladungsdichte im  
Querschnitt



In vollen Unterschalen  
ist die Ladung  
kugelsymmetrisch  
verteilt



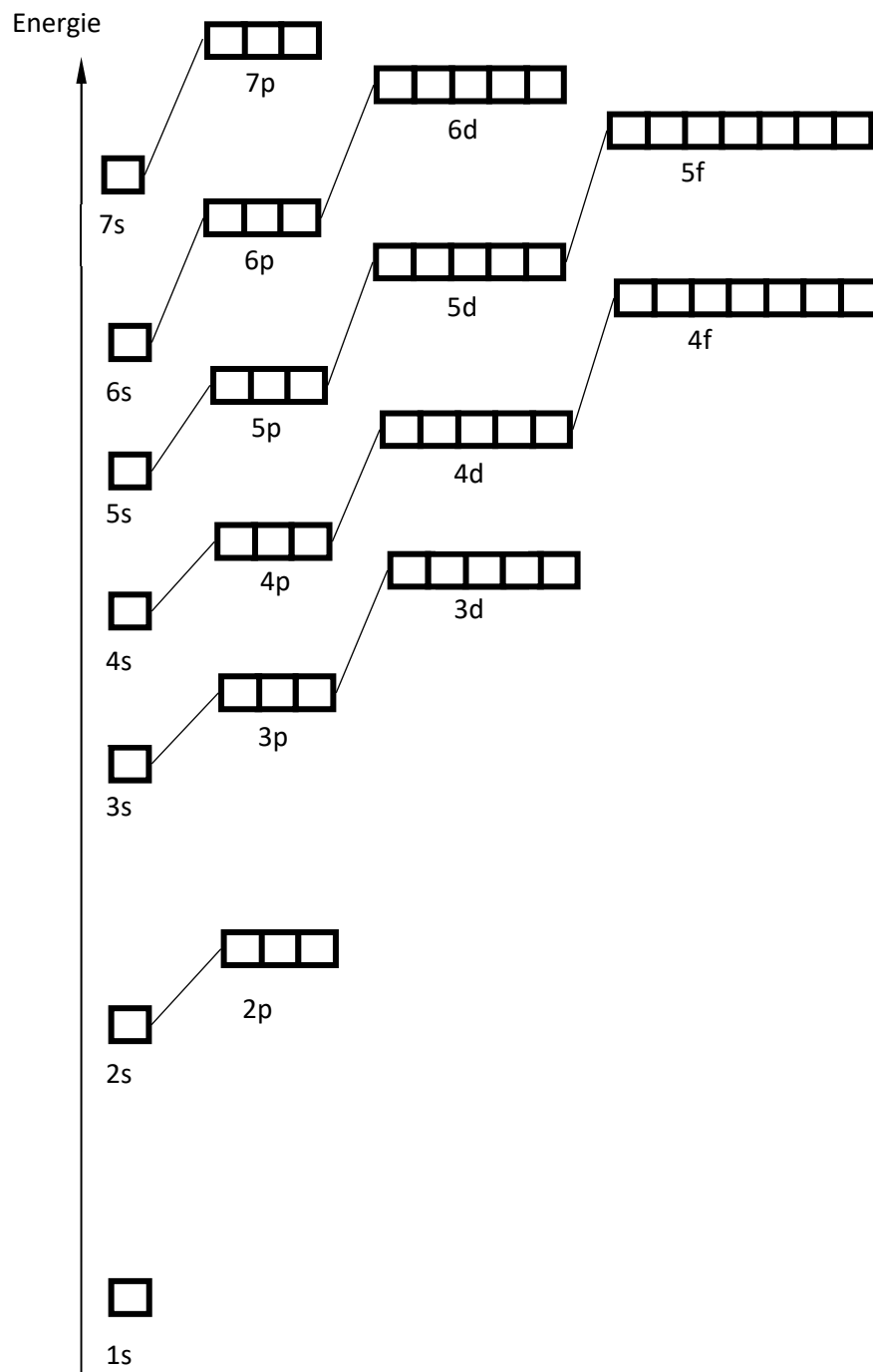
Elektronendichte-Verteilung ( $\psi^2$ ) in einzelnen  
einfachen Atom-Orbitalen.

Bedeutung der Farbe: Elektronendichte von  
tief (dunkelblau) bis hoch (rot). Sortiert nach  
Hauptschale (Beschriftung rechts) und  
Unterschalen (Beschriftung oben).

<http://www.hydrogenlab.de/>

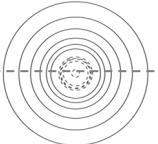

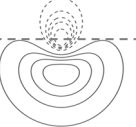
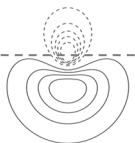
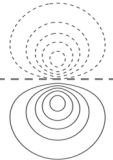

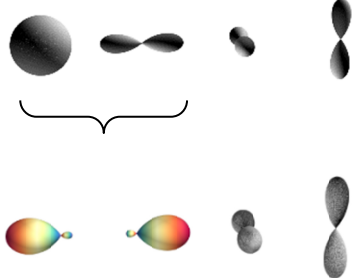
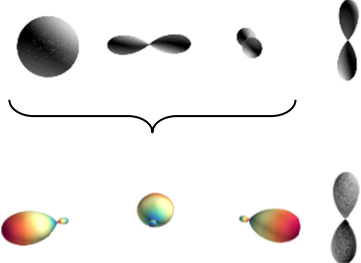
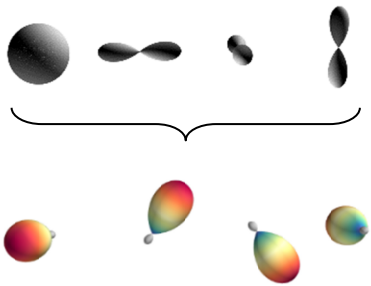



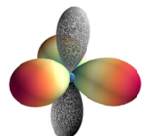

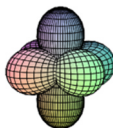
# Energieniveau-Schema

Für Mehrelektronen-Atome



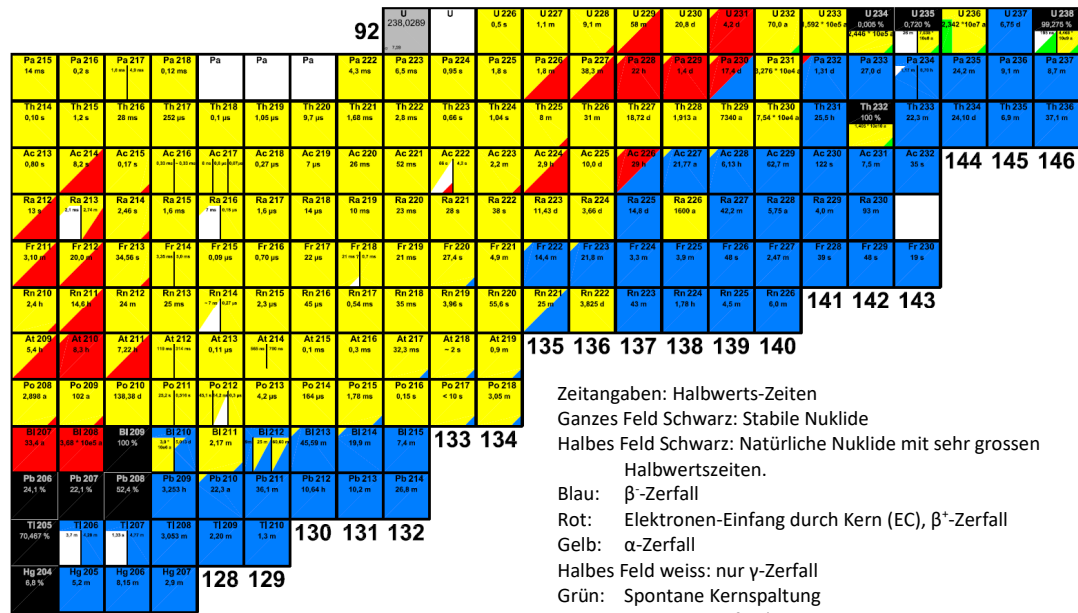
# HYBRID-ORBITALE

Dargestellt sind nur Hybrid-Orbitale (HO) aus s- und p-Atomorbitalen (AO). AO können auf drei verschiedene Arten miteinander hybridisiert werden (zudem sind Zwischenformen möglich).

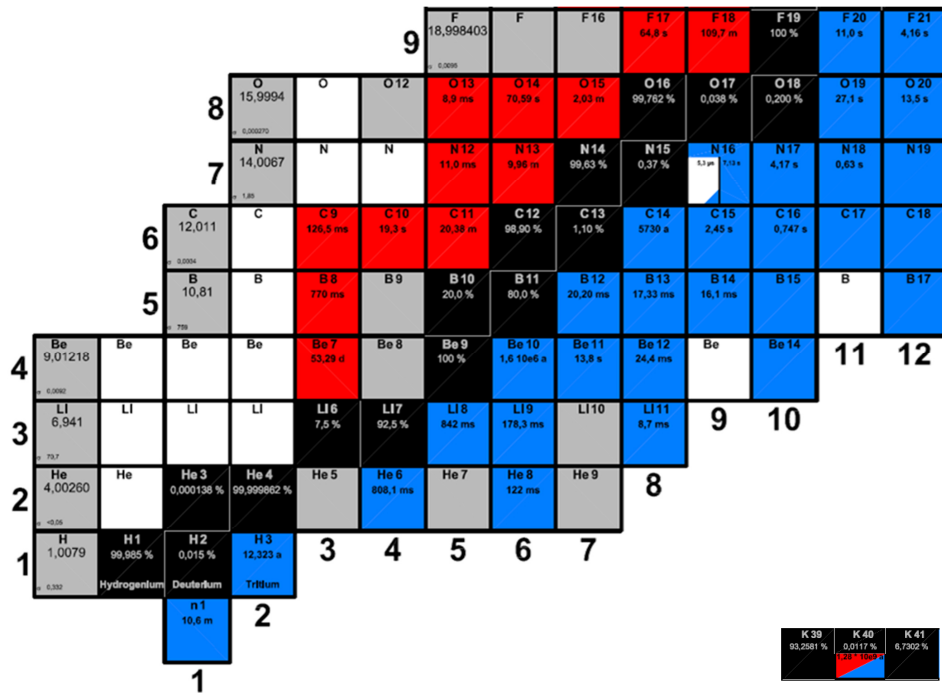
Orbital	s - AO	sp - HO	sp <sup>2</sup> - HO	sp <sup>3</sup> - HO	p - AO
Bindungs-situation		Eine Dreifachbindung, zwei Doppelbindungen oder Mesomerie	Eine Doppelbindung oder Mesomerie	Nur Einfachbindungen	
Geometrie Bindungswinkel		Linear 180°	Trigonal planar 120°  (Falls nichtbindende Elektronenpaare auftreten auch gewinkelt oder linear)	Tetraedrisch 109.5°  (Falls nichtbindende Elektronenpaare auftreten auch trigonal pyramidal, gewinkelt oder linear)	
					
					
					



# NUKLIDKARTE



Zeitangaben: Halbwerts-Zeiten  
 Ganzes Feld Schwarz: Stabile Nuklide  
 Halbes Feld Schwarz: Natürliche Nuklide mit sehr grossen Halbwertszeiten.  
 Blau:  $\beta$ -Zerfall  
 Rot: Elektronen-Einfang durch Kern (EC),  $\beta^+$ -Zerfall  
 Gelb:  $\alpha$ -Zerfall  
 Halbes Feld weiss: nur  $\gamma$ -Zerfall  
 Grün: Spontane Kernspaltung  
 Grau: sonstiger Zerfall (z.B. Proton- oder Neutron-Emission) oder Zerfallsart unbekannt.



### Relative Massen einiger Nuklide in g mol<sup>-1</sup>

Anordnung analog zur Isotopenkarte.

Angegeben ist die **Atommasse (Atome incl. Elektronen)** relativ zu  $^{12}\text{C}$ .

	p <sup>+</sup>								
Pu	94	234.043299	235.045260	236.046032	237.048401	238.049554	239.052157	240.053808	241.056845
Np	93	233.040800	234.042888	235.044056	236.046550	237.048167	238.050941	239.052933	240.056050
U	92	232.037130	233.039628	234.040946	235.043924	236.045562	237.048724	238.050784	239.054289
Pa	91	231.035880	232.038565	233.040242	234.043303	235.045430	236.048890	237.051140	238.055040
Th	90	230.033127	231.036298	232.038054	233.041577	234.043593	235.047510		
		140	141	142	143	144	145	146	147

	p <sup>+</sup>								
Ne	10						16.02575	17.0177	18.00571
F	9						15.018	16.01147	17.0020952
O	8				12.03442	13.02481	14.0085953	15.003065	15.9949146
N	7					12.018613	13.0057386	14.003074	15.000109
C	6		8.03768	9.03104	10.016853	11.011433	12	13.0033548	14.003242
B	5		7.0299	8.024607	9.013329	10.012937	11.009306	12.014352	13.01778
Be	4		6.01973	7.016929	8.0053051	9.012182	10.013534	11.02166	12.02692
Li	3		5.01254	6.015122	7.016004	8.022486	9.026789	10.0359	11.04379
He	2	3.0160293	4.0026033	5.01222	6.018888	7.02803	8.03392	9.0438	
H	1	1.007825	2.0141018	3.0160493					
n	0	1.0086649							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8

Ruhemassen:

Proton:  $1.00727646677(10) \text{ u}$

Neutron: 1.00866491597(43) u

Elektron: 0.00054857990943(23) u

# ELEKTROMAGNETISCHE STRAHLUNG

## Wellenlängen $\lambda$ und Energie $E$ von Photonen

Frequenz $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$	Energie $\text{kJ/mol Quanten}$	Wellenlänge $\lambda$ in m von... Radius	Wellenart	
$10^1=10$ $10^2$ $10^3$ $10^4$	$4 \cdot 10^{-12}$ $4 \cdot 10^{-11}$ $4 \cdot 10^{-10}$ $4 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^7$ $3 \cdot 10^6$ $3 \cdot 10^5 = 300 \text{ km}$ $3 \cdot 10^4 = 30 \text{ km}$	Niederfrequenz Wechselstrom	Wechselstrom  Ton-Übertragung
$10^5$ $10^6 = 1 \text{ M}$ $10^7$ $10^8$	$4 \cdot 10^{-8}$ $4 \cdot 10^{-7}$ $4 \cdot 10^{-6}$ $4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^3 = 3 \text{ km}$ 300 30 3	Radiowellen Langwellen Mittelwellen Kurzwellen	Radio und TV: $\lambda = 1 \text{ m} - 10 \text{ km}$
$10^9 = 1 \text{ G}$ $10^{10}$ $10^{11}$	$4 \cdot 10^{-4}$ $4 \cdot 10^{-3}$ $4 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-1} = 30 \text{ cm}$ $3 \cdot 10^{-2} = 3 \text{ cm}$ $3 \cdot 10^{-3} = 3 \text{ mm}$	Mikrowellen Ultrakurzwellen	Mobiltelefon Radar, Mikrowellenherd $\lambda = 1 \text{ mm} - 1 \text{ m}$
$10^{12}$ $10^{13}$ $10^{14}$	$4 \cdot 10^{-1}$ 4 $4 \cdot 10^1$	$3 \cdot 10^{-4} = 300 \mu\text{m}$ $3 \cdot 10^{-5} = 30 \mu\text{m}$ $3 \cdot 10^{-6} = 3 \mu\text{m}$	Infrarot IR Wärmestrahlung	$\lambda = 750 \text{ nm} - 1 \text{ mm}$
$10^{15}$	$4 \cdot 10^2 = 4.1 \text{ eV}$	$3 \cdot 10^{-7} = 300 \text{ nm}$	Licht Sichtbares Licht	$\lambda = 350 - 750 \text{ nm}$
$10^{16}$ $10^{17}$	$4 \cdot 10^3 = 41 \text{ eV}$ $4 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^{-8} = 30 \text{ nm}$ $3 \cdot 10^{-9} = 3 \text{ nm}$	Ultraviolett UV Ultraviolett UV	Siehe Seite 2
$10^{18}$ $10^{19}$ $10^{20}$	$4 \cdot 10^5$ $4 \cdot 10^6$ $4 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^{-10} = 300 \text{ pm}$ Rb-Atom $3 \cdot 10^{-11} = 30 \text{ pm}$ H-Atom $3 \cdot 10^{-12} = 3 \text{ pm}$	Röntgenstrahlung:  Weiche Röntg.  Harte Röntg.	Röntgenbilder $\lambda = 10 \text{ pm} - 10 \text{ nm}$
$10^{21}$ $10^{22}$ $10^{23}$ $10^{24}$ $10^{25}$	$4 \cdot 10^8$ $4 \cdot 10^9$ $4 \cdot 10^{10}$ $4 \cdot 10^{11}$ $4 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{-13} = 300 \text{ fm}$ $3 \cdot 10^{-14} = 30 \text{ fm}$ $3 \cdot 10^{-15} = 3 \text{ fm}$ H-Kern $3 \cdot 10^{-16}$ $3 \cdot 10^{-17}$	$\gamma$ -Strahlung $\gamma$ -Strahlung	Radioaktiver Zerfall  kosmische Höhenstrahlung

## Wellenlängen und Farben von sichtbarem Licht und UV

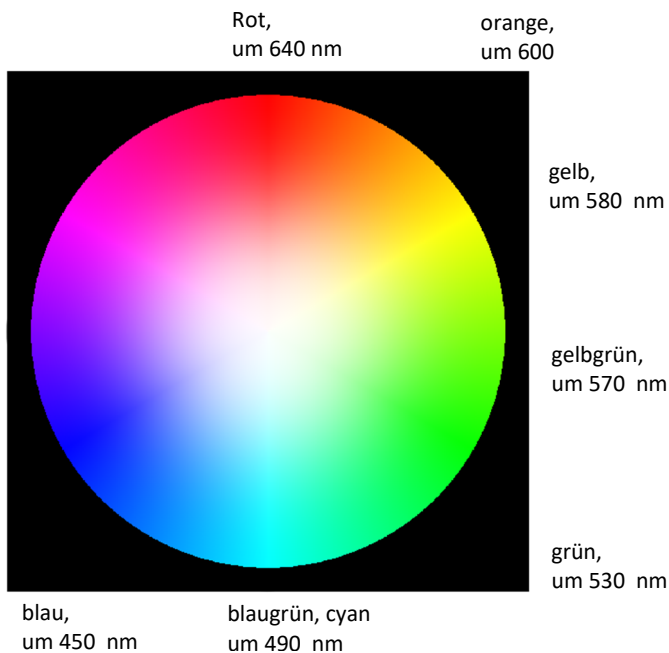
Wellenlänge [nm]	Energie [eV] ([kJ/mol]) {[ $10^{-21}$ J/Photon]}	Wahrgenommene Farbe	Komplementärfarbe (Farbkreis)
100-200	6.20 - 12.4	UV-C-VUV, Vakuum-UV	
200-280	4.43 - 6.20	UV-C-FUV, fernes UV	
280-315	3.94 - 4.43	UV-B, mittleres UV	
315-380	3.26 - 3.94	UV-A, nahes UV	
400-425	3.10 - 2.92 (299 - 282) {497- 468}	Blauviolett	Grüngelb
425-480	2.92 - 2.58 (282 - 249) {468 - 413}	Blau-Töne	Gelb bis Orange
480-500	2.58 - 2.48 (249 - 239) {413 - 397}	Blaugrün	Orange bis Rot
500-560	2.48 - 2.21 (239 - 214) {397- 355}	Grün	Purpur
560-580	2.21 - 2.14 (214 - 206) {355 - 342}	Grüngelb	Violett
580-590	2.14 - 2.10 (206 - 203) {342 - 337}	Gelb	Indigoblau
590-605	2.10 - 2.05 (203 - 198) {337 - 329}	Orange	Blaugrün
605-730	2.05 - 1.70 (198 - 164) {329 - 272}	Rot	Grünblau
um 400 <b>und</b> um 700		Purpur	Grün

Der Farbkreis beschreibt die **Gesetze des Farbmischens** (Lichter oder Farbstoffe), die sich aus der Lichtempfindlichkeit der Zäpfchen im Auge ergeben, das Gegenfarben-Schema hingegen beschreibt diejenigen der **Farbwahrnehmung**, die eine Folge der neuronalen Signalverarbeitung ist, mit anderen Paaren von gegensätzlichen Farben.

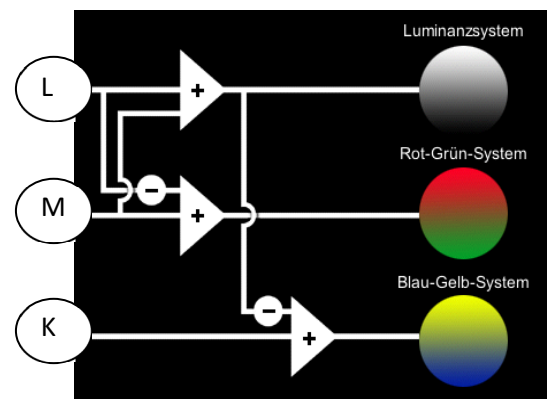
### Farbkreis

Gewisse Töne von violett, pink, purpur, magenta: Sind nicht mit Licht einer Wellenlänge zu erzeugen (nicht monochromatisch)

indigoblau, um 425 nm



### Gegenfarben-Schema



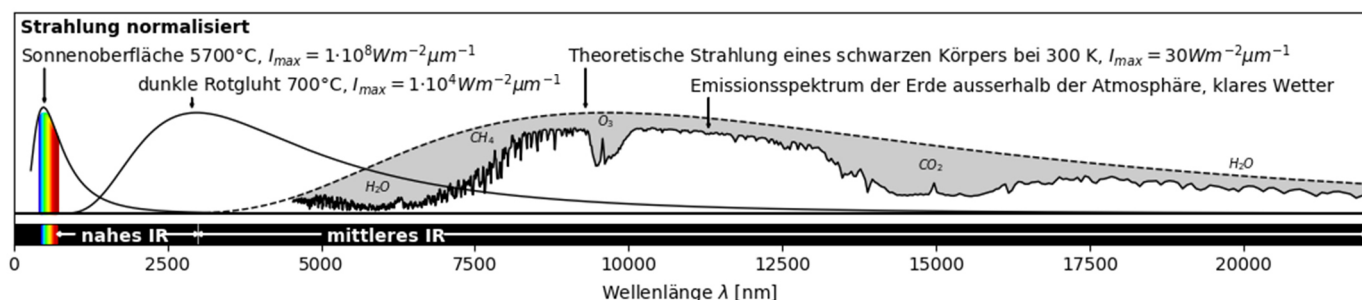
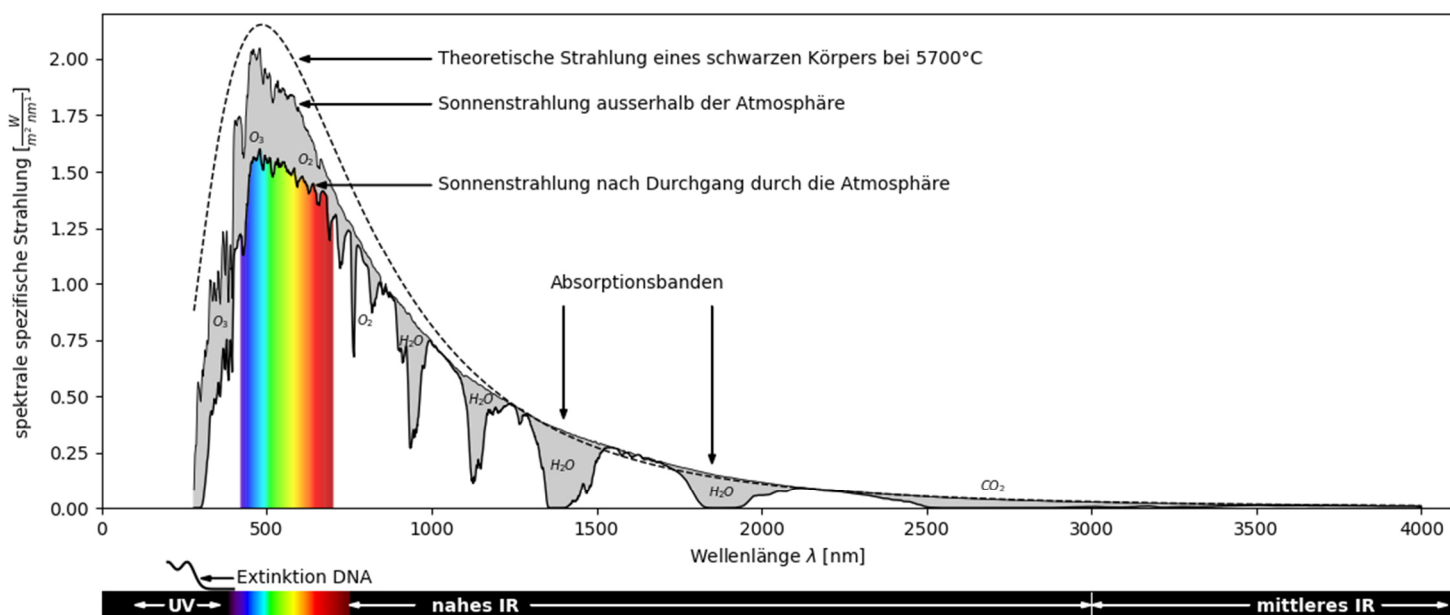
**L: L-Zapfen** (empfindlich auf langwelliges Licht: etwa rot)  
**M: M-Zapfen** (mittleres Licht: etwa grün)  
**K: K-Zapfen** (kurzwelliges Licht: etwa blau)

Verarbeitung in Neuronen der Netzhaut:

**Rot/Grün-Kanal:** Differenz aus L- und M-Signal

**Helligkeitskanal (Luminanz):** Summe aus L- und M.

**Blau/Gelb-Kanal:** Differenz zwischen Luminanz- und K.



Elektromagnetische Strahlung. A. Theoretische Strahlung eines schwarzen Körpers mit der Oberflächentemperatur der Sonne und Sonnenstrahlung ausserhalb der Atmosphäre und am Boden. B. UV-Absorption der DNA. C. Strahlungskurven schwarzer Körper mit unterschiedlicher Temperatur, normalisiert (Maxima gleich hoch), mit der tatsächlichen Strahlungsenergie in  $W m^{-3}$  und den absorbierenden Stoffen bei den wichtigsten Absorptionsbanden.

# Atom- und Ionenradien, Normalpotential der Elementarstoffe

Ordnungszahl			mittlere Atom-Masse	Elektronen-Konfiguration	Elektro-Negativität	Kovalenzradius (Elementarstoffe)	Mittlerer Van der Waals-Radius (-CH <sub>3</sub> : 200 pm; H <sub>2</sub> O ca. 300x390 pm)	Ion [Koordinationszahl] Effektiver Ionenradius	Ion [Koordinationszahl] Effektiver Ionenradius	Ion [Koordinationszahl] Effektiver Ionenradius	Ion [Koordinationszahl] Effektiver Ionenradius	Normalpotential	konj. Form bei Normalpotential-Glgw
			u			pm	pm					V	
1	H	<b>Wasserstoff</b>	1.00795	1s <sup>1</sup>	2.2	32	120(-145)	H <sup>1+</sup> [1] -24	H <sup>1+</sup> [2] -4			0.00	H <sup>+</sup> (aq)
2	He	<b>Helium</b>	4.002602	1s <sup>2</sup>	-	93	180						
3	Li	<b>Lithium</b>	6.941	1s <sup>2</sup> 2s <sup>1</sup>	0.98	123	180	Li <sup>1+</sup> [4] 73	Li <sup>1+</sup> [8] 106			-3.04	Li <sup>+</sup>
4	Be	<b>Beryllium</b>	9.0122	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup>	1.57	90	153	Be <sup>2+</sup> [3] 30	Be <sup>2+</sup> [6] 59			-1.97	Be <sup>2+</sup>
5	B	<b>Bor</b>	10.811	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> p <sup>1</sup>	2.04	82		B <sup>3+</sup> [3] 15	B <sup>3+</sup> [6] 41				
6	C	<b>Kohlenstoff</b>	12.011	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> p <sup>2</sup>	2.55	77	165-170	C <sup>4+</sup> [3] 6	C <sup>4+</sup> [6] 30				
7	N	<b>Stickstoff</b>	14.00674	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> p <sup>3</sup>	3.04	75	155	N <sup>3+</sup> [4] 132					
8	O	<b>Sauerstoff</b>	15.9994	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> p <sup>4</sup>	3.44	73	150	O <sup>2-</sup> [2] 121	O <sup>2-</sup> [8] 128			1.23	O <sup>2-</sup>
9	F	<b>Fluor</b>	18.9984	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> p <sup>5</sup>	3.98	72	147(-160)	F <sup>-</sup> [2] 114.5	F <sup>-</sup> [6] 119			2.87	F <sup>-</sup>
10	Ne	<b>Neon</b>	20.180	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> p <sup>6</sup>	-	71	160						
11	Na	<b>Natrium</b>	22.990	[Ne]3s <sup>1</sup>	0.93	154	230	Na <sup>1+</sup> [4] 113	Na <sup>1+</sup> [6] 116	Na <sup>1+</sup> [8] 132	Na <sup>1+</sup> [12] 153	-2.713	Na <sup>+</sup>
12	Mg	<b>Magnesium</b>	24.3051	[Ne]3s <sup>2</sup>	1.31	136	170	Mg <sup>2+</sup> [4] 71	Mg <sup>2+</sup> [6] 86	Mg <sup>2+</sup> [8] 103		-2.372	Mg <sup>2+</sup>
13	Al	<b>Aluminium</b>	26.98154	[Ne]3s <sup>2</sup> p <sup>1</sup>	1.61	118		Al <sup>3+</sup> [4] 53	Al <sup>3+</sup> [6] 67.5			-1.676	Al <sup>3+</sup>
14	Si	<b>Silicium</b>	28.0855	[Ne]3s <sup>2</sup> p <sup>2</sup>	1.9	111	210	Si <sup>4+</sup> [4] 40	Si <sup>4+</sup> [6] 54				
15	P	<b>Phosphor</b>	30.97376	[Ne]3s <sup>2</sup> p <sup>3</sup>	2.19	106	185	P <sup>3-</sup> [6] 200					
16	S	<b>Schwefel</b>	32.067	[Ne]3s <sup>2</sup> p <sup>4</sup>	2.58	102	180	S <sup>2-</sup> [6] 170				-0.48	S <sup>2-</sup>
17	Cl	<b>Chlor</b>	35.453	[Ne]3s <sup>2</sup> p <sup>5</sup>	3.16	99	170-190	Cl <sup>-</sup> [6] 167				1.36	Cl <sup>-</sup>
18	Ar	<b>Argon</b>	39.8	[Ne]3s <sup>2</sup> p <sup>6</sup>	-	98	190						
19	K	<b>Kalium</b>	39.0983	[Ar]4s <sup>1</sup>	0.82	203	280	K <sup>1+</sup> [4] 151	K <sup>1+</sup> [12] 178			-3.5	K <sup>+</sup>
20	Ca	<b>Calcium</b>	40.078	[Ar]4s <sup>2</sup>	1	174		Ca <sup>2+</sup> [6] 114	Ca <sup>2+</sup> [12] 148			-2.84	Ca <sup>2+</sup>
21	Sc	<b>Scandium</b>	44.95591	[Ar]3d <sup>1</sup> 4s <sup>2</sup>	1.36	144		Sc <sup>3+</sup> [6] 88.5	Sc <sup>3+</sup> [8] 101			-2.03	Sc <sup>3+</sup>
22	Ti	<b>Titan</b>	47.867	[Ar]3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup>	1.54	132		Ti <sup>2+</sup> [6] 100	Ti <sup>3+</sup> [6] 81	Ti <sup>4+</sup> [4] 56	Ti <sup>4+</sup> [8] 88	-0.86	TiO <sup>2+</sup> + 2 H <sup>+</sup>
23	V	<b>Vanadium</b>	50.9415	[Ar]3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup>	1.63	122		V <sup>2+</sup> [6] 93	V <sup>4+</sup> [8] 86	V <sup>5+</sup> [4] 49.5	V <sup>5+</sup> [6] 68		
24	Cr	<b>Chrom</b>	51.996	[Ar]3d <sup>5</sup> 4s <sup>1</sup>	1.66	118		Cr <sup>2+</sup> [6 ls] 87	Cr <sup>3+</sup> [6] 75.5	Cr <sup>4+</sup> [6] 69	Cr <sup>6+</sup> [4] 40	-0.913	Cr <sup>2+</sup>
25	Mn	<b>Mangan</b>	54.93805	[Ar]3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup>	1.55	117		Mn <sup>2+</sup> [8] 110	Mn <sup>4+</sup> [6] 67	Mn <sup>6+</sup> [4] 39.5	Mn <sup>7+</sup> [4] 39	-1.18	Mn <sup>2+</sup>
26	Fe	<b>Eisen</b>	55.845	[Ar]3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup>	1.83	117		Fe <sup>2+</sup> [4 hs] 77	Fe <sup>2+</sup> [4 qu hs] 78	Fe <sup>2+</sup> [6 ls] 75	Fe <sup>2+</sup> [6 hs] 92	-0.44	Fe <sup>2+</sup>
								Fe <sup>3+</sup> [4 hs] 63	Fe <sup>3+</sup> [6 ls] 69	Fe <sup>3+</sup> [6 hs] 78.5	Fe <sup>3+</sup> [8 hs] 92		
27	Co	<b>Cobalt</b>	58.93319	[Ar]3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup>	1.88	116		Co <sup>2+</sup> [4 hs] 72	Co <sup>2+</sup> [8] 104	Co <sup>3+</sup> [6 ls] 68.5	Co <sup>4+</sup> [6 hs] 67	-0.28	Co <sup>2+</sup>
28	Ni	<b>Nickel</b>	58.6934	[Ar]3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup>	1.91	115	160	Ni <sup>2+</sup> [4] 69	Ni <sup>2+</sup> [6] 83	Ni <sup>3+</sup> [6 ls] 70	Ni <sup>3+</sup> [6 hs] 74	-0.257	Ni <sup>2+</sup>
29	Cu	<b>Kupfer</b>	63.546	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup>	1.9	117	140	Cu <sup>1+</sup> [2] 60	Cu <sup>1+</sup> [6] 91	Cu <sup>2+</sup> [4] 71	Cu <sup>2+</sup> [6] 87	0.34	Cu <sup>2+</sup>
30	Zn	<b>Zink</b>	65.39	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup>	1.65	125	140	Zn <sup>2+</sup> [4] 74	Zn <sup>2+</sup> [5] 82	Zn <sup>2+</sup> [6] 88	Zn <sup>2+</sup> [8] 104	-0.7926	Zn <sup>2+</sup>
31	Ga	<b>Gallium</b>	69.723	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> p <sup>1</sup>	1.81	126	190	Ga <sup>3+</sup> [4] 61	Ga <sup>3+</sup> [6] 76			-0.53	Ga <sup>3+</sup>
32	Ge	<b>Germanium</b>	72.61	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> p <sup>2</sup>	2.01	122		Ge <sup>2+</sup> [6] 87	Ge <sup>4+</sup> [4] 53	Ge <sup>4+</sup> [6] 67		0.247	Ge <sup>2+</sup>
33	As	<b>Arsen</b>	74.922	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> p <sup>3</sup>	2.18	120		As <sup>3-</sup> [6] 210	As <sup>3+</sup> [6] 72	As <sup>5+</sup> [4] 47.5	As <sup>5+</sup> [6] 60	0.240	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 6 H <sup>+</sup>
34	Se	<b>Selen</b>	78.96	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> p <sup>4</sup>	2.55	116	190	Se <sup>2-</sup> [6] 184	Se <sup>4+</sup> [6] 64	Se <sup>6+</sup> [4] 42	Se <sup>6+</sup> [6] 56	-0.67	Se <sup>2-</sup>
35	Br	<b>Brom</b>	79.904	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> p <sup>5</sup>	2.96	114	180-200	Br <sup>1-</sup> [6] 182				1.066	Br <sup>-</sup>
36	Kr	<b>Krypton</b>	83.801	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> p <sup>6</sup>	-	112	200						
37	Rb	<b>Rubidium</b>	85.4678	[Kr]5s <sup>1</sup>	0.82	216		Rb <sup>1+</sup> [6] 166	Rb <sup>1+</sup> [14] 197			-2.924	Rb <sup>+</sup>
38	Sr	<b>Strontium</b>	87.62	[Kr]5s <sup>2</sup>	0.95	191		Sr <sup>2+</sup> [6] 132	Sr <sup>2+</sup> [12] 158			-2.89	Sr <sup>2+</sup>
47	Ag	<b>Silber</b>	107.8682	[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup>	1.93	134	170	Ag <sup>1+</sup> [2] 81	Ag <sup>1+</sup> [4] 114	Ag <sup>1+</sup> [6] 129	Ag <sup>2+</sup> [6] 108	0.7991	Ag <sup>+</sup>
48	Cd	<b>Cadmium</b>	112.41	[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup>	1.69	148	160	Cd <sup>2+</sup> [4] 92	Cd <sup>2+</sup> [6] 109	Cd <sup>2+</sup> [12] 145		-0.403	Cd <sup>2+</sup>
49	In	<b>Indium</b>	114.818	[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> p <sup>1</sup>	1.78	144	190	In <sup>3+</sup> [4] 76	In <sup>3+</sup> [6] 94	In <sup>3+</sup> [8] 106		-0.343	In <sup>3+</sup>
50	Sn	<b>Zinn (β-Sn)</b>	118.711	[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> p <sup>2</sup>	1.96	141	220	Sn <sup>4+</sup> [4] 69	Sn <sup>4+</sup> [6] 83	Sn <sup>4+</sup> [8] 95		-0.137	Sn <sup>2+</sup>
51	Sb	<b>Antimon</b>	121.76	[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> p <sup>3</sup>	2.05	140		Sb <sup>3+</sup> [4 py] 90	Sb <sup>3+</sup> [6] 90	Sb <sup>5+</sup> [6] 74		0.150	Sb <sup>3+</sup>
52	Te	<b>Tellur</b>	127.60	[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> p <sup>4</sup>	2.1	136	210	Te <sup>2-</sup> [6] 207	Te <sup>4+</sup> [3] 66	Te <sup>4+</sup> [6] 111		-1.14	Te <sup>2-</sup>
53	I	<b>Iod</b>	126.9045	[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> p <sup>5</sup>	2.66	133	195-212	I <sup>1-</sup> [6] 206				0.536	I <sup>-</sup>
54	Xe	<b>Xenon</b>	131.29	[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> p <sup>6</sup>	-	131	220	Xe <sup>8+</sup> [4] 54	Xe <sup>8+</sup> [6] 62				
55	Cs	<b>Cäsium</b>	132.91	[Xe]6s <sup>1</sup>	0.79	235		Cs <sup>1+</sup> [6] 181	Cs <sup>1+</sup> [12] 202			-2.923	Cs <sup>+</sup>
56	Ba	<b>Barium</b>	137.33	[Xe]6s <sup>2</sup>	0.89	198		Ba <sup>2+</sup> [6] 149	Ba <sup>2+</sup> [12] 175			-2.92	Ba <sup>2+</sup>
78	Pt	<b>Platin</b>	195.078	[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>9</sup> 6s <sup>1</sup>	2.28	130	170-180	Pt <sup>2+</sup> [4 qu] 74	Pt <sup>2+</sup> [6] 94	Pt <sup>4+</sup> [6] 76.2	Pt <sup>5+</sup> [6] 71	1.118	Pt <sup>2+</sup>
79	Au	<b>Gold</b>	196.9666	[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>1</sup>	2.54	134	170	Au <sup>1+</sup> [6] 151	Au <sup>3+</sup> [4 qu] 82	Au <sup>3+</sup> [6] 99	Au <sup>5+</sup> [6] 71	1.52	Au <sup>3+</sup>
80	Hg	<b>Quecksilber</b>	200.59	[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup>	2	149	150	Hg <sup>1+</sup> [6] 133	Hg <sup>2+</sup> [2] 83	Hg <sup>2+</sup> [6] 116	Hg <sup>2+</sup> [8] 128	0.8535	Hg <sup>2+</sup>
81	Tl	<b>Thallium</b>	204.3833	[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> p <sup>1</sup>	2.04	148	200	Tl <sup>1+</sup> [6] 164	Tl <sup>1+</sup> [12] 184	Tl <sup>3+</sup> [4] 89	Tl <sup>3+</sup> [6] 102.5	-0.3363	Tl <sup>+</sup>
82	Pb	<b>Blei</b>	207.2	[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> p <sup>2</sup>	2.33	147	200	Pb <sup>2+</sup> [4 py] 112	Pb <sup>2+</sup> [6] 133	Pb <sup>2+</sup> [12] 163	Pb <sup>4+</sup> [6] 91.5	-0.1251	Pb <sup>2+</sup>
83	Bi	<b>Bismut</b>	208.98	[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> p <sup>3</sup>	2.02	146		Bi <sup>3+</sup> [5] 110	Bi <sup>3+</sup> [6] 117	Bi <sup>3+</sup> [8] 131	Bi <sup>5+</sup> [6] 90	0.317	Bi <sup>3+</sup>
84	Po	<b>Polonium</b>	209	[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> p <sup>4</sup>	2	146		Po <sup>4+</sup> [6] 108	Po <sup>4+</sup> [8] 122	Po <sup>6+</sup> [6] 81		0.37	Po <sup>2+</sup>
85	At	<b>Astat</b>	210	[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> p <sup>5</sup>	2.2			At <sup>7+</sup> [6] 76					
86	Rn	<b>Radon</b>	222	[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> p <sup>6</sup>	-								
87	Fr	<b>Francium</b>	223	[Rn]7s <sup>1</sup>	0.7			Fr <sup>1+</sup> [6] 194				-2.9	Fr <sup>1+</sup>
88	Ra	<b>Radium</b>	226	[Rn]7s <sup>2</sup>	0.9			Ra <sup>2+</sup> [8] 162	Ra <sup>2+</sup> [12] 184			-2.916	Ra <sup>2+</sup>

**Ionisierungs-Energien [eV]**

		IE <sub>1</sub>	IE <sub>2</sub>	IE <sub>3</sub>	IE <sub>4</sub>	IE <sub>5</sub>	IE <sub>6</sub>	IE <sub>7</sub>	IE <sub>8</sub>	IE <sub>9</sub>	IE <sub>10</sub>	IE <sub>11</sub>	IE <sub>12</sub>	IE <sub>13</sub>	IE <sub>14</sub>	IE <sub>15</sub>
1	H	13.6														
2	He	24.6	54.4													
3	Li	5.4	75.6	122.5												
4	Be	9.3	18.2	153.9	217.7											
5	B	8.3	25.2	37.9	259.4	340.2										
6	C	11.3	24.4	47.9	64.5	392.1	490.0									
7	N	14.5	29.6	47.4	77.5	97.9	552.1	667.0								
8	O	13.6	35.1	54.9	77.4	113.9	138.1	739.3	871.4							
9	F	17.4	35.0	62.7	87.1	114.2	157.2	185.2	953.9	1103.1						
10	Ne	21.6	41.0	63.5	97.1	126.2	157.9	207.3	239.1	1195.8	1362.2					
11	Na	5.1	47.3	71.6	98.9	138.4	172.2	208.5	264.3	299.9	1465.1	1648.7				
12	Mg	7.6	15.0	80.1	109.3	141.3	186.8	225.0	266.0	328.1	367.5	1761.8	1962.7			
13	Al	6.0	18.8	28.4	120.0	153.8	190.5	241.8	284.7	330.1	398.8	442.0	2086.0	2304.1		
14	Si	8.2	16.3	33.5	45.1	166.8	205.3	246.5	303.5	351.1	401.4	476.4	523.4	2437.6	2673.2	
15	P	10.5	19.8	30.2	51.4	65.0	220.4	263.6	309.6	372.1	424.4	479.5	560.8	611.7	2816.9	3069.8
16	S	10.4	23.3	34.8	47.2	72.6	88.1	280.9	328.8	379.6	447.5	504.8	564.4	652.2	707.0	3223.8
17	Cl	13.0	23.8	39.6	53.5	67.8	97.0	114.2	348.3	400.1	455.6	529.3	592.0	656.7	749.8	809.4
18	Ar	15.8	27.6	40.7	59.8	75.0	91.0	124.3	143.5	422.5	478.7	539	618.3	686.1	755.7	854.8
19	K	4.3	31.6	45.8	60.9	82.7	99.4	117.6	154.9	175.8	503.8	564.7	629.4	714.6	786.6	861.1
20	Ca	6.1	11.9	50.9	67.3	84.5	108.8	127.2	147.2	188.5	211.3	591.9	657.2	726.6	817.6	894.5

IE<sub>i</sub> : Ionisierungs-Energie, die für die Abspaltung des i. Elektrons aus der Atomhülle erforderlich ist.

**Elektronen-Affinitäten**

Elektronen-Empfänger	Elektronen-Affinität in eV	Elektronen-Empfänger	Elektronen-Affinität in eV	Elektronen-Empfänger	Elektronen-Affinität in eV
H	-0.7543	Si	-1.385	Co	-0.660
He	0	P→P <sup>-</sup>	-0.746	Ni	-1.156
Li	-0.6180	P <sup>-</sup> →P <sup>2-</sup>	4.85	Cu	-1.227
Be	0	P <sup>2-</sup> →P <sup>3-</sup>	9.183	Zn	0
B	-0.277	S→S <sup>-</sup>	-2.077	Br	-3.364
C	-1.595	S <sup>-</sup> →S <sup>2-</sup>	4.73	Ag	-1.302
N→N <sup>-</sup>	-0.07	Cl	-3.617	Pt	-2.128
N <sup>-</sup> →N <sup>2-</sup>	6.975	Ar	0	Au	-2.309
N <sup>2-</sup> →N <sup>3-</sup>	11.09	K	-0.5015	·OH → <sup>-</sup> OH	-1.83
O→O <sup>-</sup>	-1.4612	Ca	0	H <sub>3</sub> C·	- 0.1
O <sup>-</sup> → O <sup>2-</sup>	7.71	Sc	-0.188	H <sub>3</sub> CCH <sub>2</sub> · → C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> <sup>-</sup>	0.3
F	-3.40	Ti	-0.079	H <sub>2</sub> C=CH· → C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> <sup>-</sup>	- 0.667
Ne	0	V	-0.524	H <sub>2</sub> C=CHO·	-1.82
Na	-0.5480	Cr	-0.6660	H <sub>3</sub> CO·	-1.6
Mg	0	Mn	0	H <sub>2</sub> N·	-0.77
Al	-0.440	Fe	-0.163	HS·	-2.31

## Bindungs- und Verbrennungs-Enthalpien

Zur Spaltung der Bindungen muss  $\Delta H_{X-Y}$  mit **positivem** Vorzeichen (Energie-Aufwand), bei der Ausbildung mit **negativem** Vorzeichen (Energie-Freisetzung) verwendet werden. Normalerweise tabelliert man Werte mit negativem Vorzeichen, so dass einzelne ungebundene Atome den Referenzzustand mit Energie 0 darstellen.

Die tabellierten Werte sind Durchschnitts-Werte, die beträchtlich vom tatsächlichen Wert in einem gegebenen Molekül abweichen können.

### A. Bindungs-Enthalpien von Einfachbindungen in $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

	Br	C	Cl	F	H	I	N	O	P	S	Si
Br	-193	-285	-219	-249	-366	-178		-234	-264	-218	-325
C	-285	-348	-339	-489	-413	-218	-305	-358	-264	-272	-285
Cl	-219	-339	-242	-253	-431	-211	-192	-208	-322	-271	-397
F	-249	-489	-253	-159	-567	-280	-278	-193	-503	-327	-586
H	-366	-413	-431	-567	-436	-298	-391	-463	-323	-367	-318
I	-178	-218	-211	-280	-298	-151		-234	-184		-234
N		-305	-192	-278	-391		-163	-201			
O	-234	-358	-208	-193	-463	-234	-201	-146	-335		-451
P	-264	-264	-322	-503	-323	-184		-335	-172		
S	-218	-272	-271	-327	-367					-255	-293
Si	-325	-285	-397	-586	-318	-234		-451		-293	-176

### B. Bindungs-Enthalpien von Mehrfachbindungen in $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

C=C	-614	C≡N	-891	N=N	-418	O=O	-498
C≡C	-839	C=O	-745	N≡N	-945		
C=N	-615	C=S	-536	N=O	-607		

### C. Verbrennungs-Enthalpie organischer Stoffe

Die Verbrennungsenergie (Genauer: Verbrennungsenthalpie) von organischen Stoffen lässt sich aus der Anzahl schwach polar gebundener Bindungs-Elektronenpaare abschätzen (Elektronenpaare aus C-C, C=C, C≡C, C-H):

Bei vollständigen Verbrennungen werden rund 220 kJ Energie pro mol Bindungselektronenpaare in schwach polaren Bindungen frei (negatives Vorzeichen), also rund **440 kJ pro mol umgesetztes O<sub>2</sub>**.

### D. Energien zwischenmolekularer Kräfte (≠ Bindung!)

Das Brechen von Van der Waals-Wechselwirkungen kostet bei organischen Stoffen ganz grob 1 kJ/mol pro C-Atom, das Brechen von Wasserstoffbrücken WBR ganz grob 10 kJ/mol WBR.

## Gitter- und Hydratations-Enthalpien

### A. Gitter-Enthalpien ausgewählter Salze in $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

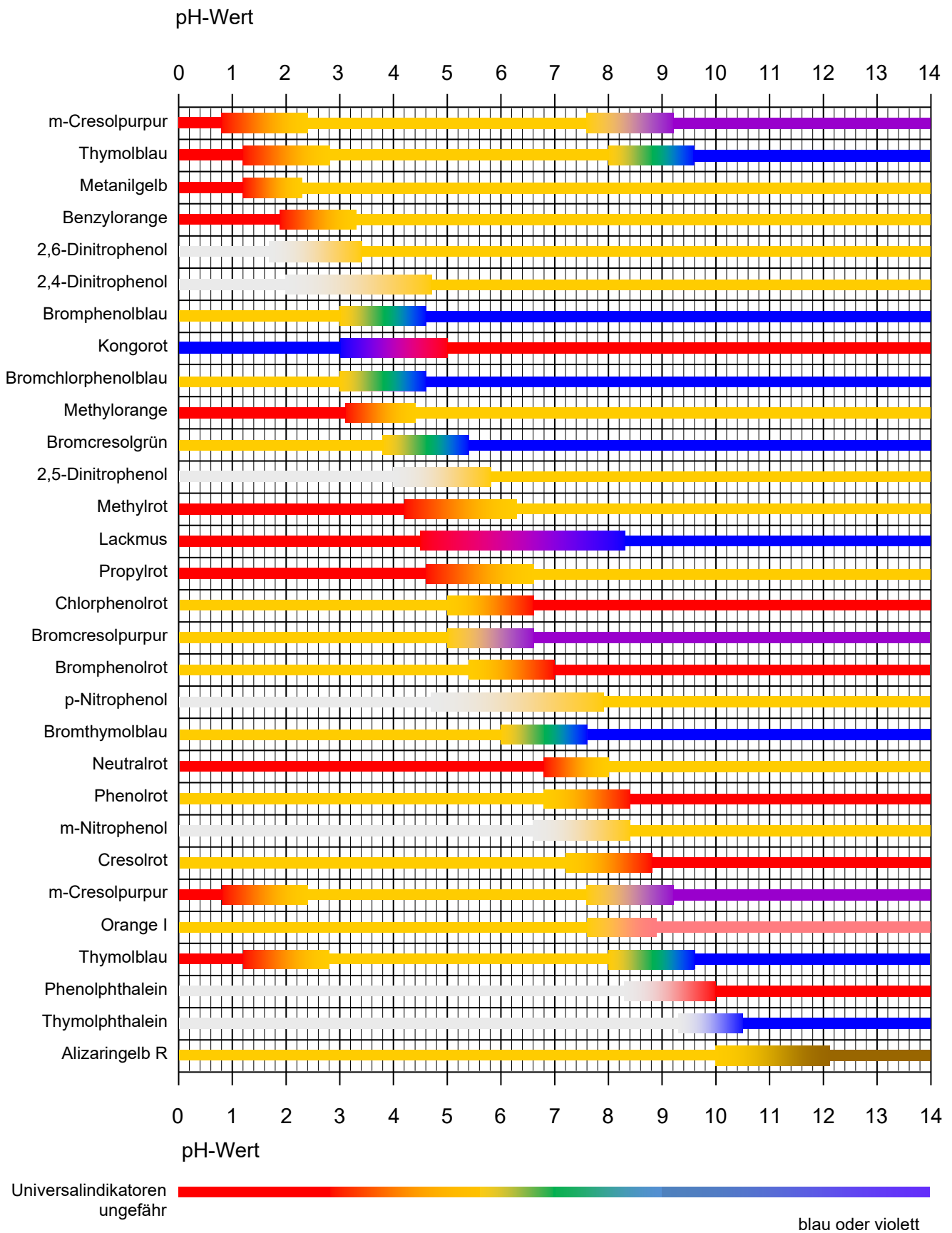
LiF	- 1'019	BeCl <sub>2</sub>	- 3017	SrO	- 3'217	Ni(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-2'447
LiCl	- 838	MgCl <sub>2</sub>	- 2'524	BaO	- 3'042	Cd(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-2'713
LiBr	- 798	CaF <sub>2</sub>	- 2'611	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	- 15'100	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	- 666
LiI	- 742	CaCl <sub>2</sub>	- 2'146	MgS	- 3'347	NaOH	- 887
NaF	- 926	CaBr <sub>2</sub>	- 2'025	CaS	- 3'084	KOH	- 790
NaCl	- 787	CaI <sub>2</sub>	- 1'920	BaS	- 2'707	Mg(OH) <sub>2</sub>	-3'006
KF	- 821	AlF <sub>3</sub>	- 5'210	Li <sub>2</sub> S	- 2'464	Ca(OH) <sub>2</sub>	- 2'637
KCl	- 703	AlBr <sub>3</sub>	- 5'356	Na <sub>2</sub> S	- 2'192	Fe(OH) <sub>2</sub>	- 3'044
KBr	- 689	Ca(CN) <sub>2</sub>	- 2'192	K <sub>2</sub> S	- 1'979	Cu(OH) <sub>2</sub>	- 3'229
KI	- 649	Zn(CN) <sub>2</sub>	- 2'769	Rb <sub>2</sub> S	- 1'929	Al(OH) <sub>3</sub>	-5'627
RbCl	- 665	Li <sub>2</sub> O	- 2'799	Cu <sub>2</sub> S	- 2'786	Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 2'142
CsCl	- 623	Na <sub>2</sub> O	- 2'481	NaHCO <sub>3</sub>	- 656	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 1'784
AgF	-969	K <sub>2</sub> O	- 2'238	K(CH <sub>3</sub> COO)	- 683	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 1'827
AgCl	-912	Rb <sub>2</sub> O	- 2'163	NH <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> COO)	- 700	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 1'700
AgI	- 886	MgO	- 3'929	KNO <sub>3</sub>	- 685	CaSO <sub>4</sub>	- 2'489
NH <sub>4</sub> Cl	- 734	CaO	- 3'477	AgNO <sub>3</sub>	-832	CuSO <sub>4</sub>	- 3'167

### B. Hydratations-Enthalpien ausgewählter Ionen in $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

Li <sup>+</sup>	- 508	Ca <sup>2+</sup>	- 1'577	Al <sup>3+</sup>	- 4'602	OH <sup>- (*)</sup>	- 364
Na <sup>+</sup>	- 398	Sr <sup>2+</sup>	- 1'431	Fe <sup>3+</sup>	- 4'485	CN <sup>-</sup>	- 349
K <sup>+</sup>	- 314	Ba <sup>2+</sup>	- 1'289			NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	- 255
Rb <sup>+</sup>	- 289	Mn <sup>2+</sup>	- 1'841	ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	- 238	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	- 370
Cs <sup>+</sup>	- 256	Fe <sup>2+</sup>	- 1'958	ClO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	- 350	NCO <sup>-</sup>	- 390
Ag <sup>+</sup>	- 468	Co <sup>2+</sup>	- 1'996	IO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	- 470	SCN <sup>-</sup>	- 280
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	- 293	Ni <sup>2+</sup>	- 2'105	BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	- 380	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	- 405
H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	- 1'084	Zn <sup>2+</sup>	- 2'054	F <sup>-</sup>	- 510	CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>	- 450
		Cu <sup>2+</sup>	- 2'100	Cl <sup>-</sup>	- 376		
Be <sup>2+</sup>	- 2'494	Cd <sup>2+</sup>	- 1'791	Br <sup>-</sup>	- 342	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	- 1100
Mg <sup>2+</sup>	- 1'908	Hg <sup>2+</sup>	- 1'820	I <sup>-</sup>	- 298		

Die Literaturangaben der Hydratationsenergien bzw. -Enthalpien variieren teils beträchtlich

# Umschlagbereiche von Säure/Base-Indikatoren





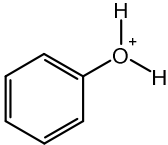
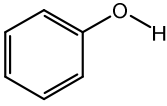
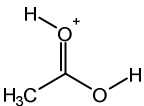
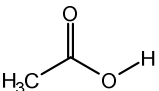
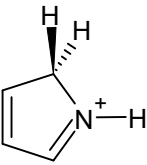
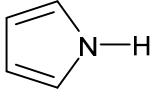
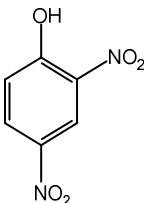
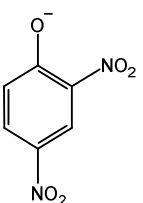
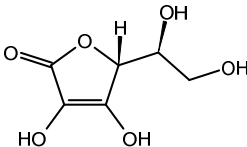
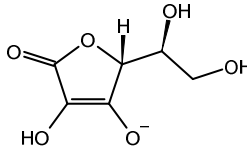
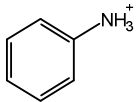
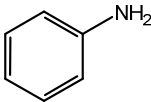
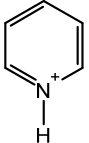
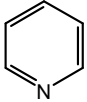
# Säure/Base-Reihe für wässrige Lösungen

pK <sub>s</sub>	K <sub>s</sub>	(konjugierte) Säure		⇌	(konjugierte) Base		K <sub>B</sub>	pK <sub>B</sub>
ca. -10	sehr gross	Iodwasserstoff	HI		I	Iodid-Ion	sehr klein	
ca. -10	sehr gross	Perchlorsäure	HClO <sub>4</sub>		ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Perchlorat-Ion	sehr klein	
ca. -7	sehr gross	Chlorwasserstoff	HCl		Cl <sup>-</sup>	Chlorid-Ion	sehr klein	
ca. -2.2	sehr gross	Methyloxonium-Ion	CH <sub>3</sub> OH <sub>2</sub> <sup>+</sup>		CH <sub>3</sub> OH	Methanol	sehr klein	
ca. -2	sehr gross	Schwefelsäure	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Hydrosulfat-Ion	sehr klein	
ca. -1.3	sehr gross	Salpetersäure	HNO <sub>3</sub>		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrat-Ion	sehr klein	
ca. -1	sehr gross	Chlorsäure	HClO <sub>3</sub>		ClO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Chlorat-Ion	sehr klein	
0	1.00	Hydroxonium-Ion	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>		H <sub>2</sub> O	Wasser	1.0 · 10 <sup>-14</sup>	14.00
0.52	3.0 · 10 <sup>-1</sup>	Trichloressigsäure	CCl <sub>3</sub> COOH		CCl <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>	Trichloracetat-Ion	3.3 · 10 <sup>-14</sup>	13.48
1.23	5.9 · 10 <sup>-2</sup>	Oxalsäure	HOOC-COOH		HOOC <sup>-</sup> COO <sup>-</sup>	Hydrogenoxalat-Ion	1.7 · 10 <sup>-13</sup>	12.77
1.92	1.2 · 10 <sup>-2</sup>	Hydrosulfat-Ion	HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sulfat-Ion	8.3 · 10 <sup>-13</sup>	12.08
1.94	1.1 · 10 <sup>-2</sup>	Chlorige Säure	HClO <sub>2</sub>		ClO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Chlorit-Ion	8.7 · 10 <sup>-13</sup>	12.06
1.96	1.1 · 10 <sup>-2</sup>	Schweflige Säure	H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>		HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Hydrosulfit-Ion	9.1 · 10 <sup>-13</sup>	12.04
1.96	1.1 · 10 <sup>-2</sup>	Phosphorsäure	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>		H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Dihydrogenphosphat-Ion	9.1 · 10 <sup>-13</sup>	12.04
2.20	6.3 · 10 <sup>-3</sup>	Hexaaqua-eisen(III)-Ion	[Fe(H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub> ] <sub>3</sub> <sup>+</sup>		[Fe(OH)(H <sub>2</sub> O) <sub>5</sub> ] <sub>2</sub> <sup>+</sup>	Pentaaqua-hydroxo-eisen(III)-Ion	1.6 · 10 <sup>-12</sup>	11.80
2.59	2.6 · 10 <sup>-3</sup>	Fluoressigsäure	CH <sub>2</sub> FCOOH		CH <sub>2</sub> FCOO <sup>-</sup>	Fluoracetat-Ion	3.9 · 10 <sup>-12</sup>	11.41
2.87	1.3 · 10 <sup>-3</sup>	Chloressigsäure	CH <sub>2</sub> ClCOOH		CH <sub>2</sub> ClCOO <sup>-</sup>	Chloracetat-Ion	7.4 · 10 <sup>-12</sup>	11.13
3.13	7.4 · 10 <sup>-4</sup>	Zitronensäure	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub>		C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> O <sub>7</sub> <sup>-</sup>	Dihydrogencitrat-Ion	1.3 · 10 <sup>-11</sup>	10.87
3.14	7.2 · 10 <sup>-4</sup>	Fluorwasserstoff	HF		F <sup>-</sup>	Fluorid-Ion	1.4 · 10 <sup>-11</sup>	10.86
3.37	4.3 · 10 <sup>-4</sup>	Salpetrige Säure	HNO <sub>2</sub>		NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Nitrit-Ion	2.3 · 10 <sup>-11</sup>	10.63
3.75	1.8 · 10 <sup>-4</sup>	Ameisensäure	HCOOH		HCOO <sup>-</sup>	Formiat-Ion	5.6 · 10 <sup>-11</sup>	10.25
3.86	1.4 · 10 <sup>-4</sup>	Milchsäure	CH <sub>3</sub> CHOHCOOH		CH <sub>3</sub> CHOHCOO <sup>-</sup>	Lactat-Ion	7.2 · 10 <sup>-11</sup>	10.14
4.19	6.5 · 10 <sup>-5</sup>	Hydrogenoxalat-Ion	HOOC <sup>-</sup> COO <sup>-</sup>		OOC <sup>-</sup> COO <sup>-</sup>	Oxalat-Ion	1.6 · 10 <sup>-10</sup>	9.81
4.19	6.5 · 10 <sup>-5</sup>	Benzoessäure	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> COOH		C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> COO <sup>-</sup>	Benzoat-Ion	1.6 · 10 <sup>-10</sup>	9.81
4.76	1.7 · 10 <sup>-5</sup>	Essigsäure	CH <sub>3</sub> COOH		CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>	Acetat-Ion	5.8 · 10 <sup>-10</sup>	9.24
4.76	1.7 · 10 <sup>-5</sup>	Dihydrogencitrat-Ion	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> O <sub>7</sub> <sup>-</sup>		C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup>	Hydrogencitrat-Ion	5.8 · 10 <sup>-10</sup>	9.24
4.8	1.6 · 10 <sup>-5</sup>	Hydroperoxyl-Radikal	HO <sub>2</sub> •		O <sub>2</sub> • <sup>-</sup>	Superoxid-Radikal (Anion)	6.31 · 10 <sup>-10</sup>	9.2
4.83	1.5 · 10 <sup>-5</sup>	Butansäure (Buttersäure)	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> COOH		C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> COO <sup>-</sup>	Butanoat-Ion (Butyrat-Ion)	6.8 · 10 <sup>-10</sup>	9.17
4.87	1.3 · 10 <sup>-5</sup>	Propansäure (Propion-S.)	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> COOH		C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> COO <sup>-</sup>	Propanoat-Ion (Propionat-Ion)	7.4 · 10 <sup>-10</sup>	9.13
4.90	1.3 · 10 <sup>-5</sup>	Hexaaqua-aluminium-Ion	[Al(H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub> ] <sub>3</sub> <sup>+</sup>		[Al(OH)(H <sub>2</sub> O) <sub>5</sub> ] <sub>2</sub> <sup>+</sup>	Pentaaqua-hydroxo-aluminium-Ion	7.9 · 10 <sup>-10</sup>	9.10
6.40	4.0 · 10 <sup>-7</sup>	Hydrogencitrat-Ion	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup>		C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sub>7</sub> <sup>3-</sup>	Citrat-Ion	2.5 · 10 <sup>-8</sup>	7.60
6.46	3.5 · 10 <sup>-7</sup>	Kohlensäure	H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> *		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Hydrogencarbonat-Ion	2.9 · 10 <sup>-8</sup>	7.54
7.06	8.7 · 10 <sup>-8</sup>	Schwefelwasserstoff	H <sub>2</sub> S		HS <sup>-</sup>	Hydrosulfid-Ion	1.2 · 10 <sup>-7</sup>	6.94
7.20	6.3 · 10 <sup>-8</sup>	Hydrosulfit-Ion	HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Sulfit-Ion	1.6 · 10 <sup>-7</sup>	6.80
7.21	6.1 · 10 <sup>-8</sup>	Dihydrogenphosphat-Ion	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>		HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Hydrogenphosphat-Ion	1.6 · 10 <sup>-7</sup>	6.79
7.4	4 · 10 <sup>-8</sup>	Unterchlorige Säure	HClO		ClO <sup>-</sup>	Hypochlorit-Ion	3 · 10 <sup>-7</sup>	6.6
9.21	6.2 · 10 <sup>-10</sup>	Ammonium-Ion	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		NH <sub>3</sub>	Ammoniak	1.6 · 10 <sup>-5</sup>	4.79
9.31	4.9 · 10 <sup>-10</sup>	Cyanwasserstoff	HCN		CN <sup>-</sup>	Cyanid-Ion	2.0 · 10 <sup>-5</sup>	4.69
9.66	2.2 · 10 <sup>-10</sup>	Hexaaqua-zink-Ion	[Zn(H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub> ] <sub>2</sub> <sup>+</sup>		[Zn(OH)(H <sub>2</sub> O) <sub>5</sub> ] <sub>2</sub> <sup>+</sup>	Pentaaqua-hydroxo-zink-Ion	4.6 · 10 <sup>-5</sup>	4.34
9.89	1.3 · 10 <sup>-10</sup>	Phenol	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH		C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sup>-</sup>	Phenolat-Ion	7.8 · 10 <sup>-5</sup>	4.11
10.40	4.0 · 10 <sup>-11</sup>	Hydrogencarbonat-Ion	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Carbonat-Ion	2.5 · 10 <sup>-4</sup>	3.60
11.62	2.4 · 10 <sup>-12</sup>	Wasserstoffperoxid	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		HO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Hydrogenperoxid-Ion	4.2 · 10 <sup>-3</sup>	2.38
12.32	4.8 · 10 <sup>-13</sup>	Hydrogenphosphat-Ion	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Phosphat-Ion	2.1 · 10 <sup>-2</sup>	1.68
12.90	1.3 · 10 <sup>-13</sup>	Hydrosulfid-Ion	HS <sup>-</sup>		S <sup>2-</sup>	Sulfid-Ion	7.9 · 10 <sup>-2</sup>	1.10
14.00	1.00 · 10 <sup>-14</sup>	Wasser	H <sub>2</sub> O		OH <sup>-</sup>	Hydroxid-Ion	1	0
15.54	sehr klein	Methanol	CH <sub>3</sub> OH		CH <sub>3</sub> O <sup>-</sup>	Methanolat-Ion	sehr gross	
ca. 25	sehr klein	Ethin	HCCH		HCC <sup>-</sup>	Hydrogenacetylid-Ion	sehr gross	
ca. 35	sehr klein	Wasserstoff	H <sub>2</sub>		H <sup>-</sup>	Hydrid-Ion	sehr gross	
ca. 36	sehr klein	Ammoniak	NH <sub>3</sub>		NH <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Amid-Ion	sehr gross	
ca. 36	sehr klein	Hydroxid-Ion	OH <sup>-</sup>		O <sup>2-</sup>	Oxid-Ion	sehr gross	

H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>\* umfasst eigentliches H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> plus gelöste CO<sub>2</sub>-Moleküle, CO<sub>2</sub>(aq)

Standard-Konzentrationen: H<sub>2</sub>O: 55.3 mol/L (Konzentration von reinem, flüssigen Wasser bei 25°C und Normdruck), alle anderen Spezies: 1 mol/L.

Ausgewählte pK<sub>s</sub>-Werte

pK <sub>s</sub>	Säure	$\rightleftharpoons$	Base	Säure/Base-Paar
-9	HBr		Br <sup>-</sup>	Bromwasserstoff Bromid
-7				Phenyloxonium Penol
-6				Protonierte Essigsäure Essigsäure
-3.8				Pyrrol-1-ium Pyrrol
-2	R—OH <sub>2</sub> <sup>+</sup>	R = Alkyl	R—OH	Alkyloxonium Alkohol
4.1				2,4-Dinitrophenol 2,4-Dinitrophenolat
4.25				Ascorbinsäure Ascorbat-Ion
4.6				Anilinium Anilin
ca. 5	R—COOH	R = Alkyl	R—COO <sup>-</sup>	Carbonsäure Carboxylat
5.2				Pyridinium Pyridin

6.			2,4,6-Trichlorphenol 2,4,6-Trichlorphenolat	
9			Pentan-2,4-dion 4-Oxopent-2-en-2-olat	
ca. 10		$R_1 = \text{Alkyl}$ $R_{2,3} = \text{H oder Alkyl}$	Trialkylammonium Trialkylamin	
10			Phenol Phenolat	
Ca. 11	$R-NH_3^+$	$R = \text{Alkyl}$	$R-NH_2$	Alkylammonium Alkylamin
15.5	$H_3C-OH$		$H_3C-O^-$	Methanol Methanolat
16	$CH_3CH_2-OH$		$CH_3CH_2-O^-$	Ethanol Ethanolat
16				Cyclopentadien Cyclopentadienid
16.5				Pyrrol Pyrrol-1-id
20				Propanon (Aceton) Propen-2-olat
36	$NH_3$		$NH_2^-$	Ammoniak Amid
37 bis 38		$R_1 = \text{Alkyl}$ $R_2 = \text{H oder Alkyl}$		Dialkylamin Dialkylamid
40	$CH_4$		$CH_3^-$	Methan Methanid
43				Benzen (Benzol) Benzenid
50	$H_3C-CH_3$		$H_3C-CH_2^-$	Ethan Ethanid

# Redox-Reihe mit Standard-Reduktionspotential $E^\circ$ für wässrige Lösungen

	Reduzierte Form (Red-Mittel)					Oxidierter Form (Ox-Mittel)				$E^\circ$ [V]
	Li				$\rightleftharpoons$	$\text{Li}^+$		+ 1 e <sup>-</sup>		- 3.04
	K				$\rightleftharpoons$	$\text{K}^+$		+ 1 e <sup>-</sup>		- 2.93
	Ca				$\rightleftharpoons$	$\text{Ca}^{2+}$		+ 2 e <sup>-</sup>		- 2.87
	Na				$\rightleftharpoons$	$\text{Na}^+$		+ 1 e <sup>-</sup>		- 2.71
	Mg				$\rightleftharpoons$	$\text{Mg}^{2+}$		+ 2 e <sup>-</sup>		- 2.37
(Dithionit)	Ce				$\rightleftharpoons$	$\text{Ce}^{3+}$		+ 3 e <sup>-</sup>		- 2.34
	Al	+	4	$\text{OH}^-$	$\rightleftharpoons$	$[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$		+ 3 e <sup>-</sup>		- 2.33
	Al				$\rightleftharpoons$	$\text{Al}^{3+}$		+ 3 e <sup>-</sup>		- 1.66
	Mn				$\rightleftharpoons$	$\text{Mn}^{2+}$		+ 2 e <sup>-</sup>		- 1.19
	$\text{S}_2\text{O}_4^{2-}$	+	4	$\text{OH}^-$	$\rightleftharpoons$	2 $\text{SO}_3^{2-}$	+	2 $\text{H}_2\text{O}$	+ 2 e <sup>-</sup>	- 1.12
(Thiosulfat)	$\text{HPO}_3^{2-}$	+	3	$\text{OH}^-$	$\rightleftharpoons$	$\text{PO}_4^{3-}$	+	2 $\text{H}_2\text{O}$	+ 2 e <sup>-</sup>	- 1.05
	$\text{SO}_3^{2-}$	+	2	$\text{OH}^-$	$\rightleftharpoons$	$\text{SO}_4^{2-}$	+	$\text{H}_2\text{O}$	+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.93
	2 $\text{OH}^-$	+		$\text{H}_2$	$\rightleftharpoons$	2 $\text{H}_2\text{O}$			+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.83
	Zn				$\rightleftharpoons$	$\text{Zn}^{2+}$			+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.76
	Au	+	2	$\text{CN}^-$	$\rightleftharpoons$	$[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$			+ e <sup>-</sup>	- 0.6
(Thiosulfat)	$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	+	6	$\text{OH}^-$	$\rightleftharpoons$	2 $\text{SO}_3^{2-}$	+	3 $\text{H}_2\text{O}$	+ 4 e <sup>-</sup>	- 0.57
	$\text{Fe}(\text{OH})_2$	+		$\text{OH}^-$	$\rightleftharpoons$	$\text{Fe}(\text{OH})_3$			+ 1 e <sup>-</sup>	- 0.56
	8 $\text{S}^{2-}$				$\rightleftharpoons$	$\text{S}_8$			+ 16 e <sup>-</sup>	- 0.48
	Fe				$\rightleftharpoons$	$\text{Fe}^{2+}$			+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.447
	Cd				$\rightleftharpoons$	$\text{Cd}^{2+}$			+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.40
	Pb	+		$\text{SO}_4^{2-}$	$\rightleftharpoons$	$\text{PbSO}_4$			+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.36
	$\text{H}_3\text{PO}_3$	+		$\text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons$	$\text{H}_3\text{PO}_4$	+	2 $\text{H}_3\text{O}^+$	+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.28
	Ni				$\rightleftharpoons$	$\text{Ni}^{2+}$			+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.26
	$\text{HCOOH}$				$\rightleftharpoons$	$\text{CO}_2 + 2 \text{H}^+$			+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.199
	Pb				$\rightleftharpoons$	$\text{Pb}^{2+}$			+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.13
(Thiosulfat)	$\text{NH}_3$	+	9	$\text{OH}^-$	$\rightleftharpoons$	$\text{NO}_3^-$	+	6 $\text{H}_2\text{O}$	+ 8 e <sup>-</sup>	- 0.12
	$\text{HO}_2^-$	+		$\text{OH}^-$	$\rightleftharpoons$	$\text{O}_2$	+	$\text{H}_2\text{O}$	+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.08
	2 $\text{H}_2\text{O}$	+		$\text{H}_2$	$\rightleftharpoons$	2 $\text{H}_3\text{O}^+$			+ 2 e <sup>-</sup>	0.00
	2 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$				$\rightleftharpoons$	$\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$			+ 2 e <sup>-</sup>	0.08
	$\text{Cu}^+$				$\rightleftharpoons$	$\text{Cu}^{2+}$			+ 1 e <sup>-</sup>	0.15
	2 $\text{NH}_4^+$	+	8	$\text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons$	$\text{N}_2$	+	8 $\text{H}_3\text{O}^+$	+ 6 e <sup>-</sup>	0.27
	Cu				$\rightleftharpoons$	$\text{Cu}^{2+}$			+ 2 e <sup>-</sup>	0.34
	$[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$				$\rightleftharpoons$	$[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$			+ 1 e <sup>-</sup>	0.36
	4 $\text{OH}^-$				$\rightleftharpoons$	$\text{O}_2$	+	2 $\text{H}_2\text{O}$	+ 4 e <sup>-</sup>	0.40
	2 $\text{I}^-$				$\rightleftharpoons$	$\text{I}_2$			+ 2 e <sup>-</sup>	0.54
#1 Benzochinon/Chinon	$\text{MnO}_4^{2-}$				$\rightleftharpoons$	$\text{MnO}_4^-$			+ 1 e <sup>-</sup>	0.56
	$\text{MnO}_2$	+	4	$\text{OH}^-$	$\rightleftharpoons$	$\text{MnO}_4^-$	+	2 $\text{H}_2\text{O}$	+ 3 e <sup>-</sup>	0.60
	$\text{H}_2\text{Q} + 2 \text{H}_2\text{O}$				$\rightleftharpoons$	$\text{Q} (\text{C}_6\text{H}_4\text{O}_2) +$	2 $\text{H}_3\text{O}^+$		+ 2 e <sup>-</sup>	0.6996
	$\text{H}_2\text{O}_2$	+	2	$\text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons$	$\text{O}_2$	+	2 $\text{H}_3\text{O}^+$	+ 2 e <sup>-</sup>	0.70
	$\text{Fe}^{2+}$				$\rightleftharpoons$	$\text{Fe}^{3+}$			+ 1 e <sup>-</sup>	0.771
#2 (Quarz)	Ag				$\rightleftharpoons$	$\text{Ag}^+$			+ 1 e <sup>-</sup>	0.80
	$\text{NO}_2$	+	3	$\text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons$	$\text{NO}_3^-$	+	2 $\text{H}_3\text{O}^+$	+ 1 e <sup>-</sup>	0.80
	$\text{Cl}^-$	+	2	$\text{OH}^-$	$\rightleftharpoons$	$\text{ClO}^-$	+	$\text{H}_2\text{O}$	+ 2 e <sup>-</sup>	0.81
	Hg				$\rightleftharpoons$	$\text{Hg}^{2+}$			+ 2 e <sup>-</sup>	0.85
	Si	+	6	$\text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons$	$\text{SiO}_2$	+	4 $\text{H}_3\text{O}^+$	+ 4 e <sup>-</sup>	0.86
#2	$\text{NH}_4^+$	+	13	$\text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons$	$\text{NO}_3^-$	+	10 $\text{H}_3\text{O}^+$	+ 8 e <sup>-</sup>	0.87
	NO	+	6	$\text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons$	$\text{NO}_3^-$	+	4 $\text{H}_3\text{O}^+$	+ 3 e <sup>-</sup>	0.96
	Au	+	4	$\text{Cl}^-$	$\rightleftharpoons$	$[\text{AuCl}_4]^-$			+ 3 e <sup>-</sup>	1.00
	NO	+	3	$\text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons$	$\text{NO}_2$	+	2 $\text{H}_3\text{O}^+$	+ 2 e <sup>-</sup>	1.04
	2 $\text{Br}^-$				$\rightleftharpoons$	$\text{Br}_2$			+ 2 e <sup>-</sup>	1.09
	Pt				$\rightleftharpoons$	$\text{Pt}^{2+}$			+ 2 e <sup>-</sup>	1.18
	$\text{Mn}^{2+}$	+	6	$\text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons$	$\text{MnO}_2$	+	4 $\text{H}_3\text{O}^+$	+ 2 e <sup>-</sup>	1.22
	6 $\text{H}_2\text{O}$				$\rightleftharpoons$	$\text{O}_2$	+	4 $\text{H}_3\text{O}^+$	+ 4 e <sup>-</sup>	1.23
	2 $\text{Cr}^{3+}$	+	21	$\text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons$	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$	+	14 $\text{H}_3\text{O}^+$	+ 6 e <sup>-</sup>	1.232
	$\text{Cr}^{3+}$	+	11	$\text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons$	$\text{HCrO}_4^-$	+	7 $\text{H}_3\text{O}^+$	+ 3 e <sup>-</sup>	1.350
	2 $\text{Cl}^-$				$\rightleftharpoons$	$\text{Cl}_2$			+ 2 e <sup>-</sup>	1.36
	$\text{Cl}^-$	+	9	$\text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons$	$\text{ClO}_3^-$	+	6 $\text{H}_3\text{O}^+$	+ 6 e <sup>-</sup>	1.451
	Au				$\rightleftharpoons$	$\text{Au}^{3+}$			+ 3 e <sup>-</sup>	1.50
	$\text{Mn}^{2+}$	+	12	$\text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons$	$\text{MnO}_4^-$	+	8 $\text{H}_3\text{O}^+$	+ 5 e <sup>-</sup>	1.51
	$\text{Mn}^{2+}$				$\rightleftharpoons$	$\text{Mn}^{3+}$			+ 1 e <sup>-</sup>	1.54
	$\text{PbSO}_4$	+	6	$\text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons$	$\text{PbO}_2$	+	$\text{SO}_4^{2-} + 4 \text{H}_3\text{O}^+$	+ 2 e <sup>-</sup>	1.69
	Au				$\rightleftharpoons$	$\text{Au}^+$			+ 1 e <sup>-</sup>	1.69
	$\text{Ce}^{3+}$				$\rightleftharpoons$	$\text{Ce}^{4+}$			+ 1 e <sup>-</sup>	1.72
	4 $\text{H}_2\text{O}$				$\rightleftharpoons$	$\text{H}_2\text{O}_2$	+	2 $\text{H}_3\text{O}^+$	+ 2 e <sup>-</sup>	1.78
	$\text{O}_2$	+	3	$\text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons$	$\text{O}_3$	+	2 $\text{H}_3\text{O}^+$	+ 2 e <sup>-</sup>	2.08
	2 $\text{HSO}_4^-$	+	2	$\text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons$	$\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$	+	2 $\text{H}_3\text{O}^+$	+ 2 e <sup>-</sup>	2.12
	2 $\text{F}^-$				$\rightleftharpoons$	$\text{F}_2$			+ 2 e <sup>-</sup>	2.87

#1  $\text{MnO}_4^{2-}$  ist nur in alkalischem Milieu beständig; #2 „ $\text{NO}_2$ “ steht für ein Gleichgewicht aus  $\text{N}_2\text{O}_4$  und  $\text{NO}_2$

Standard-Konzentrationen wie üblich mol/L (Lösungen), atm (Gase) oder 1 (feste oder flüssige Stoffe in eigener Phase).

# Midpoint-Redox-Potentiale für wässrige Lösungen bei pH 7 (oder damit im Gleichgewicht)

Reduzierte Form (RedM)				Oxidierte Form (OxM)	E°' [V]		
#3	P700* (Photosystem I, angeregt)		↔	P700 <sup>+</sup>		+ 1 e <sup>-</sup>	- 1.1
	P680* (Photosystem II, angeregt)		↔	P680 <sup>+</sup>		+ 1 e <sup>-</sup>	- 0.72
	Glucose		↔	2 C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> O <sub>3</sub> <sup>-</sup> (Pyruvat)	+ 6 H <sup>+</sup> (aq)	+ 4 e <sup>-</sup>	- 0.712
#3	C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> O <sub>3</sub> <sup>-</sup> (Pyruvat) + H <sub>2</sub> O		↔	CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup> (Acetat)	+ CO <sub>2</sub>	+ 2 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>
	α-Ketoglutarat (C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>5</sub> <sup>2-</sup> ) + H <sub>2</sub> O		↔	Succinat (C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	+ CO <sub>2</sub>	+ 2 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>
#3	CH <sub>3</sub> CHO (Ethanal) + 1 H <sub>2</sub> O		↔	CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>	+ 3 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.581
	HCOO <sup>-</sup>		↔	CO <sub>2</sub> (g)	+	H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>
	C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> O <sub>3</sub> <sup>-</sup> (Pyruvat) + CoA		↔	AcetylCoA	+ CO <sub>2</sub>	+	H <sup>+</sup> (aq)
	CH <sub>2</sub> O + H <sub>2</sub> O		↔	CO <sub>2</sub> (g)	+ 4 H <sup>+</sup> (aq)	+ 4 e <sup>-</sup>	- 0.485
	CH <sub>2</sub> O + H <sub>2</sub> O		↔	HCOO <sup>-</sup>	+ 3 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.454
	Glucose + 6 H <sub>2</sub> O		↔	6 CO <sub>2</sub> (g)	+ 24 H <sup>+</sup> (aq)	+ 24 e <sup>-</sup>	- 0.434
	Glucose + H <sub>2</sub> O		↔	Gluconat	+ 3 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.45
	Transferrin mit Fe <sup>2+</sup>		↔	Transferrin mit Fe <sup>3+</sup>		+ 1 e <sup>-</sup>	- 0.40
#3	H <sub>2</sub>		↔	2 H <sup>+</sup>		+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.421
	C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> O <sub>3</sub> <sup>-</sup> (Pyruvat) + 3 H <sub>2</sub> O		↔	3 CO <sub>2</sub>	+ 9 H <sup>+</sup> (aq)	+ 10 e <sup>-</sup>	- 0.379
	3-Hydroxybutansäure		↔	3-Oxobutansäure (Acetessigs.)	+ 2 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.346
	2 Cystein (-SH)		↔	Cystin (-S-S-)	+ 2 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.340
	O <sub>2</sub> <sup>-•</sup> (Superoxid Radikal)		↔	O <sub>2</sub>		+ 1 e <sup>-</sup>	- 0.33
	NADPH		↔	NADP <sup>+</sup>	+	H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>
	NADH		↔	NAD <sup>+</sup>	+	H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>
	Dihydroliponsäure		↔	Liponsäure (-S-S-)	+ 2 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.29
	CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup> (Acetat) + 4 H <sub>2</sub> O		↔	2 HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	+ 9 H <sup>+</sup> (aq)	+ 8 e <sup>-</sup>	- 0.288
	2 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		↔	N <sub>2</sub> (g)	+ 8 H <sup>+</sup> (aq)	+ 6 e <sup>-</sup>	- 0.28
	CH <sub>4</sub> (g) + 2 H <sub>2</sub> O		↔	CO <sub>2</sub> (g)	+ 8 H <sup>+</sup> (aq)	+ 8 e <sup>-</sup>	- 0.244
#5	8 H <sub>2</sub> S (g)		↔	S <sub>8</sub>	+ 16 H <sup>+</sup> (aq)	+ 16 e <sup>-</sup>	- 0.24
	2 GSH (Glutathion red)		↔	GSSG (Glutathion ox)	+ 2 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.23
	Ferredoxin (red, Fe <sup>2+</sup> )		↔	Ferredoxin (ox, Fe <sup>3+</sup> )		+ 1 e <sup>-</sup>	- 0.22
	HS <sup>-</sup> + 4 H <sub>2</sub> O		↔	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	+ 9 H <sup>+</sup> (aq)	+ 8 e <sup>-</sup>	- 0.22
	FADH <sub>2</sub> (frei)		↔	FAD	+ 2 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.219
#3	H <sub>2</sub> S (g) + 4 H <sub>2</sub> O		↔	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	+ 10 H <sup>+</sup> (aq)	+ 8 e <sup>-</sup>	- 0.21
	Ethanol		↔	Ethanal (Acetaldehyd)	+ 2 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.197
	S <sub>8</sub> (s) + 32 H <sub>2</sub> O		↔	8 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	+ 64 H <sup>+</sup> (aq)	+ 48 e <sup>-</sup>	- 0.195
	C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> O <sub>3</sub> <sup>-</sup> Lactat		↔	C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> O <sub>3</sub> <sup>-</sup> (Pyruvat)	+ 2 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.192
	Ferritin mit Fe <sup>2+</sup>		↔	Ferritin mit Fe <sup>3+</sup>		+ 1 e <sup>-</sup>	- 0.19
#3	CH <sub>3</sub> OH		↔	CH <sub>2</sub> O	+ 2 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.178
	Malat <sup>2-</sup>		↔	Oxaloacetat <sup>2-</sup>	+ 2 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.166
	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> COO <sup>-</sup> (Propionat) + H <sub>2</sub> O		↔	C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> O <sub>3</sub> <sup>-</sup> (Pyruvat)	+ 4 H <sup>+</sup> (aq)	+ 4 e <sup>-</sup>	- 0.111
	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH (Ethanol) + CO <sub>2</sub>		↔	C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> O <sub>3</sub> <sup>-</sup> (Pyruvat)	+ 3 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.100
	Fe <sup>2+</sup> + 3 H <sub>2</sub> O		↔	Fe(OH) <sub>3</sub> (s)	+ 3 H <sup>+</sup> (aq)	+ 1 e <sup>-</sup>	- 0.059
	FeCO <sub>3</sub> (s) + 2 H <sub>2</sub> O		↔	FeOOH (s) + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	+ 2 H <sup>+</sup> (aq)	+ 1 e <sup>-</sup>	- 0.047
	FADH <sub>2</sub> (in Flavoproteinen)		↔	FAD	+ 2 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	- 0.040
	CH <sub>4</sub> (g) + H <sub>2</sub> O		↔	CH <sub>2</sub> O	+ 4 H <sup>+</sup> (aq)	+ 4 e <sup>-</sup>	- 0.0035
	Plastochinol		↔	Plastochinon	+ 2 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	0.0
	Methylenblau (farblos)		↔	Methylenblau (blau)	+ 2 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	0.01
#3	Succinat <sup>2-</sup>		↔	Fumarat <sup>2-</sup>	+ 2 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	0.031
	Ubichinol		↔	Ubichinon	+ 2 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	0.05
	Ascorbat		↔	Dehydroascorbat	+ 2 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	0.08
	CH <sub>4</sub> (g) + H <sub>2</sub> O		↔	CH <sub>3</sub> OH	+ 2 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	0.170
	HAscorbat		↔	Ascorbat <sup>-</sup> (Ascorbyl-Radikal)	+	H <sup>+</sup> (aq)	+ 1 e <sup>-</sup>
#4	Cytochrom c (red, Fe <sup>2+</sup> )		↔	Cytochrom c (ox, Fe <sup>3+</sup> )		+ 1 e <sup>-</sup>	0.235
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		↔	O <sub>2</sub>	+ 2 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	0.29
	H <sub>2</sub> O + OH <sup>•</sup> (Hydroxyl Radikal)		↔	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	+	H <sup>+</sup> (aq)	+ 1 e <sup>-</sup>
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + 2 H <sub>2</sub> O		↔	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	+ 8 H <sup>+</sup> (aq)	+ 6 e <sup>-</sup>	0.34
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + 3 H <sub>2</sub> O		↔	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	+ 10 H <sup>+</sup> (aq)	+ 8 e <sup>-</sup>	0.36
#6	P700 (Photosystem I)		↔	P700 <sup>+</sup>		+ 1 e <sup>-</sup>	0.49
	MnCO <sub>3</sub> (s) + 2 H <sub>2</sub> O		↔	MnO <sub>2</sub> (s) + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	+ 3 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	0.526
	Mn <sup>2+</sup> + 2 H <sub>2</sub> O		↔	MnO <sub>2</sub> (s)	+ 4 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	0.58
	Cytochrom c Oxidase (red)		↔	Cytochrom c Oxidase (ox)		+ 1 e <sup>-</sup>	0.58
	N <sub>2</sub> (g) + 6 H <sub>2</sub> O		↔	2 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	+ 12 H <sup>+</sup> (aq)	+ 10 e <sup>-</sup>	0.75
#6	N <sub>2</sub> O (g) + 3 H <sub>2</sub> O		↔	2 NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	+ 6 H <sup>+</sup> (aq)	+ 4 e <sup>-</sup>	0.77
	2 H <sub>2</sub> O		↔	O <sub>2</sub>	+ 4 H <sup>+</sup> (aq)	+ 4 e <sup>-</sup>	0.815
	RS <sup>-</sup> (Cystein)		↔	RS <sup>•</sup>		+ 1 e <sup>-</sup>	0.92
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		↔	O <sub>2</sub> <sup>-•</sup> (Superoxid-Radikal)	+ 2 H <sup>+</sup> (aq)	+ 1 e <sup>-</sup>	0.96
	P680 (Photosystem II)		↔	P680 <sup>+</sup>		+ 1 e <sup>-</sup>	1.1
	2 H <sub>2</sub> O		↔	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	+ 2 H <sup>+</sup>	+ 2 e <sup>-</sup>	1.32
	N <sub>2</sub> (g) + H <sub>2</sub> O		↔	N <sub>2</sub> O (g)	+ 2 H <sup>+</sup> (aq)	+ 2 e <sup>-</sup>	1.35
	H <sub>2</sub> O		↔	OH <sup>•</sup> (Hydroxyl-Radikal)	+	H <sup>+</sup> (aq)	+ 1 e <sup>-</sup>

E°': Standard-Reduktionspotential (Midpoint Redox Potential) bei neutralem pH (physiologische Bedingungen). Standard-Konzentrationen: wie Standard-Reduktions-Potential, ausser [H<sup>+</sup>(aq)] = [H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>] = [OH<sup>-</sup>] = 10<sup>-7</sup> mol/L  
#3 Ionenstärke = 0.25 mol/L; #4 Standard-Konzentrationen: [HCO<sub>3</sub>]<sub>s</sub> = 10<sup>-3</sup> mol/L, [Mn<sup>2+</sup>]<sub>s</sub> = [Fe<sup>2+</sup>]<sub>s</sub> = 10<sup>-6</sup> mol/L (typische Umweltkonzentration)  
#5 Es gibt verschiedene Ferredoxine mit Potentialen bis zu E°' = -0.420. #6 Freies Chlorophyll: Chl<sup>+</sup> ⇌ Chl: E°' = 0.78 V

# Löslichkeitsprodukte $K_L$ schwerlöslicher Salze bei 25°C

$\text{Ag}_3\text{AsO}_4$	$1.03 \cdot 10^{-22}$	[1]	$\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$2.32 \cdot 10^{-9}$	[1]
$\text{AgBr}$	$5.35 \cdot 10^{-13}$	[1]	$\text{CaCrO}_4$	$7.1 \cdot 10^{-4}$	[2]
$\text{AgBrO}_3$	$5.38 \cdot 10^{-5}$	[1]	$\text{CaF}_2$	$3.45 \cdot 10^{-11}$	[1]
$\text{AgCH}_3\text{COO}$	$1.94 \cdot 10^{-3}$	[1]	$\text{Ca}(\text{IO}_3)_2$	$6.47 \cdot 10^{-6}$	[1]
$\text{AgCN}$	$5.97 \cdot 10^{-17}$	[1]	$\text{Ca}(\text{IO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	$7.10 \cdot 10^{-7}$	[1]
$\text{Ag}_2\text{C}_2\text{O}_4$	$5.40 \cdot 10^{-12}$	[1]	$\text{CaMoO}_4$	$1.46 \cdot 10^{-8}$	[1]
$\text{Ag}_2\text{CO}_3$	$8.46 \cdot 10^{-12}$	[1]	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	$5.02 \cdot 10^{-6}$	[1]
$\text{AgCl}$	$1.77 \cdot 10^{-10}$	[1]	$\text{CaHPO}_4$	$1.26 \cdot 10^{-19}$	[7]
$\text{Ag}_2\text{CrO}_4$	$1.12 \cdot 10^{-12}$	[1]	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$	$10^{-114}$	(3) [6]
$\text{Ag}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	$2.0 \cdot 10^{-7}$	[4]	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$	$10^{-118}$	[6]
$\text{Ag}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$	$1.6 \cdot 10^{-41}$	[2]	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	$1.0 \cdot 10^{-3}$	[2]
$\text{AgIO}_3$	$3.17 \cdot 10^{-8}$	[1]	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	$2.07 \cdot 10^{-33}$	[1]
$\text{AgI}$	$8.52 \cdot 10^{-17}$	[1]	$\text{Ca}_4(\text{HPO}_4)(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$1.25 \cdot 10^{-47}$	[6]
$\text{Ag}_2\text{O} (2 \text{Ag}^+ + 2 \text{OH}^-)$	$4.0 \cdot 10^{-16}$	[1b]	$\text{CaSO}_3 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	$1.3 \cdot 10^{-8}$	[2]
$\text{Ag}_3\text{PO}_4$	$8.89 \cdot 10^{-17}$	[1]	$\text{CaSO}_4$	$4.93 \cdot 10^{-5}$	[1]
$\text{Ag}_2\text{SO}_4$	$1.20 \cdot 10^{-5}$	[1]	$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O} (\text{Gips})$	$3.14 \cdot 10^{-5}$	[1]
$\text{Ag}_2\text{SO}_3$	$1.50 \cdot 10^{-14}$	[1]	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} (\text{Anhydrit})$	$3.1 \cdot 10^{-7}$	[1]
$\text{AgSCN}$	$1.03 \cdot 10^{-12}$	[1]	$\text{Cd}_3(\text{AsO}_4)_2$	$2.2 \cdot 10^{-33}$	[1]
$\text{Ag}_2\text{S}$	$1.0 \cdot 10^{-49}$	(2) [2]	$\text{CdCO}_3$	$1.0 \cdot 10^{-10}$	[1]
$\text{AlAsO}_4$	$1.6 \cdot 10^{-16}$	[2]	$\text{CdC}_2\text{O}_4 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$	$1.42 \cdot 10^{-8}$	[1]
$\text{Al}(\text{OH})_3$	$1.9 \cdot 10^{-33}$	[2]	$\text{Cd}(\text{CN})_2$	$1.0 \cdot 10^{-8}$	[2]
$\text{AlPO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	$9.84 \cdot 10^{-21}$	[1]	$\text{CdF}_2$	$6.44 \cdot 10^{-3}$	[1]
$\text{AlCa}(\text{HPO}_4)(\text{PO}_4)$	$10^{-39}$	[6]	$\text{Cd}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$	$3.2 \cdot 10^{-17}$	[2]
$\text{AuBr}$	$5.0 \cdot 10^{-17}$	[2]	$\text{Cd}(\text{IO}_3)_2$	$2.5 \cdot 10^{-8}$	[1]
$\text{AuCl}$	$2.0 \cdot 10^{-13}$	[3]	$\text{Cd}(\text{OH})_2$	$7.2 \cdot 10^{-15}$	[1]
$\text{AuI}$	$1.6 \cdot 10^{-23}$	[2]	$\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$	$2.53 \cdot 10^{-33}$	[1]
$\text{AuBr}_3$	$4.0 \cdot 10^{-36}$	[2]	$\text{CdS}$	$8 \cdot 10^{-28}$	(2) [3]
$\text{AuCl}_3$	$3.2 \cdot 10^{-25}$	[2]	$\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2$	$6.8 \cdot 10^{-29}$	[1]
$\text{Au}(\text{OH})_3$	$1 \cdot 10^{-53}$	[2]	$\text{CoCO}_3$	$8.0 \cdot 10^{-13}$	[2]
$\text{AuI}_3$	$1.0 \cdot 10^{-46}$	[2]	$\text{Co}(\text{IO}_3)_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	$1.21 \cdot 10^{-2}$	[1]
$\text{Ba}_3(\text{AsO}_4)_2$	$1.1 \cdot 10^{-13}$	[2]	$\text{Co}(\text{OH})_2 (\text{blau})$	$5.92 \cdot 10^{-15}$	[1]
$\text{Ba}(\text{BrO}_3)_2$	$2.43 \cdot 10^{-4}$	[1]	$\text{Co}_3(\text{PO}_4)_2$	$2.05 \cdot 10^{-35}$	[1]
$\text{BaCO}_3$	$2.58 \cdot 10^{-9}$	[1]	$\text{CoS} (\alpha)$	$5.9 \cdot 10^{-21}$	(2) [2]
$\text{BaC}_2\text{O}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	$1.1 \cdot 10^{-7}$	[2]	$\text{Co}(\text{OH})_3$	$4.0 \cdot 10^{-45}$	[2]
$\text{BaCrO}_4$	$1.17 \cdot 10^{-10}$	[1]	$\text{CrAsO}_4$	$7.8 \cdot 10^{-21}$	[2]
$\text{BaF}_2$	$1.84 \cdot 10^{-7}$	[1]	$\text{Cr}(\text{OH})_3$	$6.7 \cdot 10^{-31}$	[2]
$\text{Ba}(\text{IO}_3)_2$	$4.01 \cdot 10^{-9}$	[1]	$\text{CrPO}_4$	$2.4 \cdot 10^{-23}$	[2]
$\text{Ba}(\text{IO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$1.67 \cdot 10^{-9}$	[1]	$\text{CuBr}$	$6.27 \cdot 10^{-9}$	[1]
$\text{BaMoO}_4$	$3.54 \cdot 10^{-8}$	[1]	$\text{CuCl}$	$1.72 \cdot 10^{-7}$	[1]
$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	$4.64 \cdot 10^{-3}$	[1]	$\text{CuCN}$	$3.47 \cdot 10^{-20}$	[1]
$\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$	$2.55 \cdot 10^{-4}$	[1]	$\text{CuI}$	$1.27 \cdot 10^{-12}$	[1]
$\text{Ba}_3(\text{PO}_4)_2$	$1.3 \cdot 10^{-29}$	[2]	$\text{Cu}_2\text{O} (\text{Cu}^+ \text{ und } \text{OH}^-)$	$2.0 \cdot 10^{-30}$	(1) [1b]
$\text{BaSO}_4$	$1.08 \cdot 10^{-10}$	[1]	$\text{CuSCN}$	$1.77 \cdot 10^{-13}$	[1]
$\text{BaSO}_3$	$5.0 \cdot 10^{-10}$	[1]	$\text{Cu}_2\text{S} (\text{Cu}^+, \text{HS}^-, \text{OH}^-)$	$1.6 \cdot 10^{-48}$	(2) [2]
$\text{BaSeO}_4$	$3.40 \cdot 10^{-8}$	[1]	$\text{Cu}_3(\text{AsO}_4)_2$	$7.95 \cdot 10^{-36}$	[1]
$\text{Be}(\text{OH})_2$	$6.92 \cdot 10^{-22}$	[1]	$\text{CuCO}_3$	$2.5 \cdot 10^{-10}$	[2]
$\text{BiAsO}_4$	$4.43 \cdot 10^{-10}$	[1]	$\text{CuC}_2\text{O}_4$	$4.43 \cdot 10^{-10}$	[1]
$\text{BiI}_3$	$7.71 \cdot 10^{-19}$	[1]	$\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$	$1.3 \cdot 10^{-16}$	[2]
$\text{BiOCl}$	$7.0 \cdot 10^{-9}$	[2]	$\text{Cu}(\text{IO}_3)_2 \cdot 1 \text{H}_2\text{O}$	$6.94 \cdot 10^{-8}$	[1]
$\text{BiO}(\text{OH})$	$1.0 \cdot 10^{-12}$	(1) [2]	$\text{Cu}(\text{OH})_2$	$1.6 \cdot 10^{-19}$	[2]
$\text{Bi}(\text{OH})_3$	$3.2 \cdot 10^{-40}$	[2]	$\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$	$1.40 \cdot 10^{-37}$	[1]
$\text{BiPO}_4$	$1.3 \cdot 10^{-23}$	[2]	$\text{CuS} (\text{Cu}^{2+}, \text{HS}^-, \text{OH}^-)$	$7.9 \cdot 10^{-37}$	(2) [2]
$\text{Bi}_2\text{S}_3$	$1.6 \cdot 10^{-72}$	(2) [2]	$\text{FeCO}_3$	$3.13 \cdot 10^{-11}$	[1]
$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$	$6.8 \cdot 10^{-19}$	[2]	$\text{FeC}_2\text{O}_4$	$2.0 \cdot 10^{-7}$	[4]
$\text{CaCO}_3 (\text{Calzit})$	$3.36 \cdot 10^{-9}$	[1]	$\text{FeF}_2$	$2.36 \cdot 10^{-6}$	[1]

Fe(OH) <sub>2</sub>	$4.87 \cdot 10^{-17}$	[1]
FeS (Fe <sup>2+</sup> , HS <sup>-</sup> , OH <sup>-</sup> )	$6 \cdot 10^{-19}$	(2) [3]
Fe <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O (Vivianit)	$1.7 \cdot 10^{-36}$	[5]
FeF <sub>3</sub>	$1.1 \cdot 10^{-7}$	[1]
Fe(OH) <sub>3</sub>	$2.79 \cdot 10^{-39}$	[1]
FePO <sub>4</sub> ·2 H <sub>2</sub> O (Strengit)	$9.91 \cdot 10^{-16}$	[1]
Fe <sub>2</sub> S <sub>3</sub> (Fe <sup>3+</sup> , HS <sup>-</sup> , OH <sup>-</sup> )	$1.4 \cdot 10^{-88}$	(2) [2]
Fe <sub>4</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ] <sub>3</sub>	$3.0 \cdot 10^{-41}$	[2]
Hg <sub>2</sub> Br <sub>2</sub> (Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup> )	$6.40 \cdot 10^{-23}$	[1]
Hg <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	$3.6 \cdot 10^{-17}$	[1]
Hg <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	$1.75 \cdot 10^{-13}$	[1]
Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	$1.43 \cdot 10^{-18}$	[1]
Hg <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	$5.0 \cdot 10^{-9}$	[2]
Hg <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	$3.10 \cdot 10^{-6}$	[1]
Hg <sub>2</sub> I <sub>2</sub>	$5.2 \cdot 10^{-29}$	[1]
Hg <sub>2</sub> O·H <sub>2</sub> O (Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup> , OH <sup>-</sup> )	$1.6 \cdot 10^{-23}$	(1) [2]
Hg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	$6.5 \cdot 10^{-7}$	[1]
Hg <sub>2</sub> (SCN) <sub>2</sub>	$3.2 \cdot 10^{-20}$	[1]
HgBr <sub>2</sub>	$6.2 \cdot 10^{-20}$	[1]
Hg(CN) <sub>2</sub>	$3.0 \cdot 10^{-23}$	[2]
HgI <sub>2</sub>	$2.9 \cdot 10^{-29}$	[1]
Hg(OH) <sub>2</sub>	$2.5 \cdot 10^{-26}$	[2]
HgS (rot, Zinnober)	$4 \cdot 10^{-54}$	(2) [3]
HgS (schwarz)	$2 \cdot 10^{-53}$	(2) [3]
K <sub>2</sub> PtCl <sub>6</sub> (Hexachloroplatinat)	$7.48 \cdot 10^{-6}$	[1]
K[B(C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub> ] (Tetraphenylborat)	$2.19 \cdot 10^{-8}$	[8]
KClO <sub>4</sub>	$1.05 \cdot 10^{-2}$	[1]
KIO <sub>4</sub>	$3.71 \cdot 10^{-4}$	[1]
Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	$8.15 \cdot 10^{-4}$	[1]
Ni <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	$1.9 \cdot 10^{-26}$	[2]
NiCO <sub>3</sub>	$1.42 \cdot 10^{-7}$	[1]
Ni(CN) <sub>2</sub>	$3.0 \cdot 10^{-23}$	[2]
Ni(OH) <sub>2</sub>	$5.48 \cdot 10^{-16}$	[1]
Ni(IO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	$4.71 \cdot 10^{-5}$	[1]
Ni <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	$4.74 \cdot 10^{-32}$	[1]
NiS	$3.0 \cdot 10^{-21}$	(2) [2]
Mg <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	$2.1 \cdot 10^{-20}$	[2]
MgCO <sub>3</sub>	$6.82 \cdot 10^{-6}$	[1]
MgCO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	$2.38 \cdot 10^{-6}$	[1]
MgCO <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O	$3.79 \cdot 10^{-6}$	[1]
MgF <sub>2</sub>	$5.16 \cdot 10^{-11}$	[1]
Mg(OH) <sub>2</sub>	$5.61 \cdot 10^{-12}$	[1]
MgC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	$4.83 \cdot 10^{-6}$	[1]
Mg <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	$1.04 \cdot 10^{-24}$	[1]
MgNH <sub>4</sub> PO <sub>4</sub>	$2.5 \cdot 10^{-12}$	[2]
Mn <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	$1.9 \cdot 10^{-11}$	[2]
MnCO <sub>3</sub>	$2.24 \cdot 10^{-11}$	[1]
MnC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	$1.70 \cdot 10^{-7}$	[1]
Mn(IO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	$4.37 \cdot 10^{-7}$	[1]
Mn(OH) <sub>2</sub>	$1.9 \cdot 10^{-13}$	[3]
MnS (grün)	$5.1 \cdot 10^{-15}$	(2) [2]
Mn(OH) <sub>3</sub>	ca. $1 \cdot 10^{-36}$	[2]
Pb <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	$4.1 \cdot 10^{-36}$	[2]
PbBr <sub>2</sub>	$6.60 \cdot 10^{-6}$	[1]
PbCO <sub>3</sub>	$7.40 \cdot 10^{-14}$	[1]
PbCl <sub>2</sub>	$1.70 \cdot 10^{-5}$	[1]

PbCrO <sub>4</sub>	$2.8 \cdot 10^{-13}$	[3]
PbF <sub>2</sub>	$3.3 \cdot 10^{-8}$	[1]
Pb(IO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	$3.69 \cdot 10^{-13}$	[1]
PbI <sub>2</sub>	$9.8 \cdot 10^{-9}$	[1]
Pb(OH) <sub>2</sub>	$1.43 \cdot 10^{-20}$	[1]
Pb <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	$3.0 \cdot 10^{-44}$	[2]
PbSeO <sub>4</sub>	$1.37 \cdot 10^{-7}$	[1]
PbSO <sub>4</sub>	$2.53 \cdot 10^{-8}$	[1]
PbS(Pb <sup>2+</sup> , HS <sup>-</sup> , OH <sup>-</sup> )	$3.2 \cdot 10^{-28}$	(2) [2]
Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	$1.6 \cdot 10^{-93}$	(2) [2]
SnI <sub>2</sub>	$1.0 \cdot 10^{-4}$	[2]
Sn(OH) <sub>2</sub>	$5.45 \cdot 10^{-27}$	[1]
SnS	$1.0 \cdot 10^{-28}$	(2) [2]
Sn(OH) <sub>4</sub>	$1.0 \cdot 10^{-57}$	[2]
SnS <sub>2</sub>	$1.0 \cdot 10^{-70}$	(2) [2]
Sr <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	$4.29 \cdot 10^{-19}$	[1]
SrCO <sub>3</sub>	$5.60 \cdot 10^{-10}$	[1]
SrC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> · 2 H <sub>2</sub> O	$5.6 \cdot 10^{-8}$	[2]
SrCrO <sub>4</sub>	$3.6 \cdot 10^{-5}$	[2]
SrF <sub>2</sub>	$4.33 \cdot 10^{-9}$	[1]
Sr(IO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	$1.14 \cdot 10^{-7}$	[1]
Sr(IO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 1 H <sub>2</sub> O	$3.77 \cdot 10^{-7}$	[1]
Sr(IO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6 H <sub>2</sub> O	$4.55 \cdot 10^{-7}$	[1]
Sr(OH) <sub>2</sub> · 8H <sub>2</sub> O	$3.2 \cdot 10^{-4}$	[2]
Sr <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	$1.0 \cdot 10^{-31}$	[2]
SrSO <sub>3</sub>	$4.0 \cdot 10^{-8}$	[2]
SrSO <sub>4</sub>	$3.44 \cdot 10^{-7}$	[1]
Zn <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	$2.8 \cdot 10^{-28}$	[1]
ZnCO <sub>3</sub>	$1.46 \cdot 10^{-10}$	[1]
ZnCO <sub>3</sub> · 1H <sub>2</sub> O	$5.42 \cdot 10^{-11}$	[1]
ZnC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> · 2 H <sub>2</sub> O	$1.38 \cdot 10^{-9}$	[1]
Zn(CN) <sub>2</sub>	$8.0 \cdot 10^{-12}$	[2]
ZnF <sub>2</sub>	$3.04 \cdot 10^{-2}$	[1]
Zn <sub>3</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ] <sub>2</sub>	$4.1 \cdot 10^{-16}$	[2]
Zn(IO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 2 H <sub>2</sub> O	$4.1 \cdot 10^{-6}$	[1]
Zn(OH) <sub>2</sub>	$3 \cdot 10^{-17}$	[1]
Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	$9.1 \cdot 10^{-33}$	[2]
ZnSe	$3.6 \cdot 10^{-26}$	[1]
ZnSeO <sub>3</sub> ·1H <sub>2</sub> O	$1.59 \cdot 10^{-7}$	[1]
ZnS (Wurtzit)	$3 \cdot 10^{-23}$	(2) [1]
ZnS (Sphalerit)	$2 \cdot 10^{-25}$	(2) [1]

- (1) Sehr kleine Mengen an Oxiden lösen sich in Wasser unter Bildung von Metallkationen und OH<sup>-</sup>. Feste Hydroxide sind instabil und zerfallen bei ihrer Bildung zu Oxiden. [2]
- (2) Gleichgewichtskonstanten  $K_{SPB}$  (Löslichkeitsprodukt und Säure/Base-Reaktion) für Metallsulfide beziehen sich auf das Gleichgewicht [3]:  
 $M_mS_n(s) + n H_2O(l) \rightleftharpoons m M^{n+}(aq) + n HO^-(aq) + n HS^-(aq)$
- (3) (Hydroxyl)apatit, geht auch mit 6 H<sub>2</sub>O in Lösung ( $K=10^{-17}$ ) als:  
 $4 [Ca_2(HPO_4)(OH)_2] + 2 Ca^{2+} + 2 HPO_4^{2-}$

[1] CRC Handbook of Chemistry and Physics [1b] aus  $\Delta G^\circ_f$

[2] Unterlagen von U. Leutenegger

[3] Kotz und Treichel, Chemistry and Chemical Reactivity, 5<sup>th</sup> ed, Thomson, 2003.

[4] U. Wuthier, Tabellenbuch Chemie

[5] Al-Borno, A. Tomson, M. B. (1994): The temperature dependence of the solubility product constant of vivianite, Geochim. Cosmochim. acta 58.

[6] Stumm, W. und Morgan, J.: Aquatic Chemistry, Wiley, 1996

[7] GeoChem EZ Database

[8] Wikipedia (teils berechnet aus Löslichkeit)

# Komplexbildungs-Konstanten (Stabilitäts-Konstanten):

$K_i$ : individuelle Komplexbildungs-Konstante;  $K_{Bi} = \beta_i$ : Brutto-Komplexbildungs-Konstante;  $K_1 = \beta_1$

Zentral-Ion	Komplex-Ion	L = NH <sub>3</sub>	Ammoniak	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : pK <sub>S</sub> = 9.21				Temp	Medium	Literatur
Ni <sup>2+</sup>	[Ni(NH <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> ] <sup>2+</sup> oct.	lgK <sub>1</sub> = 2.79	lgK <sub>2</sub> = 2.26	lgK <sub>3</sub> = 1.69	lgK <sub>4</sub> = 1.25	lgK <sub>5</sub> = 0.74	lgK <sub>6</sub> = 0.03 lgβ <sub>6</sub> = 8.74	30°C	2 M NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	[1]
Co <sup>2+</sup>	Co(NH <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> <sup>2+</sup> oct.	lgK <sub>1</sub> = 2.11	lgK <sub>2</sub> = 1.63	lgK <sub>3</sub> = 1.05	lgK <sub>4</sub> = 0.76	lgK <sub>5</sub> = 0.18	lgK <sub>6</sub> = -0.62 lgβ <sub>6</sub> = 5.11	30°C	2 M NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	[1]
Co <sup>3+</sup>	[Co(NH <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> ] <sup>3+</sup>						lgβ <sub>6</sub> = 34			[9]
Cu <sup>2+</sup>	[Cu(NH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> ] <sup>2+</sup> quadr. planar	lgK <sub>1</sub> = 4.15	lgK <sub>2</sub> = 3.50	lgK <sub>3</sub> = 2.89	lgK <sub>4</sub> = 2.13 lgβ <sub>4</sub> = 12.67			18°C	2 M NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	[2]
Zn <sup>2+</sup>	[Zn(NH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> ] <sup>2+</sup>	lgK <sub>1</sub> = 2.37	lgK <sub>2</sub> = 2.44	lgK <sub>3</sub> = 2.50	lgK <sub>4</sub> = 2.15 lgβ <sub>4</sub> = 9.46			30°C	2 M NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	[1]
Ag <sup>+</sup>	[Ag(NH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ] <sup>+</sup>	lgK <sub>1</sub> = 3.20	lgK <sub>2</sub> = 3.83					30°C	2 M NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	[1]
Zentral-Ion	Komplex-Ion	L = en	Ethylendiamin	H <sub>2</sub> N-CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -NH <sub>2</sub> H <sub>2</sub> en <sup>2+</sup> : pK <sub>S1</sub> = 7.31; pK <sub>S2</sub> = 10.05				Temp	Medium	Literatur
Ni <sup>2+</sup>	[Ni(en) <sub>3</sub> ] <sup>2+</sup> oct.	lgK <sub>1</sub> = 7.51	lgK <sub>2</sub> = 6.35	lgK <sub>3</sub> = 4.42 lgβ <sub>3</sub> = 18.3				25°C	1 M KNO <sub>3</sub>	[1]
Co <sup>2+</sup>	[Co(en) <sub>3</sub> ] <sup>2+</sup> oct.	lgK <sub>1</sub> = 6.0	lgK <sub>2</sub> = 4.8	lgK <sub>3</sub> = 3.3 lgβ <sub>3</sub> = 14.1				25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5]
Cu <sup>2+</sup>	[Cu(en) <sub>3</sub> ] <sup>2+</sup>	lgK <sub>1</sub> = 10.72	lgK <sub>2</sub> = 9.31 lgβ <sub>2</sub> = 20.0	lgK <sub>3</sub> = 1.0 lgβ <sub>3</sub> = 21.0				25°C		[1]
Zn <sup>2+</sup>	[Zn(en) <sub>3</sub> ] <sup>2+</sup>	lgK <sub>1</sub> = 5.92	lgK <sub>2</sub> = 5.15 lgβ <sub>2</sub> = 11.1	lgK <sub>3</sub> = 1.86 lgβ <sub>3</sub> = 12.9				25°C		[1]
Ag <sup>+</sup>	[Ag(en) <sub>2</sub> ] <sup>+</sup>	lgK <sub>1</sub> = 4.7	lgK <sub>2</sub> = 3.0					25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5]
Ag <sup>+</sup>	[Ag(Hen)] <sup>2+</sup>	lgK <sub>1</sub> = 11.9						25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5]
Zentral-Ion	Komplex-Ion	L = Y <sup>4-</sup>	EDTA	H <sub>4</sub> Y: pK <sub>S1</sub> = 1.99; pK <sub>S2</sub> = 2.67; pK <sub>S3</sub> = 6.16; pK <sub>S4</sub> = 10.26				Temp	Medium	Literatur
Na <sup>+</sup>	[NaY] <sup>3-</sup>	lgK <sub>1</sub> = lgβ <sub>1</sub> = 2.5						25°C	H <sub>2</sub> O rein	[5]
Ni <sup>2+</sup>	[NiY] <sup>2-</sup>	lgK <sub>1</sub> = lgβ <sub>1</sub> = 18.6						20°C	0.1 M KCl	[1]
Co <sup>2+</sup>	[CoY] <sup>2-</sup>	lgK <sub>1</sub> = lgβ <sub>1</sub> = 16.2						20°C	0.1 M KCl	[1]
Co <sup>3+</sup>	[CoY] <sup>-</sup>	lgK <sub>1</sub> = lgβ <sub>1</sub> = 36						20°C	0.1 M KCl	[1]
Cu <sup>2+</sup>	[CuY] <sup>2-</sup>	lgK <sub>1</sub> = lgβ <sub>1</sub> = 18.8						20°C	0.1 M KCl	[1]
Fe <sup>2+</sup>	[FeY] <sup>2-</sup>	lgK <sub>1</sub> = lgβ <sub>1</sub> = 14.3						20°C	0.1 M KCl	[1]
Fe <sup>3+</sup>	[FeY] <sup>-</sup>	lgK <sub>1</sub> = lgβ <sub>1</sub> = 25.1						20°C	0.1 M KCl	[1]
Pb <sup>2+</sup>	[PbY] <sup>2-</sup>	lgK <sub>1</sub> = lgβ <sub>1</sub> = 19.8						25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5]
Mg <sup>2+</sup>	[MgY] <sup>2-</sup>	lgK <sub>1</sub> = lgβ <sub>1</sub> = 8.7						20°C	0.1 M KCl	[1]
Ca <sup>2+</sup>	[CaY] <sup>2-</sup>	lgK <sub>1</sub> = lgβ <sub>1</sub> = 10.6						25°C	0.1 M KCl	[1]
Al <sup>3+</sup>	[AlY] <sup>-</sup>	lgK <sub>1</sub> = lgβ <sub>1</sub> = 16.1						20°C	0.1 M KNO <sub>3</sub>	[1]
Ba <sup>2+</sup>	[BaY] <sup>2-</sup>	lgK <sub>1</sub> = lgβ <sub>1</sub> = 7.8						20°C	0.1 M KCl	[1]
Sr <sup>2+</sup>	[SrY] <sup>2-</sup>	lgK <sub>1</sub> = lgβ <sub>1</sub> = 8.6						20°C	0.1 M KCl	[1]
Zentral-Ion	Komplex-Ion	L = F <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> , Br <sup>-</sup> , I <sup>-</sup>	Halogenid-Ionen (Fluorid, Chlorid, Bromid, Iodid)				Temp	Medium	Literatur	
Al <sup>3+</sup>	[AlF <sub>6</sub> ] <sup>3-</sup>	lgK <sub>1</sub> = 6.1	lgK <sub>2</sub> = 5.0	lgK <sub>3</sub> = 3.9	lgK <sub>4</sub> = 2.7	lgK <sub>5</sub> = 1.6	lgK <sub>6</sub> = 0.5 lgβ <sub>6</sub> = 19.8	25°C		[4]
Fe <sup>3+</sup>	[FeF <sub>3</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>3</sub> ]	lgK <sub>1</sub> = 6.0	lgK <sub>2</sub> = 4.6	lgK <sub>3</sub> = 3.1 pK <sub>L</sub> = 6.9				25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5] [6]
Cu <sup>2+</sup>	[CuCl <sub>4</sub> ] <sup>2-</sup> tetr – quadr. planar	lgK <sub>1</sub> = 0.98			lgβ <sub>4</sub> = 5.6			20°C	0.6 M HClO <sub>4</sub>	[1] [3,9]
Fe <sup>3+</sup>	[FeCl <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>4</sub> ] <sup>+</sup>	lgK <sub>1</sub> = 1.5	lgK <sub>2</sub> = 0.6					25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5]
Zn <sup>2+</sup>	[ZnCl <sub>4</sub> ] <sup>2-</sup>				lgβ <sub>4</sub> = 0.20					[9]
Ag <sup>+</sup>	[AgCl <sub>3</sub> ] <sup>2-</sup>	lgK <sub>1</sub> = 3.3 pK <sub>L</sub> = 9.7	lgK <sub>2</sub> = 2.0 lgβ <sub>2</sub> = 5.3	lgK <sub>3</sub> = 1.1 lgβ <sub>3</sub> = 6.4				25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5]
Ag <sup>+</sup>	[AgI <sub>2</sub> ] <sup>-</sup>	pK <sub>L</sub> = 16	lgβ <sub>2</sub> = 11					25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5] [9]



Zentral-Ion	Komplex-Ion	L = SCN <sup>-</sup>	Thiocyanat-Ion = Rhodanid-Ion			Temp	Medium	Literatur
Ag <sup>+</sup>	[Ag(SCN) <sub>2</sub> ] <sup>-</sup>	lgβ <sub>2</sub> = 9.8						[3]
Fe <sup>3+</sup>	[Fe(SCN) <sub>3</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>3</sub> ]	lgK <sub>1</sub> = 2.11	lgK <sub>2</sub> = 1.17	lgK <sub>3</sub> = 3.02				[3, 9]
Cu <sup>2+</sup>	[Cu(SCN) <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub> ]	lgβ <sub>2</sub> = 3.7						[9]
Zentral-Ion	Komplex-Ion	L = X <sup>3-</sup> = NTA = N(CH <sub>2</sub> COO) <sub>3</sub> <sup>3-</sup> H <sub>4</sub> X <sup>+</sup> : pK <sub>S1</sub> = 1.1; pK <sub>S2</sub> = 1.7; pK <sub>S3</sub> = 2.9; pK <sub>S4</sub> = 10.3				Temp	Medium	Literatur
Ni <sup>2+</sup>	[NiX] <sup>-</sup>	lgK <sub>1</sub> = lgβ <sub>1</sub> = 11.5				20°C		[2]
Cu <sup>2+</sup>	[CuX] <sup>-</sup>	lgK <sub>1</sub> = lgβ <sub>1</sub> = 13.0				20°C		[2]
Zn <sup>2+</sup>	[ZnX] <sup>-</sup>	lgK <sub>1</sub> = lgβ <sub>1</sub> = 10.7				20°C		[2]
Pb <sup>2+</sup>	[PbX] <sup>-</sup>	lgK <sub>1</sub> = lgβ <sub>1</sub> = 12.6				25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5]
Cd <sup>2+</sup>	[CdX <sub>2</sub> ] <sup>4-</sup>	lgK <sub>1</sub> = 11.1	lgK <sub>2</sub> = 4.0			25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5]
Mg <sup>2+</sup>	[MgX] <sup>-</sup>	lgK <sub>1</sub> = lgβ <sub>1</sub> = 5.4				20°C		[2]
Ca <sup>2+</sup>	[CaX] <sup>-</sup>	lgK <sub>1</sub> = lgβ <sub>1</sub> = 7.6				25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5]
Ba <sup>2+</sup>	[BaX] <sup>-</sup>	lgK <sub>1</sub> = lgβ <sub>1</sub> = 4.8				20°C		[2]
Zentral-Ion	Komplex-Ion	L = CN <sup>-</sup> Cyanid-Ion			HCN: pK <sub>S</sub> = 9.2	Temp	Medium	Literatur
Ni <sup>2+</sup>	[Ni(CN) <sub>4</sub> ] <sup>2-</sup>	lgβ <sub>1</sub> = 7.3		lgβ <sub>4</sub> = 30.2		25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5]
Zn <sup>2+</sup>	[Zn(CN) <sub>4</sub> ] <sup>2-</sup>	lgβ <sub>1</sub> = 5.7	lgβ <sub>2</sub> = 11.1	lgβ <sub>3</sub> = 16.1	lgβ <sub>4</sub> = 19.6	25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5]
Ag <sup>+</sup>	[Ag(CN) <sub>3</sub> ] <sup>2-</sup>	lgβ <sub>2</sub> = 20.5		lgβ <sub>3</sub> = 21.4		25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5]
Au <sup>+</sup>	[Au(CN) <sub>2</sub> ] <sup>-</sup>	lgβ <sub>2</sub> = 37						[8]
Fe <sup>2+</sup>	[Fe(CN) <sub>6</sub> ] <sup>4-</sup>				lgβ <sub>6</sub> = 24	25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[1]
Fe <sup>3+</sup>	[Fe(CN) <sub>6</sub> ] <sup>3-</sup>				lgβ <sub>6</sub> = 31	25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[1]
Zentral-Ion	Komplex-Ion	L = S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Thiosulfat-Ion	H <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : pK <sub>S1</sub> = 1.6; pK <sub>S2</sub> = 0.6		Temp	Medium	Literatur
Ag <sup>+</sup>	[Ag(S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ] <sup>5-</sup>	lgK <sub>1</sub> = 8.8	lgK <sub>2</sub> = 4.9	lgK <sub>3</sub> = 0.5		25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5]
Fe <sup>3+</sup>	[FeS <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>n</sub> ] <sup>+</sup>	lgK <sub>1</sub> = 3.3				25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5]
Zentral-Ion	Komplex-Ion	L = OH-	Hydroxid-Ion			Temp	Medium	Literatur
Fe <sup>2+</sup>	[Fe(OH) <sub>3</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>n</sub> ] <sup>-</sup>	lgβ <sub>1</sub> = 4.5	lgβ <sub>2</sub> = 7.4 pK <sub>L</sub> = 15.1	lgβ <sub>3</sub> = 11.0		25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5]
Co <sup>2+</sup>	[Co(OH) <sub>3</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>n</sub> ] <sup>-</sup>	lgβ <sub>1</sub> = 4.3	lgβ <sub>2</sub> = 9.2 pK <sub>L</sub> = 15.7	lgβ <sub>3</sub> = 10.5		25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5]
Ni <sup>2+</sup>	[Ni(OH) <sub>3</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>n</sub> ] <sup>-</sup>	lgβ <sub>1</sub> = 4.1	lgβ <sub>2</sub> = 9.0 pK <sub>L</sub> = 17.2	lgβ <sub>3</sub> = 12.0		25°C 25°C	entmin. H <sub>2</sub> O entmin. H <sub>2</sub> O	[5] [5]
Cu <sup>2+</sup>	[Cu(OH) <sub>4</sub> ] <sup>2-</sup>	lgβ <sub>1</sub> = 6.3	lgβ <sub>2</sub> = 11.8 pK <sub>L</sub> = 20	lgβ <sub>4</sub> = 16.4		25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5]
Zn <sup>2+</sup>	[Zn(OH) <sub>4</sub> ] <sup>2-</sup>	lgβ <sub>1</sub> = 4.3	lgβ <sub>2</sub> = 11.1 pK <sub>L</sub> = 16	lgβ <sub>3</sub> = 13.6	lgβ <sub>4</sub> = 14.8	25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5]
Ca <sup>2+</sup>	[Ca(OH)(H <sub>2</sub> O) <sub>n</sub> ] <sup>+</sup>	lgβ <sub>1</sub> = 1.15	pK <sub>L</sub> = 5.19			25°C 25°C	entmin. H <sub>2</sub> O entmin. H <sub>2</sub> O	[5] [5]
Al <sup>3+</sup>	[Al(OH) <sub>4</sub> ] <sup>-</sup>	lgβ <sub>1</sub> = 9.1	lgβ <sub>2</sub> = 17.9	lgβ <sub>3</sub> = 25.2 pK <sub>L</sub> = 33.5	lgβ <sub>4</sub> = 33.3	25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[7]
Fe <sup>3+</sup>	[Fe(OH) <sub>4</sub> ] <sup>-</sup>	lgβ <sub>1</sub> = 11.8	lgβ <sub>2</sub> = 22.3	lgβ <sub>2</sub> = 30 pK <sub>L</sub> = 40	lgβ <sub>4</sub> = 34.4	25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5,7]
Zentral-Ion	Komplex-Ion	L = PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>			Temp	Medium	Literatur	
Ca <sup>2+</sup>		lgβ <sub>1</sub> ([CaL] <sup>-</sup> ) = 6.5	lgβ <sub>1</sub> ([CaHL]) = 15.1	lgβ <sub>1</sub> ([CaH <sub>2</sub> L] <sup>+</sup> ) = 21.0 pK <sub>L</sub> (CaHL)=19.0	25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5]	
Zn <sup>2+</sup>		lgβ <sub>1</sub> ([ZnHL]) = 15.7	lgβ <sub>1</sub> ([ZnH <sub>2</sub> L] <sup>+</sup> ) = 21.2	lgβ <sub>1</sub> ([Zn <sub>3</sub> L <sub>2</sub> ]) = 35.3	25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5]	
Zentral-Ion	Komplex-Ion	L <sub>A</sub> = P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>4-</sup>	L <sub>B</sub> = P <sub>3</sub> O <sub>10</sub> <sup>5-</sup>		Temp	Medium	Literatur	
Ca <sup>2+</sup>		lgK <sub>1</sub> (CaL <sub>A</sub> <sup>2-</sup> ) = 6.8	lgK <sub>1</sub> (CaHL <sub>A</sub> <sup>-</sup> ) = 13.4	lgK <sub>1</sub> (CaZnL <sub>B</sub> <sup>3-</sup> ) = 8.1 pK <sub>L</sub> (Ca <sub>2</sub> L) = 14.7	25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5]	
Zn <sup>2+</sup>		lgK <sub>1</sub> (ZnL <sub>A</sub> <sup>2-</sup> ) = 8.7	lgK <sub>1</sub> (Zn(L <sub>A</sub> ) <sub>2</sub> <sup>6-</sup> ) = 11.0	lgK <sub>1</sub> (Zn(OH)(L <sub>A</sub> ) <sup>3-</sup> ) = 13.8 lgK <sub>1</sub> (ZnL <sub>B</sub> <sup>3-</sup> ) = 10.3	25°C	entmin. H <sub>2</sub> O	[5]	

# Gleichgewichtskonstanten für das Lösen von Gasen in Wasser

Henry-Konstante  $K_H$

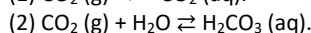
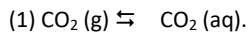
$$K_H = \frac{\text{molare Konzentration der Spezies in Wasser gelöst } [\frac{\text{mol}}{\text{L}}]}{\text{Partialdruck der Spezies in der Gasphase } [\text{atm}]} = \frac{[i]}{p(i)} = \frac{c_{\text{molar}}(i)}{p(i)}$$

## Einige Henry-Konstanten in $[\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}]$ bei 25°C.

Manche Stoffe gehen mit Wasser hier nicht berücksichtigte Folgereaktionen ein. Beispielsweise gibt  $K_H$  von HCl an, wie viele HCl-Moleküle im Gleichgewicht mit HCl in der Gasphase sind, und es umfasst nicht die  $\text{Cl}^-$ -Ionen.

Stoff	$K_H$	Stoff	$K_H$	Stoff	$K_H$
$\text{O}_2$	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$\text{N}_2$	$6.1 \cdot 10^{-4}$	$\text{CH}_3\text{OH}$	220
$\text{H}_2$	$7.8 \cdot 10^{-4}$	$\text{N}_2\text{O}$	$2.5 \cdot 10^{-2}$	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$	200
$\text{H}_2\text{O}_2$	71'000	$\text{NO}$	$1.9 \cdot 10^{-3}$	$\text{CH}_4$	$1.3 \cdot 10^{-3}$
$\text{HF}$	$9.6 / K_S$	$\text{NO}_2$	$3 \cdot 10^{-2}$	$\text{CO}_2 \text{ \#1}$	$3.4 \cdot 10^{-2}$
$\text{HCl}$	$20 = 2 \cdot 10^6 / K_S$	$\text{N}_2\text{O}_4$	1.5	$\text{H}_2\text{CO}$	3000
$\text{Cl}_2$	$9 \cdot 10^{-2}$	$\text{HNO}_3$	$2 \cdot 10^5$	$\text{CO}$	$9.5 \cdot 10^{-4}$
$\text{He}$	$3.7 \cdot 10^{-4}$	$\text{NH}_3$	60	$\text{H}_2\text{S}$	0.1
$\text{Ne}$	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$\text{HCN}$	10	$\text{SO}_2 \text{ \#2}$	1.2
$\text{Ar}$	$1.4 \cdot 10^{-3}$			$\text{SO}_3$	Sehr gross

#1 Beim Lösen von  $\text{CO}_2$  laufen nacheinander zwei Reaktionen ab:



Im Gleichgewicht liegt allerdings der weitaus grösste Teil als  $\text{CO}_2(\text{aq})$  vor und nur ein sehr kleiner Teil (ca. 0.2%) als  $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$ , wobei sich das Gleichgewicht relativ langsam einstellt. Die Henry-Konstante  $K_H$  von  $\text{CO}_2$  ist

$$K_H = \frac{[\text{CO}_2(\text{aq})] + [\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})]}{p(\text{CO}_2(\text{g}))} = \frac{[\text{H}_2\text{CO}_3^*]}{p(\text{CO}_2(\text{g}))} \approx \frac{[\text{CO}_2(\text{aq})]}{p(\text{CO}_2(\text{g}))}$$

$\text{H}_2\text{CO}_3^*$  bezeichnet damit die Summe der Konzentrationen der gelösten  $\text{CO}_2$  und eigentlichen  $\text{H}_2\text{CO}_3$ . Das gibt beim Weiterrechnen aber keine Probleme, denn auch bei Berechnungen mit der Säurekonstante  $K_S$  von  $\text{H}_2\text{CO}_3$  versteht man unter  $[\text{H}_2\text{CO}_3]$  die Summe der Konzentrationen beider Spezies: eigentliche  $\text{H}_2\text{CO}_3$  und gelöste  $\text{CO}_2$ -Moleküle:

$$K_S = \frac{[\text{HCO}_3^-] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]}{([\text{CO}_2(\text{aq})] + [\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})])} = \frac{[\text{HCO}_3^-] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{H}_2\text{CO}_3^*]} \approx \frac{[\text{HCO}_3^-] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{CO}_2(\text{aq})]}$$

#2 Für  $\text{SO}_2$  gilt dasselbe, wie für  $\text{CO}_2$ : in der wässrigen Lösung liegt im Gleichgewicht praktisch nur  $\text{SO}_2$  und fast kein  $\text{H}_2\text{SO}_3$  vor, die Summe der beiden Konzentrationen wird als  $\text{H}_2\text{SO}_3^*$  bezeichnet, obwohl fast nur  $\text{SO}_2$  vorliegt. Der  $K_S$  von „ $\text{H}_2\text{SO}_3$ “ ist

$$K_S = \frac{[\text{HSO}_3^-] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{H}_2\text{SO}_3^*]} \approx \frac{[\text{HSO}_3^-] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{SO}_2(\text{aq})]}$$



# Thermodynamische Daten für 25°C, 1 atm und Standard-Zustände

$\Delta G_f^\circ$ : Freie Standard-Bildungs-Enthalpie;  $\Delta H_f^\circ$ : Standard-Bildungs-Enthalpie;  $S^\circ$ : Standard-Entropie

Spezies	$\Delta H_f^\circ$ kJ mol <sup>-1</sup>	$\Delta G_f^\circ$ kJ mol <sup>-1</sup>	$S^\circ$ J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Ref
Ag (s)	0	0	43	[4]
Ag <sup>+</sup> (aq)	106	77	73	[4]
AgCl (s)	-127	-110	96	[4]
Br <sub>2</sub> (l)	0	0	152	[0]
Br <sub>2</sub> (g)	31	3	245	[4]
Br <sub>2</sub> (aq)	-259	3.93	130.5	[0]
C (g)	717	617	158	[4]
C (s, Graphit)	0	0	5.740	[1]
C (s, Diamant)	1.895	2.900	2.377	[1]
CO (g)	-111	-137	198	[4]
CO <sub>2</sub> (g)	-393.5	-394.37	213.6	[0]
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (aq, incl. gelöstes CO <sub>2</sub> )	-699.6	-623.2	187.0	[0]
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (aq, ohne gel. CO <sub>2</sub> )		~-607.1		[0]
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-692.0	-586.9	91.20	[10]
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-677.1	-527.9	-56.90	[10]
Ca <sup>2+</sup> (aq)	-543	-554	-53	[4]
CaCO <sub>3</sub> (s)	-1'207	-1'129	93	[4]
Ca(OH) <sub>2</sub> (s)	-986.1	-898.4	83.39	[10]
CaSO <sub>4</sub> (s)	-1434.1	-1321.7	106.7	[10]
CaSO <sub>4</sub> · 2 H <sub>2</sub> O (s)	-2022.6	-1797.2	194.1	[10]
CaCl <sub>2</sub> · (s)	-795.8	-748.1	104.6	[10]
CaO (s)	-635	-604	40	[4]
Cl <sub>2</sub> (g)	0	0	223.08	[9]
Cl <sub>2</sub> (aq)		6.94	121	[9]
Cl (g)	121	105	165	[4]
Cl <sup>-</sup> (aq)	-167	-131.2	56.60	[4,9]
ClO <sup>-</sup> (aq)		-37.67	42.00	[9]
HClO (aq)		-80.02	142.0	[9]
ClO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (aq)		-10.25	101.3	[9]
HClO <sub>2</sub> (aq)		-0.940	188.3	[9]
Cu (s)	0	0	33.15	[9]
Cu <sup>+</sup> (aq)		48.87	40.6	[9]
Cu <sup>2+</sup> (aq)	64.8	65.04	-98	[4,9]
CuSO <sub>4</sub> (s)	-771	-662	109	[4]
CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O (s)	-2'280	-1'880	300	[4]
CuO (s)	-157.3	-129.6	42.63	[10]
[CuOH] <sup>+</sup> (aq)		-126.66	-61	[9]
[Cu(OH) <sub>2</sub> ] (aq)		-316.54	26	[9]
[Cu(OH) <sub>3</sub> ] <sup>-</sup> (aq)		-493.98	-14	[9]
[Cu(OH) <sub>4</sub> ] <sup>2-</sup> (aq)		-657.48	-175	[9]
[Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> ] <sup>2+</sup> (aq)		-285.1	-4	[9]
[Cu <sub>3</sub> (OH) <sub>4</sub> ] <sup>2+</sup> (aq)		-633.0	-59	[9]
[CuCl] <sup>+</sup> (aq)	-93.8	-69.83	-1	[9]
[CuCl <sub>2</sub> ] (aq)	-246.2	-200.83	104	[9]
[CuCl <sub>3</sub> ] <sup>-</sup> (aq)	-406.2	-327.5	169	[9]
[CuCl <sub>4</sub> ] <sup>2-</sup> (aq)	-563.6	-452.42	237	[9]
H (g)	218	203	115	[4]
H <sub>2</sub> (g)	0	0	130.6	[0]
H <sup>+</sup> (aq) <i>per definitionem</i>	0	0	0	[0]
HF	-271	-273	174	[4]
HCl (g)	-92	-95	187	[4]
„HCl (aq)“	-167	-131	56	[4]
HBr (g)	-36	-53	199	[4]
HI (g)	26	2	206	[4]
I <sub>2</sub> (s)	0	0	116	[0]
I <sub>2</sub> (g)	62	19	261	[4]
I <sub>2</sub> (aq)	22.6	16.4	137	[0]
I <sup>-</sup> (aq)	-55.19	-51.59	111	[0]
K (s)	0	0	64.7	[0]
K (g)	89.0	60.5	160	[0]
K <sup>+</sup> (aq)	-251	-282	103	[4]
KCl (s)	-436	-408	83	[4]
Mg (s)	0	0	33	[4]
Mg <sup>2+</sup> (aq)	-467	-455	-138	[4]
MgCl <sub>2</sub> (s)	-642	-592	90	[4]
Mg(OH) <sub>2</sub> (s)	-924.5	-833.5	63.18	[10]
MgSO <sub>4</sub> (s)	-1'288	-1'171	92	[4]
MgSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O (s)	-3'388	-2'872	372	[4]
Spezies	$\Delta H_f^\circ$	$\Delta G_f^\circ$	$S^\circ$	Ref

Spezies	$\Delta H_f^\circ$ kJ mol <sup>-1</sup>	$\Delta G_f^\circ$ kJ mol <sup>-1</sup>	$S^\circ$ J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Ref
N <sub>2</sub> (g)	0	0	191.6	[0]
N <sub>2</sub> (aq)	-10	-18	96	[1]
NH <sub>3</sub> (g)	-46.1	-16.48	192	[0]
NH <sub>3</sub> (aq)	-80.29	-26.57	111	[0]
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (aq)	-132	-79	113	[4]
NH <sub>4</sub> Cl (s)	-314	-203	95	[4]
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (s)	-366	-184	151	[4]
N <sub>2</sub> O (g)	82	104	220	[4]
NO (g)	90	87	211	[4]
NO <sub>2</sub> (g)	33.10	51	240.04	[5]
N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (g)	9.08		304.38	[5]
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (aq)	-207	-111	146	[4]
Na (s)	0	0	51.3	[4]
Na (g)	109	78	154	[4]
Na <sup>+</sup> (aq)	-240	-262	59	[4]
NaCl (s)	-411	-384	72	[4]
NaOH (s)	-427	-381	64	[4]
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	-1'384	-1'267	149	[4]
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 10 H <sub>2</sub> O (s)	-4'324	-3'644	593	[4]
O <sub>2</sub> (g)	0	0	205.2	[0]
O <sub>2</sub> (aq)	-12.471	16.32	108.1	[11]
O <sub>3</sub> (g)	142.7	163.2	239	[0]
OH <sup>-</sup> (aq)	-230.0	-157.29	-10.75	[0]
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (g)	-136.31	-105.6	232.6	[0]
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (l)	-188	-120	109	[4]
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (aq)	-191.17	-134.1	143.9	[0]
H <sub>2</sub> O (s) (0°C)	-291.83		41.45	(3)
H <sub>2</sub> O (l) (0°C)	-285.82		63.45	(3)
H <sub>2</sub> O (l)	-285.830	-237.18	69.91	[0]
H <sub>2</sub> O (l) (100°C)	-283.454		86.896	[7]
H <sub>2</sub> O (g) (0°C)	-240.77		172.35	(4)
H <sub>2</sub> O (g)	-241.826	-228.57	188.832	[7]
H <sub>2</sub> O (g) (100°C)	-242.797		195.847	[7,6]
OH <sup>·</sup> (g) (Radikal)	38.95	34.22	183.64	[0]
OH <sup>·</sup> (aq) (Radikal)		7.74		[0]
P (α, weiss)	0	0	41.1	[0]
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (aq)	-1277.4	-1018.8	-222	[0]
HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (aq)	-1292.1	-1089.3	-33.4	[0]
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (aq)	-1296.3	-1130.4	90.4	[0]
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (aq)	-1288.3	-1142.6	158	[0]
P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>4-</sup> (aq)	-2271.1	-1919	-117	[0]
HP <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>3-</sup> (aq)	-2274.8	-1972.2	46	[0]
H <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup> (aq)	-2278.6	-2010.2	163	[0]
S (rhombisch, S <sub>8</sub> )	0	0	31.8	[0]
SO <sub>2</sub> (g)	-296.8	-300.2	248	[0]
SO <sub>3</sub> (g)	-395.7	-371.1	257	[0]
H <sub>2</sub> S (g)	-20.63	-33.56	205.7	[0]
H <sub>2</sub> S (aq)	-39.75	-27.87	121.3	[0]
S <sup>2-</sup> (aq)	33.0	85.8	-14.6	[0]
HS <sup>-</sup> (aq)	-17.6	12.05	62.8	[0]
SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (aq)	-635.5	-486.6	-29	[0]
HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (aq)	-626.2	-527.8	140	[0]
H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> (aq) (incl. gel. SO <sub>2</sub> )	-608.8	-537.9	232	[0]
H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> (aq) (ohne gel. SO <sub>2</sub> )		~-534.5		[0]
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (aq)	-909.2	-744.6	20.1	[0]
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (aq)	-887.3	-756.0	132	[0]
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (l)	-814	-690	157	[4]
Se (s)	0	0	42	[4]
Se (g)	227	187	177	[4]
H <sub>2</sub> Se (g)	30	16	219	[4]
H <sub>2</sub> Te (g)	100			[4]
Si (s)	0	0	18.8	[0]
SiO <sub>2</sub> (α, Quarz)	-910.94	-856.67	41.8	[0]
SiO <sub>2</sub> (α, Cristobalit)	-909.48	-855.88	42.7	[0]
SiO <sub>2</sub> (α, Tridymit)	-909.06	-855.29	43.5	[0]
SiO <sub>2</sub> (amorph)	-903.49	-850.73	46.9	[0]
H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> (aq)	-1468.6	-1308.0	180	[0]
Spezies	$\Delta H_f^\circ$	$\Delta G_f^\circ$	$S^\circ$	Ref

	$\text{kJ mol}^{-1}$	$\text{kJ mol}^{-1}$	$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$	
Zn (s)	0	0	42	[4]
$\text{Zn}^{2+}$ (aq)	- 154	- 147	- 112	[4]
ZnS	-206.0	-201.3	57.7	[4]

	$\text{kJ mol}^{-1}$	$\text{kJ mol}^{-1}$	$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$	
$\text{ZnCO}_3$ (s)	-812.8	-731.5	82.42	[10]
ZnO	-350.5	-320.5	43.64	[10]

Spezies		$\Delta H_f^\circ$ ( $\text{kJ mol}^{-1}$ )	$\Delta G_f^\circ$ ( $\text{kJ mol}^{-1}$ )	$S^\circ$ ( $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	Referenz
CH <sub>4</sub> (g)	Methan	-74.80	-50.79	186	
CH <sub>4</sub> (aq)		-89.04	-34.39	83.7	
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (g)	Ethan	- 85	- 33	230	[4]
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (g)	Propan	- 104	- 24	270	[4]
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (g)	Butan	- 125.6	- 24	313	[4]
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (g)	Pentan	- 146	- 8	349	[4]
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (l)		- 173			[4]
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> (l)	Hexan	-198.7	257.8	295	[3]
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> (aq)		-199.3	289.9	185.3	[2]
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> (g)		-167.1	261.7	388	[2]
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> (g)	Octan	- 208	16	467	[4]
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> (g)	Nonan	- 229	25	506	[4]
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> (l)		- 275			[4]
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (g)	Ethen/Ethylen	52	68	220	[4]
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (g)	Ethin/Acetylen	227	209	201	[4]
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (l)	Benzen ("Benzol")	49.1	124.5	173.4	
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (aq)		51.3	143.9	115	[2]
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (g)		82.9	129.7	269.2	
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> (g)	Cyclohexen	-5	107	311	[4]
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> (g)	Cyclohexen	38		216	[5]
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> (l)	1,4-Cyclohexadien	67		189.37	[5]
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> (l)	1,3-Cyclohexadien	71		197.28	[5]
CH <sub>3</sub> OH (l)	Methanol	-239.2	-166.6	126.8	[7]
CH <sub>3</sub> OH (g)	Methanol	- 201.0	- 162.3	239.9	[7]
CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH (l)	Ethanol	-277.6	-174.8	160.7	
CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH (aq)		-287.6	-171.6	116.4	(1)[2]
CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH (g)		-234.8	-167.9	281.6	
CH <sub>2</sub> O (g)	Methanal/Formaldehyd	-116.0	-110.0	218.6	
CH <sub>2</sub> O (aq)			-129.7		
CH <sub>3</sub> CHO (g)	Ethanal/Acetaldehyd	- 166	- 133	264	[4]
(O <sub>3</sub> N)C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (NO <sub>3</sub> )	Ethylenglycoldinitrat	-233			
CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub> (g)	Propanon / Aceton	- 218	- 153	295	[4]
CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub> (l)		-249		200	[5]
CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> (l)	Diethylether	-279.5	Y	253.5	(2)[3]
CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> (aq)		-299.2	Y+12	147.2	[2]
CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> (g)		-252.1		342.7	
HCOOH (l)	Ameisensäure	-425.0	-361.4	129	[1]
HCOOH (g)		-378.7	-351	249	[1],[4]
HCOOH (aq)		-425.4	-372.3	163	
HCOO <sup>-</sup> (aq)		-425.6	-351.0	92	
H <sub>3</sub> CCOOH (l)	Essigsäure (Ethansäure)	-484.3	-389.9	159.8	[1]
H <sub>3</sub> CCOOH (g)		-432.2	-374.2	283.5	[1]
H <sub>3</sub> CCOO <sup>-</sup> (aq)	Acetat-Ion	-486.0	-369.3	86.6	[1]
H <sub>6</sub> C <sub>4</sub> O <sub>3</sub> (l)	Essigsäureanhydrid	-625.0			
C <sub>17</sub> H <sub>35</sub> COOH (s)	Hexadecansäure / Palmitins.	-949			
H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (aq)	Oxalsäure	-818.26	-697.0		
HC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> <sup>-</sup> (aq)		-818.8	-690.86		
C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (aq)		-818.8	-674.04	45.6	
CH <sub>3</sub> Br (g)	Brommethan	- 38	- 28	246	[4]
CH <sub>3</sub> Cl (g)	Chlormethan	- 86	- 63	235	[4]
CH <sub>3</sub> F (g)	Fluormethan	- 234	- 210	223	[4]
CH <sub>3</sub> I (g)	Iodmethan	14	16	254	[4]
NH <sub>2</sub> CONH <sub>2</sub> (s)	Harnstoff	-333.1		104	[5]
NH <sub>2</sub> CONH <sub>2</sub> (g)		- 246	- 154	249	[4]
NH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> COOH (s)	Glycin	- 529	- 369	104	[4]
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> (s)	α-D-Glucose	- 1'273.3		209	[1], [5]
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> (s)	β-D-Fructose	- 1'265.6			[1]
C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub> (s)	Sucrose, Saccharose	-2'221.2		392.40	[5]

# Wichtige Funktionelle Gruppen und Substituenten

## Formeln und Daten

**Ungeladene Gruppen sind nach zunehmendem Rang geordnet**. R<sub>x</sub> ist organischer Rest oder (wenn nicht anders vermerkt) ein H-Atom. Der Name der ranghöchsten funktionellen Gruppe erscheint wie die Mehrfachbindungen am Ende des Stammmens (Suffix), da sie als Teil der Hauptkette gilt. Die übrigen funktionellen Gruppen gelten als Substituenten und ihre Namen erscheinen vor dem Stammmens (Präfix).

### Kohlenwasserstoffe

Funkt. Gruppe	Allgemeine Formel	Stoffklasse	Beispiele	Name [als Substituent]
Keine	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	Alkane (KW*)	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub> [CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -] {C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> , Ring}	Propan [Ethyl-] {Cyclohexan}
CC-Doppelbindung		Alkene (KW*)	CH <sub>2</sub> =CH-CH <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub> [R=CH-CH <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub> ]	But-1-en [Propyliden]
CC-Dreifachbindung		Alkine (KW*)	HC≡C-CH <sub>3</sub> [R≡C-CH <sub>3</sub> ]	Propin [Propylidin]

### Ungeladene Gruppen mit Heteroatomen (Acetal, Ketal: siehe Abschnitt über Zucker)

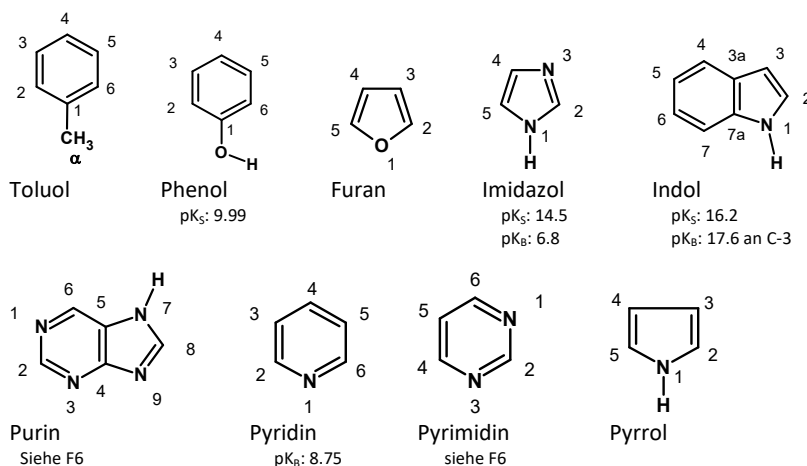
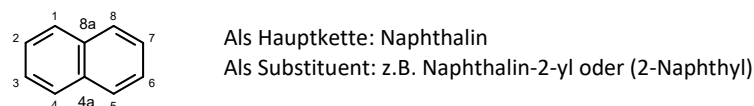
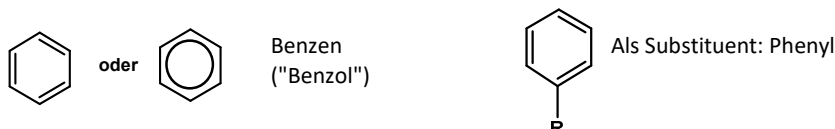
Funkt. Gruppe	Allgemeine Formel	Stoffklasse	Beispiele	Name
Halogen-Atom	R-X (X=F, Cl, Br oder I)	Halogen-KW*	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> Cl	1-Chlorbutan
Nitro-Gruppe	R-NO <sub>2</sub> (R ≠ H)	Nitro-Verbindungen	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -NO <sub>2</sub>	1-Nitropropan
Peroxid Hydroperoxid	R <sub>1</sub> -O-O-R <sub>2</sub> , R <sub>1</sub> -O-OH	Peroxid Hydroperoxid	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -O-O-CH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -NO <sub>2</sub>	(Methyl)-dioxyethan Hydroperoxypropan
Sulfid-Gruppe [Disulfid]	R-S-R' [R-S-S-R']	Sulfid, Thioether [Disulfid]	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -S-CH <sub>3</sub>	Ethylmethylsulfid (Methylsulfanyl)methan
Ether-Gruppe	R <sub>1</sub> -O-R <sub>2</sub> (R <sub>1</sub> und R <sub>2</sub> ≠ H):	Ether	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -O-CH <sub>3</sub>	Ethylmethylether (Methoxyethan)
Imino-Gruppe	RR'-C=N-R'''	Imine	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -HC=NH	Propylimin (Iminopropan)
Amino-Gruppe	R <sub>1</sub> -N-R <sub>2</sub> R <sub>3</sub>	Amine	H-N-(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Zweites Beispiel: CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> NH <sub>2</sub>	Dimethylamin Bsp 2: Propylamin (=1-Aminopropan)
Thiol-Gruppe (Mercapto-)	R-SH (R ≠ H)	Thiole (Mercaptan)	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -SH	Propan-1-thiol (1-Sulfanylpropan)
Hydroxyl-Gruppe	R-OH (R ≠ H)	Alkohole	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -OH	Propan-1-ol (=1-Hydroxypropan)
Keto- oder Carbonyl-Gruppe	R <sub>1</sub> -CO-R <sub>2</sub> (R <sub>1</sub> und R <sub>2</sub> ≠ H):	Ketone	CH <sub>3</sub> -CO-CH <sub>3</sub>	Propanon (=2-Oxopropan)
Aldehyd- oder Carbonyl-Gruppe	R-CHO	Aldehyde	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CHO	Propanal (=1-Oxopropan) (=1-Formylethan) (!!)
Amid-Gruppe	R <sub>1</sub> -CO-NR <sub>2</sub> R <sub>3</sub> :	(Carbonsäure)-Amide Ring: <b>Lactam</b>	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CO-NH-CH <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub>	Propansäureethylamid oder N-Ethylpropanamid (Nicht: Propylamid!) Ring: -lactam
Säurehalogenid- Gruppe	R-(C=O)-X	Carbonsäure- halogenid	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CO-Cl	Propanoylchlorid Chlorcarbonylethan
Nitrat-Gruppe (& andere Ester)	R-O-NO <sub>2</sub>	Nitrate (Phosphate,...)	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -O-NO <sub>2</sub>	Propylnitrat 1-Nitrooxypropan
Ester-Gruppe [Carbonat-Ester- Gruppe]	R <sub>1</sub> -CO-O-R <sub>2</sub> (R <sub>2</sub> ≠ H): [R <sub>1</sub> = R-O]	Carbonsäure-Ester [Carbonat] Ring: <b>Lacton</b>	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CO-O-CH <sub>3</sub> [CH <sub>3</sub> -O-(CO)-O-CH <sub>3</sub> ]	Propansäuremethylester (=Methylpropanoat) [Dimethylcarbonat]
Anhydrid-Gruppe	R <sub>1</sub> -CO-O-CO-R <sub>2</sub>	Carbonsäure-Anhydrid	CH <sub>3</sub> -CO-O-CO-CH <sub>3</sub> [H <sub>2</sub> PO <sub>3</sub> -O-PO <sub>3</sub> H <sub>2</sub> ]	Diethansäureanhydrid [Phosphorsäure-anhydrid]
Carboxyl-Gruppe	R-COOH:	Carbonsäuren	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -COOH	Propansäure (=Carboxyethan (nicht Carboxypropan!!!))

**Ionische Gruppen** (Kationen enden generell auf: -ium oder -onium und haben den höchsten Rang aller funktionellen Gruppen; der Rang der aufgeführten Anionen liegt zwischen dem der Carboxyl- und Anhydrid-Gruppe)

Alkoholat-Gruppe	$R-O^-$		$CH_3-CH_2-CH_2-O^-$	Propan-1- <b>olat</b> (1-Oxidopropan)
Carboxylat-Gruppe	$R-COO^-$		$CH_3-CH_2-COO^-$	Propanoat ( <b>Carboxylatoethan !!!</b> )
Thiolat-Gruppe	$R-S^-$		$CH_3-CH_2-CH_2-S^-$	Propan-1- <b>thiolat</b> (1-Sulfidopropan)
Sulfat [Phosphat]	$[R-O-SO_3^-, R-O-PO_3^{2-}, RR'R''PO_4]$			Triethyl- <b>phosphat</b> (bzw. -Salz)
Azanium- oder Ammonium-	$R_1R_2R_3R_4N^+$		$CH_3CH_2CH_2NH_3^+$	Propylazanium- oder Propyl <b>ammonium</b> -Ion (bzw. -Salz)

### Gebräuchliche Trivialnamen komplizierter Molekülteile:

Bei diesen Molekülen ist die Nummerierung vorgegeben



Die Anzahl mehrfach auftretender funktioneller Gruppen gib man mit Zählworten an. Die Vorsilbe „mono“ ist nicht zwingend und wird nur verwendet, wenn betont werden soll, dass die entsprechende funktionelle Gruppe nur einmal auftritt:

einmal	mono	viermal	tetra	siebenmal	hepta
zweimal	di (bis)	fünfmal	penta	achtmal	octa
dreimal	tri	sechsmal	hexa	neunmal	nona

### Homologe Reihe der Alkane

Formel	Name
$CH_4$	Methan
$C_2H_6$	Ethan
$C_3H_8$	Propan
$C_4H_{10}$	Butan
$C_5H_{12}$	Pentan
$C_6H_{14}$	Hexan
$C_7H_{16}$	Heptan
$C_8H_{18}$	Octan
$C_9H_{20}$	Nonan
$C_{10}H_{22}$	Decan
$C_{11}H_{24}$	Undecan
$C_{12}H_{26}$	Dodecan
$C_{13}H_{28}$	Tridecan
$C_{14}H_{30}$	Tetradecan
$C_{15}H_{32}$	Pentadecan
$C_{16}H_{34}$	Hexadecan
$C_{17}H_{36}$	Heptadecan
$C_{18}H_{38}$	Octadecan
$C_{19}H_{40}$	Nonadecan
$C_{20}H_{42}$	Eicosan

**Benennung langer Ketten:** Die Namen werden durch Kombinationen folgender Zahlworte gebildet:

1 Hen	10 Decan	100 He	1000 Ki
2 Do	20 Cosan	200 Di	2000 Di
3 Tri	30 Tria	300 Tri	3000 Tri
4 Tetra	40 Tetra	400 Tetra	4000 Tetra
5 Penta	50 Penta	500 Penta	5000 Penta
6 Hexa	60 Hexa	600 Hexa	6000 Hexa
7 Hepta	70 Hepta	700 Hepta	7000 Hepta
8 Octa	80 Octa	800 Octa	8000 Octa
9 Nona	90 Nona	900 Nona	9000 Nona

Ausnahmen: 1 einziges Atom = Mono, 2 einzelne Atome = Di, 11 = Undecan, 20 = Icosa; 21 = Henicosa

Beispiele:  $C_{22}H_{46}$ : Docosan;  $C_{44}H_{90}$ : Tetratetracontan;  $C_{121}H_{244}$ : Henicosahectan;  $C_{9876}H_{19754}$ :

## IR-Spektren

Je massereicher die Bindungspartner und je schwächer die Bindungen sind (je mehr p-Charakter), desto kleiner die Wellenzahl (Verschiebung nach rechts). ss = sehr stark, s = stark, m = mittel, w = schwach. Je polarer die Bindung, desto intensiver die Absorption.

### Alle Moleküle

Fingerprint-Region: komplexes Muster von Schwingungen, die sich über grössere Molekülteile erstrecken (spezifisch für jedes Molekül); 700 bis 1300  $\text{cm}^{-1}$ .

#### Alkane:

- **CH-Streckschwingung (stretching vibrations) an  $\text{sp}^3$ -hybridisierten Atomen:** 2850-3000  $\text{cm}^{-1}$  s (Oktan: 2925  $\text{cm}^{-1}$ )
- $\text{CH}_2$ - und  $\text{CH}_3$ -Scherschwingung (Deformationsschwingung, scissoring mode): 1450-1470  $\text{cm}^{-1}$  s (Oktan: 1465  $\text{cm}^{-1}$ )
- CH-Schaukelschwingung in Richtung Molekülachse: 650-1000  $\text{cm}^{-1}$  (bei  $\text{CH}_3$  in Oktan: 890  $\text{cm}^{-1}$ ).
- $\text{CH}_3$ -Schaukelschwingung (Rocking): 1370-1380  $\text{cm}^{-1}$  s (Oktan: 1380  $\text{cm}^{-1}$ ) bei zwei benachbarten (geminalen) Methylgruppen meist zwei Banden (Dublett)
- $\text{CH}_2$ -Schaukelschwingung: 720-725 m (Oktan: 720  $\text{cm}^{-1}$ ).

#### Alkene ( $\text{C}=\text{C}$ -Doppelbindung und C-H $\text{sp}^2$ ): $\text{C}=\text{C}$ -Streckschwingung um 1650 $\text{cm}^{-1}$ .

- **CH-Streckschwingung an an  $\text{sp}^2$ -hybridisierten Atomen:** Kettenende: 3080-3140  $\text{cm}^{-1}$  m, sonst: 3020  $\text{cm}^{-1}$  w (auch **Aromaten**)
- Oberton 1750-1860  $\text{cm}^{-1}$  m.
- $\text{C}=\text{C}$ -Streckschwingung: Kettenende: 1645-1650  $\text{cm}^{-1}$  m, innerhalb der Kette: 1660-1675 w.
- CH-Beugeschwingung (out of plane) 650-1000  $\text{cm}^{-1}$  m, falls sich die Doppelbindung an einem Molekülende befindet, liegt diese Bande bei 890-990  $\text{cm}^{-1}$  s und ist relativ intensiv.
- Aromaten: C-Gerüst: 1475 bis 1625  $\text{cm}^{-1}$  m. oft zwei Dubletten (eines unter 1525 und eines über 1575  $\text{cm}^{-1}$ )

#### Alkine ( $\text{C}\equiv\text{C}$ -Dreifachbindung und C-H $\text{sp}$ ): Scharfe $\equiv\text{C-H}$ -Streckschwingung um 3300 $\text{cm}^{-1}$ .

- **CH-Streckschwingung an an  $\text{sp}$ -hybridisierten Atomen:** 3300-3320  $\text{cm}^{-1}$  s (scharf, eine Bande)
- $\text{C}\equiv\text{C}$ -Streckschwingung: 2100-2140  $\text{cm}^{-1}$  m, wenn die Dreifachbindung am Kettenende ist, sonst bei 2190-2260 w (meist sehr schwach).
- Intensive C-H-Beugeschwingung direkt bei Dreifachbindung 600-700  $\text{cm}^{-1}$

#### C-O und O-H in Alkoholen (R-OH), Carbonsäuren (R-(C=O)-OH), Ethern (ROR'), und Estern (R-(C=O)-O-R'):

- **O-H-Streckschwingung 3200-3600  $\text{cm}^{-1}$** 
  - -OH ohne Wasserstoffbrücke (oft scharf): 3500-3650  $\text{cm}^{-1}$
  - -OH...OR in Wasserstoffbrücke (oft **breit**): **Alkohole: 3450-3550  $\text{cm}^{-1}$ , Carbonsäuren: 2500-3300  $\text{cm}^{-1}$**
- C-O-Streckschwingung bei Alkoholen und Ethern 1050-1200  $\text{cm}^{-1}$  (charakteristisch, aber an dieser Stelle hat es meist viele andere Banden). Primäre Alkohole: 1050  $\text{cm}^{-1}$  s, sekundäre 1150  $\text{cm}^{-1}$  s, tertiäre 1200  $\text{cm}^{-1}$ , Ether: 1070-1150  $\text{cm}^{-1}$ , Ester: 1050-1330  $\text{cm}^{-1}$  ss 2 Banden.

#### Carbonylgruppe C=O: intensive Bande um 1700 $\text{cm}^{-1}$

- C-H-Streckschwingung bei **Aldehyd**: 2720  $\text{cm}^{-1}$  m, 2820  $\text{cm}^{-1}$  m.
- C=O-Streckschwingung:
  - Gesättigtes **Aldehyd** 1720 - 1740  $\text{cm}^{-1}$  s (scharf, intensiv, oft mit Oberton bei 3400-3500  $\text{cm}^{-1}$ )
  - **Offenkettiges Keton** 1705 - 1725  $\text{cm}^{-1}$  s (scharf, intensiv, oft mit Oberton bei 3400-3500  $\text{cm}^{-1}$ )
  - **Ringförmiges Keton**: Dreiring: 1850  $\text{cm}^{-1}$  s, Vierring: 1780  $\text{cm}^{-1}$  s, Fünfring: 1745  $\text{cm}^{-1}$  s, Sechsring: 1715  $\text{cm}^{-1}$  s
  - **Ester**: 1735-1750  $\text{cm}^{-1}$ .
  - **Carbonsäure**: 1700-1725  $\text{cm}^{-1}$ , Carboxylat-Ionen: 1550-1610  $\text{cm}^{-1}$  ss und 1400 - 1450  $\text{cm}^{-1}$  s
  - **Amide**: 1630-1680

#### Alkylhalide (Halogen-Verbindungen)

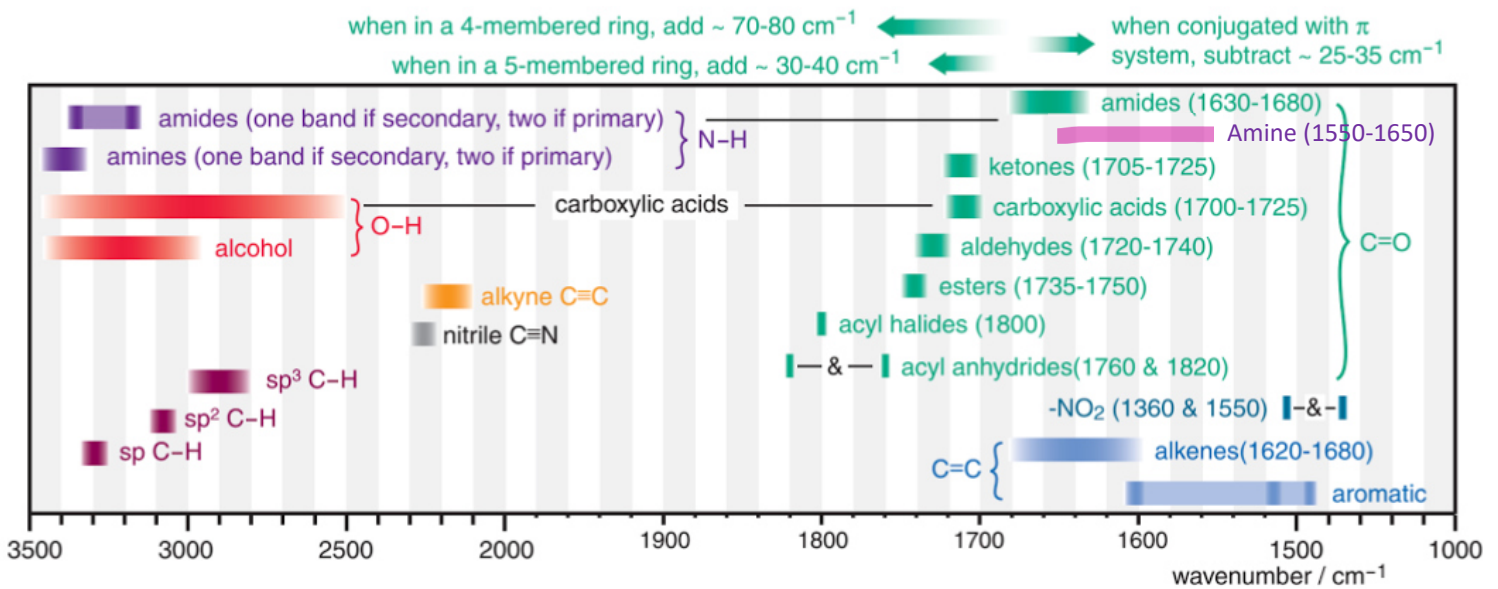
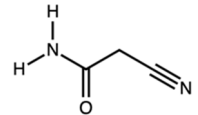
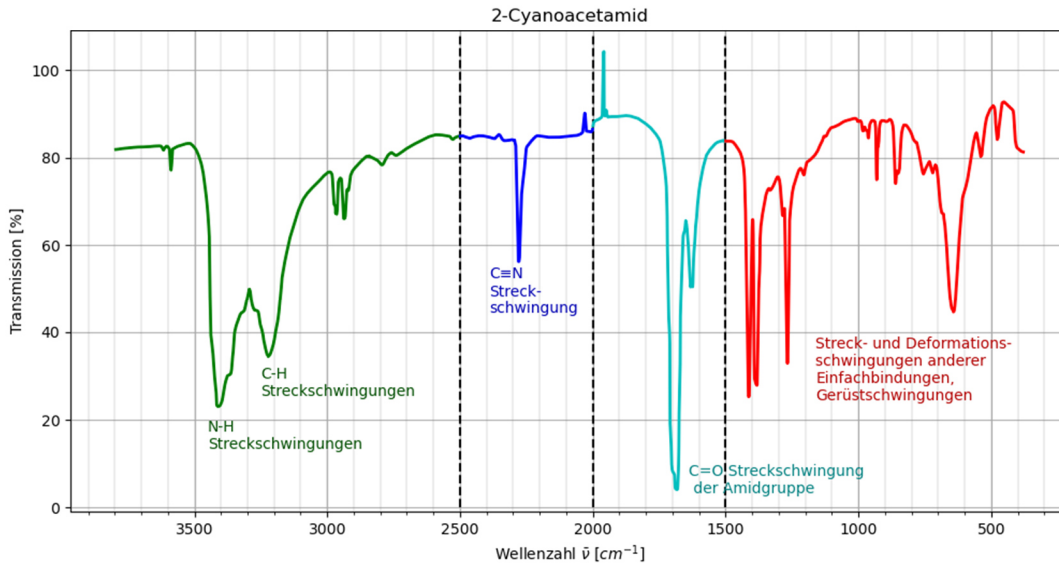
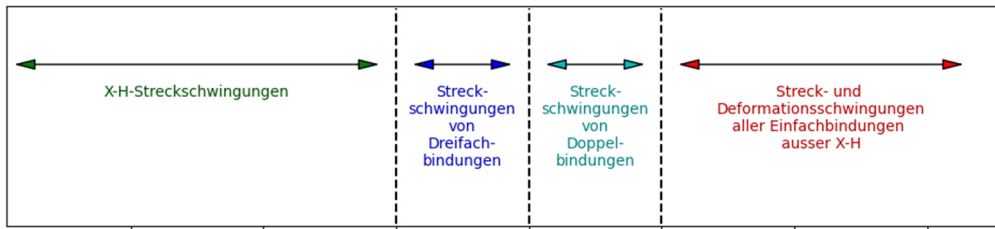
- C-X-Streckschwingung: R-F: 1000-1350  $\text{cm}^{-1}$  s (ss), R-Cl: 750-850  $\text{cm}^{-1}$  s, R-Br: 500-680  $\text{cm}^{-1}$  s, R-I: 200-500  $\text{cm}^{-1}$  s.

#### Stickstoff-Verbindungen

- N-H-Streckschwingung:
  - Primäre Amine: R-NH<sub>2</sub>: 3300-3500  $\text{cm}^{-1}$  s, **2 Scharfe Banden** mit Abstand 65-75  $\text{cm}^{-1}$
  - Sekundäre Amine: R<sub>1</sub>-NH-R<sub>2</sub>: 3300-3450  $\text{cm}^{-1}$  w (eine Bande) mittelstark, breit, stark strukturiert:
  - R-NH<sub>3</sub><sup>+</sup>, R<sub>1</sub>R<sub>2</sub>-NH<sub>2</sub><sup>+</sup>: 2700-3000  $\text{cm}^{-1}$
  - RR'R''-NH<sup>+</sup>: 2250-2700  $\text{cm}^{-1}$
  - Amid: RCONH<sub>2</sub>: zwei Banden bei 3400  $\text{cm}^{-1}$  und 3500  $\text{cm}^{-1}$ ; RCONHR': 3440  $\text{cm}^{-1}$
- -NH<sub>2</sub> Scherschwingung: 1590 - 1650  $\text{cm}^{-1}$  m bis s, Wippschwingung (auch sekundäre): 666 - 909  $\text{cm}^{-1}$  m bis s
- C=O Streckschwingung: Polypeptide: 1510-1560, Amide: 1650 - 1690  $\text{cm}^{-1}$
- C-N-Streckschwingung: Amin: 1010 - 1250  $\text{cm}^{-1}$  w, (wenig wertvoll, da viele andere Banden)
- RCN (Nitril): 2220-2260  $\text{cm}^{-1}$  (scharfe Bande)



# Übersicht über die wichtigsten starken IR-Absorptionsbanden (in $\text{cm}^{-1}$ )



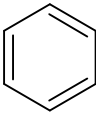
Ungefähre Streck-Schwingungs-Frequenzen einiger funktioneller Gruppen. Die Region zwischen 1500 und 2000  $\text{cm}^{-1}$  ist vergrößert dargestellt. Quelle: James Keeler and Peter Wothers: Chemical Structure and Reactivity

H-Atome an aromatischen Ringen: oft mehrere starke Banden im Bereich 900 – 650  $\text{cm}^{-1}$  (out of plane)

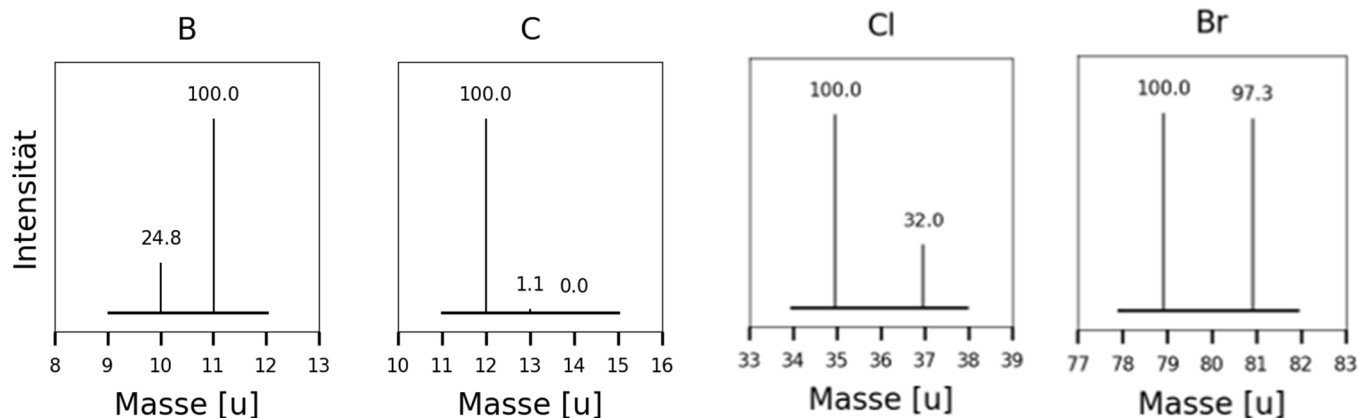
# Massenspektrometrie

## Einige typische Fragmente und ihre Masse

Masse	
15 u	$-\text{CH}_3$ (durch Abspaltung einzelner H auch bei 14 u, 13 u und 12 u)
29 u	$-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ $-\text{C}(=\text{O})\text{H}$
18 u	$\text{H}_2\text{O}$ , $\text{NH}_4^+$ (durch Abspaltung einzelner H auch bei 17 u und 16 u)
26 u (27 u)	$-\text{CN}$ (durch Aufnahme eines $\text{H}^+$ auch bei 27 u)
29 u	$-\text{C}_2\text{H}_5$ $-\text{CHO}$
30 u	$-\text{CH}_2-\text{NH}_2$ $-\text{N}_2\text{H}_2$ $-\text{CH}_2-\text{O}-$ , $-\text{NO}$
31 u	$-\text{CH}_2-\text{OH}$ $-\text{O}-\text{CH}_3$ $-\text{CH}_2\text{NH}_2$ $-\text{N}_2\text{H}_3$
33 u (34 u)	$-\text{SH}$ (durch Aufnahme eines $\text{H}^+$ auch bei 34 u)

Masse	
43 u	$-\text{C}(=\text{O})\text{CH}_3$ $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ $-\text{HC}(\text{CH}_3)_2$
45 u	$-\text{C}(=\text{O})\text{OH}$ $-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ $-\text{HC}(\text{CH}_3)\text{OH}$
57 u	$-\text{C}(=\text{O})\text{CH}_2-\text{CH}_3$ $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$
59 u	$-\text{C}(=\text{O})\text{O}-\text{CH}_3$ $-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ $-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$
72 u	$-\text{C}(\text{CH}_3)_2\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$
73 u	$-\text{CH}_2-\text{C}(=\text{O})\text{O}-\text{CH}_3$ $-\text{C}(=\text{O})\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$
78 u	
87 u	$-\text{CH}_2-\text{C}(=\text{O})\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ $-\text{C}(=\text{O})\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$

## Einige Isotopensignale



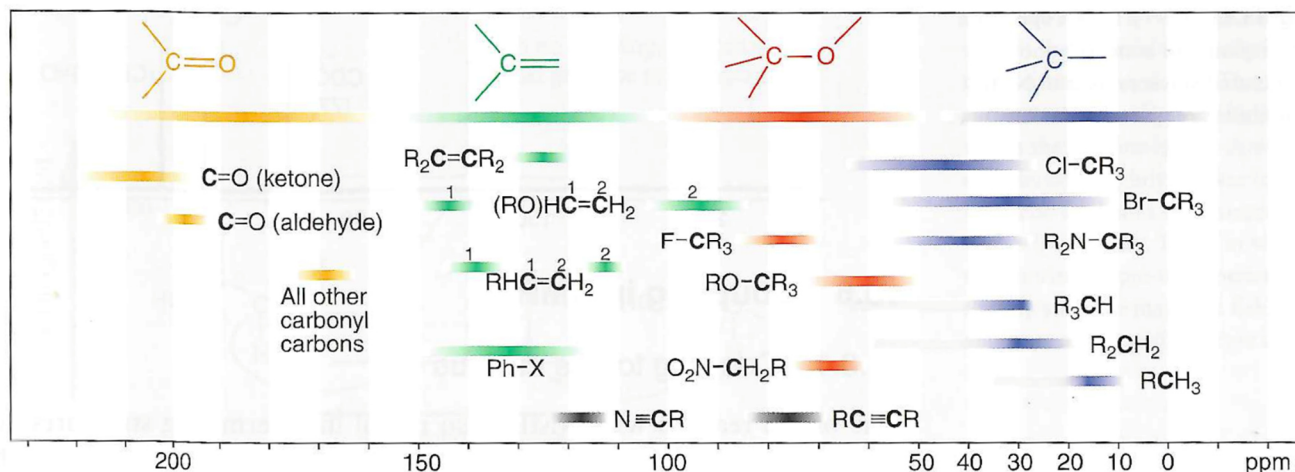
**$^{13}\text{C}$ -NMR-Spektroskopie**

Abbildung 1: Typische Verschiebungen in  $^{13}\text{C}$ -NMR-Spektren für einige funktionelle Gruppen. Quelle: J. Keeler und Wothers, *Chemical Structure and Reactivity: an integrated approach*, 2nd edition. Oxford: Oxford University Press, 2008.

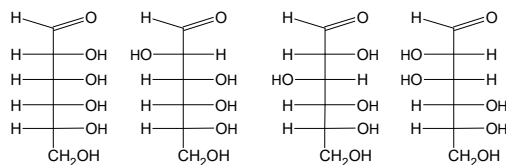
Zuoberst im Diagramm sind die ungefähren Bereiche der Banden angegeben. Darunter finden sich typische Verschiebungen für einzelne funktionelle Gruppen. Manchmal liegen die Signale allerdings auch ausserhalb dieser Bereiche liegen, in Einzelfällen sind die Verschiebungen recht überraschend.

All other carbonyl carbons: Carbonsäuren, Ester, Amide

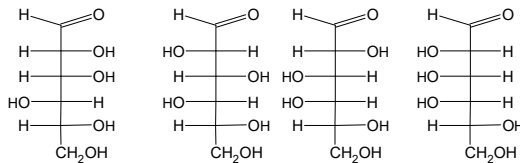
Ph-X: C-Atom in einer Phenyl-Gruppe, also in einem Benzolring. Bindet das C-Atom zudem ein H, liegt die Verschiebung typischerweise bei 110 bis 130 ppm, sonst bei 120 bis 150 ppm. Substituenten am Ring verändern die Verschiebung.

## Kohlenhydrate

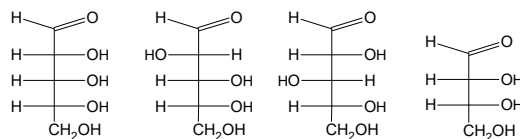
Fischer-Projektionen von Monosacchariden (Einfachzuckern): D-Aldosen und D-Ketosen



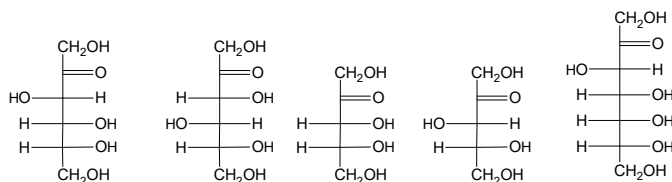
D-(+)-Allose    D-(+)-Altrose    D-(+)-Glucose    D-(+)-Mannose



D-(-)-Gulose    D-(-)-Idose    D-(+)-Galactose    D-(+)-Talose



D-(-)-Ribose    D-(-)-Arabinose    D-(+)-Xylose    D-(-)-Erythrose



D-(-)-Fructose    D-(+)-Sorbitose    D-(+)-Ribulose    D-(+)-Xylulose    D-Sedoheptulose

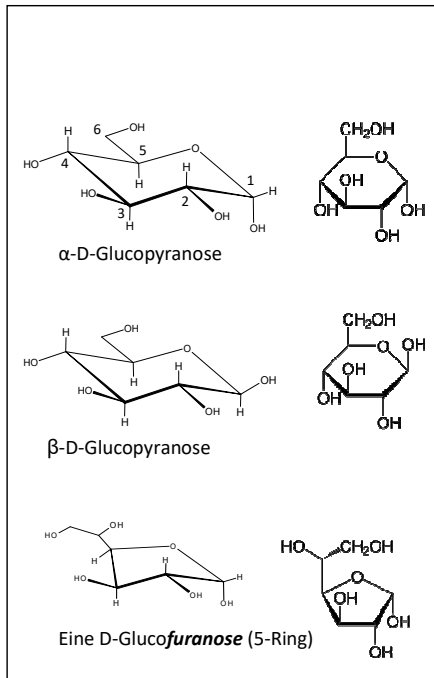
Molare Massen:

Tetrosen:  $M = 120.10 \text{ g/mol}$  (Erythrose)

Pentosen:  $M = 150.13 \text{ g/mol}$  (Ribose, Arabinose, Xylose, Ribulose, Xylulose)

Hexosen:  $M = 180.16 \text{ g/mol}$  (Zeilen 1-2, Fructose und Sorbose)

Heptosen:  $M = 210.18 \text{ g/mol}$  (Sedoheptulose)

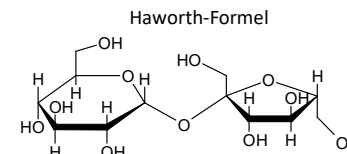
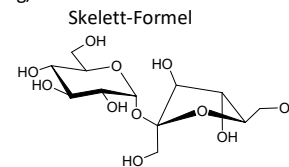


## Disaccharide (Zweifachzucker)

**Saccharose (Sucrose)**  $C_{12}H_{22}O_{11}$

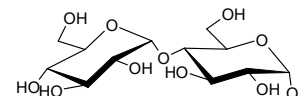
$O\text{-}\alpha\text{-D-Glucopyranosyl-(1}\rightarrow\text{2)-}\beta\text{-D-fructofuranosid} = \beta\text{-D-Fructofuranosyl-}\alpha\text{-D-glucopyranosid}$

$M = 342.30 \text{ g/mol}$



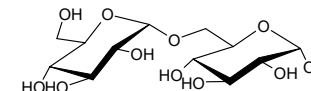
**Maltose**  $C_{12}H_{22}O_{11}$

$O\text{-}\alpha\text{-D-Glucopyranosyl-(1}\rightarrow\text{4)-D-glucose}$ ,  
2 Anomere,  $M = 342.30 \text{ g/mol}$



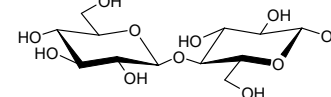
**Isomaltose**  $C_{12}H_{22}O_{11}$

$O\text{-}\alpha\text{-D-Glucopyranosyl-(1}\rightarrow\text{6)-D-glucose}$ ,  
2 Anomere,  $M = 342.30 \text{ g/mol}$



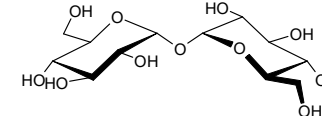
**Cellobiose**  $C_{12}H_{22}O_{11}$

$O\text{-}\beta\text{-D-Glucopyranosyl-(1}\rightarrow\text{4)-D-glucose}$ ,  
2 Anomere,  $M = 342.30 \text{ g/mol}$



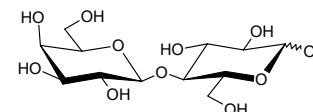
**Trehalose**  $C_{12}H_{22}O_{11}$

$O\text{-}\alpha\text{-D-Glucopyranosyl-(1}\rightarrow\text{1)-}\alpha\text{-D-glucose}$ ,  
 $M = 342.30 \text{ g/mol}$



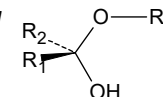
**Lactose (Milchzucker)**  $C_{12}H_{22}O_{11}$

$D\text{-Galactopyranosyl-}\beta\text{-(1}\rightarrow\text{4)-D-glucopyranose}$   
2 Anomere

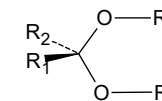


## Funktionelle Gruppen bei Sacchariden

**Halbacetal  
oder  
Halbketal**



**Acetal  
oder  
Ketal**



**Halbacetale** stehen in wässriger Lösung im Gleichgewicht mit einem Alkohol ( $R_3\text{-OH}$ ) und einer Carbonyl-Gruppe ( $R_1R_2C=O$ ), stellen also gewissermassen versteckte Carbonylgruppen dar.

**Anomeres C-Atom:** Dasjenige C-Atom, dass in der offenkettigen Form die Carbonylgruppe trägt und in den Ring-Formen als Halbacetal oder Acetal vorliegt, heisst anomeres C-Atom (hier unterscheiden sich die verschiedenen Anomere der Zucker, siehe Glucose) und erhält die **Nummer 1** (Nomenklatur).

**Glycosidische Bindung:** Glycosidische Bindungen sind Bindungen zwischen einem anomeren C-Atom in einem ringförmigen Zucker und einem Heteroatom eines anderen Zuckermoleküls oder eines sonstigen Teilchens. Ist das Heteroatom des anderen Teilchens ein O-Atom, liegt ein Acetal vor. Das Heteroatom

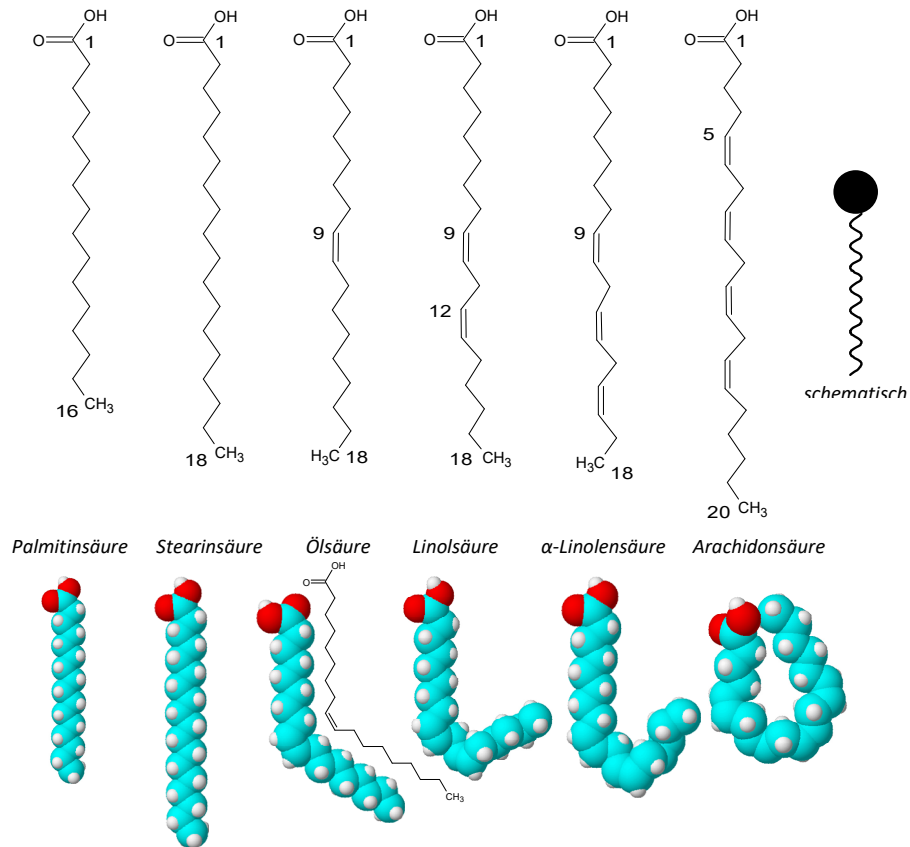
## Lipide

**Lipide** (gr. *lipos* = **Fett, Öl**) sind Stoffe,

- ... die aus Lebewesen stammen
- ... die recht unterschiedliche Molekülstrukturen und Funktionen besitzen
- ... die praktisch unlöslich in Wasser sind
- ... die gut löslich in organischen hydrophoben Lösungsmitteln sind (wie z.B. Benzen, Hexan, ...)

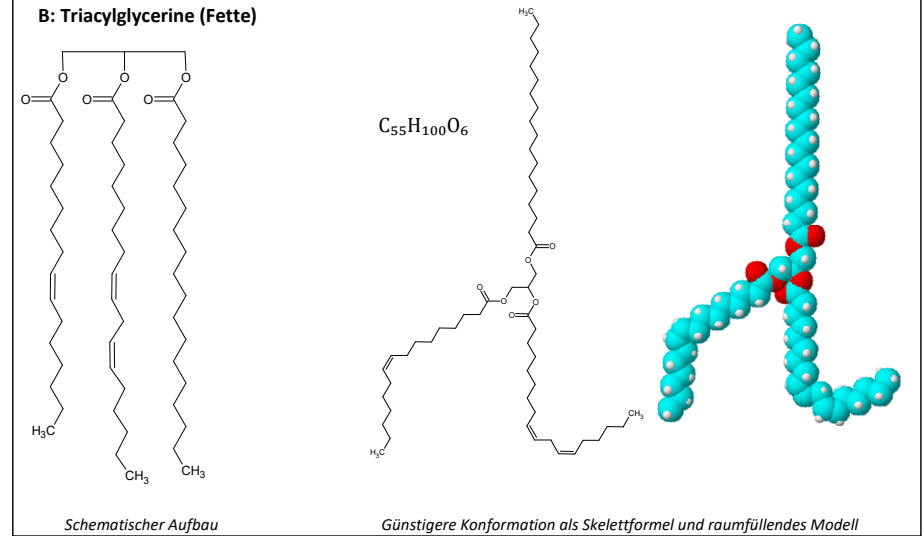
Es gibt eine Reihe von Lipiden. Besonders wichtig sind folgende Gruppen: Freie Fettsäuren, Triacylglycerine (auch Fette oder Neutralfette), Glycerophospholipide (= Phosphoglyceride) und Cholesterin.

### A: Freie Fettsäuren:



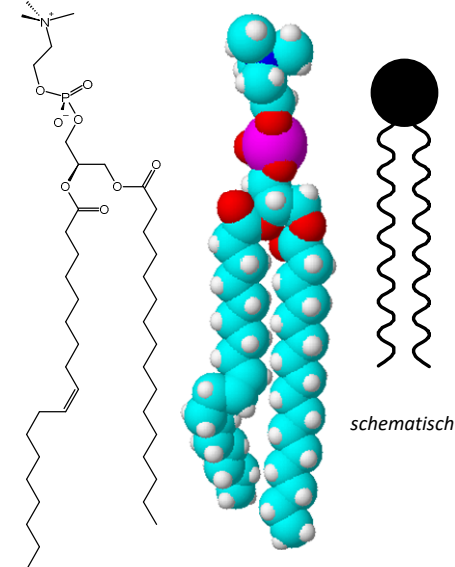
Trivialname	Systematischer Name	Schmelzpunkt (°C)	M (g/mol)
Palmitinsäure	Hexadecansäure	63.1	256.43
Stearinsäure	Octadecansäure	69.6	284.48
Ölsäure	(9Z)-Octadec-9-ensäure	13.4	282.46
Linolsäure	(9Z,12Z)-Octadec-9,12-diensäure	-9	280.45
α-Linolensäure	(9Z,12Z,15Z)-Octadec-9,12,15-triensäure	-17	278.43

### B: Triacylglycerine (Fette)



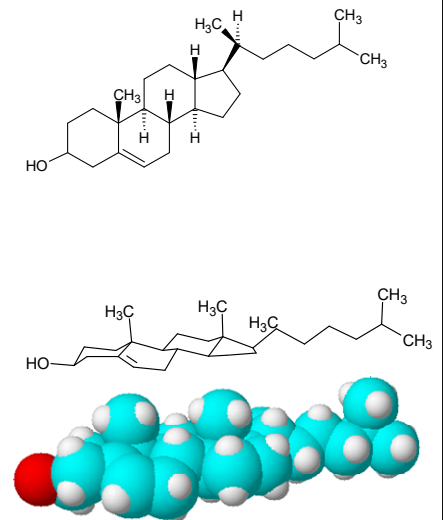
### C: Glycerophospholipide (= Phosphoglyceride)

z.B. POPC (2-Oleoyl-1-palmitoyl-sn-glycero-3-phosphocholin, C<sub>42</sub>H<sub>83</sub>NO<sub>8</sub>P, M = 761.08 g/mol)



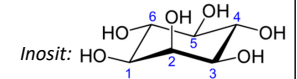
### D: Cholesterin (ein einziger Stoff)

C<sub>27</sub>H<sub>46</sub>O, M = 386.67 g/mol



Glycerophospholipide können verschiedene hydrophile Gruppen enthalten: Ester der Phosphatgruppe mit:

- ⇒ Cholin (HO-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-N(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub><sup>+</sup>) (Phosphatidylcholine = wichtige Komponenten von Lecithin)
- ⇒ Ethanolamin (HO-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-NH<sub>2</sub>) (Phosphatidylethanolamine)
- ⇒ Serin (Siehe Aminosäuren) (Phosphatidylserin)
- ⇒ C1 von Inosit (=Inositol, siehe Abbildung) (Phosphatidylinositol)
- ⇒ Verschiedenen Einfach- oder Mehrfachzuckern



## L-Aminosäuren

Strukturen (Fischer-Projektion) der gewöhnlichen L-Aminosäuren, ihre Abkürzungen, molare Masse als Eiweiss-Baustein mittlere Häufigkeit und pK<sub>s</sub>-Werte ionisierbarer funktioneller Gruppen.<sup>1</sup>

Name Symbole Summen- Formel	Lewis-Formel (Fischer-Projektion)	Molare Masse als Eiweiss- Bestandteil	Durchschnittl. Häufigkeit in Proteinen In %	pK <sub>1</sub> COOH- Gruppe	pK <sub>2</sub> NH <sub>3</sub> <sup>+</sup> - Gruppe	pK <sub>3</sub> Seitenkette
--------------------------------------	-----------------------------------	---	--	------------------------------------	---	--------------------------------

### Aminosäuren mit hydrophoben Seitenketten

Glycin Gly G C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>		57.0 g/mol	6.8	2.35	9.78	
Alanin Ala A C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>		71.1 g/mol	7.6	2.35	9.87	
Valin Val V C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub>		99.1 g/mol	6.6	2.29	9.74	
Leucin Leu L C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> NO <sub>2</sub>		113.2 g/mol	9.5	2.33	9.74	
Isoleucin Ile I C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> NO <sub>2</sub>		113.2 g/mol	5.8	2.32	9.76	
Methionin Met M C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub> S		131.2 g/mol	2.4	2.13	9.28	
Prolin Pro P C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>2</sub>		97.1 g/mol	5.0	1.95	10.64	
Phenylalanin Phe F C <sub>9</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub>		147.2 g/mol	4.1	2.20	9.31	
Tryptophan Trp W C <sub>11</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		186.2 g/mol	1.2	2.46	9.41	

### Aminosäuren mit hydrophilen ungeladenen Seitenketten

Serin Ser S C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>3</sub>		87.1 g/mol	7.1	2.19	9.21	
Threonin Thr T C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>3</sub>		101.1 g/mol	5.6	2.09	9.10	
Asparagin Asn N C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		114.1 g/mol	4.3	2.14	8.72	
Glutamin Gln Q C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		128.1 g/mol	3.9	2.17	9.13	
Tyrosin Tyr Y C <sub>9</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>3</sub>		163.2 g/mol	3.2	2.20	9.21	10.46
Cystein Cys C C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub> S		103.1 g/mol	1.6	1.92	10.70	8.37

### Aminosäuren mit hydrophilen, oft geladenen Seitenketten (Abbildung zeigt jeweils geladene Form).

Lysin Lys K C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		128.2 g/mol	6.0	2.16	9.06	10.54
Arginin Arg R C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> N <sub>4</sub> O <sub>2</sub>		156.2 g/mol	5.2	1.82	8.99	12.48
Histidin <sup>2</sup> His H C <sub>6</sub> H <sub>9</sub> N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>		137.1 g/mol	2.2	1.80	9.33	6.04
Asparaginsäure/ Aspartat Asp D C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>4</sub>		115.1 g/mol	5.2	1.99	9.90	3.90
Glutaminsäure/ Glutamat Glu E C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>4</sub>		129.1 g/mol	6.5	2.10	9.47	4.07

Angabe ist jeweils die **Summenformel der ungeladenen freien Aminosäure** sowie die **molare Masse des ungeladenen Eiweiss-Bausteins**. Die molare Masse der freien Aminosäure ist um 18.01 g/mol grösser, da bei der Spaltung von Eiweissen (Hydrolyse) pro Aminosäure ein Wassermolekül eingebaut wird.

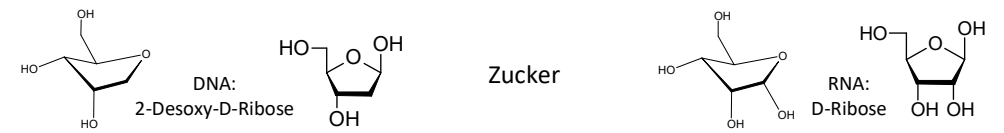
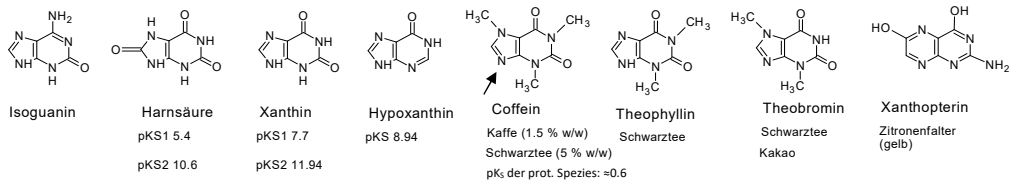
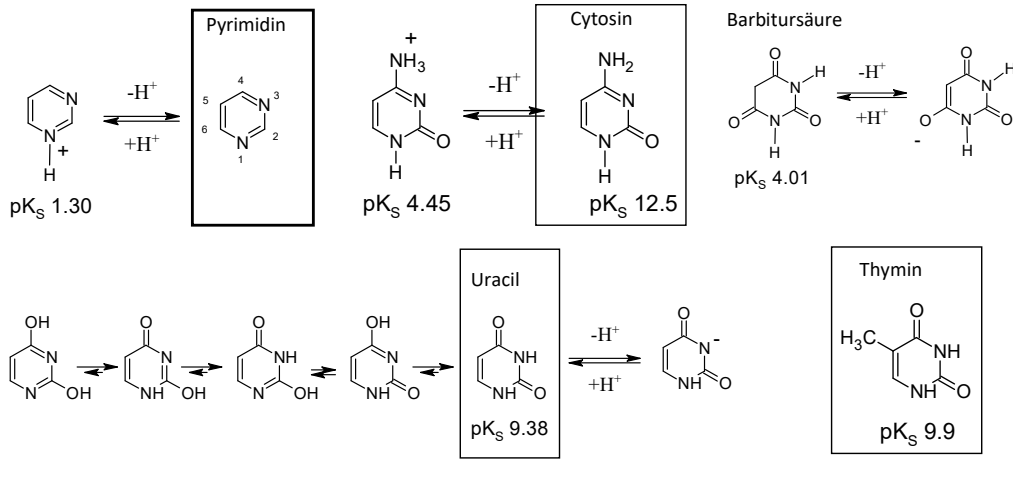
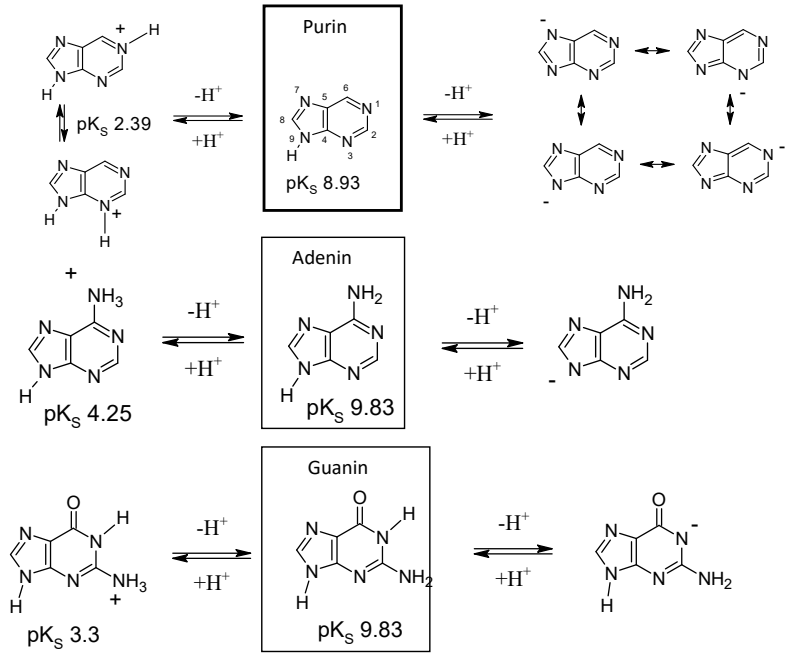
In Aminosäuresequenzen steht das Symbol X für eine beliebige Aminosäure, Z entweder für Glutamin oder Glutarsäure.

<sup>2</sup> Bei neutralem pH-Wert kommt sowohl ungeladenes als auch protoniertes Histidin vor. Die Abbildung zeigt protoniertes Histidin, um zu zeigen, welches N-Atom Säure/Base-Reaktionen eingeht.

<sup>1</sup> Voet, D. und Voet, J. G., *Biochemistry* (3rd ed.), Wiley & Sons (2004). S. 67.

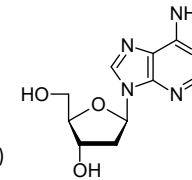
## Grundbausteine der Nukleinsäuren

## Nucleobasen und ähnliche Stoffe



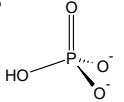
## Nukleotide

**DNA-Nucleosid**  
(Desoxyadenosin)

**Nucleoside:**

(Desoxy)-Adenosin ( $\text{pK}_s$  3.52)  
(Desoxy)-Guanosin ( $\text{pK}_s$  9.16)  
(Desoxy)-Cytidin ( $\text{pK}_s$  4.11)  
Desoxy-Thymidin\* ( $\text{pK}_s$  9.8)  
Uridin \*\* ( $\text{pK}_s$  9.17)  
\* nur DNA      \*\* nur RNA

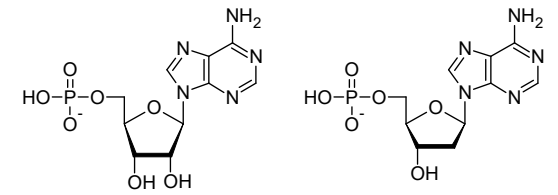
## Phosphat-Spezies



## Nukleotide

**Links: RNA-Nucleotid**  
(Adenosin-Monophosphat, dAMP)

**Rechts: DNA-Nucleotid**  
(Desoxyadenosin-Monophosphat, AMP)

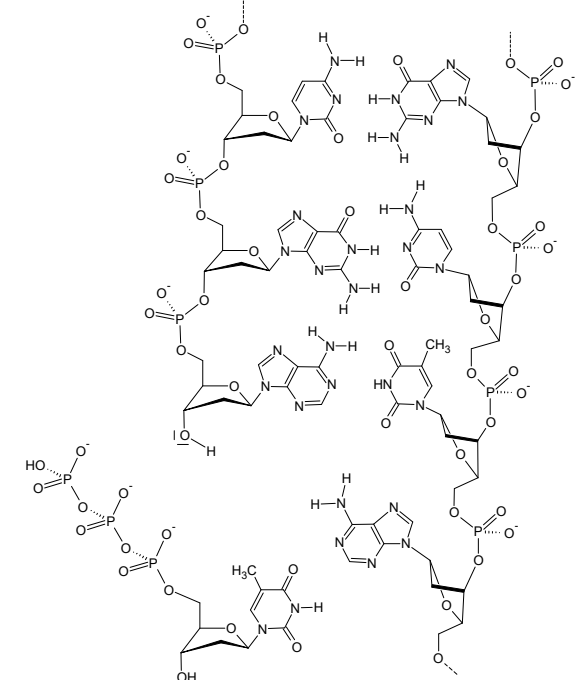
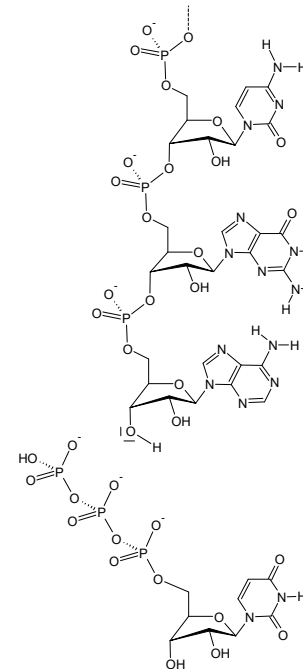


## RNA-Einzelstrang

RNA (Ribonucleic acid),  
RNS (Ribonucleinsäure)

## DNA-Doppelstrang

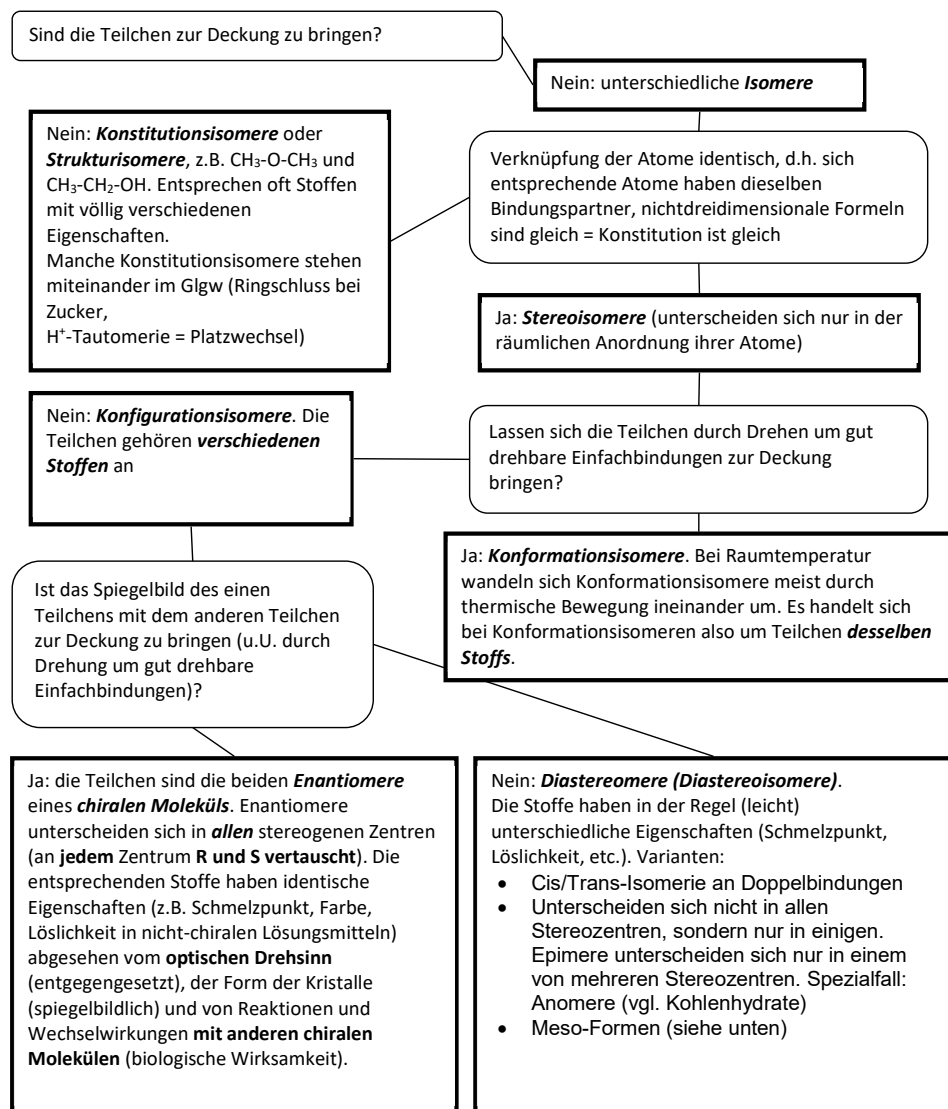
DNA (Deoxyribo-nucleic acid,  
DNS: Desoxyribo-Nukleinsäure)



## Isomerie

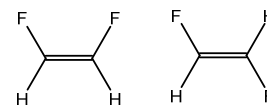
Isomere sind Teilchen, die dieselbe Summenformel haben (z.B.  $C_2H_6O$ ), bei denen aber die Atome unterschiedlich verknüpft oder räumlich anders angeordnet sind.

Man unterscheidet eine Reihe verschiedener Arten von Isomeren:



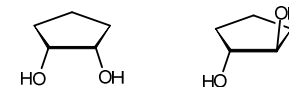
## (E)-(Z)-Isomerie: Konfigurationsisomerie an Doppelbindungen

Doppelbindungen sind unter normalen Umständen nicht drehbar. Tragen die Atome an einer Doppelbindung unterschiedliche Substituenten, so ergeben sich daher zwei Diastereoisomere. Sind die beiden wichtigsten Substituenten auf derselben Seite der Doppelbindung (d.h. auf derselben Seite einer Ebene, die durch die C-Atome der Doppelbindung geht und senkrecht auf der Molekülebene steht), so spricht man vom **(Z)-Isomer** (von zusammen), liegen die beiden wichtigeren Substituenten auf entgegengesetzten Seiten, spricht man vom **(E)-Isomer** (von entgegen). Welches der wichtigste Substituent ist, bestimmt man im Zweifelsfall anhand der Cahn-Ingold-Prelog-Regeln. Manchmal bezeichnet man das (Z)-Isomer aus als **cis-Isomer**, das (E)-Isomer als **trans-Isomer**. Beispiel: Links Maleinsäure = (Z)-Butendisäure (bzw. *cis*-Butendisäure) und rechts Fumarsäure = (E)-Butendisäure (bzw. *trans*-Butendisäure).



## cis-trans-Isomerie: Konfigurationsisomerie an Ringen

Bei cyclischen Verbindungen stehen beim *cis*-Isomer zwei Substituenten auf derselben Seite der Ringebene, bei *trans*-Isomeren stehen sie auf verschiedenen Seiten. Beispiel: links: *cis*-1,2-Dimethylcyclopentan und rechts: *trans*-1,2-Dimethylcyclopentan.

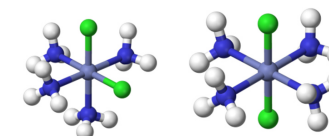
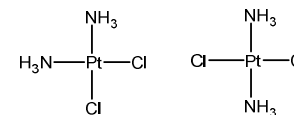


## Spezialfall: cis-trans-Isomerie bei Komplexen

Auch bei Komplexen stehen sich bei *trans*-Isomeren Liganden gegenüber, bei *cis*-Isomeren stehen sie auf derselben Seite.

*Cis*-Platin-Komplex und *Trans*-Platin-Komplex

*cis*-[Co(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub>]<sup>+</sup> und *trans*-[Co(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub>]<sup>+</sup>



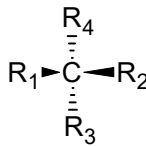
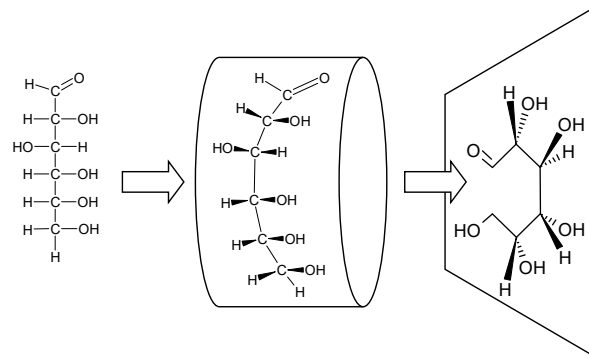


## Darstellung der genauen räumlichen Struktur (absolute Konfiguration)

### Darstellung der dreidimensionalen Struktur von Molekülen

Die dreidimensionale Struktur (absolute Konfiguration) von Molekülen kann beispielsweise mit Keil/Strich-Formeln dargestellt werden.

Auch mit der Fischer-Projektion werden absolute Konfigurationen dargestellt. In der Fischer-Projektion werden die C-Atome in einer Kette von oben nach unten dargestellt, wobei in der Regel das **am stärksten oxidierte O-Atom zuoberst** steht. Die Substituenten werden so arrangiert, dass an jedem Atom der C-Kette die senkrechten Bindungen nach hinten gerichtet sind, die waagrechten nach vorne. Folgende Abbildung zeigt links Glucose in der Fischerprojektion, rechts die Geometrie des Moleküls in der Keil/Strich-Schreibweise.



### Beschreibung der absoluten Konfiguration

Zur genauen Beschreibung der absoluten Konfiguration verwendet man die Cahn-Ingold-Prelog-Regeln (siehe unten). Will man hingegen nur zwei Enantiomere unterscheiden, kann man das auch in folgender Weise tun:

### Bezeichnung von Enantiomeren

#### Stereodeskriptoren D und L

Mit den Stereodeskriptoren D und L wird angegeben, ob in der Fischer-Projektion am untersten stereogenen Zentrum der wichtigste Substituent nach rechts (D) (lat. dexter = rechts) oder links (L) schaut (lat. laevus = links). D- und L-Form sind stets zusammengehörige Enantiomere

#### Bezeichnungen für die optische Aktivität: (+) und (-)

Enantiomere sind optisch aktiv, sie drehen also die Polarisationssebene des polarisierten Lichts, wobei verschiedene Enantiomere das Licht um den gleichen Betrag, aber in entgegengesetzter Richtung drehen.

(+)-Enantiomere drehen die Polarisationssebene **im Gegenuhrzeigersinn**, also im mathematisch positiven Drehsinn, für die **Blickrichtung in Richtung des Strahls**, also für einen Betrachter, der von der Lichtquelle weg schaut, dem Strahl hinterher. Man spricht von einem rechtsdrehendem Enantiomer (es ist rechtsdrehend, wenn man in umgekehrter Richtung schaut, also in Richtung der Lichtquelle). (-)-Enantiomere («linksdrehende Form») hingegen drehen das Licht im Uhrzeigersinn, wenn mit dem Strahl schaut. Treten in einer Probe beide Enantiomere gleich häufig auf, wird das polarisierte Licht nicht gedreht und man spricht von einem **Racemat**.

## Eindeutige Beschreibung von Konfigurationsisomeren

Mit Hilfe der so genannten Cahn-Ingold-Prelog-Konvention lassen sich unterschiedliche Anordnungen von Substituenten (absolute Konfiguration) an stereogenen Zentren eindeutig beschreiben. Für jedes stereogene Zentrum wird unabhängig der Stereodeskriptor (R oder S) bestimmt. *R* für rechtsdrehend ist die Abkürzung von lateinisch *rectus* (rechts) und *S* für linksdrehend von lateinisch *sinister* (links).

- An jedem stereogenen Zentrum wird die Ordnung der Substituenten bestimmt, d.h. die Substituenten werden nach absteigender Priorität nummeriert.
  - Zuerst werden die direkten Bindungspartner des stereogenen Atoms betrachtet (1. Sphäre). Je höher die Ordnungszahl des Atoms, desto höher ist seine Priorität, desto kleiner also die Nummer. Das Atom mit der höchsten Priorität erhält die Ziffer 1, dasjenige mit der zweiten Priorität die Ziffer 2, etc.
  - Haben mehrere Bindungspartner dieselbe Ordnungszahl, so hat der Substituent mit der höheren Masse die höhere Priorität (massereicheres Isotop)
  - Ist auch jetzt die Prioritäten-Reihenfolge noch nicht klar, so werden die Bindungspartner der Bindungspartner verglichen (2. Sphäre), also Atome, die zwei Elektronenpaarbindungen vom ursprünglichen Atom entfernt sind. Auf jeder Seite werden die Bindungspartner nach absteigender Ordnungszahl (und dann Masse) sortiert und dann, beginnend mit der höchsten, verglichen, bis es einen Unterschied gibt. Dasjenige Atom erhält die höchste Priorität, dessen Bindungspartner wiederum die höhere Priorität aufweist. Dabei werden Doppel und Dreifachbindungen so behandelt, als ob das jeweilige Atom bzw. Molekülteil doppelt bzw. dreifach vorhanden wäre. Ausnahme: Doppelbindungen zwischen Heteroatomen mit einem Heteroatom ab der dritten Periode betrachtet man als Einfachbindungen, so z.B. P=O.
  - Bei stereochemischen Unterschieden gilt zudem: Z hat höhere Priorität als E, cis höhere als trans, R höhere als S.
  - Gegebenenfalls muss das Verfahren rekursiv jeweils am Atom mit der höchsten Priorität wiederholt werden.
- Dann wird die so genannte Zählrichtung oder Drehrichtung der Struktur bestimmt: Der Substituent mit der niedrigsten Priorität 4 wird unter die Bildebene gestellt (als wäre Substituent 4 ein Stiel, an dem man die Blume hält und von oben betrachtet). Folgen sich nun die Substituenten 1, 2, 3 im Uhrzeigersinn, so liegt eine (*R*)-Konfiguration vor (Den Bogen im Buchstaben R schreibt man in Uhrzeigerrichtung), folgen sich die Substituenten hingegen im Gegenuhrzeigersinn, liegt die (*S*)-Form vor (den oberen Bogen des Buchstabens S schreibt man in Gegenuhrzeigerrichtung).

Die Beschreibung der dreidimensionalen Struktur mit den Stereodeskriptoren D und L oder R und S sind redundant: aus der einen Bezeichnung kann man stets die Keil/Strichformel konstruieren und daraus die andere Bezeichnung ableiten. Hingegen kann man aus der Keil/Strichformel den optischen Drehsinn nicht direkt ableiten und daher nicht folgern, ob die (+) oder (-)-Form vorliegt.

### Prochiralität

Prochirale Zentren können in einem einzigen Reaktionsschritt in ein stereogenes Zentrum umgewandelt werden:

Beispiele:

- Ein asymmetrisches Keton wird durch ein Nukleophil angegriffen
- Ein C-Atom trägt zwei gleichartige OH-Gruppen, von denen eine in einer Kondensations-Reaktion umgewandelt werden kann.

Daten zur Erde

Erde <sup>(1), (2)</sup>

Radius der Erde	Äquator: 6378 km	Pol: 6357 km
Oberfläche der Erde	510 ·10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	
	davon: Landfläche: 149 ·10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> (29.3%)	
	Wasserfläche: 361 ·10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> (70.8%)	
Durchschnittliche Oberflächentemperatur	14°C	
Mittlere Dichte	5.515 g/cm <sup>3</sup>	

Massen:		
Gesamte Erde:	5.9742·10 <sup>24</sup> kg	
Atmosphäre:	5.14·10 <sup>18</sup> kg (1.78·10 <sup>20</sup> mol Gasmoleküle)	
Stratosphäre:	0.5·10 <sup>18</sup> kg	
Ozeane:	1.4·10 <sup>21</sup> kg	
Wasser in der Atmosphäre:	1.3·10 <sup>16</sup> kg	
Gewässer:		
Volumen der Ozeane	1370·10 <sup>15</sup> m <sup>3</sup>	
Durchschnittliche Ozeantiefe:	3740 m	
Eis	29·10 <sup>15</sup> m <sup>3</sup>	
Grundwasser (etwa die Hälfte über 1 km Tiefe)	8.3·10 <sup>15</sup> m <sup>3</sup>	
Süßwasserseen	0.125·10 <sup>15</sup> m <sup>3</sup>	

Zusammensetzung: Anteile in Massen%	Erdkruste (ca. 40 km tief)	Erdmantel (ca. bis 2900 km tief)	Erdkern
O	46.6	44.8	4.1
Si	27.7	21.5	7.4
Al	8.1	2.2	
Fe	4.7	5.8	79.4
Ca	3.6	2.3	
Na	2.8	0.3	
K	2.6	0.03	
Mg	2.1	22.8	
Titan	0.4		
Wasserstoff	0.1		
Nickel			4.9
Schwefel			2.3

Zusammensetzung Meerwasser

Chemische Zusammensetzung  
Durchschnittliches Meerwasser hat eine Salinität von 3.5 ‰ (3.5 Massen% Salze), eine Dichte von 1020 bis 1030 kg·m<sup>-3</sup>, einen pH zwischen pH 7.5 und pH 8.4 und eine Ionenstärke von 0.70.

Durchschnittliche Zusammensetzung von Meerwasser bei einer Salinität von 3.5‰

	Konz ppm = mg/kg	Anteil an Salinität ‰	mmol/ kg		Konz ppm = mg/kg	Anteil an Salinität ‰	mmol/ kg
Cl <sup>-</sup>	19345	55.03	546	Na <sup>+</sup>	10752	30.59	468
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2701	7.68	28.1	Mg <sup>2+</sup>	1295	3.68	53.3
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	145	0.41	2.34	Ca <sup>2+</sup>	416	1.18	10.4
Br <sup>-</sup>	66	0.19	0.83	K <sup>+</sup>	390	1.11	9.97
BO <sub>3</sub> <sup>3-</sup>	27	0.08	0.46	Sr <sup>2+</sup>	13	0.04	0.091
F <sup>-</sup>	1	0.003	0.068				

Bakterien und Viren im Süßwasser  
Ein Milliliter Süßwasser (See) enthält in grober Näherung 10<sup>6</sup> Bakterien und 10<sup>9</sup> Viren.

Atmosphäre <sup>(2), (3)</sup>  
Insgesamt enthält die Atmosphäre der Erde 1.78·10<sup>20</sup> mol Gas. Die Gesamtmasse beträgt ohne Wasser 5.135·10<sup>18</sup> kg und mit Wasser 5.148·10<sup>18</sup> kg.  
Zusammensetzung:

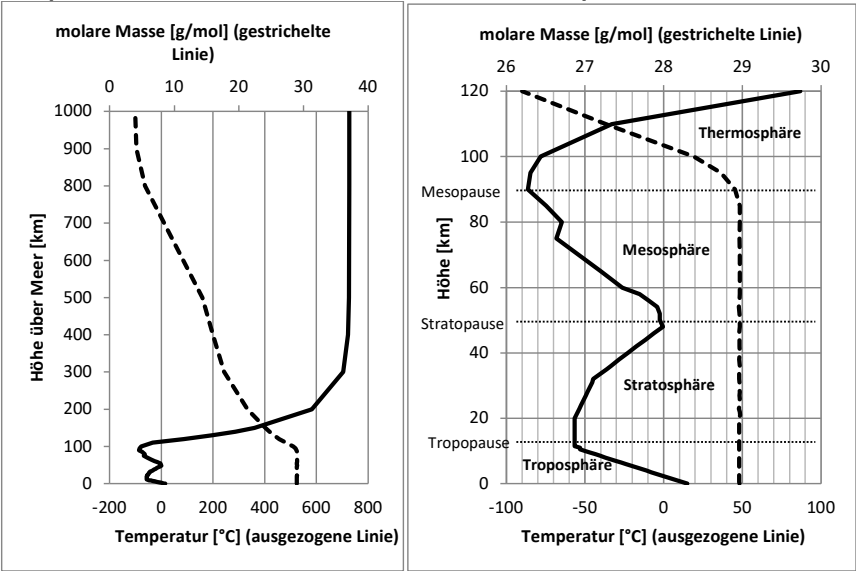
	T <sub>Oberfl</sub>	p <sub>Oberfl</sub>	Molare Anteile								
Planet	[K]	[bar]	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>	He	Ar	Ne	CO
Merkur	440	2·10 <sup>-15</sup>			42%		22%	6%			
Venus	730	90	96.4%	3.5%	69 ppm	20 ppm			70 ppm		20 ppm
Erde	288	1.0	0.038%*	78.08%	20.94%	0.3%	0.5 ppm	5.2 ppm	0.93 %	18 ppm	0.05..0.2 ppm
Mars	218	0.0064	95.32%	2.7%	0.13%	0.021%			1.6%	3 ppm	0.08%
Jupiter	129						89.8%	10.2%			
Saturn	97						92.4%	7.4%			
Uranus	58						89%	11%			
Neptun	26						89%	11%			

T<sub>Oberfl</sub>: Durchschnittliche Oberflächentemperatur  
p<sub>Oberfl</sub>: Durchschnittlicher Oberflächendruck  
ppm: Parts per million, Millionstel. 0.1 ‰ = 1<sup>0</sup>/<sub>1000</sub> = 1000 ppm.  
\* CO<sub>2</sub>-Gehalt: 0.000'385 atm = 385 ppm im Jahr 2008; Ø jährl. Anstieg derzeit 2ppm, seit 1960: 1.4 ppm.

Weitere Komponenten:

Merkur: Natrium (29%), Kalium (0.5%) (wie Sauerstoff aus Oberfläche freigesetzt, während H<sub>2</sub> und He aus dem Sonnenwind stammen)  
Venus: SO<sub>2</sub> 150 ppm  
Erde: Methan (1.760 ppm), Krypton (1.140 ppm), Lachgas (0.317 ppm), Xenon (0.087 ppm).  
Mars: Methan 0.01 ppm, Formaldehyd 0.13 ppm. Diese Verbindungen werden in der dünnen Marsatmosphäre durch UV abgebaut und müssen daher ständig nachgeliefert werden.  
Jupiter: Methan (0.3 ‰), Ammoniak (260 ppm).

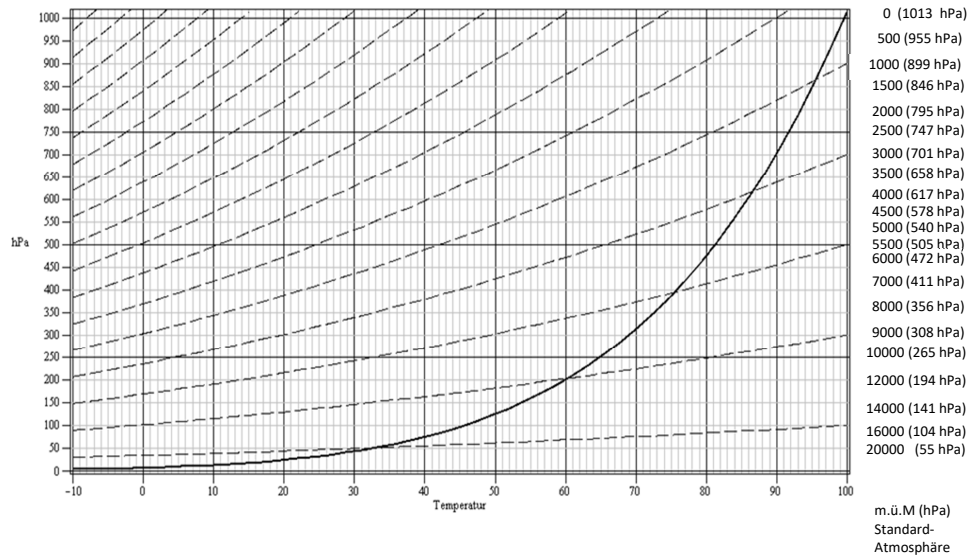
Temperatur und mittlere molare Masse der Erd-Atmosphäre



## Sättigungsdampfdruck über flüssigem Wasser

Ausgezogene Linie: Sättigungsdampfdruck über flüssigem Wasser. Rechts ist die Höhe über Meer angegeben, bei welcher die Luft in einer durchschnittlichen Atmosphäre den entsprechenden Druck hat (Ermittlung der Siedetemperatur).

Gestrichelt: Adiabaten (Isentropen) von trockener Luft (Temperatur- und Druckverlauf beim Ausdehnen oder Zusammendrücken ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung). Die Adiabaten von feuchter Luft oder reinem Dampf wären etwas steiler.



## Wassergehalt der Luft

Temperatur [°C]	-10	0	10		20	25	30	50	100
Max. Wassergehalt in Luft bei 100% rel. Luftfeuchtigkeit [g/m³]	2.36	4.85	9.40		17.3	23.0	30.3	82.8	588.4
Sättigungsdampfdruck über flüssigem Wasser [hPa = mbar]	2.866	6.112	12.28		23.39	31.69	42.45	123.45	1013.25
Sättigungsdampfdruck über Eis [hPa = mbar]	2.597	6.111							

## Barometrische Höhenformel für durchschnittliche Atmosphäre

Normdruck (Ø Meereshöhe):  $p_{\text{Norm}} = 1.013 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 1.013 \text{ bar} = 1013 \text{ mbar} = 1013 \text{ hPa} = 1.000 \text{ atm}$

$$p = p_0 \cdot 2^{-\frac{h}{5540 \text{ m}}} = p_0 \cdot 10^{-\frac{h}{18400 \text{ m}}}$$

h : Höhe über Meer im Metern.

p : Druck in der Höhe h.

$p_0$  : Druck auf Meereshöhe

5540m : Höhenunterschied, bei dem sich der Druck jeweils halbiert.

Die barometrische Höhenformel lässt sich aus der durchschnittlichen molaren Masse der Luft und der durchschnittlichen Temperatur der Atmosphäre berechnen:

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{Mgh}{RT}}$$

M : Durchschnittliche molare Masse der Luft in kg/mol

R : Universelle Gaskonstante

T : Durchschnittliche Temperatur der Atmosphäre in K.

## Nachgewiesene Energievorräte und Umsätze:

Jährlich eingestrahlte Sonnenenergie:	3'900'000 EJ
Weltweiter jährlicher technischer Energieumsatz	400 EJ
Weltweit förderfähige Energievorräte (Schätzungen von 2016):	
Gas unkonventionell (würde heute nicht gefördert)	33'000 EJ
Öl	9'000 EJ
Kohle	27'000 EJ
Uran (Nutzung in schnellen Brüttern ergäbe rund 60 mal mehr)	1'200 EJ

## Energiegehalt verschiedener Energieträger

Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck (Normdruck)

Wasser (l)	0°C	4.228 J g <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Eis	0°C	2.100 J g <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Wasser (l)	20°C	4.182 J g <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Wasserdampf	20°C	1.863 J g <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Wasser(l)	100°C	4.217 J g <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Stickstoff	20°C	1.038 J g <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>

**Brennstoffe (Verbrennung mit Sauerstoff) und Uran (Kettenreaktion)**

	Brennwert = - Verbrennungsenthalpie $\Delta H_c$			Heizwert (ohne Kondensation Wasser)		Spez. CO <sub>2</sub> -Emission (Reinstoffe: pro $\Delta H_c$ )
Brennstoff	$\text{kJ g}^{-1}$	$\text{kJ L}^{-1}$	$\text{kJ mol}^{-1}$	$\text{kJ g}^{-1}$	$\text{kJ L}^{-1}$	$\text{g CO}_2/\text{MJ}$
Buchenholz*	19	9'100		15	7200	109.6
Steinkohle	29-32.7	ca. 26'000		27-32.7	ca. 25'000	94.6
Graphit	32.8	72'160	-393.5	32.8	72'160	112
Magnesium	25.2		-601	25.2		0
Erdöl				42.8	33'400 - 42'800	73.3
Diesel, Heizöl	45.4	38'160		42	36'000	74.1
Benzin	47	35'600		43.6	33'000	69.3
n-Octan	47.5	33'300	-5430			64.9
Ethanol	29.7	23'445	-1367.6	26.8	21'000	64.3
Wasserstoff	143	11.7	288.9	120	9.9	0
Erdgas L	36 - 50	35 - 45		38	32-42	56.1
Methan	55.5	36.3	-890.7	50.0	32.7	49.4

Uran: Bei Kettenreaktion in konventionellem Reaktor freigesetzt  
In Brutreaktoren freigesetzt  
\* Lufttrocken, ca. 15% Wassergehalt, das Volumen bezieht sich auf locker geschichtetes Stückholz (Raummeter)

## Sonnenenergie

Jährlich durch die Sonne auf die Erde eingestrahlte Energie: rund  $3.9 \cdot 10^{24}$  J bzw.  $1,08 \cdot 10^{18}$  kWh.

	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	$\{\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}\}$	$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$
Leistung der Sonne pro Quadratmeter ausserhalb der Atmosphäre	43'200	{12'000}	1.367
Auftreffende Sonnenenergie, max. Sonneneinstrahlung, Mitteleuropa <i>UV+Sichtbar, 0 bis 780 nm</i>			0.8 - 1.0 0.57
Pro Jahr eingestrahlte Sonnenenergie <sup>3</sup>			
in der Region Zug	4'000	{1'100}	
im Wallis	5'000	{1'400}	
in Südsanien	6'800	{1'900}	
El. Leistung einer Photovoltaik-Anlage pro m <sup>2</sup> bei 14% Anlagewirkungsgrad,	Spitze Jahresertrag		0.14 (Spitze)
Jahresertrag Bioethanol aus Zuckerrohr	9.7 – 14.4	{2.7 – 4}	
Jahresertrag Holz	3.6	{1}	

- (1) Wenn die Sonne ununterbrochen scheinen würde, käme dieser Betrag zusammen.
- (2) Wenn die jährliche Energiemenge gleichmässig auf das ganze Jahr verteilt geleistet würde.

## Atmung und Gärung

### Netto-Reaktionsgleichungen:

*Glucose (alle Hexosen)*

Atmung:	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2$	$\rightarrow 6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$	ergibt 36 ATP	( $\Delta H^\circ_{\text{R}} = -2813 \text{ kJ/mol}$ )
Ethanolgärung:	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	$\rightarrow 2 \text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + 2 \text{CO}_2$	ergibt 2 ATP	( $\Delta G^\circ = -218 \text{ kJ/mol}$ )
Milchsäuregärung:	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	$\rightarrow 2 \text{CH}_3\text{-CHOH-COO}^- + 2 \text{H}^+$	ergibt 2 ATP	

*Veratmung anderer Stoffe:*

Palmitinsäure:	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	+ 23 O <sub>2</sub>	$\rightarrow 16 \text{CO}_2$	+ 16 H <sub>2</sub> O
Stearinsäure:	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$	+ 26 O <sub>2</sub>	$\rightarrow 18 \text{CO}_2$	+ 18 H <sub>2</sub> O
Ölsäure:	$\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$	+ 25.5 O <sub>2</sub>	$\rightarrow 18 \text{CO}_2$	+ 17 H <sub>2</sub> O
Glycerin-Tripalmitat:	$\text{C}_{51}\text{H}_{98}\text{O}_6$	+ 72.5 O <sub>2</sub>	$\rightarrow 51 \text{CO}_2$	+ 49 H <sub>2</sub> O
Glycerin:	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	+ 3.5 O <sub>2</sub>	$\rightarrow 3 \text{CO}_2$	+ 4 H <sub>2</sub> O

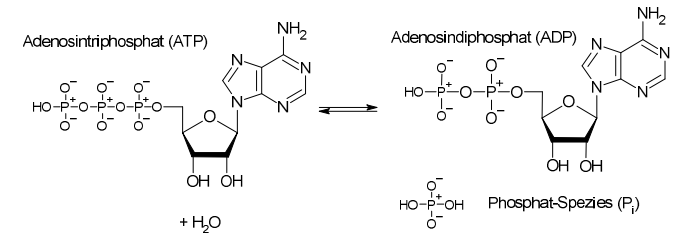
### Energieumsatz bei vollständiger Verbrennung / Veratmung<sup>4,5</sup>

Stoff	M [g/mol]	$\Delta G^\circ_{\text{verb}}$ (1) [kJ/mol]	Verbrennungs- enthalpie = Brennwert $\Delta H$ [kJ/mol]	Brennwert [kJ/g]	Brennwert [kJ/mol O <sub>2</sub> ] [kJ/L O <sub>2</sub> ] (3)	mol ATP pro mol Stoff im Körper	mol ATP pro mol O <sub>2</sub> im Körper
Glucose	180.16	-2864	-2813	-15.63	-469	(30-) 36	(5-) 6.0
Ethanol			-1367				
Milchsäure			-1344				
Palmitinsäure	256.42	-9791	-10'025	-38.79	-436	131	5.7
Stearinsäure	282.45		-11'278	-39.92	-433	148	5.7
Ölsäure	280.44		-11'106	-39.58	-436	148	5.8
Glycerin-Tripalmitat	807.33		-30'143	-37.34	-415	409	5.6
Glycerin	92.09		-1659	-18.02	-474	22	6.3
Kohlenhydrate Ø			-17.2		21.1		
Stärke, Glycogen			-17.51				
Cellulose			-17.47				
Fette Ø			-38.9		19.6		
Fettgewebe			-39.17				
Proteine Ø			17.2 (2)		18.8		

- (1)  $\Delta G^\circ$ : Änderung der freien Energie bei vollst. Verbrennung unter physiologischen Bedingungen
- (2) Physiologischer Brennwert mit Abbau nur bis zum Harnstoff (menschlicher Körper). Würde der Harnstoff auch noch veratmet, ergäben Proteine einen physikalischen Brennwert von 23 kJ/g. Bei Kohlenhydraten und Fetten sind physiologischer und physikalischer Brennwert identisch.
- (3) Bei 0°C und Standarddruck (molares Volumen 22.4 L/mol). Bei 37°C ergäbe sich: Kohlenhydrate 18.8 kJ/L O<sub>2</sub>, Fette 17.6 kJ/L O<sub>2</sub>, Proteine: 16.8 kJ/L O<sub>2</sub>

## ATP

Hydrolyse von ATP zu ADP und einer Phosphatspezies s:



Für die exergone (energieliefernde) Hinreaktion (Hydrolyse) gilt bei 37°C, pH 7 und Standardbedingungen<sup>6</sup>:

Freie Reaktionsenthalpie	$\Delta G^\circ_{\text{Hydrolyse}}$	= -30 kJ/mol (exergon);
Reaktionsenthalpie	$\Delta H^\circ_{\text{Hydrolyse}}$	= -20 kJ·mol <sup>-1</sup> (exotherm),
Reaktionsentropie	$\Delta S^\circ_{\text{Hydrolyse}}$	= +34 J·K <sup>-1</sup> ·mol <sup>-1</sup>

Unter *physiologischen* Bedingungen beträgt  $\Delta G_{\text{R}}$  der Hydrolyse etwa  $\Delta G_{\text{R}} = -50 \text{ kJ/mol}$ <sup>7</sup> (-46 bis -54 kJ/mol), da [ATP] und [ADP] viel kleiner als 1 mol/L, da [ATP]>[ADP], auch in Abhängigkeit von [H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>] und [Mg<sup>2+</sup>].

<sup>4</sup> Heldmaier, Gerhard, und Neuweiler, Gerhard: *Vergleichende Tierphysiologie, Band 2, Vegetative Physiologie*, Springer (2004), S. 29ff

<sup>5</sup> Silbernagl, Stefan und Despopoulos, Agamemnon: *Taschenatlas der Physiologie*, Thieme (2003), S 228

<sup>6</sup> Atkins, P.W: *Physical Chemistry* (6<sup>th</sup> Edition), Oxford University Press (1998) Seite 237

<sup>7</sup> Voet, D. und Voet, J. G., *Biochemistry* (3rd ed.), Wiley & Sons (2004), S. 567.

<sup>3</sup> <http://www.meteonorm.com/pages/de/downloads/karten.php?lang=DE>

## Menschlicher Körper: Umsatz und Energiespeicher

Ungefährer Umsatz bei erwachsenen Menschen

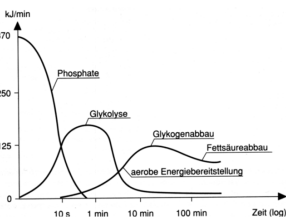
Grundumsatz	7 MJ/d	= 80 W	
Körperliche Arbeit	11 MJ/d	= 127 W	
Schwerstarbeit	♀ 15 MJ/d	= 175 W	♂ 20 MJ/d = 230 W
Hochleistungssportler über 2 Stunden		1600 W	
Ein Körper konsumiert ruhend ca. 0.1 kW, schwer arbeitend 0.4 kW und leistet dabei 0.1 kW Arbeit.			

Energiespeicher, ihre Kapazität und Anteile am Energiestoffwechsel

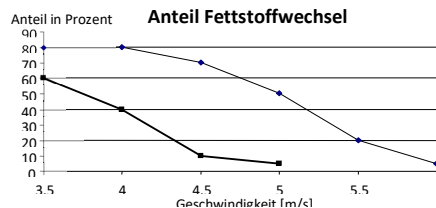
Energiespeicher einer Person (75 kg) und daraus berechnete Zeitdauer bis zum vollständigen Verbrauch bei

**Grundumsatz (5.25 kJ/min = 87.5 W) und 17 km/h Dauerlauf (60 kJ/min = 1000 W = 3600 kJ/h):**

Energiehaltige Substanz	Totaler Vorrat im Körper in kJ	Totaler Vorrat im Körper in kcal	Theoret. Dauer bis zum vollst. Verbrauch bei Grundumsatz	Theoret. Dauer bis zum vollst. Verbrauch bei Laufen mit 17 km/h (flottes 12-Minutenlauf-Tempo)
ATP	6.3	1.5	1 min	6 sec
Kreatinphosphat	14.7	3.5	3 min	15 sec
Glykogen	5040 [Nutzbar: 3000]	1200	16 h [9.5 h]	1.4 h [50 min]
Fett	210000	50000	1 Monat	2.5 Tage



Energiebereitstellung im menschlichen Körper bei maximaler Beanspruchung in Abhängigkeit der Zeit. Bei der Glycolyse wird zunächst Lactat gebildet, das in Herz und Leber verstoffwechselt wird, bis die aerobe Energiebereitstellung einsetzt.



Anteil des Fettstoffwechsels an der gesamten Energiebereitstellung bei verschiedenen Lauf-geschwindigkeiten von 3.5 (12.6 km/h) bis 6 m/s (21.6 km/h) bei Untrainierten (untere Kurve) und Leistungssportlern (obere Kurve). 17 km/h entsprechen 4.7 m/s.

## Körperflüssigkeiten

Die **Pufferkapazität** des Blutes beträgt bei pH 7.4 rund 75 mmol·L<sup>-1</sup>·(ΔpH)<sup>-1</sup>. Davon macht das H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> System etwa 75% aus. Obwohl sein pK<sub>s</sub> mit 6.1-6.4 ungünstig ist, spielt dieses Puffersystem doch eine herausragende Rolle, weil CO<sub>2</sub> abgeatmet wird. Die Pufferbasenkonzentration des Blutes beträgt etwa 48 mval/L, also 48 mol Pufferbasen pro Liter (vgl. unten: 46 mmol/L im Blut total, 60 mmol/L im Plasmawasser).

	Zellplasma mmol/L	Interstitium mmol/kg ≈ mmol/L	Blutplasma mmol/L	Plasmawasser mmol/L
<b>Kationen</b>				
H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	10 <sup>-4</sup> (pH 7)	(1)	4·10 <sup>-5</sup> (pH 7.4)	(1)
K <sup>+</sup>	140-160	(1)	4.4-4.5	(1)
Na <sup>+</sup>	7-12	(1)	144	(1)
Ca <sup>2+</sup>	10 <sup>-5</sup> bis 10 <sup>-4</sup>	(1)	1.3	(1)
Mg <sup>2+</sup>	0.8	0.45	0.5 (frei)	
<b>Anionen</b>				
Cl <sup>-</sup>	3-7	(1)	114	(1)
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10	(1)	27-28	(1)
Phosphat-Spezies	Ca. 30	(2)	2.3	(2)
Proteine	Ca. 54	(2)	0.4	(2)
Sonstige Anionen (3)	Ca. 54	(2)	6.2	(2)
<b>Moleküle, sonstiges</b>				
Glucose			5	
Harnstoff			5	
Kreatinin			0.1	
CO <sub>2</sub>			Venös: 5.8 ± 0.9 kPa Arteriell: 5.4 ± 0.7 kPa	
O <sub>2</sub>			Venös: 5.35 ± 0.55 kPa Arteriell: 11.7 ± 2.2 kPa	

(1) Maximum jeweils „effektive Konzentration“, vermutlich Aktivität, in mmol/kg = mmol/L.

(2) mval/L, also mmol Elementarladungen pro L.

(3) z.B. Bisphosphoglycerat

## Glycolyse

(4) Teilchen und Freie Reaktionsenthalpie unter physiologischen Bedingungen<sup>8</sup>

	<b>Glucose</b>	
	<b>Glucose-6-phosphat (G6P)</b>	ATP → ADP Hexokinase (HK) ΔG = -27.2 kJ/mol
	<b>Fructose-6-phosphat (F6P)</b>	↕ Phosphoglucose-isomerase (PGI) ΔG = -1.4 kJ/mol
	<b>Fructose-1,6-bisphosphat (FBP)</b>	ATP → ADP Phosphofructo-kinase (PFK) ΔG = -25.9 kJ/mol
	<b>Glyceraldehyd-3-phosphat (GAP) und Dihydroxyacetonphosphat (DHAP)</b>	↕ Aldolase ΔG = -5.9 kJ/mol
	<b>1,3-Bisphosphoglycerat (1,3-BPG)</b>	P <sub>i</sub> + NAD <sup>+</sup> → NADH + H <sup>+</sup> Triosephosphat-Isomerase (TIM) DHAP=GAP; ΔG = negativ Glycerinaldehyd-3-Phosphat dehydrogenase (GAPDH)
	<b>3-Phosphoglycerat (3PG)</b>	ADP → ATP Phosphoglycerat-kinase (PGK) ΔG(GAPDH+PGK) = -1.1 kJ/mol *
	<b>2-Phosphoglycerat (2PG)</b>	↕ Phosphoglycerat mutase (PGM) ΔG = -0.6 kJ/mol *
	<b>Phosphoenolpyruvat (PEP)</b>	H <sub>2</sub> O → H <sub>2</sub> O Enolase ΔG = -2.4 kJ/mol *
	<b>Pyruvat</b>	ADP → ATP Pyruvat kinase (PK) ΔG = -13.9 kJ/mol *

\* Ab GAP sind die Umsätze (ATP, NADH, ΔG) pro Glucose-Molekül doppelt so gross wie angegeben.

## Eigenschaften konzentrierter Lösungen

### HCl

Molare Masse: 36.47 g/mol

Konzentration	Dichte (g/mL, 20°C)	Konz g/L	Konz mol/L	Gefrierpunkt °C	Osmolarität Os/L
1% w/w	1.0031	10.0	0.275	-0.99	0.534
10% w/w	1.0476	104.8	2.873	-15.4	8.67
36% w/w (konz)	1.1791	424.5	11.639		
38% w/w (konz)	1.1886	451.7	12.385		

### NaOH

M: 40.01 g/mol

Konzentration	Dichte (g/mL, 20°C)	Konz g/L	Konz mol/L	Gefrierpunkt °C	Osmolarität Os/L
1% w/w	1.0095	10.1	0.252	-0.86	0.466
10% w/w	1.1089	110.9	2.772	-10.47	6.24
17% w/w	1.182	200.0	5.00		
28% w/w (konz)	1.3064	365.8	9.142		
30% w/w (konz)	1.3277	398.3	9.956		

### Essigsäure konz

M: 60.05 g/mol

Konzentration	Dichte (g/mL, 20°C)	Konz g/L	Konz mol/L
100% w/w	1.0477	1047.7	17.446

### Ammoniak konz

M: 17.3 g/mol

Konzentration	Dichte (g/mL, 20°C)	Konz g/L	Konz mol/L	Gefrierpunkt °C
28% w/w	0.8980	251.4	14.764	-71.66
30% w/w:	0.8920	267.6	15.713	-84.06

### Salpetersäure konz

M: 63.02 g/mol

Konzentration	Dichte (g/mL, 20°C)	Konz g/L	Konz mol/L	Gefrierpunkt °C	Siedepunkt °C
20% w/w	1.1150	223.0	3.538	-17	103.4
40% w/w:	1.2466	498.7	7.913	-30	112.0
60% w/w	1.37	819.3	13.0	-22	120.4
70% w/w	1.42	995.7	15.8	-41	121.6
80% w/w	1.46		18.5		
Reine = Rauchende Salpetersäure, aufgrund des darin gelösten Stickstoffdioxids gelb:					
100% w/w	1.513	1513	24.01	-42	86.0

### Schwefelsäure konz

M: 98.08 g/mol

Konzentration	Dichte bei 20°C	Konz g/L	Konz mol/L	Gefrierpunkt °C
9% w/w	1.0591	95.3	0.972	
20% w/w	1.1398	227.9	2.324	
38% w/w	1.2855	488.5	4.981	
100% w/w	1.8305	1830.5	18.663	

### Phosphorsäure

M: 98.00 g/mol

Stark hygroskopisch, selten rein.

Konzentration	Dichte g/mL	Konz g/L	Konz mol/L	Gefrierpunkt °C	
40% w/w	1.2536		5.117		
85% w/w	1.6850	1435	14.61		
100% w/w	1.834 (18°C)	1834.5	18.66	42.35	H <sub>2</sub> O-Abspaltung: 213°C
Bei bis 150°C verdampft das Wasser aus Phosphorsäurelösungen, Phosphorsäure reagiert ab rund 200°C langsam zu Pyrophosphorsäure = Diphosphorsäure (H <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ), ab 300°C zu Metaphosphorsäure.					

### NaCl

M: 58.44 g/mol

Konzentration	Dichte (g/mL, 20°C)	Konz g/L	Konz mol/L	Gefrierpunkt °C	Osmolarität Os/L
1% w/w	1.0053	10.1	0.172	-0.593	0.321
10% w/w	1.0707	107.1	1.832	-6.56	3.78
20% w/w:	1.1478	229.6	3.928	-16.46	10.16
26% w/w	1.1972	311.3	5.326		
Gesättigt		359			

### D-Glucose, C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>·H<sub>2</sub>O

M: wasserfrei: 180.16 g/mol, Monohydrat: 198,17 g/mol

Konzentration	Dichte (g/mL, 20°C)	Konz g/L	Konz mol/L	Gefrierpunkt °C	Osmolarität Os/L
1% w/w:	1.0020	10.0	0.056	-0.107	0.057
10% w/w	1.0375	103.7	0.576	-1.167	0.65
20% w/w	1.0797	215.9	1.199	-2.70	1.56
60% w/w	1.279	767.6	4.261		
Gesättigt		910			

### Tropfpipetten:

Tropfen aus der Tropfpipette: Volumen: ca. 0.040 mL; Masse: 0.040-0.043 g, 25 Tropfen ergeben etwa 1.0 mL

Tropft man sehr schnell, erhöht sich das Volumen um 5-10%.

## Namen von Ionen und kleinen Molekülen

- Einatomige Kationen heissen gleich wie die entsprechende Atomsorte
- Die Präfixe Hydrogen-, Dihydrogen- oder Trihydrogen- etc. bezeichnen die entsprechenden Ionen mit einem, zwei oder drei zusätzlichen  $H^+$ , vgl. Silicat-Ion etc.
- Geordnet nach der Ordnungszahl des Atom mit höchster Ordnungszahl. Ausnahme: Teilchen mit C-Atomen unter C.

$BO_3^{3-}$	Borat-Ion	$SiO_4^{4-}$	Silicat
$B(OH)_3$	Borsäure	$HSiO_4^{3-}$	Hydrosilicat
$B_4O_7^{2-}$	Tetraborat-Ion	$H_2SiO_4^{2-}$	Dihydrosilicat
		$H_3SiO_4^-$	Trihydrosilicat
$C^{4-}$	Carbid, Methanid	$H_4SiO_4$	Kieselsäure
$CH_4$	Methan		
$C_2^{2-}$	Carbid, Acetylid	$P^{3-}$	Phosphid
$H_2C_2$	Ethin	$H_3P$	(Mono)phosphan
$CO_3^{2-}$	Carbonat-Ion	$HPO_3^{2-}$	Phosphonat-Ion
$H_2CO_3$	Kohlensäure	$H_3PO_3$	Phosphonsäure ( $H-PO(OH)_2$ )
$CN^-$	Cyanid-Ion	$PO_4^{3-}$	Phosphat-Ion
$HCN$	Cyanwasserstoff	$H_3PO_4$	Phosphorsäure
$HCN(aq)$	Blausäure		
$OCN^-$	Cyanat-Ion	$S^{2-}$	Sulfid
$H-OCN$	Cyansäure	$H_2S$	Schwefelwasserstoff
$H-NCO$	Isocyansäure	$SO_3^{2-}$	Sulfit-Ion
$H-CNO$	Knallsäure	$H_2SO_3$	Schweflige Säure
$SCN^-$	Thiocyanat-Ion (Rhodanid-Ion)	$SO_4^{2-}$	Sulfat-Ion
$SCNH$	Isothiocyansäure	$H_2SO_4$	Schwefelsäure
$HCOO^-$	Methanoat-Ion (Formiat-Ion)	$S_2^{2-}$	Disulfid-Ion (Salz: $FeS_2$ : Pyrit)
$HCOOH$	Methansäure (Ameisensäure)	$H_2S_2$	Wasserstoffdisulfid
$CH_3NH_3^+$	Methylammonium-Ion	$S_2O_4^{2-}$	Dithionit-Ion
$CH_3COO^-$	Ethanoat-Ion (Acetat-Ion)	$S_2O_3^{2-}$	Thiosulfat-Ion
$CH_3COOH$	Ethansäure (Essigsäure)	$H_2S_2O_3$	Thioschwefelsäure
$N^{3-}$	Nitrid-Ion	$Cl^-$	Chlorid-Ion
$NH_3$	Ammoniak	$HCl$	Chlorwasserstoff
$NH_4^+$	Ammonium-Ion	„HCl (aq)“	Salzsäure
$N_3^-$	Azid-Ion	$ClO^-$	Hypochlorit-Ion
$HN_3$	Stickstoffwasserstoffsäure	$HClO$	Unterchlorige Säure
$NO$	Stickstoffmonoxid (Radikal)	$ClO_2^-$	Chlorit-Ion
$NO_2$	Stickstoffdioxid (Radikal)	$HClO_2$	Chlorige Säure
$NO_2^-$	Nitrit-Ion	$ClO_3^-$	Chlorat-Ion
$HNO_2$	Salpetrige Säure	$HClO_3$	Chlorsäure
$NO_3^-$	Nitrat-Ion	$ClO_4^-$	Perchlorat-Ion
$HNO_3$	Salpetersäure	$HClO_4$	Perchlorsäure
$N_2H_4$	Hydrazin		
$N_2H_5^+$	Hydrazonium	$CrO_4^{2-}$	Chromat-Ion
$HONH_2$	Hydroxylamin	$H_2CrO_4$	Chromsäure
$HONH_3^+$	Hydroxylammonium	$Cr_2O_7^{2-}$	Dichromat-Ion
		$H_2Cr_2O_7$	Dichromsäure
$O^{2-}$	Oxid-Ion		
$OH^-$	Hydroxid-Ion	$MnO_4^-$	Permanganat-Ion
$H^+$	Wasserstoff-Kation, Proton		
$H^+ (aq) = H_3O^+$	Hydroxonium-Ion, Oxonium-Ion	$Br^-$	Bromid-Ion
$H^-$	Hydrid-Ion	$BrO_3^-$	Bromat-Ion
$OH^\bullet$	Hydroxyl-Radikal	Bromwasserstoff, Hypobromat etc. siehe Chlor	
$O_2^{2-}$	Peroxid-Ion		
$H_2O_2$	Wasserstoffperoxid	$I^-$	Iodid-Ion
$O_2^\bullet$	Superoxid-Ion (Radikal)	$IO_3^-$	Iodat-Ion
		Iodwasserstoff, Hypiodit etc. siehe Chlor	
$F^-$	Fluorid-Ion		
$HF$	Fluorwasserstoff		