

Otfried Regen  
Georg Brandes

# Physikalische Chemie



FORMELSAMMLUNG

# Formelsammlung

# Physikalische Chemie

Von Fachschuldozent Dipl.-Chem. Otfried Regen  
und Dipl.-Chem. Georg Brandes

4., überarbeitete Auflage



VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie  
Leipzig

Als Lehrbuch für die Ausbildung an Ingenieur- und Fachschulen der DDR anerkannt.

Berlin, 1987

Minister für Hoch- und Fachschulwesen

Regen, Otfried:

Formelsammlung Physikalische Chemie / von Otfried Regen u. Georg Brandes. -

- 4., überarb. Aufl. -

Leipzig : Dt. Verl. für Grundstoffind., 1988. - 100 S.

NE : 2. Verf.:

ISBN 3-342-00273-5

4., überarbeitete Auflage

© VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1979

Überarbeitete Auflage © VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie,  
Leipzig, 1988

VLN 152-915/20/88

LSV 1213

Printed in the German Democratic Republic

Gesamtherstellung: VEB Druckerei "Thomas Müntzer", 5820 Bad Langensalza

Redaktionsschluß: 1.7.1987

Bestell-Nr.: 542 055 1

00400

## Vorwort zur 4. Auflage

Die Grundlagen der physikalischen Chemie sind in zahlreichen Lehrbüchern dargestellt. Zweck dieser Formelsammlung ist es, das Lösen numerischer Probleme der physikalischen Chemie zu unterstützen. Die Autoren haben während ihrer Unterrichtspraxis festgestellt, daß derartige Aufgaben von den Studenten oftmals sehr mühsam bewältigt werden, da ihnen einerseits die Übung fehlt, andererseits die Gesetzmäßigkeiten und Formeln nicht geläufig sind. Das Üben kann den Studenten nicht abgenommen werden. Für die Anwendung der richtigen Formel ist dieses Buch ein geeignetes Hilfsmittel.

Grundlage für Inhalt und Umfang der vorliegenden Sammlung sind die an den Ingenieurschulen des Ministeriums für Chemische Industrie der DDR gültigen Lehrprogramme. Dementsprechend erfolgten bei Vorbereitung der 4. Auflage dieses Buches die inhaltliche Auswahl und Zusammenstellung der Formeln und weitgehende Angleichung der Größenkennzeichnung durch Formelzeichen und Indices an die gegenwärtig in der Fachschulliteratur gebräuchliche Darstellungsweise.

Gegenüber vorangegangenen Auflagen wurden Ergänzungen und Korrekturen im Formelteil und in den Stoffwertetabellen vorgenommen.

Bei Benutzung der Formeln sind durchgängig SI-Einheiten anwendbar. Die im Zusammenhang mit der Erklärung verwendeter Formelzeichen genannten SI-Einheiten können für die meisten Berechnungen als zweckmäßig empfohlen werden.

Hinweise und Vorschläge zur Verbesserung dieses Buches werden gern entgegen-  
genommen.

Die Autoren

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. <u>Aufbau der Formelsammlung</u>	7
1.1.     SI-Einheiten	7
1.2.     Hinweise zur Benutzung	8
2. <u>Formelzeichen</u>	9
3. <u>Stöchiometrische Grundbegriffe</u>	16
3.1.     Stoffgrößen	16
3.2.     Gehaltsgrößen	18
3.3.     Stoffmengenbilanz	20
4. <u>Gasgesetze</u>	20
4.1.     Ideale Gase und Gasgemische	20
4.1.1.   Gesetze idealer Gase	20
4.1.2.   Mischungen idealer Gase	21
4.1.3.   Thermische Dissoziation idealer Gase	22
4.2.     Thermische Zustandsgleichung realer Gase	23
4.3.     Kinetische Theorie der idealen Gase	24
5. <u>Feste Stoffe</u>	27
6. <u>Flüssige Systeme</u>	28
6.1.     Lösungen	28
6.2.     Kolligative Eigenschaften ideal verdünnter Lösungen mit Nichtelektrolyten	29
6.2.1.   Dampfdruckerniedrigung	29
6.2.2.   Kryoskopie, Ebullioskopie	30
6.2.3.   Osmotischer Druck	31
6.3.     Kolligative Eigenschaften ideal verdünnter Elektrolytlösungen	31
6.4.     Trennung flüssiger Gemische	32
7. <u>Chemisches Gleichgewicht</u>	33
7.1.     Massenwirkungsgesetz	33
7.2.     Anwendung des Massenwirkungsgesetzes	33
7.2.1.   Thermische Dissoziation	33

	Seite
7.2.2.	Elektrolytische Dissoziation 34
7.2.2.1.	Schwache Elektrolyte 35
7.2.2.2.	Starke Elektrolyte 35
7.2.3.	Protolysegleichgewichte 36
7.2.3.1.	Autoprotolyse des Wassers 36
7.2.3.2.	Protolyse von Säuren und Basen 36
7.2.3.3.	Protolyse von Salzen 39
7.2.4.	Puffersysteme 39
7.3.	Lösungs- und Fällungsgleichgewichte 40
8.	<u>Chemische Thermodynamik</u> 41
8.1.	Wärme 41
8.2.	Energieumsatz bei Kompressions- und Expansion vorgängen 42
8.3.	Erster Hauptsatz der Thermodynamik 43
8.4.	Energie bei chemischen Reaktionen 45
8.5.	Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik 46
8.6.	Anwendung des 2. Hauptsatzes auf geschlossene Systeme 48
8.7.	Gleichgewichtsbedingungen 51
8.7.1.	Phasengleichgewichte 51
8.7.2.	Chemische Gleichgewichte 52
9.	<u>Elektrochemische Vorgänge</u> 54
9.1.	Elektrische Leitfähigkeit 54
9.2.	Überführung 55
9.3.	Elektrodenprozesse 56
9.4.	Galvanische Zellen 57
9.5.	Strom und Spannung in elektrochemischen Prozessen 58
10.	<u>Reaktionskinetik</u> 61
10.1.	Reaktionsordnung und Zeitgesetze 61
10.2.	Folgereaktionen und Parallelreaktionen 62
10.3.	Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit 63
11.	<u>Grenzflächengleichgewichte</u> 64
11.1.	Oberflächenspannung 64
11.2.	Adsorption 65

		Seite
11.3.	Chromatographie	66
11.3.1.	Allgemeine Chromatographie	66
11.3.2.	Gaschromatographie	66
11.4.	Viskosität	68
11.5.	Diffusion	69
12.	<u>Photochemie</u>	71
13.	<u>Literaturverzeichnis</u>	73
14.	<u>Tabellen</u>	74

## 1. Aufbau der Formelsammlung

### 1.1. SI-Einheiten

Das Internationale Einheitensystem (abgekürzt SI) wird auf 7 Basiseinheiten zurückgeführt:

Größe		Name der Basiseinheit	Einheitenzeichen
Länge	l	Meter	m
Masse	m	Kilogramm	kg
Zeit	t	Sekunde	s
elektrische			
Stromstärke	I	Ampere	A
Temperatur	T	Kelvin	K
Lichtstärke	$I_v$	Candela	cd
Stoffmenge	n	Mol	mol

Abgeleitete SI-Einheiten sind aus Basiseinheiten bzw. ergänzenden SI-Einheiten kohärent, d. h. als Potenzprodukte mit dem Zahlenfaktor 1, gebildete Einheiten. Im folgenden sind Beispiele für abgeleitete Einheiten angeführt:

Physikalische Größe		Name und Zeichen der Einheit		Definition der Einheit
Energie,				
Arbeit	W	Joule	J	$1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$
Kraft	F	Newton	N	$1 \text{ kg m s}^{-2} = 1 \text{ J m}^{-1}$
Leistung	P	Watt	W	$1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} = 1 \text{ J s}^{-1}$
Druck	p	Pascal	Pa	$1 \text{ N m}^{-2} = 1 \text{ m}^{-1} \text{ kg s}^{-2}$
elektrische				
Spannung	U	Volt	V	$1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ A}^{-1} = 1 \text{ J A}^{-1} \text{ s}^{-1}$
elektrischer				
Widerstand	R	Ohm	$\Omega$	$1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ A}^{-2} = 1 \text{ V A}^{-1}$



Zur Bildung von dezimalen Vielfachen und Teilen von Einheiten sind Vorsätze festgelegt, die bei entsprechender Multiplikation vor den Einheitenamen angefügt werden:

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

Es ist zu beachten, daß die gleichzeitige Verwendung mehrerer Vorsätze nicht zulässig ist.

## 1.2. Hinweise zur Benutzung

Gliederung des Stoffgebietes und Auswahl der Formeln erfolgten auf der Grundlage der Lehrprogramme Physikalische Chemie für Ingenieurschulen und der verbindlichen Fachschullehrbücher. Damit enthält diese Sammlung die wichtigsten Formeln zum Umgang mit dem Lehrstoff, erhebt aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Mit den Tabellen sind hinreichende Hilfsmittel beigegeben, um die in der Ingenieurausbildung nötigen Rechenaufgaben der physikalischen Chemie zu lösen.

Die Verwendung der Formelsammlung enthebt den Studenten nicht von der Notwendigkeit, die theoretischen Grundlagen und Zusammenhänge des Fachgebietes zu studieren und zu erkennen.

Nach einer Zusammenstellung von Grundgrößen der Chemie, deren Kenntnis beim Umgang mit physikalisch-chemischen Gesetzmäßigkeiten unerlässlich ist, sind in den nachfolgenden Abschnitten die Formeln, jeweils in Verbindung mit einer auf ihren Inhalt hinweisenden stichwortartigen Erklärung und einer Kennzahl, aufgeführt. Wichtige Gesetzmäßigkeiten und Formeln sind durch Einrahmungen hervorgehoben.

Häufig wiederkehrende Formelzeichen und Indices sind im Abschnitt 2. zusammengefaßt. Darüber hinaus werden spezifische Konstanten sowie seltener genannte Größen in den Abschnitten beschrieben.

Zur richtigen Anwendung der Formelzeichen sind folgende Festlegungen zu beachten:

- eine Zustandsgröße im physikalischen Normzustand (273 K bzw. 0 °C, 101,325 kPa) ist durch den Index "NB" gekennzeichnet;
- der Index "o" beschreibt Standardbedingungen einer Größe (298 K, 101,325 kPa, bei wäßrigen Lösungen  $a = 1$ );
- für molare Größen wird der Index "m" verwendet; die Einheit bezieht sich dann jeweils auf 1 mol;
- der Index "0" beschreibt den Ausgangszustand einer Reaktionsgröße.

## 2. Formelzeichen

A	$\text{m}^2; \text{cm}^2$	Oberfläche, Querschnitt
A		Absorptionsgrad (opt.), Absorbanz
$A_1$	$\text{cm}^2$	Flächenbedarf eines Moleküls
C	$\text{J K}^{-1}$	Wärmekapazität
$\bar{C}_p$	$\text{J K}^{-1}$	mittlere Wärmekapazität bei konstantem Druck
$\Delta_R C$	$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$	Reaktionswärmekapazität
D	$\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$	Diffusionskoeffizient
E	$\text{V cm}^{-1}$	elektrische Feldstärke
E	V; mV	EMK
E		Extinktion
$E_a$	V; mV	Asymmetriepotential
$E_d$	V; mV	Diffusionspotential
$E_G$	$\text{kg K mol}^{-1}$	kryoskopische Konstante
E	J; kJ	Strahlungsenergie

E	V; mV	Elektrodenpotential
$E_I$	V; mV	Elektrodenpotential bei Stromfluß
$E_i$	V cm <sup>-1</sup>	innere elektrische Feldstärke
$E_R$	V; mV	Ruhepotential
$E_S$	kg K mol <sup>-1</sup>	ebullioskopische Konstante
$E_o$	V; mV	Standardelektrodenpotential
$E_{1/2}$	V; mV	Halbstufenpotential
F	C mol <sup>-1</sup> ; As mol <sup>-1</sup>	FARADAY-Konstante
F	N	Kraft
F	J	Freie Energie
F		Zahl der Freiheiten (GIBBS)
$\Delta_R F$	J; kJ	Freie Reaktionsenergie
G	J; kJ	Freie Enthalpie, thermodynamisches Potential
H	J; kJ	Enthalpie
H	cm	Bodenhöhe
H		Häufigkeitsexponent
I	A	Stromstärke
$I_d$	A; mA	Diffusionsstromstärke
J	mol l <sup>-1</sup>	Ionenstärke
K		Gleichgewichtskonstante
K		Zahl der Komponenten (GIBBS)
$K_B$		Basenkonstante
$K_L$		Löslichkeitsprodukt
$K_{mob}$		Mobile Phase (Chromatographie)
$K_{stat}$		Stationäre Phase (Chromatographie)
$K_S$		Säurekonstante
$K_W$	mol <sup>2</sup> l <sup>-2</sup>	Ionenprodukt des Wassers
$L_m$	mol l <sup>-1</sup>	molare Löslichkeit
$\bar{M}$	g mol <sup>-1</sup>	mittlere molare Masse
N		Zahl der Moleküle
$N_A$	mol <sup>-1</sup>	AVOGADRO-Konstante
$N_O$		Gesamtzahl der Moleküle
P	V; mV	Elektrodenpolarisation
P		Zahl der Phasen (GIBBS)
P	W	elektrische Leistung
Q	C; As	elektrische Ladung
Q	J	Wärme
Q		Quantenausbeute

$Q_p$	J	Wärme bei konstantem Druck
$Q_v$	J	Wärme bei konstantem Volumen
$R$	$J \text{ mol}^{-1} K^{-1}$	allgemeine Gaskonstante
$R$	$\Omega$	elektrischer Widerstand
$R_a$	$\Omega$	äußerer Widerstand des Stromkreises
$R_f$		Retentionsfaktor
$R_i$	$\Omega$	innerer Widerstand
$R_{st}$		Standard-Retentionsfaktor
$S$	$J K^{-1}$	Entropie
$T$	K	Temperatur
$\Delta T_G$	K	Gefrierpunktserniedrigung
$\Delta T_S$	K	Siedepunktserhöhung
$U$	J	innere Energie
$U$	V	Zellspannung
$\Delta_R U$	$J \text{ mol}^{-1}$	Reaktionsenergie
$U_Z$	V	Zersetzungsspannung
$V$	$m^3; l$	Volumen
$\bar{V}_m$	$cm^3 \text{ mol}^{-1}$	partiell molares Volumen
$V_{mono}$	$cm^3$	Volumen einer monomolekularen Schicht
$V_R$	$cm^3$	Retentionsvolumen
$W$	N m; J; Ws	Arbeit, Energie
$W_A$	$J \text{ mol}^{-1}$	Aktivierungsenergie
$W_{el}$	Ws; kWh	elektrische Arbeit
$W_{kin}$	N m; J	kinetische Energie
$W_N$	N m; J	Nutzarbeit
$W_{pot}$	N m; J	potentielle Energie
$W_V$	N m; J	Volumenarbeit
$a$		Aktivität
$a$	$g g^{-1}$	Gramm absorbiertes Stoff (Adsorpt) pro 1 g Adsorbens
$a_+$		mittlere Ionenaktivität
$a_\infty$	$g g^{-1}$	Sättigungsmenge bei monomolekularer Bedeckung
$b$	cm	Bandenbreite
$b_{1/2}$	cm	halbe Bandenbreite
$c$	$\text{mol l}^{-1}$	Stoffmengenkonzentration
$c$	$m s^{-1}$	Lichtgeschwindigkeit
$c$	$J g^{-1} K^{-1}$	spezifische Wärmekapazität

$c_A, c_B$	$\text{mol l}^{-1}$	Konzentration des Stoffes zur Zeit t
$c_m$	$\text{mol kg}^{-1}$	Molalität
$c_S$	$\text{mol l}^{-1}$	Sättigungskonzentration
$c_0$	$\text{mol l}^{-1}$	molare Ausgangskonzentration
d	cm	Schichtdicke, Durchmesser, Kernabstand
$d_p$	cm	Partikeldurchmesser der Füllung
e	C	elektrische Elementarladung
f		Anzahl der Freiheitsgrade
$f_a$		mittlerer Aktivitätskoeffizient
$f_+$		mittlerer Aktivitätskoeffizient
$f_\Lambda$		Leitfähigkeitskoeffizient
g	$\text{m s}^{-2}$	Fallbeschleunigung
h	J s	PLANCK-Konstante
h	m	kapillare Steighöhe, Eintauchtiefe
i		VAN'T-HOFF'scher Faktor
j	$\text{A m}^{-2}$	Stromdichte
$j_d$	$\text{A m}^{-2}$	Diffusionsstromdichte
$j_{d,Gr}$	$\text{A m}^{-2}$	Diffusionsgrenzstromdichte
$j_o$	$\text{A m}^{-2}$	Austauschstromdichte
k	$\text{J K}^{-1}$	BOLTZMANN-Konstante
k		Reaktionsgeschwindigkeitskonstante
k		natürlicher Extinktionskoeffizient
$k_{\max}$		Aktionskonstante, präexponentieller Faktor
l	m; cm	Länge
m	q; kg	Masse
n	mol	Stoffmenge
n		Brechungsindex
$n_0$	mol	Stoffmenge vor der Dissoziation
$n_+, n_-$		Überföhrungszahlen
p	Pa; $\text{N m}^{-2}$	Druck, Kapillardruck, Partialdruck
$p_{\text{Ads}}$	Pa; $\text{N m}^{-2}$	Dampfdruck des adsorbierten Gases beim Sättigungsdampfdruck der Flüssigkeit
$p_0$	Pa; $\text{N m}^{-2}$	Dampfdruck der reinen Komponente
q	$\text{cm}^2$	Querschnitt der Diffusionsschicht
r	m; cm	Radius, Kapillarradius
$r_M$	cm	Molekülradius
t	s; h	Zeit

$t_L$	s	Retentionszeit für Luft
$t_R$	s	Retentionszeit
$u$	$\text{cm s}^{-1}$	Wanderungsgeschwindigkeit
$u_T$	$\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$	Trägergasgeschwindigkeit
$v$	$\text{cm}^2 \text{s}^{-1} \text{V}^{-1}$	Geschwindigkeit, Ionengeschwindigkeit, Ionenbeweglichkeit
$v_d$	$\text{mol cm}^{-3} \text{s}^{-1} \text{D}$	Diffusionsgeschwindigkeit
$w$		Massenanteil
$x$		Stoffmengenanteil
$x$	cm	Diffusionsweg
$x'_A$		Stoffmengenanteil der Komponente A in der flüssigen Phase
$x''_A$		Stoffmengenanteil der Komponente A in der Dampfphase
$z_e$		Ionenladungszahl, elektrochemische Wertigkeit des Elektrolyten
$\theta$	K	DEBYE-Temperatur
$\Lambda_{ev}$	$\Omega^{-1} \text{cm}^2 \text{mol}^{-1}$	Äquivalentleitfähigkeit
$\Lambda_m$	$\Omega^{-1} \text{cm}^2 \text{mol}^{-1}$	molare Leitfähigkeit
$\Lambda_\infty$	$\Omega^{-1} \text{cm}^2 \text{mol}^{-1}$	Grenzleitfähigkeit, Leitfähigkeit bei unendlicher Verdünnung
$\Lambda_\pm$	$\Omega^{-1} \text{cm}^2 \text{mol}^{-1}$	Ionenäquivalentleitfähigkeit
$\Omega$		thermodynamische Wahrscheinlichkeit
$\alpha$	Grad	Randwinkel, Kontaktwinkel
$\alpha$		Durchtrittsfaktor
$\alpha$		Absorptionskoeffizient
$\gamma$		Labyrinthfaktor der Porenkanäle
$\gamma$	$\text{K}^{-1}$	thermischer Ausdehnungskoeffizient idealer Gase
$\delta$	cm	Dicke der Diffusionsschicht
$\epsilon$		Dielektrizitätskonstante
$\epsilon$	$\text{l mol}^{-1} \text{cm}^{-1}$	molarer dekadischer Extinktionskoeffizient
$\epsilon$	J; kJ	Energie eines Lichtquants
$\eta$	Pa s	dynamische Viskosität
$\eta_r$		relative Viskosität

$\eta$	mV; V	Überspannung
$\kappa$	$\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$	elektrische Leitfähigkeit
$\alpha$		POISSONscher Adiabatenexponent
$\lambda$	m	Wellenlänge
$\lambda$		statistische Packungsregelmäßigkeit
$\mu$	$\text{J mol}^{-1}$	chemisches Potential
$\nu$	Hz	Lichtfrequenz
$\nu$	$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$	kinematische Viskosität
		stöchiometrischer Faktor
$\pi$	$\text{Pa}; \text{N m}^{-2}$	osmotischer Druck
$\rho$	$\text{kg m}^{-3}$	Dichte
$\varrho$	$\Omega \text{ cm}$	spezifischer elektrischer Widerstand
$\sigma$	$\text{J cm}^{-2}$	spezifische Oberflächenspannung
$\sigma$	cm	effektiver Moleküldurchmesser
$\sigma_m$	$\text{J mol}^{-2/3}$	molare Oberflächenspannung
$\tau$	$\text{N m}^{-2}$	Schubspannung
$\tau$	s	mittlere Zeitdauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stößen
$\varphi$	$(\text{Pa s})^{-1}$	Fluidität
$\chi$		Volumenanteil

### Reaktionsgröße

$\Delta_R Y$	Reaktionsgröße, allgemein
$\Delta_R Y_o$	Standardreaktionsgröße, allgemein

Anstelle von Y können z. B. die Größen F, G, H, S und U eingesetzt werden.

Anstelle von R können andere Indices verwendet werden, z. B. B, G, H, K, L, p, S und V. Molare Größen werden durch den Index "m" gekennzeichnet, z. B.

$\Delta_{B_o, m} Y$

## Indices

A	Anode, Analyt	L	Lösung
A, B, C	Stoffkomponente	Lm	Lösungsmittel
Ads	Adsorption	l	flüssig
		M	Mischung
B	Bildung	m	molare Größe
Des	Desorption	OM	Oxydationsmittel
G	Gitter	p	Phasenumwandlung
g	gasförmig	R	Reaktion
H	Hydratation	RM	Reduktionsmittel
i	Komponente	rev	reversibel
irr	irreversibel	S	Schmelze
j	Komponente	s	fest
K	Katode, Katolyt	V	Verdampfung
K	Kondensation		
k	kritisch		
O	Ausgangsbedingungen, undissoziiert	1, 2	Stoffkomponenten, allgemein: 1 Lösungsmittel
o	Standardzustand		2 gelöste Stoffe



### 3. Stöchiometrische Grundbegriffe

#### 3.1. Stoffgrößen

##### Mol

1 mol ist die Stoffmenge, in der ebensoviele elementare Einheiten wie in 0,012 kg des Nuklids  $^{12}\text{C}$  Atome enthalten sind. Dabei ist die Teilchenart (Atome, Ionen, Elektronen usw.) anzugeben.

$$n = 1 \text{ mol} = 10^3 \text{ mmol} = 10^{-3} \text{ kmol} \quad (3.1)$$

##### AVOGADRO-Konstante

Die AVOGADRO-Konstante ist die Teilchenzahl eines Mol.

$$N_A = 6,02252 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad (3.2)$$

##### Molare Masse (Molmasse) M

Die molare Masse ist die Masse eines Mol.

$$M = \frac{m}{n} \quad (3.3)$$

##### Molares Volumen (Molvolumen) $V_m$

Das molare Volumen ist das Volumen eines Mol.

$$V_m = \frac{V}{n} \quad (3.4)$$

##### Stöchiometrische Wertigkeit z

Die stöchiometrische Wertigkeit gibt an, wieviel einwertige Atome oder Atomgruppen ein Atom des betreffenden Elements binden oder in Verbindungen ersetzen kann.

##### Äquivalent $\bar{A}$

Der z-te Teil eines Atoms, einer Atomgruppe, einer Verbindung, allgemein: einer Formeleinheit, wird als Äquivalent bezeichnet.

### Relative Atommasse $A_r$

Die relative Atommasse gibt an, wieviel mal größer die Masse eines Atoms des betreffenden Elements wie 1/12 der Masse eines Atoms des Kohlenstoffnuklids  $^{12}_6\text{C}$  ist.

$$A_r = \frac{\bar{m}}{\frac{1}{12} m_{^{12}_6\text{C}}} \quad (3.5)$$

(Dabei gilt, daß für ein Mischelement - das ist ein Element, das aus verschiedenen Isotopen besteht - die angegebenen absoluten ( $\bar{m}$ ) wie die relativen Atommassen ( $A_r$ ) generell als Mittelwert der Masse von Isotopen aufzufassen sind, in die außer den absoluten und relativen Massen der einzelnen Isotope auch noch die prinzipiell variablen Isotopenverhältnisse eingehen.)

### Relative Molekülmasse $M_r$

Als relative Molekülmasse eines Moleküls bezeichnet man die Summe der relativen Atommassen der das Molekül aufbauenden Atome.

$$M_r = \sum_{i=1}^n A_{r,i} \quad (3.6)$$

### Relative Formel- oder Substanzformelmasse $F_r$

Die relative Formelmasse ist die der jeweiligen Formel entsprechende Summe der relativen Atommassen. (Dieser Begriff wird bei ionogen aufgebauten Stoffen verwendet).

$$F_r = \sum_{i=1}^n A_{r,i} \quad (3.7)$$

### 3.2. Gehaltsgrößen

Der Gehalt gibt die quantitative Zusammensetzung einer Mischphase als Quotient zweier Mengen (Stoffmenge, Masse, Volumen) an.

#### Übersicht der gebräuchlichsten Gehaltsgrößen

Gehaltsangabe der Lösung	Gehaltsangabe des gelösten Stoffes		
	Stoffmenge $n_i$	Masse $m_i$	Volumen $V_i$
Volumen $V$	Stoffmengen- konzentration $d_i$	Massenkonzentration $\xi_i$	Volumenanteil (Volumenkonzentration) $\chi_i$
Masse $m$		Massenanteil (Massenprozent) $w_i$	-
Stoffmenge $n$	Stoffmengenanteil $x_i$	-	-

Die Gehaltsgrößen Massenanteil, Stoffmengenanteil und Volumenanteil sind Verhältnisgrößen. Sie können mit folgenden Einheiten angegeben werden:

Einheit	Kurzzeichen	Definition
Zahl	1	-
Prozent	%	1 % = $10^{-2}$
Promille	‰	1 ‰ = $10^{-3}$
Millionstel	ppm	1 ppm = $10^{-6}$
Milliardstel	ppb	1 ppb = $10^{-9}$
Billionstel	ppt	1 ppt = $10^{-12}$

### Stoffmengenkonzentration

$$c_i = \frac{n_i}{V} \quad (3.8)$$

### Massenkonzentration

$$\xi_i = \frac{m_i}{V} \quad (3.9)$$

### Volumenanteil (Volumenkonzentration)

$$\chi_i = \frac{V_i}{\sum_{j=1}^k V_j} \quad (3.10)$$

Für ideale Mischungen gilt  $V = \sum_{j=1}^k V_j$

### Massenanteil

$$w_i = \frac{m_i}{\sum_{j=1}^k m_j} \quad (3.11)$$

### Stoffmengenanteil (Molenbruch)

$$x_i = \frac{n_i}{\sum_{j=1}^k n_j} \quad (3.12)$$

### Molalität

Die Molalität ist der Quotient aus der Stoffmenge  $n_i$  des gelösten Stoffes und der Masse  $m_{Lm}$  des Lösungsmittels.

$$c_m = \frac{n_i}{m_{Lm}} \quad (3.13)$$

### 3.3. Stoffmengenbilanz

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

$$\frac{n_A}{n_C} = \frac{a}{c} ; \quad \frac{n_A}{n_D} = \frac{a}{d} \quad (3.14)$$

$$\frac{n_B}{n_C} = \frac{b}{c} ; \quad \frac{n_B}{n_D} = \frac{b}{d} \quad (3.15)$$

n vgl. (3.3)

### 4. Gasgesetze

#### 4.1. Ideale Gase und Gasgemische

##### 4.1.1. Gesetze idealer Gase

Gesetz von GAY-LUSSAC

$$\left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_{p,n} = \frac{V_{NB}}{T_{NB}} = \frac{V_T}{T} \quad (4.1)$$

$V_T = V_{NB} \left[ 1 + \gamma_{NB} (T - T_{NB}) \right]$

(4.2)

Thermischer Ausdehnungskoeffizient idealer Gase

$$\gamma = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_{p,n} \quad (4.3)$$

Grenzwert des thermischen Ausdehnungskoeffizienten

$$\gamma_{NB} = \frac{1}{273,15} \text{ K}^{-1} = 3,661 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \quad (4.4)$$

## Gesetz von AMONTONS

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_{V,n} = \frac{p_{NB}}{T_{NB}} = \frac{p_T}{T} \quad (4.5)$$

$$p_T = p_{NB} [1 + \gamma_{NB} (T - T_{NB})] \quad (4.6)$$

## Kompressibilitätskoeffizient

$$\chi = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_{T,n} \quad (4.7)$$

## Gesetz von BOYLE-MARIOTTE

$$p V = \text{const} \quad (T, n = \text{const}) \quad (4.8)$$

## Thermische Zustandsgleichung idealer Gase

$$V = f(T, p, n) \quad (4.9)$$

## Allgemeine Gaskonstante

$$R = \frac{p V_m}{T} \quad (4.10)$$

## Gaskonstante und thermische Zustandsgleichung

$$p V_m = R T \quad (n = 1 \text{ mol}) \quad (4.11)$$

$$p V = n R T \quad (4.12)$$

weitere Gasgesetze vgl. S. 44

### 4.1.2. Mischungen idealer Gase

#### Gesetz von DALTON

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_j = \sum_{i=1}^j p_i \quad (4.13)$$

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_j = \sum_{i=1}^j V_i \quad (4.14)$$

Partialdruck idealer Gase in einer Mischung

$$p_1 = n_1 \frac{R T}{V} \quad (4.15)$$

RAOULTsches Gesetz vgl. (6.11)

Zustandsgleichung idealer Gasmischungen

$$p V = \sum_{i=1}^j n_i \cdot R T \quad (4.16)$$

Mittlere Molmasse einer Gasmischung

$$\bar{M} = \frac{\sum_{i=1}^j m_i}{\sum_{i=1}^j n_i} = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_j}{n_1 + n_2 + \dots + n_j} = \frac{n_1 M_1 + n_2 M_2 + \dots}{\sum_{i=1}^j n_i} \quad (4.17)$$

$$\bar{M} = x_1 M_1 + x_2 M_2 + \dots + x_j M_j = \sum_{i=1}^j x_i M_i \quad (4.18)$$

#### 4.1.3. Thermische Dissoziation idealer Gase

Dissoziationsgrad

$$\alpha = \frac{\text{Zahl der dissoziierten Teilchen}}{\text{Zahl der ursprünglich vorhandenen Teilchen}} \leq 1 \quad (4.19)$$

Dissoziationsgrad und mittlere Molmasse

$$\bar{M} = \frac{M_0}{[1 + \alpha(\nu - 1)]} \quad (4.20)$$

Stoffmenge nach der Dissoziation

$$n = n_0 (1 - \alpha) + n_0 \alpha = n_0 [1 + \alpha (\nu - 1)] \quad (4.21)$$

Thermische Zustandsgleichung für dissoziierte ideale Gase

$$p V = n_0 [1 + \alpha (\nu - 1)] R T \quad (4.22)$$

#### 4.2. Thermische Zustandsgleichung realer Gase

VAN-DER-WAALSsche Zustandsgleichung

$$\left( p + \frac{a}{v_m^2} \right) (v_m - b) = R T \quad (n = 1 \text{ mol}) \quad (4.23)$$

$$\left( p + \frac{a n^2}{V^2} \right) (V - n b) = n R T \quad (4.24)$$

VAN-DER-WAALSsche Konstanten

$$a = 3 p_k v_k^2 = \frac{27 R^2 T_k^2}{64 p_k} \quad (4.25)$$

$$b = \frac{v_k}{3} = \frac{R T_k}{8 p_k} = 4 \cdot \frac{4}{3} r_M^3 \pi N_A \quad (4.26)$$

Kritische Daten VAN-DER-WAALScher Gase

$$p_k = \frac{a}{27 b^2} \quad (4.27)$$

$$v_{m,k} = 3 b \quad (4.28)$$

$$T_k = \frac{8 a}{27 b R} \quad (4.29)$$



## BOYLE-Temperatur

$$T_B = \frac{a}{b R} \quad (4.30)$$

## Virialgleichung

$$p V = n R T + n B p + n C p^2 + n D p^3 \quad (4.31)$$

## Vereinfachte Virialgleichung

$$p V = n R T + n B p \quad (4.32)$$

## Zweiter Virialkoeffizient

$$B = b - \frac{a}{R T} \quad (4.33)$$

## REDLICH-KWONG-Gleichung

$$\left( p + \frac{a n^2}{V_m (V_m + n b) T^{0,5}} \right) (V_m - n b) = n R T \quad (4.34)$$

## 4.3. Kinetische Theorie der idealen Gase

### MAXWELLSche Geschwindigkeitsverteilung

$$\frac{dn}{n} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{v^2 e^{-\frac{mv^2}{2 k T}}}{\left( \frac{2 \cdot k T}{m} \right)^{3/2}} dv \quad (4.35)$$

### Wahrscheinlichste Geschwindigkeit

$$v_w = \sqrt{\frac{2 \cdot k T}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot R \cdot T}{M}} \quad (4.36)$$

### Mittlere Geschwindigkeit

$$\bar{v} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot T}{m}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} v_w = \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi M}} \quad (4.37)$$

### Mittleres Geschwindigkeitsquadrat

$$\bar{v}^2 = \frac{3}{2} \frac{2 \cdot k \cdot T}{m} = \sqrt{\frac{3 \cdot R \cdot T}{M}} \quad (4.38)$$

### Wurzel aus dem mittleren Geschwindigkeitsquadrat

$$\sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_w = 1,223 v_w \quad (4.39)$$

### Mittlerer Gasdruck

$$p = \frac{1}{3} N_0 m \bar{v}^2 \quad (4.40)$$

### Mittlerer Gasdruck je Mol

$$p v_m = \frac{1}{3} M_n \bar{v}^2 \quad (4.41)$$

### Mittleres Geschwindigkeitsquadrat des Gasmoleküls

$$\bar{v}^2 = 3 \frac{R}{M_m} T \quad (4.42)$$

### Mittlere kinetische Energie des Gasmoleküls

$$\bar{w}_{kin} = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} \cdot \frac{R}{N_A} T = \frac{3}{2} k T$$

(4.43)

### Beziehung zwischen Temperatur und mittlerer kinetischer Energie

$$T = \frac{2}{3} \frac{N_A}{R} \bar{w}_{kin} \quad (4.44)$$

## BOLTZMANN-Konstante

$$k = \frac{R}{N_A} \quad (4.45)$$

Innere Energie eines Gasmoleküls

$$U = \frac{1}{2} k f T \quad (4.46)$$

Molare Translationsenergie

$$E_{tr} = \frac{3}{2} R T \quad (4.47a)$$

Molare Rotationsenergie je Rotationsfreiheitsgrad

$$E_{rot} = \frac{1}{2} R T \quad (4.47b)$$

Molare Schwingungsenergie je Schwingungsfreiheitsgrad

$$E_{vib} = R T \quad (4.47c)$$

Molare innere Energie

$$U_m = \frac{1}{2} k f t N_A = \frac{1}{2} f R T \quad (4.48)$$

Mittlere freie Weglänge

$$\bar{l} = f(d, N) \quad (4.49)$$

$$\bar{l} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 N} ; N \text{ vgl. (4.46)} \quad (4.50)$$

Stoßzahl

$$z = \frac{v}{\bar{l}} = \pi d^2 N \bar{v} ; N \text{ vgl. (4.46)} \quad (4.51)$$

## 5. Feste Stoffe

### COULOMB-Gesetz

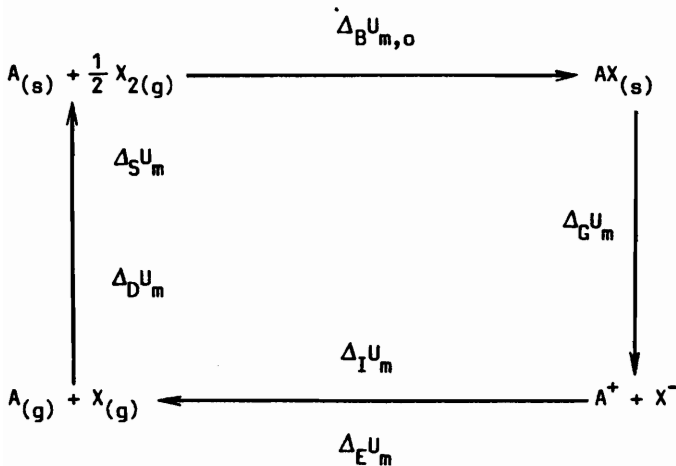
$$w_{\text{pot}} = - \frac{z_1 z_2 e^2}{4 \pi \epsilon_0 d} \quad (5.1)$$

### Gitterenergie; MADELUNG-Gleichung

$$U_G = \frac{N_A z_1 z_2 k_{\text{Ma}} e^2}{4 \pi \epsilon_0} \left(1 - \frac{1}{n}\right) \quad (\text{Abstoßungskoeffizient } n = 9 \dots 12) \quad (5.2)$$

$k_{\text{Ma}}$  MADELUNG-Konstante

### Bestimmung der Gitterenergie; BORN-HABER-Kreisprozeß



$$\Delta_G U_m = \Delta_S U_m + \frac{1}{2} \Delta_D U_m + \Delta_I U_m + \Delta_E U_m - \Delta_B U_{m,o} \quad (5.3)$$

$\Delta_D U$  Dissoziationsenergie von  $X_{2(g)}$

$\Delta_G U$  Gitterenergie der Verbindung  $AX_{(s)}$

$\Delta_S U$  Sublimationsenergie von  $A_{(g)}$

$\Delta_I U$	Ionisierungsenergie von $A_{(g)}$ und $X_{(g)}$
$\Delta_E U$	Elektronenaffinität von $A_{(g)}$ und $X_{(g)}$
$\Delta_{B,m,o} U$	Standardbildungsenergie von $AX_{(s)}$

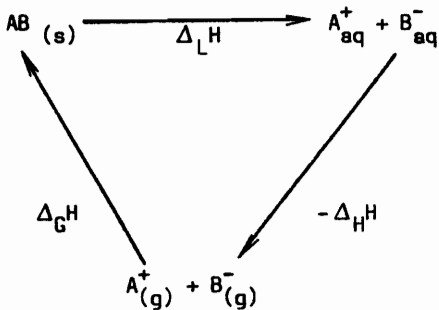
## 6. Flüssige Systeme

### 6.1. Lösungen

Löseenthalpie von Ionengitter-Verbindungen

BORN-HABER-Kreisprozeß

Für eine Reaktion  $[AB]_{(s)} + H_2O \rightleftharpoons A_{aq}^+ + B_{aq}^-$  gilt:



$$\Delta_L H = \Delta_H H - \Delta_G H \quad (6.1)$$

Verdünnen von Lösungen

$$w_1 m_1 = w_2 m_2 \quad (6.2)$$

$$c_1 V_1 = c_2 V_2 \quad (6.3)$$

Mischungsgleichung

$$w_M m_M = \sum_{i=1}^j w_i m_i \quad (6.4)$$

$$c_M V_M = \sum_{i=1}^j c_i V_i \quad (\text{vgl. (6.7) und (6.9)}) \quad (6.5)$$

Volumen idealer flüssiger Gemische

$$V_i = \left( \frac{\partial V}{\partial n_i} \right) \quad (6.6)$$

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_j = \sum_{i=1}^j V_i \quad (6.7)$$

Volumen realer flüssiger Gemische

$$\bar{V}_1 = \left( \frac{\partial V}{\partial n_1} \right)_{p, T, n_2, n_3, \dots, n_{i-1}} \quad (6.8)$$

$$V = n_1 \bar{V}_{m1} + n_2 \bar{V}_{m2} + \dots + n_j \bar{V}_{mj} = \sum_{i=1}^j n_i \bar{V}_{m,i} \quad (6.9)$$

## 6.2. Kolligative Eigenschaften ideal verdünnter Lösungen mit Nichtelektrolyten

### 6.2.1. Dampfdruckerniedrigung

$$\frac{P_{Lm} - P_L}{P_{Lm}} = \frac{\Delta p}{P_{Lm}} = \frac{n_2}{n_1 + n_2} = x_2 \quad (6.10)$$

RAOULTsches Gesetz

$$p_1 = x_1 \cdot p$$

(6.11)

Molmasse aus der Dampfdruckerniedrigung

$$M_2 = \frac{m_2 \cdot p_L}{n_1 \cdot \Delta p}$$

(6.12)

6.2.2. Kryoskopie, Ebullioskopie

Siedepunktserhöhung (Ebullioskopie)

$$\Delta T_S = T_{S,L} - T_{S,Lm} = E_S \cdot \frac{m_2}{M_2 \cdot m_1}$$

(6.13)

$$\Delta T_S = E_S \cdot \frac{\Delta p}{p_L \cdot M_{Lm}}$$

(6.14)

Ebullioskopische Konstante

$$E_S = \frac{R \cdot T^2 \cdot M_{Lm}}{\Delta_v H_m}$$

(6.15)

$M$  in  $\text{kg mol}^{-1}$   
 $m$  in  $\text{kg}$   
 $m_{Lm}$  in  $\text{kg}$

Gefrierpunktserniedrigung (Kryoskopie)

$$\Delta T_G = T_{G,Lm} - T_{G,L} = E_G \cdot \frac{m_2}{M_2 \cdot m_1}$$

(6.16)

$$\Delta T_G = E_G \cdot \frac{\Delta p}{p_L \cdot M_{Lm}}$$

(6.17)

Kryoskopische Konstante

$$E_G = \frac{R \cdot T^2 \cdot M_{Lm}}{\Delta_s H_m}$$

(6.18)

$M$  in  $\text{kg mol}^{-1}$   
 $m$  in  $\text{kg}$   
 $m_{Lm}$  in  $\text{kg}$

### 6.2.3. Osmotischer Druck

VAN'T-HOFFsche Gleichung

$$\pi = c R T = \frac{n}{V} R T \quad (6.19)$$

Osmotischer Druck aus Dampfdruckerniedrigung von Lösungen

$$\pi = \frac{\Delta p}{p_L} \frac{R T}{V} \quad (6.20)$$

Osmotischer Druck und Siedepunkterhöhung (Gefrierpunkterniedrigung)

$$\pi = \frac{\Delta T}{E_{S(G)}} \frac{S(G)}{R T} \quad (6.21)$$

Molmasse aus osmotischem Druck

$$M_2 = \frac{m_2 R T}{\pi V_L} \quad (6.22)$$

### 6.3. Kolligative Eigenschaften ideal verdünnter Elektrolytlösungen

VAN'T-HOFFscher Faktor

$$i = \frac{\text{gemessener kolligativer Effekt}}{\text{nach molaren Mengen berechneter kolligativer Effekt}} \quad (6.23)$$

VAN'T-HOFFscher Faktor für verdünnte Lösungen schwacher Elektrolyte

$$i = 1 + \alpha (v - 1) = \frac{\pi_0}{\pi_0} \quad (6.24)$$

$v$  Zahl der Ionen, in welche der Elektrolyt dissoziiert

VAN'T-HOFFsche Gleichung für schwache Elektrolyte

$$\pi = c i R T \quad (6.25)$$

Dissoziationsgrad schwacher Elektrolyte

$$\alpha = \frac{i - 1}{v - 1} \quad (6.26)$$



## Gefrierpunktserniedrigung/Siedepunktserhöhung

$$\Delta T_{G(S)} = E_{G(S)} \frac{m_2}{M_2} \frac{i}{m_1} \quad (6.27)$$

## Dampfdruckerniedrigung

$$\frac{p_{Lm} - p_L}{p_{Lm}} = i \frac{n_2}{n_1 + n_2} \quad (6.28)$$

## 6.4. Trennung flüssiger Gemische

### Idealer Trennfaktor

$$\alpha_0 = \frac{p_{0,B}}{p_{0,A}} \quad (6.29)$$

### Dampfdruck eines Zweikomponentensystems

$$p = p_{0,A} x_A + p_{0,B} x_B \quad (6.30)$$

### Partialdrücke der Komponente A im idealen Zweistoffsystem

- in der Dampfphase

$$p_A = x_A'' p \quad (6.31)$$

- in der flüssigen Phase

$$p_A = x_A' p_{0,A} \quad (6.32)$$

### Zusammensetzung der Gasphase über einer Mischung

$$x_{A,\%}'' = \frac{x_A' p_{0,A}}{p} \cdot 100 \% \quad (6.33)$$

## 7. Chemisches Gleichgewicht

### 7.1. Massenwirkungsgesetz

Gleichgewichtskonstante für die Reaktion



$$K_c = \frac{c_C^c c_D^d}{c_A^a c_B^b}; \quad K_c \text{ Gleichgewichtskonstante der molaren Konzentration} \quad (7.1)$$

$$K_p = \frac{p_C^c p_D^d}{p_A^a p_B^b}; \quad K_p \text{ Gleichgewichtskonstante der Partialdrücke} \quad (7.2)$$

$$K_x = \frac{x_C^c x_D^d}{x_A^a x_B^b}; \quad K_x \text{ Gleichgewichtskonstante der Molenbrüche} \quad (7.3)$$

Beziehungen zwischen den Gleichgewichtskonstanten

$$K_c = K_p (RT)^{-\Delta n} = K_x \left( \frac{RT}{p} \right)^{-\Delta n}$$

(7.4)

Summe der stöchiometrischen Faktoren

$$\Delta n \hat{=} \sum \nu_i = -a - b + c + d \quad (7.5)$$

Temperaturabhängigkeit der Gleichgewichtskonstante vgl. (8.99)  
bis (8.102)

### 7.2. Anwendung des Massenwirkungsgesetzes

#### 7.2.1. Thermische Dissoziation

Dissoziationsgrad vgl. (4.19)

Thermische Zustandsgleichung für dissoziierende Gase  
vgl. (4.22)

# Dissoziationsgrad und Massenwirkungsgesetz

Reaktionstyp	Gleichgewichtskonstante (p = Gesamtdruck der Gasmischung)	
$A_2 \rightleftharpoons 2 A$	$K_p = \frac{4\alpha^2}{1 - \alpha^2} p$	(7.6)
$AB \rightleftharpoons A + B$	$K_p = \frac{\alpha^2}{1 - \alpha^2} p$	(7.7)
$AB \rightleftharpoons \frac{1}{2} A_2 + \frac{1}{2} B_2$	$K_p = \frac{\alpha}{2(1 - \alpha)}$	(7.8)
$2 A_2B \rightleftharpoons 2 A_2 + B_2$	$K_p = \frac{\alpha^3}{(2 + \alpha)(1 - \alpha)^2} p$	(7.9)
$2 A_3B \rightleftharpoons 3 A_2 + B_2$	$K_p = \frac{27\alpha^4}{16(1 - \alpha^2)^2} p^2$	(7.10)

Summe der Stoffmengen

$$\sum n_i = (n_0 - n_0 \alpha) + n_0 \alpha \quad (7.11)$$

$$\sum n_i = n_0 [1 + \alpha (\nu - 1)] \quad (7.12)$$

vgl. (4.21)

## 7.2.2. Elektrolytische Dissoziation

Gesetz der Elektroneutralität

$$z_+ \nu_+ = |z_-| \nu_- = z_e \quad (7.13)$$

### 7.2.2.1. Schwache Elektrolyte

Dissoziationskonstante für die Reaktion  $AB \rightleftharpoons A^+ + B^-$

$$K_c = \frac{c_{A^+} \cdot c_{B^-}}{c_{AB}} \quad (7.14)$$

OSTWALDsches Verdünnungsgesetz

$$K_c = \frac{\alpha^2 c_0}{1 - \alpha} \quad (7.15)$$

### 7.2.2.2. Starke Elektrolyte

Dissoziationskonstante der Reaktion  $AB \rightleftharpoons A^+ + B^-$

$$K_a = \frac{a_{A^+} \cdot a_{B^-}}{a_{AB}} \quad (7.16)$$

Aktivität und Aktivitätskoeffizient

$$a = f_{\pm} \cdot \frac{c}{\pm 1 \text{ mol l}^{-1}}$$

(7.17)

Mittlerer Aktivitätskoeffizient des Elektrolyten  $A_x B_y$

$$f_{\pm} = \sqrt[x+y]{f_+^x f_-^y} \quad (7.18)$$

DEBYE-HÜCKEL-Gleichung

$$\lg f_{\pm} = - A |z_+ z_-| \sqrt{J} \quad (7.19)$$

( $A = 0,509$  bei  $J < 0,01 \text{ mol l}^{-1}$ )

Ionenstärke

$$J = \frac{1}{2} \sum c_i z_i^2 \quad (7.20)$$

### 7.2.3. Protolysegleichgewichte

#### 7.2.3.1. Autoprotolyse des Wassers

Gleichgewichtskonstante der Reaktion  $2 \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$

$$K_a = \frac{a_{\text{H}_3\text{O}^+} \cdot a_{\text{OH}^-}}{a_{\text{H}_2\text{O}}^2} \quad (7.21)$$

Ionenprodukt des Wassers

$K_W = a_{\text{H}_3\text{O}^+} \cdot a_{\text{OH}^-}$

 (7.22)

$$\text{p}K_W = \text{pH} + \text{pOH} \quad (7.23)$$

pH-Wert

$\text{pH} = -\lg a_{\text{H}_3\text{O}^+}$

 (7.24)

pOH-Wert

$$\text{pOH} = -\lg a_{\text{OH}^-} \quad (7.25)$$

#### 7.2.3.2. Protolyse von Säuren und Basen

Säurekonstante des Gleichgewichts  $\text{S}_1 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{B}_1$

$$K_S = \frac{a_{\text{B}_1} \cdot a_{\text{H}_3\text{O}^+}}{a_{\text{S}_1} \cdot a_{\text{H}_2\text{O}}} \approx \frac{a_{\text{B}_1} \cdot a_{\text{H}_3\text{O}^+}}{a_{\text{S}_1}} \quad (7.26)$$

Basenkonstante des Gleichgewichts  $\text{B}_1 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{OH}^- + \text{S}_1$

$$K_B = \frac{a_{\text{S}_1} \cdot a_{\text{OH}^-}}{a_{\text{B}_1} \cdot a_{\text{H}_2\text{O}}} \approx \frac{a_{\text{S}_1} \cdot a_{\text{OH}^-}}{a_{\text{B}_1}} \quad (7.27)$$

Zusammenhang zwischen Säure- und Basenkonstante

$$K_W = K_S K_B \quad (7.28)$$

$$pK_W = pK_S + pK_B = 14 \text{ (bei } 22^\circ\text{C)} \quad (7.29)$$

$$pK_S = -\lg K_S \quad (7.30)$$

$$pK_B = -\lg K_B \quad (7.31)$$

Protolysegrad (schwache Protolyte)

$$\alpha = \frac{c_0 - c_{S1}}{c_0} = \frac{c_{B1}}{c_0} \quad \text{bzw.} \quad \alpha = \frac{c_0 - c_{B1}}{c_0} \simeq \frac{c_{S1}}{c_0} \quad (7.32)$$

Protolysegrad schwacher Säuren ( $c_{S1} \ll c_0$ )

$$\alpha = \sqrt{\frac{K_S}{c_0}} \quad (7.33)$$

Protolysegrad schwacher Basen ( $c_{B1} \ll c_0$ )

$$\alpha = \sqrt{\frac{K_B}{c_0}} \quad (7.34)$$

Protolysegrad starker Säuren und Basen

$$\alpha = 1 \text{ (wenn } c_{S1} \text{ bzw. } c_{B1} = c_0) \quad (7.35)$$

Näherungsformeln zur Berechnung von Säure-Base-Gleichgewichten  
(einwertige Protolyte)

Protolyt	Bedingung für $K_S$	$c_{H_3O^+} \approx a_{H_3O^+} =$	Gültigkeit (s. Abb. 1)
starke Säure	$> 10^{-2}$	$c_0$	I (7.36)
	$> 10^{-4}$	$\frac{c_0}{2} + \sqrt{\frac{c_0^2}{4} + K_W}$	I, II, III, IV, V (7.37)
starke bis schwache Säure	$> 10^{-14}$	$-\frac{K_S}{2} + \sqrt{\frac{K_S^2}{4} + K_S c_0 + K_W}$	I, V, VI, VII, VIII (7.38)
mittelstarke Säure	$> 10^{-13}$ $< 10^{-2}$	$\sqrt{K_S c_0}$	VII (7.39)
schwache Säure	$> 10^{-14}$ $< 10^{-5}$	$\sqrt{K_S c_0 + K_W}$	IV, V, VI, VII (7.40)
starke Base	$K_B > 10^{-2}$	$c_{OH^-} \approx c_0$	(7.41)
Ampholyt	$K_{S1} \ll c_0$	$c_{H_3O^+} = \sqrt{K_{S1} \cdot K_{S2}}$	(7.42)

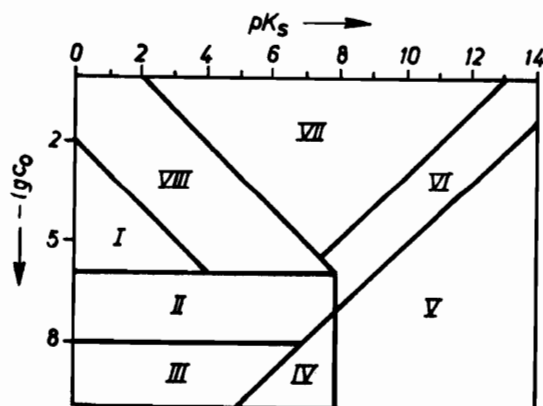


Abbildung 1  
Gültigkeitsbereiche der  
Näherungsformeln zur  
Berechnung des pH-Wertes

### 7.2.3.3. Protolyse von Salzen

Protolysegrad

- für Salze aus schwachen Säuren und starken Basen

$$\alpha = \frac{c_{\text{OH}^-}}{c_{\text{Salz}}} \quad (7.43)$$

- für Salze aus schwachen Basen und starken Säuren

$$\alpha = \frac{c_{\text{H}^+}}{c_{\text{Salz}}} \quad (7.44)$$

- für Salze aus schwachen Basen und schwachen Säuren

$$\alpha = \sqrt{\frac{K_{\text{H}}}{K_{\text{S}} K_{\text{B}}}} \quad (7.45)$$

### 7.2.4. Puffersysteme

Ionenaktivität von Puffersystemen

$$a_{\text{H}_3\text{O}^+} \approx K_{\text{S}} \frac{c_{\text{Säure}}}{c_{\text{Salz}}} \quad (7.46)$$

$$\text{pH} = \text{p}K_{\text{S}} - \lg \frac{c_{\text{Säure}}}{c_{\text{Salz}}} \quad (7.47)$$

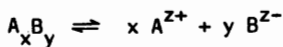
Pufferkapazität

$$\text{pH} = \text{p}K_{\text{S}} \pm 1 \quad (7.48)$$



### 7.3. Lösungs- und Fällungsgleichgewichte

Löslichkeitsprodukt für schwerlösliche Salze



$$K_L = a_{A^{z+}}^x a_{B^{z-}}^y \quad (7.49)$$

Löslichkeit

$$L_m = \sqrt[x+y]{\frac{K_L}{x^x \cdot y^y}} \quad (7.50)$$

Löslichkeit bei gleichionigem Zusatz B

$$L_m = \frac{1}{x} \sqrt[x]{\frac{K_L}{c_B^y}} \quad (7.51)$$

Löslichkeit bei gleichionigem Zusatz A

$$L_m = \frac{1}{y} \sqrt[y]{\frac{K_L}{c_A^x}} \quad (7.52)$$

$$L_m = \sqrt[x+y]{\frac{K_L}{x^x y^y f_{\pm}^x f_{\pm}^y}} \quad (7.53)$$

## 8. Chemische Thermodynamik

### 8.1. Wärme

#### Wärme

$$Q = m c (T_2 - T_1) \quad (8.1)$$

#### Spezifische Wärmekapazität

$$c = \frac{C}{m} = \frac{C_m}{M} \quad (8.2)$$

#### Wärmekapazität

$$C = m c = \frac{Q}{\Delta T} \quad (8.3)$$

#### Molare Wärmekapazität

$$C_m = \frac{C}{n} = c M \quad (8.4)$$

#### Wärmekapazität bei konstantem Druck

$$C_p = \frac{dQ}{dT} \Big|_p = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \quad (8.5)$$

#### Wärmekapazität bei konstantem Volumen

$$C_v = \frac{dQ}{dT} \Big|_v = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \quad (8.6)$$

#### Molare Wärmekapazitäten für Gase bei tiefen Temperaturen

Bau des Gasmoleküls	$C_{m,p} =$	$C_{m,v} =$	
1atomig	$5/2 R$	$3/2 R$	(8.7)
2atomig	$7/2 R$	$5/2 R$	(8.8)
3atomig gestreckt	$7/2 R$	$5/2 R$	(8.9)
3atomig gewinkelt	$4 R$	$3 R$	(8.10)

Mittlere Wärmekapazität eines reinen Stoffes zwischen  $T_1$  und  $T_2$

$$\bar{C}_p = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (8.11)$$

Beziehung zwischen  $C_{m,p}$  und  $C_{m,v}$  bei idealen Gasen

$C_{m,p} - C_{m,v} = R$

 (8.12)

Temperaturabhängigkeit der molaren Wärmekapazität

$$C_{m,p} = a + bT + cT^2 + \dots \quad (8.13)$$

$a, b, c$  empirisch ermittelte Stoffkonstanten

Molare Wärmekapazitäten für Feststoffe

DEBYEsches Gesetz

$$C_{m,v} = a \left( \frac{T}{\theta} \right)^3 \quad (8.14)$$

DEBYE-Konstante  $a = 1944,35 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

DULONG-PETITSche Regel

$$C_{m,v} \cdot M \approx 26,8 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad (8.15)$$

## 8.2. Energieumsatz bei Kompressions- und Expansionsvorgängen

Volumenarbeit

$$dW_v = -p dV \quad (8.16)$$

## Reversible Volumenarbeit idealer Gase

	isotherm $dT = 0$ ( $T = \text{const}$ )	isobar $dp = 0$ ( $p = \text{const}$ )	adiabatisch $dQ = 0$ ( $Q = \text{const}$ )
$dw_V =$	$- nRT \frac{dV}{V}$	$- p dV$	$\frac{- p dV}{n c_{m,V}} dT$
$w_V =$	$- nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$ $- nRT \ln \frac{p_1}{p_2}$	$- p (V_2 - V_1)$	$n c_{m,V} (T_2 - T_1)$

(8.17)

(8.18)

### POISSONscher Adiabatenexponent

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad (8.19)$$

### POISSONsche Adiabatengleichungen

$$p V^\kappa = \text{const} \quad \text{bzw.} \quad \frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^\kappa \quad (8.20)$$

$$T V^{\kappa-1} = \text{const} \quad \text{bzw.} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa-1} \quad (8.21)$$

### 8.3. Erster Hauptsatz der Thermodynamik

#### Kalorische Zustandsgleichung der inneren Energie

$$U = f(V, T, n) \quad (8.22)$$

$$dU = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_{V,n} dT + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_{T,n} dV + \left( \frac{\partial U}{\partial n} \right)_{T,V} dn \quad (8.23)$$

### Innere Energie im geschlossenen System

$$U = W + Q \quad (8.24)$$

$$dU = dW + dQ = dQ - p \, dV \quad (8.25)$$

### Änderung der inneren Energie

$$\Delta U = Q - \int p \, dV \quad (8.26)$$

### Temperaturabhängigkeit der inneren Energie

$$U_T = U_o + \int_{T_o}^T C_V \, dT \quad (8.27)$$

$$\Delta U = n \int_{T_1}^{T_2} C_{m,V} \, dT \quad (8.28)$$

### Temperaturabhängigkeit der molaren inneren Energie

$$U_{m,T} = U_{m,o} + n \int_{T_o}^T C_{m,V} \, dT \quad (8.29)$$

### Enthalpie

$$H = U + p \, V \quad (8.30)$$

$$dH = dU + d(p \, V) \quad (8.31)$$

### Kalorische Zustandsgleichung der Enthalpie

$$H = f(p, T, n) \quad (8.32)$$

$$dH = \left( \frac{\partial H}{\partial p} \right)_{T,n} dp + \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_{p,n} dT + \left( \frac{\partial H}{\partial n} \right)_{p,T} dn \quad (8.33)$$

## Temperaturabhängigkeit der Enthalpie

$$H_T = H_0 + \int_{T_0}^T C_p dT \quad (8.34)$$

$$\Delta H = n \int_{T_1}^{T_2} C_{m,p} dT \quad (8.35)$$

Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität vgl. (8.13)

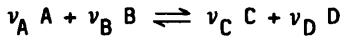
Reaktionsenthalpie vgl. (8.36)

## 8.4. Energie bei chemischen Reaktionen

### Reaktionsenthalpie

$$\Delta_R H = \sum_i \nu_i \Delta_f H_{m,i} \quad (8.36)$$

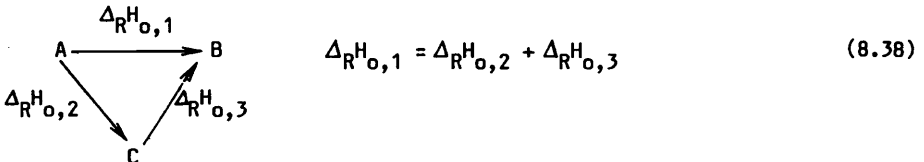
Summe der stöchiometrischen Faktoren einer Reaktion



$$\sum \nu_i = -\nu_A - \nu_B + \nu_C + \nu_D \quad (8.37)$$

### HESSsches Gesetz

Schema:



### Reaktionsenergie

$$\Delta_R U = \Delta_R H - \sum_i \nu_i R T \quad (8.39)$$

## KIRCHHOFFsches Gesetz

$$\left( \frac{\partial \Delta_R H}{\partial T} \right)_p = \Delta_R C_{m,p} \quad (8.40)$$

## Reaktionswärmekapazität

$$\Delta_R C_p = \sum v_i C_{p,m,i} \quad (\text{vgl. auch (8.37)}) \quad (8.41)$$

## Temperaturabhängigkeit der Reaktionsenthalpie

$$\Delta_R H_{T2} = \Delta_R H_{T1} + \int_{T_1}^{T_2} \Delta_R C_{m,p} dT \quad (8.42)$$

## Enthalpieänderung bei Phasenumwandlung eines reinen Stoffes

$$\Delta H_m = \int_{T_0}^{T_S} \Delta C_{m,p(s)} dT + \Delta_S H_m + \int_{T_S}^{T_V} \Delta C_{m,p(l)} dT + \Delta_V H_m + \int_{T_V}^T \Delta C_{m,p(g)} dT \quad (8.43)$$

## Spezifischer Heizwert (unterer Heizwert)

$$\Delta_H h = \Delta_V h - \Delta_V h_{H_2O} \quad (\text{in kJ kg}^{-1}) \quad (8.44)$$

mit  $\Delta_V h$  = spezifischer Brennwert (oberer Heizwert)

## 8.5. Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

### Formulierung des 2. Hauptsatzes

- thermisch

$$dS = \frac{dQ_{rev}}{T} \quad \text{oder} \quad \Delta S = \frac{Q_{rev}}{T} \quad (8.45)$$

- statistisch

$$S = k \ln \Omega \quad \text{oder} \quad \Delta S = k \ln \frac{\Omega_2}{\Omega_1} \quad (8.46)$$

### Temperaturabhängigkeit der Entropie

$$S_T = S_0 + \int_{T_0}^T \frac{C_p}{T} dT \quad (8.47)$$

$$\Delta S = n \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_{m,p}}{T} dT \quad (8.48)$$

### Druckabhängigkeit der Entropie

$$dS = - \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dp \quad (8.49)$$

$$\Delta S = n R \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (8.50)$$

### Volumenabhängigkeit der Entropie

$$\Delta S = n R \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (8.51)$$

### Abhängigkeit der Entropie von Temperatur und Volumen

$$\Delta S = n \left[ (C_{m,V} d \ln T + \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_V dV) \right] \quad (8.52)$$

- für ideale Gase

$$\Delta S = n \left[ \int_{T_1}^{T_2} C_{m,V} d \ln T + R \ln \frac{V_2}{V_1} \right] \quad (8.53)$$

- für ideale Gase ( $C_{m,V} = \text{const}$  angenommen)

$$\Delta S_m = C_{m,V} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (8.54)$$

$$\Delta S = n \left[ C_{m,V} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \right] \quad (8.55)$$



Reaktionsentropie

$$\Delta_R S = \sum_j \nu_j S_{m,j} \quad (8.56)$$

(vgl. a. (8.37))

Temperaturabhängigkeit der Reaktionsentropie

$$\Delta_R S_{T2} = \Delta_R S_{T1} + \int_{T_1}^{T_2} \frac{\Delta_R C_{m,p}}{T} dT \quad (8.57)$$

Reaktionswärmekapazität vgl. (8.41)

Phasenumwandlungsentropie

$$\Delta_p S_m = -\frac{\Delta_p H_m}{T_p} \quad (8.58)$$

TROUTONsche Regel

$$\left( \frac{\Delta_p H_m}{T_p} = \Delta_p S_m \right) \approx (88 \pm 4) \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad (8.59)$$

8.6. Anwendung des 2. Hauptsatzes auf geschlossene Systeme

Arbeit

	reversibler Prozeß	irreversibler Prozeß	
dW	= dU - T dS	> dU - T dS	(8.60)
dW <sub>N</sub>	= dU - T dS + p(dV) <sub>p</sub>	> dU - T dS + p(dV) <sub>p</sub>	(8.61)
dT = 0	W <sub>rev</sub> < W <sub>irr</sub>	Q <sub>rev</sub> > Q <sub>irr</sub>	(8.62)

Freie Energie (nach HELMHOLTZ)

$$A = U - T S$$

(dT = 0)

(8.63)

## Freie Enthalpie (nach GIBBS)

$$G = U - T S + p V = H - T S \quad (8.64)$$

## Kriterien für Freiwilligkeit, Gleichgewicht und Zwang

	$(T, V) = \text{const}$	$(T, p) = \text{const}$	$W_{N, \text{rev}}$	
Freiwilligkeit	$\Delta F < 0$	$\Delta G < 0$	$< 0$	(8.65)
Gleichgewicht	$\Delta F = 0$	$\Delta G = 0$	$= 0$	(8.66)
Zwang	$\Delta F > 0$	$\Delta G > 0$	$> 0$	(8.67)

vgl. a. Tabelle 12

## Chemisches Potential

$$\mu = \left( \frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{p, T, n_{i-1}} \quad (8.68)$$

## Chemisches Potential und reversible Nutzarbeit

$$\mu_i \, dn_i = d W_{N, \text{rev}} \quad (8.69)$$

## Chemisches Potential für reine Stoffe

$$\mu = G_m = H_m - T S_m \quad (8.70)$$

## Chemisches Potential für ideale Gase

$$\mu_i = \mu_{0,i} + R T \ln \frac{p_i}{p_n} \quad (8.71)$$

## Chemisches Potential in Mischphasen

$$\mu_i = \mu_{0,i} + R T \ln a_i \quad (8.72)$$

Chemisches Potential für ideale Mischungen/ideale Lösungen

$$\mu_i = \mu_{0,i} + R T \ln x_i \quad (8.73)$$

Reales Zweikomponentensystem; GIBBS-DUHEMSche Gleichung

$$x_1 d\mu_1 + x_2 d\mu_2 = 0 \quad (8.74)$$

$$x_1 d \ln a_1 + x_2 d \ln a_2 = 0 \quad (8.75)$$

Partialdrücke des Dampfes über einer kondensierten Mischung;  
DUHEM-MARGULES-Gleichung

$$x_1 \frac{d\mu_1}{dx_1} + x_2 \frac{d\mu_2}{dx_2} = 0 ; \quad (\text{für } dT = 0) \quad (8.76)$$

Zusammensetzung der kondensierten Phase (bei Drücken < 0,1 MPa)

$$x_1 \frac{d \ln p_1}{dx_1} - x_2 \frac{d \ln p_2}{dx_2} = 0 ; \quad (x_2 = 1 - x_1) \quad (8.77)$$

GIBBSsche Fundamentalgleichungen

$dU = TdS - pdV + \sum \mu_i dn_i$	$U = TS - pV + \sum n_i \mu_i$	(8.78)
------------------------------------	--------------------------------	--------

$dH = TdS + Vdp + \sum \mu_i dn_i$	$H = TS + \sum n_i \mu_i$	(8.79)
------------------------------------	---------------------------	--------

$dF = -SdT - pdV + \sum \mu_i dn_i$	$F = -pV + \sum n_i \mu_i$	(8.80)
-------------------------------------	----------------------------	--------

$dG = -SdT + Vdp + \sum \mu_i dn_i$	$G = \sum n_i \mu_i$	(8.81)
-------------------------------------	----------------------	--------

GIBBS-HELMHOLTZ-Gleichungen

$$G = H + T \left( \frac{\partial G}{\partial T} \right)_p = H - TS \quad (8.82)$$

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

(8.83)

$$H = U + T \left( \frac{\partial F}{\partial T} \right)_V = U - TS \quad (8.84)$$

$$\Delta H = \Delta U - T \Delta S$$

(8.85)

### 8.7. Gleichgewichtsbedingungen

Allgemeine Gleichgewichtsbedingung im geschlossenen System

$$(p, V) = \text{const}$$

$$dG = 0$$

(8.86)

$$\sum v_i \mu_i = 0$$

(8.87)

#### 8.7.1. Phasengleichgewichte

Gleichgewicht zwischen Phase 1 und Phase 2

$$\mu_1 = \mu_2$$

(8.88)

Gleichgewicht in Lösungen; NERNSTscher Verteilungssatz

(Lösung ideal verdünnt;  $(T, p) = \text{const}$ )

$$\frac{a_1}{a_2} = K_{N,i} \quad K_{N,i} \text{ NERNSTscher Verteilungskoeffizient}$$

(8.89)

GIBBSsches Phasengesetz

$$F = K + 2 - P$$

(8.90)

Gleichgewicht zwischen flüssiger und gasförmiger Phase

CLAUSIUS-CLAPEYRONsche Gleichung

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta_p H}{T_p \Delta_p V}$$

(8.91)

Dampfdruckgleichung

$$\left( \frac{d \ln p}{dT} \right) = \frac{\Delta_v H_m}{R T^2} \quad (8.92a)$$

-, integrierte Form

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = - \frac{\Delta_v H_m}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (8.92b)$$

Temperaturabhängigkeit der Enthalpie vgl. (8.34)

### Gleichgewichte zwischen Gasphase und Lösung

Löslichkeitskoeffizient (Absorptionskoeffizient)

HENRY-DALTON-Gesetz (für ideale Gase)

$$\alpha_i = \frac{c_i(fl)}{p_i} \quad (i \text{ gasförmige Komponente}) \quad (8.93)$$

-, nach OSTWALD

$$\alpha_{OS} = \frac{c_i(fl)}{c_i(g)} \quad (8.94)$$

BUNSENScher Absorptionskoeffizient

$$\alpha_{BU} = \alpha_{OS} \left( \frac{T_{NB}}{T} \right) \quad (8.95)$$

### 8.7.2. Chemische Gleichgewichte

Massenwirkungsgesetz

$$\prod (a_i^{\nu_i}) = \frac{a_C^{\nu_C} a_D^{\nu_D}}{a_A^{\nu_A} a_B^{\nu_B}} = K = f(T, p) \quad (8.96)$$

Chemisches Gleichgewicht und freie Standardreaktionsenthalpie

$$\Delta_R G_o = - R T \ln K_a \quad (8.97)$$

## Chemisches Gleichgewicht und freie Standardreaktionsenthalpie

$$\Delta_{R^0}^F = - R T \ln K_c \quad (8.98)$$

Abhängigkeit der Gleichgewichtskonstante von den Zustandsbedingungen  
(VAN'T HOFF)

- Reaktionsisobare

$$\left( \frac{\partial \ln K}{\partial T} \right)_p = \frac{\Delta_{R^0}^H}{R T^2} \quad (8.99)$$

- - integrierte Form

$$\ln \frac{K_2}{K_1} = - \frac{\Delta_{R^0}^H}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (8.100)$$

- Reaktionsisochore

$$\left( \frac{\partial \ln K}{\partial T} \right)_V = \frac{\Delta_{R^0}^U}{R T^2} \quad (8.101)$$

- - integrierte Form

$$\ln \frac{K_2}{K_1} = - \frac{\Delta_{R^0}^U}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (8.102)$$

Druckabhängigkeit der Gleichgewichtskonstante

$$\left( \frac{\partial \ln K}{\partial p} \right)_T = - \frac{\Delta_{R^0}^V}{R T} \quad (8.103)$$

- - integrierte Form

$$\ln \frac{K_2}{K_1} = - \frac{\Delta_{R^0}^V}{R T} \cdot (p_2 - p_1) \quad (8.104)$$

Temperaturabhängigkeit der inneren Energie vgl. (8.27)

Temperaturabhängigkeit der Enthalpie vgl. (8.34)

## 9. Elektrochemische Vorgänge

### 9.1. Elektrische Leitfähigkeit

Elektrischer Widerstand

$$R = \varrho \frac{l}{A} = \frac{U}{I} \quad (9.1)$$

Elektrischer Leitwert

$$G = \frac{1}{R} \quad (9.2)$$

Elektrische Leitfähigkeit

$$\kappa = \frac{1}{\varrho} \quad (9.3)$$

Molare Leitfähigkeit

$$\Lambda_m = \frac{\kappa}{c} \quad (9.4)$$

Äquivalentleitfähigkeit

$$\Lambda_{ev} = \frac{\Lambda_m}{z_e} = \frac{\kappa}{z_e c} \quad (9.5)$$

Ionenbeweglichkeit

$$v = \frac{u}{E} \quad (9.6)$$

Ionenäquivalentleitfähigkeit

$$\Lambda_{\pm} = F v_{\pm} \quad (9.7)$$

Leitfähigkeit bei unendlicher Verdünnung (Grenzleitfähigkeit)

$$\Lambda_{\infty} = \Lambda_{+\infty} + \Lambda_{-\infty} \quad (9.8)$$

Leitfähigkeitskoeffizient (für vollständig dissoziierte Elektrolyte)

$$f_{\Lambda} = \frac{\Lambda_{ev}}{\Lambda_{\infty}} \quad (\alpha \approx 1) \quad (9.9)$$

Konzentrationsabhängigkeit der Äquivalentleitfähigkeit  
(KOHLENSCHE'SCHE Quadratwurzelgesetz)

$$\Lambda_{ev} = \Lambda_{\infty} - k \sqrt{c} \quad k \text{ Konstante} \quad (9.10)$$

Dissoziationsgrad

$$\alpha = \frac{\Lambda_{ev}}{\Lambda_{\infty}} \quad (\alpha \leq 1) \quad (9.11)$$

Elektrische Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Konzentration

- bei schwachen Elektrolyten

$$\kappa = |z_e| c \alpha f_{\Lambda} \Lambda_{\infty} \quad (9.12)$$

$$\kappa = |z_e| c \alpha (\Lambda_+ + \Lambda_-) = |z_e| c \alpha \Lambda_{ev} \quad (9.13)$$

- bei starken Elektrolyten

$$\kappa = |z_e| c \Lambda_{ev} \quad (9.14)$$

$$\kappa = |z_e| c f_{\Lambda} \Lambda_{\infty} \quad (9.15)$$

OSTWALD'SCHES Verdünnungsgesetz

$$K_c = \frac{\Lambda_{ev}^2 c_0}{\Lambda_{\infty}(\Lambda_{\infty} - \Lambda_{ev})} \quad (9.16)$$

9.2. Überführung

Überführungszahlen (nach HITTORF) für einen Elektrolyten  $A_x^{z+} B_y^{z-}$

$$n_+ = \frac{x v_+}{x v_+ + y v_-} \quad (9.17)$$

$$n_+ + n_- = 1 \quad (9.18)$$



Grenzwert der Überföhrungszahl (für unendlich verdünnte Lösungen;  
 $j < 10^{-2} \text{ mol l}^{-1}$ )

$$n_{+\infty} = \frac{\Lambda_{+\infty}}{\Lambda_{\infty}} \quad (9.19)$$

### 9.3. Elektrodenprozesse

Elektrodenpotential (GALVANI-Spannung)

$$E = \Delta \varepsilon = \varepsilon_{(1)} - \varepsilon_{(2)} \quad (9.20)$$

$\varepsilon$  GALVANI-Potential

Potential der Elektrodenreaktion  $a \text{ OM} + z e^- \rightleftharpoons b \text{ RM}$

(NERNST-Gleichung)

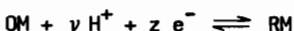
$$E = E_o + \frac{R}{z_e} \ln \frac{a_{\text{OM}}^a}{a_{\text{RM}}^b} = E_o + \frac{F_N}{z_e} \lg \frac{a_{\text{OM}}^a}{a_{\text{RM}}^b} \quad (9.21)$$

NERNST-Faktor

$$F_N = \frac{2,303 R T}{F} \quad (9.22)$$

$\Delta y_{o_c}$	0	15	18	20	25
$F_N/V$	0,0542	0,0572	0,0578	0,0582	0,0592

Potential des pH-abhängigen korrespondierenden Redoxpaares



$$E = E_o - F_N \frac{\nu}{z_e} \text{pH} \quad (9.23)$$

Diffusionspotential zwischen den Phasen (1) und (2)

$$E_d = \varepsilon_{(1)} - \varepsilon_{(2)} = \frac{v_+ - v_-}{v_+ + v_-} \frac{F_N}{z_e} \ln \frac{a_{(2)}}{a_{(1)}} \quad (9.24)$$

HENDERSONSche Gleichung (für einwertige Ionen)

$$E_d = (n_+ - n_-) \frac{R T}{F} \ln \frac{a_{(1)}}{a_{(2)}} \quad (9.25)$$

Membranpotential

$$E_M = \epsilon_{(1)} - \epsilon_{(2)} = \pm \frac{R T}{z_e F} \ln \frac{a_{(1)}}{a_{(2)}} \quad (9.26)$$

Potential der Glaselektrodenkette

$$E_{Gl} = F_N (pH_A - pH_K) + E_a \quad (9.27)$$

A Anodenelektrolyt  $E_a$  Asymmetriepotential

K Katodenelektrolyt

#### 9.4. Galvanische Zellen

Zellspannung

$$U = (R_a + R_i) I = - E \quad (9.28)$$

Elektromotorische Kraft (EMK)

$$E = E_K - E_A \quad (9.29)$$

Standard-EMK eines Redoxsystems (LUTHERSche Regel)

$$E_o = \frac{(z_e E_o)_K - (z_e E_o)_A}{z_{e,K} - z_{e,A}} \quad (9.30)$$

Gleichgewichtskonstante der Zellreaktion

$$K_a = \exp \left( \frac{z_e F E_o}{R T} \right) \quad (9.31)$$

Elektrische Nutzarbeit der Zellreaktion (bei reversibler Prozeßführung)

$$W_{el} = \Delta_R G = \Delta_R H - T \Delta_R S \quad (9.32)$$

Reaktionsentropie der Zellreaktion

$$\Delta_R S = z_e n F \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_p \quad (9.33)$$

Reaktionsenthalpie der Zellreaktion

$$\Delta_R H = - z_e n F \left[ E - T \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_p \right] \quad (9.34)$$

Temperaturkoeffizient der EMK

$$\frac{\Delta E}{\Delta T} = \frac{\Delta_R H - z_e n F E}{z_e n F T} = \frac{\Delta_R H - \Delta_R G}{z_e n F T} \quad (9.35)$$

#### 9.5. Strom und Spannung in elektrochemischen Prozessen

Elektrische Arbeit

$$W_{el} = U I t = U Q \quad (9.36)$$

Elektrische Leistung

$$P = U I \quad (9.37)$$

FARADAYSches Gesetz

$$Q = I t = z_e n F \quad (9.38)$$

Stromdichte an Elektroden

- Gesamtstromdichte

$$j = \frac{I}{A} = j_+ + j_- \quad (9.39)$$

- Austauschstromdichte

$$j_0 = j_+ = |j_-| \quad (9.40)$$

- Diffusionsstromdichte

$$j_d = - z_e A D \frac{c - c_0}{\delta} \quad (9.41)$$

$c_0$  Konzentration an der Phasengrenzfläche

$c$  Konzentration im Phaseninnern

- Diffusionsgrenzstromdichte

$$j_{d,Gr} = - z_e A D \frac{c}{\delta} \quad (9.42)$$

Elektrodenpolarisation

$$P = E_I - E_R \quad (9.43)$$

Überspannung

$$\eta = E_I - \epsilon_{Gl} \quad \epsilon_{Gl} \text{ Gleichgewichtspotential der Elektrode} \quad (9.44)$$

- Durchtrittsüberspannung (TAFEL-Gleichung)

$$\eta_T = a + b \ln j \quad (9.45)$$

- Konstanten der TAFEL-Gleichung

$$a = - b \ln j_0 \quad (9.46)$$

$$b = \frac{R T}{|z_e| F \alpha} \quad \text{Durchtrittsfaktor} \quad (9.47)$$

- Diffusionsüberspannung

$$\eta_d = \frac{R T}{z_e F} \ln \frac{c}{c_{Gl}} \quad c_{Gl} \text{ Ionenkonzentration im stromlosen Zustand} \quad (9.48)$$

$$\eta_d = \frac{R T}{z_e F} \ln \left[ 1 - \frac{j_d}{j_{d,Gr}} \right] \quad (9.49)$$

### Zellpolarisation

$$\eta_z = \sum \eta + I R_i \quad (9.50)$$

### Zersetzungsspannung

$$U_z = U_{z,A} - U_{z,K} \quad (9.51)$$

### Zelle Spannung

$$U = U_z + \eta_z \quad (9.52)$$

### Spannungsabfall durch Innenwiderstand $R_i$ der Zelle

$$\Delta U = I R_i = E \frac{R_i}{R_i + R_a} \quad (9.53)$$

### Materialausbeute

$$\eta_n = \frac{m_A}{m_E} \cdot 100 \% \quad (Q = \text{const}; M = \text{const}) \quad (9.54)$$

$m_A$  Masse der Ausgangsstoffe im Reaktionsprodukt

$m_E$  Masse der umgesetzten Ausgangsprodukte

### Stromausbeute

$$\eta_S = \frac{(I t)_{\text{theor}}}{(I t)_{\text{eff}}} \cdot 100 \% \quad (m = \text{const}) \quad (9.55)$$

### Energieausbeute

$$\eta_E = \frac{(Q U)_{\text{theor}}}{(Q U)_{\text{eff}}} \cdot 100 \% \quad (m = \text{const}) \quad (9.56)$$

theor theoretisch notwendiger Betrag  
eff aufzuwendender Betrag

10. Reaktionskinetik

10.1. Reaktionsordnungen und Zeitgesetze

Reaktions- gleichung	-ord- nung	Zeitgesetz	integriertes Zeitgesetz	Halbwerts- zeit $t_{1/2}$
$A \longrightarrow E$	0.	$-\frac{dc_A}{dt} = k$	$k = \frac{1}{t} (c_{0,A} - c_A)$	$\frac{c_0}{2k}$
$A \longrightarrow E$	1.	$-\frac{dc_A}{dt} = k c_A$	$k = \frac{1}{t} \ln \frac{c_{0,A}}{c_A}$	$\frac{\ln 2}{k}$
$2 A \longrightarrow E$	2.	$-\frac{dc_A}{dt} = k c_A^2$	$k = \frac{1}{t} \left[ \frac{1}{c_A} - \frac{1}{c_{0,A}} \right]$	$\frac{1}{k c_{0,A}}$
$A + B \longrightarrow E$ ( $c_A \neq c_B$ )		$-\frac{dc_A}{dt} = k c_A c_B$	$k = \frac{1}{t(c_{0,A} - c_{0,B})} \ln \frac{c_A c_{0,B}}{c_B c_{0,A}}$	
$A + B + C \longrightarrow E$ ( $c_A = c_B = c_C$ )	3.	$-\frac{dc_A}{dt} = k c_A^3$	$k = \frac{1}{2t} \left[ \frac{1}{c_A^2} - \frac{1}{c_{0,A}^2} \right]$	$\frac{3}{2k c_{0,A}^2}$
$A + B + \dots \longrightarrow E$ ( $c_A = c_B = \dots$ )	n.	$-\frac{dc_A}{dt} = k c_A^n$	$k = \frac{1}{(n-1)t} \left[ \frac{1}{c_A^{n-1}} - \frac{1}{c_{0,A}^{n-1}} \right]$	$\frac{2^{n-1} - 1}{k (n-1) c_{0,A}^{n-1}}$

(10.1)

(10.2)

(10.3)

Hinweis:  $c_A$  (bzw.  $c_B$ ) =  $c_{0,A(B)} - x$ , wobei  $x$  Konzentration des umgesetztten Stoffes

## 10.2. Folgereaktionen und Parallelreaktionen



Bestimmung der Stoffkonzentrationen A, B und C

$$\frac{dc_A}{dt} = -k_1 c_A \quad (10.4)$$

- integriertes Zeitgesetz

$$c_A = c_{0,A} \cdot \exp(-k_1 t) \quad (10.5)$$

$$\frac{dc_B}{dt} = -k_1 c_A - k_2 c_B \quad (10.6)$$

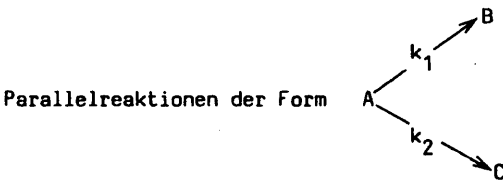
- integriertes Zeitgesetz

$$c_B = c_{0,A} \left[ \frac{k_1}{k_2 - k_1} \left( \exp(-k_1 t) - \exp(-k_2 t) \right) \right] \quad (10.7)$$

$$\frac{dc_C}{dt} = k_2 c_B \quad (10.8)$$

- integriertes Zeitgesetz

$$c_C = c_{0,A} \left[ 1 - \frac{1}{k_2 - k_1} k_2 \left( \exp(-k_1 t) - k_1 \exp(-k_2 t) \right) \right] \quad (10.9)$$



$$\frac{dc_A}{dt} = -k_1 c_A - k_2 c_A \quad (10.10)$$

- integriertes Zeitgesetz

$$c_A = c_{0,A} \exp(- (k_1 + k_2) t) \quad (10.11)$$

$$\frac{dc_B}{dt} = k_1 c_A \quad (10.12)$$

- integriertes Zeitgesetz

$$c_B = \frac{k_2}{k_1 + k_2} \cdot c_{0,A} \left[ 1 - \exp(- (k_1 + k_2) t) \right] \quad (10.13)$$

$$\frac{dc_C}{dt} = k_2 c_A \quad (10.14)$$

- integriertes Zeitgesetz

$c_C$  wie (10.13)

$$\frac{c_B}{c_C} = \frac{k_1}{k_2} \quad (10.15)$$

### 10.3. Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit

Aktivierungsenergie (ARRHENIUS)

$$\boxed{\frac{d \ln k}{dT} = \frac{W_A}{R T^2}} \quad (10.16)$$

- integrierte Form

$$\ln \frac{k_{T2}}{k_{T1}} = - \frac{W_A}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (10.17)$$

Aktionskonstante, präexponentieller Faktor

$$k_{\max} = k \exp(- W_A/RT) \quad (10.18)$$



## 11. Grenzflächengleichgewichte

### 11.1. Oberflächenspannung

Spezifische Oberflächenspannung

$$\sigma = \left( \frac{\partial G}{\partial A} \right)_{p,T} \quad (11.1)$$

Oberflächenarbeit

$$dW = \int \sigma dA = \sigma (A_2 - A_1) \quad (11.2)$$

Molare Oberflächenspannung

$$\sigma_m = \sigma v_m^{2/3} \quad (11.3)$$

Temperaturabhängigkeit der molaren Oberflächenspannung

EÜTVÖSsche Regel

$$\sigma_m = k_\sigma (T'_k - T) \quad \text{mit} \quad T'_k \approx (T - 6) \quad (11.4)$$

EÜTVÖSsche Konstante (für fast alle nichtassoziierten Flüssigkeiten)

$$k_\sigma \approx 2,1 \cdot 10^{-7} \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-2/3} \quad (11.5)$$

Grenzflächenspannung; ANTONOVsche Regel

$$\sigma_{\text{Grenz}} = \sigma_1 - \sigma_2 \quad (11.6)$$

YOUNG-Gleichung

$$\sigma_{s/g} - \sigma_{s/l} = \sigma_{l/g} \cdot \cos \alpha \quad (11.7)$$

Oberflächenspannung nach der Kapillarmethode

$$\sigma = \frac{1}{2} r h g \rho \quad (11.8)$$

## Oberflächenspannung nach der Blasendruckmethode

$$\sigma = \frac{r}{8} (\Delta p - \rho g h) \quad (11.9)$$

## Oberflächenspannung nach der Lamellenmethode

$$\sigma = \frac{F}{2 l} \quad (11.10)$$

## 11.2. Adsorption

### FREUNDLICH-Isotherme

$a = k c^{1/n}$
-----------------

 $k, n$  temperaturabhängige Konstanten (11.11)

$a = k p^{1/n}$
-----------------

(11.12)

### LANGMUIR-Isotherme

$a = a_{\infty} \frac{c}{b + c}$
----------------------------------

 $b$  Konstante (11.13)

$a = a_{\infty} \frac{p}{b + p}$
----------------------------------

(11.14)

### BET-Gleichung

$$\frac{p}{V (p_{\text{Ads}} - p)} = \frac{1}{C V_{\text{mono}}} + \frac{C - 1}{C V_{\text{mono}}} \cdot \frac{p}{p_{\text{Ads}}} \quad (11.15)$$

### Konstante der BET-Gleichung (1. Näherung)

$$C = e^{\frac{\Delta_{\text{Ads}} H_m - \Delta_K H_m}{R T}} \quad (11.16)$$

### Flächenbedarf eines adsorbierten Moleküls

- einzeln, kugelförmig

$$A_1 = \pi r_M^2 = 1,21 \left( \frac{V_m}{N_A} \right)^{2/3} \quad (11.17)$$

- dichteste Kugelpackung

$$A_1 = 3,46 r_M^2 = 1,33 \left( \frac{V_m}{N_A} \right)^{2/3} \quad (11.18)$$

Temperaturabhängigkeit des Adsorptionsgleichgewichts

$$\left( \frac{\partial \ln p}{\partial T} \right)_a = - \frac{\Delta \text{Ads}^H_m}{R T^2} = \frac{\Delta \text{Des}^H_m}{R T^2} \quad (11.19)$$

### 11.3. Chromatographie

#### 11.3.1. Allgemeine Chromatographie

Trennfaktor

$$\beta = \frac{C_A}{C_B} \quad C \text{ Verteilungskoeffizient} \quad (11.20)$$

Retentionsfaktor

$$R_f = \frac{\text{Laufstrecke Substanz}}{\text{Strecke Lösungsmittelfront} - \text{Startlinie}} \quad (11.21)$$

Standard-Retentionsfaktor

$$R_{st} = \frac{\text{Laufstrecke Substanz}}{\text{Laufstrecke Standardsubstanz}} \quad (11.22)$$

Verteilungskoeffizient der Papierchromatographie

$$C = \frac{K_{mob}}{K_{stat}} \left( \frac{1 - R_f}{R_f} \right) \quad (11.23)$$

#### 11.3.2. Gaschromatographie

Theoretische Trennstufenzahl

$$n = \frac{1}{H} = 16 \left( \frac{t_R}{b} \right)^2 \quad (11.24)$$

- bei unsymmetrischen Banden

$$n = 5,54 \left( \frac{t_R}{b_{1/2}} \right)^2 \quad (11.25)$$

Retentionsvolumen

$$V_R = t_R u_T \quad (11.26)$$

Trennleistung einer Säule

VAN-DEEMTER-Gleichung

$$H = A + \frac{B}{u_T} + C u_T \quad (11.27)$$

Konstanten der VAN-DEEMTER-Gleichung

$$A = 2 \lambda d_p \quad (11.28)$$

$$B = 2 \gamma D_g \quad (11.29)$$

$$C = \frac{g_n k d}{\pi^2 D_l (1 + k')^2} \quad (11.30)$$

k Verteilungskoeffizient der Gaschromatografie

k' vorgangsspezifische Konstante

Leistungsindex einer Säule

$$I = \frac{(b_{1/2})^4}{t^4 - \frac{15}{16} t_R t_L} t_L \Delta p \quad (11.31)$$

HERINGTONsche Trennformel

$$\frac{t_{R,1}}{t_{R,2}} = \frac{p_2 f_2}{p_1 f_1} \quad (11.32)$$

#### 11.4. Viskosität

NEWTONsche Gleichung

$$F = \eta A \frac{dv}{dx} \quad (11.33)$$

Bestimmung der Viskosität (Kapillarmethode)

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{t_1}{t_2} \quad (11.34)$$

$$\eta = K_\eta \rho t \quad (11.35)$$

$K_\eta$  Viskosimeterkonstante in  $\text{Nm kg}^{-1}$

Fluidität

$$\varphi = \frac{1}{\eta} \quad (11.36)$$

Schubspannung

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx} \quad (11.37)$$

Kinematische Viskosität

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (11.38)$$

Relative Viskosität

$$\eta_r = \frac{\eta_L}{\eta_{Lm}} \quad (11.39)$$

Spezifische Viskosität

$$\eta_{sp} = \frac{\eta_L - \eta_{Lm}}{\eta_{Lm}} = \eta_r - 1 \quad (11.40)$$

## Viskosität kolloider Dispersionen

### Sphärokolloide

$$\frac{\eta_{sp}}{c} = K \quad K \text{ Konstante} \quad (11.41)$$

### Linearkolloide, STAUDINGER-Gleichung

$$\frac{\eta_{sp}}{c} = K M \quad K \text{ Konstante} \quad (11.42)$$

### Grenzviskosität

$$[\eta] = \lim_{c \rightarrow 0} \frac{\eta_{sp}}{c} = K' M \quad K' \text{ Konstante} \quad (11.43)$$

### Konzentrationsabhängigkeit der relativen Viskosität

$$\ln \eta_r = K c \quad K \text{ Konstante} \quad (11.44)$$

### FIKENTSCHER-Gleichung

$$\lg \eta_r = \left( \frac{75 K^2}{1 + 1,5 K c} + K \right) c \quad K \text{ Konstante} \quad (11.45)$$

## 11.5. Diffusion

Teilchentransport bei zeitunabhängigem Konzentrationsgefälle;

### 1. FICKsches Gesetz

$$dn = - DA \cdot \frac{dc}{dx} dt$$

 (11.46)

### Diffusionskoeffizient

$$D = \frac{k T}{6\pi \eta r} \quad (11.47)$$

- in Elektrolytlösungen

$$D = \frac{v}{z_e} \frac{R}{F} T \quad (11.48)$$

Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten

$$D = D_0 \exp(-W_A/RT) \quad (11.49)$$

Diffusionsgeschwindigkeit

$$v_d = - \frac{dc}{dt} = \frac{D}{V_L} A \cdot \frac{dc}{dx} \quad (11.50)$$

Auflösungsgeschwindigkeit von Salzen;

Gleichung von NERNST-NOYES-WHITNEY

$$\frac{dc}{dt} = \frac{D}{\delta V_L} A \cdot (c_S - c) = k_1 (c_S - c) \quad (11.51)$$

Teilchentransport in Gasen und stark verdünnten Lösungen bei zeitabhängigem Konzentrationsgefälle in x-Richtung

2. FICKsches Gesetz

$$\left( \frac{\partial c}{\partial t} \right) = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right) \quad (11.52)$$

## 12. Photochemie

Lichtstrom

$$\Phi = \frac{dE}{dt} \quad E \text{ Strahlungsenergie} \quad (12.1)$$

Durchlaßgrad, Transparenz

$$D = \frac{\Phi_D}{\Phi} \quad \Phi_D \text{ durchtretender Lichtstrom} \quad (12.2)$$

Absorptionsgrad, Absorbanz

$$A = \frac{\Phi_0 - \Phi}{\Phi_0} = \frac{\Phi_A}{\Phi} \quad \Phi_A \text{ absorbierter Lichtstrom} \quad (12.3)$$

Strahlungsdurchgang ohne Reflexion

$$A + D = 1 \quad (12.4)$$

LAMBERT-Gesetz

$$-\frac{d\Phi}{\Phi} = k \, dl \quad k \text{ natürlicher Extinktionskoeffizient} \quad (12.5)$$

Extinktion

$$E = -\lg D = \lg \frac{\Phi}{\Phi_D} = \frac{k}{2,303} l = 0,4343 k l \quad (12.6)$$

Molarer Extinktionskoeffizient (bei  $\lambda = \text{const}$ )

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{0,4343 k}{c} \quad (12.7)$$

LAMBERT-BEERSches Gesetz

$$E = \varepsilon(\lambda) \cdot c \cdot l \quad (12.8)$$

Energie eines Lichtquants; Frequenzgesetz von PLANCK-EINSTEIN

$$\varepsilon = h \frac{c}{\lambda} = h\nu \quad (12.9)$$



Energie eines Mol Lichtquanten; Photochemisches Äquivalent

$$E_m = N_A \epsilon = N_A h \frac{c}{\lambda} \quad (12.10)$$

Quantenausbeute

$$Q = \frac{\text{Zahl der angeregten Moleküle}}{\text{Zahl der absorbierten Lichtquanten}} \quad (12.11)$$

13. Literaturverzeichnis

- /1/ Chemische Thermodynamik. - 2., durchges. Aufl. - In: Lehrwerk Chemie, Lehrbuch 4. - Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1975
- /2/ Elektrolytgleichgewichte und Elektrochemie. - 2., durchges. Aufl. - In: Lehrwerk Chemie, Lehrbuch 5. - Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1977
- /3/ Chemische Kinetik. - 2., durchges. Aufl. - In: Lehrwerk Chemie, Lehrbuch 6. - Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1977
- /4/ Stöchiometrie auf der Grundlage des modernen Molbegriffs/BLUMENTHAL, G.; HARTUNG, H. - Leipzig: Akadem. Verlagsges. Geest & Portig, 1974
- /5/ Allgemeine Chemie Energetik, Dynamik und Struktur chemischer Systeme/CAMPBELL, J. A. - Weinheim: Verlag Chemie, 1975
- /6/ Physikalisch-technische Einheiten richtig angewandt/FISCHER, R.; PADEL, E.; SCHINDLER, H. - 8., bearb. Aufl. - Berlin: Verlag Technik, 1980
- /7/ Physikalische Chemie für Techniker und Ingenieure/NÄSER, K.-H.; LEMPE, D.; REGEN, O. - 18. Aufl. - Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1988
- /8/ Aufgabensammlung zur physikalischen Chemie/REGEN, O.; BRANDES, G. - Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1986
- /9/ Physikalisch-chemische Meßmethoden/NÄSER, K.-H.; PESCHEL, G. - 4. Aufl. - Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1986
- /10/ Einheiten und Größenarten der Naturwissenschaften/PADEL, E.; LAPORTE, H. - 3., bearb. Aufl. - Leipzig: Fachbuchverlag, 1976
- /11/ Gültigkeitsbereiche von Näherungsformeln zur Berechnung von Säure-Base-Gleichgewichten/HENRION, G.; SCHMIDT, R.; MARQUARDT, D. - In: Z. Chem. - Leipzig 29 (1980) 12. - S. 433 - 436

14. TabellenTabelle 1. Allgemeine physikalische Konstanten

Größe	Symbol	Zahlenwert	Einheit
AVOGADRO-Konstante	$N_A$	$6,022137 \cdot 10^{23}$	$\text{mol}^{-1}$
BOLTZMANN-Konstante	$k$	$1,380658 \cdot 10^{-23}$	$\text{J K}^{-1}$
Dielektrizitäts- konstante im Vakuum	$\epsilon_0$	$8,854 \cdot 10^{-12}$	$\text{F m}^{-1}$
FARADAY-Konstante	$F$	$9,648531 \cdot 10^4$	$\text{C mol}^{-1}$
Gaskonstante, allg.	$R$	8,3144	$\text{J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ 1)
Ladung eines Elektrons (elektrische Elementar- ladung)	$e$	$1,6021773 \cdot 10^{-19}$	$\text{C}$
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$c_0$	$2,99792458 \cdot 10^8$	$\text{m s}^{-1}$
Molvolumen idealer Gase bei Norm- bedingungen	$V_{m,n}$	$22,4136 \cdot 10^{-3}$	$\text{m}^3 \text{ mol}^{-1}$
Fallbeschleunigung	$g$	9,80665	$\text{m s}^{-2}$
PLANCK-Konstante	$h$	$6,626076 \cdot 10^{-34}$	$\text{J s}$
Ruhemasse			
- des Elektrons	$m_e$	$9,109390 \cdot 10^{-31}$	$\text{kg}$
- des Neutrons	$m_n$	$1,6749286 \cdot 10^{-27}$	$\text{kg}$
- des Protons	$m_p$	$1,6726231 \cdot 10^{-27}$	$\text{kg}$

$$\begin{aligned}
 1) \quad 1 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1} &= 1 \text{ N m K}^{-1} \text{ mol}^{-1} = 1 \text{ Pa m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \\
 &= 1 \text{ kg m}^2 \text{ K}^{-1} \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-2}
 \end{aligned}$$

Genauigkeit von Zahlenangaben:

Eine Zahl, die sich auf Grund von Divisionen oder Multiplikationen ergibt, sollte nicht mit mehr Stellen angegeben werden, als die Grenze der Genauigkeit erlaubt. Die Stellenzahl der berechneten Zahl sollte die Stellenzahl der ungenauesten unter den verwendeten Zahlen nicht überschreiten.

**Tabelle 2. Kritische Zustandsgrößen und VAN-DER-WAALSsche Konstanten  
einiger gasförmiger Stoffe**

Stoff	$T_k$ K	$10^{-5} p_k$ Pa	$a$ $\text{Pa}(\text{m}^3 \text{mol}^{-1})^2$	$10^6 b$ $\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$
Aceton	329,1	47,61	1,413	99,4
Ammoniak	405,6	112,95	0,442	37,3
Argon	150,8	48,62	0,137	32,2
Benzen	561,5	48,52	1,828	115,4
Bromwasserstoff	363	85,09	0,452	44,3
n-Butan	425	34,95	1,470	133,8
Chlor	417	77,09	0,657	56,1
Chloroform	536	55,61	1,541	102,2
Chlorwasserstoff	324	84,1	0,373	40,8
Diethylether	466,8	35,96	1,765	134,4
Distickstofftetroxid	431	100,29	0,537	44,3
Essigsäure	594,6	57,94	1,809	106,8
Ethan	308	49,65	0,545	63,9
Ethanol	516,1	63,92	1,221	84,1
Ethen	283	51,36	0,453	57,0
Ethin (Acetylen)	308,7	62,40	0,443	51,2
Ethylchlorid	460,2	52,68	1,109	86,4
Helium	5,13	2,29	0,0034	23,7
n-Hexan	507,8	29,88	2,512	175,8
Kohlendioxid	304,2	74,05	0,365	42,7
Kohlenmonoxid	133	34,95	0,147	39,5
Luft	132,3	37,68	0,136	36,5
Methan	190	46,29	0,227	42,6
Methanol	513	79,72	0,967	67,0
Methylchlorid	416,1	66,66	0,759	64,8
Neon	44,3	26,24	0,215	17,1
n-Pentan	470,2	33,43	1,930	146,0
Phosphorwasserstoff	324	64,83	0,470	51,6
Propan	369,8	42,55	0,881	84,4
Propen	365,3	45,59	0,851	71,5
Sauerstoff	154,4	50,35	0,138	31,8

Fortsetzung Tabelle 2

Stoff	$T_k$ K	$10^{-5} p_k$ Pa	$\frac{a}{Pa(m^3 mol^{-1})^2}$	$\frac{10^6 b}{m^3 mol^{-1}}$
Schwefeldioxid	430	78,81	0,695	56,7
Schwefelkohlenstoff	546	76,99	1,180	76,9
Schwefelwasserstoff	373,4	90,16	0,450	42,9
Stickstoff	126	33,94	0,136	38,5
Stickstoffoxid	179	65,85	0,136	27,9
Tetrachlormethan	556,1	45,59	1,982	126,8
Toluen	593,6	42,14	2,443	146,3
Wasser	647,2	220,33	0,551	30,4
Wasserstoff	33,3	12,97	0,0249	26,6

Tabelle 3. Dampfdruck des Wassers

$\frac{p}{^\circ C}$	$\frac{p_{H_2O}}{kPa}$	$\frac{p}{^\circ C}$	$\frac{p_{H_2O}}{kPa}$	$\frac{p}{^\circ C}$	$\frac{p_{H_2O}}{kPa}$
- 20	0,103 <sup>+) </sup>	20	2,338	65	25,003
- 15	0,165 <sup>+) </sup>	21	2,487	70	31,157
- 10	0,259 <sup>+) </sup>	22	2,643	75	38,544
- 5	0,401 <sup>+) </sup>	23	2,809	80	47,343
0	0,610 <sup>+) </sup>	24	2,983	85	57,809
5	0,872	25	3,167	90	70,101
10	1,228	30	4,242	95	84,513
12	1,402	35	5,624	100	101,325
14	1,598	40	7,375	105	120,803
15	1,705	45	9,583	110	143,268
16	1,817	50	12,334	120	198,530
17	1,937	55	15,737	130	270,071
18	2,063	60	19,916	140	361,370
19	2,196				

+) Dampfdruck des Wassers über Eis

Tabelle 4. Ebullioskopische und kryoskopische Konstanten

Lösungsmittel	$E_S$	$E_G$
	kg K mol <sup>-1</sup>	kg K mol <sup>-1</sup>
Aceton	1,48	-
Ameisensäure	2,4	2,77
Anilin	3,69	5,87
Benzen	2,64	5,07
Campher	6,09	40,0
Chloroform	3,80	4,90
Cyclohexan	2,75	20,2
Cyclohexanol	-	38,28
Dioxan	3,13	4,7
Essigsäure	3,07	3,9
Ethanol	1,04	-
Harnstoff	-	21,5
Methanol	0,84	-
Naphthalin	5,80	6,98
Nitrobenzen	5,27	6,89
Phenol	3,60	7,27
Pyridin	2,69	4,97
Schwefelkohlenstoff	2,29	-
Schwefelsäure	5,33	6,17
Tetrachlormethan	4,88	29,8
Trichlorethylen	4,43	-
Trichloressigsäure	-	12,1
Wasser	0,513	1,86
Wasserstoffperoxid	-	1,97

Tabelle 5. Molare Schmelz- und Verdampfungsenthalpien

Stoff	$\frac{T_S}{K}$	$\frac{\Delta_S H_m}{kJ\ mol^{-1}}$	$\frac{T_V}{K}$	$\frac{\Delta_V H_m}{kJ\ mol^{-1}}$
Helium	2,45	0,014	4,25	0,084
Neon	25	0,34	27	2,12
Argon	84	1,17	87	6,35
Wasserstoff <sup>1)</sup>	14	0,12	20	0,93
Sauerstoff <sup>1)</sup>	54	0,44	90	6,85
Stickstoff <sup>1)</sup>	63	0,72	77	5,63
Chlor <sup>1)</sup>	173	13,36	239	18,44
Ammoniak	195	5,77	240	23,31
Kohlenmonoxid	68	0,84	82	6,11
Schwefeldioxid	198	7,48	263	25,75
Wasser	273	5,98	373	40,67
Chlorwasserstoff	162	2,05	188	16,19
Schwefelkohlenstoff	162	4,40	319	26,80
Benzen	279	9,98	353	30,78
Toluen	178	6,63	384	32,80
o-Xylen	248	13,78	418	36,94
m-Xylen	225	11,56	412	36,41
p-Xylen	286	17,03	411	35,99
Chloroform	210	9,55	334	30,33
Tetrachlormethan	250	2,51	350	30,00
Methanol	176	3,30	338	35,24
Ethanol	159	4,98	351	38,98
Essigsäure	290	11,71	391	24,83
Diethylether	157	7,45	308	26,68
Ethylacetat	190	10,48	350	32,42

1) bezogen auf molekulare Stoffe

Tabelle 6. Temperaturabhängigkeit der molaren Wärmekapazität

 $C_{m,p}$  einiger Gase ( $p = 101,325 \text{ kPa}$ )

Gas	$C_{m,p} / (\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1})$	Temperaturbereich in $^{\circ}\text{C}$
$\text{H}_2$	$27,21 + 3,77 \cdot 10^{-3} T$	0...2700
$\text{H}_2$	$28,81 + 2,76 \cdot 10^{-4} T + 1,17 \cdot 10^{-6} T^2$	0...1700
$\text{O}_2$	$27,21 + 4,19 \cdot 10^{-3} T$	0...2700
$\text{O}_2$	$26,21 + 1,15 \cdot 10^{-2} T - 3,22 \cdot 10^{-6} T^2$	0...1700
$\text{N}_2$	$27,21 + 4,19 \cdot 10^{-3} T$	0...2700
$\text{N}_2$	$26,38 + 7,62 \cdot 10^{-3} T - 1,44 \cdot 10^{-6} T^2$	0...1700
$\text{Cl}_2, \text{Br}_2, \text{I}_2$	$30,98 + 4,19 \cdot 10^{-3} T$	0...2000
$\text{N}_2\text{O}$	$27,34 + 4,40 \cdot 10^{-2} T - 1,5 \cdot 10^{-5} T^2$	0...1200
$\text{NO}$	$26,0 + 1,02 \cdot 10^{-2} T - 2,56 \cdot 10^{-6} T^2$	0...1200
$\text{NO}_2$	$29,31 + 2,97 \cdot 10^{-2} T - 3,6 \cdot 10^{-6} T^2$	0...1200
$\text{NH}_3$	$28,05 + 2,64 \cdot 10^{-2} T$	0... 500
$\text{NH}_3$	$24,79 + 3,75 \cdot 10^{-2} T - 7,39 \cdot 10^{-6} T^2$	0...1700
$\text{HCl}$	$27,21 + 4,19 \cdot 10^{-3} T$	0...2700
$\text{HCl}$	$28,19 + 1,81 \cdot 10^{-3} T + 1,54 \cdot 10^{-6} T^2$	0...1200
$\text{HBr}$	$27,54 + 4,0 \cdot 10^{-3} T + 0,66 \cdot 10^{-6} T^2$	0...1200
$\text{H}_2\text{S}$	$26,73 + 2,39 \cdot 10^{-2} T - 5,07 \cdot 10^{-6} T^2$	0...1500
$\text{SO}_2$	$32,24 + 2,22 \cdot 10^{-2} T - 3,48 \cdot 10^{-6} T^2$	0...2200
$\text{SO}_3$	$18,84 + 6,7 \cdot 10^{-2} T$	0...1200
$\text{H}_2\text{O}$	$34,12 + 2,09 \cdot 10^{-3} T$	0...2000
$\text{H}_2\text{O}$	$30,38 + 9,62 \cdot 10^{-3} T + 1,18 \cdot 10^{-6} T^2$	0...1200
$\text{CO}$	$27,21 + 4,19 \cdot 10^{-3} T$	0...2700
$\text{CO}$	$26,17 + 8,75 \cdot 10^{-3} T - 1,92 \cdot 10^{-6} T^2$	0...1700
$\text{CO}_2$	$32,24 + 2,22 \cdot 10^{-2} T - 3,48 \cdot 10^{-6} T^2$	0...2200
$\text{CH}_4$	$14,16 + 7,55 \cdot 10^{-2} T - 1,8 \cdot 10^{-5} T^2$	0...1200
$\text{C}_2\text{H}_6$	$9,19 + 0,16 T - 4,61 \cdot 10^{-5} T^2$	0...1200
$\text{C}_2\text{H}_4$	$11,33 + 0,122 T - 3,79 \cdot 10^{-5} T^2$	0...1200
$\text{C}_2\text{H}_2$	$24,45 + 2,21 \cdot 10^{-2} T - 2,31 \cdot 10^{-5} T^2$	0...1200
$\text{C}_3\text{H}_8$	$0,5 + 0,27 T - 9,53 \cdot 10^{-5} T^2$	0...1200
$\text{C}_6\text{H}_6$	$21,1 + 0,4 T - 1,7 \cdot 10^{-4} T^2$	0...1200
$\text{CH}_3\text{OH}$	$20,43 + 0,103 T - 2,47 \cdot 10^{-5} T^2$	0... 400
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	$9,04 + 0,208 T - 6,5 \cdot 10^{-5} T^2$	0... 400
$\text{CH}_3\text{CHOH}$	$18,97 + 0,14 T - 3,89 \cdot 10^{-5} T^2$	0... 400



**Tabelle 7. Mittlere molare Wärmekapazität einiger Stoffe**

(p = 101,325 kPa)

Stoff	$\bar{c}_{m,p} / (\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1})$ bei			
	300 K	600 K	900 K	1200 K
H <sub>2</sub>	28,89	29,32	29,89	31,02
O <sub>2</sub>	29,39	32,15	34,42	35,71
H <sub>2</sub> O(g)	33,49	36,17	39,77	43,46
F <sub>2</sub>	31,53	35,04	36,30	36,76
HF	29,14	29,27	29,85	31,02
Cl <sub>2</sub>	33,79	36,26	36,89	37,14
HCl	29,10	29,60	31,02	32,57
Br <sub>2</sub> (g)	36,09	37,30	37,68	37,93
HBr	29,14	29,89	31,74	33,49
HI	29,14	30,40	32,32	33,91
N <sub>2</sub>	29,14	30,14	32,15	33,79
NH <sub>3</sub>	35,59	44,63	53,21	60,71
H <sub>2</sub> S	34,04	38,64	43,92	47,98
SO <sub>2</sub>	39,94	48,90	53,13	55,14
C (Graphit)	8,75	16,96	20,47	22,36
CO	29,14	30,48	32,62	34,21
CO <sub>2</sub>	37,30	47,39	53,13	56,52
CH <sub>4</sub>	35,80	52,50	67,91	79,09
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	44,55	58,20	65,69	71,18
Si	20,10	24,70	26,38	27,63
SiO <sub>2</sub> (Quarz)	45,22	64,48	66,57	73,69
NaCl	50,45	55,68	61,13	66,57(1)
KCl	50,66	55,27	59,87	
MgO	37,26	45,64	49,40	51,50
CaO	42,91	52,75	59,45	61,55
CaCO <sub>3</sub>	82,90	108,86	125,60	
Al	24,07	28,05	31,40	29,31(1)
Cr	23,86	27,63	31,40	35,17
Mn	25,12	35,59	45,64	45,64
Fe	25,12	33,49	41,87	39,36
Cu	24,62	26,46	28,14	29,73
Ag	25,20	27,09	28,81	30,98
Zn	25,41	28,81	30,31(1)	

**Tabelle 8. Molare Standardbildungsenthalpien und molare Standardentropien einiger Elemente**

Stoff	Zustand	$\Delta_{\text{B}}^{\text{H}}{}_{\text{m},\text{o}}$ $\text{kJ mol}^{-1}$	$S_{\text{m},\text{o}}$ $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
H <sub>2</sub>	g	0	130,75
H	g	217,29	114,72
O <sub>2</sub>	g	0	205,28
O	g	247,44	161,11
F <sub>2</sub>	g	0	200,92
F	g	132,93	158,81
Cl <sub>2</sub>	g	0	223,24
Cl	g	121,00	165,25
Br <sub>2</sub>	l	0	154,07
Br <sub>2</sub>	g	32,03	245,47
Br	g	112,54	175,05
I <sub>2</sub>	s	0	116,81
I <sub>2</sub>	g	62,43	260,84
I	g	107,14	180,87
S (rhombisch)	s	0	31,99
S (monoklin)	s	- 0,31	32,41
S	g	277,58	167,89
S <sub>2</sub>	g	122,25	227,76
N <sub>2</sub>	g	0	191,76
N	g	356,30	153,32
P (weiß)	s	0	44,38
P <sub>2</sub>	g	86,67	217,71
P <sub>4</sub>	g	55,27	280,52
As	s	0	35,17
As	g	126,86	174,25
C (Graphit)	s	0	5,69
C (Diamant)	s	0,92	2,47
Si	s	0	18,84
Si	g	355,88	167,89
Li	s	0	28,05
Na	s	0	51,08

Fortsetzung Tabelle 8

Stoff	Zustand	$\Delta_B H_{m,o}$	$S_{m,o}$
		$\text{kJ mol}^{-1}$	$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
Na	g	108,44	153,66
Na <sub>2</sub>	g	139,84	230,27
K	s	0	63,64
K	g	82,90	160,35
Rb	s	0	69,50
Cs	s	0	82,90
Be	s	0	9,55
Mg	s	0	32,66
Mg	g	151,98	148,63
Ca	s	0	41,66
Sr	s	0	55,68
Ba	s	0	63,22
Al	s	0	28,26
Al	g	230,27	164,54
La	s	0	57,36
Ce	s	0	82,90
Ti	s	0	26,80
Zr	s	0	20,89
V	s	0	29,31
Cr	s	0	23,86
Mo	s	0	28,47
W	s	0	33,49
U	s	0	46,47
Mn	s	0	31,82
Fe	s	0	27,21
Co	s	0	28,47
Ni	s	0	29,73
Pt	s	0	41,87
Cu	s	0	33,37
Cu	g	339,97	166,63
Ag	s	0	42,71
Ag	g	284,70	172,91

Fortsetzung Tabelle 8

Stoff	Zustand	$\frac{\Delta_B H_{m,o}}{\text{kJ mol}^{-1}}$	$\frac{S_{m,o}}{\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}}$
Au	s	0	47,73
Au	g	385,19	180,45
Zn	s	0	41,66
Cd	s	0	51,50
Hg	l	0	77,46
Hg	g	61,13	175,01
Sn (weiß)	s	0	51,50
Sn (grau)	s	2,51	44,80
Pb	s	0	64,90
Bi	s	0	56,94

Tabelle 9. Molare Standardbildungsenthalpien und molare  
Standardentropien von anorganischen Verbindungen

Stoff	Zustand	$\frac{\Delta_B H_{m,o}}{\text{kJ mol}^{-1}}$	$\frac{S_{m,o}}{\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}}$
O <sub>3</sub>	g	+ 144,14	239,07
H <sub>2</sub> O	l	- 286,17	70,76
H <sub>2</sub> O	g	- 242,16	188,95
HF	g	- 269,84	173,84
HCl	g	- 91,65	186,98
HBr	g	- 32,82	198,79
HI	g	+ 25,50	206,83
H <sub>2</sub> S	g	- 22,19	205,99
SO <sub>2</sub>	g	- 296,84	248,70
SO <sub>3</sub>	s	- 443,80	263,77
SO <sub>3</sub>	g	- 388,54	267,12
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	l	- 811,19	200,55
NH <sub>3</sub>	g	- 46,05	192,17
N <sub>2</sub> O	g	+ 82,27	220,14
NO	g	+ 90,43	210,76

Fortsetzung Tabelle 9

Stoff	Zustand	$\Delta_B H_{m,o}$	$S_{m,o}$
		$\text{kJ mol}^{-1}$	$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
$\text{NO}_2$	g	+ 33,62	240,62
$\text{N}_2\text{O}_4$	g	+ 12,81	304,38
$\text{N}_2\text{O}_5$	g	+ 2,51	342,48
$\text{PH}_3$	g	- 9,63	211,43
$\text{PCl}_3$	g	- 293,08	311,92
$\text{POCl}_3$	g	- 579,45	324,90
$\text{As}_2\text{O}_3$	s	- 619,65	107,18
$\text{CO}$	g	- 110,62	198,12
$\text{CO}_2$	g	- 393,77	213,86
$\text{CS}_2$	l	+ 87,92	150,31
$\text{HCN}$	g	+ 130,63	201,80
$\text{SiO}_2$ (Quarz)	s	- 851,18	42,29
$\text{SiCl}_4$	g	- 596,62	330,76
$\text{LiOH}$	s	- 487,97	53,59
$\text{LiCl}$	s	- 408,84	50,24
$\text{NaOH}$	s	- 426,89	57,78
$\text{NaF}$	s	- 569,20	50,24
$\text{NaCl}$	s	- 411,69	72,43
$\text{NaBr}$	s	- 363,12	83,74
$\text{NaI}$	s	- 290,06	92,11
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	s	-1383,65	149,47
$\text{NaNO}_3$	s	- 467,75	120,58
$\text{Na}_2\text{CO}_3$	s	-1129,98	136,07
$\text{NaHCO}_3$	s	- 947,89	102,16
$\text{KCl}$	s	- 436,93	82,90
$\text{KBr}$	s	- 393,85	94,62
$\text{KI}$	s	- 330,21	100,90
$\text{K}_2\text{SO}_4$	s	-1434,65	187,57
$\text{KNO}_3$	s	- 494,42	133,14
$\text{NH}_4\text{Cl}$	s	- 313,80	133,14
$\text{MgO}$	s	- 611,69	26,80
$\text{Mg(OH)}_2$	s	- 915,65	63,22
$\text{MgCl}_2$	s	- 641,84	116,81

Fortsetzung Tabelle 9

Stoff	Zustand	$\Delta_{\text{B}} H_{\text{m},\text{o}}$ $\text{kJ mol}^{-1}$	$S_{\text{m},\text{o}}$ $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
CaO	s	- 635,14	39,77
Ca(OH) <sub>2</sub>	s	- 988,08	76,20
CaSO <sub>4</sub>	s	-1426,44	107,18
BaSO <sub>4</sub>	s	-1462,87	132,30
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	s	- 991,85	213,95
BaCO <sub>3</sub>	s	-1008,60	112,21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	s	-1590,98	52,34
TiO <sub>2</sub>	s	- 912,72	52,13
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	s	-1143,00	81,22
MnO <sub>2</sub>	s	- 514,98	58,20
KMnO <sub>4</sub>	s	- 807,63	171,66
FeO	s	- 269,21	59,45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	s	- 831,08	90,02
FeCO <sub>3</sub>	s	- 723,48	92,95
Cu <sub>2</sub> O	s	- 177,94	100,90
CuO	s	- 161,19	43,54
CuSO <sub>4</sub>	s	- 773,30	105,93
AgCl	s	- 126,23	94,20
AgBr	s	- 99,23	107,18
AgI	s	- 62,55	115,56
Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	s	- 712,17	200,55
AgNO <sub>3</sub>	s	- 120,79	141,10
ZnO	s	- 349,60	43,54
Zn(OH) <sub>2</sub>	s	- 652,30	92,11
ZnCl <sub>2</sub>	s	- 416,80	106,76
ZnSO <sub>4</sub>	s	- 977,20	128,12
CdS	s	- 144,86	58,62
Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	s	- 132,30	98,39
HgCl <sub>2</sub>	s	- 223,58	125,60
HgS	s	- 46,05	82,90
SnO	s	- 283,45	56,52
SnO <sub>2</sub>	s	- 578,20	52,34

Fortsetzung Tabelle 9

Stoff	Zustand	$\frac{\Delta_B H_{m,o}}{\text{kJ mol}^{-1}}$	$\frac{S_{m,o}}{\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}}$
$\text{SnCl}_4$	s	- 533,40	260,00
$\text{PbO}$ (gelb)	s	- 217,96	70,76
$\text{PbO}_2$	s	- 272,14	76,62
$\text{Pb}_3\text{O}_4$	s	- 721,80	211,43
$\text{PbSO}_4$	s	- 914,82	147,38
$\text{PbCO}_3$	s	- 703,38	131,05
$\text{Bi}_2\text{O}_3$	s	- 576,94	134,81
$\text{BiCl}_3$	s	- 379,32	191,76

Tabelle 10. Molare Standardbildungsenthalpie und molare Standardentropie von organischen Verbindungen

Name	Formel	Zu- stand	$\frac{\Delta_B H_{m,o}}{\text{kJ mol}^{-1}}$	$\frac{S_{m,o}}{\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}}$
Aceton	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	l	- 253,3	200,13
Ameisensäure	$\text{CH}_2\text{O}_2$	l	- 416,7	138,16
Anilin	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	l	+ 35,2	191,76
Benzen	$\text{C}_6\text{H}_6$	l	+ 46,6	173,75
Benzoessäure	$\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_2$	s	- 381,0	170,82
Butan	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	g	- 124,6	310,66
Chinon	$\text{C}_6\text{H}_4\text{O}_2$	s	- 185,9	159,10
Chloroform	$\text{CHCl}_3$	g	- 98,1	296,43
Cyclohexan	$\text{C}_6\text{H}_{12}$	l	- 158,1	205,15
Diethylether	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	l	- 281,8	251,21
Dimethylamin	$\text{C}_2\text{H}_7\text{N}$	l	- 46,9	182,54
Dimethylether	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	g	- 183,0	272,14
Essigsäure	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	l	- 486,5	159,10
Essigsäureethylester	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	l	- 463,5	259,58
Ethan	$\text{C}_2\text{H}_6$	g	- 84,7	228,60
Ethanol	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	l	- 278,5	159,10
Ethen	$\text{C}_2\text{H}_4$	g	+ 52,3	219,68

Fortsetzung Tabelle 10

Name	Formel	Zu- stand	$\Delta_B H_{m,o}$ $\text{kJ mol}^{-1}$	$S_{m,o}$ $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
Ethin (Acetylen)	$\text{C}_2\text{H}_2$	g	+ 225,7	210,09
Formaldehyd	$\text{CH}_2\text{O}$	g	- 118,5	217,71
Fumarsäure	$\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4$	s	- 812,4	166,22
Glycerol	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	l	- 660,3	204,73
Glycol	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$	l	- 452,2	167,05
Harnstoff	$\text{CH}_4\text{ON}_2$	s	- 331,2	104,67
Hexan	$\text{C}_6\text{H}_{14}$	l	- 211,4	298,10
Hydrochinon	$\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_2$	s	- 358,0	140,26
Maleinsäure	$\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4$	s	- 789,7	159,10
Methan	$\text{CH}_4$	g	- 74,9	186,15
Methanol	$\text{CH}_4\text{O}$	l	- 238,7	126,86
Methylamin	$\text{CH}_5\text{N}$	l	- 38,1	241,58
Methylchlorid	$\text{CH}_3\text{Cl}$	g	- 84,2	234,46
Naphthalin	$\text{C}_{10}\text{H}_8$	s	+ 76,2	167,05
Nitrobenzen	$\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_2\text{N}$	l	+ 18,0	221,90
Oxalsäure	$\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$	s	- 821,9	117,23
Phenol	$\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$	s	- 155,3	142,35
o-Phthalsäure	$\text{C}_8\text{H}_6\text{O}_4$	s	- 782,9	205,15
Propen	$\text{C}_3\text{H}_6$	g	+ 20,4	267,12
Propan	$\text{C}_3\text{H}_8$	g	- 103,7	270,89
n-Propanol	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	l	- 302,7	192,59
Pyridin	$\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$	l	+ 80,4	179,20
Styren	$\text{C}_8\text{H}_8$	l	+ 87,5	-
Tetrachlormethan	$\text{CCl}_4$	l	- 141,5	217,71
Toluen	$\text{C}_7\text{H}_8$	l	+ 15,1	217,71
o-Xylen	$\text{C}_8\text{H}_{10}$	l	- 0,84	247,02



Tabelle 11. Molare Standardbildungsenthalpien und molare Standardentropien für Ionen  
(Gültig für ideale wäßrige Lösungen)

Kation	$\frac{\Delta_B H_{m,o}}{kJ\ mol^{-1}}$	$\frac{S_{m,o}}{J\ mol^{-1}\ K^{-1}}$	Anion	$\frac{\Delta_B H_{m,o}}{kJ\ mol^{-1}}$	$\frac{S_{m,o}}{J\ mol^{-1}\ K^{-1}}$
H <sup>+</sup>	0	0	OH <sup>-</sup>	- 230,23	- 10,43
Li <sup>+</sup>	- 278,42	+ 19,68	F <sup>-</sup>	- 327,41	- 9,63
Na <sup>+</sup>	- 240,32	+ 58,62	Cl <sup>-</sup>	- 165,8	+ 56,52
K <sup>+</sup>	- 252,46	+ 101,32	Br <sup>-</sup>	- 119,74	+ 82,48
Rb <sup>+</sup>	- 256,23	+ 120,16	I <sup>-</sup>	- 55,68	+ 105,93
Cs <sup>+</sup>	- 260,42	+ 133,14	ClO <sup>-</sup>	- 108,02	+ 41,87
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	- 132,72	+ 110,53	ClO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	- 79,97	+ 164,96
Ag <sup>+</sup>	+ 105,84	+ 73,44	ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	- 164,12	+ 182,54
Mg <sup>2+</sup>	- 461,39	- 132,30	BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	- 51,08	+ 161,19
Ca <sup>2+</sup>	- 543,03	- 47,73	IO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	- 226,92	+ 117,23
Sr <sup>2+</sup>	- 545,96	- 30,56	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	- 107,18	+ 125,19
Ba <sup>2+</sup>	- 537,59	+ 9,36	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	- 205,99	+ 146,54
Zn <sup>2+</sup>	- 153,24	- 108,44	HS <sup>-</sup>	- 15,07	+ 62,38
Cd <sup>2+</sup>	- 72,43	- 61,96	HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	- 617,55	+ 136,49
Hg <sup>2+</sup>	+ 168,31	+ 74,11	SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	- 615,04	+ 12,56
Fe <sup>2+</sup>	- 86,67	- 108,44	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	- 903,51	+ 18,42
Cu <sup>2+</sup>	+ 69,50	- 110,95	CN <sup>-</sup>	+ 146,12	+ 104,67
Sn <sup>2+</sup>	- 10,05	- 20,52	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	- 692,08	+ 92,95
Pb <sup>2+</sup>	- 2,09	+ 16,33	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	- 677,42	- 54,43
Al <sup>3+</sup>	- 528,79	- 318,2	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-1245,99	- 188,41
Fe <sup>3+</sup>	- 35,17	- 255,39			

Tabelle 12. Abschätzung des Reaktionsverlaufs aus thermodynamischen Zustandsgrößen

Fall	$\Delta H$	$\Delta S$	$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$	Bemerkungen
1	< 0 (exotherm)	> 0	< 0	hohe Reaktionswahrscheinlichkeit bei allen Temperaturen
2	< 0 (exotherm)	< 0	< 0 T ist klein	bei tiefer Temperatur hohe Reaktionswahrscheinlichkeit
			> 0 T ist groß	Rückreaktion ist wahrscheinlicher
3	> 0 (endotherm)	> 0	< 0 T ist groß	hohe Reaktionswahrscheinlichkeit bei hoher Temperatur
			> 0 T ist klein	Rückreaktion ist wahrscheinlicher
4	> 0 (endotherm)	0	> 0	Rückreaktion ist wahrscheinlicher

Tabelle 13. Stärke von Säure-Base-Paaren (bei 20 °C)

	Säure	Base + H <sup>+</sup>	pK <sub>S</sub>	pK <sub>B</sub>
sehr starke Säuren	HClO <sub>4</sub>	ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	≈ - 10	≈ 24
	HI	I <sup>-</sup>	≈ - 9	≈ 23
	HBr	Br <sup>-</sup>	≈ - 9	≈ 23
	HCl	Cl <sup>-</sup>	≈ - 6	≈ 20
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	≈ - 3	≈ 17
starke Säuren (schwache Basen)	HNO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	- 1,32	15,32
	NCIO <sub>3</sub>	ClO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	≈ 0	≈ 14
	HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1,92	12,08
	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	1,96	12,04
	HF	F <sup>-</sup>	3,14	10,86
	HCOOH	HCOO <sup>-</sup>	3,7	10,3
mittelstarke Säuren (mittelstarke Basen)	CH <sub>3</sub> COOH	CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>	4,75	9,25
	[Al(H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub> ] <sup>3+</sup>	[Al(OH)(H <sub>2</sub> O) <sub>5</sub> ] <sup>2+</sup>	4,85	9,15
	H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	6,52	7,48
	H <sub>2</sub> S	HS <sup>-</sup>	6,92	7,08
	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	7,12	6,88
schwache Säuren (starke Basen)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NH <sub>3</sub>	9,25	4,75
	HCN	CN <sup>-</sup>	9,40	4,60
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	10,4	3,6
	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	12,32	1,68
	HS <sup>-</sup>	S <sup>2-</sup>	12,9	1,1
sehr schwache Säuren (sehr starke Basen)	H <sub>2</sub> O	OH <sup>-</sup>	15,74	- 1,74
	NH <sub>3</sub>	NH <sub>2</sub> <sup>-</sup>	≈ 23	≈ - 9
	OH <sup>-</sup>	O <sup>2-</sup>	≈ 24	≈ - 10

**Tabelle 14. Temperaturabhängigkeit für das Ionenprodukt  
des Wassers**

$\vartheta$ °C	$10^{14} K_W$ mol <sup>2</sup> l <sup>-2</sup>	pK <sub>W</sub>
10	0,36	14,45
18	0,74	14,13
20	0,86	14,07
22	1,00	14,00
30	1,89	13,73
50	5,6	13,25
100	74,0	12,13

**Tabelle 15. Löslichkeitsprodukte (bei 25 °C)**

Reaktionsgleichung	K <sub>L</sub>	pK <sub>L</sub>
$\text{AgCl} \rightleftharpoons \text{Ag}^+ + \text{Cl}^-$	$1,8 \cdot 10^{-10}$	9,75
$\text{AgBr} \rightleftharpoons \text{Ag}^+ + \text{Br}^-$	$5,2 \cdot 10^{-13}$	12,28
$\text{AgI} \rightleftharpoons \text{Ag}^+ + \text{I}^-$	$4,5 \cdot 10^{-17}$	16,35
$\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	$7,2 \cdot 10^{-9}$	8,14
$\text{BaCO}_3 \rightleftharpoons \text{Ba}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	$5,5 \cdot 10^{-9}$	8,26
$\text{BaSO}_4 \rightleftharpoons \text{Ba}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$	$8,7 \cdot 10^{-11}$	10,06
$\text{BaCrO}_4 \rightleftharpoons \text{Ba}^{2+} + \text{CrO}_4^{2-}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	9,93
$\text{AgCN} \rightleftharpoons \text{Ag}^+ + \text{CN}^-$	$1,2 \cdot 10^{-16}$	15,92
$\text{CuCl} \rightleftharpoons \text{Cu}^+ + \text{Cl}^-$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	6,73
$\text{Hg}_2\text{Cl}_2 \rightleftharpoons \text{Hg}_2^{2+} + 2 \text{Cl}^-$	$1,3 \cdot 10^{-18}$	17,88

Tabelle 16. Ionenleitfähigkeit bei unendlicher Verdünnung (Werte bei 25 °C)

Kationen	$\Lambda_{+\infty}$ $\Omega^{-1} \text{ cm}^2 \text{ mol}^{-1}$	Anionen	$\Lambda_{-\infty}$ $\Omega^{-1} \text{ cm}^2 \text{ mol}^{-1}$
H <sup>+</sup>	349,8	OH <sup>-</sup>	197,6
Li <sup>+</sup>	38,7	F <sup>-</sup>	55
Na <sup>+</sup>	50,1	Cl <sup>-</sup>	76,3
K <sup>+</sup>	73,5	Br <sup>-</sup>	78,3
Rb <sup>+</sup>	77,0	I <sup>-</sup>	76,8
Cs <sup>+</sup>	77,7	ClO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	65,3
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	73,5	BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	55,7
Ag <sup>+</sup>	61,9	IO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	41
1/2 Be <sup>2+</sup>	45	ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	67,3
1/2 Mg <sup>2+</sup>	53,1	IO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	54,6
1/2 Ca <sup>2+</sup>	59,5	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	71,4
1/2 Sr <sup>2+</sup>	59,4	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	44,5
1/2 Ba <sup>2+</sup>	63,6	1/2 CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	69,3
1/2 Cu <sup>2+</sup>	56,6	1/2 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	80,0
1/2 Cd <sup>2+</sup>	54	1/2 CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	85
1/2 Zn <sup>2+</sup>	52,8	1/2 C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	74,2
1/2 Pb <sup>2+</sup>	70	1/3 [Fe(CN) <sub>6</sub> ] <sup>3-</sup>	100,9
1/2 Fe <sup>2+</sup>	53,5	1/4 [Fe(CN) <sub>6</sub> ] <sup>4-</sup>	110,5
1/2 Co <sup>2+</sup>	55	HCOO <sup>-</sup>	54,5
1/2 Ni <sup>2+</sup>	54	CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>	40,9
1/2 Mn <sup>2+</sup>	53,5	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> COO <sup>-</sup>	35,8
1/3 Fe <sup>3+</sup>	68	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> COO <sup>-</sup>	32,4
1/3 Cr <sup>3+</sup>	67	Pikrat <sup>-</sup>	30,4
1/3 Al <sup>3+</sup>	63		
1/3 La <sup>3+</sup>	69,7		

Tabelle 17. Standardelektrodenpotentiale von Kationen

RM	OM	$\frac{E_o}{V}$	RM	OM	$\frac{E_o}{V}$
Li	$Li^+$	- 3,045	Fe	$Fe^{2+}$	- 0,440
K	$K^+$	- 2,925	Cd	$Cd^{2+}$	- 0,403
Rb	$Rb^+$	- 2,925	Co	$Co^{2+}$	- 0,277
Cs	$Cs^+$	- 2,923	Ni	$Ni^{2+}$	- 0,250
Ba	$Ba^{2+}$	- 2,906	Sn	$Sn^{2+}$	- 0,140
Sr	$Sr^{2+}$	- 2,888	Pb	$Pb^{2+}$	- 0,126
Ca	$Ca^{2+}$	- 2,866	Fe	$Fe^{3+}$	- 0,024
Na	$Na^+$	- 2,714	Cu	$Cu^{2+}$	+ 0,342
La	$La^{3+}$	- 2,522	Cu	$Cu^+$	+ 0,521
Mg	$Mg^{2+}$	- 2,363	Hg	$Hg_2^{2+}$	+ 0,788
Th	$Th^{4+}$	- 1,899	Ag	$Ag^+$	+ 0,799
Be	$Be^{2+}$	- 1,847	Au	$Au^{3+}$	+ 1,498
Zn	$Zn^{2+}$	- 0,763	Au	$Au^+$	+ 1,691

Tabelle 18. Standardelektrodenpotentiale von Anionen

RM	OM	$\frac{E_o}{V}$	RM	OM	$\frac{E_o}{V}$
$Te^{2-}$	$Te_{(s)}$	- 0,92	2 $CNS^-$	$(CNS)_2$	+ 0,77
$Se^{2-}$	$Se_{(s)}$	- 0,78	2 $Br^-$	$Br_{2(l)}$	+ 1,07
$S^{2-}$	$S_{(s)}$	- 0,51	2 $Br^-$	$Br_{2(aq)}$	+ 1,09
4 $OH^-$	$O_2 + 2 H_2O$	+ 0,40	2 $Cl^-$	$Cl_{2(aq)}$	+ 1,36
2 $I^-$	$I_{2(s)}$	+ 0,54	2 $F^-$	$F_{2(g)}$	+ 2,87
2 $I^-$	$I_{2(aq)}$	+ 0,62			

Tabelle 19. Standardpotentiale für Redoxreaktionen

Reaktion		$E_o$ V
RM	OM	
$2 \text{NO}_2^-$	$\rightleftharpoons \text{NO}_3^- + \text{NO}$	- 0,58
$2 \text{NH}_3 + \text{H}_2$	$\rightleftharpoons 2 \text{NH}_4^+$	- 0,55
$\text{Cr}^{2+}$	$\rightleftharpoons \text{Cr}^{3+}$	- 0,41
$\text{H}_3\text{PO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons \text{H}_3\text{PO}_4 + 2 \text{H}^+$	- 0,28
$\text{SO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons \text{SO}_4^{2-} + 2 \text{H}^+$	+ 0,14
$\text{Cu}^+$	$\rightleftharpoons \text{Cu}^{2+}$	+ 0,17
$\text{ClO}_3^- + 2 \text{OH}^-$	$\rightleftharpoons \text{ClO}_4^- + \text{H}_2\text{O}$	+ 0,36
$\text{Cl}_{2(\text{g})} + 4 \text{OH}^-$	$\rightleftharpoons 2 \text{HOCl} + 2 \text{H}_2\text{O}$	+ 0,40
$\text{IO}^- + 4 \text{OH}^-$	$\rightleftharpoons \text{IO}_3^- + 2 \text{H}_2\text{O}$	+ 0,45
$\text{Cl}^- + 8 \text{OH}^-$	$\rightleftharpoons \text{ClO}_4^- + 4 \text{H}_2\text{O}$	+ 0,56
$\text{Cl}^- + 6 \text{OH}^-$	$\rightleftharpoons \text{ClO}_3^- + 3 \text{H}_2\text{O}$	+ 0,63
$\text{ClO}^- + 2 \text{OH}^-$	$\rightleftharpoons \text{ClO}_2^- + \text{H}_2\text{O}$	+ 0,66
$\text{HNO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons \text{NO}_3^- + 3 \text{H}^+$	+ 0,94
$\text{NO} + 2 \text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons \text{NO}_3^- + 4 \text{H}^+$	+ 0,96
$\text{I}^- + \text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons \text{HIO} + \text{H}^+$	+ 0,99
$\text{NO} + \text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons \text{HNO}_2 + \text{H}^+$	+ 0,99
$2 \text{OH}^-$	$\rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}_2$	+ 1,00
$\text{I}^- + 3 \text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons \text{IO}_3^- + 6 \text{H}^+$	+ 1,08
$\text{ClO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons \text{ClO}_4^- + 2 \text{H}^+$	+ 1,19
$\text{HClO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons \text{ClO}_3^- + 3 \text{H}^+$	+ 1,21
$\text{Mn}^{2+} + 2 \text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons \text{MnO}_2 + 4 \text{H}^+$	+ 1,24
$\text{Cr}^{3+} + 4 \text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons \text{HCrO}_4^- + 7 \text{H}^+$	+ 1,30
$\text{Br}^- + \text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons \text{HBrO} + \text{H}^+$	+ 1,33
$\text{Br}^- + 3 \text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons \text{BrO}_3^- + 6 \text{H}^+$	+ 1,42

Fortsetzung Tabelle 19

Reaktion		$\frac{E_o}{V}$
RM	OM	
$Pb^{2+} + 2 H_2O \rightleftharpoons PbO_2 + 4 H^+$		+ 1,47
$Cl^- + 3 H_2O \rightleftharpoons ClO_3^- + 6 H^+$		+ 1,47
$Cl^- + H_2O \rightleftharpoons HClO + H^+$		+ 1,49
$Mn^{2+} + 4 H_2O \rightleftharpoons MnO_4^- + 8 H^+$		+ 1,52
$Cl_{2(g)} + 2 H_2O \rightleftharpoons 2 HOCl + 2 H^+$		+ 1,63
$MnO_2 + 2 H_2O \rightleftharpoons MnO_4^- + 4 H^+$		+ 1,69
$PbSO_4 + 2 H_2O \rightleftharpoons PbO_2 + 4 H^+ + SO_4^{2-}$		+ 1,68
$IO_3^- + 3 H_2O \rightleftharpoons H_5IO_6 + H^+$		+ 1,70
$2 H_2O \rightleftharpoons H_2O_2 + 2 H^+$		+ 1,77
$2 SO_4^{2-} \rightleftharpoons S_2O_8^{2-}$		+ 2,05
$O_2 + H_2O \rightleftharpoons O_3 + 2 H^+$		+ 2,07
$2 HF \rightleftharpoons F_2 + 2 H^+$		+ 3,03

Tabelle 20. Potentiale bekannter Bezugs Elektroden bei 25 °C

	$\frac{E_H}{V}$
Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> (ges), KCl(ges)	+ 0,241
Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> (ges), 1 M KCl	+ 0,280
Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> (ges), 0,1 M KCl	+ 0,334
Ag/AgCl(ges), KCl(ges)	+ 0,197
Ag/AgCl(ges), 1 M KCl	+ 0,235
Ag/AgCl(ges), 0,1 M KCl	+ 0,287
Ag/AgAc(ges)	+ 0,5978
Hg/Hg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ges)	+ 0,617



Tabelle 21. Standardelektrodenpotentiale von  
Elektroden 2. Art

	$\frac{E_o}{V}$
$Pb_{(s)}/PbSO_{4(s)}, SO_4^{2-}$	- 0,276
$Ag_{(s)}/AgI_{(s)}, I^-$	- 0,15225
$Ag_{(s)}/AgBr_{(s)}, Br^-$	- 0,07131
$Ag_{(s)}/AgCl_{(s)}, Cl^-$	+ 0,22234
$Hg/Hg_2Cl_{2(s)}, Cl^-$	+ 0,26796
$Hg/Hg_2SO_{4(s)}, SO_4^{2-}$	+ 0,6141

Tabelle 22. Standardelektrodenpotentiale von Redox-  
Elektroden mit pH-abhängigem Redoxsystem

	$\frac{E_o}{V}$
$H_{2(g)}/H^+$	0
$OH^-/O_{2(g)}$	+ 0,401
$MnO_{2(s)}/MnO_4^-, OH^-$	+ 0,587
Hydrochinon/Chinon, $H^+$	+ 0,6996
$Mn^{2+}/MnO_{2(s)}, H^+$	+ 1,236
$PbSO_{4(s)}/PbO_{2(s)}, SO_4^{2-}, H^+$	+ 1,685

Tabelle 23. Oberflächenspannungen von Flüssigkeiten

Flüssigkeit	$\sigma/\text{mN m}^{-1}$ bei		
	20 °C	30 °C	50 °C
Anilin	42,9	41,8	39,4
Benzen	28,9	27,5	25,0
Chlorbenzen	33,3	32,1	29,8
Cyclohexan	25,0	23,8	
Diethylether	17,0	15,9	
Essigsäure	27,7	26,75	24,8
Ethanol	22,55	21,7	19,9
n-Hexan	18,4	17,35	
Nitrobenzen	43,55	42,4	40,1
Pyridin	37,2	35,7	
Quecksilber	475	472,5	467,5
Schwefelkohlenstoff	32,4	30,85	27,8
Tetrachlormethan	26,8	25,5	
Wasser	72,75	71,15	67,9

Tabelle 24. Grenzflächenspannungen bei 20 °C

Verbindung	$\sigma_{\text{Grenz}}$ gemessen gegen	$\sigma_{\text{Grenz}} / \text{mN m}^{-1}$
Quecksilber	Wasser	375
Wasser	Benzen	34,96
Wasser	Chloroform	27,7
Wasser	Diethylether	9,69
Wasser	Tetrachlor- methan	45,05

**Tabelle 25. Graphische Auswertung von Meßwerten nach Regressionsverfahren**

**Geradengleichung**

$$a = \frac{\sum(x \cdot y) - \frac{\sum x \cdot \sum y}{n}}{\sum(x^2) - \frac{(\sum x)^2}{n}}$$

$$y = a \cdot x + b$$

$$b = \frac{\sum y}{n} - a \cdot \frac{\sum x}{n}$$

**Bestimmtheitsmaß**

$$r^2 = \frac{\left[ \sum(x \cdot y) - \frac{\sum x \cdot \sum y}{n} \right]^2}{\left[ \sum(x^2) - \frac{(\sum x)^2}{n} \right] \left[ \sum(y^2) - \frac{(\sum y)^2}{n} \right]}$$

**Exponentialgleichung**

$$a = \frac{\sum(x \cdot \ln y) - \frac{\sum x \cdot \sum \ln y}{n}}{\sum(x^2) - \frac{(\sum x)^2}{n}}$$

$$y = b \cdot e^{ax}$$

$$\ln y = ax + \ln b$$

$$b = e^{\left[ \frac{\sum \ln y}{n} - a \cdot \frac{\sum x}{n} \right]}$$

**Bestimmtheitsmaß**

$$r^2 = \frac{\left[ \sum(x \cdot \ln y) - \frac{\sum x \cdot \sum \ln y}{n} \right]^2}{\left[ \sum(x^2) - \frac{(\sum x)^2}{n} \right] \left[ \sum(\ln y)^2 - \frac{(\sum \ln y)^2}{n} \right]}$$



**VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie**

**ISBN 3-342-00273-5**