

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 entgegenommen.

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, Ebulioskopie	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	$1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$
Kraft	F	Newton	$1 \text{ kg m s}^{-2} = 1 \text{ J m}^{-1}$
Leistung	P	Watt	$1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} = 1 \text{ J s}^{-1}$
Druck	p	Pascal	$1 \text{ N m}^{-2} = 1 \text{ m}^{-1} \text{ kg s}^{-2}$
elektrische Spannung	U	Volt	$1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ A}^{-1} = 1 \text{ J A}^{-1} \text{ s}^{-1}$
elektrischer Widerstand	R	Ohm	Ω
			$1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ A}^{-2} = 1 \text{ V A}^{-1}$

Zur Bildung von dezimalen Vielfachen und Teilen von Einheiten sind Vorsätze festgelegt, die bei entsprechender Multiplikation vor den Einheitennamen 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	μ
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	m^2 ; cm^2	Oberfläche, Querschnitt
A		Absorptionsgrad (opt.), Absorbanz
A_1	cm^2	Flächenbedarf eines Moleküls
C	J K^{-1}	Wärmekapazität
\bar{c}_p	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	V cm^{-1}	elektrische Feldstärke
E	V; mV	EMK
E		Extinktion
E_a	V; mV	Asymmetriepotential
E_d	V; mV	Diffusionspotential
E_G	kg K mol^{-1}	kryoskopische Konstante
E	J; kJ	Strahlungsenergie

E	$V; \text{ mV}$	Elektrodenpotential
E_I	$V; \text{ mV}$	Elektrodenpotential bei Stromfluß
E_i	$V \text{ cm}^{-1}$	innere elektrische Feldstärke
E_R	$V; \text{ mV}$	Ruhepotential
E_S	kg K mol^{-1}	ebullioskopische Konstante
E_o	$V; \text{ mV}$	Standardelektrodenpotential
$E_{1/2}$	$V; \text{ mV}$	Halbstufenpotential
F	$\text{C mol}^{-1}; \text{ As mol}^{-1}$	FARADAY-Konstante
F	N	Kraft
F	J	Freie Energie
F		Zahl der Freiheiten (GIBBS)
Δ_F^F	$J; \text{ kJ}$	Freie Reaktionsenergie
G	$J; \text{ kJ}$	Freie Enthalpie, thermodynamisches Potential
H	$J; \text{ kJ}$	Enthalpie
H	cm	Bodenhöhe
H		Häufigkeitsexponent
I	A	Stromstärke
I_d	$A; \text{ mA}$	Diffusionsstromstärke
J	mol l^{-1}	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	$\text{mol}^2 \text{ l}^{-2}$	Ionenprodukt des Wassers
L_m	mol l^{-1}	molare Löslichkeit
M	g mol^{-1}	mittlere molare Masse
N		Zahl der Moleküle
N_A	mol^{-1}	AVOGADRO-Konstante
N_0		Gesamtzahl der Moleküle
P	$V; \text{ mV}$	Elektrodenpolarisation
P		Zahl der Phasen (GIBBS)
P	W	elektrische Leistung
Q	$C; \text{ As}$	elektrische Ladung
Q	J	Wärme
Q		Quantenausbeute

Q_p	J	Wärme bei konstantem Druck
Q_v	J	Wärme bei konstantem Volumen
R	$J \text{ mol}^{-1} \text{K}^{-1}$	allgemeine Gaskonstante
R	Ω	elektrischer Widerstand
R_a	Ω	äußerer Widerstand des Stromkreises
R_f		Retentionsfaktor
R_i	Ω	innerer Widerstand
R_{st}		Standard-Retentionsfaktor
S	$J \text{ K}^{-1}$	Entropie
T	K	Temperatur
ΔT_G	K	Gefrierpunktserniedrigung
ΔT_S	K	Siedepunktserhöhung
U	J	innere Energie
U	V	Zellspannung
ΔR_U	$J \text{ mol}^{-1}$	Reaktionsenergie
U_z	V	Zersetzungsspannung
V	m^3 ; 1	Volumen
\bar{V}_m	$\text{cm}^3 \text{ mol}^{-1}$	partielles 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 absorbierter Stoff (Adsorpt)
		pro 1 g Adsorbens
a_{∞}^+	g g^{-1}	mittlere Ionenaktivität
		Sättigungsmenge bei monomolekularer Bedeckung
b	cm	Bandenbreite
$b_{1/2}$	cm	halbe Bandenbreite
c	mol l^{-1}	Stoffmengenkonzentration
c	m s^{-1}	Lichtgeschwindigkeit
c	$\text{J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$	spezifische Wärmekapazität

c_A, c_B	mol l^{-1}	Konzentration des Stoffes zur Zeit t
c_m	mol kg^{-1}	Molalität
c_s	mol l^{-1}	Sättigungskonzentration
c_0	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_Λ		Leitfähigkeitskoeffizient
g	m s^{-2}	Fallbeschleunigung
h	J s	PLANCK-Konstante
h	m	kapillare Steighöhe, Eintauchtiefe
i		VAN'T-HOFFscher Faktor
j	A m^{-2}	Stromdichte
j_d	A m^{-2}	Diffusionsstromdichte
$j_{d,Gr}$	A m^{-2}	Diffusionsgrenzstromdichte
j_o	A m^{-2}	Austauschstromdichte
k	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_-		Überführungszahlen
p	Pa; N m^{-2}	Druck, Kapillardruck, Partialdruck
p_{Ads}	Pa; N m^{-2}	Dampfdruck des adsorbierten Gases beim Sättigungsdampfdruck der Flüssigkeit
p_0	Pa; N m^{-2}	Dampfdruck der reinen Komponente
q	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	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
Θ	K	DEBYE-Temperatur
Λ_{ev}	$\Omega^{-1} \text{ cm}^2 \text{ mol}^{-1}$	Äquivalentleitfähigkeit
Λ_m	$\Omega^{-1} \text{ cm}^2 \text{ mol}^{-1}$	molare Leitfähigkeit
Λ_∞	$\Omega^{-1} \text{ cm}^2 \text{ mol}^{-1}$	Grenzleitfähigkeit, Leitfähigkeit bei unendlicher Verdünnung
Λ_+	$\Omega^{-1} \text{ cm}^2 \text{ mol}^{-1}$	Ionenäquivalentleitfähigkeit
Ω		thermodynamische Wahrscheinlichkeit
α	Grad	Randwinkel, Kontaktwinkel
α		Durchtrittsfaktor
α		Absorptionskoeffizient
γ		Labyrinthfaktor der Porenkanäle
γ	K^{-1}	thermischer Ausdehnungskoeffizient idealer Gase
δ	cm	Dicke der Diffusionsschicht
ϵ		Dielektrizitätskonstante
ϵ	$1 \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$	molarer dekadischer Extinktionskoeffizient
ϵ	J; kJ	Energie eines Lichtquants
η	Pa s	dynamische Viskosität
η_r		relative Viskosität

η	$\text{mV}; \text{V}$	Überspannung
χ	$\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$	elektrische Leitfähigkeit
α		POISSONcher Adiabatenexponent
λ	m	Wellenlänge
λ		statistische Packungsregelmäßigkeit
μ	J mol^{-1}	chemisches Potential
ν	Hz	Lichtfrequenz
ν	$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$	kinematische Viskosität
		stöchiometrischer Faktor
π	$\text{Pa}; \text{N m}^{-2}$	osmotischer Druck
ρ	kg m^{-3}	Dichte
ϱ	$\Omega \text{ cm}$	spezifischer elektrischer Widerstand
σ	J cm^{-2}	spezifische Oberflächenspannung
δ	cm	effektiver Moleküldurchmesser
σ_m	$\text{J mol}^{-2/3}$	molare Oberflächenspannung
τ	N m^{-2}	Schubspannung
τ	s	mittlere Zeitdauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stößen
φ	$(\text{Pa s})^{-1}$	Fluidität
χ		Volumenanteil

Reaktionsgröße

$\Delta_R Y$	Reaktionsgröße, allgemein
$\Delta_{R,0} Y$	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.

$\Delta_B Y_{0,m}$.

Indices

A	Anode, Anolyt	L	Lösung
A, B, C	Stoffkomponente	L _m	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 2 gelöste Stoffe
o	Standardzustand		

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}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 Ä

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}C ist.

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

(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		Stoffmengenkonzentration d_i	Massenkonzentration ξ_i	Volumenanteil (Volumenkonzentration) x_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	1	-
Prozent	%	$1\% = 10^{-2}$
Promille	‰	$1\‰ = 10^{-3}$
Millionstel	ppm	$1\text{ ppm} = 10^{-6}$
Milliardstel	ppb	$1\text{ ppb} = 10^{-9}$
Billionstel	ppt	$1\text{ ppt} = 10^{-12}$

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

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

$$V_T = V_{NB} \left[1 + \gamma_{NB} (T - T_{NB}) \right] \quad (4.2)$$

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

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

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

Kompressibilitätskoeffizient

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

Gesetz von BOYLE-MARIOTTE

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

Thermische Zustandsgleichung idealer Gase

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

Allgemeine Gaskonstante

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

Gaskonstante und thermische Zustandsgleichung

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

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

weitere Gasgesetze vgl. S. 44

4.1.2. Mischungen idealer Gase

Gesetz von DALTON

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

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

(4.14)

Partialdruck idealer Gase in einer Mischung

$$p_1 = n_1 \frac{R T}{V}$$

(4.15)

RAOUFTsches Gesetz vgl. (6.11)

Zustandsgleichung idealer Gasmischungen

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

(4.16)

Mittlere Molmasse einer Gasmischung

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

(4.17)

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

(4.18)

4.1.3. Thermische Dissoziation idealer Gase

Dissoziationsgrad

$$\alpha = \frac{\text{Zahl der dissozierten Teilchen}}{\text{Zahl der ursprünglich vorhandenen Teilchen}} \leq 1$$

(4.19)

Dissoziationsgrad und mittlere Molmasse

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

(4.20)

Stoffmenge nach der Dissoziation

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

Thermische Zustandsgleichung für dissoziierte ideale Gase

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

4.2. Thermische Zustandsgleichung realer Gase

VAN-DER-WAALSche 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-WAALSche 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

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

Mittleres Geschwindigkeitsquadrat

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

Wurzel aus dem mittleren Geschwindigkeitsquadrat

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

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

$$\boxed{\bar{W}_{kin} = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} \cdot \frac{R}{N_A} T = \frac{3}{2} k T} \quad (4.43)$$

Beziehung zwischen Temperatur und mittlerer kinetischer Energie

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

BOLTZMANN-Konstante

$$k = \frac{R}{N_A}$$

(4.45)

Innere Energie eines Gasmoleküls

$$U = \frac{1}{2} k f T$$

(4.46)

Molare Translationsenergie

$$E_{tr} = \frac{3}{2} R T$$

(4.47a)

Molare Rotationsenergie je Rotationsfreiheitsgrad

$$E_{rot} = \frac{1}{2} R T$$

(4.47b)

Molare Schwingungsenergie je Schwingungsfreiheitsgrad

$$E_{vib} = R T$$

(4.47c)

Molare innere Energie

$$U_m = \frac{1}{2} k f t N_A = \frac{1}{2} f R T$$

(4.48)

Mittlere freie Weglänge

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

(4.49)

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

(4.50)

Stoßzahl

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

(4.51)

COULOMB-Gesetz

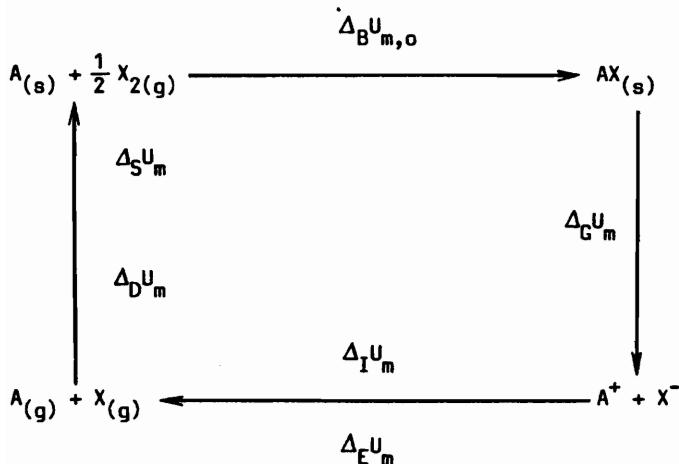
$$W_{\text{pot}} = -\frac{z_1 z_2 e^2}{4 \pi \epsilon_0 d} \quad (5.1)$$

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_{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 $A_{(g)}$

- Δ_I^U Ionisierungsenergie von $A_{(g)}$ und $X_{(g)}$
 Δ_E^U Elektronenaffinität von $A_{(g)}$ und $X_{(g)}$
 $\Delta_B^U m,o$ Standardbildungsenthalpie von $AX_{(s)}$

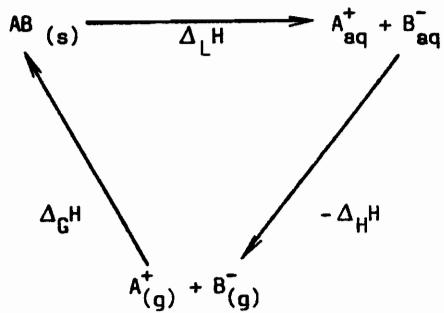
6. Flüssige Systeme

6.1. Lösungen

Lösenthalpie 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

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

$$c_1 v_1 = c_2 v_2 \quad (6.3)$$

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

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

RAOUlt'sches 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)

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

(6.13)

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

Ebullioskopische Konstante

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

}
 M in kg mol⁻¹
 m in kg
 m_{Lm} in kg

(6.14)

(6.15)

Gefrierpunktserniedrigung (Kryoskopie)

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

(6.16)

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

Kryoskopische Konstante

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

}
 M in kg mol⁻¹
 m in kg
 m_{Lm} in kg

(6.17)

(6.18)

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 Siedepunktserhöhung (Gefrierpunktserniedrigung)

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

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

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

Dampfdruckerniedrigung

$$\frac{P_{Lm}}{P_{Lm}} = \frac{P_L}{P_L} = i \frac{n_2}{n_1 + n_2} \quad (6.28)$$

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 Zweistoffsysteem

- 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

$$K_c = K_p (RT)^{-\Delta n} = K_x \left(\frac{RT}{p}\right)^{-\Delta n} \quad (7.4)$$

Summe der stöchiometrischen Faktoren

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

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)
$2 A_2 B \rightleftharpoons 2 A_2 + B_2$	$K_p = \frac{\alpha^3}{(2 + \alpha)(1 - \alpha)^2} p$	(7.9)
$2 A_3 B \rightleftharpoons 3 A_2 + B_2$	$K_p = \frac{27 \alpha^4}{16 (1 - \alpha^2)^2} p^2$	(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 $AB \rightleftharpoons A^+ + B^-$

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

OSTWALD'sches 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

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

(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. Protopolysegleichgewichte

7.2.3.1. Autoprotolyse des Wassers



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

Ionenprodukt des Wassers

$$K_w = a_{\text{H}_3\text{O}^+} \cdot a_{\text{OH}^-} \quad (7.22)$$

$$pK_w = pH + pOH \quad (7.23)$$

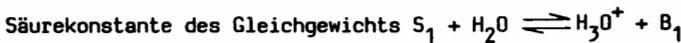
pH-Wert

$$pH = - \lg a_{\text{H}_3\text{O}^+} \quad (7.24)$$

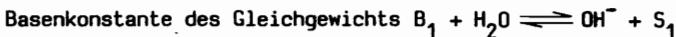
pOH-Wert

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

7.2.3.2. Protopolyse von Säuren und Basen



$$K_s = \frac{a_{B_1} \cdot a_{\text{H}_3\text{O}^+}}{a_{S_1} \cdot a_{\text{H}_2\text{O}}} \simeq \frac{a_{B_1} \cdot a_{\text{H}_3\text{O}^+}}{a_{S_1}} \quad (7.26)$$



$$K_B = \frac{a_{S_1} \cdot a_{\text{OH}^-}}{a_{B_1} \cdot a_{\text{H}_2\text{O}}} \simeq \frac{a_{S_1} \cdot a_{\text{OH}^-}}{a_{B_1}} \quad (7.27)$$

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)

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

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)

Proton	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)
mittel- starke 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)

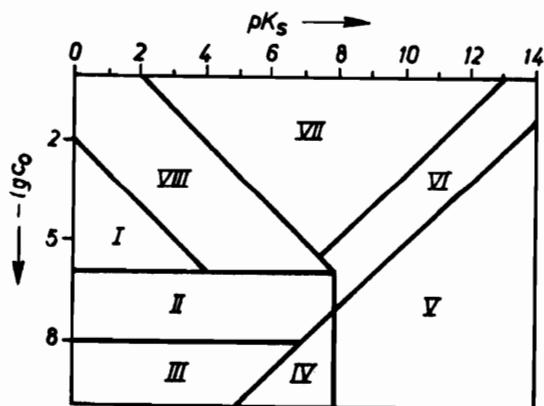


Abbildung 1
Gültigkeitsbereiche der
Näherungsformeln zur
Berechnung des pH-Wertes

7.2.3.3. Protopolyse von Salzen

Protopolysegrad

- 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



$$K_L = a_A^{xz+} a_B^{yz-} \quad (7.49)$$

Löslichkeit

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

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

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

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

8. Chemische Thermodynamik

8.1. Wärme

Wärme

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

Spezifische Wärmekapazität

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

Wärmekapazität

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

Molare Wärmekapazität

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

Wärmekapazität bei konstantem Druck

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

Wärmekapazität bei konstantem Volumen

$$C_V = \frac{dQ}{dT} = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V \quad (8.6)$$

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

$$C_{m,p} - C_{m,V} = R \quad (8.12)$$

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 $dQ = 0$ ($Q = \text{const}$)
$dW_V =$	$- nRT \frac{dV}{V}$	$- p dV$	$\frac{- p}{n C_{m,V}} dT$
$W_V =$	$- nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$ $- nRT \ln \frac{p_1}{p_2}$	$- p (V_2 - V_1)$	$n C_{m,V} (T_2 - T_1)$

(8.17)

(8.18)

POISSONscher Adiabatenexponent

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} \quad (8.19)$$

POISSONsche Adiabatengleichungen

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

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

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

$$U_T = U_0 + \int_{T_0}^T C_V dT \quad (8.27)$$

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

Temperaturabhängigkeit der molaren inneren Energie

$$U_{m,T} = U_{m,0} + n \int_{T_0}^T C_{m,V} dT \quad (8.29)$$

Enthalpie

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

$$dH = dU + d(pV) \quad (8.31)$$

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)

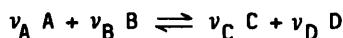
Reaktionsenthalpie vgl. (8.36)

8.4. Energie bei chemischen Reaktionen

Reaktionsenthalpie

$$\Delta_R^H = \sum v_i \Delta_B^H m,i \quad (8.36)$$

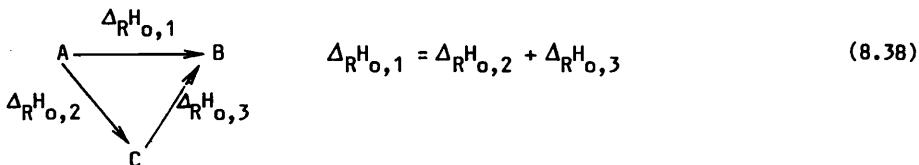
Summe der stöchiometrischen Faktoren einer Reaktion



$$\sum v_i = -v_A - v_B + v_C + v_D \quad (8.37)$$

HESSsches Gesetz

Schema:



Reaktionsenergie

$$\Delta_R^U = \Delta_R^H - \sum v_i^g RT \quad (8.39)$$

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

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

Spezifischer Heizwert (unterer Heizwert)

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

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

8.5. Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

Formulierung des 2. Hauptsatzes

- thermisch

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

- 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

$$\Delta_R S = \sum_j v_i S_{m,i} \quad (8.56)$$

(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

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

8.6. Anwendung des 2. Hauptsatzes auf geschlossene Systeme

Arbeit

	reversibler Prozeß	irreversibler Prozeß	
dW	$= dU - T dS$	$> dU - T dS$	(8.60)
dW_N	$= dU - T dS + p(dV)_p$	$> dU - T dS + p(dV)_p$	(8.61)
$dT = 0$	$W_{rev} < W_{irr}$	$Q_{rev} > Q_{irr}$	(8.62)

Freie Energie (nach HELMHOLTZ)

$\Delta_f G = U - TS$

 $(dT = 0) \quad (8.63)$

Freie Enthalpie (nach GIBBS)

$$G = U - TS + pV = H - TS \quad (8.64)$$

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
Gleichgewicht	$\Delta F = 0$	$\Delta G = 0$	$= 0$
Zwang	$\Delta F > 0$	$\Delta G > 0$	> 0

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

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

Chemisches Potential für reine Stoffe

$$\mu = G_m = H_m - TS_m \quad (8.70)$$

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

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

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

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

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

GIBBS-HELMHOLTZ-Gleichungen

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

$$\boxed{\Delta G = \Delta H - T \Delta S} \quad (8.83)$$

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

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

(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)

GIBBSches Phasengesetz

$$F = K + 2 - P$$

(8.90)

Gleichgewicht zwischen flüssiger und gasförmiger Phase

CLAUSIUS-CLAPEYRONsche Gleichung

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta_p H}{T_p \Delta_p V} \quad (8.91)$$

Dampfdruckgleichung

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

- , integrierte Form

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = - \frac{\Delta V_m^H}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (8.92b)$$

Temperaturabhängigkeit der Enthalpie vgl. (8.34)

Gleichgewichte zwischen Gasphase und Lösung

Löslichkeitskoeffizient (Absorptionskoeffizient)

HENRY-DALTON-Gesetz (für ideale Gase)

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

- , nach OSTWALD

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

BUNSENscher Absorptionskoeffizient

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

8.7.2. Chemische Gleichgewichte

Massenwirkungsgesetz

$$\prod (a_i^{\gamma_i}) = \frac{a_C^{\gamma} a_D^{\gamma}}{a_A^{\gamma} a_B^{\gamma}} = K = f(T, p) \quad (8.96)$$

Chemisches Gleichgewicht und freie Standardreaktionsenthalpie

$$\Delta_R G_0 = - R T \ln K_a \quad (8.97)$$

Chemisches Gleichgewicht und freie Standardreaktionsenthalpie

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

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

- Reaktionsisobare

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

-- integrierte Form

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

- Reaktionsisochore

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

-- integrierte Form

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

Druckabhängigkeit der Gleichgewichtskonstante

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

-- integrierte Form

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

Temperaturabhängigkeit der inneren Energie vgl. (8.27)

Temperaturabhängigkeit der Enthalpie vgl. (8.34)

9. Elektrochemische Vorgänge

9.1. Elektrische Leitfähigkeit

Elektrischer Widerstand

$$R = \rho \frac{1}{A} = \frac{U}{I} \quad (9.1)$$

Elektrischer Leitwert

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

Elektrische Leitfähigkeit

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

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 dissozierte Elektrolyte)

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

Konzentrationsabhängigkeit der Äquivalentleitfähigkeit
(KOHLRASCHes Quadratwurzelgesetz)

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

Dissoziationsgrad

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

Elektrische Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Konzentration

- bei schwachen Elektrolyten

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

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

- bei starken Elektrolyten

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

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

OSTWALDsches Verdünnungsgesetz

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

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 Überführungszahl (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)

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

ε GALVANI-Potential

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

(NERNST-Gleichung)

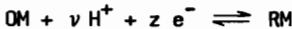
$$E = E_0 + \frac{R T}{z_e F} \ln \frac{a_{\text{OM}}^a}{a_{\text{RM}}^b} = E_0 + \frac{F_N}{z_e} \lg \frac{a_{\text{OM}}^a}{a_{\text{RM}}^b} \quad (9.21)$$

NERNST-Faktor

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

$\frac{F_N}{F} \text{ V}$	0	15	18	20	25
F_N/V	0,0542	0,0572	0,0578	0,0582	0,0592

Potential des pH-abhängigen korrespondierenden Redoxpaars



$$E = E_0 - F_N \frac{v}{z_e} \text{pH} \quad (9.23)$$

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

$$E_{G1} = F_N (\text{pH}_A - \text{pH}_K) + E_a \quad (9.27)$$

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)

$$E_0 = \frac{(z_e E_o)_K - (z_e E_o)_A}{z_{e,K} - z_{e,A}} \quad (9.30)$$

Gleichgewichtskonstante der Zellreaktion

$$K_a = \exp \left(\frac{z_e F E_0}{R T} \right) \quad (9.31)$$

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

$$j_d = - z_e A D \frac{c - c_{G1}}{\delta} \quad (9.41)$$

c_{G1} Konzentration an der Phasengrenzfläche

c Konzentration im Phaseninnern

- Diffusionsgrenzstromdichte

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

Elektrodenpolarisation

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

Überspannung

$$\eta = E_I - E_{G1} \quad E_{G1} \text{ Gleichgewichtspotential der Elektrode} \quad (9.44)$$

- 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

$$\eta_d = \frac{R T}{z_e F} \ln \frac{c}{c_{G1}} \quad c_{G1} \text{ Ionenkonzentration im stromlosen Zustand} \quad (9.48)$$

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

Zellpolarisation

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

Zersetzungsspannung

$$U_Z = U_{Z,A} - U_{Z,K} \quad (9.51)$$

Zellspannung

$$U = U_Z + \eta_Z \quad (9.52)$$

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

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

(10.1)

(10.2)

(10.3)

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

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

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

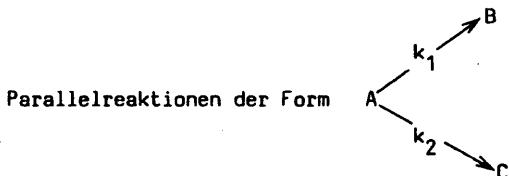
- integriertes Zeitgesetz

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

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

- 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)

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

- 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

EÖTVÖSsche Regel

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

EÖTVÖSsche 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

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

Oberflächenspannung nach der Blasendruckmethode

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

Oberflächenspannung nach der Lamellenmethode

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

11.2. Adsorption

FREUNDLICH-Isotherme

$$\boxed{a = k \cdot c^{1/n}} \quad k, n \text{ temperaturabhängige Konstanten} \quad (11.11)$$

$$\boxed{a = k \cdot p^{1/n}} \quad (11.12)$$

LANGMUIR-Isotherme

$$\boxed{a = a_{\infty} \frac{c}{b + c}} \quad b \text{ Konstante} \quad (11.13)$$

$$\boxed{a = a_{\infty} \frac{p}{b + p}} \quad (11.14)$$

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

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

Temperaturabhängigkeit des Adsorptionsgleichgewichts

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

11.3. Chromatographie

11.3.1. Allgemeine Chromatographie

Trennfaktor

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

Retentionsfaktor

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

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

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

Trennleistung einer Säule

VAN-DEEMTER-Gleichung

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

Konstanten der VAN-DEEMTER-Gleichung

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

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

$$C = \frac{g_n \cdot k \cdot d}{\pi^2 \cdot D_1 \cdot (1 + k')^2} \quad (11.30)$$

k Verteilungskoeffizient der Gaschromatografie

k' vorgangsspezifische Konstante

Leistungsindex einer Säule

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

HERINGTONsche Trennformel

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

11.4. Viskosität

NEWTONsche Gleichung

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

Bestimmung der Viskosität (Kapillarmethode)

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} \cdot \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \frac{t_1}{t_2} \quad (11.34)$$

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

K_η Viskosimeterkonstante in 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

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

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

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

11.5. Diffusion

Teilchentransport bei zeitunabhängigem Konzentrationsgefälle;

1. FICKsches Gesetz

$$\boxed{dn = - D A \cdot \frac{dc}{dx} dt} \quad (11.46)$$

Diffusionskoeffizient

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

- in Elektrolytlösungen

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

Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten

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

Diffusionsgeschwindigkeit

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

Auflösungsgeschwindigkeit von Salzen;

Gleichung von NERNST-NOYES-WHITNEY

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

Teilchentransport in Gasen und stark verdünnten Lösungen bei zeit-abhängigem 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 $\lambda = \text{const}$)

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

LAMBERT-BEERsches Gesetz

$$E = \epsilon(\lambda) \, c \, l \quad (12.8)$$

Energie eines Lichtquants; Frequenzgesetz von PLANCK-EINSTEIN

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

Energie eines Mol Lichtquanten; Photochemisches Äquivalent

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

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.; PADELT, 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/PADELT, 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

Tabelle 1. Allgemeine physikalische Konstanten

Größe	Symbol	Zahlenwert	Einheit
AVOGADRO-Konstante	N_A	$6,022137 \cdot 10^{23}$	mol^{-1}
BOLTZMANN-Konstante	k	$1,380658 \cdot 10^{-23}$	J K^{-1}
Dielektrizitätskonstante im Vakuum	ϵ_0	$8,854 \cdot 10^{-12}$	F m^{-1}
FARADAY-Konstante	F	$9,648531 \cdot 10^4$	C mol^{-1}
Gaskonstante, allg.	R	8,3144	$\text{J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ 1)
Ladung eines Elektrons (elektrische Elementarladung)	e	$1,6021773 \cdot 10^{-19}$	C
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	c_0	$2,99792458 \cdot 10^8$	m s^{-1}
Molvolumen idealer Gase bei Normbedingungen	$V_{m,n}$	$22,4136 \cdot 10^{-3}$	$\text{m}^3 \text{ mol}^{-1}$
Fallbeschleunigung	g	9,80665	m s^{-2}
PLANCK-Konstante	h	$6,626076 \cdot 10^{-34}$	J s
Ruhemasse			
- des Elektrons	m_e	$9,109390 \cdot 10^{-31}$	kg
- des Neutrons	m_n	$1,6749286 \cdot 10^{-27}$	kg
- des Protoms	m_p	$1,6726231 \cdot 10^{-27}$	kg

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

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 Pa($m^3 mol^{-1}$) ²	$10^6 b$ $m^3 mol^{-1}$
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	$\frac{T_k}{K}$	$\frac{10^{-5} p_k}{Pa}$	$\frac{a}{Pa(m^3 mol^{-1})^2}$	$\frac{10^6 b}{m^3 mol^{-1}}$
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

$\frac{\vartheta}{^{\circ}C}$	$\frac{p_{H_2O}}{kPa}$	$\frac{\vartheta}{^{\circ}C}$	$\frac{p_{H_2O}}{kPa}$	$\frac{\vartheta}{^{\circ}C}$	$\frac{p_{H_2O}}{kPa}$
- 20	0,103 ⁺⁾	20	2,338	65	25,003
- 15	0,165 ⁺⁾	21	2,487	70	31,157
- 10	0,259 ⁺⁾	22	2,643	75	38,544
- 5	0,401 ⁺⁾	23	2,809	80	47,343
0	0,610 ⁺⁾	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^{-1}	kg K mol^{-1}
Aceton	1,48	-
Ameisensäure	2,4	2,77
Anilin	3,69	5,87
Benzin	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	T_S K	$\Delta_{S,m}^H$ kJ mol ⁻¹	T_V K	$\Delta_{V,m}^H$ 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 ¹⁾	14	0,12	20	0,93
Sauerstoff ¹⁾	54	0,44	90	6,85
Stickstoff ¹⁾	63	0,72	77	5,63
Chlor ¹⁾	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
Toluol	178	6,63	384	32,80
<i>o</i> -Xylen	248	13,78	418	36,94
<i>m</i> -Xylen	225	11,56	412	36,41
<i>p</i> -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 $^{\circ}\text{C}$
H_2	$27,21 + 3,77 \cdot 10^{-3} T$	0...2700
H_2	$28,81 + 2,76 \cdot 10^{-4} T + 1,17 \cdot 10^{-6} T^2$	0...1700
O_2	$27,21 + 4,19 \cdot 10^{-3} T$	0...2700
O_2	$26,21 + 1,15 \cdot 10^{-2} T - 3,22 \cdot 10^{-6} T^2$	0...1700
N_2	$27,21 + 4,19 \cdot 10^{-3} T$	0...2700
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
N_2O	$27,34 + 4,40 \cdot 10^{-2} T - 1,5 \cdot 10^{-5} T^2$	0...1200
NO	$26,0 + 1,02 \cdot 10^{-2} T - 2,56 \cdot 10^{-6} T^2$	0...1200
NO_2	$29,31 + 2,97 \cdot 10^{-2} T - 3,6 \cdot 10^{-6} T^2$	0...1200
NH_3	$28,05 + 2,64 \cdot 10^{-2} T$	0... 500
NH_3	$24,79 + 3,75 \cdot 10^{-2} T - 7,39 \cdot 10^{-6} T^2$	0...1700
HCl	$27,21 + 4,19 \cdot 10^{-3} T$	0...2700
HCl	$28,19 + 1,81 \cdot 10^{-3} T + 1,54 \cdot 10^{-6} T^2$	0...1200
HBr	$27,54 + 4,0 \cdot 10^{-3} T + 0,66 \cdot 10^{-6} T^2$	0...1200
H_2S	$26,73 + 2,39 \cdot 10^{-2} T - 5,07 \cdot 10^{-6} T^2$	0...1500
SO_2	$32,24 + 2,22 \cdot 10^{-2} T - 3,48 \cdot 10^{-6} T^2$	0...2200
SO_3	$18,84 + 6,7 \cdot 10^{-2} T$	0...1200
H_2O	$34,12 + 2,09 \cdot 10^{-3} T$	0...2000
H_2O	$30,38 + 9,62 \cdot 10^{-3} T + 1,18 \cdot 10^{-6} T^2$	0...1200
CO	$27,21 + 4,19 \cdot 10^{-3} T$	0...2700
CO	$26,17 + 8,75 \cdot 10^{-3} T - 1,92 \cdot 10^{-6} T^2$	0...1700
CO_2	$32,24 + 2,22 \cdot 10^{-2} T - 3,48 \cdot 10^{-6} T^2$	0...2200
CH_4	$14,16 + 7,55 \cdot 10^{-2} T - 1,8 \cdot 10^{-5} T^2$	0...1200
C_2H_6	$9,19 + 0,16 T - 4,61 \cdot 10^{-5} T^2$	0...1200
C_2H_4	$11,33 + 0,122 T - 3,79 \cdot 10^{-5} T^2$	0...1200
C_2H_2	$24,45 + 2,21 \cdot 10^{-2} T - 2,31 \cdot 10^{-5} T^2$	0...1200
C_3H_8	$0,5 + 0,27 T - 9,53 \cdot 10^{-5} T^2$	0...1200
C_6H_6	$21,1 + 0,4 T - 1,7 \cdot 10^{-4} T^2$	0...1200
CH_3OH	$20,43 + 0,103 T - 2,47 \cdot 10^{-5} T^2$	0... 400
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	$9,04 + 0,208 T - 6,5 \cdot 10^{-5} T^2$	0... 400
CH_3CHOH	$18,97 + 0,14 T - 3,89 \cdot 10^{-5} T^2$	0... 400

Tabelle 7. Mittlere molare Wärmekapazität einiger Stoffe
 $(p = 101,325 \text{ kPa})$

Stoff	$\bar{C}_{m,p} / (\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1})$ bei			
	300 K	600 K	900 K	1200 K
H_2	28,89	29,32	29,89	31,02
O_2	29,39	32,15	34,42	35,71
$\text{H}_2\text{O(g)}$	33,49	36,17	39,77	43,46
F_2	31,53	35,04	36,30	36,76
HF	29,14	29,27	29,85	31,02
Cl_2	33,79	36,26	36,89	37,14
HCl	29,10	29,60	31,02	32,57
$\text{Br}_2\text{(g)}$	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_2	29,14	30,14	32,15	33,79
NH_3	35,59	44,63	53,21	60,71
H_2S	34,04	38,64	43,92	47,98
SO_2	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_2	37,30	47,39	53,13	56,52
CH_4	35,80	52,50	67,91	79,09
C_2H_2	44,55	58,20	65,69	71,18
Si	20,10	24,70	26,38	27,63
SiO_2 (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_3	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	$\Delta_B H_{m,o}$ kJ mol ⁻¹	$S_{m,o}$ J mol ⁻¹ K ⁻¹
H ₂	g	0	130,75
H	g	217,29	114,72
O ₂	g	0	205,28
O	g	247,44	161,11
F ₂	g	0	200,92
F	g	132,93	158,81
Cl ₂	g	0	223,24
Cl	g	121,00	165,25
Br ₂	l	0	154,07
Br ₂	g	32,03	245,47
Br	g	112,54	175,05
I ₂	s	0	116,81
I ₂	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 ₂	g	122,25	227,76
N ₂	g	0	191,76
N	g	356,30	153,32
P (weiß)	s	0	44,38
P ₂	g	86,67	217,71
P ₄	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	$\Delta_B^H m,o$ kJ mol ⁻¹	$S_{m,o}$ J mol ⁻¹ K ⁻¹
Na	g	108,44	153,66
Na ₂	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	$\Delta_{B,m,o}^H$ kJ mol $^{-1}$	$S_{m,o}$ J mol $^{-1}$ 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	$\Delta_{B,m,o}^H$ kJ mol $^{-1}$	$S_{m,o}$ J mol $^{-1}$ K $^{-1}$
O ₃	g	+ 144,14	239,07
H ₂ O	l	- 286,17	70,76
H ₂ 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 ₂ S	g	- 22,19	205,99
SO ₂	g	- 296,84	248,70
SO ₃	s	- 443,80	263,77
SO ₃	g	- 388,54	267,12
H ₂ SO ₄	l	- 811,19	200,55
NH ₃	g	- 46,05	192,17
N ₂ O	g	+ 82,27	220,14
NO	g	+ 90,43	210,76

Fortsetzung Tabelle 9

Stoff	Zustand	$\Delta_B H_{m,o}$ kJ mol ⁻¹	$S_{m,o}$ J mol ⁻¹ K ⁻¹
NO ₂	g	+ 33,62	240,62
N ₂ O ₄	g	+ 12,81	304,38
N ₂ O ₅	g	+ 2,51	342,48
PH ₃	g	- 9,63	211,43
PCl ₃	g	- 293,08	311,92
POCl ₃	g	- 579,45	324,90
As ₂ O ₃	s	- 619,65	107,18
CO	g	- 110,62	198,12
CO ₂	g	- 393,77	213,86
CS ₂	l	+ 87,92	150,31
HCN	g	+ 130,63	201,80
SiO ₂ (Quarz)	s	- 851,18	42,29
SiCl ₄	g	- 596,62	330,76
LiOH	s	- 487,97	53,59
LiCl	s	- 408,84	50,24
NaOH	s	- 426,89	57,78
NaF	s	- 569,20	50,24
NaCl	s	- 411,69	72,43
NaBr	s	- 363,12	83,74
NaI	s	- 290,06	92,11
Na ₂ SO ₄	s	-1383,65	149,47
NaNO ₃	s	- 467,75	120,58
Na ₂ CO ₃	s	-1129,98	136,07
NaHCO ₃	s	- 947,89	102,16
KCl	s	- 436,93	82,90
KBr	s	- 393,85	94,62
KI	s	- 330,21	100,90
K ₂ SO ₄	s	-1434,65	187,57
KNO ₃	s	- 494,42	133,14
NH ₄ Cl	s	- 313,80	133,14
MgO	s	- 611,69	26,80
Mg(OH) ₂	s	- 915,65	63,22
MgCl ₂	s	- 641,84	116,81

Fortsetzung Tabelle 9

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

Fortsetzung Tabelle 9

Stoff	Zustand	$\frac{\Delta_B H_{m,o}}{\text{kJ mol}^{-1}}$	$\frac{S_{m,o}}{\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}}$
SnCl_4	s	- 533,40	260,00
PbO (gelb)	s	- 217,96	70,76
PbO_2	s	- 272,14	76,62
Pb_3O_4	s	- 721,80	211,43
PbSO_4	s	- 914,82	147,38
PbCO_3	s	- 703,38	131,05
Bi_2O_3	s	- 576,94	134,81
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	CH_2O_2	l	- 416,7	138,16
Anilin	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	l	+ 35,2	191,76
Benzen	C_6H_6	l	+ 46,6	173,75
Benzoësäure	$\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_2$	s	- 381,0	170,82
Butan	C_4H_{10}	g	- 124,6	310,66
Chinon	$\text{C}_6\text{H}_4\text{O}_2$	s	- 185,9	159,10
Chloroform	CHCl_3	g	- 98,1	296,43
Cyclohexan	C_6H_{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	C_2H_6	g	- 84,7	228,60
Ethanol	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	l	- 278,5	159,10
Ethen	C_2H_4	g	+ 52,3	219,68

Fortsetzung Tabelle 10

Name	Formel	Zu- stand	$\Delta_B H_{m,o}$ kJ mol ⁻¹	$S_{m,o}$ J mol ⁻¹ K ⁻¹
Ethin (Acetylen)	C ₂ H ₂	g	+ 225,7	210,09
Formaldehyd	CH ₂ O	g	- 118,5	217,71
Fumarsäure	C ₄ H ₄ O ₄	s	- 812,4	166,22
Glycerol	C ₃ H ₈ O ₃	l	- 660,3	204,73
Glycol	C ₂ H ₆ O ₂	l	- 452,2	167,05
Harnstoff	CH ₄ ON ₂	s	- 331,2	104,67
Hexan	C ₆ H ₁₄	l	- 211,4	298,10
Hydrochinon	C ₆ H ₆ O ₂	s	- 358,0	140,26
Maleinsäure	C ₄ H ₄ O ₄	s	- 789,7	159,10
Methan	CH ₄	g	- 74,9	186,15
Methanol	CH ₃ O	l	- 238,7	126,86
Methylamin	CH ₃ N	l	- 38,1	241,58
Methylchlorid	CH ₃ Cl	g	- 84,2	234,46
Naphthalin	C ₁₀ H ₈	s	+ 76,2	167,05
Nitrobenzen	C ₆ H ₅ O ₂ N	l	+ 18,0	221,90
Oxalsäure	C ₂ H ₂ O ₄	s	- 821,9	117,23
Phenol	C ₆ H ₅ O	s	- 155,3	142,35
o-Phthalsäure	C ₈ H ₆ O ₄	s	- 782,9	205,15
Propen	C ₃ H ₆	g	+ 20,4	267,12
Propan	C ₃ H ₈	g	- 103,7	270,89
n-Propanol	C ₃ H ₈ O	l	- 302,7	192,59
Pyridin	C ₅ H ₅ N	l	+ 80,4	179,20
Styren	C ₈ H ₈	l	+ 87,5	-
Tetrachlormethan	CCl ₄	l	- 141,5	217,71
Toluen	C ₇ H ₈	l	+ 15,1	217,71
o-Xylen	C ₈ H ₁₀	l	- 0,84	247,02

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

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

Tabelle 12. Abschätzung des Reaktionsverlaufs aus thermodynamischen Zustandsgrößen

Fall	ΔH	ΔS	$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$	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 (endotherrn)	> 0	< 0 T ist groß	hohe Reaktionswahrscheinlichkeit bei hoher Temperatur
			> 0 T ist klein	Rückreaktion ist wahrscheinlicher
4	> 0 (endotherrn)	0	> 0	Rückreaktion ist wahrscheinlicher

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

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

Tabelle 14. Temperaturabhängigkeit für das Ionenprodukt des Wassers

$\text{ }^\circ\text{C}$	$10^{14} K_W$ $\text{mol}^2 \text{ l}^{-2}$	$\text{p}K_W$
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 $^\circ\text{C}$)

Reaktionsgleichung	K_L	$\text{p}K_L$
$\text{AgCl} \rightleftharpoons \text{Ag}^+ + \text{Cl}^-$	$1,8 \cdot 10^{-10}$	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^+	349,8	OH^-	197,6
Li^+	38,7	F^-	55
Na^+	50,1	Cl^-	76,3
K^+	73,5	Br^-	78,3
Rb^+	77,0	I^-	76,8
Cs^+	77,7	ClO_3^-	65,3
NH_4^+	73,5	BrO_3^-	55,7
Ag^+	61,9	IO_3^-	41
$1/2 \text{ Be}^{2+}$	45	ClO_4^-	67,3
$1/2 \text{ Mg}^{2+}$	53,1	IO_4^-	54,6
$1/2 \text{ Ca}^{2+}$	59,5	NO_3^-	71,4
$1/2 \text{ Sr}^{2+}$	59,4	HCO_3^-	44,5
$1/2 \text{ Ba}^{2+}$	63,6	$1/2 \text{ CO}_3^{2-}$	69,3
$1/2 \text{ Cu}^{2+}$	56,6	$1/2 \text{ SO}_4^{2-}$	80,0
$1/2 \text{ Cd}^{2+}$	54	$1/2 \text{ CrO}_4^{2-}$	85
$1/2 \text{ Zn}^{2+}$	52,8	$1/2 \text{ C}_2\text{O}_4^{2-}$	74,2
$1/2 \text{ Pb}^{2+}$	70	$1/3 [\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$	100,9
$1/2 \text{ Fe}^{2+}$	53,5	$1/4 [\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$	110,5
$1/2 \text{ Co}^{2+}$	55	HCOO^-	54,5
$1/2 \text{ Ni}^{2+}$	54	CH_3COO^-	40,9
$1/2 \text{ Mn}^{2+}$	53,5	$\text{C}_2\text{H}_5\text{COO}^-$	35,8
$1/3 \text{ Fe}^{3+}$	68	$\text{C}_6\text{H}_5\text{COO}^-$	32,4
$1/3 \text{ Cr}^{3+}$	67	Pikrat $^-$	30,4
$1/3 \text{ Al}^{3+}$	63		
$1/3 \text{ La}^{3+}$	69,7		

Tabelle 17. Standardelektrodenpotentiale von Kationen

RM	OM	E_o V	RM	OM	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	E_o V	RM	OM	E_o V
Te^{2-}	$\text{Te}_{(\text{s})}$	- 0,92	2 CNS^-	$(\text{CNS})_2$	+ 0,77
Se^{2-}	$\text{Se}_{(\text{s})}$	- 0,78	2 Br^-	$\text{Br}_2(\text{l})$	+ 1,07
S^{2-}	$\text{S}_{(\text{s})}$	- 0,51	2 Br^-	$\text{Br}_2(\text{aq})$	+ 1,09
4OH^-	$\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	+ 0,40	2 Cl^-	$\text{Cl}_2(\text{aq})$	+ 1,36
2I^-	$\text{I}_2(\text{s})$	+ 0,54	2 F^-	$\text{F}_2(\text{g})$	+ 2,87
2I^-	$\text{I}_2(\text{aq})$	+ 0,62			

Tabelle 19. Standardpotentiale für Redoxreaktionen

Reaktion	OM	E_{o} V	
RM			
2NO_2^-	\rightleftharpoons	$\text{NO}_3^- + \text{NO}$	- 0,58
$2 \text{NH}_3 + \text{H}_2$	\rightleftharpoons	2NH_4^+	- 0,55
Cr^{2+}	\rightleftharpoons	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
Cu^+	\rightleftharpoons	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
2OH^-	\rightleftharpoons	H_2O_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	RM	OM	E_o V
$Pb^{2+} + 2 H_2O \rightleftharpoons PbO_2 + 4 H^+$			+ 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
$Cl_2(g) + 2 H_2O \rightleftharpoons 2 HCl + 2 H^+$			+ 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 Bezugselektroden bei 25 °C

	E_H V
$Hg/Hg_2Cl_2(ges), KCl(ges)$	+ 0,241
$Hg/Hg_2Cl_2(ges), 1 M KCl$	+ 0,280
$Hg/Hg_2Cl_2(ges), 0,1 M KCl$	+ 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
$Hg/Hg_2SO_4, K_2SO_4(ges)$	+ 0,617

Tabelle 21. Standardelektrodenpotentiale von Elektroden 2. Art

	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

	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	σ_{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	Tetrachlormethan	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

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

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

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

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

Bestimmtheitsmaß

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

Periodensystem der Elemente (langperiodische Darstellung, relative Atommassen gerundet, nach IUPAC 1983)

Periode	Ia	IIa	IIIa	IVa	Va	VIIa	VII	Ib	IIb	IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	0	2 He 4,00
1	H 1,008															
2	Li 6,94	Be 9,01													Ne 20,18	
3	Na 22,99	Mg 24,31													Ar 39,95	
4	K 39,10	Ca 40,08	Sc 44,96	Ti 47,88	V 50,94	Cr 52,00	Mn 54,94	Fe 55,85	Co 58,93	Ni 58,69	Cu 63,55	Zn 65,38	Ga 69,72	Ge 72,59	O 74,92	F 16,00
5	Rb 85,47	Sr 87,62	Y 88,91	Zr 91,22	Nb 92,91	Mo 95,94	Tc (96)	Ru 101,07	Rh 102,91	Ag 106,42	Pd 107,87	Cd 112,41	In 114,82	Sn 118,69	Te 121,75	Br 78,96
6	Cs 132,90	Ba 137,33	La 138,91	Hf 178,49	Ta 180,95	W 183,85	Re 186,21	Os 190,2	Pt 192,22	Au 195,08	Hg 196,97	Tl 200,59	Pb 204,38	Bi 207,2	Po 208,98	At (210)
7	Fr (223)	Ra 226,03	Ac 227,03		Ku (261)	Ns (262)									Rn (222)	
Lanthanoide: 4f		Ce 140,12	Pr 140,91	Nd 144,24	Pm (145)	Sm 150,36	Eu 151,96	Gd 157,25	Tb 158,93	Dy 162,50	Ho 164,93	Er 167,26	Tm 168,93	Yb 173,04	Lu 174,97	
Actinoide: 5f		Th 232,04	Pa 231,04	U 238,03	Np 237,05	Pu (244)	Am (243)	Cm (247)	Bk (247)	Cf (251)	E (252)	Fm (257)	Md (258)	No (259)	Lr (260)	

VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie
ISBN 3-342-00273-5