

1

Physikalische Größen und Einheitensysteme

1.1 Größen und Größenarten

Ein wesentliches Ziel der naturwissenschaftlichen und technischen Forschung ist die Beschreibung der in der Natur ablaufenden Vorgänge bzw. der technischen Prozesse durch mathematische Gleichungen. Diese werden entweder durch Experimente oder durch theoretische Überlegungen erhalten. Diese Gleichungen stellen einen funktionalen Zusammenhang zwischen den für den betrachteten Prozess maßgeblichen erfassbaren Eigenschaften oder Erscheinungen des Systems her, die auch allgemein Einflussgrößen genannt werden. Solche Größen sind z. B. Länge, Masse, Zeit, Stromstärke, Konzentration, Arbeit oder Energie. Jede dieser **Größen** G lässt sich aufspalten in ein Produkt aus dem **Zahlenwert** $\{G\}$ und der dazugehörigen **Einheit** $[G]$:

$$G = \{G\} \cdot [G] \quad (1-1)$$

Die Einheit ist eine willkürlich wählbare, aber vereinbarte Größe der gleichen Art wie die betrachtete Größe. Die physikalische Größe der Zeit $t = 60 \text{ s}$ besteht beispielsweise aus dem Zahlenwert $\{t\} = 60$ und der Einheit $[t] = \text{s}$. Statt der Einheit „Sekunde“ kann auch eine andere Zeiteinheit verwendet werden, z. B. „Minute“ oder „Stunde“.

Eine Gleichung zwischen verschiedenen Einflussgrößen (Größengleichung) beinhaltet immer die Arten (Einheiten) dieser Größe und deren Zahlenwerte. Größengleichungen sind daher im Unterschied zu den reinen Zahlenwertgleichungen (z. B.: $4 \cdot 2 = 8$) auch Einheitengleichungen. Eine Größengleichung ist demzufolge auch nur dann erfüllt, wenn Zahlenwert und Einheit auf beiden Seiten übereinstimmen.

Gleichartige Größen werden unter dem Begriff **Größenarten** zusammengefasst. So stellen die Größen Arbeit und Wärme etwas grundsätzlich anderes dar, gehören jedoch beide der gemeinsamen Größenart Energie an. Der überwiegende Teil der physikalischen und chemischen Größenarten ist durch Naturgesetze miteinander verknüpft. Einige müssen jedoch unabhängig voneinander festgelegt werden. Sie werden als Grundgrößenarten oder **Basisgrößen** bezeichnet. Aus diesen Basisgrößen werden die abgeleiteten Größen definiert.

Bisher existierte eine Vielzahl von Einheitensystemen, z. B. das physikalische und das technische Einheitensystem u. v. a.; daneben kommen noch die britischen und US-Einheitensysteme. Die Gremien der Meterkonvention haben das sog. **Internationale Einheitensystem** (Système International d'Unités = SI) empfohlen. Durch das „Gesetz über Einheiten im Meßwesen“ vom 2. Juli 1969 wurde das Internationale Einheitensystem für die Bundesrepublik Deutschland gesetzlich vorgeschrieben. Die Basisgrößen, Basiseinheiten und Einheitenzeichen sind in Tabelle 1.1 gezeigt.

Tabelle 1.1 SI-Basisgrößen und Basiseinheiten

Basisgröße	Basiseinheit Name	Einheitenzeichen
Länge	Meter	m
Masse	Kilogramm	kg
Zeit	Sekunde	s
Stromstärke	Ampere	A
Temperatur	Kelvin	K
Stoffmenge	Mol	mol
Lichtstärke	Candela	cd

Die Basiseinheiten des Internationalen Einheitensystems sind gegenwärtig wie folgt definiert:

1 Meter ist gleich der Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von $1/299\,792\,458$ Sekunden durchläuft.

1 Kilogramm ist die Masse des Internationalen Kilogrammprototyps in Paris, einem Zylinder aus einer Pt-Ir-Legierung von 39 mm Höhe und gleichem Durchmesser.

1 Sekunde ist die Zeitdauer von $9\,192\,631\,770$ Schwingungsperioden der Strahlung des ^{133}Cs -Isotops.

1 Ampere ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen Stromes, der durch zwei im Vakuum parallel im Abstand von 1 m voneinander angeordnete, geradlinige, unendlich lange Leiter von vernachlässigbar kleinem Querschnitt fließend zwischen diesen Leitern elektrodynamisch eine längenbezogene Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ Newton je 1 m Leiterlänge hervorgerufen würde.

1 Kelvin ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes von Wasser genau definierter Isotopenzusammensetzung.

1 Candela ist die Lichtstärke einer monochromatischen Strahlungsquelle mit einer Frequenz von exakt $540 \cdot 10^{12}$ Hz, deren Strahlstärke in die herausgegriffene Richtung $1/683$ W/sr beträgt.

1 Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das so viele Teilchen enthält, wie Atome in $0,012$ kg des Kohlenstoffisotops ^{12}C enthalten sind. (Diese Zahl

$N_A = 6,022\,141 \cdot 10^{23}$ Atome/Mol heißt AVOGADRO-Konstante.)

Dezimale Vielfache und Teile von Einheiten werden durch Voransetzen von Präfixen ausgedrückt (vgl. Tabelle 1.2).

Die Vielzahl möglicher Größen lässt sich auf die sieben Basisgrößen zurückführen. Eine Basisgröße kann nicht weiter auf andere Größen reduziert werden. Daher gibt es für eine Basisgröße keine Definition, sondern nur eine Messvorschrift, mit der ihre Einheit festgelegt wird.

Exkurs 1.1 Vom Urmeter bis zur Neudefinition der Längeneinheit Meter

Die **Längeneinheit Meter** ist seit Ende des 18. Jahrhunderts in Gebrauch. Der Ursprung ist ein Beschluss der französischen Nationalversammlung, ein einheitliches Längenmaß zu schaffen. Das Königreich Bayern trat 1870, noch vor der Reichsgründung, der Internationalen Meterkonvention bei und erhielt als einer der damals 27 beteiligten Staaten eine offizielle Kopie des Prototyps von 1889 aus einer Platin-Iridium-Legierung. Während des 3. Reiches musste Bayern ein Exemplar an die Physikalisch-Technische Reichsanstalt Berlin abgeben.

Der **Meterprototyp** wurde erst 1960 abgelöst, als die Generalkonferenz für Maß und Gewicht das Meter als das $1\,650\,763,73$ -fache der Wellenlänge der von Atomen des Nuklids Krypton-86 im Vakuum ausgesandten Strahlung definierte. Damit wurde eine etwas höhere Genauigkeit definiert.

Da die früheren Definitionen des Urmeters auf der Basis des internationalen Prototyps bzw. einer bestimmten Wellenlänge im Vergleich zur mit Atomuhren gemessenen SI-Basiseinheit Sekunde relativ ungenau waren, entschloss man sich, das Meter neu zu definieren. Seit 1983 ist die SI-Basiseinheit Meter wie folgt festgelegt:

1 Meter ist die Strecke, die das Licht im Vakuum in einer Zeit von $1/299\,792\,458$ Sekunden durchläuft.

Tabelle 1.2 Präfixe für dezimale Vielfache und Teile von Einheiten (DIN 1301, Auszug)

Präfixe	Kurzzeichen	Bedeutung der Präfixe
Exa	E	10^{18} -Faches der Einheit
Peta	P	10^{15} -Faches der Einheit
Tera	T	10^{12} -Faches der Einheit
Giga	G	10^9 -Faches der Einheit
Mega	M	10^6 -Faches der Einheit
Kilo	k	10^3 -Faches der Einheit
Hekto	h	10^2 -Faches der Einheit
Deka	da	10^1 -Faches der Einheit
Dezi	d	10^{-1} -Faches der Einheit
Zenti	c	10^{-2} -Faches der Einheit
Milli	m	10^{-3} -Faches der Einheit
Mikro	μ	10^{-6} -Faches der Einheit
Nano	n	10^{-9} -Faches der Einheit
Piko	p	10^{-12} -Faches der Einheit
Femto	f	10^{-15} -Faches der Einheit
Atto	a	10^{-18} -Faches der Einheit

Alle anderen Größen sind **abgeleitete Größen** und können entsprechend ihrer Definition als solche dargestellt werden. Als Beispiel einer abgeleiteten Größe soll die Kraft betrachtet werden. Für sie gilt das physikalische Gesetz:

$$\text{Kraft} = \text{Masse} \cdot \text{Beschleunigung}$$

$$F = m \cdot a$$

Mit der Masse $m = 1$ kg als Basisgröße und der Beschleunigung $a = 1$ m/s² als bereits abgeleitete Größenart ergibt sich:

$$F = m \cdot a = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s}^2 = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 1 \text{ N}$$

Die abgeleitete Einheit $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ hat die neue Bezeichnung Newton erhalten. 1 N ist daher die Kraft F , die der Masse $m = 1 \text{ kg}$ die Beschleunigung $a = 1 \text{ m/s}^2$ erteilt.

Tabelle 1.3 Einige abgeleitete Größenarten und Einheiten des Internationalen Einheitensystems

Größenart	Einheit	physikal. Gleichung	Einheitengleichung
Kraft	N (Newton)	$F = m \cdot a$	$\text{N} = \text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2$
Druck	Pa (Pascal)	$p = F / A$	$\text{Pa} = \text{kg} / (\text{m} \cdot \text{s}^2)$
Energie	J (Joule)	$W = F \cdot s$	$\text{J} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$
Leistung	W (Watt)	$P = W / t$	$\text{W} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^3$
Frequenz	Hz (Herz)	$f = 1/t$	$\text{Hz} = 1/\text{s}$

Viele der häufig verwendeten Einheiten sind keine SI-Einheiten. Sie sind jedoch Vielfache von SI-Einheiten, wie z. B. die Einheit Liter ($1 \text{ l} = 10^{-3} \text{ m}^3$). In der folgenden Tabelle 1.4 sind einige gebräuchliche Umrechnungsfaktoren für übliche Einheiten zusammengestellt.

Tabelle 1.4 Umrechnungsfaktoren häufig verwendeter Einheiten

Basisgröße	Basiseinheit Name	Einheitenzeichen
Zeit (t)	Minute (min)	1 min = 60 s
	Stunde (h)	1 h = 3 600 s
	Tag (d)	1 d = 86 400 s
	Jahr (a)	1 a = 31 536 000 s
Länge (l)	Ångström (Å)	1 Å = 10^{-10} m
Volumen (V)	Liter (l)	1 l = 10^{-3} m^3
Druck (p)	Bar (bar)	1 bar = 100 000 Pa
Energie (E)	Elektronvolt (eV)	1 eV = $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

1.2 Größen- und Zahlenwertgleichungen

Größengleichungen sind im Unterschied zu den früher häufig verwendeten Zahlenwertgleichungen unabhängig von den verwendeten Einheiten und enthalten daher auch keine Umrechnungsfaktoren. Es

ist daher zweckmäßig, Definitionen und Gesetze stets als Größengleichungen anzugeben.

Größengleichungen sind Gleichungen zwischen physikalischen Größen. Sie enthalten nur die Symbole der physikalischen Größen und Zahlenwerte, die aus mathematischen Operationen entstanden sind. Andere Zahlenwerte oder Zeichen, die aus der Umrechnung unterschiedlicher Einheiten stammen, enthalten sie nicht.

In Größengleichungen ist die physikalische Größe vollständig angegeben, also als Produkt aus Zahlenwert und Einheit. Folgendes Beispiel soll diesen Sachverhalt verdeutlichen:

$$\begin{aligned} \text{Kraft} &= \text{Masse} \cdot \text{Beschleunigung} \\ F &= m \cdot g \end{aligned}$$

Bei einer Masse von $m = 90 \text{ kg}$ sind der Zahlenwert $\{m\} = 90$ und die Einheit $[m] = \text{kg}$ in die Größengleichung einzusetzen. Mit der Fallbeschleunigung von $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ist ebenso zu verfahren. Im Internationalen Einheitensystem ergibt sich:

$$F = m \cdot g = 90 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 882,9 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$$

Mit $1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 1 \text{ N}$ ist die Kraft $F = 882,9 \text{ N}$.

Im Technischen Einheitensystem wäre

$$m = \frac{F}{g} = \frac{90 \text{ kp}}{9,81 \text{ m/s}^2} = 9,17 \frac{\text{kp} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

Wird die Kraft $F = 882,9 \text{ N}$ in die Krafteinheit des Technischen Einheitensystems umgerechnet, so ergibt sich mit $1 \text{ kp} = 9,81 \text{ N}$:

$$F = 882,9 \text{ N} = 882,9 \text{ N} \cdot (1/9,81) \cdot \text{kp/N} = 90 \text{ kp}$$

Mathematische Beziehungen zwischen reinen Zahlen werden **Zahlenwertgleichungen** genannt. Sie werden nur in Sonderfällen verwendet, z. B. bei der Umrechnung verschiedener Temperatureinheiten. Die gebräuchlichste Einheit ist Grad Celsius. In den USA ist auch die Einheit degree Fahrenheit in Gebrauch. Die meistverwendete Einheit für wissenschaftliche Zwecke ist das Kelvin.

Die Zahlenwerte der unterschiedlichen Einheiten sind durch Zahlenwertgleichungen verknüpft. Die Umrechnung einer Temperaturangabe von Fah-

renheit in Celsius ist in dem folgenden Beispiel gezeigt:

$$\{\vartheta_C\} = 0,5556 \cdot (\{\vartheta_F\} - 32) \quad (1-2)$$

Nach Gleichung (1-2) lässt sich der Zahlenwert der Celsius-Temperatur errechnen. Für die Temperatur nach der Fahrenheit-Skala ist der reine Zahlenwert einzusetzen. Für 140 °F ergibt sich beispielsweise:

$$\{\vartheta_C\} = 0,5556 \cdot (140 - 32) = 60$$

Weitere Temperaturumrechnungsformeln sind in Tabelle 1.5 zusammengestellt.

Tabelle 1.5 Temperaturumrechnungsformeln häufig verwendete Einheiten wie Grad Celsius (°C), Grad Fahrenheit (°F), Kelvin (K), Grad Rankine (°Ra) und Grad Réaumur (°Re)

Umrechnungsformeln	
$\{\vartheta_C\} = 0,5556 \cdot (\{\vartheta_F\} - 32)$ $\{\vartheta_F\} = (1,80 \cdot \{\vartheta_C\}) + 32$	Grad Celsius ↔ Grad Fahrenheit
$\{\vartheta_C\} = \{T\} - 273,15$ $\{T\} = \{\vartheta_C\} + 273,15$	Grad Celsius ↔ Kelvin
$\{\vartheta_C\} = 0,5556 \cdot (\{\vartheta_{Ra}\} - 491,67)$ $\{\vartheta_{Ra}\} = (1,80 \cdot \{\vartheta_C\}) + 491,67$	Grad Celsius ↔ Grad Rankine
$\{\vartheta_C\} = 1,25 \cdot \{\vartheta_{Re}\}$ $\{\vartheta_{Re}\} = 0,80 \cdot \{\vartheta_C\}$	Grad Celsius ↔ Grad Réaumur

Neben diesen wichtigsten Temperaturskalen gibt es noch eine Reihe veralteter Skalen, wie die nach DELISLE, NEWTON oder RØMER.

1.3 Zustandsgrößen und Prozessgrößen

Eine **Zustandsgröße (Zustandsvariable)** ist eine physikalische Größe oder ein Parameter in einer Zustandsgleichung, die nur vom aktuellen Zustand eines betrachteten Systems abhängt. Der Weg, auf dem dieser Zustand erreicht wurde, ist daher nicht von Interesse. Eine Zustandsgröße beschreibt nur eine Eigenschaft des Systems in diesem Zustand.

Temperatur, Druck, Masse, Dichte, Energie und Entropie sind Beispiele von Zustandsgrößen.

In der Thermodynamik wird ein System eindeutig beschrieben, beispielsweise durch Angabe der Zustandsgrößen Druck p , Temperatur T , Volumen V , Stoffmenge n bzw. Masse m , Enthalpie H und Entropie S . Diese Zustandsgrößen bleiben konstant, wenn sich das System im thermodynamischen Gleichgewicht befindet.

Physikalische Größen, die den Zustand eines thermodynamischen Systems beschreiben, werden thermodynamische Zustandsgrößen genannt. Es wird unterschieden:

Thermische Zustandsgrößen: Temperatur T , Volumen V und Druck p .

Kalorische Zustandsgrößen: Innere Energie U , Enthalpie H , Entropie S und weitere.

Spezifische Zustandsgrößen: Physikalische Größen, die in der Regel auf die Masse eines Stoffes oder Körpers oder auf Raumdimensionen eines Systems (Volumen, Flächeninhalt, Länge) bezogen sind. Nach DIN-Norm ist der Begriff spezifisch jedoch nur für den Massenbezug reserviert. Spezifische Größen werden mit Kleinbuchstaben bezeichnet (Ausnahmen: Masse m und Stoffmenge n). Beispiel: Spezifisches Volumen $v = V/m$.

Molare Zustandsgrößen: Auf die Stoffmenge n (Substanzmenge, Molmenge) bezogene Zustandsgrößen, auch stoffmengenbezogene Zustandsgrößen genannt. Sie werden durch den Index m gekennzeichnet. Beispiel: Molares Volumen $V_m = V/n$.

Extensive Zustandsgrößen: Physikalische Größen, die zur Teilchenzahl proportional sind. Der Wert einer solchen Zustandsgröße ändert sich mit der Größe des betrachteten Systems. Beispiele sind Masse m , Stoffmenge n , Volumen V , Enthalpie H und Entropie S . Das Pendant der extensiven Größe ist die intensive Größe.

Intensive Zustandsgrößen: Physikalische Größen, die sich bei unterschiedlicher Größe des betrachteten Systems nicht ändern. Es werden **systemeigene intensive Größen** wie beispielsweise Temperatur T und Druck p und **stoffeigene intensive Größen** wie alle spezifischen und molaren Größen unterschieden.

Es ist natürlich auch möglich, extensive in intensive Größen umzuwandeln, indem diese auf eine

Exkurs 1.2 Beispiele von wegunabhängigen Zustandsgrößen

Das Volumen einer definierten Gasmenge Luft wird durch Änderung des Druckes und der Temperatur von einem bestimmten Anfangswert V_A zu einem bestimmten Endwert V_E gebracht. Experimentell lässt sich feststellen, dass die Reihenfolge, in der die Druck- und Temperaturänderung vorgenommen wurde, keinen Einfluss auf die Volumenänderung ΔV hat. Die Änderung des Volumens ist immer gleich groß und unabhängig vom Weg.

Ein Bergsteiger hat auf einem Berggipfel eine bestimmte, von der Höhe des Berges abhängige potenzielle Energie. Es ist gleichgültig, auf welchem Weg der Bergsteiger den Gipfel erreicht hat. Die Arbeit hingegen, die der Bergsteiger aufzuwenden hat, um auf den Gipfel zu gelangen (Energie), hängt natürlich vom zurückgelegten Weg ab.

bestimmte Masse (spezifische Größe) oder auf eine bestimmte Stoffmenge (molare Größe) bezogen werden. Das Volumen ist daher eine extensive Größe, während das molare Volumen im Unterschied hierzu eine intensive Größe darstellt.

Im Unterschied zu Zustandsgrößen beschreiben **Prozessgrößen** einen Prozessschritt zwischen zwei Zuständen. Sie stellen keine Eigenschaften des Systems dar, sondern beschreiben einen Austauschprozess zwischen zwei Systemen oder zwischen einem System mit seiner Umgebung. Prozessgrößen sind **wegabhängig**, also abhängig davon, wie der Prozess geführt wird.

1.4 Zustandsfunktionen

Zustandsgleichungen stellen einen funktionalen Zusammenhang zwischen thermodynamischen Zustandsgrößen her, mit deren Hilfe sich der Zustand eines thermodynamischen Systems beschreiben lässt. Eine der Zustandsgrößen wird als **Zustandsfunktion** gewählt und die anderen von ihr abhängigen Zustandsgrößen als **Zustandsvariablen**. Mit Zustandsgleichungen lassen sich Eigenschaften von Gasen, Flüssigkeiten, Fluidgemischen und Feststoffen beschreiben.

Die bekanntesten Zustandsgleichungen dienen der Beschreibung von Gasen und Flüssigkeiten. Die wichtigste und zugleich auch einfachste Zustandsgleichung dieser Art ist die **allgemeine Gasgleichung**.

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (1-3)$$

p Druck, V Volumen, n Stoffmenge, T Temperatur, R allgemeine Gaskonstante

Es konnte experimentell gezeigt werden, dass diese Gleichung (1-3) auf viele Gase näherungsweise bei geringen Drücken und hohen Temperaturen anwendbar ist. Bei kleinen spezifischen Volumina und hohen Drücken treten zu große Abweichungen von der durch die thermische Zustandsgleichung des idealen Gases gegebene Gesetzmäßigkeit auf. Diese können dann nicht mehr vernachlässigt werden.

Eine Möglichkeit zur Berücksichtigung der Abweichungen besteht darin, die thermische Zustandsgleichung des idealen Gases durch einen Realgasfaktor Z zu korrigieren:

$$p \cdot V = Z \cdot n \cdot R \cdot T \quad (1-4)$$

p Druck, V Volumen, Z Realgasfaktor, n Stoffmenge, T Temperatur, R allgemeine Gaskonstante

Für ideale Gase ist $Z = 1$, für reale Gase werden **Virialkoeffizienten** (Kräfte zwischen den Molekülen) angehängt, die experimentell, in manchen Fällen auch rechnerisch, zu ermitteln sind:

$$Z = \frac{p \cdot V}{n \cdot R \cdot T} = 1 + \frac{B(T)}{V_m} + \frac{C(T)}{V_m^2} + \frac{D(T)}{V_m^3} \quad (1-5)$$

Der Realgasfaktor ist vom physikalischen Zustand abhängig. $B(T)$, $C(T)$, $D(T)$ usw. sind die Virialkoeffizienten. In Bild 1.1 ist die Abhängigkeit des Realgasfaktors Z für trockene Luft vom Druck p und der Temperatur T gezeigt.

Der holländische Physiker **VAN DER WAALS** entwickelte eine historisch interessante Gleichung, welche die Kräfte zwischen den Molekülen als Ursache für die Abweichung berücksichtigte. Die Zustandsgleichung enthält außer den bekannten Größen zwei Parameter a und b , die man experimentell für ein gegebenes Gas bestimmen muss. Parameter a ist ein Maß für die Stärke des anziehenden Teils des **intermolekularen Potentials**, und b ist ein Maß für das **Mindestvolumen**, das die Moleküle in Anspruch nehmen können.

Zustandsgleichungen realer Gase werden am besten als empirische Gleichungen angesehen, de-

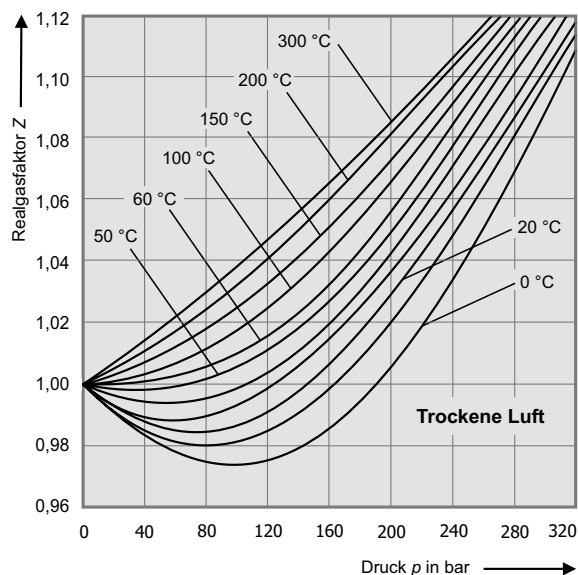


Bild 1.1 Realgasfaktor Z für trockene Luft

ren Funktionsform gewählt wurde, um experimentell gefundene p - V - T -Daten wiederzugeben.

$$p = \frac{n \cdot R \cdot T}{V - n \cdot b} - \frac{n^2 \cdot a}{V^2} \quad (1-6)$$

p Druck, n Stoffmenge, R allgemeine Gaskonstante, T Temperatur, V Volumen, a Stoffkonstante, b Stoffkonstante

Die VAN-DER-WAALS-Zustandsgleichung basiert zwar auf nicht sehr genauen Korrekturkonstanten, ist aber die am häufigsten verwendete Gleichung. Eine weitere nützliche Zustandsgleichung ist die REDLICH-KWONG-Zustandsgleichung:

$$p = \frac{n \cdot R \cdot T}{V - n \cdot b} - \frac{n^2 \cdot a}{\sqrt{T} \cdot V \cdot (V + n \cdot b)} \quad (1-7)$$

p Druck, n Stoffmenge, R allgemeine Gaskonstante, T Temperatur, V Volumen, a Stoffkonstante, b Stoffkonstante

Obwohl in beiden Gleichungen dieselben Symbole für die Korrekturkonstanten a und b verwendet werden, haben sie für ein gegebenes Gas unterschiedliche Werte.

1.5 Gehalts- und Konzentrationsangaben

Eine Mischphase ist eine Phase, die aus mehreren Stoffen, den Komponenten, besteht. Sie kann gasförmig, flüssig oder fest sein. Gasförmige Mischphasen werden auch **Gasgemische** genannt, flüssige Mischungen auch **Lösungen** und feste Mischphasen auch **Mischkristalle** oder feste Lösungen. Gemenge sind im Unterschied zu Gemischen keine Mischphasen, sondern heterogene Mehrphasensysteme.

Ein **ideales Gemisch** liegt vor, wenn sich bei isothermer ($T = \text{konst.}$) und isobarer ($p = \text{konst.}$) Reaktionsführung bei der Gemischbildung das Volumen, die innere Energie, die Enthalpie und die Wärmekapazität als Summe der jeweiligen Einzelstoffe ergeben. Viele Fluide (Gase und Flüssigkeiten) lassen sich so betrachten. Bei **realen Gemischen** stellen sich dagegen Mischungseffekte ein, d. h., das Volumen der Mischung ist nicht unbedingt gleich der Summe der Volumina der beiden Reinstoffe vor der Mischung. Mischt man beispielsweise 1,0 Liter Wasser mit 1,0 Liter Ethanol, so ist das Volumen des Gemisches mit ca. 1,9 Liter kleiner als die Summe der Einzelvolumina (**negatives Exzessvolumen, Volumenkontraktion**). Auch der umgekehrte Effekt ist bekannt und wird als **positives Exzessvolumen (Volumendilatation)** bezeichnet.

Hat ein Gemisch an allen Stellen die gleichen Eigenschaften, so wird es **homogen** genannt, es bildet eine Phase. Ist die Mischbarkeit jedoch begrenzt, so bilden sich mehrere Phasen wie z. B. Öl/Wasser- oder Wasser/Luft-Systeme (**heterogene Gemische**). Bei Flüssigkeiten ist von einer Lösung die Rede, wenn druck- und temperaturabhängig in Wasser nur wenig Öl oder in Öl nur wenig Wasser löslich ist.

Zur Beschreibung einer homogenen Mischphase lässt sich für jeden einzelnen Stoff i eine der folgenden Größen verwenden: die Masse m_i , das Volumen V_i oder die Stoffmenge n_i . V_i ist das Volumen, das der Stoff i allein bei gegebener Temperatur und Druck und vorliegendem Aggregatzustand einnehmen würde.

Im Internationalen Einheitensystem ist die **Stoffmenge** eine Basisgröße, deren Basiseinheit das Mol

ist (vgl. Abschn. 1.1). Die Stoffmenge von 1 mol eines Stoffes besteht aus ebenso vielen Einzelteilchen (Atome, Moleküle oder Ionen), wie Atome in $12 \cdot 10^{-3}$ kg des Kohlenstoffnuklids ^{12}C enthalten sind. Bei der Verwendung der Basisgröße Stoffmenge müssen daher die einzelnen Teilchen des Systems genau spezifiziert sein. Es darf nicht heißen 1 mol Sauerstoff, sondern es muss zum Ausdruck gebracht werden, ob es sich um Sauerstoffatome (O), Sauerstoffmoleküle (O_2) oder Ozon (O_3) handelt. Es muss daher geschrieben werden: 1 mol O $\hat{=}$ 16 g, 1 mol O_2 $\hat{=}$ 32 g bzw. 1 mol O_3 $\hat{=}$ 48 g.

Eine Mischphase wird durch die Materiemenge (Masse, Stoffmenge oder Molvolumen) jeder Komponente beschrieben. Von Interesse ist im Allgemeinen nur der intensive, d. h. von der Größe des Systems unabhängige Zustand. Bei den Einzelmengen wird auf eine extensive Zustandsgröße bezogen, d. h. eine zur Materiemenge proportionale Größe, wie Masse, Stoffmenge oder Molvolumen (vgl. Abschn. 1.3). Die Einzelmengen bestimmen die Zusammensetzung der Mischphase. Zusätzlich werden zwei voneinander unabhängige intensive Zustandsgrößen benötigt, z. B. Druck und Temperatur.

Um die Menge des gelösten Stoffes im Lösungsmittel zu charakterisieren, gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Angabe des Massenanteils w
- Angabe des Stoffmengenanteils x
- Angabe des Volumenanteils φ
- Angabe der Massenkonzentration β
- Angabe der Stoffmengenkonzentration c
- Angabe der Volumenkonzentration σ

Soll die Anteilsgröße angegeben werden, so werden stets Quotienten gleicher Größen wie Masse, Volumen oder Stoffmenge verwendet. Bei der Angabe einer Konzentration wird die Menge des gelösten Stoffes als Masse, Volumen oder Stoffmenge auf das Volumen der Flüssigkeit bezogen. Konzentrationsangaben gelten immer nur für eine gegebene Temperatur.

1.5.1 Massenanteil

Der Massenanteil (Formelzeichen w) einer Komponente an einem Stoffgemisch ist die anteilige Masse dieser Komponente an der Gesamtmasse des Stoffgemisches. Berechnet wird der Massenanteil der Komponente i als Quotient aus der Masse der Komponente m_i und der Summe aller Massen des Stoffgemisches aus k Komponenten.

$$w_i = \frac{m_i}{\sum_{j=1}^k m_j} \quad (1-8)$$

Der Massenanteil einer Komponente des Gemisches liegt zwischen 0 und 1:

$$0 \leq w_i \leq 1 \quad (1-9)$$

Die Massenanteile aller k Bestandteile eines Stoffgemisches addieren sich zu 1.

$$\sum_{i=1}^k w_i = 1 \quad (1-10)$$

Multipliziert man den Massenanteil mit 100%, so kann man ihn auch als prozentuale Größe angeben, also Gewichtsprozent (Gew.-%) bzw. Massenprozent. Dies sollte nach DIN 1 310 jedoch vermieden werden.

1.5.2 Stoffmengenanteil

Der Stoffmengenanteil (Formelzeichen x) einer Komponente an einem Stoffgemisch ist die relative Anzahl der Teilchen (Atome, Moleküle, Ionen) dieser Komponente an der Gesamtteilchenzahl des Stoffgemisches. Im Unterschied dazu beschreibt das **Stoffmengenverhältnis** die relative Anzahl an Teilchen der Komponenten zueinander.

Berechnet wird der Stoffmengenanteil der Komponente i als Quotient aus der Stoffmenge der Komponente n_i und der Summe aller Stoffmengen des Stoffgemisches aus k Komponenten.

$$x_i = \frac{n_i}{\sum_{j=1}^k n_j} \quad (1-11)$$

Der Stoffmengenanteil einer Komponente des Gemisches liegt zwischen 0 und 1:

$$0 \leq x_i \leq 1 \quad (1-12)$$

Die Stoffmengenanteile aller k Bestandteile eines Stoffgemisches addieren sich zu 1.

$$\sum_{i=1}^k x_i = 1 \quad (1-13)$$

Multipliziert man den Stoffmengenanteil mit 100 %, so kann man ihn als prozentuale Größe angeben, also Stoffmengenprozent oder Molprozent (Mol-%).

1.5.3 Volumenanteil

Der Volumenanteil (Formelzeichen φ) einer Komponente an einem Stoffgemisch ist das anteilige Volumen dieser Komponente an der Summe der Volumina aller Komponenten des Stoffgemisches. Berechnet wird der Volumenanteil der Komponente i als Quotient aus dem Volumen der Komponente V_i und der Summe aller Volumina des Stoffgemisches aus k Komponenten.

$$\varphi_i = \frac{V_i}{\sum_{j=1}^k V_j} \quad (1-14)$$

Der Volumenanteil einer Komponente des Gemisches liegt zwischen 0 und 1:

$$0 \leq \varphi_i \leq 1 \quad (1-15)$$

Die Volumenanteile aller k Bestandteile eines Stoffgemisches addieren sich zu 1.

$$\sum_{i=1}^k \varphi_i = 1 \quad (1-16)$$

Multipliziert man den Volumenanteil mit 100 %, so kann man ihn auch als prozentuale Größe angeben, also Volumenprozent (Vol-%). Bei der Zusammensetzung von Gasen oder bei der Festlegung von Explosionsgrenzen ist diese Angabe üblich.

1.5.4 Massenkonzentration

Die Massenkonzentration (Formelzeichen β) ist eine Gehaltsangabe, bei der die Masse m_i eines Stoffes i auf das Volumen V eines Stoffgemisches oder einer Lösung bezogen angegeben wird.

$$\beta_i = \frac{m_i}{V} \quad (1-17)$$

Die SI-Einheit lautet $[\beta] = \text{kg/m}^3$. Bei Arbeiten im Labor wird meistens die Einheit g/l verwendet.

1.5.5 Stoffmengenkonzentration

Die Stoffmengenkonzentration (Formelzeichen c) ist eine Gehaltsangabe, bei der die Stoffmenge n_i eines Stoffes i , bezogen auf das Volumen V eines Stoffgemisches oder einer Lösung, angegeben wird.

$$c_i = \frac{n_i}{V} \quad (1-18)$$

Die SI-Einheit lautet $[c] = \text{mol/m}^3$. Bei Arbeiten im Laboratorium wird meistens die Einheit mol/l verwendet.

1.5.6 Volumenkonzentration

Die Volumenkonzentration (Formelzeichen σ) ist eine Gehaltsangabe für Mischphasen, insbesondere von Lösungen, bei der das Volumen V_i eines Stoffes i , bezogen auf das Gesamtvolumen V eines Stoffgemisches oder einer Lösung, angegeben wird.

$$\sigma_i = \frac{V_i}{V} \quad (1-19)$$

Die SI-Einheit lautet $[\sigma] = \text{m}^3/\text{m}^3$. Bei Arbeiten im Laboratorium wird meistens die Einheit l/l verwendet. Die Volumenkonzentration unterscheidet sich von der Gehaltsangabe Volumenanteil, da bei der Volumenkonzentration eine mögliche Volumenkontraktion mit berücksichtigt ist.

1.5.7 Molalität

Die Molalität (Formelzeichen b) ist der Quotient aus der Stoffmenge n_i des gelösten Stoffes i und der Masse m_{Lsgm} des Lösungsmittels.

$$b = \frac{n_i}{m_{\text{Lsgm}}} \quad (1-20)$$

Die SI-Einheit lautet $[b] = \text{mol/kg}$.

1.5.8 Aktivität

Aufgrund interionischer Wechselwirkungen in konzentrierten Lösungen ist die **wirksame Konzentration** oder Aktivität der Lösung kleiner als die tatsächliche Konzentration. Die Abweichungen sind umso größer, je höher die Konzentrationen der Stoffe sind.

$$a = f \cdot \frac{c}{c^\circ} \quad (1-21)$$

a Aktivität, f Aktivitätskoeffizient, c Stoffmengenkonzentration, c° Standard-Stoffmengenkonzentration (1 mol/l)

1.6 Umrechnungen und Mischungsrechnung

Im Laboratorium werden mitunter Lösungen hergestellt, indem zwei Lösungen unterschiedlichen Massenanteils zu einer neuen Lösung vermischt werden. Manchmal wird auch eine Lösung hergestellt, indem eine höherkonzentrierte Lösung mit Lösungsmittel (z. B. Wasser) verdünnt wird. Die Mengen bzw. die Massenanteile werden mit der **Mischungsrechnung** berechnet:

$$m_1 w_1 + m_2 w_2 + \dots = (m_1 + m_2 + \dots) w_{\text{Mischung}} \quad (1-22)$$

m_1 Masse der Lösung 1, m_2 Masse der Lösung 2,
 w_1 Massenanteil der Lösung 1, w_2 Massenanteil der Lösung 2,
 w_{Mischung} Massenanteil der entstandenen Mischung

Benutzt man zum Verdünnen einer Lösung reines Lösungsmittel, so beträgt der Massenanteil des reinen Lösungsmittels $w_2 = 0$.

Beispiel 1.1: Es sollen 2,5 kg Schwefelsäure mit $w(\text{H}_2\text{SO}_4) = 15\%$ aus einer konzentrierten Schwefelsäure ($w = 95\%$) mit Wasser hergestellt werden. Welche Masse an konz. Schwefelsäure und welche Masse an Wasser sind abzuwiegen?

1. Zunächst wird die Mischungsgleichung aufgestellt und werden die Daten der Aufgabe definiert:

$$m_1 \cdot w_1 + m_2 \cdot w_2 = (m_1 + m_2) \cdot w_{\text{Mischung}}$$

$$m_1 = \text{Schwefelsäure, } w(\text{H}_2\text{SO}_4) = 95\%$$

$$m_2 = \text{Wasser}$$

Beide Massen ergeben zusammen nach dem Mischen 2 500 g Lösung ($m_1 + m_2 = 2\,500\text{ g}$)

$$m_2 = 2\,500\text{ g} - m_1$$

$$w_1 = 95\%$$

$$w_2 = 0\%$$

$$w_{\text{Mischung}} = 15\%$$

2. Die Daten werden in die Mischungsgleichung eingesetzt:

$$m_1 \cdot 95\% + (2\,500\text{ g} - m_1) \cdot 0\% = 2\,500\text{ g} \cdot 15\%$$

Für m_1 ergibt sich nach Umstellung der Gleichung:

$$m_1 = 395\text{ g Schwefelsäure mit } w = 95\%.$$

3. Die Menge an Wasser kann aus der Gesamtmenge herzustellender Schwefelsäure berechnet werden. Masse der 95%-Schwefelsäure und Masse Wasser ergeben zusammen 2 500 g.

$$m_2 = 2\,500\text{ g} - m_1 = 2\,500\text{ g} - 395\text{ g} = 2\,105\text{ g Wasser}$$

4. Es werden 2 105 g Wasser vorgelegt und langsam darin 395 g Schwefelsäure mit $w = 95\%$ eingerührt. Man erhält 2,5 kg Schwefelsäure mit einer Konzentration von 15%.

In der Praxis muss schnell gerechnet werden. Formt man die Mischungsgleichung (1-22) für zwei Komponenten um, dann erhält man:

$$m_1 w_1 + m_2 w_2 = (m_1 + m_2) w_{\text{Mischung}}$$

$$m_1 w_1 - m_1 w_{\text{Mischung}} = m_2 w_{\text{Mischung}} - m_2 w_2$$

$$m_1 (w_1 - w_{\text{Mischung}}) = m_2 (w_{\text{Mischung}} - w_2)$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{w_{\text{Mischung}} - w_2}{w_1 - w_{\text{Mischung}}} \quad (1-23)$$

Die Differenzen ($w_{\text{Mischung}} - w_2$) zu ($w_1 - w_{\text{Mischung}}$) verhalten sich wie die Massen der beiden Komponenten. Dieses Verhältnis lässt sich in Form eines Kreuzes, dem **Mischungskreuz** (Andreas-Kreuz), darstellen und damit das Massenverhältnis berechnen:

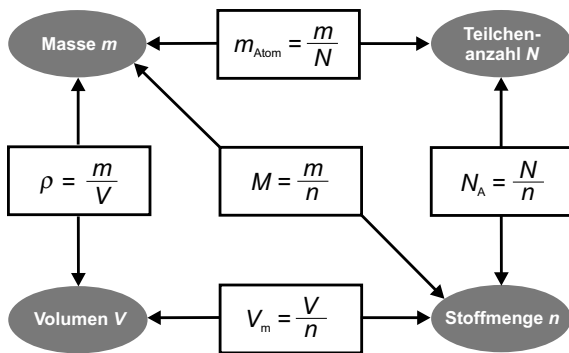
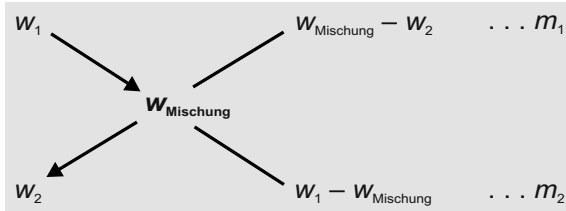


Bild 1.2 Umrechnungsformeln von Masse m in Teilchenanzahl N , Volumen V und Stoffmenge n mit der Dichte ρ und der molaren Masse M

Zur schnellen Umrechnung von Stoff- und Gehaltsgrößen können die Gleichungen in Bild 1.2 genutzt werden.

Beispiel 1.2: Welche Masse an Natriumchloridlösung mit einem Massenanteil von $w(\text{NaCl}) = 18\%$ muss zu 500 g einer Lösung mit einem Massenanteil von $w(\text{NaCl}) = 8\%$ gegeben werden, damit eine Mischung mit $w(\text{NaCl}) = 10\%$ entsteht?

- Zunächst werden die Daten der Aufgabe definiert: $w_1 = 18\%$, $w_2 = 8\%$ und $w_{\text{Mischung}} = 10\%$ und entsprechend dem Mischungskreuz eingesetzt.
- Aus der Differenzbildung ergibt sich:
 $w_{\text{Mischung}} - w_2 = 10\% - 8\% = 2\% \Rightarrow m_1 = 2$
 $w_1 - w_{\text{Mischung}} = 18\% - 10\% = 8\% \Rightarrow m_2 = 8$
 Die beiden Kochsalzlösungen sind daher im Verhältnis 2 zu 8 bzw. 1 zu 4 miteinander zu mischen.

- Da 500 g einer 8%-NaCl-Lösung mit einer 18%-NaCl-Lösung gemischt werden sollen, erfolgt der nächste Rechenschritt als Dreisatz:
 4 Teile entsprechen 500 g NaCl ($w = 8\%$)
 1 Teil entspricht x g NaCl ($w = 18\%$)
 $x = 1/4 \cdot 500 \text{ g} = 125 \text{ g NaCl}$ ($w = 18\%$)
- Es werden 125 g der 18%-Kochsalzlösung benötigt, um mit 500 g der 8%-Kochsalzlösung eine Mischkonzentration von 10%-NaCl zu erhalten.

Massenanteil in Stoffmengenanteil

$$w_i = \frac{x_i \cdot M_i}{\sum_{i=1}^k x_i \cdot M_i} \quad (1-24)$$

$$x_i = \frac{w_i}{M_i \cdot \sum_{i=1}^k \frac{w_i}{M_i}} \quad (1-25)$$

w_i Massenanteil der Komponente i in %, x_i Stoffmengenanteil der Komponente i in %, M_i molare Masse der Komponente i in g/mol

Massenanteil in Stoffmengenkonzentration

$$w_i = \frac{c_i \cdot M_i}{\rho \cdot 10} \quad (1-26)$$

$$c_i = \frac{\rho \cdot w_i \cdot 10}{M_i} \quad (1-27)$$

w_i Massenanteil der Komponente i in %, c_i Stoffmengenkonzentration der Komponente i in mol/l, ρ Dichte des Lösung in g/ml, M_i molare Masse der Komponente i in g/mol

Massenanteil in Volumenanteil

$$w_i = \frac{\sigma_i \cdot \rho_i}{\rho} \quad (1-28)$$

$$\sigma_i = \frac{w_i \cdot \rho}{\rho_i} \quad (1-29)$$

w_i Massenanteil der Komponente i in %, σ_i Volumenanteil der Komponente i in %, ρ_i Dichte des reinen Stoffes in g/ml, ρ Dichte der Lösung in g/ml

Massenanteil in Massenkonzentration

$$w_i = \frac{\beta_i}{\rho \cdot 10} \quad (1-30)$$

$$\beta_i = 10 \cdot \rho \cdot w_i \quad (1-31)$$

w_i Massenanteil der Komponente i in %, β_i Massenkonzentration in g/l, ρ Dichte des Lösung in g/ml

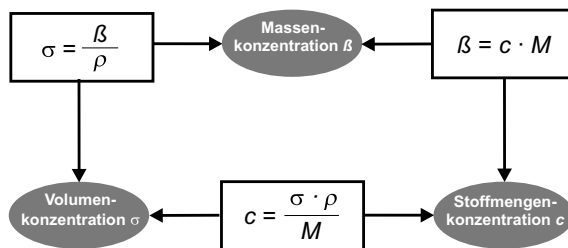


Bild 1.3 Umrechnungsformeln von der Massenkonzentration β in die Stoffmengenkonzentration c und in die Volumenkonzentration σ mit der Dichte ρ und der molaren Masse M

Sachwortverzeichnis

A

- Abgas 359
- Abgeberphase 342
- Abhängigkeit der Reynolds-Zahl und des Widerstandsbeiwerts 214
- Ablaufstrom 317
- Abschätzung der Messunsicherheit 31
- Abscheidegrad 217
- Abscheiden 219
- Absenkung des Druckes 319
- Absetzen 211
- Absetzprozesse 211
- Absorbat 342
- Absorbens 342
- Absorbensverhältnis 347, 351
- Absorpt 342
- Absorption 342
- Absorption von CO₂ 358
- Absorption, physikalische 343
- Absorptionsgeschwindigkeit 370
- Absorptionsgrad 357
- Absorptionskolonne 360
- Absorptiv 342
- Abstoßung zwischen den Molekülen 58
- Abtrennen unerwünschter Komponenten 198
- Abtriebsgerade 325
- Abtriebsteil 323
- Abweichung von Messwerten, grobe 25
- Abweichung von Messwerten, systematische 25
- Abweichungen der Messwerte 25
- Abweichung vom idealen Verhalten 168
- Addition, quadratische 33
- adiabatisch 92
- Adsorbens 132
- Adsorber, diskontinuierlich betriebene 379
- Adsorption 342, 362
- Adsorptionsanlage, (quasi) kontinuierliche 380
- Adsorptionsbetrieb, kontinuierlicher 380
- Adsorptionsisobare 368
- Adsorptionsisothermen 368
- Adsorptionsmittel 364 f.
- Adsorptiv 132
- Agglomerieren 254 ff.
- Aggregatzustände und Phasenlehre 38 ff.
- Aktivierung der C=C-Doppelbindung 139
- Aktivierung der C=O-Bindung 139
- Aktivierung der N-Bindung 139
- Aktivierung durch Initiatorzerfall 126
- Aktivierung von Reaktionen und Katalyse 122 ff.
- Aktivierung von Reaktionsprozessen 123
- Aktivierung, biokatalytische 126
- Aktivierung, fotochemische 128
- Aktivierung, katalytische 124
- Aktivierung, thermische 123
- Aktivierungsenergie 118
- Aktivität 22, 125
- Aktivkohle 365
- amorph 49
- Ampere 15
- Analyse, elektrische 196
- Analyse, optische 196
- Änderung der Anlagenkennlinie 267
- Änderung des Verlaufs der Pumpenkennlinie 267
- Anfertigung einer grafischen Darstellung 35
- Anforderungen, sicherheitstechnische 77
- Angaben zur Wärmedämmung 80
- Anlagenkennlinie 266
- Anlagerung 362
- Anomalie des Wassers 46
- Ansaugen 271
- Anteilsgößen 89
- Antriebsmotor 270
- Anwendungsgebiete 251
- Anzahl der Übertragungseinheiten (NTU) 337
- Anziehung zwischen den Molekülen 58
- Apparate 79 f.
- Äquivalentdurchmesser 185
- Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) 84
- Armaturen 80
- Arrhenius-Gleichung 118
- Arten der Förderung 260
- Aufbauagglomeration (Pelletieren) 255
- Aufbereitung am Ende der Filtration 229
- Aufgabenstellung 80
- aufkonzentriert 288
- Aufnehmerphase 342
- Ausbeute 90
- Ausdehnen 272
- Ausdehnungskoeffizient, linearer 46
- Ausgangsgemisch 306
- Auslaugen 393
- Außenmischung 208
- Austauschzonen (Böden) 321
- Austritt 271
- Auswertung linearer Zusammenhänge, grafische 36
- Auswertung von Messdaten, grafische 34
- autokatalytisch 137
- Avogadro-Konstante 39
- Axialpumpen 263
- azeotrop 307
- Azeotropie 309 f.

B

Backenbrecher 202
Basenkatalyse 138 f.
Basisgrößen 14
Batch-Extraktion 389
Batch-Reaktor 395
Bauarten der Filtrationsmodule 235
Bauarten von Trocknern 301
Bauform eines Wärmeaustauschers 287
Becherwerke 275
Bedeckungsgrad 364
Begasen einer Flüssigkeit 252
Begasung 198, 208
Beispiele für Reaktionen 0. Ordnung 105
Beispiele für Reaktionen 1. Ordnung 106
Beladung 132, 346
Beladung am Gasaustritt 349
Beladung im Gaseintritt 349
Beladung im Waschmitteleintritt 349
Beladungen, geringe 371
Beladungen, hohe 371
Beladungskapazität 365
Beladungskapazität, maximale 367
Beladungsverteilung 376
Beladungswert, tatsächlicher 377
Benennung der Ein- und Ausgangsstoffe 79
Benennung der Stoffe zwischen den Stufen 79
Benetzungsfaktor 354
Beobachtungseinheit 26
Beobachtungsmenge 26
Beobachtungsmerkmale 26
Berechnung 264, 304, 347
Berechnung und Auswertung von Verweilzeitverteilungen 172
Berechnung von Rührkesselkaskaden 163
Berechnungen zur Kristallisation 291
Berechnungsbeispiele 179
Bereich 29
Bereich, kinetischer 131
Bereich, laminarer 248
Bereich, turbulenter 249
Berieselung 198, 204
Berieselung 204
Beschreibung der Messunsicherheit 31

Beständigkeit 365
Bestimmung der HTU-Werte 356
Bestimmung der NTU-Werte 355
Bestimmung der Tropfenmasse (Stalagmometer) 49
Bestimmung von Reaktionsordnungen 109
Bestimmungsmethoden, experimentelle 112
Bestwert 29
BET-Gleichung 373
Betrieb, diskontinuierlicher 147
Betrieb, halbkontinuierlicher 147
Betrieb, kontinuierlicher 147
Betriebsbedingungen, charakteristische 79
Betriebsformen, allgemeine 146
Betriebsformen, wärmetechnische 148
Betriebsführung mit Rückvermischung der Reaktionsmasse kontinuierliche 159
Betriebsführung ohne Rückvermischung der Reaktionsmasse, kontinuierliche 156
Betriebsparameter 209
Betriebspunkt 267
Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) 83
Betriebsweise, kontinuierliche 91
Betriebszeit 152
Betriebszustand, adiabater 148
Betriebszustand, instationärer 159
Betriebszustand, isothermer 148
Betriebszustand, polytoper 148
Beurteilungsgrößen und Definitionen 89
Bewehrung des Rührbehälters 247
Bezeichnung der einzelnen Stufen 79
Bezeichnung und Menge der Energieart 79
Bezugsgröße, unveränderliche 296
Bilanzen 101
Bilanzen an einer Rektifikationskolonne 323
Bilanzgebiet 99
Bilanzierung 347
Bilanzierung von Adsorbieren 375
Bilanzlinie 355
bimolekular 109

Binäre Phasengleichgewichte 55
Bingham-Fluid 71
Binodale 384
Binodalkurve 59
Biokatalysatoren 126
Biokatalysatoren, immobilisierte 127
Bitumen 341
Blasengase 209
Blitzlichtfotolyse 112
Bodenstein-Zahl 180
Boyle-Temperatur 42
Bragg-Gleichung 51
Bravais-Gitter 50
Brechen 198 f.
Bruchvorgang 201
Brunauer-Emmet-Teller-Isotherme (BET) 133

C

Candela 15
Charakterisierung von Partikeln und dispersen Systemen 184 ff.
Chemisorption 132, 134, 342 f., 363
Clausius-Clapeyron-Gleichung 54 f.

D

Dampf 282
Dampf, gesättigter 282
Dampf, überhitzter ungesättigter 283
Dampf, überkritischer 283
Dampfbelastung 336
Dampfdruck 78, 280
Dampfdruckerniedrigung 60
Dampfdruckerniedrigung, relative 56
Dampfdruckmaximum 308 f.
Dampfdruckminimum 308, 310
Darstellung, grafische 304
Darstellung von Messreihen 26
Daten der Zentrifuge, konstruktive 222
Daten zu Hauptreaktionen 77
Daten zu Nebenreaktionen 77
Daten zu Phasengleichgewichten 78
Daten zur Toxikologie 77
Daten, sicherheitstechnische 83
Daten, toxikologische 84
Desaktivierung 125
Desorption 342, 345, 361
Desorptionsgeschwindigkeit 370
Destillation 312
Destillation und Rektifikation 302 ff.

- Destillation, absatzweise (einfache) 312
 Destillation, einfache 312
 Destillation, einfache diskontinuierliche 312
 Destillation, fraktionierte 312, 316
 Destillation, kontinuierliche 317
 Destillationslinien 341
 Destillatstrom 317
 Dichte 45, 78
 Dichte und Volumenausdehnung 45
 Dichtstromförderung 277
 Differenzialgleichungen 104
 Differenzialmethode 110, 195
 Differenzielle Verweilzeitverteilung 180
 Diffusion, äußere 131
 Diffusion, innere 131
 Diffusion, molekulare 131
 Diffusionsgebiet, äußeres 131
 Diffusionsgebiet, inneres 131
 Diffusionsvorgänge 364
 Diffusor (große Ventilatoren) 270
 Dilatanz 71
 diskontinuierlich 89
 Dispergieren von Flüssigkeiten 252
 Dispersionsmittel 184
 Dispersionsmodell 175
 Dispersionszustand 184
 Dosierbarkeit 198
 Dosis 84
 Drehkolbenverdichter 273
 Dreiecksdiagramme 341
 Dreieckskoordinatensysteme 59
 Dreikomponentengemische 341
 Dreiphasenreaktionen 133
 Druck, hydrostatischer 48
 Druck, konstanter 231
 Druck, messbarer 67
 Druck, osmotischer 62
 Druck und Osmose 62
 Dreistoffdiagramm 386
 Druckabfall, konstanter 231
 Druckdifferenz 230, 264
 Druckförderanlagen 276
 Druckstufe 80
 Druck-Temperatur-Phasendiagramm 52
 Druckverhältnisse 228
 Druckverlust in Formstücken und Armaturen 75
 Druckverlust in Rohrleitungen 73
 Dual-Flow-Böden 321
 Dünnstromförderung 276
 Durchbruchkurve (DBK) 376
 Durchflüsse 80
 Durchflüsse und Mengen der Energien 79
 Durchflüsse und Mengen der Stoffe 79
 Durchgang 188
 Durchmesser, mittlerer 186
 Durchmesser, mittlerer arithmetischer 206
 Durchmischungskennzahl 249
 Durchregnen 322
 Durchströmungseigenschaften, verbesserte 254
- E**
- Ebene Wände 284
 Edukte 77, 88
 Effekt, katalytischer 140
 Eigenschaften der Suspension 229
 Eigenschaften des Filtermittels 229
 Eigenschaften von Gemischen 83
 Eigenschaften, kolligative 60
 Eindampfen 288
 Einfluss des Rücklaufverhältnisses 331
 Einführung und Grundbegriffe 88
 Einheit 14
 Einheitensystem, Internationales 14
 Einlaufdüse 270
 einphasig 128
 Einstoffdüse 205
 Einteilung der Agglomeration 255
 Einzelproblemstellungen im Labor und Technikum 76
 Einzelumsatz 162
 Elektronenbeugung 52
 Elementarreaktion 109
 Elementarzelle 49
 endergonisch 95
 endotherm 93
 Energie, innere 93
 Energie, kinetische 93
 Energie, potenzielle 93
 Energieart 79
 Energieinhalt 117
 Energiemaximum 121
 Energieträger 79
 Enthalpie 93
 Enthalpie, freie 95
 Entmischung 240
 Entmischung, vollständige 239
 Entropie 95
 Enzym-Substrat-Komplex 141
 Erfassung der Messwertabweichung 29
 Erhaltung der Masse 100
 Erhaltungssatz der Energie 101
 Erhaltungssatz der Masse 100
 Erhöhung des Siedepunktes 61
 Ermittlung der kinetischen Daten 115
 Erster Hauptsatz 92
 Erwartungswert 30
 Ethanol 304
 Exergie 95
 exergonisch 95
 exotherm 93
 Explosionsgrenzen 83
 Extinktionsmessung 196
 Extraktion 381
 Extraktion, absatzweise 389
 Extraktion im Gegenstrom, kontinuierliche 391
 Extraktion im Kreuzstrom, kontinuierliche 390
 Extraktionsgrad 383
 Extraktionsgut 393
 Extraktionsmittel 381
 Extraktionsrückstand 393
 Extraktlösung 381
 Extraktphase 381
 Extrakt(stoff) 381
 Extrusion 258
 Exzessvolumen (Volumendilatation), positives 19
 Exzessvolumen (Volumenkontraktion), negatives 19
- F**
- Feed 306, 323
 Fehler 25
 Fehlerabschätzung 33
 Fehlerarten 25
 Fehlerfortpflanzung 32
 Fehlerfortpflanzung, GAUSSsche 33
 Fehlerfortpflanzung, lineare 33
 Feingutkegel 201
 Feinheitsmerkmale 186
 Feldstörung 197

Fest-Flüssig-Extraktion 393
Festkörper, idealer 49
Feststoff 198
Feststoffbilanz 216
Feststoff-Feststoff 211
Feststoff-Flüssigkeit 211
Feststoff-Gas 211
Feststoffförderung 274
Feststoffmischung, pneumatische 241
Feuchte, absolute 41
Feuchte, relative 41, 296
Feuchtebelastung 296
Feuchtegrad 41
Filmdiffusion 129
Filterkuchen 229
Filtermittel 228
Filtermittel, primäres 229
Filtermittel, sekundäres 229
Filtern 228
Filterstützen 229
Filtrat 229
Filtrationsprozesse 228
Filtrationsvorgang 229
Filtrieren 211, 228
Flammpunkt 83
Fliehkraftsichter 196
Fließgleichgewicht 142
Fließrichtung 79
Fließrichtung der Hauptstoffe 79
Fließschemata von Anlagen 78
Fließverhalten, NEWTONSches 71
Fließverhalten, verbessertes 254
Fließweg 79
Flockulanten 227
Flockulation 227
Flotat 228
Flotation 227
Flüchtigkeit, mittlere relative 329
Flüchtigkeit, relative 307
Fluid 364
Fluide, ideale 67
Fluide, inkompressible 65
Fluide, kompressible 65
Fluide, nicht-NEWTONSche 71
Fluide, reale 67
Fluide, überkritische 53
Fluid-Fluid-Reaktion 134
Fluidisieren 241
Fluidität 47
flüssig - dampfförmig 302
Flüssiger Zustand 45

Flüssig-Flüssig-Extraktion 381
Flüssigkeit 198
Flüssigkeit-Flüssigkeit 211
Flüssigkeitsbelastung 336
Flüssigkeitsreaktionen, einphasige 138
Flüssigkeitsseite 356
Flüssigkeitszerteilung 198, 204
Flutgrenze 337
Flutpunkt 337
Folgereaktionen 116
Förderbänder 274
Förderhöhe 264
Fördermittel 260
Förderstrom 264
Förderung mit Pumpen 261
Förderung, pneumatische 275
Förderwege 260
Formfaktor 186
Fouling 234
Fraktionen 316
Freifallmischer 241
Freiheitsgrade 52
Freundlich-Gleichung 372
Füllen der Lücken 257
Füllkörperkolonnen 336

G

Gas, absorbierendes 345
Gas, ideales 38
Gasbelastungsfaktor 378
Gase, reale 42
Gas-Flüssigkeit 211
Gasgemische 19, 40
Gasgleichung, allgemeine 18, 39
Gasmenge, reinigende 349
Gasphase 356
Gasreaktionen, endotherme 137
Gasreaktionen, exotherme 137
Gas-Stripping 360
Gasverteilung 198
Gasvolumina 41
GAUSSSche Normalverteilungsfunktion 191
Gebiet, kinetisches 132
Gefrierpunkt abgesenkter 61
Gefrierpunktserniedrigung 61
Gefriertrocknung 301
Gegenstrom 149
Gegenstromdestillation 321
Gegenstromprinzip 284
Gegenstromsichter 196
Gehalts- und Konzentrationsangaben 19
Gemisch, ideales 19, 302
Gemisch, reales 308
Gemische, binäre 302
Gemische, einphasige 56
Gemische, heterogene 19
Gemische, homogene 38
Gemische, reale 19
Gemische, zweiphasige 58
Gerade 349
Geradenfunktion 105
Geradrohrwärmeaustauscher 287
Gesamtbilanz 215, 323
Gesamtumsatz 162
Gesamtverfahren 77
Gesamtwiderstand beider Diffusionsschichten 355
gesättigt 290
Geschwindigkeit 212
Geschwindigkeitsgesetz 103
Geschwindigkeitskonstante 117
Geschwindigkeitsunterschiede 265
Gesetz der abgewandten Hebelarme 306
Gesetz von BOYLE-MARIOTTE 38
Gesetz von der Erhaltung der Energie 92
Gesetz von GAY-LUSSAC 39
Gesetze der Reaktionskinetik 103
Gestaltung und stoffliche Bilanzierung 162
Gibbs-Helmholtz 95
Gittergerade 49
Gleichgewicht, chemisches 95f.
Gleichgewichtsbelastung, maximal mögliche 377
Gleichgewichtsdiagramm 306
Gleichgewichtskoeffizienten 307
Gleichgewichtslinie 355
Gleichgewichtslinie, lineare 356
Gleichgewichtslinie, linearer Verlauf 352
Gleichgewichtsreaktionen 114
Gleichstrom 147, 149
Gleichstromprinzip 352
Gleichstromverfahren 289
Gleichung, lineare 370
Gleichung von BERNOULLI 67
Gleichung von TORRICELLI 69

- Gliederbandförderer 274
 Glockenboden 322
 Granulierkonus 256
 Granulierteller 256
 Granuliertrommel 256
 Grenzflächenenergie, freie 201
 Grenzflächenenergie, spezifische freie 201
 Grenzflächenreaktionen 135
 Größen 14
 Größen und Einheitensysteme, physikalische 14 ff.
 Größen und Größenarten 14
 Größen- und Zahlenwertgleichungen 16
 Größen, abgeleitete 15
 Größen, kennzeichnende 80
 Größen, sonstige 78
 Größen, stoffeigene intensive 17
 Größen, systemeigene intensive 17
 Größenarten 14
 Größengleichungen 16
 Grundbegriffe, produktionstechnische 76 ff.
 Grundbegriffe, strömungstechnische 65 ff.
 Grundfließschema 78 f.
 Grundinformation 79 f.
 Grundlagen der Reaktionstechnik 88 ff.
 Grundlagen, statistische 25 ff.
 Grundlagen, verfahrenstechnische 13 ff.
 Grundtypen chemischer Reaktoren 150
 Gurt-, Gliederbandförderer und Becherwerke 274
 Gütegrad, isentroper 269
- H**
 Haftflüssigkeit 295
 Haftkräfte 255
 HAGEN-POISEUILLESches Gesetz 73
 halbkontinuierlich 89
 Halbwertszeit von Reaktionen 1. Ordnung 106
 Halbwertszeit von Reaktionen 2. Ordnung (Typ I) 107
 Halbwertszeit von Reaktionen 2. Ordnung (Typ II) 108
 Halbwertszeit von Reaktionen 3. Ordnung 109
- Halbwertszeitmethode 111
 Handling, einfaches 365
 Häufigkeit, absolute 27
 Häufigkeit, relative 27
 Häufigkeitsverteilungen einer Stichprobe 26
 Hauptfließlinien 79
 Hauptprodukt 115
 Hauptsätze der Thermodynamik 93
 Heißdampf 283
 Heizleistung 317, 334
 Hemmung, kompetitive 144
 Hemmung, nichtkompetitive 144 f.
 Hemmung, unkompetitive 144 f.
 HENRYsches Gesetz 343
 heterogen 128
 Heterogenkatalyse 140
 HETP-Wert 337 f.
 Hilfsstoffe 77
 Histogramm 27
 Hochdruck-Extraktion 395
 Höhe einer Übertragungseinheit (HTU) 337
 Höhe eines Adsorberbetts 377
 Höhe, geodätische 264
 Höhenkriterium 252
 homogen 19, 128
 Homogenkatalyse 140
 HTU-Wert (height of transfer unit) 355
 Hydrolasen 141
 hypertonisch 62
 hypotonisch 62
 Hysterese 369
- I**
 Idealreaktor 175
 Impulsmethode 171
 Inertheit 365
 Inhibitoren 143
 Inkompressibilität von Flüssigkeiten 44
 Innenmischung 208
 Instrumentenfließschema 78, 80
 Integralmethode 195
 Integrationsmethode 111
 International Union of Biochemistry and Molecular Biology (IUBMB) 141
 Interpretation der Ergebnisse 180
 Ionen 126
 irreversibel 94, 113
 isenthalp 92
- isentrop 92
 isobar 39, 92
 isochor 92
 Isolationsmethode 110
 Isomerasen 141
 isotherm 38, 92
 Isothermen, günstig verlaufende 369
 Isothermen, ungünstig verlaufende 369
 isotonisch 62
 isotrop 46
- K**
 Kanalbildung 169
 Kapillarflüssigkeit 295
 Kaskade von kontinuierlich betriebenen idealen Rührreaktoren 173
 Kaskadenmodell 178
 Katalysator 77, 122
 Katalysatoren, multifunktionelle 125
 Katalysatorwirkungsgrad, externer 130
 Katalyse 122
 Katalyse, heterogene 124, 128
 Katalyse, homogene 124, 128, 136
 Kavitation 266
 Kelvin 15
 Kenngrößen einer Verteilung 187
 Kenngrößen eines Absorbers 357
 Kennzahlen, dimensionslose 100
 Kesselzahl 180
 Kinetik chemischer Reaktionen 102 ff.
 Kinetik komplexer Reaktionen 113
 Klärfläche, äquivalente 222
 Klärung 215
 Klasseneinteilung 27
 Klassieren 217
 Klassifizierung chemischer Reaktionen 88
 Klassifizierung von Reaktoren 146
 Knotenlinie 385
 Knudsen-Diffusion 130
 Koagulant 227
 Koagulation 227
 Koeffizienten (Umsatzzahlen), stöchiometrische 90
 Koexistenzkurve 53
 Kolbenblasenströmung 210
 Kolonnen 321
 Kolonnenkopf 324

Kompaktkatalysatoren 125
Komplex, aktivierter 120
Komponente, leichter siedende 304
Komponenten, gasförmige 341
Kompression 258
Kondensationsenthalpie 54
Kondensationskurve 305
Kondensationsprozess 364
Konjugationslinie 387
Konoden 57, 306
Konstante, ebullioskopische 61
Konstante, katalytische 143
Konstante, kryoskopische 62
Konstruktion der Stufen 331
Kontaktstellen 255
Kontaktrocknung 295, 299
kontinuierlich 89
Kontinuitätsgleichung 66f.
Konvektion 99, 283
Konvektionstrocknung 295
Konzentration 84
Konzentration, wirksame 22
Konzentrationsbeiwert 213
Konzentrationsgrößen 89
Konzentrationsunterschied 394
Konzept der Übertragungseinheit 337
Kopf 323
Kopfrücklauf 323
Kopf-Rücklaufverhältnis 323
Körnerkollektive 184
Korngrößenverteilung 198
Korrosionsverhalten der Werkstoffe 77
Kraft, treibende 296
Kreuzstrom 149, 285
Kreuzstromboden 321
Kristallgitter 49
Kristallgitter und Kristallsysteme 49
kristallin 49
Kristallisation 54, 290ff.
Kristallisationsenthalpie 54
Kristallisationsverdampfer (vertikale Bauweise) 294
Kristallisationsstrom 292
Kristallisieren 288
Kristallwasser 291, 295
Kritische Größen eines Gases 43
Kuchenfiltration 229
Kugelmühlen 203
Kühlkristallisation 291
Kühlkristallisation, reine 292
Kurzschlussströmung 169

L

Labyrinthfaktor 130
Lagedruck 67
Lagerbarkeit 198
Länge des ungenutzten Betts 377
Längenausdehnung 46
Langlebigkeit 365
LANGMUIR-Gleichung 370
LANGMUIR-Isotherme für zwei Stoffe 133
Laufrad 270
Laufrad, halbaxiales 263
LC50-Wert 84
LD50-Wert 84
Leichtbenzin 341
Leichtsieder 303, 311
Leistungsbedarf 247
Leitung (konduktive Ströme) 99
Lichtstreuung 196
Ligasen 141
Linearisierung 34
liquid 94
Lockerungsgeschwindigkeit 242
Löschverhalten 148
Löslichkeit 62
Löslichkeit von Gasen 63
Löslichkeit, maximale 63
Lösung, echte 60
Lösung, gesättigte 291
Lösungen 19, 290
Lösungen, kolloide 60
Lösungen, verdünnte 58, 60
Lösungsmittel 290, 381
Lösungsmittelstoffverhältnis 390
Lösungsmittelstrom 383
Lösungsmittelverhältnis 347
Luft, feuchte 296
Lösungsvermittlung 382
Lüfter und Gebläse 268
Lyasen 141

M

Mahlen 198f.
Mahlgrenze 199
Makrokinetik 88, 129
Makroporen 365
Mammutpumpenprinzip 288
Markierungskonzentration am Reaktorausgang 179
Maschinen 79f.
Masse, mittlere molare 40

Massenanteil 20
Massenanteil in Massenkonzentration 24
Massenanteil in Stoffmengenanteil 23
Massenanteil in
Stoffmengenkonzentration 23
Massenanteil in Volumenanteil 23
Massenkonzentration 21
Massenübergangszone 376
Massenwirkungsgesetz 96, 136
McCABE-THIELE-Diagramm 325
Mechanische Verfahrenstechnik 183ff.
Mechanismus 120
Median 31
Median, empirischer 29
Medianwert 190
mehrphasig 128
Menge 79
Mengen von Energie 80
Merkmal, quantitativ-diskretes 28
Merkmal, quantitativ-stetiges 28
Mesoporen 365
Messen einer Partikelgrößenverteilung 195
Messgröße 29
Messgrößen, konzentrationsabhängige 111
Messschema 78, 82
Messtechnik 79
Messung der Verweilzeitverteilungen 171
Messunsicherheit, absolute 25
Messwerte, zufällige Abweichung 26
Meter 15
Methanol 304
Methode der Anfangsgeschwindigkeiten 110
Methode der oberen und unteren Grenze 32
Methoden zur Ermittlung der Festkörperstruktur 51
MICHAELIS-MENTEN-Gleichung 142
Mikrokinetik 88, 129
Mikroporen 365
Mindestvolumen 18
Mischbarkeit, verbesserte 254
Mischen 238ff.
Mischen von Feststoffen 240
Mischen von Fluiden, statisches 243
Mischen von Flüssigkeiten, dynamisches 39

- Mischer mit erhöhter Geschwindigkeit 241
- Mischer mit geringer Geschwindigkeit 241
- Mischgüte 238, 249
- Mischkristalle 19
- Mischstromförderung 276
- Mischung im Molekülmaßstab 169
- Mischung, ideale 56, 58
- Mischungen, nichtideale 57
- Mischungsgerade 386
- Mischungsgleichung 22
- Mischungsgrad 240
- Mischungskreuz 23
- Mischungslücke 310f.
- Mischungslücke, einseitig offene 388
- Mischungslücke, geschlossene 386f.
- Mischungspunkt, krit. 385
- Mischungszustand 184
- Mischzeit 249
- Mitreißen 322
- Mitrotieren der Flüssigkeit 246
- Mittel, arithmetisches 29
- Mitteldestillate (leicht) 341
- Mitteldestillate (schwer) 341
- Modalwert 190
- Modelle, empirische 368
- Mol 15
- Molalität 22, 61
- Molekulardiffusion 130
- Molekularität 109
- Molekularität einer Reaktion 109
- Molekularsiebe 366
- Momente, gewöhnliche 176f.
- Momente, zentrale 176f.
- Monodispersität 184
- monomolekular 109
- MTZ (Mass Transfer Zone) 376
- N**
- Nachleitwerk 270
- Näherungsformel nach RITTINGER 200
- Näherungsgleichung nach BOND 200
- Näherungsgleichung nach KICK 200
- Nanofiltration 234
- Nassdampf 282
- Naturumlauf 288
- Naturzeolithe 367
- Nebenprodukte 77, 115
- Nennweite 80
- NERNSTscher Verteilungssatz 343
- Nichtidealität, globale 169
- Nichtidealität, lokale 169
- Normalverteilung, logarithmische 192
- Normalverteilung nach Gauß 30
- Normvolumen 345
- NTU/HTU-Konzept für die Absorption 353
- NTU-Wert (number of transfer units) 355
- O**
- Oberfläche 186
- Oberfläche, massenspezifische 187
- Oberfläche, volumenspezifische 187
- Oberflächendiffusion 130f.
- Oberflächenerneuerungstheorie (Turbulenztheorie) 353
- Oberflächenerneuerungstheorie von Dankwerts 353
- Oberflächenspannung 48
- Oberflächenzuwachs 198
- Oxidoreduktasen 141
- P**
- Packungen 337
- Packungskolonnen 336
- Parallelbetrieb 289
- Parallelreaktionen 115
- Parallelstromprinzip 284
- Parameter, apparatetechnische 209
- Parameter, stoffliche 209
- Partialdruck 40
- Partialdruck, zunehmender 345
- Partialdrücke, hohe 368
- Partialvolumen 40
- Partikeldurchmesser 185
- Partikeleigenschaften, definierte 254
- Partikelgröße, abgeschiedene 228
- Partikelgröße, häufigste 186
- Partikelgröße, mittlere 186, 190
- Partikelgrößen und Merkmale 185
- Partikelgrößen, charakteristische 186
- Partikelkollektive 184
- Pfropfenströmung 147, 151
- Pfropfenströmung im Rohrreaktor 168
- Phase, disperse 184
- Phase, flüssige 357, 364
- Phase, gasförmige 364
- Phasen, zwei unterschiedliche 311
- Phasendiagramm 52
- Phasendiagramme binärer Systeme 308
- Phasengesetz von GIBBS 52
- Phasengleichgewichte, binäre 55
- Phasengleichgewichte, ternäre 59
- Phasenumwandlung von Reinstoffen 52
- Phasenwechsel 364
- Phase, schwersiedende 395
- Physisorption 132, 342, 363
- POISEUILLE-Strömung 130f.
- Pol 297
- Polydispersität 184
- Porendiffusion 130
- Porenvolumen, relatives 130
- Potenzial, intermolekulares 18
- Potenzverteilung nach GATES-GAUDIN-SCHUMANN 191
- Prallmühle 203
- Pressagglomeration (Formpressen) 257
- Pressen 258
- Prinzip des kleinsten Zwanges 98
- Prinzip von AVOGADRO 39
- Prinzip von LE CHATELIER 97
- Produkte 77, 88
- Produktionsleistung 88
- Projektstudie 76
- Protonenübertragung 139
- Prozesse, Säure-Basen-katalysierte 139
- Prozessführung, kontinuierliche 89
- Prozessgrößen 18, 89
- Prozessweg A 53
- Prozessweg B 54
- Punkt, azeotroper 58, 309
- Punkt, kritischer 43, 53
- Q**
- Quellflüssigkeit 295
- Querstromfiltration 229, 233
- R**
- Radialpumpen 263
- Radialventilatoren 270
- Radikale 126
- Raffinat(lösung) 381
- Raffinatphase 381
- RAOULTsches Gesetz 56, 302
- Raumgruppen 50
- RAYLEIGH-Gleichung 313

- Reaktion, chemische 77, 129
Reaktionen dritter Ordnung 108
Reaktionen erster Ordnung 105
Reaktionen nullter Ordnung 105
Reaktionen zweiter Ordnung 107
Reaktionen, augenblickliche 135
Reaktionen, enzymkatalytische 140
Reaktionen, fotochemische 128
Reaktionen, heterogene 103
Reaktionen, homogene 103
Reaktionen, katalysierte 138
Reaktionen, langsame 134
Reaktionen, schnelle 135
Reaktionen, unkatalysierte 138
Reaktionsablauf 135
Reaktionsbedingungen, optimale 77
Reaktionsenthalpie 93
Reaktionsführung, adiabate 152
Reaktionsgeschwindigkeit 102
Reaktionsgeschwindigkeitskonstante 104
Reaktionsmechanismus 140
Reaktionsordnung 104, 109
Reaktionsphase 89
Reaktionsrichtung 95
Reaktionsspezifität 141
Reaktionssysteme, einphasige 137
Reaktionstechnik, chemische 87 ff.
Reaktionstyp 89
Reaktionszeit 152
Reaktor, beidseitig geschlossener 177
Reaktor, beidseitig offener 177
Reaktoren, ideale 146 ff.
Reaktoren mit realem Verhalten 175
Reaktoren, vergleichende Betrachtung 165
Reaktortyp 89
Reale Reaktoren und Verweilzeitverteilungen 168 ff.
Regel von HIRSCHFELDER, empirische 119
Regelschema 78, 82
Regeltechnik 79
Regel von TROUTON 55
Regeneratoren 287, 360
Regiospezifität 127
Reibungsverluste 264
Reinstoffgrößen 83
Rektifikation 319 f.
Rektifikationsverfahren 338
Rekuperatoren 287
Relaxationsmethoden 113
Resublimationsenthalpie 54
reversibel 94, 113
Reversible Hemmung von Enzymen 143
Rheopexie 71
Rohrbündelwärmeaustauscher 287
Rohre, glatte 74
Rohre, raue 74
Rohrleitungen 80
Rohrleitungsfließschema 78, 80
Rohrreaktor, kontinuierlicher 166
Rohrreaktor, laminar durchströmter 174
Rohrreibungszahl 73
Rohrströmung mit Reibung 72
Rohrwände 284
Rollagglomeration 256
Röntgenstrahlbeugung 51
Röntgenstrukturanalyse 51
Roots-Gebläse (Drehkolbengebläse) 271
RRSB-Verteilung 192
R-Sätze 83
Rücklaufverhältnis 326
Rücklaufverhältnis, minimales 329
Rücklaufverhältnis, unendliches 328
Rückstand 188
Rückvermischung, partielle axiale 169
Rühren von nicht-Newtonschen Flüssigkeiten 250
Rührer, axial wirkende 245
Rührer, radial wirkende 245
Rührer, tangential wirkende 245
Rührkessel, adiabats betriebener 154
Rührkessel, diskontinuierlich betriebener 152
Rührkessel, diskontinuierlicher 166
Rührkessel, isotherm betriebener 153
Rührkessel, kontinuierlich betriebener 159
Rührkessel, kontinuierlicher 166
Rührkessel, polytrop betriebener 155
Rührkesselkaskade 161
Rührreaktor, idealer kontinuierlicher 172
Rundlaufstempelpresse 258
- S**
Salz, kristallflüssigkeitsfreies 292
Sammler 228
Sattdampf 282
Sättigung eines Gases mit Feuchtigkeit 41
Sättigungsgrad 358
Sättigungswert 371
Satz von HESS 94
Saugförderanlagen 278
Säurekatalyse 138 f.
SAUTER-Durchmesser 186
SAUTER-Durchmesser, mittlerer 206
Scale-up 250
Scale-up-Kriterien 250
Scale-up-Maßstabsübertragung 250
Scale-up-Probleme 84
Schar von Dampfdruckkurven 304
Schätzung von Unsicherheiten 30
Schaufeltrockner 301
Schäumer 228
Schemata, spezielle 78
Scherrate 70
Schicht, monomolekulare 364
Schleuderziffer 220
Schlüsselkomponenten 82
Schlüssel-Schloss-Prinzip 126
Schmelzen 54
Schmelzen und Kristallstrukturänderungen 55
Schmelzenthalpie 54, 78
Schmelztemperatur 78
Schmelzvorgänge 258
Schneckenextruder 259
Schneckenförderer 275
Schneckenzenrifuge (Dekanter) 223
Schnitt (Cut) 317
Schnittpunktgerade 327
Schubspannung 70
Schwerbenzin 341
Schwerkraft 260
Schwersieder 303
Sedimentation 211
Sedimentationsanalyse 195
Sedimenter 215
Segregation 168
Segregationsgrad nach Danckwerts 240
Sekunde 15
Selektivität 90, 365
Separator (Tellerzenrifuge) 223
Sicherheit, statistische 30
Sichten 196
Siebboden 322
Siebklassierer 217

- Siebung (Analysen-) 195
 Siebung eines Feststoffs 189
 Siedebereich 306
 Siedediagramm 305
 Siedekurve 305
 Siedepunkt 319
 Siedepunkterhöhung 61
 Siedepunktmaximum 308, 310
 Siedepunktminimum 308 f.
 Siedetemperatur 78
 Siedeverzögerung 319
 Silicagel (Kieselgele) 366
 Simultanreaktionen 115
 Sintervorgänge 258
 Skalen, lineare und nichtlineare 34
 Solvat 291
 Solvens 381
 Sonderfälle 357
 Sorption 132, 342 ff.
 Soxhlet-Apparatur 395
 Sphärität 186, 213
 Spinodale 384
 Spiralförderer 275
 Spritzbreite, effektive 207
 Sprudelzone 323
 Sprühzone 323
 Sprungmethode 171
 S-Sätze 83
 Stabilitätskriterium 95
 Standardabweichung 30
 Standardbedingungen (SATP) 40
 Standardbildungsenthalpie 94
 Standardenthalpien 93
 Standardreaktionsenthalpie 94
 Standardsiedetemperatur 53
 Staudruck 67
 Staugrenze 337
 Steighöhenmethode 48
 Stereospezifität 127, 141
 Stoffaustauschprozesse 321
 Stoffbilanz 163
 Stoffbilanzen 98, 100, 151, 160
 Stoffdaten 82, 222
 Stoffdurchgangskoeffizienten 357
 Stoffdurchgangskoeffizienten,
 gasseitige 357
 Stoffe, teillösliche 311
 Stoffmenge 19
 Stoffmengenanteil 20, 304, 382
 Stoffmengenkonzentration 21
 Stoffmengenstrom des Dampfes 317
 Stoffmengenverhältnis 20
 Stoffstrom, konvektiver
 flächenbezogener 99
 Stoffströme (Durchsätze) 90
 Stofftransport der Edukte 129
 Stofftransport der Produkte 129
 Stofftransports durch Diffusion 99
 Stoffübergang 99
 Stoffübergangskoeffizienten 356
 Stoffwerte für Reinstoffe und
 Gemische 78
 Stopped-Flow-Technik 112
 Stoßenergie, kritische 118
 Stoßtheorie 123
 Strahlgeose 209
 Strahlpumpen 263
 Strahlungstrocknung 301
 Strähnenförderung 276
 Strähnenförderung über ruhender
 Ablagerung 277
 Streuung 31
 Streuung der Messwerte 25
 Strippingfaktor 352
 Stromklassierer 217
 Strömung mit Reibung 70
 Strömung, laminare 70, 72, 74, 214
 Strömung ohne Reibung 67
 Strömung, segregierte 174
 Strömung, turbulente 73 f., 214
 Strömungsbereich, heterogener 210
 Strömungsbereich, homogener 210
 Strömungsförderer 275
 Strömungsgeschwindigkeit, mittlere
 65
 Strömungsmethoden 112
 Strömungsrohr, ideales 175
 Strukturgrößen 89
 Strukturviskosität 71
 Studentscher Faktor 31
 Stufenkonstruktion 330
 Stufenwirkungsgrad 351
 Stufenwirkungsgrad, mittlerer 332
 Stufenzahl, unendliche 351
 Sublimationsenthalpie 54
 Substratspezifität 140
 Summenhäufigkeit, absolute 27
 Summenhäufigkeit, relative 27
 Sumpf 323
 Suspendieren 251
 Suspensionsverfahren 195
 System 92
 System, geschlossenes 92
 System, isoliertes 92
 System, offenes 92
 Systeme und Zustandsgrößen 92
 Systeme, heterogene 128
 Systeme, homogene 128
- T**
 Teilen 219
 Teilkondensation 282, 331
 Teilumsatz 162
 Temperaturen, niedrige 368
 Temperatur, steigende 345
 Temperaturabhängigkeit der
 Penicillinhydrolyse 34
 Temperaturabhängigkeit der
 Reaktionsgeschwindigkeit 118
 Temperaturführung 89
 Temperaturveränderung
 (Wärmetönung) 344
 Theorie der Reaktionsgeschwindigkeit
 117
 Theorie des aktivierten Komplexes
 120
 Theorie des Übergangszustandes 120
 Thermische Verfahrenstechnik 279 ff.
 Thermodynamik, chemische 92
 Thixotropie 71
 Tiefenfiltration 229, 235
 Totzeit 152
 Totzonen 168
 Trägerdampfdestillation 318
 Trägergasmengenstrom 349
 Trägerkatalysatoren 125
 Trägermedium 382
 Trägersubstanzen 346
 Transferasen 141
 Transport von Flüssigkeiten 260
 Transport von Gasen 268
 Transport von Stoffen 260 ff.
 Transportierbarkeit 198
 Transportprozesse 99
 Treibmittel 205
 Trennbarkeit, verbesserte 254
 Trennen disperser Systeme 211 ff.
 Trennschärfe 217, 219
 Trennschärfegrad 219
 Trennstufe, theoretische 330, 348,
 351
 Trennstufen 320
 Trennstufenzahl, theoretische 330

Trennung azeotroper Gemische 338
Trennung von
 Mehrkomponentensystemen 340
Triebkraft einer chemischen Reaktion
 96
trimolekular 109
Tripelpunkt 52
Trocknen 288, 295 ff.
Trocknen durch Ausdampfen 295
Trocknung, konvektive 299
Trocknungsarten 299
Trocknungsgas 295
Trocknungsgeschwindigkeit 299
Trocknungsgut 295
Trocknungskurven 299 f.
Trombe 246
turbulent 71

U

Überdruck oder Unterdruck 261
Überflutung des Rührers 253
Übergang (Ströme an
 Phasengrenzflächen) 99
Übergangsbereich 74, 249
Übergangskomponente 381
Übergangsverhalten 160
Übergangszustand (transition state)
 120
übersättigt 290
Überschichtungsverfahren 195
Umkehrosmose 234
Umordnung im Partikelkollektiv 257
Umrechnung in den tatsächlichen
 Zustand 345
Umrechnungen und
 Mischungsrechnung 22
Umsatz 90
Umsatz, maximal erreichbarer 96
Umsatzvariable 91, 102
Umweltbelastungen, potenzielle 77
Underwood-Gleichung 329
ungesättigt 290
Unsicherheit 29

V

Vakuumdestillation 319
Vakuumgasöl 341
Vakuumrektifikation 339
VAN'T-HOFF-Gleichung 98
VAN-DER-WAALS-Gleichung 44
Variable, abhängige 35

Variable, unabhängige 35
Varianz 30
Varianz der Verweilzeit 180
Ventilboden 321
Verdampfen und Eindampfen 288
Verdampfen und Kondensieren 280 ff.
Verdampfen und Sublimieren 55
Verdampferbauarten 288
Verdampfung 280
Verdampfungsenthalpie 54, 78, 280
Verdampfungskristallisation 290, 292
Verdampfungswärme 280
Verdichten 271
Verdichter 271
Verdrängerpumpen, oszillierende 262
Verdrängerpumpen, rotierende 261
Verdunstung 280
Verdunstungstrocknung 295
Veresterung von Carbonsäuren 140
Verfahren, chemische 112
Verfahren, diskontinuierliche 228
Verfahren, kontinuierliche 228
Verfahren, mikrobiologische 127
Verfahren, physikalische 112
Verfahrensablauf 82
Verfahrensentwicklung 76
Verfahrensfließschema 78 f.
Verfahrenshandbuch 77
Verfahrensinformationen 77
Verfahrenstechnik, mechanische
 183 ff.
Verfahrenstechnik, thermische 279
Verflüchtigung 280
Vergleich der Kennwerte 193
Vergleich der Verteilungen 193
Verhalten eines Gases, reales 308
Verhältnis 346
Vermischung, absolut ideale 239
Vermischung im Reaktor 147
Verstärkungsgeraden 325
Verstärkungsteil 323
Versuchsanlage 77
Verteilerboden 204
Verteilung zwischen flüssigen Phasen
 64
Verteilungsdiagramm 388
Verteilungsdichte 188
Verteilungsfunktion, empirische 28
Verteilungsgesetz, universelles 190
Verteilungsgesetz von NERNST 64
Verteilungsgesetze 190

Verteilungskoeffizient 64, 307
Verteilungssumme 187
Vertrauensbereich 31
Verweilzeit 147
Verweilzeit, mittlere 147, 170, 180
Verweilzeitspektrum 170
Verweilzeit-Summenfunktion 170
Verweilzeituntersuchungen zur
 Charakterisierung des
 Vermischungsverhaltens 169
Verweilzeitverteilung, differenzielle
 170, 180
Virialkoeffizienten 18
Viskosität 70
Viskosität von Flüssigkeiten 47
Viskosität von Gasen 45
Viskosität, dynamische 47, 70
Viskosität, kinematische 47, 71
Vollkatalysatoren 125
Volumen 186
Volumen, molares 39
Volumenänderungsarbeit 93, 280
Volumenanteil 21
Volumenausdehnung 46
Volumendurchmesser, mittlerer 206
Volumenkonzentration 21
Volumenstrom, konstanter 231 f.
Vorgang, exothermer 54, 364
Vorgang, instationärer 146
Vorgang, stationärer 146
Vorgänge, endotherme 54

W

Wachsdestillate 341
Wälzdruckmaschinen 258
Walzenpresse 258
Wände, ebene 284
Wandrauigkeit 73
Wärme 93
Wärmeaustausch 253
Wärmeaustausch, mittelbarer
 (indirekter) 286
Wärmeaustausch, unmittelbarer
 (direkter) 286
Wärmeaustauscher 284, 286
Wärmeaustauschprozesse 321
Wärmebedarf 334
Wärmebilanz 163
Wärmebilanz an einem
 Festbettadsorber 378
Wärmebilanz bei der Absorption 358

- Wärmebilanzen 98, 151, 160
 Wärmedurchgang 284
 Wärmedurchgangskoeffizient 284
 Wärmeleitung 283
 Wärmeleitung an einer ebenen Wand 283
 Wärmeleitung an einer Rohrwand 284
 Wärmeleitungsgleichung, FOURIERSche 99
 Wärmespeicher 287
 Wärmestrahlung 283
 Wärmestrom, konvektiver flächenbezogener 99
 Wärmeströme, abgeführte 334
 Wärmeströme, zugeführte 334
 Wärmetausch, direkter 149
 Wärmetausch, indirekter 149
 Wärmeträgerbilanz 163
 Wärmeübergang 284
 Wärmeübertragung 283
 Wärmeübertragung durch Konvektion 284
 Wärmeübertragungskoeffizient 284
 Waschmittelverhältnis 347
 Wasser 359
 Wasserdampfdestillation 319
 Wechselzahl (turnover number) 143
 Werkstoff 80
 Widerstandsbeiwert 71
 Wirbelschicht, homogene 243
 Wirbelschichtadsorber 380
 Wirbelschichttrockner (zweistufig) 301
 Wirkung, aktivierende 124
 Wirkung, selektive 124
- Z**
 Zahlenwert 14
 Zahlenwertgleichungen 16
 Zellen- oder Drehschieberverdichter 273
 Zentren, aktive 364
 Zentrifugalpumpen 262
 Zentrifuge 219f.
 Zentrifugenkennzahl 220
 Zeolithe 366
 Zeolithe, synthetische 367
 Zerkleinerung 198
 Zerkleinerungsgrad 201
 Zerkleinerungsgrad, bezogen auf Korngrößen 201
 Zerkleinerungsgrad, bezogen auf massenspezifische Oberflächen 201
 Zerkleinerungsmaschinen 202
 Zersetzung von Phosphin an Wolfram 36
 Zerspritzen 198
 Zerspritzung 208
 Zerstäuben 198, 204
 Zerstäubung 204
 Zerteilung von Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen 198ff.
 Zulauf 323
 Zündtemperatur 83
 Zündverhalten 148
 Zusatzinformationen 79f.
 Zustand A – Siedende Flüssigkeit 326
 Zustand B – Sattdampf 326
 Zustand C – Dampf-Flüssigkeits-Gemisch 326
 Zustand D – Unterkühlte Flüssigkeit 327
 Zustand E – Überhitzter Dampf 327
 Zustand, aktivierter 120
 Zustand, fester 49
 Zustand, flüssiger 45
 Zustand, gasförmiger 38
 Zustand, stationärer 142, 157
 Zustand, übersättigter 283
 Zustandsfunktion 18
 Zustandsgleichung für Gasmischungen 40
 Zustandsgleichung nach VAN-DER-WAALS 43
 Zustandsgröße (Zustandsvariable) 17
 Zustandsgrößen, extensive 17
 Zustandsgrößen, intensive 17
 Zustandsgrößen, kalorische 17
 Zustandsgrößen, molare 17
 Zustandsgrößen, spezifische 17
 Zustandsgrößen, thermische 17
 Zustandsgrößen und Prozessgrößen 17
 Zustandsgrößenänderung 92
 Zustandsvariablen 18
 Zwangsmischer 241
 Zwangsumlauf 288
 Zweifilmtheorie 134, 353
 Zweifilmtheorie von LEWIS AND WHITMAN 353
 Zweistoffdüse 205, 207
 Zweistoffgemisch, ideales 302
 Zweistoffgemisch, reales 308
 Zweistoffgemisch, schwer lösliches 310
 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik 94f.
 Zyklon 220, 224