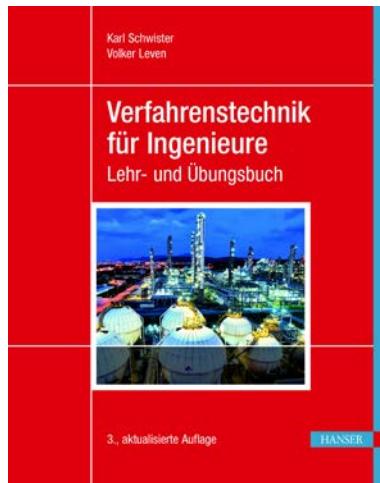


HANSER



Leseprobe

zu

„Verfahrenstechnik für Ingenieure“
von Karl Schwister und Volker Leven

ISBN (Buch): 978-3-446-46136-9

ISBN (E-Book): 978-3-446-46138-3

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/9783446461369>
sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Das Lehr- und Übungsbuch *Verfahrenstechnik für Ingenieure* bietet eine kompakte, verständliche und an den Bedürfnissen der Praxis ausgerichtete Gesamtdarstellung über den vielfältigen und weit verzweigten Bereich der Verfahrenstechnik. Es gibt eine erste Einführung in die notwendigen Grundlagen wie Thermodynamik, Kinetik, Katalyse, Strömungstechnik sowie Statistik und behandelt natürlich die Grundverfahren der Mechanischen und Thermischen Verfahrenstechnik sowie die Chemische Reaktionstechnik. Neben den zahlreichen Übungsaufgaben und Exkursen wird auch dem Fachfremden ein Einstieg in diese wichtige Ingenieurdisziplin ermöglicht.

Die Abgrenzung der vier Teilbereiche erfolgt nach traditionellem Verständnis. Danach basieren die Grundoperationen der *Mechanischen Verfahrenstechnik* im Wesentlichen auf den Grundgesetzen der Mechanik. Hinzu kommen die in der *Thermischen Verfahrenstechnik* zusammengefassten Gesetzmäßigkeiten des Stoff- und Wärmetransports. Das komplexe Gebiet der *Chemischen Reaktionstechnik* beschäftigt sich mit chemischen Umsetzungen, für deren quantitative Beschreibung sowohl die Thermodynamik als auch die Kinetik benötigt wird. Bei der Anwendung der dargelegten Theorien und Berechnungsmethoden stoßen Studenten und Absolventen häufig auf Probleme, die den Einstieg in Lehrveranstaltungen, Seminare oder Praktika erschweren.

Die Zielsetzung des vorliegenden Lehr- und Übungsbuches besteht darin, den Studenten der Fach- und Vertiefungsrichtungen Verfahrenstechnik, Biotechnologie, Lebensmitteltechnologie, Pharma- und Kosmetikindustrie, Kunststoffindustrie, Metallverarbeitung, Bergbau und Hüttenwesen sowie einer Reihe von Industrie- und Umweltbereichen das nötige Grundwissen einerseits, aber auch eine Aufgabensammlung von Berechnungsbeispielen und Stoffdaten andererseits, zur schnellen und erfolgreichen Einarbeitung an die Hand zu geben.

Ausführliche Übungsbeispiele mit Lösungen sowie Stoffdaten, Glossar und Formeln sind auf der Webseite des Buches abrufbar. Weitere Informationen für den Download der Daten finden Sie auf S. 381.

Besonders bedanken möchten wir uns bei Frau Antje Kim Fraedrich für die Konzeption und Erstellung der Aufgabensammlung. Herrn Klaus Vogelsang und Frau Janine Mater möchten wir für das Korrekturlesen danken.

Wie immer sind allein wir für die in diesem Buch enthaltenen Fehler verantwortlich.

Düsseldorf, im Juni 2019

Volker Leven und
Karl Schwister

Inhalt

Vorwort	5	2.4	<i>Fehlerfortpflanzung</i>	32
		2.4.1	Methode der oberen und unteren Grenze	32
VTG – Verfahrenstechnische Grundlagen ..	13	2.4.2	GAUSSsche Fehlerfortpflanzung	33
1 Physikalische Größen und Einheitensysteme	14	2.5	Lineare Fehlerfortpflanzung ..	33
1.1 <i>Größen und Größenarten</i>	14		<i>Grafische Auswertung von Messdaten ..</i>	34
1.2 <i>Größen- und Zahlenwertgleichungen ..</i>	16		2.5.1 Lineare und nichtlineare Skalen	34
1.3 <i>Zustandsgrößen und Prozessgrößen ..</i>	17		2.5.2 Anfertigung einer grafischen Darstellung	35
1.4 <i>Zustandsfunktionen</i>	18		2.5.3 Grafische Auswertung linearer Zusammenhänge	36
1.5 <i>Gehalts- und Konzentrationsangaben ..</i>	19			
1.5.1 Massenanteil	20			
1.5.2 Stoffmengenanteil	20			
1.5.3 Volumenanteil	21	3	Aggregatzustände und Phasenlehre ..	38
1.5.4 Massenkonzentration	21	3.1	<i>Gasförmiger Zustand</i>	38
1.5.5 Stoffmengenkonzentration ...	21		3.1.1 Ideales Gas	38
1.5.6 Volumenkonzentration	21		3.1.2 Gasgemische	40
1.5.7 Molalität	22		3.1.3 Reale Gase	42
1.5.8 Aktivität	22	3.2	<i>Flüssiger Zustand</i>	45
1.6 <i>Umrechnungen und Mischungsrechnung</i>	22		3.2.1 Dichte und Volumenausdehnung	45
			3.2.2 Viskosität von Flüssigkeiten ..	47
2 Statistische Grundlagen	25	3.3	3.2.3 Oberflächenspannung	48
2.1 Fehlerarten	25		<i>Fester Zustand</i>	49
2.1.1 Grobe Abweichung von Messwerten	25		3.3.1 Kristallgitter und Kristallsysteme	49
2.1.2 Systematische Abweichung von Messwerten	25		3.3.2 Methoden zur Ermittlung der Festkörperstruktur	51
2.1.3 Zufällige Abweichung von Messwerten	26	3.4	<i>Phasenumwandlung von Reinstoffen ..</i>	52
2.2 <i>Darstellung von Messreihen</i>	26		3.4.1 Druck-Temperatur-Phasendiagramm	52
2.3 <i>Erfassung der Messwertabweichung</i>	29		3.4.2 CLAUSIUS-CLAPEYRON-Gleichung	54
2.3.1 Normalverteilung nach GAUSS	30		3.4.3 Regel von TROUTON	55
2.3.2 Standardabweichung	30	3.5	<i>Binäre Phasengleichgewichte</i>	55
2.3.3 Vertrauensbereich	31	3.6	<i>Ternäre Phasengleichgewichte</i>	59

3.7	<i>Verdünnte Lösungen</i>	60	6.2.2	Erster Hauptsatz	92	
3.7.1	Kolligative Eigenschaften	60	6.2.3	Standardenthalpien	93	
3.7.2	Löslichkeit	62	6.2.4	Zweiter Hauptsatz	94	
			6.2.5	Chemisches Gleichgewicht ..	96	
4	Strömungstechnische Grundbegriffe	65	6.3	<i>Stoff- und Wärmebilanzen</i>	98	
4.1	<i>Allgemeine Grundlagen</i>	65	6.3.1	Transportprozesse	99	
4.2	<i>Kontinuitätsgleichung</i>	66	6.3.2	Erhaltungssätze	100	
4.3	<i>Strömung ohne Reibung</i>	67				
	4.3.1 Gleichung von BERNOULLI	67	7	Kinetik chemischer Reaktionen	102	
	4.3.2 Gleichung von TORRICELLI	69	7.1	<i>Reaktionsgeschwindigkeit</i>	102	
4.4	<i>Strömung mit Reibung</i>	70	7.2	<i>Gesetze der Reaktionskinetik</i>	103	
	4.4.1 Viskosität	70	7.2.1	Differenzialgleichungen	104	
	4.4.2 Widerstandsbeiwert	71	7.2.2	Reaktionen nullter Ordnung ..	105	
4.5	<i>Rohrströmung mit Reibung</i>	72	7.2.3	Reaktionen erster Ordnung ..	105	
	4.5.1 Laminare Strömung	72	7.2.4	Reaktionen zweiter Ordnung ..	107	
	4.5.2 Turbulente Strömung	73	7.2.5	Reaktionen dritter Ordnung ..	108	
	4.5.3 Druckverlust in Rohrleitungen	73	7.2.6	Molekularität einer Reaktion ..	109	
	4.5.4 Druckverlust in Formstücken und Armaturen	75	7.3	<i>Bestimmung von Reaktionsordnungen</i> ..	109	
			7.3.1	Differenzialmethode	110	
			7.3.2	Methode der Anfangs- geschwindigkeiten	110	
5	Produktionstechnische Grundbegriffe	76	7.3.3	Integrationsmethode	111	
5.1	<i>Verfahrensentwicklung</i>	76	7.3.4	Halbwertszeitmethode	111	
5.2	<i>Verfahrensinformationen</i>	77	7.3.5	Konzentrationsabhängige Messgrößen	111	
5.3	<i>Fließschemata von Anlagen</i>	78	7.3.6	Experimentelle Bestimmungs- methoden	112	
	5.3.1 Grundfließschema	79	7.4	<i>Kinetik komplexer Reaktionen</i>	113	
	5.3.2 Verfahrensfließschema	79	7.4.1	Gleichgewichtsreaktionen ..	114	
	5.3.3 Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema ...	80	7.4.2	Parallelreaktionen	115	
	5.3.4 Mess- und Regelschema	82	7.4.3	Folgereaktionen	116	
5.4	<i>Stoffdaten und Verfahrensablauf</i>	82	7.5	<i>Theorie der Reaktionsgeschwindigkeit</i> ..	117	
	5.4.1 Stoffdaten	82	7.5.1	Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit ..	118	
	5.4.2 Sicherheitstechnische Daten ..	83	7.5.2	Theorie des aktivierten Komplexes	120	
5.5	<i>Scale-up - Probleme</i>	84				
CRT – Chemische Reaktionstechnik			87	8	Aktivierung von Reaktionen und Katalyse	122
6	Grundlagen der Reaktionstechnik ...	88	8.1	<i>Aktivierung von Reaktionsprozessen</i>	123	
6.1	<i>Einführung und Grundbegriffe</i>	88	8.1.1	Thermische Aktivierung ..	123	
	6.1.1 Klassifizierung chemischer Reaktionen	88	8.1.2	Katalytische Aktivierung ..	124	
	6.1.2 Beurteilungsgrößen und Definitionen	89	8.1.3	Aktivierung durch Initiator- zerfall	126	
6.2	<i>Chemische Thermodynamik</i>	92	8.1.4	Biokatalytische Aktivierung ..	126	
	6.2.1 Systeme und Zustandsgrößen	92	8.1.5	Fotochemische Aktivierung ..	128	
				<i>Homogene und heterogene Systeme</i>	128	

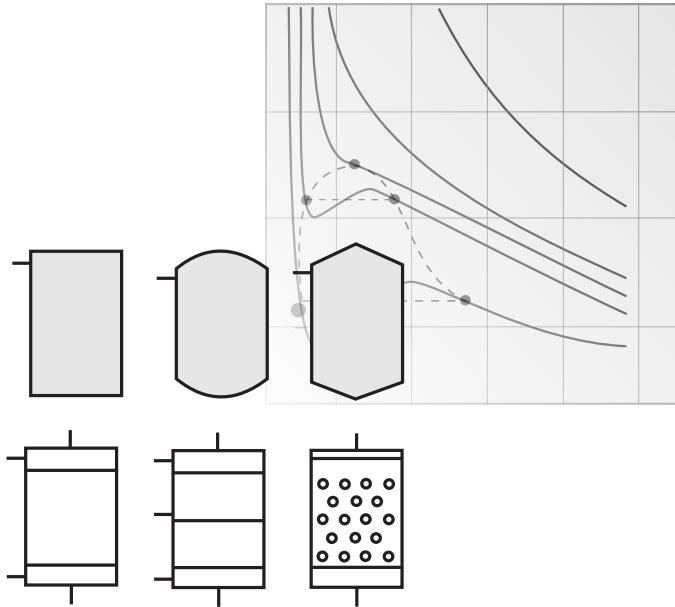
8.3	<i>Heterogene Katalyse</i>	128	10.2.1	Verweilzeitspektrum und Verweilzeit-Summenfunktion	170	
8.3.1	Heterogene Reaktionen mit Feststoffen	128	10.2.2	Messung der Verweilzeit- verteilungen	171	
8.3.2	Heterogene Reaktionen mit Fluiden	134	10.3	<i>Berechnung und Auswertung von Verweilzeitverteilungen</i>	172	
8.3.3	Reaktionsablauf	135	10.3.1	Idealer kontinuierlicher Rührreaktor	172	
8.4	<i>Homogene Katalyse</i>	136	10.3.2	Kaskade von kontinuierlich betriebenen idealen Rührreaktoren	173	
8.4.1	Einphasige Reaktionssysteme	137	10.3.3	Laminar durchströmter Rohrreaktor	174	
8.4.2	Säure- und Basenkatalyse	138	10.4	<i>Reaktoren mit realem Verhalten</i>	175	
8.4.3	Enzymkatalytische Reaktionen	140	10.4.1	Dispersionsmodell	175	
8.4.4	Reversible Hemmung von Enzymen	143	10.4.2	Kaskadenmodell	178	
9	Ideale Reaktoren	146	10.4.3	Berechnungsbeispiele	179	
9.1	<i>Klassifizierung von Reaktoren</i>	146	MVT – Mechanische Verfahrenstechnik – Grundoperationen			183
9.1.1	Allgemeine Betriebsformen ..	146	11	Charakterisierung von Partikeln und dispersen Systemen	184	
9.1.2	Vermischung im Reaktor ..	147	11.1	<i>Grundlagen</i>	184	
9.1.3	Wärmetechnische Betriebs- formen	148	11.2	<i>Partikelgrößen und Merkmale</i>	185	
9.1.4	Grundtypen chemischer Reaktoren	150	11.3	<i>Kenngrößen einer Verteilung</i>	187	
9.1.5	Stoff- und Wärmebilanzen ..	151	11.3.1	Verteilungssumme	187	
9.2	<i>Diskontinuierlich betriebener Rührkessel</i> 152		11.3.2	Verteilungsdichte	188	
9.2.1	Isotherm betriebener Rührkessel	153	11.4	<i>Verteilungsgesetze</i>	190	
9.2.2	Adiabat betriebener Rührkessel	154	11.4.1	Potenzverteilung nach GATES- GAUDIN-SCHUMANN	191	
9.2.3	Polytrop betriebener Rührkessel	155	11.4.2	GAUSSsche Normalverteilungs- funktion	191	
9.3	<i>Kontinuierliche Betriebsführung ohne Rückvermischung der Reaktionsmasse</i> ..	156	11.4.3	Logarithmische Normal- verteilung	192	
9.4	<i>Kontinuierliche Betriebsführung mit Rückvermischung der Reaktionsmasse</i> ..	159	11.4.4	RRSB-Verteilung	192	
9.5	<i>Rührkesselkaskade</i>	161	11.4.5	Vergleich der Verteilungen und Kennwerte	193	
9.5.1	Gestaltung und stoffliche Bilanzierung	162	11.5	<i>Messen einer Partikelgrößenverteilung</i> ..	195	
9.5.2	Berechnung von Rührkessel- kaskaden	163	12	Zerteilung von Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen	198	
9.6	<i>Vergleichende Betrachtung der Reaktoren</i>	165	12.1	<i>Grundlagen</i>	198	
10	Reale Reaktoren und Verweilzeit- verteilungen	168	12.2	<i>Zerkleinerung</i>	198	
10.1	<i>Abweichungen vom idealen Verhalten</i> ...	168	12.2.1	Näherungsformeln	200	
10.2	<i>Verweilzeituntersuchungen zur Charakterisierung des Vermischungs- verhaltens</i>	169	12.2.2	Zerkleinerungsgrad	201	

12.2.3	Bruchvorgang	201	16.2	<i>Transport von Flüssigkeiten</i>	260
12.2.4	Zerkleinerungsmaschinen ...	202	16.2.1	Verdrängungspumpen	261
12.3	<i>Flüssigkeitszerteilung</i>	204	16.2.2	Zentrifugalpumpen	262
12.3.1	Berieselung	204	16.2.3	Strahlpumpen	263
12.3.2	Zerstäubung	204	16.2.4	Berechnungen	264
12.3.3	Zerspritzung	208	16.3	<i>Transport von Gasen</i>	268
12.4	<i>Begasung</i>	208	16.3.1	Lüfter und Gebläse	268
13	Trennen disperter Systeme	211	16.3.2	Verdichter	271
13.1	<i>Grundlagen</i>	211	16.4	<i>Feststoffförderung</i>	274
13.2	<i>Absetzprozesse</i>	211	16.4.1	Gurt-, Gliederbandförderer und Becherwerke	274
13.2.1	Sedimenter	215	16.4.2	Schnecken- und Spiralförderer	275
13.2.2	Trennschärfe und Abscheidegrad	217	16.4.3	Pneumatische Förderung	275
13.2.3	Zentrifuge	219			
13.2.4	Zyklone	224			
13.2.5	Koagulation und Flokkulation	227			
13.2.6	Flotation	227			
13.3	<i>Filtrationsprozesse</i>	228			
13.3.1	Kuchenfiltration	229	17	Verdampfen und Kondensieren	280
13.3.2	Querstromfiltration	233	17.1	<i>Grundlagen</i>	280
13.3.3	Tiefenfiltration	235	17.1.1	Dampf	282
14	Mischen	238	17.1.2	Wärmeübertragung	283
14.1	<i>Grundlagen</i>	238	17.1.3	Wärmeaustauscher	286
14.2	<i>Mischen von Feststoffen</i>	240	17.2	<i>Verdampfen und Eindampfen</i>	288
14.3	<i>Statisches Mischen von Fluiden</i>	243	18	Kristallisation	290
14.4	<i>Dynamisches Mischen von Flüssigkeiten</i>	245	18.1	<i>Grundlagen</i>	290
14.4.1	Laminarer Bereich	248	18.2	<i>Berechnungen zur Kristallisation</i>	291
14.4.2	Turbulenter Bereich	249	18.3	<i>Technische Anwendung</i>	294
14.4.3	Übergangsbereich	249	19	Trocknen	295
14.4.4	Rühren von nicht-NEWTON- schen Flüssigkeiten	250	19.1	<i>Grundlagen</i>	295
14.4.5	Scale-up - Maßstabs- übertragung	250	19.2	<i>Trocknungsarten und Trocknungs- kurven</i>	299
14.4.6	Weitere Anwendungsbereiche	251	19.3	<i>Bauarten von Trocknern</i>	301
15	Agglomerieren	254	20	Destillation und Rektifikation	302
15.1	<i>Grundlagen</i>	254	20.1	<i>Grundlagen</i>	302
15.2	<i>Einteilung der Agglomeration</i>	255	20.1.1	Ideales Zweistoffgemisch	302
15.2.1	Aufbauagglomeration (Pelletieren)	255	20.1.2	Reales Zweistoffgemisch	308
15.2.2	Pressagglomeration (Formpressen)	257	20.1.3	Mischungslücken	310
16	Transport von Stoffen	260	20.2	<i>Destillation</i>	312
16.1	<i>Arten der Förderung</i>	260	20.2.1	Absatzweise (einfache) Destillation	312
			20.2.2	Fraktionierte Destillation	316
			20.2.3	Kontinuierliche Destillation ..	317

20.2.4	Trägerdampfdestillation	318	21.1.5	Wärmebilanz bei der Absorption	358
20.2.5	Vakuumdestillation	319	21.1.6	Anwendung der Absorption ..	360
20.3	<i>Rektifikation</i>	319	21.2	<i>Adsorption</i>	362
20.3.1	Grundlagen der Rektifikation	320	21.2.1	Grundlagen der Adsorption ..	362
20.3.2	Bilanzen an einer Rektifikationskolonne	323	21.2.2	Adsorptionsmittel	364
20.3.3	Wärmebedarf und Heizleistung	334	21.2.3	Beispiele einiger Adsorptionsmittel	365
20.3.4	Füllkörper- und Packungskolonnen	336	21.2.4	Mechanismen der Adsorption ..	367
20.3.5	Rektifikationsverfahren	338	21.2.5	Bilanzierung von Adsorbern ..	375
21	Sorption	342	21.2.6	Wärmebilanz an einem Festbettadsorber	378
21.1	<i>Absorption</i>	342	21.2.7	Technische Anwendungen und Bauformen	379
21.1.1	Grundlagen der Absorption ..	342		Hinweise zum Zusatzmaterial	381
21.1.2	Bilanzierung und Berechnung	347		Sachwortverzeichnis	382
21.1.3	NTU/HTU-Konzept für die Absorption	353			
21.1.4	Kenngrößen eines Absorbers	357			

VTG

Verfahrenstechnische Grundlagen



- 1 Physikalische Größen und Einheitensysteme**
- 2 Statistische Grundlagen**
- 3 Aggregatzustände und Phasen**
- 4 Strömungstechnische Grundbegriffe**
- 5 Produktionstechnische Grundbegriffe**

In diesem Teil des Buches werden neben grundlegenden naturwissenschaftlichen Gesetzmäßigkeiten die verfahrenstechnischen Grundlagen besprochen. Es geht um Definitionen von Begriffen, um das Vergrößern von Laborverfahren in den Produktionsmaßstab (Scale-up) und um chemische Stoffumwandlungsprozesse in verschiedenen Reaktionsapparaten. Daneben werden Transportvorgänge von Fluiden, Wärme und Stoffen in ihren physikalischen Grundprinzipien dargestellt. Bei diesen drei Erscheinungsformen handelt es sich um Ausgleichsvorgänge auf submikroskopischer Ebene, bei denen Volumenelemente sich gegeneinander verschieben oder aneinander reiben können. Der Widerstand

einer Strömung, einer Wärmeübertragung oder des Stofftransports ist in allen Fällen mit der inneren und äußereren Reibung zu begründen. Bei der Übertragung der Wärme werden Teilchen mit hoher thermischer Bewegung Energie an benachbarte Teilchen abgeben. Strömungsimpulse entstehen, wenn schnelle auf langsame Teilchen treffen. Der Stofftransport entsteht, wenn Teilchen aufgrund ihrer kinetischen Bewegungsenergie in andere Bereiche vordringen. Alle Vorgänge, die auf eine submikroskopische Bewegung von Teilchen zurückzuführen sind, lassen sich mit mathematischen Gleichungen beschreiben.

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 $t = 60$ 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	Einheiten-zeichen
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 hervorufen 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

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

$N_A = 6,022\,141 \cdot 10^{23}$ 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.

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 $m = 1 \text{ kg}$ als Basisgröße und der Beschleunigung $a = 1 \text{ m/s}^2$ 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	Einheiten-gleichung
Kraft	N (Newton)	$F = m \cdot a$	$N = \text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2$
Druck	Pa (Pascal)	$p = F/A$	$\text{Pa} = \text{kg} / (\text{m} \cdot \text{s}^2)$
Energie	J (Joule)	$W = F \cdot s$	$J = \text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$
Leistung	W (Watt)	$P = W/t$	$W = \text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^3$
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	Einheiten-zeichen
Zeit (t)	Minute (min)	$1 \text{ min} = 60 \text{ s}$
	Stunde (h)	$1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$
	Tag (d)	$1 \text{ d} = 86400 \text{ s}$
	Jahr (a)	$1 \text{ a} = 31536000 \text{ s}$
Länge (l)	Ångström (\AA)	$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$
Volumen (V)	Liter (l)	$1 \text{ l} = 10^{-3} \text{ m}^3$
Druck (p)	Bar (bar)	$1 \text{ bar} = 100000 \text{ Pa}$
Energie (E)	Elektronvolt (eV)	$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

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:

$$\{9_{\text{C}}\} = 0,5556 \cdot (\{9_{\text{F}}\} - 32) \quad (1-2)$$

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:

$$\{9_{\text{C}}\} = 0,5556 \cdot (140 - 32) = 60$$

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	
$\{9_{\text{C}}\} = 0,5556 \cdot (\{9_{\text{F}}\} - 32)$	Grad Celsius ↔ Grad Fahrenheit
$\{9_{\text{F}}\} = (1,80 \cdot \{9_{\text{C}}\}) + 32$	
$\{9_{\text{C}}\} = \{T\} - 273,15$	Grad Celsius ↔ Kelvin
$\{T\} = \{9_{\text{C}}\} + 273,15$	
$\{9_{\text{C}}\} = 0,5556 \cdot (\{9_{\text{Ra}}\} - 491,67)$	Grad Celsius ↔ Grad Rankine
$\{9_{\text{Ra}}\} = (1,80 \cdot \{9_{\text{C}}\}) + 491,67$	
$\{9_{\text{C}}\} = 1,25 \cdot \{9_{\text{Re}}\}$	Grad Celsius ↔ Grad Réaumur
$\{9_{\text{Re}}\} = 0,80 \cdot \{9_{\text{C}}\}$	

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

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

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
Absorbensverhaltnis 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, große 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.
Adsortiv 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
Aktivierungsentergie 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
Ansauen 271
Anteilsgroen 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
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 138f.
 Basisgrößen 14
 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
 Benetzungs faktor 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
 Berieseln 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, polytroper 148
 Beurteilungsgrößen und Definitionen 89
 Bewehrung des Rührbehälters 247
 Bezeichnung der einzelnen Stufen 79
 Bezeichnung und Menge der Energieart 79
 Bezugsgroße, unveränderliche 296
 Bilanzen 101
 Bilanzen an einer Rektifikationskolonne 323
 Bilanzgebiet 99
 Bilanzierung 347
 Bilanzierung von Adsorbern 375
 Bilanzlinie 355
 bimolekular 109
 Binäre Phasengleichgewichte 55
 Bingham-Fluid 71
 Binodalkurve 59

Biotkatalysatoren 126
 Biotkatalysatoren, immobilisierte 127
 Bitumen 341
 Blasengase 209
 Blitzlichtfotolyse 112
 Bodenstein-Zahl 180
 Boyle-Temperatur 42
 Bragg-Gleichung 51
 Bravais-Gitter 50
 Brechen 198f.
 Bruchvorgang 201
 Brunauer-Emmet-Teller-Isotherme (BET) 133

C

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

D

Dampf 282
 Dampf, gesättigter 282
 Dampf, überhitzter ungesättigter 283
 Dampf, überkritischer 283
 Dampfbelastung 336
 Dampfdruck 78, 280
 Dampfdruckniedrigung 60
 Dampfdruckniedrigung, relative 56
 Dampfdruckmaximum 308f.
 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 302ff.
 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
- Dreiecksdigramme 341
- Dreieckskoordinatensysteme 59
- Dreikomponentengemische 341
- Dreiphasenreaktionen 133
- Druck, hydrostatischer 48
- Druck, konstanter 231
- Druck, messbarer 67
- Druck, osmotischer 62
- Druck und Osmose 62
- 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
- Durchbruchskurve (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
- Einheitenystem, 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
- 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
- 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
- Feuchtebeladung 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
Flokkulanten 227
Flokkulation 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
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
Geradrohrwärmearausch 287
Gesamtbilanz 215, 323
Gesamtumsatz 162
Gesamtverfahren 77
Gesamtwiderstand beider 16
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.
Gleichgewichtsbeladung, 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 14ff.
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
 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
 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
 Konoden 57, 306
 Konstante, ebullioskopische 61
 Konstante, katalytische 143
 Konstante, kryoskopische 62
 Konstruktion der Stufen 331
 Kontaktstellen 255
 Kontakttrocknung 295, 299
 kontinuierlich 89
 Kontinuitätsgleichung 66 f.
 Konvektion 99, 283
 Konvektionstrocknung 295
 Konzentration 84

- Konzentration, wirksame 22
 Konzentrationsbeiwert 213
 Konzentrationsgrößen 89
 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
 Kristallisatstrom 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
 Löscherhalten 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
 Lösungsmittelverhältnis 347
 Luft, feuchte 296
 Lüfter und Gebläse 268
 Lyasen 141
- M**
 Mahlen 198f.
 Mahlgrenze 199
 Makrokinetik 88, 129
 Makroporen 365
 Mammutpumpenprinzip 288
 Markierungskonzentration am Reaktorausgang 179
 Maschinen 79 f.
 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 183 ff.
 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 19
 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 Molekülmäßigstab 169
 Mischung, ideale 56, 58
 Mischungen, nichtideale 57
 Mischungsgleichung 22
 Mischungsgrad 240
 Mischungskreuz 23
 Mischungslücke 310f.
 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

Molekulsiebe 366

Momente, gewöhnliche 176f.

Momente, zentrale 176f.

Monodispersität 184

monomolekular 109

MTZ (Mass Transfer Zone) 376

N

Nachleitwerk 270

Näherungsformel nach Ritter 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

Physisorption 132, 342, 363

Poiseuille-Strömung 130f.

Pol 297

Polydispersität 184

Porendiffusion 130

Porenvolumen, relatives 130

Potenzial, intermolekulares 19

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

Raoult'sches 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 87ff.

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, rau 74
 Rohrleitungen 80
 Rohrleitungsließschema 78, 80
 Rohrreaktor, kontinuierlicher 166
 Rohrreaktor, laminar durchströmter 174
 Rohreibungszahl 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
 Röhren von nicht-Newtonsschen Flüssigkeiten 250
 Rührer, axial wirkende 245
 Rührer, radial wirkende 245
 Rührer, tangential wirkende 245
 Rührkessel, adiabat 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
 Schneckenzentrifuge (Dekanter) 223
 Schnitt (Cut) 317
 Schnittpunktsgerade 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 (Tellerzentrifuge) 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
 Siedepunktserhöhung 61
 Siedepunktsmaximum 308, 310
 Siedepunktsminimum 308 f.
 Siedetemperatur 78
 Siedeverzug 319
 Silicagel (Kieselgele) 366
 Simultanreaktionen 115
 Sintervorgänge 258
 Skalen, lineare und nichtlineare 34
 Solvat 291
 Sonderfälle 357
 Sorption 132, 342 ff.
 Sphärität 186, 213
 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 20
 Stoffmengenanteil 20, 304
 Stoffmengenkonzentration 21
 Stoffmengenstrom des Dampfes 317
 Stoffmengenverhältnis 20
 Stoffstrom, konvektiver flächen-
 bezogener 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
 Strahlgase 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 73f., 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
 Trägergasmenstrom 349
 Trägerkatalysatoren 125

Trägersubstanzen 346
 Transferasen 141
 Transport von Flüssigkeiten 260
 Transport von Gasen 268
 Transport von Stoffen 260ff.
 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 Mehrkomponenten-
 systemen 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
 Übergangsverhalten 160
 Übergangszustand (transition state)
 120
 übersättigt 290
 Übersichtsverfahren 195
 Umkehrosmose 234
 Umordnung im Partikelkollektiv 257
 Umrechnung in den tatsächlichen
 Zustand 345
 Umrechnungen und Mischungs-
 rechnung 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 280ff.
 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 78f.
 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
 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
- Wandraufigkeit 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
Zentrifugalgumpen 262
Zentrifuge 219f.
Zentrifugenkennzahl 220
Zeolith 366
Zeolith, 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 198 ff.
Zulauf 323
Zündtemperatur 83
Zündverhalten 148
Zusatzinformationen 79 f.
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 94 f.
Zyklon 220, 224