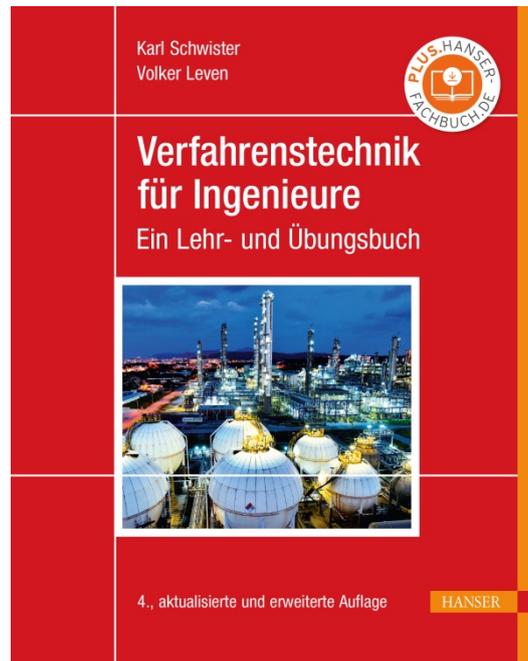


# HANSER



## Leseprobe

zu

## „Verfahrenstechnik für Ingenieure“

von Karl Schwister und Volker Leven

Print-ISBN: 978-3-446-46481-0  
E-Book-ISBN: 978-3-446-46500-8

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46481-0>

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 [plus.hanser-fachbuch.de](http://plus.hanser-fachbuch.de) abrufbar. Weitere Informationen für den Download der Daten finden Sie auf S. 399.

Besonders bedanken möchten wir uns bei Frau Antje Kim Fraedrich für die Konzeption und Erstellung der Aufgabensammlung. Herrn Klaus Vogel-sang 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 Juli 2020

Volker Leven und  
Karl Schwister

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>5</b>	<b>2.4 Fehlerfortpflanzung</b> .....	<b>32</b>
<b>VTG – Verfahrenstechnische Grundlagen</b> ..	<b>13</b>	2.4.1 Methode der oberen und unteren Grenze .....	32
<b>1 Physikalische Größen und Einheitensysteme</b> .....	<b>14</b>	2.4.2 GAUSSsche Fehlerfortpflanzung .....	33
1.1 Größen und Größenarten .....	14	2.4.3 Lineare Fehlerfortpflanzung .	33
1.2 Größen- und Zahlenwertgleichungen ....	16	<b>2.5 Grafische Auswertung von Messdaten</b> ...	<b>34</b>
1.3 Zustandsgrößen und Prozessgrößen ....	17	2.5.1 Lineare und nichtlineare Skalen .....	34
1.4 Zustandsfunktionen .....	18	2.5.2 Anfertigung einer grafischen Darstellung .....	35
1.5 Gehalts- und Konzentrationsangaben ...	19	2.5.3 Grafische Auswertung linearer Zusammenhänge .....	36
1.5.1 Massenanteil .....	20	<b>3 Aggregatzustände und Phasenlehre</b> .	<b>38</b>
1.5.2 Stoffmengenanteil .....	20	<b>3.1 Gasförmiger Zustand</b> .....	<b>38</b>
1.5.3 Volumenanteil .....	21	3.1.1 Ideales Gas .....	38
1.5.4 Massenkonzentration .....	21	3.1.2 Gasmischungen .....	40
1.5.5 Stoffmengenkonzentration ...	21	3.1.3 Reale Gase .....	42
1.5.6 Volumenkonzentration .....	21	<b>3.2 Flüssiger Zustand</b> .....	<b>45</b>
1.5.7 Molalität .....	22	3.2.1 Dichte und Volumenausdehnung .....	45
1.5.8 Aktivität .....	22	3.2.2 Viskosität von Flüssigkeiten .	47
1.6 Umrechnungen und Mischungsrechnung .....	22	3.2.3 Oberflächenspannung .....	48
<b>2 Statistische Grundlagen</b> .....	<b>25</b>	<b>3.3 Fester Zustand</b> .....	<b>49</b>
2.1 Fehlerarten .....	25	3.3.1 Kristallgitter und Kristallsysteme .....	49
2.1.1 Grobe Abweichung von Messwerten .....	25	3.3.2 Methoden zur Ermittlung der Festkörperstruktur .....	51
2.1.2 Systematische Abweichung von Messwerten .....	25	<b>3.4 Phasenumwandlung von Reinstoffen</b> ...	<b>52</b>
2.1.3 Zufällige Abweichung von Messwerten .....	26	3.4.1 Druck-Temperatur-Phasendiagramm .....	52
2.2 Darstellung von Messreihen .....	26	3.4.2 CLAUDIUS-CLAPEYRON-Gleichung .....	54
2.3 Erfassung der Messwertabweichung ....	29	3.4.3 Regel von TROUTON .....	55
2.3.1 Normalverteilung nach GAUSS .....	30	<b>3.5 Binäre Phasengleichgewichte</b> .....	<b>55</b>
2.3.2 Standardabweichung .....	30	<b>3.6 Ternäre Phasengleichgewichte</b> .....	<b>59</b>
2.3.3 Vertrauensbereich .....	31		

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
<b>4</b>	<b>Strömungstechnische Grundbegriffe</b> .....	<b>65</b>	6.2.5	Chemisches Gleichgewicht ..	96
4.1	<i>Allgemeine Grundlagen</i> .....	65	6.3	<i>Stoff- und Wärmebilanzen</i> .....	98
4.2	<i>Kontinuitätsgleichung</i> .....	66	6.3.1	Transportprozesse .....	99
4.3	<i>Strömung ohne Reibung</i> .....	67	6.3.2	Erhaltungssätze .....	100
4.3.1	Gleichung von BERNOULLI ....	67	<b>7</b>	<b>Kinetik chemischer Reaktionen</b> .....	<b>102</b>
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
<b>5</b>	<b>Produktionstechnische Grundbegriffe</b> .....	<b>76</b>	7.3.1	Differenzialmethode .....	110
5.1	<i>Verfahrensentwicklung</i> .....	76	7.3.2	Methode der Anfangs- geschwindigkeiten .....	110
5.2	<i>Verfahrensinformationen</i> .....	77	7.3.3	Integrationsmethode .....	111
5.3	<i>Fliebschemata von Anlagen</i> .....	78	7.3.4	Halbwertszeitmethode .....	111
5.3.1	Grundfliebschema .....	79	7.3.5	Konzentrationsabhängige Messgrößen .....	111
5.3.2	Verfahrensfliebschema .....	79	7.3.6	Experimentelle Bestimmungs- methoden .....	112
5.3.3	Rohrleitungs- und Instrumentenfliebschema ...	80	7.4	<i>Kinetik komplexer Reaktionen</i> .....	113
5.3.4	Mess- und Regelschema .....	82	7.4.1	Gleichgewichtsreaktionen ...	114
5.4	<i>Stoffdaten und Verfahrensablauf</i> .....	82	7.4.2	Parallelreaktionen .....	115
5.4.1	Stoffdaten .....	82	7.4.3	Folgereaktionen .....	116
5.4.2	Sicherheitstechnische Daten .	83	7.5	<i>Theorie der Reaktionsgeschwindigkeit</i> ..	117
5.4.3	Toxikologische Daten .....	84	7.5.1	Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit ...	118
5.5	<i>Scale-up - Probleme</i> .....	84	7.5.2	Theorie des aktivierten Komplexes .....	120
<b>CRT - Chemische Reaktionstechnik</b> .....	<b>87</b>	<b>8</b>	<b>Aktivierung von Reaktionen und Katalyse</b> .....	<b>122</b>	
<b>6</b>	<b>Grundlagen der Reaktionstechnik</b> ...	<b>88</b>	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
			8.2	<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 Verweilzeitverteilungen .....	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
10.4.3	Berechnungsbeispiele .....	179	<b>MVT – Mechanische Verfahrenstechnik – Grundoperationen</b> .....		
9	<b>Ideale Reaktoren</b> .....	146	11	<b>Charakterisierung von Partikeln und dispersen Systemen</b> .....	184
9.1	<i>Klassifizierung von Reaktoren</i> .....	146	11.1	<i>Grundlagen</i> .....	184
9.1.1	Allgemeine Betriebsformen ..	146	11.2	<i>Partikelgrößen und Merkmale</i> .....	185
9.1.2	Vermischung im Reaktor ...	147	11.3	<i>Kenngößen einer Verteilung</i> .....	187
9.1.3	Wärmetechnische Betriebsformen .....	148	11.3.1	Verteilungssumme .....	187
9.1.4	Grundtypen chemischer Reaktoren .....	150	11.3.2	Verteilungsdichte .....	188
9.1.5	Stoff- und Wärmebilanzen ...	151	11.4	<i>Verteilungsgesetze</i> .....	190
9.2	<i>Diskontinuierlich betriebener Rührkessel</i> .....	152	11.4.1	Potenzverteilung nach GATES-GAUDIN-SCHUMANN .....	191
9.2.1	Isotherm betriebener Rührkessel .....	153	11.4.2	GAUSSsche Normalverteilungsfunktion .....	191
9.2.2	Adiabat betriebener Rührkessel .....	154	11.4.3	Logarithmische Normalverteilung .....	192
9.2.3	Polytrop betriebener Rührkessel .....	155	11.4.4	RRSB-Verteilung .....	192
9.3	<i>Kontinuierliche Betriebsführung ohne Rückvermischung der Reaktionsmasse</i> ..	156	11.4.5	Vergleich der Verteilungen und Kennwerte .....	193
9.4	<i>Kontinuierliche Betriebsführung mit Rückvermischung der Reaktionsmasse</i> ..	159	11.5	<i>Messen einer Partikelgrößenverteilung</i> ..	195
9.5	<i>Rührkesselkaskade</i> .....	161	12	<b>Zerteilung von Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen</b> .....	198
9.5.1	Gestaltung und stoffliche Bilanzierung .....	162	12.1	<i>Grundlagen</i> .....	198
9.5.2	Berechnung von Rührkesselkaskaden .....	163	12.2	<i>Zerkleinerung</i> .....	198
9.6	<i>Vergleichende Betrachtung der Reaktoren</i> .....	165	12.2.1	Näherungsformeln .....	200
10	<b>Reale Reaktoren und Verweilzeitverteilungen</b> .....	168	12.2.2	Zerkleinerungsgrad .....	201
10.1	<i>Abweichungen vom idealen Verhalten</i> ...	168			
10.2	<i>Verweilzeituntersuchungen zur Charakterisierung des Vermischungsverhaltens</i> .....	169			

12.2.3	Bruchvorgang	201	16.2	Transport von Flüssigkeiten	260
12.2.4	Zerkleinerungsmaschinen	202	16.2.1	Verdrängungspumpen	261
12.3	Flüssigkeitserteilung	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	Transport von Gasen	268
12.4	Begasung	208	16.3.1	Lüfter und Gebläse	268
			16.3.2	Verdichter	271
<b>13</b>	<b>Trennen disperser Systeme</b>	<b>211</b>	16.4	Feststoffförderung	274
13.1	Grundlagen	211	16.4.1	Gurt-, Gliederbandförderer und Becherwerke	274
13.2	Absetzprozesse	211	16.4.2	Schnecken- und Spiralförderer	275
13.2.1	Sedimenter	215	16.4.3	Pneumatische Förderung	275
13.2.2	Trennschärfe und Abscheidegrad	217			
13.2.3	Zentrifuge	219	<b>TVT – Thermische Verfahrenstechnik – Grundoperationen</b>	<b>279</b>	
13.2.4	Zyklone	224	<b>17</b>	<b>Verdampfen und Kondensieren</b>	<b>280</b>
13.2.5	Koagulation und Flokkulation	227	17.1	Grundlagen	280
13.2.6	Flotation	227	17.1.1	Dampf	282
13.3	Filtrationsprozesse	228	17.1.2	Wärmeübertragung	283
13.3.1	Kuchenfiltration	229	17.1.3	Wärmeaustauscher	286
13.3.2	Querstromfiltration	233	17.2	Verdampfen und Eindampfen	288
13.3.3	Tiefenfiltration	235	<b>18</b>	<b>Kristallisation</b>	<b>290</b>
<b>14</b>	<b>Mischen</b>	<b>238</b>	18.1	Grundlagen	290
14.1	Grundlagen	238	18.2	Berechnungen zur Kristallisation	291
14.2	Mischen von Feststoffen	240	18.3	Technische Anwendung	294
14.3	Statisches Mischen von Fluiden	243	<b>19</b>	<b>Trocknen</b>	<b>295</b>
14.4	Dynamisches Mischen von Flüssigkeiten	245	19.1	Grundlagen	295
14.4.1	Laminarer Bereich	248	19.2	Trocknungsarten und Trocknungs- kurven	299
14.4.2	Turbulenter Bereich	249	19.3	Bauarten von Trocknern	301
14.4.3	Übergangsbereich	249	<b>20</b>	<b>Destillation und Rektifikation</b>	<b>302</b>
14.4.4	Rühren von nicht-NEWTON- schen Flüssigkeiten	250	20.1	Grundlagen	302
14.4.5	Scale-up – Maßstabs- übertragung	250	20.1.1	Ideales Zweistoffgemisch	302
14.4.6	Weitere Anwendungsgebiete	251	20.1.2	Reales Zweistoffgemisch	308
<b>15</b>	<b>Agglomerieren</b>	<b>254</b>	20.1.3	Mischungslücken	310
15.1	Grundlagen	254	20.2	Destillation	312
15.2	Einteilung der Agglomeration	255	20.2.1	Absatzweise (einfache) Destillation	312
15.2.1	Aufbauagglomeration (Pelletieren)	255	20.2.2	Fraktionierte Destillation	316
15.2.2	Pressagglomeration (Formpressen)	257	20.2.3	Kontinuierliche Destillation	317
<b>16</b>	<b>Transport von Stoffen</b>	<b>260</b>			
16.1	Arten der Förderung	260			

20.2.4	Trägerdampfdestillation . . . . .	318	21.2.4	Mechanismen der Adsorption	367
20.2.5	Vakuumdestillation . . . . .	319	21.2.5	Bilanzierung von Adsorbenten	375
20.3	<i>Rektifikation</i> . . . . .	319	21.2.6	Wärmebilanz an einem Festbettadsorber . . . . .	378
20.3.1	Grundlagen der Rektifikation	320	21.2.7	Technische Anwendungen und Bauformen . . . . .	379
20.3.2	Bilanzen an einer Rekti- fikationskolonne . . . . .	323	<b>22</b>	<b>Extraktion</b> . . . . .	<b>381</b>
20.3.3	Wärmebedarf und Heiz- leistung . . . . .	334	22.1	<i>Flüssig-Flüssig-Extraktion</i> . . . . .	381
20.3.4	Füllkörper- und Packungs- kolonnen . . . . .	336	22.1.1	Schwerlösliche Flüssigkeiten	382
20.3.5	Rektifikationsverfahren . . . . .	338	22.1.2	Bilanzierung (schwerlösliche Flüssigkeiten) . . . . .	383
<b>21</b>	<b>Sorption</b> . . . . .	<b>342</b>	22.1.3	Teilweise lösliche Flüssig- keiten . . . . .	384
21.1	<i>Absorption</i> . . . . .	342	22.1.4	Bilanzierung von Prozessen mit teilweiser Löslichkeit der Flüssigkeiten . . . . .	389
21.1.1	Grundlagen der Absorption ..	342	22.2	<i>Fest-Flüssig-Extraktion</i> . . . . .	393
21.1.2	Bilanzierung und Berechnung	347	22.3	<i>Kontinuierlich arbeitende Extraktionsapparate</i> . . . . .	396
21.1.3	<i>NTU/HTU</i> -Konzept für die Absorption . . . . .	353	<b>Hinweise zum Zusatzmaterial</b> . . . . .	<b>399</b>	
21.1.4	Kenngrößen eines Absorbers	357	<b>Sachwortverzeichnis</b> . . . . .	<b>400</b>	
21.1.5	Wärmebilanz bei der Absorption . . . . .	358			
21.1.6	Anwendung der Absorption ..	360			
21.2	<i>Adsorption</i> . . . . .	362			
21.2.1	Grundlagen der Adsorption ..	362			
21.2.2	Adsorptionsmittel . . . . .	364			
21.2.3	Beispiele einiger Adsorptions- mittel . . . . .	365			

# 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  $^{133}\text{Cs}$ -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  $273,16$ te 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  $^{12}\text{C}$  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	$\mu$	$10^{-6}$ -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/s<sup>2</sup> 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 = $10^{-10} \text{ m}$
Volumen ( $V$ )	Liter (l)	1 l = $10^{-3} \text{ m}^3$
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  $\Delta V$  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

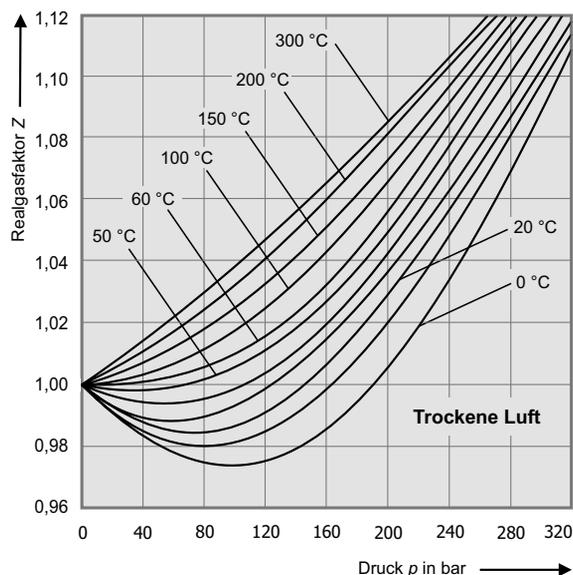
Für ideale Gase ist  $Z = 1$ , für reale Gase werden **Virialkoeffizienten** (Kräfte zwischen den Molekülen) angehängt, die experimentell, in manchen Fällen auch rechnerisch, zu ermitteln sind:

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

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  $^{12}\text{C}$  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 ( $\text{O}_2$ ) oder Ozon ( $\text{O}_3$ ) handelt. Es muss daher geschrieben werden: 1 mol O  $\hat{=}$  16 g, 1 mol  $\text{O}_2$   $\hat{=}$  32 g bzw. 1 mol  $\text{O}_3$   $\hat{=}$  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  $\varphi$
- Angabe der Massenkonzentration  $\beta$
- Angabe der Stoffmengenkonzentration  $c$
- Angabe der Volumenkonzentration  $\sigma$

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  $\varphi$ ) 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  $\beta$ ) 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  $\sigma$ ) 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  $m_{\text{Lsgm}}$  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,  $c^\circ$  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,  
 $w_{\text{Mischung}}$  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:

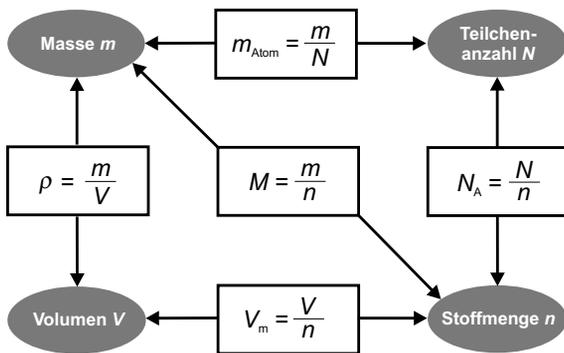
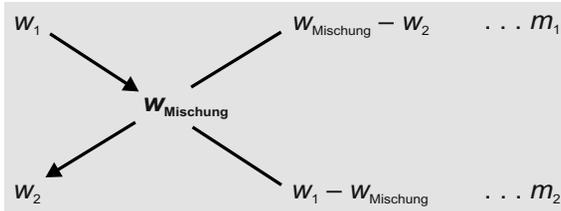
$$m_1 w_1 + m_2 w_2 = (m_1 + m_2) w_{\text{Mischung}}$$

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

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

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

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** (Andreaszkreuz), darstellen und damit das Massenverhältnis berechnen:



**Bild 1.2** Umrechnungsformeln von Masse  $m$  in Teilchenanzahl  $N$ , Volumen  $V$  und Stoffmenge  $n$  mit der Dichte  $\rho$  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 ( $w = 18\%$ )  
 $x = \frac{1}{4} \cdot 500 \text{ g} = 125 \text{ g NaCl}$  ( $w = 18\%$ )
- 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,  $\rho$  Dichte des Lösung in g/ml,  $M_i$  molare Masse der Komponente  $i$  in g/mol

### Massenanteil in Volumenanteil

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

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

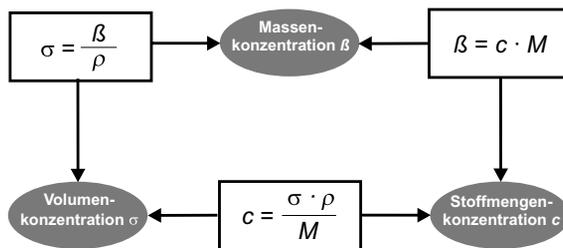
$w_i$  Massenanteil der Komponente  $i$  in %,  $\sigma_i$  Volumenanteil der Komponente  $i$  in %,  $\rho_i$  Dichte des reinen Stoffes in g/ml,  $\rho$  Dichte der Lösung in g/ml

### 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 %,  $\beta_i$  Massenkonzentration in g/l,  $\rho$  Dichte des Lösung in g/ml



**Bild 1.3** Umrechnungsformeln von der Massenkonzentration  $\beta$  in die Stoffmengenkonzentration  $c$  und in die Volumenkonzentration  $\sigma$  mit der Dichte  $\rho$  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 CO<sub>2</sub> 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  
 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

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 310 f.  
 Mischungslücke, einseitig offene 388  
 Mischungslücke, geschlossene 386 f.  
 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 176 f.  
 Momente, zentrale 176 f.  
 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 130 f.  
 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 130 f.  
 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, adiabatisch 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  
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 (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  
 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