



Leseprobe

Karl Schwister, Volker Leven

Verfahrenstechnik für Ingenieure

Ein Lehr- und Übungsbuch

ISBN (Buch): 978-3-446-44214-6

ISBN (E-Book): 978-3-446-44001-2

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44214-6>

sowie im Buchhandel.

Inhalt

Vorwort	5	2.4 Fehlerfortpflanzung	32
VTG – Verfahrenstechnische Grundlagen ..	13	2.4.1 Methode der oberen und unteren Grenze	32
1 Physikalische Größen und Einheitensysteme	14	2.4.2 GAUSSsche Fehlerfortpflanzung	33
1.1 Größen und Größenarten	14	2.4.3 Lineare Fehlerfortpflanzung .	33
1.2 Größen- und Zahlenwertgleichungen ...	16	2.5 Grafische Auswertung von Messdaten ..	34
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	3 Aggregatzustände und Phasenlehre .	38
1.5.2 Stoffmengenanteil	20	3.1 Gasförmiger Zustand	38
1.5.3 Volumenanteil	21	3.1.1 Ideales Gas	38
1.5.4 Massenkonzentration	21	3.1.2 Gasmische	40
1.5.5 Stoffmengenkonzentration ...	21	3.1.3 Reale Gase	42
1.5.6 Volumenkonzentration	21	3.2 Flüssiger Zustand	45
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
2 Statistische Grundlagen	25	3.3 Fester Zustand	49
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	3.4 Phasenumwandlung von Reinstoffen ...	52
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	3.5 Binäre Phasengleichgewichte	55
2.3.2 Standardabweichung	30	3.6 Ternäre Phasengleichgewichte	59
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
4	Strömungstechnische Grundbegriffe	65	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	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
5	Produktionstechnische Grundbegriffe	76	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>Fließschemata von Anlagen</i>	78	7.3.4	Halbwertszeitmethode	111
5.3.1	Grundfließschema	79	7.3.5	Konzentrationsabhängige Messgrößen	111
5.3.2	Verfahrensfließschema	79	7.3.6	Experimentelle Bestimmungs- methoden	112
5.3.3	Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema ...	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
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
			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	MVT – Mechanische Verfahrenstechnik – Grundoperationen 183		
9	Ideale Reaktoren 146		11	Charakterisierung von Partikeln und dispersen Systemen 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>Kenngrößen 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	190
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	191
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>	194
9.5	<i>Rührkesselkaskade</i>	161	12	Zerteilung von Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen 197	
9.5.1	Gestaltung und stoffliche Bilanzierung	162	12.1	<i>Grundlagen</i>	197
9.5.2	Berechnung von Rührkesselkaskaden	163	12.2	<i>Zerkleinerung</i>	197
9.6	<i>Vergleichende Betrachtung der Reaktoren</i>	165	12.2.1	Näherungsformeln	199
10	Reale Reaktoren und Verweilzeitverteilungen 168		12.2.2	Zerkleinerungsgrad	200
10.1	<i>Abweichungen vom idealen Verhalten</i>	168			
10.2	<i>Verweilzeituntersuchungen zur Charakterisierung des Vermischungsverhaltens</i>	169			

12.2.3	Bruchvorgang	200	16.2	Transport von Flüssigkeiten	258
12.2.4	Zerkleinerungsmaschinen	201	16.2.1	Verdrängungspumpen	259
12.3	Flüssigkeitserteilung	203	16.2.2	Zentrifugalpumpen	260
12.3.1	Berieselung	203	16.2.3	Strahlpumpen	261
12.3.2	Zerstäubung	203	16.2.4	Berechnungen	262
12.3.3	Zerspritzung	207	16.3	Transport von Gasen	266
12.4	Begasung	207	16.3.1	Lüfter und Gebläse	266
13	Trennen disperser Systeme	210	16.3.2	Verdichter	269
13.1	Grundlagen	210	16.4	Feststoffförderung	271
13.2	Absetzprozesse	210	16.4.1	Gurt-, Gliederbandförderer und Becherwerke	271
13.2.1	Sedimenter	214	16.4.2	Schnecken- und Spiralförderer	272
13.2.2	Trennschärfe und Abscheidegrad	216	16.4.3	Pneumatische Förderung	273
13.2.3	Zentrifuge	218	TVT – Thermische Verfahrenstechnik – Grundoperationen	277	
13.2.4	Zyklone	223	17	Verdampfen und Kondensieren	278
13.2.5	Koagulation und Flokkulation	225	17.1	Grundlagen	278
13.2.6	Flotation	226	17.1.1	Dampf	280
13.3	Filtrationsprozesse	227	17.1.2	Wärmeübertragung	281
13.3.1	Kuchenfiltration	227	17.1.3	Wärmeaustauscher	283
13.3.2	Querstromfiltration	232	17.2	Verdampfen und Eindampfen	284
13.3.3	Tiefenfiltration	234	18	Kristallisation	288
14	Mischen	236	18.1	Grundlagen	288
14.1	Grundlagen	236	18.2	Berechnungen zur Kristallisation	289
14.2	Mischen von Feststoffen	238	18.3	Technische Anwendung	291
14.3	Statisches Mischen von Fluiden	241	19	Trocknen	293
14.4	Dynamisches Mischen von Flüssigkeiten	242	19.1	Grundlagen	293
14.4.1	Laminarer Bereich	246	19.2	Trocknungsarten und Trocknungskurven	297
14.4.2	Turbulenter Bereich	246	19.3	Bauarten von Trocknern	299
14.4.3	Übergangsbereich	247	20	Destillation und Rektifikation	300
14.4.4	Rühren von nicht-NEWTON- schen Flüssigkeiten	248	20.1	Grundlagen	300
14.4.5	Scale-up – Maßstabs- übertragung	248	20.1.1	Ideales Zweistoffgemisch	300
14.4.6	Weitere Anwendungsgebiete	249	20.1.2	Reales Zweistoffgemisch	306
15	Agglomerieren	252	20.1.3	Mischungslücken	308
15.1	Grundlagen	252	20.2	Destillation	310
15.2	Einteilung der Agglomeration	253	20.2.1	Absatzweise (einfache) Destillation	310
15.2.1	Aufbauagglomeration (Pelletieren)	253	20.2.2	Fraktionierte Destillation	314
15.2.2	Pressagglomeration (Formpressen)	255	20.2.3	Kontinuierliche Destillation	315
16	Transport von Stoffen	258			
16.1	Arten der Förderung	258			

20.2.4	Trägerdampfdestillation	316	21.1.5	Wärmebilanz bei der Absorption	355
20.2.5	Vakuumdestillation	317	21.1.6	Anwendung der Absorption ..	357
20.3	<i>Rektifikation</i>	317	21.2	<i>Adsorption</i>	359
20.3.1	Grundlagen der Rektifikation	318	21.2.1	Grundlagen der Adsorption ..	359
20.3.2	Bilanzen an einer Rekti- fikationskolonne	321	21.2.2	Adsorptionsmittel	361
20.3.3	Wärmebedarf und Heiz- leistung	332	21.2.3	Beispiele einiger Adsorptions- mittel	362
20.3.4	Füllkörper- und Packungs- kolonnen	332	21.2.4	Mechanismen der Adsorption	364
20.3.5	Rektifikationsverfahren	334	21.2.5	Bilanzierung von Adsorbentien .	371
21	Sorption	339	21.2.6	Wärmebilanz an einem Festbettadsorber	374
21.1	<i>Absorption</i>	339	21.2.7	Technische Anwendungen und Bauformen	376
21.1.1	Grundlagen der Absorption ..	339			
21.1.2	Bilanzierung und Berechnung	344			
21.1.3	<i>NTU/HTU</i> -Konzept für die Absorption	350			
21.1.4	Kenngrößen eines Absorbentens	354			
				Hinweise zur beigefügten CD	378
				Sachwortverzeichnis	379

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.

Besonders möchten wir uns bei Frau Antje Kim Fraederich bedanken, die neben ihrem Studium die beiliegende CD konzipiert und erstellt hat. Für das Korrekturlesen bedanken wir uns bei Frau Janine Mater und Herrn Klaus Vogelsang. Unseren Frauen Karin und Regine möchten wir auf diesem Wege unseren herzlichen Dank für ihr Verständnis und ihre Geduld während der Erarbeitung des Manuskriptes ausdrücken.

Für die in diesem Buch enthaltenen Fehler und Mängel sind wir alleine verantwortlich.

Düsseldorf, im Oktober 2014

Volker Leven und
Karl Schwister

12

Zerteilung von Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen

12.1 Grundlagen

Eine Zerteilung kann in allen Aggregatzuständen stattfinden, z. B. kann ein Feststoff gebrochen, eine Flüssigkeit versprüht oder ein Gas fein verteilt in eine Flüssigkeit eingeleitet werden. Man unterscheidet folgende Begrifflichkeiten:

- **Zerkleinerung**
Ein **Feststoff** wird von einer groben in eine feinere Form überführt. Man unterscheidet die Hauptverfahren **Brechen** und **Mahlen**.
- **Flüssigkeitszerteilung**
Eine **Flüssigkeit** wird aus einem zusammenhängenden Volumen in Fäden, Filme oder Tröpfchen (Aerosole) überführt. Als Verfahren haben sich das **Berieseln**, das **Zerspritzen** und das **Zerstäuben** (Sprühen) etabliert.
- **Gasverteilung**
Ein Gas wird fein verteilt (z. B. als Gasbläschen) in eine Flüssigkeit geleitet. Man spricht hierbei von **Begasung**.

12.2 Zerkleinerung

Bei der Zerkleinerung eines Feststoffs müssen Kräfte aufgewendet werden, die stärker als der Zusammenhalt der den Feststoff bildenden Bindungen sind, wobei es sich z. B. bei Salzkristallen um Ionenbindungen handeln kann. Zerkleinerungsprozesse sind immer mit einem großen Energieaufwand (spezifische Zerkleinerungsarbeit) verbunden. In der industriellen Zerkleinerungstechnik wird daher aufgrund der Wirtschaftlichkeit eine Reduzierung dieses Energieaufwands angestrebt, da sehr viele Roh- und Zwischenprodukte in zerkleinerter Form für die weitere Verwendung vorliegen müssen. Die

Vorteile von zerkleinerten Materialien sind dabei entscheidend:

- **Oberflächenzuwachs**
Fein zerteilte Materialien haben eine deutlich größere Oberfläche als grobe (vgl. Beisp. 12.1). Zum einen bieten sich dadurch verbesserte Stoff- und Wärmeübergänge (vgl. Abschn. 21.2 Adsorption) und zum anderen kann eine chemische Reaktion begünstigt werden.
- **Transportier- und Lagerbarkeit**
Eine Lagerung von feinem Material ist aufgrund der besseren Raumausnutzung platzsparender. Der Transport kann dadurch effektiver gestaltet werden, was z. B. in einer Fabrik durch pneumatische Druckförderung realisiert werden kann.
- **Abtrennen unerwünschter Komponenten**
Sind in einem Feststoff unerwünschte Stoffe eingeschlossen, können sie nach der Zerkleinerung durch eine geeignete Trennmethode vom Produkt abgetrennt werden (Aufschluss).
- **Dosierbarkeit**
Feine Stoffe sind deutlich exakter maschinell dosierbar und führen so zu optimalen Betriebsbedingungen und zu Kostenersparnis durch effektiven Einsatz.
- **Korngrößenverteilung**
Bei der Herstellung von sogenannten „Fertigprodukten“ ist eine definierte Verteilung der feinen Materialien in Bezug auf die folgende Aufbereitung entscheidend.

Eine Zerkleinerung ist technisch gesehen begrenzt, da ab einer gewissen Feinheit die Teilchen zum einen zerkleinert und zum anderen gleichzeitig zusammengelagert werden (Agglomerieren). Tritt ein Gleichgewicht zwischen beiden Vorgängen ein, stagniert die Zerkleinerung. Daher kann eine Zerteilung

eines Feststoffs durch **Mahlen** nicht bis hin zur Molekülgröße im gaskinetischen Sinne erfolgen, sondern nur bis zu einer gewissen **Mahlgrenze**. Durch Zugabe von meist flüssigen Zuschlagstoffen (Mahlhilfsmittel) wird versucht, das Agglomerieren zu vermindern. Das **Brechen** hingegen geschieht nur mit dem trockenen Material. Daher unterteilt man bei den Zerkleinerungsverfahren nur das Mahlen in Nass- und Trockenmahlen. Eine allgemeine Unterscheidung der Zerkleinerungsprozesse kann in Hinblick auf die Härte oder die Produktfeinheit erfolgen, wie in Tabelle 12.1 gezeigt.

Tabelle 12.1 Einteilung der Zerkleinerung

Zerkleinerung	
nach Materialhärte (Härte nach MOHS)	nach Produktfeinheit (Partikelgröße in mm)
Hartzerkleinerung 5 ... 10 z. B. Erze, Mineralien	Grobbrechen > 50 (Brocken)
	Feinbrechen 5 ... 50 (Splitt)
Mittelhartzerkleinerung 3 ... 4 Kohle, Salze	Schroten 0,5 ... 5 (Granulat)
	Mahlen 0,05 ... 0,5 (Pulver)
Weichzerkleinerung 1 ... 2 z. B. Getreide, Kunststoffe	Feinmahlen 0,005 ... 0,05 (Puder)
	Feinstmahlen < 0,005 (Feinstpuder)

Eine Zerkleinerung kann auf unterschiedliche Weise erfolgen, die zumeist von der Art des vorliegenden Materials und seinen Eigenschaftsänderungen bei der Zerkleinerung abhängt. Die wirkenden Kräfte als Mittel zur Zerlegung des Feststoffverbunds sind bei den Verfahren unterschiedlich geartet. In Bild 12.1 sind die klassischen Arten der Zerkleinerungsprozesse dargestellt. Sie unterscheiden sich durch die Anzahl der Kontaktstellen, an denen die Kräfte angreifen.

Die Zerkleinerung durch Druck und Schlag ist nur bei mittelhartem bis hartem (spröden) Stoffen sinnvoll einsetzbar, wohingegen Reibung (auch Scherung) bei faserigen weichen Stoffen geeignet ist. Die Prall- und Schnitttechnik deckt einen großen Anwendungsbereich von spröden bis elastischen,

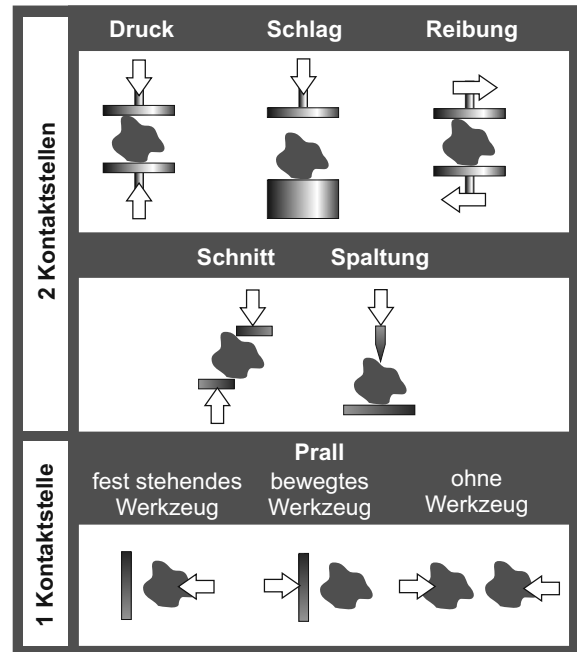


Bild 12.1 Einteilung der Zerkleinerung

weichen bis mittelhartem und vor allem temperaturempfindlichen Stoffen ab. Neben den genannten Hauptverfahren findet man auch andere Verfahren, die nicht auf mechanischen Kräften beruhen. So kann eine Zerkleinerung auch thermisch, elektrisch oder chemisch erfolgen. Ferner kann das Zerkleinern durch ein das Partikel umgebendes Medium erfolgen, ohne dass ein Kontakt mit einer Feststoffoberfläche besteht. Im Folgenden werden ausschließlich die verbreiteten mechanischen Verfahren behandelt.

Obwohl es sich bei der Zerkleinerung um ein grundlegendes und wichtiges Verfahren handelt, ist bis heute noch keine direkte Beziehung aufgestellt worden, die die nötige Zerkleinerungsarbeit mit dem Zerkleinerungsergebnis (z. B. Produktfeinheit) verknüpft. Gründe dafür liegen in der Vielfalt der auftretenden Formen, Lagen und vorliegenden Spannungszustände während der Beanspruchung. Für geometrisch einfache Partikel, wie z. B. eine Kugel, kann ein solcher Vorgang beschrieben werden. Der Nutzen für die Praxis ist aber als gering zu werten, da die Abweichungen von den tatsächlichen be-

nötigten Energien zu groß sind. Daher werden Daten auch heute noch über Vorversuche mit den zu zerkleinernden Materialien durchgeführt.

12.2.1 Näherungsformeln

Um die spezifische Zerkleinerungsarbeit w_z darzustellen, ist es in der Praxis wichtig, sie über den Anfangs- und Endzustand, häufig bezogen auf die Partikelgröße, zu erhalten, da diese für ein Zerkleinerungsvorhaben bekannt sein sollten. Die als Zerkleinerungsgesetze bezeichneten halbempirischen Näherungsgleichungen nach KICK, BOND und RITTINGER stellen in der Zerkleinerungstechnik einen überschlägigen Berechnungsansatz dar, wobei der Proportionalitätsfaktor, wie bereits beschrieben, experimentell durch Vorversuche erhalten werden muss. Die Gültigkeitsbereiche (z. B. Partikelgrößenbereich) sind dabei stets zu beachten. Die Zusammenhänge beruhen auf einem allgemeinen Zerkleinerungsgesetz:

$$\frac{dw_z}{dx_p} = -\frac{K}{x_p^n} \quad (12-1)$$

Die Berechnung der spezifischen Zerkleinerungsarbeit $w_{z,Kick}$ über die **Näherungsgleichung nach KICK** gilt nur für das Zerteilen grober Partikel (Grobbrechen). Als Partikelgrößen werden definitionsgemäß die zu einer Verteilungssumme von 80 % gehörenden Partikelgrößen $x_{p,80}$ der Verteilung $Q_3(x_p)$ am Anfang und Ende der Zerkleinerung eingesetzt.

$$w_{z,Kick} = K_{Kick} \cdot (\log x_{p,80}^{Anfang} - \log x_{p,80}^{Ende}) \quad (12-2)$$

Für feinste Partikel (Feinstmahlen) bringt die **Näherungsformel nach RITTINGER** bessere Ergebnisse:

$$w_{z,Rittinger} = K_{Rittinger} \cdot \left(\frac{1}{x_{p,80}^{Ende}} - \frac{1}{x_{p,80}^{Anfang}} \right) \quad (12-3)$$

Die **Näherungsgleichung nach BOND** ist für die technische Anwendung mit einem Anwendungsbereich vom Feinstmahlen bis zum Feinbrechen als die in der Praxis am weitesten verbreitete Berechnungsgrundlage anzusehen.

$$w_{z,Bond} = K_{Bond} \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{x_{p,80}^{Ende}}} - \sqrt{\frac{1}{x_{p,80}^{Anfang}}} \right) \quad (12-4)$$

Eine Umrechnung der stoffspezifischen Konstanten kann wie folgt vorgenommen werden:

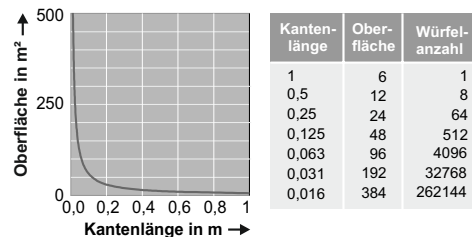
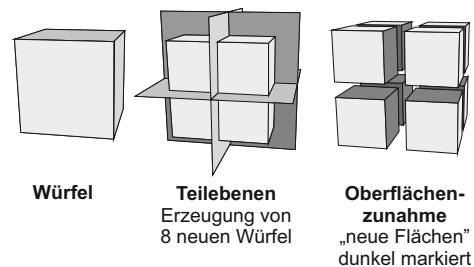
$$K_{Kick} = 1,151 \cdot K_{Bond} \cdot \frac{1}{\sqrt{x_{B,OB}}},$$

$$K_{Rittinger} = 0,5 \cdot K_{Bond} \cdot \sqrt{x_{B,UB}}$$

Die Werte $x_{B,OB}$ und $x_{B,UB}$ stellen die obere und die untere Partikelgröße (OB - BOND zu KICK, UB - RITTINGER zu BOND) für den Bereichsübergang der Näherungsformeln dar. Diese werden experimentell ermittelt und in Ausnahmefällen zur groben Abschätzung als $x_{B,OB} = 0,05$ m und $x_{B,UB} = 0,00005$ m angenommen. Es sei an dieser Stelle erneut erwähnt, dass die in Literaturquellen zu findenden Werte überschlägige Ergebnisse liefern, da z. B. ebenfalls die Art der Zerkleinerungsapparatur einen Einfluss hat.

Beispiel 12.1: Zunahme der Oberfläche eines Würfels

Ein Würfel mit der Kantenlänge 1 (z. B. m) wird bei einem Zerteilungsvorgang an 3 Ebenen in 8 gleiche Würfel mit halber Kantenlänge zerteilt. Der Vorgang wird an den neu entstandenen Würfeln wiederholt.



Bei einem Zerteilungsvorgang entstehen neue Oberflächen, die sich bisher im Inneren des Würfels befanden. Dabei nimmt die Partikelgröße (hier veranschaulicht durch die Kantenlänge) bei jedem Teilvorgang ab. Im Diagramm werden die überproportionale Zunahme der Oberfläche bei der Zerkleinerung und somit die starke Zunahme der Würfelzahl deutlich.

12.2.2 Zerkleinerungsgrad

Allgemein wird für eine Beurteilung des Zerkleinerungsprozesses der **Zerkleinerungsgrad** herangezogen. Dieser beruht auf der Beurteilung des Partikelkollektivs vor und nach dem Zerkleinerungsvorgang und ist auf unterschiedliche Weise definierbar.

Zerkleinerungsgrad, bezogen auf Korngrößen

$$z_x = \frac{x_p^{\text{Anfang}}}{x_p^{\text{Ende}}} \quad (12-5)$$

Hier ist die Wahl der Partikelgröße entscheidend. Es bestehen mehrere Möglichkeiten, so wird z.B. als charakteristische Partikelgröße aus der Durchgangssummenkurve $x_{p,50}$ (Medianwert) oder $x_{p,80}$ gewählt. Die maximale Partikelgröße besitzt aufgrund der aufwendigeren und ungenaueren Bestimmung wenig Bedeutung in der Praxis.

Zerkleinerungsgrad, bezogen auf massenspezifische Oberflächen

$$z_A = \frac{A_{p,m}^{\text{Anfang}}}{A_{p,m}^{\text{Ende}}} \quad (12-6)$$

Der Zerkleinerungsgrad nimmt folglich große Werte bei feiner werdender Zerkleinerung an.

12.2.3 Bruchvorgang

Der eigentliche Bruchvorgang findet statt, wenn an einer Stelle des Feststoffpartikels die Bindungskräfte der Molekül- oder Ionenbestandteile aufbrechen.

Damit sich ein Bruch ausbilden kann, muss ein Spalt entstehen, der eine gewisse Mindestlänge hat (häufig als 1 μm angegeben) und eine Breite, die die Reichweite der Zusammenhänge übersteigt (häufig 0,0001 bis 0,001 μm angegeben). Am Spalt entstehen extrem hohe Temperaturen, und der Bruch breitet sich mit (mehr als) Schallgeschwindigkeit aus. In einem Zerkleinerungsapparat entsteht an der Kontaktstelle des Partikels (z. B. zum Werkzeug) eine Abflachung und daraufhin ein kegelförmiger Bereich, der mit Feingut durchsetzt ist (**Feingutkegel**, vgl. Bild 12.2).

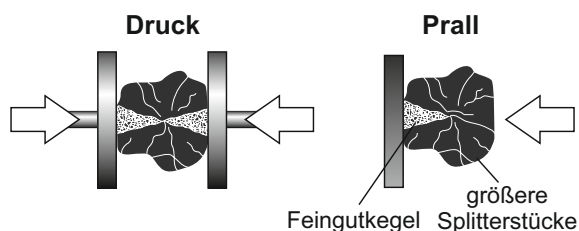


Bild 12.2 Bruchkegel bei unterschiedlicher Belastung

Folglich erscheint bei Prallbeanspruchungen nur ein Feingutkegel und zwei bei einer Druckbeanspruchung. Ein Bruch zieht eine unterschiedliche Partikelverteilung nach sich, da der Rest des Partikels in größere Splitter zerfällt.

Ähnlich wie bei einer Flüssigkeit besitzen die Moleküle (Ionen, Atome) in der äußersten Schicht (Oberfläche) einen Überschuss an potenzieller Energie, da sie nicht von allen Seiten mit Nachbarbausteinen verbunden sind (vgl. Bild 12.3). Diesen Überschuss nennt man **freie Grenzflächenenergie**. Vergrößert man durch die Zerkleinerung nun die Oberfläche, existieren auch mehr „äußere“ Moleküle, und die freie Grenzflächenenergie (Oberflächenenergie) nimmt zu. Die Differenz ist die aufzuwendende Arbeit, die bei der Zerkleinerung auftritt.

Die **spezifische freie Grenzflächenenergie** (bei Flüssigkeiten auch Oberflächenspannung genannt, in J/m^2) ist der Quotient der Arbeit W_0 , die zur Vergrößerung der Oberfläche benötigt wurde, und der Oberflächenvergrößerung.

$$\sigma_0 = \frac{dW_0}{dA} \quad (12-7)$$

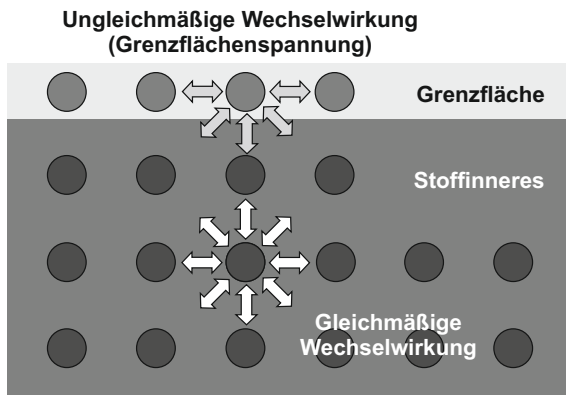


Bild 12.3 Ursache der freien Grenzflächenspannung

Hierbei handelt es sich um eine von der Oberflächengröße unabhängige Stoffkonstante. Eine Berechnung von Kennwerten (z. B. Zerreißspannung) zur Zerteilung spröder Stoffe liefert normalerweise deutlich höhere Werte, als sie bei der Zerkleinerung in der Praxis zu finden sind. Das liegt in den Fehlstellen (Kerben, Kanäle, Fremdstoffe etc.), die im Feststoff bereits vorliegen und eine Zerkleinerung energetisch gesehen deutlich vereinfachen. Die Ausprägung und die Anzahl solcher Fehlstellen nehmen bei kleiner werdenden Partikeln stark ab, wodurch auch die steigende Zerkleinerungsarbeit bei zunehmendem Feinheitsgrad erklärt werden kann.

Der Wirkungsgrad einer Zerkleinerung, d. h. das Verhältnis der Nutzarbeit (Arbeit, die zur Oberflächenvergrößerung aufgewendet wird) zu der tatsächlich aufgewendeten Zerkleinerungsarbeit (bestehend aus den Arbeiten zur Oberflächenvergrößerung, der Formänderungs-, der Reibungs- und der Verlustarbeit der Maschine), liegt häufig deutlich **unter einem Prozent**. Die auftretenden Verluste steigen bei zunehmender Feinheit stark an. Daher sind folgende Maßnahmen sinnvoll:

- Eine Zerkleinerung sollte nur bis zum benötigten Feinheitsgrad vorgenommen werden.
- Während des Zerkleinerungsprozesses sollte der den Vorgaben entsprechende Feingutanteil abgeführt werden.
- Rückführungen durch Klassierungen sollten ermöglicht werden.
- Eine den Bruch unterstützende Nassmahlung

kann bei unlöslichen Stoffen vorgesehen werden.

- Verwendung von Mahlhilfsmitteln, die die freie spezifische Grenzflächenenergie herabsetzen.
- Die Härte bzw. Spröde eines Stoffes ist durch Kühlung auf ein sehr niedriges Temperaturniveau zu erhöhen.

12.2.4 Zerkleinerungsmaschinen

Eine Zerkleinerung kann in mehreren Schritten erfolgen, wobei man die verwendeten Apparate auf die vorliegende und die zu erzielenden Partikelgröße anpasst. Das Schema (vgl. Bild 12.4) zeigt einen solchen Zerkleinerungsvorgang.

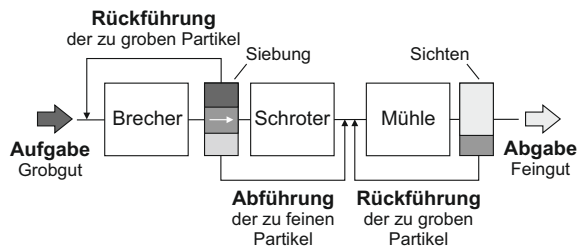


Bild 12.4 Hintereinandergeschaltete Zerkleinerungen

Das Grobgut (Aufgabegut mit hoher Partikelgröße) wird über einen Brecher vorzerkleinert. Nach Abtrennung und Rückführung der im gebrochenen Anteil vorliegenden großen Reststücke wird der Anteil mit mittlerer Partikelgröße einem Schroter und der Feinanteil direkt einer Mühle zugeführt. Durch einen Sichter kann das Feingut mit der gewünschten Partikelgröße abgeführt werden. Die nicht den Vorgaben entsprechenden Partikel werden zur Mühle zurückgeführt.

An dieser Stelle werden nur einige Beispiele der oben verwendeten Zerkleinerungsapparate besprochen, wobei in der Praxis zahlreiche unterschiedliche und auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasste Apparate existieren.

Ein typischer Apparat zur Grobgutzerkleinerung ist der **Backenbrecher**. Mit Durchsätzen von bis zu 1 200 t/h an meist hartem, sprödem Material zer-

kleinert dieser durch eine Druck- bzw. Schlagbeanspruchung des Aufgabeguts bis zu Partikelgrößen von ca. 40 – 50 mm. Die Zerkleinerungszone besteht aus einer fest stehenden und einer schwingenden „Backe“.

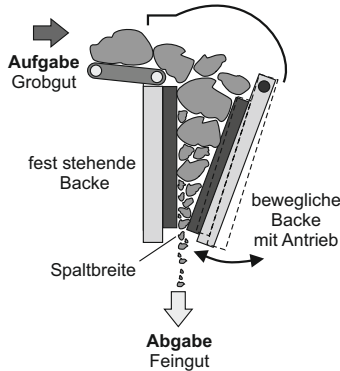


Bild 12.5 Schema eines Backenbrechers

Durch die Schwingung findet in stetem Wechsel ein Öffnen und Schließen der Backen statt, wobei das gebrochene Material unten herausfällt und neues Grobgut von oben „nachrutscht“. Eine Beeinflussung des Durchsatzes kann über die Backenneigung geschehen. Die Spaltweite entscheidet über die erhaltene Partikelgröße.

Zum Schroten kann eine **Prallmühle** verwendet werden. Dabei wird das Aufgabegut in den Zerkleinerungsraum, in dem sich eine rotierende Scheibe mit Schlagwerkzeugen und eine verstellbare Wand-

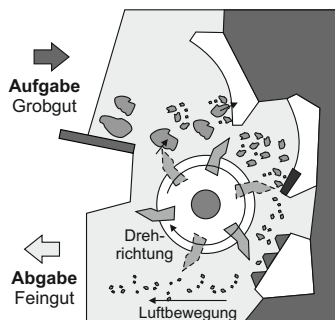


Bild 12.6 Schema einer Prallmühle

panzerungen befinden, eingebracht und im Flug durch Schlag- bzw. Prallwirkung mehrfach zerkleinert.

Hier ist der Durchsatz deutlich geringer anzusetzen als bei einem Backenbrecher (ca. 15 t/h). Die resultierende Partikelgröße liegt in einem Größenbereich von ca. 0,05 bis 0,5 mm. Um eine weitere Zerkleinerung des geschroteten Materials zu erzielen (Feinmahlen), werden z. B. **Kugelmühlen** eingesetzt. Dazu werden Mahlkörper in ein Rohr mit dem Aufgabegut eingebracht. Ein besonderes Merkmal einer Kugelmühle ist dabei die drehzahlabhängige Zerkleinerungsart. Bewegt sich das Rohr mit einer so hohen Umdrehungszahl, dass die Mahlkörper durch die Fliehkraft bis zu einer bestimmten Höhe an die Wand gedrückt werden und es dann zu einer Fallbewegung der Mahlkörper kommt, wird das Aufgabegut durch eine Schlagwirkung zerkleinert, was eine Grobmahlung nach sich zieht.

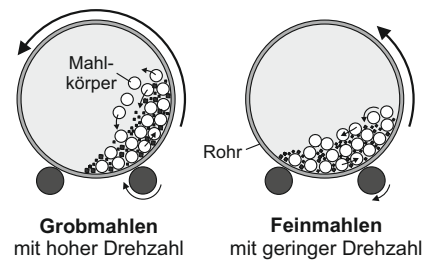


Bild 12.7 Schema einer Kugelmühle

Dreht sich das Rohr so langsam, dass es nur zu einer Abrollbewegung kommt, führt dies zu einer Feinmahlung, wobei die Wirkung der Zerkleinerung auf Scherung und Reibung zurückgeführt werden kann. Man erreicht so Partikelgrößen unter 0,01 mm. Die entscheidenden Größen bei diesem Verfahren sind die Größe der Mahlkörper und die Drehzahl des Rohrs. Es ist dabei nicht jede Drehzahl sinnvoll, weil es z. B. durch zu große Drehzahlen zum Mitrotieren der Mahlkörper an der Wandung des Rohrs kommen kann.

12.3 Flüssigkeitszerteilung

Eine Flüssigkeitszerteilung wird vorgenommen, um die Oberfläche zu vergrößern und Stoff- bzw. Wärmetransportvorgänge zu verbessern. Es ist wesentlich weniger aufwendig, eine Flüssigkeit zu zerteilen als einen Feststoff, da hier die Zusammenhängekräfte (Kohäsion durch VAN-DER-WAALSSche Kräfte) deutlich geringer ausfallen. Die grundlegenden Kräfte für eine Flüssigkeitsverteilung können allerdings ähnlich der Zerkleinerung durch Druck, Schlag oder Prall erzeugt werden.

12.3.1 Berieselung

Die in der Anwendung einfachste Methode ist das Berieseln. Beim **Berieseln** werden Flüssigkeitsströme erzeugt, die entweder in Strahlen, Bächen oder Tropfenform auftreten und daher keine ausgesprochen große Oberfläche aufgrund ihrer geringen Zerteilung aufweisen. Das Berieseln wird für die Flüssigkeitsverteilung genutzt, die z. B. an einem **Verteilerboden** stattfinden kann, wobei die Flüssigkeit auf Füllkörper gleichmäßig aufgebracht wird. Flüssigkeitsströme können auch durch kompaktere Apparaturen verteilt werden, z. B. **Brausen**. Bei einer Brause (vgl. Bild 12.8) fließt die Flüssigkeit durch einzelne Löcher, wobei der Volumenstrom mithilfe der BERNOULLI-Gleichung und der Kontinuitätsgleichung ermittelt wird.

$$\dot{V} = N_{\text{Löcher}} \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{Löcher}}^2}{4} \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (12-8)$$

Der Volumenstrom wird mit der Anzahl der Löcher $N_{\text{Löcher}}$, dem Durchmesser $d_{\text{Löcher}}$, der hydrostatischen Zulaufhöhe und dem strömungsmechanischen Korrekturfaktor (Ausflussziffer α) berechnet.

Die Ausflussziffer gibt dabei das Verhältnis der tatsächlich austretenden zur theoretischen Ausflussmenge wieder. Die Korrektur muss wegen der entstehenden Reibungs- (Geschwindigkeitsziffer) und Kontraktionseffekte (Einschnürung, Kontraktionsziffer) beim Ausfluss aus Öffnungen vorgenommen werden. Die Ausflussziffer, welche aus der

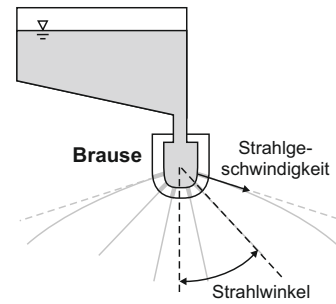


Bild 12.8 Schema einer Brausevorrichtung mit Zufluss

Zusammenfassung der Kontraktions- und der Geschwindigkeitsziffer resultiert, beträgt an scharfkantigen Löchern für Wasser z. B. $\alpha = 0,59$. Über den Volumenstrom bzw. die Geschwindigkeit an den Austrittsöffnungen und durch den Winkel der Löcher kann der Verteilradius beeinflusst werden.

12.3.2 Zerstäubung

Um eine feinere Zerteilung der Flüssigkeit zu realisieren und somit die Oberflächen noch deutlicher zu erhöhen, kommen häufig Düsen in unterschiedlichen Bauarten zum Einsatz. Als Düse bezeichnet man in diesem Fall ein sich innen verengendes Formstück, in dem eine Beschleunigung der Flüssigkeit (des Gases) stattfindet. Zum **Zerstäuben (Versprühen)** nutzt man die höhere Flüssigkeitgeschwindigkeit, wobei zwei Düsenarten unterschieden werden. Die zur Oberflächenvergrößerung notwendige Energie kann dabei nach dem Ansatz von RITTINGER (vgl. Abschn. 12.2) folgendermaßen erhalten werden:

$$W_z = \sigma_0 \cdot A$$

Zurückgeführt auf das ursprüngliche Flüssigkeitsvolumen, welches weder durch Druck noch durch Temperaturunterschiede beeinflusst werden sollte, folgt:

$$W_z = \sigma_0 \cdot \delta \cdot \frac{V}{d_{p,32}} \quad (12-9)$$

Die theoretisch aufzuwendende Energie zur Oberflächenvergrößerung ist nur ein Bruchteil der real aufzuwendenden Energie, in die zusätzlich die kinetischen Energien der Tropfen (z. B. Rotation, Translation), die Reibungsenergien und die elektrostatischen Energien eingehen. Der energetische Wirkungsgrad der Zerstäubung liegt somit analog zur Zerkleinerung zumeist unter 1 %.

Man unterscheidet zwei Düsentypen. In einer **Einstoffdüse** (Druckdüse) wird durch den anliegenden Druck die Flüssigkeit ohne weitere Hilfskomponenten zerstäubt. In einer **Zweistoffdüse** (pneumatische Düse) setzt man einen zweiten Stoff als Hilfsstoff ein, wobei es sich hierbei um ein sogenanntes **Treibmittel** (Gas oder Dampf) handelt. Druckdüsen erfordern eine Zuführung der Flüssigkeit bei einem Mindestdruck (ab 1,5 bar) und mit einem Mindestvolumenstrom, aus dem die Mindestgeschwindigkeit des austretenden Mediums resultiert. Die Zerstäubung ist bei dieser Düsenart durch einen festliegenden Viskositätsbereich der Flüssigkeit eingeschränkt. Eine Erhöhung des Druckes bei konstanten Bedingungen führt zu einem höheren Volumenstrom in den Düsen, respektive zu größeren Austrittsgeschwindigkeiten. Diese ziehen zugleich kleinere Tropfen nach sich.

Um eine Beurteilung des Strahlzerfalls vornehmen zu können, werden die REYNOLDS-Zahl am Düsenaustritt und die OHNESORGE-Zahl herangezogen.

$$Re_D = \frac{\rho_1 \cdot w_D \cdot d_D}{\eta_1} \quad (12-10)$$

$$Oh_D = \frac{\eta_1}{\sqrt{\rho_1 \cdot \sigma_{0,1} \cdot d_D}} \quad (12-11)$$

Die Herleitung der OHNESORGE-Zahl erfolgt über die WEBER-Zahl, die auf dem Verhältnis der Trägheitskräfte zur Oberflächenspannung beruht.

$$We_D = \frac{\rho_1 \cdot w_D^2 \cdot d_D}{\sigma_{0,1}} \quad (12-12)$$

$$Oh_D = \frac{\sqrt{We_D}}{Re_D} \quad (12-13)$$

Durch die OHNESORGE-Zahl wird das Verhältnis der Zähigkeitskräfte zu den Oberflächenkräften dargestellt. Die einzusetzenden Größen resultieren, wie bei der zu betrachtenden REYNOLDS-Zahl, aus der Charakteristik am Düsenaustritt. Dazu zählen der Düsendurchmesser d_D , die Austrittsgeschwindigkeit an der Düse w_D und die Stoffwerte der Flüssigkeit (Viskosität η_1 , Oberflächenspannung $\sigma_{0,1}$ und Dichte ρ_1). Weitergehend wird bei der Viskosität auch das dynamische Viskositätsverhalten beachtet, da in den Zerstäubungseinheiten starke Scherkräfte auftreten. Man unterscheidet lineare NEWTONSche Flüssigkeiten (häufigste Art), strukturviskose Flüssigkeiten (die Viskosität erhöht sich bei Scherung) und viskositätserniedrigende Flüssigkeiten (bei Scherung geringere Viskosität).

Eine Einteilung der an der Düse entstehenden Effekte erfolgt dabei nach drei Hauptkategorien: Zertropfen, Zerwellen und Zerstäuben (vgl. Bild 12.9).

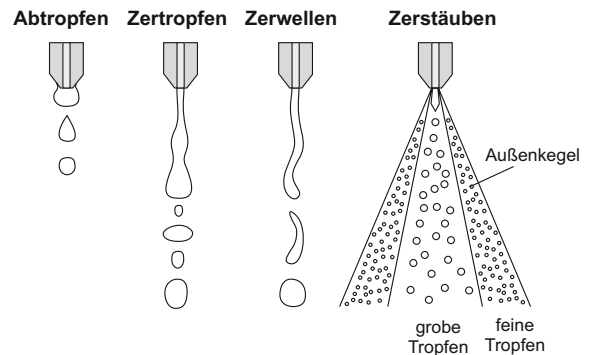


Bild 12.9 Auftretende Strömungstypen an einer Düse

Durch eine logarithmisch geteilte Darstellung der OHNESORGE-Zahl über der REYNOLDS-Zahl erhält man Bereiche, in denen die Mechanismen Zertropfen, Zerwellen und Zerstäuben vorliegen.

Die notwendige Düsenaustrittsgeschwindigkeit w_D zur Zerstäubung, beruhend auf den Theorien von V. OHNESORGE, kann anhand der Stoffwerte folgendermaßen berechnet werden:

$$w_D \geq 244 \cdot \frac{\eta_1^{0,1935} \cdot \sigma_{0,1}^{0,403}}{\rho_1^{0,597} \cdot d_D^{0,597}} \quad (12-14)$$

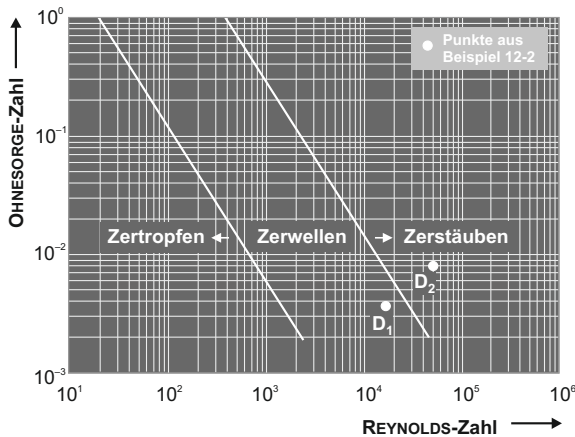


Bild 12.10 Auftragung der Strömungsbereiche einer Düse

Beispiel 12.2: In einem Verbrennungsraum wird Heptan mit einer Druckdüse versprüht. Für eine optimale Verbrennung muss der Brennstoff vorher bei einer Temperatur $T = 293,15 \text{ K}$ zerstäubt werden. Es ist anhand der Rahmenbedingungen zu prüfen, ob Düse 1 oder Düse 2 besser geeignet ist.

Düse 1: $d_{D1} = 1,0 \text{ mm}$, $w_{D1} = 10 \text{ m/s}$

Düse 2: $d_{D2} = 0,2 \text{ mm}$, $w_{D2} = 150 \text{ m/s}$

Die Stoffdaten bei $293,15 \text{ K}$:

Viskosität: $\eta_{\text{Heptan}} = 0,410 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

Dichte: $\rho_{\text{Heptan}} = 680 \text{ kg/m}^3$,

Oberflächenspannung: $\sigma_{\text{O,Heptan}} = 18,4 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$

$$Oh_1 = \frac{\eta_1}{\sqrt{\rho_1 \cdot \sigma_{\text{O,l}} \cdot d_D}} = \frac{0,410 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}}{\sqrt{680 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 18,4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}}}$$

$$Oh_1 = 0,0037$$

$$Re_1 = \frac{\rho_1 \cdot w_D \cdot d_D}{\eta_1} = \frac{680 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{0,410 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}}$$

$$Re_1 = 16585$$

Analog dazu: $Oh_2 = 0,0082$ und $Re_2 = 49756$

Nach Eintragen der Werte im Diagramm (vgl. Bild 12.10) erkennt man, dass nur Düse 2 eine Zerstäubung bewerk-

stelligen kann. Die Mindestgeschwindigkeiten werden nach Gleichung 12-14 berechnet und ergeben für Düse 1 $w_{D1} = 13,57 \text{ m/s}$ und für Düse 2 $w_{D2} = 35,48 \text{ m/s}$

In der Technik werden die unterschiedlichsten Ansprüche an eine Zerstäubung gestellt. Auf der einen Seite ist die Tröpfchengröße, auf der anderen vor allem auch ihre Verteilung für die Wirksamkeit einer Zerstäubung verantwortlich. Hier wird versucht, einen einzigen Wert zu formulieren, der eine ganze Verteilung beschreiben kann. Aus der Partikelanalyse ist allerdings bekannt, dass dies nur eine sehr vereinfachende Näherung bedeuten kann. Der **mittlere Volumendurchmesser** $d_{v0,5}$ beschreibt den Tropfendurchmesser, der das Gesamtvolumen in zwei Hälften teilt. Analog zur Partikeltechnik erhält man ihn mit $Q_3(x_p) = 0,5$. Der **mittlere SAUTER-Durchmesser** d_{32} ist für die Charakterisierung des Tröpfchenkollektivs als sehr geeignet anzusehen, da das Verhältnis des Volumens zur Oberfläche für den mittleren Durchmesser ebenso groß ist wie für das gesamte Sprühvolumen (Tropfenvolumen). Der **mittlere Volumendurchmesser** $d_{v0,9}$ ist der Durchmesser, bei dem 90% des Gesamtvolumens der Tropfen kleiner als dieser Wert sind. Des Weiteren existieren noch der **mittlere Volumendurchmesser** d_{30} und der **mittlere arithmetische Durchmesser** d_{10} , die in der weiterführenden Fachliteratur beschrieben werden.

Die entstehenden Zerteilungsergebnisse können begrifflich folgendermaßen eingeteilt werden:

Tabelle 12.2 Einteilung der Tropfengrößen

Tropfengröße in μm	Bezeichnung
bis 20	feinster Nebel
20 bis 100	feiner Nebel
100 bis 250	feiner Sprühregen
250 bis 1000	leichter Regen
1000 bis 6000	starker Regen

Neben der Tröpfchengröße ist unter Umständen auch die Aufprallkraft, d.h. die physikalische Wirkung des zerdüsten Tröpfchenkollektivs auf eine

Oberfläche, von entscheidender Bedeutung. Auch hier finden sich Abhängigkeiten vom Düsenaufbau, von dem vorherrschenden Flüssigkeitsvolumenstrom und dem Spritzwinkel. Ist der Winkel groß, ergeben sich daraus kleine Aufprallkräfte. Eine besonders hohe Wirkung auf die Oberfläche erzielen dabei sogenannte Vollstrahldüsen, wobei diese auch nicht unter die Zerstäuberdüsen fallen.

Exkurs 12.1 Innendruck des Tropfens

Die **Oberflächenspannung** hat einen starken Einfluss auf den im Inneren des Tropfens wirkenden Überdruck p_i , der sich wie folgt berechnen lässt:

$$p_i = \frac{4 \cdot \sigma_{0,l}}{d_{\text{Tropfen}}}$$

Je größer die Oberflächenspannung, desto größer der Innendruck. Ferner gilt auch, dass mit kleiner werdenden Tropfen (-durchmessern) der Innendruck stark zunimmt. Diese Tatsache führt dazu, dass sehr feine Tropfen in Gasströmungen eine runde Form beibehalten, wohingegen größere sich deformieren.

Als Beispiel soll ein Wassertropfen dienen: Bei 20 °C hat Wasser eine Oberflächenspannung von $72,75 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$.

Tropfendurchmesser in mm	Überdruck im Tropfen in bar
1	0,002892
0,001	2,892
0,0001	28,92

Ähnlich der Brause kann auch beim Zerstäuben nicht von einer linearen Ausbreitung der eingedüsten Tropfen ausgegangen werden. Daher muss die theoretische Breite des Tropfenkollektivs auf der Aufprallfläche korrigiert werden, da die Schwerkraft auf die zerstäubten Tropfen einwirkt. Die Spritzbreite verringert sich daher im Laufe der Höhenänderung auf die **effektive Spritzbreite**.

Der Spritzwinkel kann durch folgende Faktoren beeinflusst werden:

- Durch hohe Drücke verkleinert sich der Spritzwinkel, da die axiale Geschwindigkeitskomponente stärker als die Ablenkungskomponente anwächst.
- Aus sehr geringen Drücken resultieren zumeist auch kleinere Spritzwinkel.
- Der Spritzwinkel ist geringer bei Flüssigkeiten

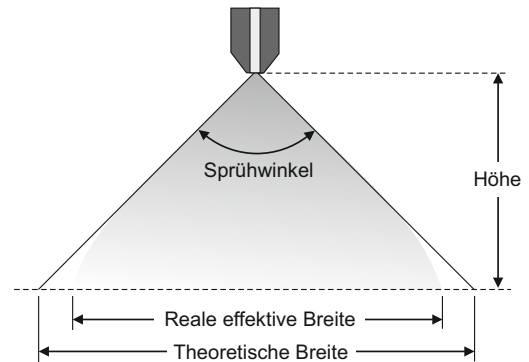


Bild 12.11 Theoretische und effektive Spritzbreite

mit einer hohen Viskosität und größer bei flüssigen Medien mit einer niedrigeren Oberflächenspannung.

In der Praxis werden die sinnvollen Einstellungen für den Anwendungsfall experimentell gefunden.

Um einen weiteren Anwendungsbereich zu erschließen, werden **Zweistoffdüsen** (pneumatische Düsen) eingesetzt. Damit ist es möglich, Flüssigkeiten mit höheren Viskositäten zu zerstäuben. Es ist frei wählbar, ob die Flüssigkeit durch das Treibmittel angesaugt oder durch Schwerkraft oder Überdruck der Düse zugeführt wird. Ferner kann eine Zerstäubung bei wesentlich kleineren Volumenströmen an Flüssigkeit realisiert werden. Die zur Zerstäubung notwendige Energie wird bei diesem Konstruktionstyp durch einen Gas- oder Dampfstrom (Treibmittel) mit hohen Geschwindigkeiten erzeugt. Die entstehenden Tropfen resultieren aus den starken Geschwindigkeitsunterschieden der flüssigen und der gasförmigen Phase (vgl. Bild 12.12), was zu Druckwellen und zum „Zerreißen“ der Flüssigkeit in Tropfenform führt. Auf diese Weise können auch unter vergleichsweise zur Druckdüse höherviskose Flüssigkeiten in sehr feine Tropfen überführt werden. Auch hier kann der Gasstrahl axial oder mit Drall die Düse verlassen, wobei die Flüssigkeit durch den entstehenden Unterdruck angesaugt wird (Injektorprinzip). Durch den Ort des Zerstäubens wird in folgende Prinzipien unterteilt:

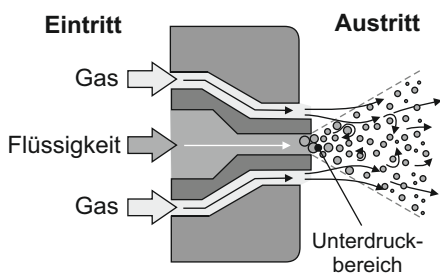


Bild 12.12 Funktionsweise einer Zweistoffdüse

Außenmischung

Das Gas verlässt die Düse, und erst außerhalb trifft es mit der Flüssigkeit zusammen, wobei die Zerstäubung stattfindet. Innerhalb der Düse liegen getrennte Förderkanäle vor, was den Vorteil hat, dass beide Volumenströme frei regelbar sind und keine Verstopfungen durch gegenseitige Beeinflussungen auftreten können. Höhere Gasdrücke führen zu feinen Tropfen, die allerdings eine hohe Geschwindigkeit aufweisen.

Innenmischung

Werden Gas- und Flüssigkeitsstrom innerhalb der Düse vermischt und dann erst versprüht, ist der Druck die entscheidende einstellbare Größe. Durch die Wahl der Größe der Austrittsbohrung begrenzt man den Volumenstrom des austretenden Strahls. Dadurch sind die Einstellmöglichkeiten dieser Düsenform begrenzt, wobei man allerdings im Vergleich zur Außenmischung normalerweise niedrigere Tropfengeschwindigkeiten erhält.

Zweistoffdüsen sind weniger anfällig gegen sich ändernde Volumenströme als Druckdüsen, und der Sprühkegel zeichnet sich durch eine homogene Tröpfchengrößenverteilung aus. Selbst Suspensionen sind versprühbar, ohne einen großen Verschleiß der Bauteile nach sich zu ziehen.

Die resultierenden Tropfen sind recht gleichmäßig eng verteilt, was bei einigen Prozessen von enormer Wichtigkeit ist (z. B. Sprühlackierung). Als nachteilig erweisen sich der niedrige energetische Wirkungsgrad und die Kosten für das Druckgas.

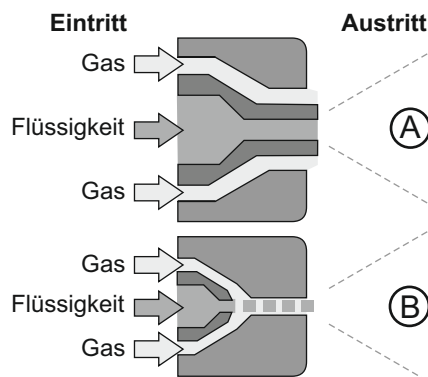


Bild 12.13 Außen- (A) und Innenmischung (B) an einer Düse

12.3.3 Zerspritzung

Beim Zerspritzvorgang werden die Tropfen durch die mechanische Wirkung eines bewegten Werkzeugs erzeugt. So kann z. B. durch Rotation eines Flügelrads durch feststehende Elemente Wasser zerspritzt und in den angrenzenden Gasraum fein verteilt ausgetragen werden. Damit ähneln das Verfahren und die verwendeten Apparaturen deutlich mehr der Zerkleinerungstechnik als die Zerstäubung, da sie auf Schlag-, Stoß- und Prallvorgängen beruhen. Dabei können die beweglichen Teile in eine Flüssigkeit eintauchen, aber auch mit bewegten Flüssigkeitsströmen betrieben werden. Vorteilhaft sind häufig der gasseitige geringe Druckverlust und die hohen Durchsatzmengen.

12.4 Begasung

Unter Begasen (Dispergieren eines Gases) versteht man das Einbringen fein verteilter Blasen in ein flüssiges Medium zur Vergrößerung der Kontaktfläche zwischen Gas und Flüssigkeit. Wie bei den Oberflächenvergrößerungsmaßnahmen Zerstäubung und Zerkleinerung dient dieses Verfahren der Verbesserung von Wärme- und Stoffübergängen. Dies kann zu effektiveren Reaktionen oder auch in der biologischen Verfahrenstechnik zur optimierten Sauerstoffversorgung von Mikroorganismen führen.

Sachwortverzeichnis

A

- Abgas 356
- Abgeberphase 339
- Abhängigkeit der Reynolds-Zahl und des Widerstandsbeiwerts 213
- Ablaufstrom 315
- Abschätzung der Messunsicherheit 31
- Abscheidegrad 216
- Abscheiden 218
- Absenkung des Druckes 317
- Absetzen 210
- Absetzprozesse 210
- Absorbat 339
- Absorbens 339
- Absorbensverhältnis 344, 348
- Absorpt 339
- Absorption 339
- Absorption von CO₂ 355
- Absorption, physikalische 340
- Absorptionsgeschwindigkeit 367
- Absorptionsgrad 354
- Absorptionskolonne 357
- Absorptiv 339
- Abstoßung zwischen den Molekülen 58
- Abtrennen unerwünschter Komponenten 197
- Abtriebsgerade 323
- Abtriebsteil 321
- 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 betriebener 376
- Adsorption 339, 359
- Adsorptionsanlage, (quasi-)kontinuierliche 376
- Adsorptionsbetrieb, kontinuierlicher 376
- Adsorptionsisobare 365
- Adsorptionsisothermen 365
- Adsorptionsmittel 361 f.
- Adsorptiv 132
- Agglomerieren 252 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 362
- amorph 49
- Ampere 15
- Analyse, elektrische 195 f.
- Analyse, optische 195
- Änderung der Anlagenkennlinie 265
- Änderung des Verlaufs der Pumpenkennlinie 265
- Anfertigung einer grafischen Darstellung 35
- Anforderungen, sicherheitstechnische 77
- Angaben zur Wärmedämmung 80
- Anlagenkennlinie 264
- Anlagerung 359
- Anomalie des Wassers 46
- Ansaugen 269
- Anteilsgößen 89
- Antriebsmotor 268
- Anwendungsgebiete 249
- Anzahl der Übertragungseinheiten (NTU) 334
- Anziehung zwischen den Molekülen 58
- Apparate 79 f.
- Äquivalentdurchmesser 185
- Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) 84
- Armaturen 80
- Arrhenius-Gleichung 118
- Arten der Förderung 258
- Aufbauagglomeration (Pelletieren) 253
- Aufbereitung am Ende der Filtration 228
- Aufgabenstellung 80
- aufkonzentriert 284
- Aufnehmerphase 339
- Ausbeute 90
- Ausdehnen 269
- Ausdehnungskoeffizient, linearer 46
- Ausgangsgemisch 304
- Außenmischung 207
- Austauschzonen (Böden) 319
- Austritt 269
- Auswertung linearer Zusammenhänge, grafische 36
- Auswertung von Messdaten, grafische 34
- autokatalytisch 137
- Avogadro-Konstante 39
- Axialpumpen 261
- azeotrop 305
- Azeotropie 307 f.

B

Backenbrecher 201
 Basenkatalyse 138f.
 Basisgrößen 14
 Bauarten der Filtrationsmodule 234
 Bauarten von Trocknern 299
 Bauform eines Wärmeaustauschers 283
 Becherwerke 272
 Bedeckungsgrad 361
 Begasen einer Flüssigkeit 250
 Begasung 197, 207
 Beispiele für Reaktionen 0. Ordnung 105
 Beispiele für Reaktionen 1. Ordnung 106
 Beladung 132, 343
 Beladung am Gasaustritt 346
 Beladung im Gaseintritt 346
 Beladung im Waschmitteleintritt 346
 Beladungen, geringe 368
 Beladungen, hohe 368
 Beladungskapazität 362
 Beladungskapazität, maximale 364
 Beladungsverteilung 372
 Beladungswert, tatsächlicher 374
 Benennung der Ein- und Ausgangsstoffe 79
 Benennung der Stoffe zwischen den Stufen 79
 Benetzungsfaktor 351
 Beobachtungseinheit 26
 Beobachtungsmenge 26
 Beobachtungsmerkmale 26
 Berechnung 262, 302, 344
 Berechnung und Auswertung von Verweilzeitverteilungen 172
 Berechnung von Rührkesselkaskaden 163
 Berechnungen zur Kristallisation 289
 Berechnungsbeispiele 179
 Bereich 29
 Bereich, kinetischer 131
 Bereich, laminarer 246
 Bereich, turbulenter 246
 Berieseln 197, 203
 Berieselung 203
 Beschreibung der Messunsicherheit 31
 Beständigkeit 362
 Bestimmung der HTU-Werte 353

Bestimmung der NTU-Werte 352
 Bestimmung der Tropfenmasse (Stalagmometer) 49
 Bestimmung von Reaktionsordnungen 109
 Bestimmungsmethoden, experimentelle 112
 Bestwert 29
 BET-Gleichung 370
 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 208
 Betriebspunkt 265
 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 245
 Bezeichnung der einzelnen Stufen 79
 Bezeichnung und Menge der Energieart 79
 Bezugsgröße, unveränderliche 294
 Bilanzen 101
 Bilanzen an einer Rektifikationskolonne 321
 Bilanzgebiet 99
 Bilanzierung 344
 Bilanzierung von Adsorbieren 371
 Bilanzlinie 352
 bimolekular 109
 Binäre Phasengleichgewichte 55
 Bingham-Fluid 71
 Binodalkurve 59

Biokatalysatoren 126
 Biokatalysatoren, immobilisierte 127
 Bitumen 337
 Blasengase 208
 Blitzlichtfotolyse 112
 Bodenstein-Zahl 180
 Boyle-Temperatur 42
 Bragg-Gleichung 51
 Bravais-Gitter 50
 Brechen 197f.
 Bruchvorgang 200
 Brunauer-Emmett-Teller-Isotherme (BET) 133

C

Candela 15
 Charakterisierung von Partikeln und dispersen Systemen 184ff.
 Chemisorption 132, 134, 339f., 360
 Clausius-Clapeyron-Gleichung 54f.

D

Dampf 280
 Dampf, gesättigter 280
 Dampf, überhitzter ungesättigter 281
 Dampf, überkritischer 281
 Dampfbelastung 333
 Dampfdruck 78, 278
 Dampfdruckerniedrigung 60
 Dampfdruckerniedrigung, relative 56
 Dampfdruckmaximum 306f.
 Dampfdruckminimum 306, 308
 Darstellung, grafische 302
 Darstellung von Messreihen 26
 Daten der Zentrifuge, konstruktive 221
 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 339, 342, 358
 Desorptionsgeschwindigkeit 367
 Destillation 310
 Destillation und Rektifikation 300ff.
 Destillation, absatzweise (einfache) 310
 Destillation, einfache 310

- Destillation, einfache diskontinuierliche 310
 Destillation, fraktionierte 310, 314
 Destillation, kontinuierliche 315
 Destillationslinien 337
 Destillatstrom 315
 Dichte 45, 78
 Dichte und Volumenausdehnung 45
 Dichtstromförderung 274
 Differenzialgleichungen 104
 Differenzialmethode 110, 195
 Differenzielle Verweilzeitverteilung 180
 Diffusion, äußere 131
 Diffusion, innere 131
 Diffusion, molekulare 131
 Diffusionsgebiet, äußeres 131
 Diffusionsgebiet, inneres 131
 Diffusionsvorgänge 361
 Diffusor (große Ventilatoren) 268
 Dilatanz 71
 diskontinuierlich 89
 Dispergieren von Flüssigkeiten 250
 Dispersionsmittel 184
 Dispersionsmodell 175
 Dispersionszustand 184
 Dosierbarkeit 197
 Dosis 84
 Drehkolbenverdichter 270
 Dreiecksdiagramme 337
 Dreieckskoordinatensysteme 59
 Dreikomponentengemische 337
 Dreiphasenreaktionen 133
 Druck, hydrostatischer 48
 Druck, konstanter 230
 Druck, messbarer 67
 Druck, osmotischer 62
 Druck und Osmose 62
 Druckabfall, konstanter 230
 Druckdifferenz 228, 262
 Druckförderanlagen 273
 Druckstufe 80
 Druck-Temperatur-Phasendiagramm 52
 Druckverhältnisse 227
 Druckverlust in Formstücken und Armaturen 75
 Druckverlust in Rohrleitungen 73
 Dual-Flow-Böden 319
 Dünnstromförderung 273
 Durchbruchskurve (DBK) 373
 Durchflüsse 80
 Durchflüsse und Mengen der Energien 79
 Durchflüsse und Mengen der Stoffe 79
 Durchgang 188
 Durchmesser, mittlerer 186
 Durchmesser, mittlerer arithmetischer 205
 Durchmischungskennzahl 247
 Durchregnen 320
 Durchströmungseigenschaften, verbesserte 252
- E**
- Ebene Wände 282
 Edukte 77, 88
 Effekt, katalytischer 140
 Eigenschaften der Suspension 228
 Eigenschaften des Filtermittels 228
 Eigenschaften von Gemischen 83
 Eigenschaften, kolligative 60
 Eindampfen 284
 Einfluss des Rücklaufverhältnisses 329
 Einführung und Grundbegriffe 88
 Einheit 14
 Einheitensystem, Internationales 14
 Einlaufdüse 268
 einphasig 128
 Einstoffdüse 204
 Einteilung der Agglomeration 253
 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 238
 Entmischung, vollständige 237
- 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 302
 Exergie 95
 exergonisch 95
 exotherm 93
 Explosionsgrenzen 83
 Extinktionsmessung 195
 Extrusion 256
 Exzessvolumen (Volumendilatation), positives 19
 Exzessvolumen (Volumenkontraktion), negatives 19
- F**
- Feed 304, 321
 Fehler 25
 Fehlerabschätzung 33
 Fehlerarten 25
 Fehlerfortpflanzung 32
 Fehlerfortpflanzung, gaußsche 33
 Fehlerfortpflanzung, lineare 33
 Feingutkegel 200
 Feinheitsmerkmale 186
 Feldstörung 196
 Festkörper, idealer 49
 Feststoff 197
 Feststoffbilanz 215
 Feststoff-Feststoff 210
 Feststoff-Flüssigkeit 210
 Feststoff-Gas 210
 Feststoffförderung 271
 Feststoffmischung, pneumatische 239
 Feuchte, absolute 41
 Feuchte, relative 41, 294
 Feuchtebelastung 294
 Feuchtegrad 41
 Filmdiffusion 129
 Filterkuchen 227
 Filtermittel 227
 Filtermittel, primäres 227
 Filtermittel, sekundäres 227

- Filtern 227
 Filterstützen 228
 Filtrat 228
 Filtrationsprozesse 227
 Filtrationsvorgang 228
 Filtrieren 210, 227
 Flammpunkt 83
 Fliehkraftsichter 195
 Fließgleichgewicht 142
 Fließrichtung 79
 Fließrichtung der Hauptstoffe 79
 Fließschemata von Anlagen 78
 Fließverhalten, Newtonsches 71
 Fließverhalten, verbessertes 252
 Fließweg 79
 Flokkulanten 226
 Flokkulation 225f.
 Flotat 226
 Flotation 226
 Flüchtigkeit, mittlere relative 327
 Flüchtigkeit, relative 305
 Fluid 361
 Fluide, ideale 67
 Fluide, inkompressible 65
 Fluide, kompressible 65
 Fluide, nicht-Newton'sche 71
 Fluide, reale 67
 Fluide, überkritische 53
 Fluid-Fluid-Reaktion 134
 Fluidisieren 239
 Fluidität 47
 flüssig - dampfförmig 300
 Flüssiger Zustand 45
 Flüssigkeit 197
 Flüssigkeit-Flüssigkeit 210
 Flüssigkeitsbelastung 333
 Flüssigkeitsreaktionen, einphasige 138
 Flüssigkeitsseite 353
 Flüssigkeitszerteilung 197, 203
 Flutgrenze 333
 Flutpunkt 333
 Folgereaktionen 116
 Förderbänder 271
 Förderhöhe 262
 Fördermittel 258
 Förderstrom 262
 Förderung mit Pumpen 259
 Förderung, pneumatische 273
 Förderwege 258
 Formfaktor 186
 Fouling 233
 Fraktionen 314
 Freifallmischer 238
 Freiheitsgrade 52
 Freundlich-Gleichung 369
 Füllen der Lücken 255
 Füllkörperkolonnen 332
- G**
- Gas, absorbierendes 342
 Gas, ideales 38
 Gasbelastungsfaktor 374
 Gase, reale 42
 Gas-Flüssigkeit 210
 Gasgemische 19, 40
 Gasgleichung, allgemeine 18, 39
 Gasmenge, reinigende 346
 Gasphase 353
 Gasreaktionen, endotherme 137
 Gasreaktionen, exotherme 137
 Gas-Stripping 357
 Gasverteilung 197
 Gasvolumina 41
 Gaußsche Normalverteilungsfunktion 191
 Gebiet, kinetisches 132
 Gefrierpunkt abgesenkter 61
 Gefrierpunktserniedrigung 61
 Gefriertrocknung 299
 Gegenstrom 149
 Gegenstromdestillation 319
 Gegenstromprinzip 282
 Gegenstromsichter 195
 Gehalts- und Konzentrationsangaben 19
 Gemisch, ideales 19, 300
 Gemisch, reales 306
 Gemische, binäre 300
 Gemische, einphasige 56
 Gemische, heterogene 19
 Gemische, homogene 38
 Gemische, reale 19
 Gemische, zweiphasige 58
 Gerade 346
 Geradenfunktion 105
 Geradrohrwärmeaustauscher 283
 Gesamtbilanz 214, 321
 Gesamtumsatz 162
 Gesamtverfahren 77
 Gesamtwiderstand beider Diffusionsschichten 352
 gesättigt 288
 Geschwindigkeit 211
 Geschwindigkeitsgesetz 103
 Geschwindigkeitskonstante 117
 Geschwindigkeitsunterschiede 263
 Gesetz der abgewandten Hebelarme 304
 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 374
 Gleichgewichtsdiagramm 304
 Gleichgewichtskoeffizienten 305
 Gleichgewichtslinie 352
 Gleichgewichtslinie, lineare 353
 Gleichgewichtslinie, linearer Verlauf 349
 Gleichgewichtsreaktionen 114
 Gleichstrom 147, 149
 Gleichstromprinzip 349
 Gleichstromverfahren 287
 Gleichung, lineare 367
 Gleichung von Bernoulli 67
 Gleichung von Torricelli 69
 Gliederbandförderer 272
 Glockenboden 320
 Granulierkonus 254
 Granulierteller 254
 Granuliertrommel 254
 Grenzflächenenergie, freie 200
 Grenzflächenenergie, spezifische freie 200
 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 271
Gütegrad, isentroper 267

H

Haftflüssigkeit 293
Haftkräfte 253
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 362
Häufigkeit, absolute 27
Häufigkeit, relative 27
Häufigkeitsverteilungen einer Stichprobe 26
Hauptfließlinien 79
Hauptprodukt 115
Hauptsätze der Thermodynamik 93
Heißdampf 281
Heizleistung 315, 332
Hemmung, kompetitive 144
Hemmung, nichtkompetitive 144 f.
Hemmung, unkompetitive 144 f.
Henrysches Gesetz 340
heterogen 128
Heterogenkatalyse 140
HETP-Wert 334

Hilfsstoffe 77
Histogramm 27
Höhe einer Übertragungseinheit (HTU) 334
Höhe eines Adsorberbetts 373
Höhe, geodätische 262
Höhenkriterium 249
homogen 19, 128
Homogenkatalyse 140
HTU-Wert (height of transfer unit) 352
Hydrolasen 141
hypertonisch 62
hypotonisch 62
Hysterese 366

I

Idealreaktor 175
Impulsmethode 171
Inertheit 362
Inhibitoren 143
Inkompressibilität von Flüssigkeiten 44
Innenmischung 207
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 366
Isothermen, ungünstig verlaufende 366
isotonisch 62
isotrop 46

K

Kanalbildung 169
Kapillarflüssigkeit 293
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 264
Kelvin 15
Kenngrößen einer Verteilung 187
Kenngrößen eines Absorbers 354
Kennzahlen, dimensionslose 100
Kesselzahl 180
Kinetik chemischer Reaktionen 102 ff.
Kinetik komplexer Reaktionen 113
Klärfläche, äquivalente 220
Klärung 214
Klasseneinteilung 27
Klassieren 216
Klassifizierung chemischer Reaktionen 88
Klassifizierung von Reaktoren 146
Knudsen-Diffusion 130
Koagulant 225
Koagulation 225
Koeffizienten (Umsatzzahlen), stöchiometrische 90
Koexistenzkurve 53
Kolbenblasenströmung 209
Kolonnen 319
Kolonnenkopf 322
Kompaktkatalysatoren 125
Komplex, aktivierter 120
Komponente, leichter siedende 302
Komponenten, gasförmige 337
Kompression 256
Kondensationsenthalpie 54
Kondensationskurve 303
Kondensationsprozess 361
Konoden 57, 304
Konstante, ebullioskopische 61
Konstante, katalytische 143
Konstante, kryoskopische 62
Konstruktion der Stufen 329
Kontaktstellen 253
Kontaktstrocknung 293, 297
kontinuierlich 89
Kontinuitätsgleichung 66 f.
Konvektion 99, 281
Konvektionstrocknung 293
Konzentration 84

- Konzentration, wirksame 22
Konzentrationsbeiwert 212
Konzentrationsgrößen 89
Konzept der Übertragungseinheit 334
Kopf 321
Kopfrücklauf 321
Kopf-Rücklaufverhältnis 321
Körnerkollektive 184
Korngrößenverteilung 197
Korrosionsverhalten der Werkstoffe 77
Kraft, treibende 294
Kreuzstrom 149, 283
Kreuzstromboden 319
Kristallgitter 49
Kristallgitter und Kristallsysteme 49
kristallin 49
Kristallisation 54, 288 ff.
Kristallisationsenthalpie 54
Kristallisationsverdampfer (vertikale Bauweise) 291
Kristallisationsstrom 290
Kristallisieren 284
Kristallwasser 289, 293
Kritische Größen eines Gases 43
Kuchenfiltration 227
Kugelmühlen 202
Kühlkristallisation 289
Kühlkristallisation, reine 290
Kurzschlussströmung 169
- L**
Labyrinthfaktor 130
Lagedruck 67
Lagerbarkeit 197
Länge des ungenutzten Betts 374
Längenausdehnung 46
Langlebigkeit 362
Langmuir-Gleichung 367
Langmuir-Isotherme für zwei Stoffe 133
Lauf rad 268
Lauf rad, halbaxiales 261
LC50-Wert 84
LD50-Wert 84
Leichtbenzin 337
Leichtsieder 301, 309
Leistungsbedarf 245
Leitung (konduktive Ströme) 99
Lichtstreuung 195
Ligasen 141
- Linearisierung 34
liquid 94
Lockerungsgeschwindigkeit 239
Löschverhalten 148
Löslichkeit 62
Löslichkeit von Gasen 63
Löslichkeit, maximale 63
Lösung, echte 60
Lösung, gesättigte 289
Lösungen 19, 288
Lösungen, kolloide 60
Lösungen, verdünnte 58, 60
Lösungsmittel 288
Lösungsmittelverhältnis 344
Luft, feuchte 294
Lüfter und Gebläse 266
Lyasen 141
- M**
Mahlen 197 f.
Mahlgrenze 198
Makrokinetik 88, 129
Makroporen 362
Mammutpumpenprinzip 286
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 373
Massenwirkungsgesetz 96, 136
McCabe-Thiele-Diagramm 323
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 362
- Messen einer Partikelgrößenverteilung 194
Messgröße 29
Messgrößen, konzentrationsabhängige 111
Messschema 78, 82
Messtechnik 79
Messung der Verweilzeitverteilungen 171
Messunsicherheit, absolute 25
Messwerte, zufällige Abweichung 26
Meter 15
Methanol 302
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 362
Mindestvolumen 19
Mischbarkeit, verbesserte 252
Mischen 236 ff.
Mischen von Feststoffen 238
Mischen von Fluiden, statisches 241
Mischen von Flüssigkeiten, dynamisches 39
Mischer mit erhöhter Geschwindigkeit 239
Mischer mit geringer Geschwindigkeit 239
Mischgüte 236, 247
Mischkristalle 19
Mischstromförderung 274
Mischung im Molekülmaßstab 169
Mischung, ideale 56, 58
Mischungen, nichtideale 57
Mischungsgleichung 22
Mischungsgrad 238
Mischungskreuz 23
Mischungslücke 308 f.
Mischungszustand 184
Mischzeit 247
Mitreißen 320
Mitrotieren der Flüssigkeit 244
Mittel, arithmetisches 29
Mitteldestillate (leicht) 337
Mitteldestillate (schwer) 337
Modalwert 190

Modelle, empirische 365
Mol 15
Molalität 22, 61
Molekulardiffusion 130
Molekularität 109
Molekularität einer Reaktion 109
Molekularsiebe 363
Momente, gewöhnliche 176f.
Momente, zentrale 176f.
Monodispersität 184
monomolekular 109
MTZ (Mass Transfer Zone) 373

N

Nachleitwerk 268
Näherungsformel nach Rittinger 199
Näherungsgleichung nach Bond 199
Näherungsgleichung nach Kick 199
Nanofiltration 233
Nassdampf 280
Naturumlauf 286
Naturzeolithe 364
Nebenprodukte 77, 115
Nennweite 80
Nernstscher Verteilungssatz 340
Nichtidealität, globale 169
Nichtidealität, lokale 169
Normalverteilung, logarithmische 191
Normalverteilung nach Gauß 30
Normvolumen 342
NTU/HTU-Konzept für die Absorption 350
NTU-Wert (number of transfer units) 352

O

Oberfläche 186
Oberfläche, massenspezifische 187
Oberfläche, volumenspezifische 187
Oberflächendiffusion 130f.
Oberflächenenergieerneuerungstheorie (Turbulenztheorie) 350
Oberflächenenergieerneuerungstheorie von Dankwerts 350
Oberflächenspannung 48
Oberflächenzuwachs 197
Oxidoreduktasen 141

P

Packungen 333
Packungskolonnen 332

Parallelbetrieb 286
Parallelreaktionen 115
Parallelstromprinzip 282
Parameter, apparatetechnische 208
Parameter, stoffliche 208
Partialdruck 40
Partialdruck, zunehmender 342
Partialdrücke, hohe 365
Partialvolumen 40
Partikeldurchmesser 185
Partikeleigenschaften, definierte 252
Partikelgröße, abgeschiedene 227
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 354, 361
Phase, gasförmige 361
Phasen, zwei unterschiedliche 309
Phasendiagramm 52
Phasendiagramme binärer Systeme 306
Phasengesetz von Gibbs 52
Phasengleichgewichte, binäre 55
Phasengleichgewichte, ternäre 59
Phasenumwandlung von Reinstoffen 52
Phasenwechsel 361
Physisorption 132, 339, 360
Poiseuille-Strömung 130f.
Pol 295
Polydispersität 184
Porendiffusion 130
Porenvolumen, relatives 130
Potenzial, intermolekulares 19
Potenzverteilung nach Gates-Gaudin-Schumann 190
Prallmühle 202
Pressagglomeration (Formpressen) 255
Pressen 256
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, 307
Punkt, kritischer 43, 53

Q

Quellflüssigkeit 293
Querstromfiltration 227, 232

R

Radialpumpen 261
Radialventilatoren 268
Radikale 126
Raoult'sches Gesetz 56, 300
Raumgruppen 50
Rayleigh-Gleichung 311
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 283, 357
 Regiospezifität 127
 Reibungsverluste 262
 Reinstoffgrößen 83
 Rektifikation 317 f.
 Rektifikationsverfahren 334
 Rekuperatoren 283
 Relaxationsmethoden 113
 Resublimationsenthalpie 54
 reversibel 94, 113
 Reversible Hemmung von Enzymen 143
 Rheopexie 71
 Rohrbündelwärmeaustauscher 283
 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 282
 Rollagglomeration 254
 Röntgenstrahlbeugung 51
 Röntgenstrukturanalyse 51
 Roots-Gebläse (Drehkolbengebläse) 268
 RRSB-Verteilung 192
 R-Sätze 83
 Rücklaufverhältnis 324
 Rücklaufverhältnis, minimales 327
 Rücklaufverhältnis, unendliches 326
 Rückstand 188
 Rückvermischung, partielle axiale 169
 Rühren von nicht-Newtonschen Flüssigkeiten 248
 Rührer, axial wirkende 243
 Rührer, radial wirkende 243
 Rührer, tangential wirkende 243
 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 256
- S**
- Salz, kristallflüssigkeitsfreies 290
 Sammler 226
 Satttdampf 280
 Sättigung eines Gases mit Feuchtigkeit 41
 Sättigungsgrad 355
 Sättigungswert 368
 Satz von Hess 94
 Saugförderanlagen 275
 Säurekatalyse 138 f.
 Sauter-Durchmesser 186
 Sauter-Durchmesser, mittlerer 205
 Scale-up 248
 Scale-up-Kriterien 248
 Scale-up-Maßstabsübertragung 248
 Scale-up-Probleme 84
 Schar von Dampfdruckkurven 302
 Schätzung von Unsicherheiten 30
 Schaufeltrockner 299
 Schäumer 226
 Schemata, spezielle 78
 Scherrate 70
 Schicht, monomolekulare 361
 Schleuderziffer 219
 Schlüsselkomponenten 82
 Schlüssel-Schloss-Prinzip 126
 Schmelzen 54
 Schmelzen und Kristallstrukturänderungen 55
 Schmelzenthalpie 54, 78
 Schmelztemperatur 78
 Schmelzvorgänge 256
 Schneckenextruder 257
 Schneckenförderer 272
 Schneckenzentrifuge (Dekanter) 222
 Schnitt (Cut) 315
 Schnittpunktsgerade 325
 Schubspannung 70
 Schwerbenzin 337
 Schwerkraft 258
 Schwersieder 301
 Sedimentation 210
 Sedimentationsanalyse 194
 Sedimenter 214
 Segregation 168
 Segregationsgrad nach Danckwerts 238
 Sekunde 15
 Selektivität 90, 362
 Separator (Tellerzentrifuge) 222
 Sicherheit, statistische 30
 Sichten 195
 Siebboden 320
 Siebklassierer 216
 Siebung (Analysen-) 194
 Siebung eines Feststoffs 189
 Siedebereich 304
 Siedediagramm 303
 Siedekurve 303
 Siedepunkt 317
 Siedepunktserhöhung 61
 Siedepunktmaximum 306, 308
 Siedepunktminimum 306 f.
 Siedetemperatur 78
 Siedeverzug 317
 Silicagel (Kieselgele) 363
 Simultanreaktionen 115
 Sintervorgänge 256
 Skalen, lineare und nichtlineare 34
 Solvat 289
 Sonderfälle 354
 Sorption 132, 339 ff.
 Sphärizität 186, 212
 Spiralförderer 272
 Spritzbreite, effektive 206
 Sprudelzone 321
 Sprühzone 321
 Sprungmethode 171
 S-Sätze 83
 Stabilitätskriterium 95
 Standardabweichung 30
 Standardbedingungen (SATP) 40
 Standardbildungsenthalpie 94
 Standardenthalpien 93
 Standardreaktionsenthalpie 94

Standardsiedetemperatur 53
Staudruck 67
Staugrenze 333
Steighöhenmethode 48
Stereospezifität 127, 141
Stoffaustauschprozesse 319
Stoffbilanz 163
Stoffbilanzen 98, 100, 151, 160
Stoffdaten 82, 221
Stoffdurchgangskoeffizienten 354
Stoffdurchgangskoeffizienten,
gasseitige 354
Stoffe, teillösliche 309
Stoffmenge 20
Stoffmengenanteil 20, 302
Stoffmengenkonzentration 21
Stoffmengenstrom des Dampfes 315
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 353
Stoffwerte für Reinstoffe und
Gemische 78
Stopped-Flow-Technik 112
Stoßenergie, kritische 118
Stoßtheorie 123
Strahlgase 208
Strahlpumpen 261
Strahlungstrocknung 299
Strähnenförderung 274
Strähnenförderung über ruhender
Ablagerung 274
Streuung 31
Streuung der Messwerte 25
Strippingfaktor 349
Stromklassierer 216
Strömung mit Reibung 70
Strömung, laminare 70, 72, 74, 213
Strömung ohne Reibung 67
Strömung, segregierte 174
Strömung, turbulente 73 f., 213
Strömungsbereich, heterogener 209
Strömungsbereich, homogener 209
Strömungsförderer 273
Strömungsgeschwindigkeit, mittlere
65

Strömungsmethoden 112
Strömungsrrohr, ideales 175
Strukturgrößen 89
Strukturviskosität 71
Studentscher Faktor 31
Stufenkonstruktion 328
Stufenwirkungsgrad 348
Stufenwirkungsgrad, mittlerer 330
Stufenzahl, unendliche 348
Sublimationsenthalpie 54
Substratspezifität 140
Summenhäufigkeit, absolute 27
Summenhäufigkeit, relative 27
Sumpf 321
Suspendieren 249
Suspensionsverfahren 194
System 92
System, geschlossenes 92
System, isoliertes 92
System, offenes 92
Systeme und Zustandsgrößen 92
Systeme, heterogene 128
Systeme, homogene 128

T

Teilen 218
Teilkondensation 280, 329
Teilumsatz 162
Temperaturen, niedrige 365
Temperatur, steigende 342
Temperaturabhängigkeit der
Penicillinhydrolyse 34
Temperaturabhängigkeit der
Reaktionsgeschwindigkeit 118
Temperaturführung 89
Temperaturveränderung
(Wärmetönung) 341
Theorie der Reaktionsgeschwindigkeit
117
Theorie des aktivierten Komplexes
120
Theorie des Übergangszustandes 120
Thermische Verfahrenstechnik 277 ff.
Thermodynamik, chemische 92
Thixotropie 71
Tiefenfiltration 227, 234
Totzeit 152
Totzonen 168
Trägerdampfdestillation 316
Trägergasstrom 346
Trägerkatalysatoren 125

Trägersubstanzen 343
Transferfasen 141
Transport von Flüssigkeiten 258
Transport von Gasen 266
Transport von Stoffen 258 ff.
Transportierbarkeit 197
Transportprozesse 99
Treibmittel 204
Trennbarkeit, verbesserte 252
Trennen disperser Systeme 210 ff.
Trennschärfe 216 f.
Trennschärfegrad 217
Trennstufe, theoretische 328, 345,
348
Trennstufen 318
Trennstufenzahl, theoretische 328
Trennung azeotroper Gemische 335
Trennung von Mehrkomponenten-
systemen 337
Triebkraft einer chemischen Reaktion
96
trimolekular 109
Tripelpunkt 52
Trocknen 284, 293 ff.
Trocknen durch Ausdampfen 293
Trocknung, konvektive 297
Trocknungsarten 297
Trocknungsgas 293
Trocknungsgeschwindigkeit 297
Trocknungsgut 293
Trocknungskurven 297 f.
Trombe 244
turbulent 71

U

Überdruck oder Unterdruck 259
Überflutung des Rührers 250
Übergang (Ströme an
Phasengrenzflächen) 99
Übergangsbereich 74, 247
Übergangsverhalten 160
Übergangszustand (transition state)
120
übersättigt 288
Überschichtungsverfahren 195
Umkehrosiose 233
Umordnung im Partikelkollektiv 255
Umrechnung in den tatsächlichen
Zustand 342
Umrechnungen und Mischungs-
rechnung 22

- Umsatz 90
 Umsatz, maximal erreichbarer 96
 Umsatzvariable 91, 102
 Umweltbelastungen, potenzielle 77
 Underwood-Gleichung 327
 ungesättigt 288
 Unsicherheit 29
- V**
- Vakuumdestillation 317
 Vakuumgasöl 337
 Vakuumrektifikation 335
 Van't-Hoff-Gleichung 98
 Van-der-Waals-Gleichung 44
 Variable, abhängige 35
 Variable, unabhängige 35
 Varianz 30
 Varianz der Verweilzeit 180
 Ventilboden 319
 Verdampfen und Eindampfen 284
 Verdampfen und Kondensieren 278 ff.
 Verdampfen und Sublimieren 55
 Verdampferbauarten 285
 Verdampfung 278
 Verdampfungsenthalpie 54, 78, 278
 Verdampfungskristallisation 288, 290
 Verdampfungswärme 278
 Verdichten 269
 Verdichter 269
 Verdrängerpumpen, oszillierende 260
 Verdrängerpumpen, rotierende 259
 Verdunstung 278
 Verdunstungstrocknung 293
 Veresterung von Carbonsäuren 140
 Verfahren, chemische 112
 Verfahren, diskontinuierliche 227
 Verfahren, kontinuierliche 227
 Verfahren, mikrobiologische 127
 Verfahren, physikalische 112
 Verfahrensablauf 82
 Verfahrensentwicklung 76
 Verfahrensflißschema 78 f.
 Verfahrenshandbuch 77
 Verfahrensinformationen 77
 Verfahrenstechnik, mechanische 183 ff.
 Verfahrenstechnik, thermische 277
 Verflüchtigung 278
 Vergleich der Kennwerte 193
 Vergleich der Verteilungen 193
 Verhalten eines Gases, reales 306
 Verhältnis 343
 Vermischung, absolut ideale 237
 Vermischung im Reaktor 147
 Verstärkungsgeraden 323
 Verstärkungsteil 321
 Versuchsanlage 77
 Verteilerboden 203
 Verteilung zwischen flüssigen Phasen 64
 Verteilungsdichte 188
 Verteilungsfunktion, empirische 28
 Verteilungsgesetz, universelles 190
 Verteilungsgesetz von Nerst 64
 Verteilungsgesetze 190
 Verteilungskoeffizient 64, 305
 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, 278
 Volumenanteil 21
 Volumenausdehnung 46
 Volumendurchmesser, mittlerer 205
 Volumenkonzentration 21
 Volumenstrom, konstanter 230 f.
 Vorgang, exothermer 54, 361
 Vorgang, instationärer 146
 Vorgang, stationärer 146
 Vorgänge, endotherme 54
- W**
- Wachsdestillate 337
 Wälzdruckmaschinen 256
 Walzenpresse 256
 Wände, ebene 282
 Wandraugigkeit 73
 Wärme 93
 Wärmeaustausch 251
 Wärmeaustausch, mittelbarer (indirekter) 283
 Wärmeaustausch, unmittelbarer (direkter) 283
 Wärmeaustauscher 282 f.
 Wärmeaustauschprozesse 319
 Wärmebedarf 332
 Wärmebilanz 163
 Wärmebilanz an einem Festbettadsorber 374
 Wärmebilanz bei der Absorption 355
 Wärmebilanzen 98, 151, 160
 Wärmedurchgang 282
 Wärmedurchgangskoeffizient 282
 Wärmeleitung 281
 Wärmeleitung an einer ebenen Wand 281
 Wärmeleitung an einer Rohrwand 281
 Wärmeleitungsgleichung, Fouriersche 99
 Wärmespeicher 283
 Wärmestrahlung 281
 Wärmestrom, konvektiver flächenbezogener 99
 Wärmeströme, abgeführte 332
 Wärmeströme, zugeführte 332
 Wärmetausch, direkter 149
 Wärmetausch, indirekter 149
 Wärmeträgerbilanz 163
 Wärmeübergang 282
 Wärmeübertragung 281
 Wärmeübertragung durch Konvektion 282
 Wärmeübertragungskoeffizient 282
 Waschmittelverhältnis 344
 Wasser 356
 Wasserdampfdestillation 317
 Wechselzahl (turnover number) 143
 Werkstoff 80
 Widerstandsbeiwert 71
 Wirbelschicht, homogene 241
 Wirbelschichtadsorber 376
 Wirbelschichttrockner (zweistufig) 299
 Wirkung, aktivierende 124
 Wirkung, selektive 124

Z

- Zahlenwert 14
Zahlenwertgleichungen 16
Zellen- oder Drehschieberverdichter 271
Zentren, aktive 361
Zentrifugalpumpen 260
Zentrifuge 218
Zentrifugenkennzahl 219
Zeolithe 363
Zeolithe, synthetische 364
Zerkleinerung 197
Zerkleinerungsgrad 200
Zerkleinerungsgrad, bezogen auf Korngrößen 200
Zerkleinerungsgrad, bezogen auf massenspezifische Oberflächen 200
Zerkleinerungsmaschinen 201
Zersetzung von Phosphin an Wolfram 36
Zerspritzen 197
Zerspritzung 207
Zerstäuben 197, 203
Zerstäubung 203
Zerteilung von Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen 197ff.
Zulauf 321
Zündtemperatur 83
Zündverhalten 148
Zusatzinformationen 79f.
Zustand A – Siedende Flüssigkeit 324
Zustand B – Satttdampf 324
Zustand C – Dampf-Flüssigkeits-Gemisch 324
Zustand D – Unterkühlte Flüssigkeit 325
Zustand E – Überhitzter Dampf 325
Zustand, aktivierter 120
Zustand, fester 49
Zustand, flüssiger 45
Zustand, gasförmiger 38
Zustand, stationärer 142, 157
Zustand, übersättigter 281
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 238
Zwangsumlauf 286
Zweifilmtheorie 134, 350
Zweifilmtheorie von Lewis and Whitman 350
Zweistoffdüse 204, 206
Zweistoffgemisch, ideales 300
Zweistoffgemisch, reales 306
Zweistoffgemisch, schwer lösliches 308
Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik 94f.
Zyklon 218, 223