

# 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	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	<b>3 Aggregatzustände und Phasenlehre</b> .	<b>38</b>
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 Gasgemische .....	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 Volumen- ausdehnung .....	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>	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-CLAUPEYRON-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	Verdünnte Lösungen .....	60	6.2.2	Erster Hauptsatz .....	92
3.7.1	Kolligative Eigenschaften ....	60	6.2.3	Standardenthalpien .....	93
3.7.2	Löslichkeit .....	62	6.2.4	Zweiter Hauptsatz .....	94
			6.2.5	Chemisches Gleichgewicht ..	96
4	Strömungstechnische Grundbegriffe	65	6.3	Stoff- und Wärmebilanzen .....	98
4.1	Allgemeine Grundlagen .....	65	6.3.1	Transportprozesse .....	99
4.2	Kontinuitätsgleichung .....	66	6.3.2	Erhaltungssätze .....	100
4.3	Strömung ohne Reibung .....	67			
4.3.1	Gleichung von BERNOULLI ....	67	7	Kinetik chemischer Reaktionen .....	102
4.3.2	Gleichung von TORRICELLI ...	69	7.1	Reaktionsgeschwindigkeit .....	102
4.4	Strömung mit Reibung .....	70	7.2	Gesetze der Reaktionskinetik .....	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	Rohrströmung mit Reibung .....	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	Bestimmung von Reaktionsordnungen ..	109
			7.3.1	Differenzialmethode .....	110
			7.3.2	Methode der Anfangs- geschwindigkeiten .....	110
			7.3.3	Integrationsmethode .....	111
			7.3.4	Halbwertszeitmethode .....	111
			7.3.5	Konzentrationsabhängige Messgrößen .....	111
			7.3.6	Experimentelle Bestimmungs- methoden .....	112
			7.4	Kinetik komplexer Reaktionen .....	113
			7.4.1	Gleichgewichtsreaktionen ...	114
			7.4.2	Parallelreaktionen .....	115
			7.4.3	Folgereaktionen .....	116
			7.5	Theorie der Reaktionsgeschwindigkeit ..	117
			7.5.1	Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit ...	118
			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	Aktivierung von Reaktionsprozessen ...	123
6.1	Einführung und Grundbegriffe .....	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	Chemische Thermodynamik .....	92	8.1.4	Biokatalytische Aktivierung .	126
6.2.1	Systeme und Zustandsgrößen	92	8.1.5	Fotochemische Aktivierung ..	128
			8.2	Homogene und heterogene Systeme ....	128

<b>8.3</b>	<b>Heterogene Katalyse</b> .....	128	<b>10.2.1</b>	Verweilzeitspektrum und Verweilzeit-Summenfunktion	170
8.3.1	Heterogene Reaktionen mit Feststoffen .....	128	<b>10.2.2</b>	Messung der Verweilzeitverteilungen .....	171
8.3.2	Heterogene Reaktionen mit Fluiden .....	134	<b>10.3</b>	<b>Berechnung und Auswertung von Verweilzeitverteilungen</b> .....	172
8.3.3	Reaktionsablauf .....	135	10.3.1	Idealer kontinuierlicher Rührreaktor .....	172
<b>8.4</b>	<b>Homogene Katalyse</b> .....	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	<b>10.4</b>	<b>Reaktoren mit realem Verhalten</b> .....	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>9</b>	<b>Ideale Reaktoren</b> .....	146	<b>MVT – Mechanische Verfahrenstechnik – Grundoperationen</b> .....		183
<b>9.1</b>	<b>Klassifizierung von Reaktoren</b> .....	146	<b>11</b>	<b>Charakterisierung von Partikeln und dispersen Systemen</b> .....	184
9.1.1	Allgemeine Betriebsformen ..	146	11.1	Grundlagen .....	184
9.1.2	Vermischung im Reaktor ....	147	11.2	Partikelgrößen und Merkmale .....	185
9.1.3	Wärmetechnische Betriebsformen .....	148	11.3	Kenngrößen einer Verteilung .....	187
9.1.4	Grundtypen chemischer Reaktoren .....	150	11.3.1	Verteilungssumme .....	187
9.1.5	Stoff- und Wärmebilanzen ...	151	11.3.2	Verteilungsdichte .....	188
<b>9.2</b>	<b>Diskontinuierlich betriebener Rührkessel</b> .....	152	<b>11.4</b>	<b>Verteilungsgesetze</b> .....	190
9.2.1	Isotherm betriebener Rührkessel .....	153	11.4.1	Potenzverteilung nach GATES-GAUDIN-SCHUMANN .....	190
9.2.2	Adiabat betriebener Rührkessel .....	154	11.4.2	GAUSSsche Normalverteilungsfunktion .....	191
9.2.3	Polytrop betriebener Rührkessel .....	155	11.4.3	Logarithmische Normalverteilung .....	191
<b>9.3</b>	<b>Kontinuierliche Betriebsführung ohne Rückvermischung der Reaktionsmasse</b> ..	156	11.4.4	RRSB-Verteilung .....	192
<b>9.4</b>	<b>Kontinuierliche Betriebsführung mit Rückvermischung der Reaktionsmasse</b> ..	159	11.4.5	Vergleich der Verteilungen und Kennwerte .....	193
<b>9.5</b>	<b>Rührkesselskaskade</b> .....	161	<b>11.5</b>	<b>Messen einer Partikelgrößenverteilung</b> ..	194
9.5.1	Gestaltung und stoffliche Bilanzierung .....	162			
9.5.2	Berechnung von Rührkesselskaskaden .....	163	<b>12</b>	<b>Zerteilung von Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen</b> .....	197
<b>9.6</b>	<b>Vergleichende Betrachtung der Reaktoren</b> .....	165	12.1	Grundlagen .....	197
			12.2	Zerkleinerung .....	197
<b>10</b>	<b>Reale Reaktoren und Verweilzeitverteilungen</b> .....	168	12.2.1	Näherungsformeln .....	199
10.1	Abweichungen vom idealen Verhalten ..	168	12.2.2	Zerkleinerungsgrad .....	200
10.2	Verweilzeituntersuchungen zur Charakterisierung des Vermischungsverhaltens .....	169			

12.2.3	Bruchvorgang	200	16.2	Transport von Flüssigkeiten	258
12.2.4	Zerkleinerungsmaschinen	201	16.2.1	Verdrängungspumpen	259
12.3	Flüssigkeitszerteilung	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
<b>20.3</b>	<b>Rektifikation . . . . .</b>	<b>317</b>	<b>21.2</b>	<b>Adsorption . . . . .</b>	<b>359</b>
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 Adsorbern .	371
<b>21</b>	<b>Sorption . . . . .</b>	<b>339</b>	21.2.6	Wärmebilanz an einem Festbettadsorber . . . . .	374
<b>21.1</b>	<b>Absorption . . . . .</b>	<b>339</b>	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	NTU/HTU-Konzept für die Absorption . . . . .	350			
21.1.4	Kenngrößen eines Absorbers	354			
				<b>Hinweise zur beigelegten CD . . . . .</b>	<b>378</b>
				<b>Sachwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>379</b>