

# 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 Volumenausdehnung .....	45
1.5.8 Aktivität .....	22	3.2.2 Viskosität von Flüssigkeiten ..	47
1.6 Umrechnungen und Mischungsrechnung .....	22	3.2.3 Oberflächenspannung .....	48
<b>2 Statistische Grundlagen</b> .....	<b>25</b>	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
			6.2.5	Chemisches Gleichgewicht ..	96
<b>4</b>	<b>Strömungstechnische Grundbegriffe</b>	<b>65</b>	6.3	<i>Stoff- und Wärmebilanzen</i> .....	98
4.1	<i>Allgemeine Grundlagen</i> .....	65	6.3.1	Transportprozesse .....	99
4.2	<i>Kontinuitätsgleichung</i> .....	66	6.3.2	Erhaltungssätze .....	100
4.3	<i>Strömung ohne Reibung</i> .....	67			
4.3.1	Gleichung von BERNOULLI ....	67	<b>7</b>	<b>Kinetik chemischer Reaktionen</b> .....	<b>102</b>
4.3.2	Gleichung von TORRICELLI ...	69	7.1	<i>Reaktionsgeschwindigkeit</i> .....	102
4.4	<i>Strömung mit Reibung</i> .....	70	7.2	<i>Gesetze der Reaktionskinetik</i> .....	103
4.4.1	Viskosität .....	70	7.2.1	Differenzialgleichungen .....	104
4.4.2	Widerstandsbeiwert .....	71	7.2.2	Reaktionen nullter Ordnung .	105
4.5	<i>Rohrströmung mit Reibung</i> .....	72	7.2.3	Reaktionen erster Ordnung ..	105
4.5.1	Laminare Strömung .....	72	7.2.4	Reaktionen zweiter Ordnung	107
4.5.2	Turbulente Strömung .....	73	7.2.5	Reaktionen dritter Ordnung ..	108
4.5.3	Druckverlust in Rohrleitungen	73	7.2.6	Molekularität einer Reaktion	109
4.5.4	Druckverlust in Formstücken und Armaturen .....	75	7.3	<i>Bestimmung von Reaktionsordnungen</i> ..	109
			7.3.1	Differenzialmethode .....	110
			7.3.2	Methode der Anfangs- geschwindigkeiten .....	110
<b>5</b>	<b>Produktionstechnische Grundbegriffe</b> .....	<b>76</b>	7.3.3	Integrationsmethode .....	111
5.1	<i>Verfahrensentwicklung</i> .....	76	7.3.4	Halbwertszeitmethode .....	111
5.2	<i>Verfahrensinformationen</i> .....	77	7.3.5	Konzentrationsabhängige Messgrößen .....	111
5.3	<i>Fliebschemata von Anlagen</i> .....	78	7.3.6	Experimentelle Bestimmungs- methoden .....	112
5.3.1	Grundfliebschema .....	79	7.4	<i>Kinetik komplexer Reaktionen</i> .....	113
5.3.2	Verfahrensliebschema .....	79	7.4.1	Gleichgewichtsreaktionen ...	114
5.3.3	Rohrleitungs- und Instrumentenfliebschema ...	80	7.4.2	Parallelreaktionen .....	115
5.3.4	Mess- und Regelschema ....	82	7.4.3	Folgereaktionen .....	116
5.4	<i>Stoffdaten und Verfahrensablauf</i> .....	82	7.5	<i>Theorie der Reaktionsgeschwindigkeit</i> ..	117
5.4.1	Stoffdaten .....	82	7.5.1	Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit ...	118
5.4.2	Sicherheitstechnische Daten .	83	7.5.2	Theorie des aktivierten Komplexes .....	120
5.4.3	Toxikologische Daten .....	84			
5.5	<i>Scale-up - Probleme</i> .....	84			
			<b>8</b>	<b>Aktivierung von Reaktionen und Katalyse</b> .....	<b>122</b>
<b>CRT - Chemische Reaktionstechnik</b> .....	<b>87</b>		8.1	<i>Aktivierung von Reaktionsprozessen</i> ...	123
<b>6</b>	<b>Grundlagen der Reaktionstechnik</b> ...	<b>88</b>	8.1.1	Thermische Aktivierung ....	123
6.1	<i>Einführung und Grundbegriffe</i> .....	88	8.1.2	Katalytische Aktivierung ....	124
6.1.1	Klassifizierung chemischer Reaktionen .....	88	8.1.3	Aktivierung durch Initiator- zerfall .....	126
6.1.2	Beurteilungsgrößen und Definitionen .....	89	8.1.4	Biokatalytische Aktivierung .	126
6.2	<i>Chemische Thermodynamik</i> .....	92	8.1.5	Fotochemische Aktivierung ..	128
6.2.1	Systeme und Zustandsgrößen	92	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			10.4.3	Berechnungsbeispiele .....	179
9	<b>Ideale Reaktoren</b> .....	146	MVT – Mechanische Verfahrenstechnik – Grundoperationen .....	183	
9.1	<i>Klassifizierung von Reaktoren</i> .....	146	11	<b>Charakterisierung von Partikeln und dispersen Systemen</b> .....	184
9.1.1	Allgemeine Betriebsformen ..	146	11.1	<i>Grundlagen</i> .....	184
9.1.2	Vermischung im Reaktor ....	147	11.2	<i>Partikelgrößen und Merkmale</i> .....	185
9.1.3	Wärmetechnische Betriebsformen .....	148	11.3	<i>Kenngrößen einer Verteilung</i> .....	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
9.2	<i>Diskontinuierlich betriebener Rührkessel</i>	152	11.4	<i>Verteilungsgesetze</i> .....	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
9.3	<i>Kontinuierliche Betriebsführung ohne Rückvermischung der Reaktionsmasse</i> .	156	11.4.4	RRSB-Verteilung .....	192
9.4	<i>Kontinuierliche Betriebsführung mit Rückvermischung der Reaktionsmasse</i> .	159	11.4.5	Vergleich der Verteilungen und Kennwerte .....	193
9.5	<i>Rührkesselkaskade</i> .....	161	11.5	<i>Messen einer Partikelgrößenverteilung</i> ..	194
9.5.1	Gestaltung und stoffliche Bilanzierung .....	162	12	<b>Zerteilung von Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen</b> .....	197
9.5.2	Berechnung von Rührkesselkaskaden .....	163	12.1	<i>Grundlagen</i> .....	197
9.6	<i>Vergleichende Betrachtung der Reaktoren</i> .....	165	12.2	<i>Zerkleinerung</i> .....	197
10	<b>Reale Reaktoren und Verweilzeitverteilungen</b> .....	168	12.2.1	Näherungsformeln .....	199
10.1	<i>Abweichungen vom idealen Verhalten</i> ..	168	12.2.2	Zerkleinerungsgrad .....	200
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	<b>Trennen disperser Systeme .....</b>	<b>210</b>	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	<b>TVT – Thermische Verfahrenstechnik – Grundoperationen .....</b>	<b>277</b>	
13.2.4	Zyklone .....	223	<b>17 Verdampfen und Kondensieren .....</b>	<b>278</b>	
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	<b>18 Kristallisation .....</b>	<b>288</b>	
14	<b>Mischen .....</b>	<b>236</b>	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	<b>19 Trocknen .....</b>	<b>293</b>	
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	<b>20 Destillation und Rektifikation .....</b>	<b>300</b>	
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	<b>Agglomerieren .....</b>	<b>252</b>	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	<b>Transport von Stoffen .....</b>	<b>258</b>			
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	<b>Hinweise zur beigelegten CD . . . . .</b>	<b>378</b>	
21.1.2	Bilanzierung und Berechnung	344	<b>Sachwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>379</b>	
21.1.3	<i>NTU/HTU</i> -Konzept für die Absorption . . . . .	350			
21.1.4	Kenngrößen eines Absorbers	354			