

# Inhalt

## Teil I Grundlagen

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	3
1.1	Definitionen	3
1.2	Fachorganisationen	7
	Europa	7
	Deutschland	8
	Schweiz	9
	Österreich	9
1.3	Maßeinheiten	10
1.4	Periodensystem der Elemente	17
1.5	Fragen aus der Praxis	19
1.6	Literatur	19
<b>2</b>	<b>Projektierung</b>	21
2.1	Maßstabsvergrößerung	21
	Ähnlichkeiten	21
	Scale-Up Methoden	23
	Dimensionslose Kenngrößen	25
	Buckingham $\Pi$ -Theorem	27
2.2	Planung von Chemieanlagen	31
	Blockschema	31
	Verfahrensfließbild	32
	RI-Schema	34
	Anlagenmodell	35
	Rohrleitungsmodell	35
	CAD-3D-Grafik	36
	Isometrische Zeichnung	37
2.3	Projektmanagement	38
	Projektphasen	39
	Projektorganisation	42
2.4	Zeit- und Ressourcenplanung	46
	Balkendiagramme	47

	Netzplandiagramme .....	47
	Zuordnung von Ressourcen .....	51
2.5	Fragen aus der Praxis .....	52
2.6	Literatur .....	53
<b>3</b>	<b>Werkstoffe .....</b>	<b>55</b>
3.1	Mechanische Eigenschaften .....	55
	Festigkeit .....	55
	Kerbschlagzähigkeit .....	60
	Härte .....	61
3.2	Korrosion .....	65
	Definitionen .....	65
	Voraussetzungen .....	66
	Korrosionsarten .....	69
3.3	Korrosionsschutz .....	71
	Werkstoff .....	71
	Beschichtung .....	72
	Konstruktion .....	76
	Elektrischer Strom .....	77
	Medium .....	77
	Werkstoffwahl .....	78
3.4	Eisen & Stahl .....	79
	Herstellung .....	80
	Unlegierter Stahl .....	81
	Legierter Stahl .....	83
	Gusseisen .....	85
3.5	Nicht-Eisenmetalle .....	86
	Leichtmetalle .....	87
	Schwermetalle .....	90
	Sondermetalle .....	94
	Edelmetalle .....	97
3.6	Keramiken .....	99
	Tonkeramik .....	99
	Glas .....	103
	Kunstkohle & Elektrographit .....	107
3.7	Kunststoffe .....	109
	Thermoplaste .....	113
	Duroplaste .....	119
	Elastomere .....	121
3.8	Naturstoffe .....	126
	Holz .....	126
	Steine .....	127
3.9	Fragen aus der Praxis .....	128
3.10	Literatur .....	128

<b>4</b>	<b>Reaktionstechnik</b>	<b>131</b>
4.1	Begriffe	131
	Homogene und heterogene Reaktionen	131
	Strömungsführung	131
	Umsatz, Ausbeute, Selektivität, Leistung, Kapazität	134
4.2	Reaktoren	135
	Rührkessel	136
	Rohrreaktor	137
	Kolonne, Säule, Turm	138
	Wirbelschichtreaktor	140
4.3	Stoffbilanzen	142
	Idealer diskontinuierlich betriebener Rührkessel	147
	Idealer kontinuierlich betriebener Rohrreaktor	148
	Idealer kontinuierlich betriebener Rührkessel	148
	Vergleich der idealisierten Reaktortypen	149
4.4	Verweilzeitverteilung	150
	Rohrreaktor	150
	Kontinuierlich betriebener Rührkessel	150
	Rührkesselkaskade	152
4.5	Fragen aus der Praxis	153
4.6	Literatur	154
<b>5</b>	<b>Berechnungen und Antworten zu Teil I</b>	<b>155</b>
5.1	Einführung	155
5.2	Projektierung	156
5.3	Werkstoffe	158
5.4	Reaktionstechnik	159
<b>Teil II Ausgleichsvorgänge</b>		
<b>6</b>	<b>Strömungslehre</b>	<b>163</b>
6.1	Einleitung	163
	Flüssigkeiten und Gase	163
	Kontinuitätsgleichung	163
	Ideale und reale Fluide	164
6.2	Strömung ohne Reibung	165
	Bernoulli	165
	Torricelli	166
6.3	Strömung mit Reibung	167
	Viskosität, Reibungswiderstand	167
	$C_W$ -Wert, Wirbelwiderstand	169
	Laminare und turbulente Strömung	171
6.4	Rohrströmung	172
	Laminare Rohrströmung	172
	Turbulente Rohrströmung	175

	Druckabfall im Rohr .....	176
	Hydraulischer Durchmesser .....	178
	Rohrleitungseinbauten .....	179
	Betriebskennlinie, Pumpenkennlinie .....	182
6.5	Filmströmung .....	185
	Strömungsformen .....	185
	Geschwindigkeitsprofil .....	185
	Volumenstrom .....	187
6.6	Impulskraft .....	188
6.7	Rheologie .....	189
	Mechanisches Verhalten von Körpern .....	190
	Scherratenabhängige Viskosität .....	192
	Zeitabhängige Viskosität .....	194
	Viskoelastizität .....	195
	Messpraxis .....	196
6.8	Fragen aus der Praxis .....	198
6.9	Literatur .....	200
<b>7</b>	<b>Wärmeübertragung .....</b>	<b>201</b>
7.1	Einleitung .....	201
	Strahlung .....	201
	Wärmeleitung .....	202
	Konvektion .....	202
	Kombination der Wärmeübertragungsmechanismen .....	203
7.2	Strahlung .....	203
	Strahlungsgesetze .....	203
	Wärmestrahlung zwischen Körpern .....	207
7.3	Wärmeleitung .....	212
	Eindimensionaler Stab .....	212
	Zusammengesetzte Wand .....	220
	Rohrwand .....	221
	Dreidimensionaler Körper .....	224
7.4	Konvektion .....	226
	Dimensionslose Kenngrößen .....	229
	Ebene Flächen .....	232
	Rohre/ Rohrbündel .....	234
	Rührkessel .....	238
	Kugeln/Schütttschichten .....	239
7.5	Wärmedurchgang .....	241
	Ebene Wände .....	241
	Rohre .....	244
	Einfluss der Strömungsführung .....	246

	Mittlere treibende Temperaturdifferenz .....	249
	Aufheizen/Abkühlen eines Rührkessels .....	250
7.6	Wärmeübertrager .....	252
	Bauarten .....	252
	Heiz- und Kühlmedien .....	258
	Auslegung .....	260
7.7	Fragen aus der Praxis .....	262
7.8	Literatur .....	263
<b>8</b>	<b>Stofftransport</b> .....	<b>265</b>
8.1	Einleitung .....	265
	Diffusion .....	265
	Konvektion .....	266
	Kombination der Stofftransportmechanismen .....	266
8.2	Diffusion .....	267
	Eindimensionale Diffusion .....	267
	Dreidimensionale Diffusion .....	274
8.3	Konvektion .....	275
	Dimensionslose Kenngrößen .....	278
	Dimensionslose Gleichungen für den Stoffübergang .....	279
8.4	Stoffdurchgang .....	282
	Zweifilmtheorie .....	282
	Penetrationstheorie .....	287
	Oberflächenenerneuerungstheorie .....	288
	Mittlere treibende Konzentrationsdifferenz .....	290
8.5	Stofftransport und chemische Reaktion .....	290
	Chemische Reaktion an der Phasengrenzfläche .....	291
	Chemische Reaktion in der zweiten Phase .....	293
8.6	Stofftransport und Wärmeübertragung .....	296
	Dimensionslose Lewis-Beziehung .....	296
	Wärme- und Stofftransport beim Trocknen .....	297
8.7	Analogien des Impuls-, Wärme- und Stofftransports .....	299
	Transportgleichungen .....	299
	Dimensionslose Beziehungen .....	301
	Grenzschichten .....	302
8.8	Fragen aus der Praxis .....	304
8.9	Literatur .....	304
<b>9</b>	<b>Berechnungen und Antworten zu Teil II</b> .....	<b>307</b>
9.1	Strömungslehre .....	307
9.2	Wärmeübertragung .....	315
9.3	Stofftransport .....	318

## Teil III Grundoperationen

<b>10 Mischen, Rühren</b>	325
10.1 Einleitung	325
Diffusion	325
Konvektion	325
Dispergierung	325
10.2 Rührertypen	326
10.3 Strömungsbild	326
10.4 Wahl des Rührertyps	328
10.5 Leistungsbedarf eines Rührwerks	328
10.6 Statische Mischer	330
10.7 Fragen aus der Praxis	331
10.8 Literatur	332
<b>11 Sedimentieren</b>	333
11.1 Definition	333
11.2 Maßgebende Kräfte	333
11.3 Strömung um ein kugelförmiges Teilchen	335
11.4 Sinkgeschwindigkeit beliebig geformter Teilchen	337
11.5 Sinkgeschwindigkeit eines Teilchenschwarms	338
11.6 Auslegung von Sedimentationsapparaten	339
11.7 Fragen aus der Praxis	340
11.8 Literatur	341
<b>12 Filtrieren</b>	343
12.1 Begriffe und Definitionen	343
12.2 Mechanismen der Abscheidung	345
12.3 Filtermittel	345
12.4 Sieb-, Kuchen- und Tiefenfiltration	346
12.5 Filterhilfsmittel	347
12.6 Vor- und nachgeschaltete Prozesse	347
12.7 Filtratfluss als Funktion der Porengröße	348
12.8 Kuchenhöhe als Funktion der Filtratmenge	350
12.9 Filtergleichungen der Kuchenfiltration	350
12.10 Druckabhängigkeit der Filtergleichungen	352
12.11 Filterapparate	353
Sandfilter	354
Papierfilter	355
Beutelfilter	355
Kerzenfilter	355
Filternutschen	356
Tellerfilter	356
Filterpressen	357
Filterzentrifugen	359

	Trommelfilter .....	361
	Bandfilter .....	362
	Scheibenfilter .....	363
12.12	Wahl des Filterapparats .....	364
12.13	Fragen aus der Praxis .....	364
12.14	Literatur .....	366
<b>13</b>	<b>Verdampfen .....</b>	<b>367</b>
13.1	Begriffe und Definitionen .....	367
	Arbeitsweise einer Verdampfungsstufe .....	367
	Dampfarten .....	369
	Dampfdruckkurve .....	370
	Siedepunkterhöhung durch gelösten Stoff .....	372
13.2	Verdampfungsarten .....	374
	Oberflächenverdampfung .....	374
	Blasensieden .....	375
	Übergangssieden .....	375
	Filmsieden .....	376
	Verdampfung in einem senkrechten Rohr .....	377
13.3	Verdampferbauarten .....	382
	Rührkessel .....	382
	Plattenverdampfer .....	382
	Dünnschichtverdampfer .....	382
	Kurzwegverdampfer .....	383
	Rohrbündelverdampfer .....	383
	Brüdenverdichtung .....	384
	Mehrstufenverdampfung .....	386
13.4	Fragen aus der Praxis .....	389
13.5	Literatur .....	389
<b>14</b>	<b>Kondensieren .....</b>	<b>391</b>
14.1	Begriffe und Definitionen .....	391
	Tropfen- und Filmkondensation .....	391
	Wirkung von Inertgasen .....	392
14.2	Wärmeübergang bei Filmkondensation .....	392
	Laminare Strömung .....	393
	Turbulente Strömung .....	395
	Horizontale Rohre .....	396
14.3	Kondensatorbauarten .....	397
	Oberflächenkondensatoren .....	397
	Mischkondensatoren .....	398
14.4	Fragen aus der Praxis .....	398
14.5	Literatur .....	400

<b>15 Destillation</b>	401
15.1 Einleitung	401
Prinzip der Destillation	401
15.2 Physikalische Grundlagen	401
Gesetze von Dalton und Raoult	401
Relative Flüchtigkeit	404
Dampfdruckdiagramm	405
Temperaturdiagramm	407
Zusammensetzungsdiagramm	409
Reale Mischungen	410
Azeotropie	413
15.3 Destillationsverfahren	415
Absatzweise offene Destillation	415
Trägerdampfdestillation	418
15.4 Fragen aus der Praxis	421
15.5 Literatur	422
<b>16 Rectifikation</b>	423
16.1 Einleitung	423
Prinzip der Rectifikation	423
Aufbau einer Rectifikationskolonne	424
16.2 Berechnung der theoretischen Stufenzahl	426
Gleichgewichtslinie	426
Verstärkungsgerade	426
Abtriebsgerade	429
Schnittpunktsgerade	430
Rücklaufverhältnis	432
Trennstufenzahl	434
16.3 Einbauten von Rectifikationskolonnen	437
Böden	437
Füllkörper	440
Geordnete Packungen	443
16.4 Dimensionierung einer Rectifikationskolonne	444
Dampfgeschwindigkeit	444
Druckabfall	445
Kolonnendurchmesser	447
Heizung/Kühlung	448
Kurzanleitung des methodischen Vorgehens	450
16.5 Sonderfälle der Rectifikation	451
Zweidruckrectifikation	451
Extraktive Rectifikation	451
Azeotrope Rectifikation	453
Diskontinuierliche Rectifikation	455
Reaktivdestillation	456



16.6	Fragen aus der Praxis .....	457
16.7	Literatur .....	458
<b>17</b>	<b>Trocknung .....</b>	<b>459</b>
17.1	Einleitung .....	459
	Prinzip der Trocknung .....	459
	Art der Wärmeübertragung .....	461
17.2	Zustandsänderung des feuchten Guts .....	463
	Feuchtigkeitsbindung .....	463
	Trocknungsverlauf .....	465
17.3	Zustandsänderung der feuchten Luft .....	468
	Eigenschaften der feuchten Luft .....	468
	Heizen/Kühlen .....	471
	Mischen von zwei Luftmassen .....	472
	Mischen von Luft mit Wasser .....	473
	Trocknungsprozesse mit warmer Luft .....	476
17.4	Trocknungsapparate .....	478
	Konvektionstrockner .....	478
	Kontaktstrockner .....	483
	Gefriertrockner .....	486
	Auswahl und Auslegung eines Trockners .....	487
	Sicherheit beim Trocknen .....	489
17.5	Fragen aus der Praxis .....	491
17.6	Literatur .....	492
<b>18</b>	<b>Berechnungen und Antworten zu Teil III .....</b>	<b>495</b>
18.1	Mischen, Rühren .....	495
18.2	Sedimentieren .....	496
18.3	Filtrieren .....	497
18.4	Verdampfen .....	501
18.5	Kondensieren .....	503
18.6	Destillation .....	505
18.7	Rektifikation .....	508
18.8	Trocknung .....	511

#### **Teil IV Regelungstechnik**

<b>19</b>	<b>Einleitung in die Regelungstechnik .....</b>	<b>517</b>
19.1	Aufgabe einer Regelung .....	517
19.2	Begriffe und Bezeichnungen .....	517
19.3	Beispiele von Regelungen .....	518
	Watt'scher Fliehkraftregler .....	518
	Abgaskatalysator .....	519
	Temperaturregelung beim Duschen .....	520
19.4	Fragen aus der Praxis .....	521

<b>20 Steuerung und Regelung</b>	523
20.1 Wirkungsplan	523
Elemente des Wirkungsplans	523
Grundstrukturen des Wirkungsplans	524
Wirkungswege und Wirkungsabläufe	525
20.2 Steuerung	526
Stetige und unstetige Steuerung	527
Ablaufsteuerung	527
Störgrößenaufschaltung	527
20.3 Regelung	527
Zeitkontinuierliche Regelung und Abtastregelung	528
Adaptive Regelung	528
Mehrpunktregelung	528
Festwertregelung und Folgeregelung	529
Selbsttätige Regelung und Handregelung	529
Führungsverhalten und Störverhalten	529
Detaillierter Regelkreis	529
Stelleinrichtung	530
Wertebereiche	530
20.4 Fragen aus der Praxis	531
<b>21 Übertragungsverhalten</b>	533
21.1 Beharrungskennlinie	533
21.2 Dynamische Eingangsfunktionen	534
21.3 Sprungantworten	536
Proportionalverhalten	536
Verzögerungsverhalten	537
Integralverhalten	538
Differentialverhalten	540
Totzeitverhalten	540
Verhaltenskombinationen	541
21.4 Frequenzgänge	542
Bode-Diagramm	544
Nyquist-Ortskurve	545
21.5 Fragen aus der Praxis	546
<b>22 Reglertypen</b>	549
22.1 Stetige Regler	550
P-Regler	550
I-Regler	551
PI-Regler	552
D-Regler	552
PD-Regler	553
PID-Regler	554

22.2	Unstetige Regler .....	554
	Zweipunktregler .....	554
	Dreipunktregler .....	556
22.3	Fragen aus der Praxis .....	557
<b>23</b>	<b>Regelgüte .....</b>	<b>559</b>
23.1	Führungsverhalten .....	559
23.2	Störverhalten .....	560
23.3	Bewertung der Regelgüte .....	561
23.4	Bewertung der Regelbarkeit .....	564
23.5	Fragen aus der Praxis .....	566
<b>24</b>	<b>Einstellregeln für industrielle Regler .....</b>	<b>569</b>
24.1	Ziegler-Nichols .....	570
24.2	Chien-Hrones-Reswick .....	570
24.3	T-Summen-Regel .....	571
24.4	Fragen aus der Praxis .....	573
<b>25</b>	<b>Komplexe Regelsysteme .....</b>	<b>575</b>
25.1	Split-Range-Regelung .....	575
25.2	Kaskadenregelung .....	576
25.3	Verhältnisregelung .....	578
25.4	Fragen aus der Praxis .....	580
<b>26</b>	<b>Prozessleittechnik .....</b>	<b>581</b>
26.1	Entwicklung der Prozessleittechnik .....	581
26.2	Aufbau eines Prozessleitsystems .....	582
26.3	Funktionen eines Prozessleitsystems .....	584
26.4	Darstellungen im Prozessleitsystem .....	586
26.5	Sicherheit computergesteuerter Anlagen .....	587
	Erläuterung von Sicherheitsbegriffen .....	588
26.6	Fragen aus der Praxis .....	589
<b>27</b>	<b>Berechnungen und Antworten zu Teil IV .....</b>	<b>591</b>
27.1	Einleitung .....	591
27.2	Steuerung und Regelung .....	592
27.3	Übertragungsverhalten .....	594
27.4	Reglertypen .....	597
27.5	Regelgüte .....	600
27.6	Einstellmethoden für industrielle Regler .....	602
27.7	Komplexe Regelsysteme .....	605
27.8	Prozessleittechnik .....	607
	<b>Literatur zur Regelungstechnik .....</b>	<b>609</b>
	<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>611</b>