

# Inhalt

## Teil I Einphasige Systeme

<b>1 Grundlagen der Transportprozesse</b>	<b>1</b>
1.1 Molekulare Transportvorgänge	1
1.1.1 Molekularer Impulstransport	3
1.1.2 Molekularer Energietransport	5
1.1.3 Molekularer Stofftransport	6
1.2 Konvektive Transportvorgänge	10
1.2.1 Konvektiver Impulstransport	10
1.2.2 Konvektiver Energietransport	11
1.2.3 Konvektiver Stofftransport	12
1.2.4 Konvektiver Energie- und Stoffübergang	12
1.3 Turbulente Transportvorgänge	16
1.4 Umwandlungsvorgänge	18
1.4.1 Stoffumwandlung	18
1.4.2 Energieumwandlung	19
1.4.3 Impulsänderung	20
1.5 Bilanzgleichungen	20
1.5.1 Differentielle Bilanzgleichungen	21
1.5.2 Integrale Bilanzgleichungen	31
1.6 Molekulare Transportkoeffizienten	33
1.6.1 Viskosität	33
1.6.2 Wärmeleitfähigkeit	40
1.6.3 Diffusionskoeffizienten	41
1.7 Aufgaben	43
1.8 Literatur	47
<b>2 Diffusion in ruhenden Medien</b>	<b>49</b>
2.1 Stationäre Diffusion	49
2.1.1 Diffusion ohne chemische Reaktion in einer ebenen Schicht	49
2.1.2 Diffusion mit homogener chemischer Reaktion	51
2.1.3 Diffusion mit heterogener chemischer Reaktion	57
2.2 Instationäre Diffusion	59
2.2.1 Instationäre Diffusion ohne chemische Reaktion in einer Platte	60

2.2.2	Instationäre Diffusion in einer Kugel.....	64
2.3	Aufgaben .....	67
2.4	Literatur.....	71
<b>3</b>	<b>Beschreibung von Ausgleichsvorgängen in technischen Systemen.....</b>	<b>73</b>
3.1	Idealisierte Modellapparate .....	73
3.1.1	Idealer Rührkessel.....	74
3.1.2	Ideales Strömungsrohr .....	76
3.2	Reale Apparate .....	76
3.2.1	Mischvorgänge .....	76
3.2.2	Kontinuierlich betriebene reale Apparate.....	80
3.3	Verweilzeitverteilungen .....	83
3.4	Aufgaben .....	91
3.5	Literatur.....	94
<b>4</b>	<b>Strömungen in Rohren.....</b>	<b>95</b>
4.1	Impulstransport.....	95
4.1.1	Laminare Rohrströmung .....	95
4.1.2	Turbulente Strömung .....	97
4.1.3	Strömungswiderstand in Rohren.....	104
4.1.4	Strömungen durch Rohrleitungssysteme .....	108
4.2	Stoffübergang .....	109
4.2.1	Laminare Strömung .....	109
4.2.2	Turbulente Rohrströmung .....	117
4.3	Stoffübergang mit heterogener chemischer Reaktion.....	117
4.4	Strömungen nicht-Newtonscher Flüssigkeiten .....	120
4.4.1	Geschwindigkeitsprofile.....	120
4.4.2	Widerstandsgesetz .....	122
4.5	Dispersion in Rohrströmungen .....	124
4.6	Aufgaben.....	126
4.7	Literatur.....	129
<b>5</b>	<b>Strömungen an ebenen Platten .....</b>	<b>131</b>
5.1	Impulstransport.....	132
5.1.1	Laminare Grenzschicht .....	132
5.1.2	Turbulente Grenzschicht .....	138
5.1.3	Widerstandsgesetz .....	138
5.2	Stoffübergang .....	140
5.2.1	Laminare Strömung .....	140
5.2.2	Turbulente Strömung .....	146
5.3	Fluiddynamik und Stofftransport bei hohem Partialdruck.....	147
5.3.1	Physikalische Problematik .....	147
5.3.2	Geschwindigkeitsprofil .....	149
5.3.3	Konzentrationsprofil .....	150
5.3.4	Reibungsbeiwert .....	152
5.3.5	Mittlere Sherwoodzahl.....	153

---

5.4 Stoffübergang mit heterogener chemischer Reaktion.....	155
5.5 Aufgaben .....	159
5.6 Literatur.....	161
<b>6 Trocknung fester Stoffe.....</b>	<b>163</b>
6.1 Grundbegriffe der thermischen Trocknung .....	163
6.2 Eigenschaften feuchter Güter.....	165
6.2.1 Arten der Feuchtigkeitsbindung.....	165
6.2.2 Bewegung der Feuchtigkeit im Gut .....	167
6.3 Eigenschaften des feuchten Gases.....	169
6.4 Darstellung der einstufigen Trocknung im Mollier-Diagramm .....	172
6.4.1 Beharrungstemperatur.....	172
6.4.2 Kühlgrenztemperatur .....	174
6.4.3 Einstufiger Trockner .....	175
6.5 Wärmeübertragung an das feuchte Gut .....	178
6.5.1 Konvektionstrocknung .....	178
6.5.2 Kontakttrocknung (konduktive Trocknung) .....	179
6.6 Kinetik der Trocknung, Trocknungsverlauf.....	179
6.6.1 I. Trocknungsabschnitt.....	182
6.6.2 II. Trocknungsabschnitt.....	185
6.7 Bauarten von Trocknern.....	189
6.7.1 Konvektionstrockner.....	189
6.7.2 Kontakttrockner .....	193
6.7.3 Strahlungstrockner .....	195
6.8 Aufgaben .....	196
6.9 Literatur.....	200
<b>7 Einphasig durchströmte Feststoffschüttungen .....</b>	<b>201</b>
7.1 Kennzeichnende Größen einer Feststoffschüttung.....	201
7.1.1 Feststoffpartikeln .....	202
7.1.2 Lückengrad.....	204
7.1.3 Hydraulischer Durchmesser .....	206
7.1.4 Geschwindigkeitsverteilung innerhalb einer Feststoffschüttung.....	208
7.2 Druckverlust .....	209
7.3 Wärmeübergang.....	213
7.4 Stoffübergang .....	215
7.5 Modellierung von Austauschvorgängen in Festbetten.....	217
7.6 Aufgaben .....	223
7.7 Literatur.....	226
<b>8 Filtration und druckgetriebene Membranverfahren.....</b>	<b>229</b>
8.1 Einteilung der Trennverfahren .....	229
8.2 Prozessführung .....	230
8.2.1 Kuchenfiltration.....	231
8.2.2 Querstromfiltration .....	232

## X Inhalt

---

8.2.3 Tiefenfiltration.....	233
8.3 Kennzeichnung des Trennerfolgs.....	235
8.4 Filtration.....	238
8.4.1 Grundlegende Theorie der Filtration.....	238
8.4.2 Kuchenfiltration wässriger Suspensionen .....	240
8.4.3 Staubabscheidung durch Filtration.....	251
8.5 Druckgetriebene Membranverfahren .....	253
8.5.1 Definitionen.....	254
8.5.2 Grundlegende Theorie zu Membranverfahren.....	256
8.5.3 Mikro- und Ultrafiltration .....	261
8.5.4 Nanofiltration .....	261
8.5.5 Umkehrosmose .....	262
8.5.6 Apparative Umsetzung der Membranfiltration .....	264
8.6 Aufgaben.....	267
8.7 Literatur.....	270

## Teil II Mehrphasige Systeme

<b>9 Stoffaustausch zwischen zwei fluiden Phasen.....</b>	<b>273</b>
9.1 Stoffübergangstheorien .....	273
9.1.1 Filmtheorie .....	274
9.1.2 Grenzschichttheorie .....	277
9.1.3 Penetrations- und Oberflächenenerneuerungstheorie .....	279
9.1.4 Turbulenztheorie.....	281
9.2 Stoffdurchgang .....	283
9.3 Stoffaustausch mit homogener chemischer Reaktion.....	288
9.3.1 Penetrationstheorie.....	288
9.3.2 Filmtheorie .....	293
9.3.3 Generelle Auswirkungen einer homogenen Reaktion erster Ordnung auf den Stofftransport.....	295
9.4 Aufgaben.....	296
9.5 Literatur.....	298
<b>10 Strömung von Flüssigkeitsfilmen.....</b>	<b>301</b>
10.1 Fluidodynamik von Rieselfilmen.....	302
10.2 Wärmeübertragung zwischen Wand und Flüssigkeit .....	306
10.3 Stoffübertragung zwischen Rieselfilm und Gas.....	308
10.3.1 Laminare Rieselfilme.....	309
10.3.2 Filme mit welliger Oberfläche.....	315
10.3.3 Gasseitiger Stoffübergang .....	317
10.4 Stofftransport mit homogener chemischer Reaktion .....	318
10.4.1 Reaktion 1. Ordnung .....	320
10.4.2 Reaktion 2. Ordnung .....	323
10.5 Technische Anwendungen von Rieselfilmapparaten.....	326

---

10.6 Aufgaben .....	328
10.7 Literatur .....	330
<b>11 Partikelbewegung .....</b>	<b>333</b>
11.1 Stationäre Partikelbewegung .....	333
11.1.1 Feste Einzelpartikel.....	333
11.1.2 Fluide Partikeln.....	342
11.2 Instationäre Partikelbewegung .....	350
11.3 Bewegung von Partikelschwärmen .....	352
11.3.1 Feste Partikeln .....	353
11.3.2 Fluide Partikeln.....	357
11.4 Aufgaben .....	359
11.5 Literatur.....	360
<b>12 Stofftransport bei Partikeln .....</b>	<b>363</b>
12.1 Stationärer Stoffübergang.....	363
12.1.1 Feste Einzelkörper .....	364
12.1.2 Fluide Partikeln.....	371
12.2 Instationärer Stofftransport bei festen und fluiden Partikeln .....	377
12.2.1 Mathematische Grundlagen und Definitionen .....	378
12.2.2 Diffusiver Transport in einer Kugel .....	381
12.2.3 Stoffübergang bei schleichender Umströmung.....	382
12.2.4 Spezielle Lösung für sehr kurze Zeiten .....	382
12.2.5 Berechnung der übergelassenen Masse für sehr lange Zeiten.....	383
12.2.6 Ergebnisse der numerischen Lösung .....	383
12.3 Aufgaben .....	386
12.4 Literatur .....	389
<b>13 Wirbelschichten.....</b>	<b>391</b>
13.1 Erscheinungsformen von Wirbelschichten .....	391
13.2 Fluiddynamische Grundlagen .....	393
13.2.1 Druckverlustcharakteristik.....	393
13.2.2 Lockerungsgeschwindigkeit .....	394
13.2.3 Expansion von Fließbetten .....	396
13.2.4 Feststoffverhalten bei der Fluidisierung mit einem Gasstrom .....	397
13.2.5 Betriebszustände in Wirbelschichten .....	399
13.3 Gasblasen in Wirbelschichten.....	401
13.4 Feststoffmischung in Wirbelschichten .....	404
13.5 Gasphasenvermischung in Wirbelschichten .....	407
13.6 Stoffübergang zwischen Fluid und Partikeln .....	407
13.7 Modellierung von Wirbelschichtreaktoren .....	408
13.8 Technische Anwendungen.....	409
13.8.1 Acrylnitrilsynthese .....	409
13.8.2 Verbrennung von Kohle .....	410
13.9 Aufgaben .....	412
13.10 Literatur .....	414

<b>14 Feststofftransport in Rohrleitungen.....</b>	<b>415</b>
14.1 Physikalische Grundlagen des Feststofftransports .....	416
14.2 Pneumatische Förderung .....	417
14.2.1 Einteilung der pneumatischen Förderung .....	418
14.2.2 Bestimmung des Druckverlustes.....	421
14.2.3 Luftexpansion entlang des Förderwegs .....	432
14.2.4 Fördergeschwindigkeit .....	433
14.2.5 Technische Fördersysteme.....	437
14.3 Hydraulische Förderung .....	438
14.4 Aufgaben .....	440
14.5 Literatur.....	442
<b>15 Gas/Flüssigkeits-Strömungen in Rohren .....</b>	<b>445</b>
15.1 Strömungs- und Phasenverteilungszustände .....	445
15.1.1 Strömungen in vertikalen Rohren .....	445
15.1.2 Strömungen in horizontalen Rohren .....	447
15.2 Grundlegende Beziehungen und Definitionen .....	448
15.3 Bestimmung der Strömungsform .....	450
15.3.1 Strömungsformen in horizontalen Rohren.....	452
15.3.2 Strömungsformen in vertikalen Rohren .....	453
15.3.3 Schlupf.....	455
15.4 Berechnungsverfahren für Gas/Flüssigkeits-Strömungen .....	456
15.4.1 Homogenes Modell.....	457
15.4.2 Heterogenes Modell (Schlupfmodell) .....	461
15.5 Aufgaben .....	465
15.6 Literatur.....	466
<b>16 Bodenkolonnen.....</b>	<b>467</b>
16.1 Thermodynamische Grundlagen .....	467
16.1.1 Stoffbilanz um eine Rektifizierkolonne.....	468
16.1.2 Stoffbilanz um eine Absorptions- oder Desorptionskolonne .....	472
16.2 Konstruktive Merkmale.....	474
16.3 Belastungsbereich und Belastungskennfeld von Kolonnenböden .....	479
16.3.1 Maximale Gasbelastung .....	480
16.3.2 Minimale Gasbelastung.....	481
16.3.3 Maximale Flüssigkeitsbelastung.....	483
16.3.4 Minimale Flüssigkeitsbelastung.....	484
16.3.5 Belastungskennfeld .....	484
16.4 Zweiphasenströmung in Bodenkolonnen.....	485
16.5 Druckverlust des Gases am Boden .....	486
16.6 Phasengrenzfläche in der Zweiphasenschicht .....	488
16.7 Stoffübergang in der Zweiphasenschicht.....	490
16.3 Aufgaben .....	496
16.4 Literatur.....	498

---

<b>17 Packungskolonnen.....</b>	<b>499</b>
17.1 Aufbau und Funktionsweise .....	499
17.2 Fluiddynamik.....	503
17.2.1 Flüssigkeitsinhalt .....	504
17.2.2 Druckverlust .....	510
17.3 Belastungsgrenzen, Belastungskennfeld, Arbeitsbereich .....	514
17.4 Stoffübergang .....	518
17.5 Axiale Dispersion.....	523
17.6 Aufgaben .....	524
17.7 Literatur.....	525
 <b>18 Mischen und Rühren.....</b>	 <b>527</b>
18.1 Definitionen und Einteilungen .....	527
18.2 Einphasige Systeme.....	529
18.2.1 Statische Mischer .....	529
18.2.2 Rühren.....	533
18.2.3 Homogenisieren in Rührgefäßen .....	546
18.3 Mehrphasensysteme .....	547
18.3.1 Suspendieren von Feststoffen .....	547
18.3.2 Begasen .....	552
18.3.3 Dispergieren von Flüssig/flüssig-Systemen.....	561
18.3 Aufgaben .....	566
18.4 Literatur.....	568
 <b>19 Blasensäulen .....</b>	 <b>571</b>
19.1 Blasensäulen mit und ohne Einbauten.....	573
19.1.1 Bauarten .....	573
19.1.2 Fluiddynamik.....	575
19.1.3 Blasengröße und -bewegung.....	577
19.1.4 Dispersion.....	579
19.1.5 Gasgehalt.....	580
19.1.6 Stofftransport.....	582
19.1.7 Wärmeübergang.....	586
19.2 Suspensionsblasensäulen .....	588
19.3 Airlift-Schlaufenapparate .....	590
19.4 Abstromblasensäulen .....	592
19.4.1 Bauarten und Einsatzgebiete.....	593
19.4.2 Betriebsbedingungen und Gasgehalt .....	594
19.4.3 Stoffübertragung .....	596
19.5 Modellgleichungen zur Beschreibung von Blasensäulenreaktoren .....	596
19.6 Anwendungsbereiche .....	599
19.7 Aufgaben .....	600
19.8 Literatur.....	603
 Sachverzeichnis .....	 605