

Inhalt

Teil I Grundlagen und Methoden

1 Grundlagen der Transportprozesse	3
1.1 Molekulare Transportvorgänge	3
1.1.1 Molekularer Impulstransport	5
1.1.2 Molekularer Energietransport	7
1.1.3 Molekularer Stofftransport	8
1.2 Konvektive Transportvorgänge	12
1.2.1 Konvektiver Impulstransport	12
1.2.2 Konvektiver Energietransport	13
1.2.3 Konvektiver Stofftransport	14
1.3 Konvektiver Energie- und Stoffübergang	14
1.4 Turbulente Transportvorgänge	18
1.5 Umwandlungsvorgänge	20
1.5.1 Stoffumwandlung	20
1.5.2 Energieumwandlung	24
1.5.3 Impulsänderung	25
1.6 Bilanzgleichungen	25
1.6.1 Differenzielle Bilanzgleichungen	26
1.6.2 Integrale Bilanzgleichungen	32
1.7 Molekulare Transportkoeffizienten und Stoffgrößen	37
1.7.1 Viskosität	38
1.7.2 Wärmeleitfähigkeit	44
1.7.3 Diffusionskoeffizienten	45
1.8 Verständnisfragen	48
1.9 Aufgaben	48
Literatur	52
2 Diffusion in ruhenden Medien	55
2.1 Stationäre Diffusion	55
2.1.1 Diffusion ohne chemische Reaktion in einer ebenen Schicht	56

2.1.2	Diffusion mit homogener chemischer Reaktion	57
2.1.3	Diffusion mit heterogener chemischer Reaktion	63
2.2	Instationäre Diffusion	65
2.2.1	Instationäre Diffusion ohne chemische Reaktion in einer Platte	65
2.2.2	Instationäre Diffusion in einer Kugel	70
2.3	Verständnisfragen	73
2.4	Aufgaben	73
	Literatur	77
3	Stoffaustausch zwischen zwei fluiden Phasen	79
3.1	Stoffübergangstheorien	80
3.1.1	Filmtheorie	80
3.1.2	Grenzschichttheorie	83
3.1.3	Penetrations- und Oberflächenenerneuerungstheorie	86
3.1.4	Turbulenztheorie	88
3.2	Stoffdurchgang	90
3.3	Stoffaustausch mit homogener chemischer Reaktion	94
3.3.1	Penetrationstheorie	94
3.3.2	Filmtheorie	98
3.3.3	Generelle Auswirkungen einer homogenen Reaktion erster Ordnung auf den Stofftransport	100
3.4	Verständnisfragen	101
3.5	Aufgaben	101
	Literatur	104
4	Beschreibung von Ausgleichsvorgängen in technischen Systemen	107
4.1	Idealisierte Modellapparate	107
4.1.1	Idealer Rührkessel	108
4.1.2	Ideales Strömungsrohr	110
4.2	Reale Apparate	110
4.2.1	Mischvorgänge	110
4.2.2	Kontinuierlich betriebene reale Apparate	114
4.3	Verweilzeitverteilung	117
4.3.1	Experimentelle Bestimmung einer Verweilzeitverteilung	120
4.3.2	Verweilzeitverteilung idealer Apparate	121
4.4	Verständnisfragen	127
4.5	Aufgaben	127
	Literatur	130
5	Strömungen in Rohren	131
5.1	Impulstransport	131
5.1.1	Laminare Rohrströmung	131
5.1.2	Turbulente Rohrströmung	133
5.1.3	Strömungswiderstand in Rohren	139
5.1.4	Strömungen durch Rohrleitungssysteme	143

5.2	Stoffübergang	146
5.2.1	Laminare Strömung	146
5.2.2	Turbulente Rohrströmung	151
5.3	Stoffübergang mit heterogener chemischer Reaktion	152
5.4	Strömungen nicht-Newtonscher Flüssigkeiten	154
5.4.1	Geschwindigkeitsprofile	154
5.4.2	Widerstandsgesetz	156
5.5	Dispersion in Rohrströmungen	158
5.6	Verständnisfragen	160
5.7	Aufgaben	160
	Literatur	164
6	Strömungen an ebenen Platten	165
6.1	Impulstransport	165
6.1.1	Laminare Grenzschicht	167
6.1.2	Turbulente Grenzschicht	171
6.1.3	Widerstandsgesetz	172
6.2	Stoffübergang	173
6.2.1	Laminare Strömung	173
6.2.2	Turbulente Strömung	179
6.3	Fluidodynamik und Stofftransport bei hohem Partialdruck	180
6.3.1	Physikalische Problematik	180
6.3.2	Geschwindigkeitsprofil	182
6.3.3	Konzentrationsprofil	183
6.3.4	Reibungsbeiwert	185
6.3.5	Mittlere Sherwoodzahl	186
6.4	Stoffübergang mit heterogener chemischer Reaktion	187
6.5	Verständnisfragen	191
6.6	Aufgaben	192
	Literatur	194
7	Disperse Systeme	195
7.1	Stationäre Partikelbewegung	196
7.1.1	Feste Einzelpartikel	196
7.1.2	Fluide Partikeln	204
7.2	Instationäre Partikelbewegung	211
7.3	Bewegung von Partikelschwärmen	213
7.3.1	Feste Partikeln	213
7.3.2	Fluide Partikeln	217
7.4	Stationärer Stoffübergang	218
7.4.1	Feste Einzelkörper	219
7.4.2	Fluide Partikeln	225
7.5	Instationärer Stofftransport bei festen und fluiden Partikeln	231
7.5.1	Mathematische Grundlagen und Definitionen	231
7.5.2	Diffusiver Transport in einer Kugel	235

7.5.3	Stoffübergang bei schleichender Umströmung	235
7.5.4	Spezielle Lösung für sehr kurze Zeiten	236
7.5.5	Berechnung der übergehenden Masse für sehr lange Zeiten	237
7.5.6	Ergebnisse der numerischen Lösung	237
7.6	Verständnisfragen	239
7.7	Aufgaben	241
	Literatur	245
8	Einphasig durchströmte Feststoffschüttungen	247
8.1	Kennzeichnende Größen einer Feststoffschüttung	248
8.1.1	Feststoffpartikeln	248
8.1.2	Lückengrad	250
8.1.3	Hydraulischer Durchmesser	252
8.1.4	Geschwindigkeitsverteilung innerhalb einer Feststoffschüttung	254
8.2	Druckverlust	255
8.3	Wärme- und Stoffübergang	258
8.3.1	Wärmeübergang in Analogie zur Einzelkugel	259
8.3.2	Stoffübergang in Analogie zum durchströmten Rohr	261
8.4	Modellierung von Austauschvorgängen in Festbetten	263
8.4.1	Berechnung des Konzentrationsverlaufs	263
8.4.2	Dispersionskoeffizienten in Feststoffschüttungen	268
8.5	Verständnisfragen	270
8.6	Aufgaben	271
	Literatur	273
 Teil II Mehrphasensysteme und apparative Anwendungen		
9	Filtration und druckgetriebene Membranverfahren	277
9.1	Einteilung der Trennverfahren	277
9.2	Prozessführung	279
9.2.1	Kuchenfiltration	279
9.2.2	Querstromfiltration	280
9.2.3	Tiefenfiltration	281
9.3	Kennzeichnung des Trennerfolgs	283
9.4	Filtration	286
9.4.1	Grundlegende Theorie der Filtration	286
9.4.2	Kuchenfiltration von Suspensionen	288
9.4.3	Staubabscheidung durch Filtration	296
9.5	Druckgetriebene Membranverfahren	299
9.5.1	Definitionen	300
9.5.2	Grundlegende Theorie zu Membranverfahren	302
9.5.3	Mikro- und Ultrafiltration	306
9.5.4	Nanofiltration	307

9.5.5 Umkehrosmose	308
9.5.6 Apparative Umsetzung der Membranfiltration	310
9.6 Verständnisfragen	310
9.7 Aufgaben	313
Literatur	316
10 Trocknung fester Stoffe	319
10.1 Grundbegriffe der thermischen Trocknung	320
10.2 Eigenschaften feuchter Güter	321
10.2.1 Arten der Feuchtigkeitsbindung	321
10.2.2 Bewegung der Feuchtigkeit im Gut	323
10.3 Eigenschaften des feuchten Gases	325
10.4 Darstellung der einstufigen Trocknung im Mollier-Diagramm	328
10.4.1 Beharrungstemperatur	328
10.4.2 Kühlgrenztemperatur	330
10.4.3 Einstufiger Trockner	332
10.5 Wärmeübertragung an das feuchte Gut	334
10.5.1 Konvektionstrocknung	335
10.5.2 Kontaktstrocknung (konduktive Trocknung)	335
10.6 Kinetik der Trocknung, Trocknungsverlauf	335 ^a
10.6.1 I. Trocknungsabschnitt	338
10.6.2 II. Trocknungsabschnitt	340
10.7 Bauarten von Trocknern	344
10.7.1 Konvektionstrockner	345
10.7.2 Kontaktstrockner	348
10.7.3 Strahlungstrockner	350
10.8 Verständnisfragen	351
10.9 Aufgaben	351
Literatur	355
11 Strömung von Flüssigkeitsfilmen	357
11.1 Fluidodynamik von Rieselfilmen	358
11.2 Wärmeübertragung zwischen Wand und Flüssigkeit	361
11.3 Stoffübertragung zwischen Rieselfilm und Gas	364
11.3.1 Laminare Rieselfilme	364
11.3.2 Filme mit welliger Oberfläche	370
11.3.3 Gasseitiger Stoffübergang	371
11.4 Stofftransport mit homogener chemischer Reaktion	373
11.4.1 Reaktion 1. Ordnung	375
11.4.2 Reaktion 2. Ordnung	377
11.5 Technische Anwendungen von Rieselfilmapparaten	380
11.6 Verständnisfragen	382
11.7 Aufgaben	382
Literatur	385

12 Bodenkolonnen	387
12.1 Thermodynamische Grundlagen	387
12.1.1 Stoffbilanz um eine Rektifizierkolonne	388
12.1.2 Stoffbilanz um eine Absorptions- oder Desorptionskolonne	392
12.2 Konstruktive Merkmale	394
12.3 Belastungsbereich und Belastungskennfeld von Kolonnenböden	396
12.3.1 Maximale Gasbelastung	399
12.3.2 Minimale Gasbelastung	400
12.3.3 Maximale Flüssigkeitsbelastung	402
12.3.4 Minimale Flüssigkeitsbelastung	402
12.3.5 Belastungskennfeld	403
12.4 Zweiphasenströmung in Bodenkolonnen	404
12.5 Druckverlust des Gases am Boden	405
12.6 Phasengrenzfläche in der Zweiphasenschicht	407
12.7 Stoffübergang in der Zweiphasenschicht	409
12.8 Verständnisfragen	414
12.9 Aufgaben	415
Literatur	416
13 Packungskolonnen	419
13.1 Aufbau und Funktionsweise	420
13.2 Fluiddynamik	424
13.2.1 Flüssigkeitsinhalt	425
13.2.2 Druckverlust	430
13.3 Belastungsgrenzen, Belastungskennfeld, Arbeitsbereich	435
13.4 Stoffübergang	439
13.5 Axiale Dispersion	443
13.6 Auswahlkriterien für Kolonneneinbauten	444
13.7 Verständnisfragen	444
13.8 Aufgaben	445
Literatur	447
14 Förderung von Fluiden	449
14.1 Einteilung und Anwendungsfelder von Förderorganen	450
14.2 Bauformen von Strömungsmaschinen	452
14.3 Energieumsetzung im Laufrad	456
14.3.1 Impulssatz und Eulersche Hauptgleichung	456
14.3.2 Kanalwirbel und Kraftübertragung	459
14.3.3 Energiebilanz und Druckerhöhung	460
14.4 Kennlinien	462
14.4.1 Theoretische Konstruktion einer Drosselkurve	463
14.4.2 Stabile und instabile Kennlinien	467
14.4.3 Kennfeld	469
14.4.4 Kennlinie einer Kolbenpumpe	470

14.5	Betriebspunkte von Kreiselpumpen	471
14.5.1	Anlagenkennlinie	471
14.5.2	Regelung von Strömungsmaschinen	472
14.5.3	Verschaltungen mehrerer Kreiselpumpen	474
14.6	Kavitation	475
14.7	Ähnlichkeitsgesetze und dimensionslose Kennzahlen	477
14.7.1	Ähnlichkeitsbeziehungen	477
14.7.2	Dimensionslose Kennzahlen	478
14.8	Verständnisfragen	480
14.9	Aufgaben	480
	Literatur	481
15	Wirbelschichten	483
15.1	Erscheinungsformen von Wirbelschichten	483
15.2	Fluiddynamische Grundlagen	485
15.2.1	Druckverlustcharakteristik	485
15.2.2	Lockerungsgeschwindigkeit	486
15.2.3	Expansion von Fließbetten	488
15.2.4	Feststoffverhalten bei der Fluidisierung mit einem Gasstrom	489
15.2.5	Betriebszustände in Wirbelschichten	491
15.3	Gasblasen in Wirbelschichten	492
15.4	Feststoffmischung in Wirbelschichten	495
15.5	Gasphasenvermischung in Wirbelschichten	498
15.6	Stoffübergang zwischen Fluid und Partikeln	498
15.7	Modellierung von Wirbelschichtreaktoren	499
15.8	Technische Anwendungen	500
15.8.1	Acrylnitrilsynthese	500
15.8.2	Verbrennung von Kohle	501
15.9	Verständnisfragen	502
15.10	Aufgaben	502
	Literatur	504
16	Feststofftransport in Rohrleitungen	505
16.1	Physikalische Grundlagen des Feststofftransports	505
16.2	Pneumatische Förderung	507
16.2.1	Einteilung der pneumatischen Förderung	508
16.2.2	Bestimmung des Druckverlustes	511
16.2.3	Luftexpansion entlang des Förderwegs	521
16.2.4	Fördergeschwindigkeit	521
16.3	Technische Fördersysteme	525
16.4	Hydraulische Förderung	526
16.5	Verständnisfragen	528
16.6	Aufgaben	529
	Literatur	531

17 Gas/Flüssigkeits-Strömungen in Rohren	533
17.1 Strömungs- und Phasenverteilungszustände	533
17.1.1 Strömungen in vertikalen Rohren	534
17.1.2 Strömungen in horizontalen Rohren	535
17.2 Grundlegende Beziehungen und Definitionen	536
17.3 Bestimmung der Strömungsform	538
17.3.1 Strömungsformen in horizontalen Rohren	539
17.3.2 Strömungsformen in vertikalen Rohren	541
17.3.3 Schlupf	543
17.4 Berechnungsverfahren für Gas/Flüssigkeits-Strömungen	543
17.4.1 Homogenes Modell	544
17.4.2 Heterogenes Modell (Schlupfmodell)	548
17.5 Verständnisfragen	551
17.6 Aufgaben	552
Literatur	553
18 Mischen und Rühren	555
18.1 Definitionen und Einteilungen	556
18.2 Rühren	557
18.2.1 Technische Rührsysteme	558
18.2.2 Impulstransport	561
18.2.3 Leistungscharakteristik	563
18.2.4 Rühren von nicht-Newtonschen Flüssigkeiten	565
18.2.5 Wärmetransport	568
18.2.6 Homogenisieren in Rührbehältern	569
18.2.7 Suspendieren von Feststoffen	571
18.2.8 Begasen	575
18.2.9 Dispergieren von Flüssig/flüssig-Systemen	583
18.3 Statische Mischer	587
18.3.1 Druckverlust	588
18.3.2 Mischgüte	590
18.4 Mikromischer	592
18.4.1 Einteilung	593
18.4.2 Arbeitsbereiche von Mikromischern	596
18.5 Verständnisfragen	596
18.6 Aufgaben	597
Literatur	600
19 Blasensäulen	603
19.1 Blasensäulen mit und ohne Einbauten	605
19.1.1 Bauarten	605
19.1.2 Fluidodynamik	607
19.1.3 Blasengröße und -bewegung	609
19.1.4 Dispersion	611
19.1.5 Gasgehalt	612

19.1.6 Stofftransport	614
19.1.7 Wärmeübergang	617
19.2 Suspensionsblasensäulen	619
19.3 Airlift-Schlaufenapparate	620
19.4 Abstromblasensäulen	622
19.4.1 Bauarten und Einsatzgebiete	623
19.4.2 Betriebsbedingungen und Gasgehalt	624
19.4.3 Stoffübertragung	626
19.5 Modellgleichungen zur Beschreibung von Blasensäulenreaktoren ..	626
19.6 Anwendungsbereiche	630
19.7 Verständnisfragen	630
19.8 Aufgaben	631
Literatur	634
Sachverzeichnis	637