

Inhaltsverzeichnis

Teil I Grundlagen und Methoden

1	Grundlagen der Transportprozesse.	3
1.1	Molekulare Transportvorgänge	4
1.1.1	Molekularer Impulstransport (innere Reibung von Fluiden)	7
1.1.2	Molekularer Energietransport (Wärmeleitung)	9
1.1.3	Molekularer Stofftransport (Diffusion)	10
1.2	Molekulare Transport- und Ausgleichskoeffizienten	13
1.2.1	Viskosität	13
1.2.2	Wärmeleitfähigkeit	21
1.2.3	Diffusionskoeffizienten	22
1.3	Konvektive Transportvorgänge	25
1.3.1	Konvektiver Impulstransport	25
1.3.2	Konvektiver Energietransport	26
1.3.3	Konvektiver Stofftransport	28
1.4	Turbulente Transportvorgänge	28
1.5	Bilanzgleichungen	32
1.5.1	Differenzielle Bilanzgleichungen	34
1.5.2	Integrale Bilanzgleichungen	40
1.5.3	Anfangs- und Randbedingungen	46
1.6	Umwandlungsvorgänge	47
1.6.1	Stoffumwandlung	47
1.6.2	Energieumwandlung	52
1.6.3	Impulsänderung	53
1.7	Konvektiver Wärme- und Stoffübergang	53
1.8	Phasengleichgewichte	58
1.8.1	Gas/Flüssigkeits-Gleichgewichte	59
1.8.2	Flüssig/flüssig-Gleichgewichte	61
1.8.3	Fest/flüssig-Gleichgewichte	62

1.8.4	Sorptionsgleichgewichte	62
1.8.5	Randbedingungen für Stofftransportvorgänge	63
1.9	Verständnisfragen	64
1.10	Aufgaben	66
	Literatur	73
2	Energie- und Stofftransport in ruhenden Medien	77
2.1	Stationäre Diffusion	78
2.1.1	Äquimolare Diffusion in einer ebenen Schicht	79
2.1.2	Einseitige Diffusion	80
2.1.3	Diffusion mit homogener chemischer Reaktion	82
2.1.4	Diffusion mit heterogener chemischer Reaktion	89
2.2	Instationäre Diffusion	91
2.2.1	Instationäre Diffusion in einer Platte	91
2.2.2	Instationäre Diffusion in einer Kugel	96
2.3	Verständnisfragen	100
2.4	Aufgaben	101
	Literatur	111
3	Wärme- und Stoffübergangstheorien	113
3.1	Wärmedurchgang	114
3.2	Stoffdurchgang	116
3.3	Stoffübergangstheorien	119
3.3.1	Filmtheorie	119
3.3.2	Grenzschichttheorie	123
3.3.3	Penetrations- und Oberflächenerneuerungstheorie	126
3.3.4	Anwendungsbereiche für die verschiedenen Wärme- und Stofftransporttheorien	128
3.4	Stoffaustausch mit homogener chemischer Reaktion	129
3.4.1	Filmtheorie	129
3.4.2	Penetrationstheorie	131
3.4.3	Generelle Auswirkungen einer homogenen Reaktion 1. Ordnung auf den Stofftransport	135
3.5	Verständnisfragen	136
3.6	Aufgaben	136
	Literatur	142
4	Mischungszustände in technischen Systemen	145
4.1	Idealisierte Modellapparate	146
4.1.1	Idealer Rührkessel	147
4.1.2	Ideales Strömungsrohr	149

4.2	Reale Apparate	149
4.2.1	Mischvorgänge in absatzweise betriebenen Apparaten	149
4.2.2	Dispersionsmodell für kontinuierlich betriebene Apparate	153
4.3	Verweilzeitverteilung	158
4.3.1	Experimentelle Bestimmung einer Verweilzeitverteilung	160
4.3.2	Verweilzeitverteilung idealer Apparate	162
4.3.3	Modellierung des Verweilzeitverhaltens realer Apparate	163
4.4	Verständnisfragen	168
4.5	Aufgaben	169
	Literatur	179
5	Strömungen in Rohrleitungen	181
5.1	Impulstransport	182
5.1.1	Laminare Rohrströmung	182
5.1.2	Turbulente Rohrströmung	184
5.1.3	Strömungswiderstand in Rohren	191
5.1.4	Strömungen nicht-Newtonscher Flüssigkeiten	196
5.1.5	Strömungen durch Rohrleitungssysteme	200
5.2	Konvektiver Wärme- und Stoffübergang	202
5.2.1	Laminare Rohrströmung	202
5.2.2	Turbulente Rohrströmung	209
5.2.3	Konvektiver Wärmeübergang	209
5.3	Stoffübergang mit heterogener chemischer Reaktion	210
5.4	Dispersion in Rohrströmungen	214
5.5	Verständnisfragen	216
5.6	Aufgaben	217
	Literatur	227
6	Strömungen an ebenen Platten	229
6.1	Impulstransport	230
6.1.1	Laminare Grenzschicht	232
6.1.2	Turbulente Grenzschicht	236
6.1.3	Reibungsbeiwert	237
6.2	Konvektiver Wärme- und Stoffübergang	239
6.2.1	Laminare Strömung	239
6.2.2	Turbulente Strömung	245
6.3	Fluidodynamik und Stofftransport bei hohem Partialdruck	246
6.3.1	Physikalische Problematik	247
6.3.2	Geschwindigkeitsprofil	248
6.3.3	Konzentrationsprofil	249

6.3.4	Reibungsbeiwert.	251
6.3.5	Mittlere Sherwoodzahl.	252
6.4	Stoffübergang mit heterogener chemischer Reaktion	254
6.5	Verständnisfragen.	257
6.6	Aufgaben	258
	Literatur.	267
7	Disperse Systeme.	269
7.1	Stationäre Partikelbewegung	270
7.1.1	Bewegungsgleichung kugelförmiger Partikel	270
7.1.2	Feste Einzelpartikel	271
7.1.3	Fluide Einzelpartikel	280
7.2	Instationäre Partikelbewegung.	288
7.3	Bewegung von Partikelschwärmen	290
7.3.1	Feste Partikel	291
7.3.2	Fluide Partikel	295
7.4	Stationärer konvektiver Wärme- und Stoffübergang	296
7.4.1	Feste Einzelpartikel	297
7.4.2	Fluide Einzelpartikel	304
7.5	Instationärer konvektiver Wärme- und Stofftransport	310
7.5.1	Mathematische Grundlagen zur Bestimmung des Stofftransports	311
7.5.2	Innenproblem.	314
7.5.3	Außenproblem	318
7.6	Verständnisfragen.	319
7.7	Aufgaben	320
	Literatur.	330
8	Einphasig durchströmte Feststoffschüttungen.	333
8.1	Kennzeichnende Größen einer Feststoffschüttung.	334
8.1.1	Partikelabmessungen	334
8.1.2	Lückengrad.	337
8.1.3	Hydraulischer Durchmesser.	340
8.1.4	Geschwindigkeitsverteilung innerhalb einer Feststoffschüttung	341
8.2	Druckverlust.	343
8.3	Konvektiver Wärme- und Stoffübergang	347
8.3.1	Wärmeübergang in Analogie zur Einzelkugel	347
8.3.2	Stoffübergang in Analogie zum durchströmten Rohr	350
8.4	Modellierung von Austauschvorgängen.	352
8.4.1	Berechnung des Konzentrationsverlaufs	352
8.4.2	Dispersionskoeffizienten in Feststoffschüttungen	356

8.5	Verständnisfragen.	359
8.6	Aufgaben.	360
	Literatur.	368

Teil II Mehrphasensysteme und apparative Anwendungen

9	Filtration und druckgetriebene Membranverfahren.	373
9.1	Einteilung der Trennverfahren.	374
9.2	Prozessführung.	376
9.2.1	Kuchenfiltration.	376
9.2.2	Querstromfiltration.	377
9.2.3	Tiefenfiltration.	378
9.3	Kennzeichnung der Trenngüte.	380
9.4	Filtration.	384
9.4.1	Grundlegende Theorie der Filtration.	384
9.4.2	Kuchenfiltration von Suspensionen.	386
9.4.3	Staubabscheidung durch Filtration.	396
9.5	Druckgetriebene Membranverfahren.	398
9.5.1	Definitionen.	401
9.5.2	Grundlegende Theorie zu Membranverfahren.	403
9.5.3	Mikro- und Ultrafiltration.	408
9.5.4	Nanofiltration.	408
9.5.5	Umkehrosmose.	409
9.5.6	Apparative Umsetzung der Membranfiltration.	411
9.6	Verständnisfragen.	414
9.7	Aufgaben.	415
	Literatur.	423
10	Thermische Trocknung fester Stoffe.	427
10.1	Grundbegriffe der thermischen Trocknung.	428
10.2	Eigenschaften feuchter Güter.	430
10.2.1	Arten der Feuchtigkeitsbindung.	430
10.2.2	Sorptionsisothermen.	431
10.2.3	Bewegung der Feuchtigkeit im Gut.	432
10.3	Eigenschaften des feuchten Gases.	435
10.4	Wärme- und Stoffübergang bei der Konvektionstrocknung.	438
10.4.1	Wärmeübertragung an das feuchte Gut.	438
10.4.2	Beharrungstemperatur.	439
10.4.3	Kühlgrenztemperatur.	441
10.5	Wärmeübergang bei der Kontaktstrocknung.	443
10.6	Berechnungsgrundlagen für Konvektionstrockner.	444
10.6.1	Trockengas- und Energiebedarf bei der Konvektionstrocknung.	444
10.6.2	Gasführung in Konvektionstrocknern.	447

10.7	Kinetik der Trocknung, Trocknungsverlauf.	449
10.7.1	I. Trocknungsabschnitt.	451
10.7.2	II. Trocknungsabschnitt.	454
10.8	Bauarten von Trocknern.	458
10.8.1	Konvektionstrockner.	459
10.8.2	Kontaktstrockner.	462
10.8.3	Strahlungstrockner.	464
10.8.4	Bedeutung der Energiekosten für die Trocknerauswahl.	465
10.9	Verständnisfragen.	466
10.10	Aufgaben.	467
	Literatur.	476
11	Rieselfilmapparate.	477
11.1	Fluidodynamik von Rieselfilmen.	479
11.2	Wärmeübertragung zwischen Wand und Flüssigkeit.	482
11.3	Stoffübertragung zwischen Rieselfilm und Gas.	485
11.3.1	Laminarer Rieselfilm.	486
11.3.2	Filme mit welliger Oberfläche.	492
11.3.3	Gasseitiger Stoffübergang.	493
11.4	Stofftransport mit homogener chemischer Reaktion.	494
11.4.1	Reaktion 1. Ordnung.	496
11.4.2	Reaktion 2. Ordnung.	499
11.5	Technische Anwendungen von Rieselfilmapparaten.	501
11.6	Verständnisfragen.	503
11.7	Aufgaben.	504
	Literatur.	511
12	Bodenkolonnen.	513
12.1	Thermodynamische Grundlagen und Stoffbilanzen.	514
12.1.1	Stoffbilanz um eine Rektifizierkolonne.	515
12.1.2	Stoffbilanz um eine Absorptions- oder Desorptionskolonne.	520
12.2	Konstruktive Merkmale.	522
12.3	Belastungsbereich und Belastungskennfeld von Kolonnenböden.	526
12.3.1	Maximale Gasbelastung.	527
12.3.2	Minimale Gasbelastung.	530
12.3.3	Maximale Flüssigkeitsbelastung.	532
12.3.4	Minimale Flüssigkeitsbelastung.	533
12.3.5	Belastungskennfeld.	533
12.4	Zweiphasenströmung in Bodenkolonnen.	534
12.5	Druckverlust des Gases über einen Boden.	535
12.6	Phasengrenzfläche in der Zweiphasenschicht.	537
12.7	Stoffübergang in der Zweiphasenschicht.	538

12.8	Verständnisfragen	545
12.9	Aufgaben	546
	Literatur	553
13	Füllkörper- und Packungskolonnen	555
13.1	Aufbau und Funktionsweise	556
13.2	Fluiddynamik	561
13.2.1	Flüssigkeitsinhalt	561
13.2.2	Druckverlust	567
13.3	Belastungsgrenzen, Belastungskennfeld, Arbeitsbereich	572
13.4	Stoffübergang	577
13.5	Axiale Dispersion	582
13.6	Auswahlkriterien für Kolonneneinbauten	582
13.7	Verständnisfragen	583
13.8	Aufgaben	584
	Literatur	590
14	Strömungsmaschinen	593
14.1	Einteilung und Anwendungsfelder von Förderorganen	594
14.2	Bauformen von Strömungsmaschinen	597
14.3	Energieumsetzung im Laufrad	600
14.3.1	Impulssatz und Eulersche Hauptgleichung	601
14.3.2	Kanalwirbel und Kraftübertragung	604
14.3.3	Energiebilanz und Druckerhöhung	605
14.4	Kennlinien	607
14.4.1	Theoretische Konstruktion einer Drosselkurve	608
14.4.2	Stabile und instabile Kennlinien	613
14.4.3	Kennfeld	614
14.4.4	Kennlinie einer Kolbenpumpe	616
14.5	Betriebspunkte von Kreiselpumpen	617
14.5.1	Anlagenkennlinie	617
14.5.2	Regelung von Strömungsmaschinen	618
14.5.3	Verschaltungen mehrerer Kreiselpumpen	620
14.6	Kavitation und Haltedruckhöhe	621
14.6.1	Kavitation	621
14.6.2	Haltedruckhöhe und NPSH-Wert	622
14.7	Ähnlichkeitsgesetze und dimensionslose Kennzahlen	624
14.7.1	Ähnlichkeitsbeziehungen	624
14.7.2	Dimensionslose Kennzahlen	625
14.8	Verständnisfragen	628
14.9	Aufgaben	629
	Literatur	636

15	Wirbelschichtapparate	637
15.1	Erscheinungsformen von Wirbelschichten	638
15.2	Fluiddynamische Grundlagen	639
15.2.1	Druckverlustcharakteristik	639
15.2.2	Lockerungsgeschwindigkeit	642
15.2.3	Expansionsverhalten homogener Wirbelschichten	643
15.2.4	Feststoffverhalten bei der Fluidisierung mit einem Gasstrom	644
15.2.5	Betriebszustände in Wirbelschichten	647
15.3	Eigenschaften von Gasblasen	648
15.4	Feststoffmischung	651
15.5	Gasphasenvermischung	654
15.6	Wärme- und Stoffübergang zwischen Fluid und Partikeln	655
15.7	Modellierung von Wirbelschichtreaktoren	656
15.8	Technische Anwendungen	656
15.8.1	Acrylnitrilsynthese	657
15.8.2	Verbrennung von Kohle	657
15.9	Verständnisfragen	659
15.10	Aufgaben	659
	Literatur	666
16	Feststofftransport in Rohrleitungen	669
16.1	Physikalische Grundlagen des Feststofftransports	671
16.2	Pneumatische Förderung	672
16.2.1	Einteilung der pneumatischen Förderung	673
16.2.2	Berechnungen von Leitungen für die pneumatische Förderung	676
16.2.3	Luftexpansion entlang des Förderwegs	687
16.2.4	Fördergeschwindigkeit	688
16.3	Technische Fördersysteme	692
16.4	Hydraulische Förderung	693
16.5	Verständnisfragen	696
16.6	Aufgaben	696
	Literatur	701
17	Gas/Flüssigkeits-Strömungen in Rohrleitungen	703
17.1	Strömungs- und Phasenverteilungszustände	704
17.1.1	Strömungsformen in vertikalen Rohren	705
17.1.2	Strömungsformen in horizontalen Rohren	706
17.2	Grundlegende Beziehungen und Definitionen	708
17.3	Bestimmung der Strömungsform	710
17.3.1	Strömungsformen in horizontalen Rohren	711
17.3.2	Strömungsformen in vertikalen Rohren	713

17.3.3	Schlupf	714
17.3.4	Gasgehalt	715
17.4	Berechnung des Druckverlusts von Gas/Flüssigkeits-Strömungen . . .	717
17.4.1	Homogenes Modell	718
17.4.2	Heterogenes Modell (Schlupfmodell)	721
17.4.3	Weitere Berechnungsansätze	725
17.5	Verständnisfragen	726
17.6	Aufgaben	726
	Literatur	731
18	Mischen und Rühren	733
18.1	Definitionen und Einteilungen	735
18.2	Rühren	736
18.2.1	Technische Rührsysteme	737
18.2.2	Impulstransport	741
18.2.3	Leistungscharakteristik	744
18.2.4	Rühren von nicht-Newtonschen Flüssigkeiten	747
18.2.5	Wärmetransport	749
18.2.6	Homogenisieren in Rührbehältern	751
18.2.7	Suspendieren von Feststoffen	753
18.2.8	Dispergierung von Gasen	758
18.2.9	Dispergieren von Flüssig/flüssig-Systemen	769
18.2.10	Maßstabsübertragung	772
18.3	Statische Mischer	774
18.3.1	Druckverlust	777
18.3.2	Mischgüte	778
18.4	Mikromischer	781
18.4.1	Einteilung	782
18.4.2	Arbeitsbereiche von Mikromischern	784
18.5	Verständnisfragen	785
18.6	Aufgaben	786
	Literatur	795
19	Blasensäulen	799
19.1	Blasensäulen mit und ohne Einbauten	800
19.1.1	Einteilung und Charakteristika	800
19.1.2	Bauarten	802
19.1.3	Fluidodynamik	804
19.1.4	Blasengröße und -bewegung	806
19.1.5	Dispersion	808
19.1.6	Gasgehalt	809
19.1.7	Stofftransport	811
19.1.8	Wärmeübergang	815

19.2	Suspensionsblasensäulen	817
19.3	Airlift-Schlaufenapparate	818
19.4	Abstromblasensäulen	821
19.4.1	Bauarten und Einsatzgebiete	821
19.4.2	Betriebsbedingungen und Gasgehalt	823
19.4.3	Stoffübertragung	823
19.5	Modellierung von Blasensäulenreaktoren	825
19.5.1	Axiales Dispersionsmodell	826
19.5.2	Vergleich gemessener und berechneter Konzentrationsverläufe	828
19.6	Maßstabsübertragung	830
19.7	Anwendungsbereiche	831
19.8	Verständnisfragen	832
19.9	Aufgaben	832
	Literatur	843
	Stichwortverzeichnis	845