

Matthias Kraume

# Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik

Grundlagen und apparative Umsetzungen

2. Aufl. 2012

**4y Springer Vieweg**

# Inhalt

## Teil I Grundlagen und Methoden

<b>1 Grundlagen der Transportprozesse</b> . . . . .	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
<b>2 Diffusion in ruhenden Medien</b> . . . . .	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
<b>3</b>	<b>Stoffaustausch zwischen zwei fluiden Phasen . . . . .</b>	<b>79</b>
3.1	Stoffübergangstheorien . . . . .	80
3.1.1	Filmtheorie . . . . .	80
3.1.2	Grenzschichttheorie . . . . .	83
3.1.3	Penetrations-und Oberflächenerneuerungstheorie . . . . .	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
<b>4</b>	<b>Beschreibung von Ausgleichsvorgängen in technischen Systemen . . . . .</b>	<b>107</b>
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
<b>5</b>	<b>Strömungen in Rohren . . . . .</b>	<b>131</b>
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
<b>6</b>	<b>Strömungen an ebenen Platten</b>	<b>165</b>
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	Fluidynamik 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
<b>7</b>	<b>Disperse Systeme</b>	<b>195</b>
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
<b>8</b>	<b>Einphasig durchströmte Feststoffschüttungen . . . . .</b>	<b>247</b>
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
 <b>Teil II Mehrphasensysteme und apparative Anwendungen</b>		
<b>9</b>	<b>Filtration und druckgetriebene Membranverfahren . . . . .</b>	<b>277</b>
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
<b>10</b>	<b>Trocknung fester Stoffe . . . . .</b>	<b>319</b>
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
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
<b>11</b>	<b>Strömung von Flüssigkeitsfilmen . . . . .</b>	<b>357</b>
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

<b>12 Bodenkolonnen</b> .....	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
<b>13 Packungskolonnen</b> .....	419
13.1 Aufbau und Funktionsweise .....	420
13.2 Fluidodynamik .....	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
<b>14 Förderung von Fluiden</b> .....	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
<b>15</b>	<b>Wirbelschichten . . . . .</b>	<b>483</b>
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
<b>16</b>	<b>Feststofftransport in Rohrleitungen . . . . .</b>	<b>505</b>
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



<b>17 Gas/Flüssigkeits-Strömungen in Rohren</b> .....	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
<b>18 Mischen und Rühren</b> .....	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
<b>19 Blasensäulen</b> .....	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
<b>Sachverzeichnis</b>		<b>637</b>