

Inhalt

Vorwort XII

1	Mischtechnik, Aufgaben und Bedeutung	1
	<i>Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. M. Pahl, Gesamthochschule Paderborn</i>	
1.1	Definitionen und Einteilung	1
1.2	Diffusives Mischen	5
1.3	Laminare Mischen	8
1.4	Turbulentes Vermischen und charakteristische Strömungen	9
1.5	Systemkenngrößen und Entmischung	12
1.6	Erfäßbarkeit der Mischvorgänge	13
1.7	Qualitätssicherung und Mischgüte	14
1.8	Ausblick	18
1.9	Literatur	19
2	Homogenisieren in Rührbehältern	21
	<i>Prof. Dr.-Ing. M. Kraume, Institut für Verfahrenstechnik, TU Berlin</i>	
2.1	Rührsysteme	21
2.2	Strömungsfelder im Rührbehälter	26
2.3	Förder- und Zirkulationsmengen	31
2.4	Leistungsbedarf von Rührern	32
2.5	Homogenisieren von Flüssigkeitsgemischen	37
2.6	Literatur	43
3	Standardmessmethoden	45
	<i>Dipl.-Ing. R. Angst, Institut für Verfahrenstechnik, TU Berlin, Dipl.-Ing. A. Wittig, Soltau</i>	
3.1	Einleitung	45
3.2	Leistungsmessung	45
3.2.1	Motorleistung	46
3.2.2	Wellenleistung	46
3.2.3	Behälterreaktion	49
3.2.4	Drehfrequenz	50
3.3	Mischzeitmessung [3.8, 3.9]	50

3.3.1	Letzter Farbumschlag	51
3.3.2	Fortschreitender Farbumschlag	53
3.3.3	Schlierenmethode	53
3.3.4	Sondenmethoden	54
3.3.5	Probennahme	54
3.3.6	Temperaturerhöhung	55
3.3.7	Aushärtende Kunststoffe	55
3.3.8	Folgereaktionen	55
3.4	Sonderfälle	57
3.4.1	Emulsionen	57
3.4.2	Begasen	57
3.4.3	Suspensionen	58
	Lokale Verfahren	59
	Rückstreuungsmessung	59
	Restlichtmessung	59
	Endoskop	60
	Kapazitive Sonden	60
	Ultraschall-Extinktion	60
	Absaug-Sonde	60
	Integrale Verfahren	61
3.5	Praktische Beispiele	61
3.5.1	Messung der Mischzeit	61
3.6	Literatur	62
4	Optische und tomographische Messverfahren für Mischprozesse	63
	<i>Prof. Dr.-Ing. D. Mewes, Institut für Verfahrenstechnik, Universität Hannover</i>	
4.1	Einleitung	63
4.2	Laser- und Phasen Doppler Anemometrie	64
4.2.1	LDA – Laser Doppler Anemometrie	64
4.2.2	PDA – Phasen Doppler Anemometrie	68
4.3	Lichtschnittverfahren	69
4.3.1	PIV – Particle Image Velocimetry	70
4.3.2	LIF – Laser Induzierte Fluoreszenz	72
4.4	Tomographische Messverfahren	76
4.4.1	Rekonstruktion	78
4.4.2	Zweiwellenlängenphotometrie	78
4.4.3	Holographische Interferometrie	81
4.4.4	Elektrische Tomographie	84
4.5	Zusammenfassung	86
4.6	Literatur	88
5	Numerische Strömungsberechnung	91
	<i>Prof. Dr.-Ing. M. Sommerfeld, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg</i>	
5.1	Einleitung	91
5.2	Methoden zur numerischen Berechnung turbulenter Strömungen	92

5.3	Diskretisierung der Grundgleichungen	98
5.4	Charakterisierung von Mehrphasensystemen	101
5.5	Numerische Methoden für dichte Mehrphasenströmungen	102
5.6	Numerische Methoden für turbulente Mehrphasenströmungen	104
5.6	Anwendung von numerischen Berechnungsverfahren für Mischprozesse	113
5.7	Ausblick	118
5.8	Literatur	118
6	Wärmeübergang im Rührkessel	123
	<i>Dr.-Ing. H. Judat, Bayer AG, Leverkusen,</i>	
	<i>Prof. Dr. R. Sperling (Vortragender), Hochschule Anhalt (FH), Köthen</i>	
6.1	Einleitung	123
6.2	Grundlagen	123
6.2.1	Der Wärmeübergang auf der Innenseite des Rührkessels	125
6.2.2	Modellvorstellungen zum Wärmetransport im Rührkessel bei schleichender Strömung	127
6.2.3	Gebrauchsformeln zum Wärmeübergang im turbulenten Bereich	134
6.2.4	Optimierungskriterien	134
	Symbole in Tabelle 6.1	137
6.3	Praktische Beispiele	143
6.4	Literatur	144
7	Bauelemente rührtechnischer Apparate – Auslegungskriterien, Wirtschaftlichkeit, anwendungsorientierte Lösungen	147
	<i>Dr.-Ing. R. Krebs, EKATO, Schopfheim</i>	
7.1	Technische und betriebswirtschaftliche Randbedingungen	147
7.2	Kriterien für die Rührorganauswahl	149
7.3	Energetisch optimierte Apparate	154
7.4	Minimierung der Investitionskosten für Rührwerke, Behälter und Einbauten	157
7.5	Multifunktionsapparate	164
7.6	Monoproduktanlagen	166
7.6	Zusammenfassung	173
7.7	Literatur	174
8	Dynamische Mischer für hochviskose Medien	175
	<i>Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. M. Pahl, Gesamthochschule Paderborn</i>	
8.1	Einleitung	175
8.2	Materialverhalten	178
8.3	Leistung	180
8.4	Mischzeit	182
8.5	Auswahl der Mischsysteme	184
8.6	Mischer für hochviskose Medien	186
8.6.1	Einwellige Rührwerke	186

8.6.2	Mehrwellige Rührwerke	186
8.6.3	Doppelmuldenknetter	187
8.6.4	Stempelknetter	189
8.6.5	Mischer mit rotierenden Behältern	190
8.6.6	Planetenrührwerke	191
8.6.7	Rührwerksmühlen	192
8.6.8	Einwellige dynamische Durchflußmischer	193
8.6.9	Walzwerke	194
8.6.10	Weitere Mischer für hochviskose Medien	194
8.7	Literatur	195
9	Statisches Mischen	197
	<i>F. A. Streiff, Sulzer, Winterthur/Schweiz</i>	
9.1	Einleitung	197
9.2	Mischvorgänge bei laminarer Strömung	198
9.3	Mischvorgänge bei turbulenter Strömung	202
9.4	Mischgüte	205
9.5	Druckabfall	210
9.6	Verweilzeitverteilung	213
9.7	Bauformen und Vergleich	214
9.8	Mehrphasige Systeme	214
9.9	Wärmeübertragung und Mischreaktoren	216
9.10	Berechnungsbeispiele zum statischen Mischen	218
	Aufgabe 1	218
	Aufgabe 2	218
9.11	Literatur	219
10	Suspendieren	221
	<i>Prof. Dr.-Ing. M. Kraume, Institut für Verfahrenstechnik, TU Berlin</i>	
10.1	Suspendierzustände und Suspendierkriterien	221
10.2	Leistungsbedarf beim Rühren von Suspensionen	225
10.3	Mechanismen und Modellvorstellungen zum Suspendieren von Feststoffpartikeln	226
10.4	Bestimmung der Suspendierdrehfrequenz	227
10.5	Feststoffverteilung	230
10.6	Stoffübergang	232
10.7	Homogenisieren	232
10.8	Maßstabsübertragung	233
10.9	Mechanische Aspekte	235
10.10	Literatur	237
11	Begasen im Rührbehälter	241
	<i>Dr.-Ing. P. Zehner, BASF, Ludwigshafen</i>	
11.1	Einleitung	241
11.1.1	Begasungsmethoden im Rührbehälter	243

11.1.2	Wichtige verfahrenstechnische Parameter	243
11.1.3	Fluiddynamische Grundlagen	244
11.2	Oberflächenbegasung im Rührbehälter	247
11.2.1	Beginn der Oberflächenbegasung	247
11.2.2	Gasvolumenanteil	250
11.2.3	Stoffübertragung	253
11.2.4	Rührerleistung	256
11.3	Druckbegasung	257
11.3.1	Maximaler Gasvolumenstrom	257
11.3.2	Rührerleistung	261
11.3.3	Gasvolumenanteil	262
11.3.4	Stoffübertragung	266
11.4	Anhang	269
11.4.1	Eigene Formelzeichen	269
	Zeichen	269
	Indizes	269
	Dimensionslose Größen	270
11.4.2	Literaturverzeichnis	270
11.4.3	Rechenbeispiele	271
12	Gerührte, begaste Suspensionsreaktoren	275
	<i>Priv. Doz. Dr.-Ing. A. Steiff, Universität Dortmund</i>	
12.1	Einführung	275
12.2	Fluiddynamik	279
12.3	Stoffübergang und chemische Reaktion	290
	Sonderfälle	298
12.4	Modellierung und Berechnung	304
	Gasphase	305
	Flüssigkeitsphase	305
	Feststoffphase	305
	Energiebilanz	306
12.5	Literatur	310
13	Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Emulgiertechnik	313
	<i>Prof. Dr.-Ing. H. Schubert, Universität Karlsruhe</i>	
13.1	Einleitung	313
13.2	Wichtige Eigenschaften von Emulsionen, die durch verfahrenstechnische Maßnahmen maßgeblich gestaltet werden können	313
13.3	Emulsionstypen	316
13.4	Tropfenzerkleinerung in Emulsionen	318
13.4.1	Tropfenaufruch in laminarer Strömung	318
13.4.2	Tropfenaufruch in turbulenter Strömung	319
13.5	Kurzzeitstabilität von Emulsionen	323
13.5.1	Physikalische Stabilität von Emulsionen kurz nach dem Tropfenaufruch	323

13.5.2	Vermeiden von Tropfenkoaleszenz unmittelbar nach dem Tropfenaufbruch	326
13.6	Herstellen feindisperser Emulsionen	328
13.6.1	Zusammenstellung der Grundverfahren	328
13.6.2	Rotor-Stator-Systeme	329
13.6.2.1	Kolloidmühlen	330
13.6.2.2	Zahnkranz-Dispergiermaschinen	331
13.6.3	Hochdrucksysteme	332
	Tropfenzerkleinerung im herkömmlichen Hochdruckhomogenisator	333
	Tropfenzerkleinerung im Strahldispergator	333
	Tropfenzerkleinerung im Microfluidizer®	333
	Vergleich der Homogenisierdüsen	334
13.6.4	Emulgieren mit Hilfe von mikroporösen Membranen	336
13.7	Zusammenstellung der unterschiedlichen Emulgiersysteme	337
13.8	Ausblick	339
13.9	Danksagung	340
13.10	Literatur	340
14	Rühren nicht-newtonscher Flüssigkeiten	343
	<i>Dr.-Ing. A. Knoch, Deutsches Institut für Lebensmitteltechnik e. V., Quakenbrück</i>	
14.1	Einleitung	343
14.2	Eigenschaften nicht-newtonscher Fluide	343
14.3	Einfluss der nicht-newtonschen Fluideigenschaften auf das Strömungsfeld	348
14.4	Homogenisieren nicht-newtonscher Fluide	350
14.4.1	Beeinflussung der Leistungscharakteristik	351
14.4.2	Beeinflussung der Mischzeitcharakteristik	355
14.5	Emulgieren nicht-newtonscher Fluide	359
14.5.1	Tropfenaufbruch bei newtonschen Phasenanteilen	359
14.5.2	Tropfenaufbruch bei nicht-newtonschen Phasenanteilen	361
14.6	Bedeutung der nicht-newtonschen Fluideigenschaften bei den weiteren Rühraufgaben	367
14.7	Zusammenfassung und Ausblick	369
14.8	Literatur	370
15	Rührprobleme in der Biotechnologie	375
	<i>Dr.-Ing. H.-J. Henzler, Bayer AG, Wuppertal</i>	
15.1	Einführung	375
15.2	Gegenstand und Eigenschaften biotechnologischer Prozesse	375
15.3	Wichtige Rühraufgaben in der Biotechnologie	376
15.4	Fermentation	377
15.4.1	Grundzüge von Fermentationen	377
15.4.2	Stoffeigenschaften von Fermentationsmedien	379
15.5	Bioreaktoren	381

15.5.1	Anforderungen	381
15.5.2	Standardreaktoren	381
15.6	Grundzüge der Auslegungsunterlagen für Rührfermenter	382
15.6.1	Leistungseintrag	383
15.6.2	Vermischung der Flüssigphase	385
15.6.3	Vermischung der Gasphase	386
15.6.4	Wärmetransport	387
15.6.5	Stofftransport: gasförmig-flüssig	389
15.6.6	Scherbeanspruchung	391
15.6.7	Berücksichtigung der nicht-Newtonschen Eigenschaften	392
15.6.8	Rührerauswahl und Maßstabsübertragung	393
15.6.9	Reaktormodellierung	395
15.7	Ursachen der Probleme bei der Dimensionierung von Bioreaktoren	396
15.8	Beispiele für Rühraufgaben in der Biotechnologie	397
15.8.4	Polymerfermentation	397
15.8.2	Fermentation mit mycelbildenden Mikroorganismen	399
15.8.3	Fermentation mit tierischen Zellen	400
15.9	Literatur	402
16	Modelltechnik und Maßstabsübertragung	403
	<i>Dr.-Ing. P. Zehner, BASF AG, Ludwigshafen</i>	
16.1	Allgemeines	403
16.2	Möglichkeiten der Produktionserhöhung	404
16.3	Theoretische Überlegungen	407
16.4	Prinzipielle Aussagen	413
16.5	Allgemeine Strategie	414
16.6	Scale-up-Ziele	418
16.6.1	Übergeordnete Ziele	418
16.6.2	Reaktionskinetische Ziele	419
16.6.3	Verfahrenstechnische Ziele	420
	Register	423