

Rührwerke

Theoretische Grundlagen, Auslegung und Bewertung

Herausgegeben von

FH Anhalt Köthen
**Fachbereich Lebensmitteltechnologie/ Biotechnologie/
Verfahrens- und Umwelttechnik**

und

Chema-Balcke-Dürr
Verfahrenstechnik GmbH Rudisleben

Autoren:

Friedrich Liepe, Federführung
Reinhard Sperling
Solomon Jembere

Inhaltsverzeichnis

	Formelzeichen	12
1	Einführung	15
	Literatur zu Abschn. 1	21
2	Hydrodynamik der Rührerströmung	27
2.1	Einfluß der REYNOLDS-Zahl	27
2.2	Analyse und Dekomposition der Rührprozesse	29
2.2.1	Rühren bei turbulenter Strömung	28
2.2.1.1	Rührerauswahl und Strömungsformen	31
2.2.1.2	Zirkulationsströmung und Turbulenz	35
2.2.1.3	Dekomposition turbulenter Rührprozesse	41
2.2.2	Strömung im Übergangs- und laminaren Bereich	43
2.3	Impulsstromeintrag und Zirkulation	50
2.4	Turbulenz und vollausgebildete Turbulenz	54
2.4.1	Makroturbulenz	55
2.4.2	Mikroturbulenz	56
2.4.3	Grenz-REYNOLDS-Zahl der vollausgebildeten Turbulenz	60
2.5	Voll- und Teilbewehrung bei turbulenten Strömungen	63
2.6	Partikeltechnologie und Mikroturbulenz	67
2.7	Mehrphasensysteme	70
2.8	Maßstabsübertragung	72
	Literatur zu Abschn. 2	71
3	Rührwerksauslegung	79
3.1	Hydrodynamische Kennzahlen	79
3.2	Einfluß der Bewehrung bei turbulenten Strömungen	84
3.3	Rührerkennwerte, vollturbulenter Bereich	91
3.3.1	NEWTON-Zahlen axialfördernder Rührer	93
3.3.2	NEWTON-Zahlen radialfördernder Rührer	98
3.3.3	Axialkraft- und Zirkulationsbeiwerte	101
3.4	Spezielle Rühreranordnungen	107
3.4.1	Außermittige Rühreranordnung	107
3.4.2	Mehrrührersysteme	107
3.4.3	Leitrohranordnungen	108
3.5	Modellierung der NEWTON-Zahlen	111
3.5.1	Wandferne Rührer	112
3.5.2	Wandnahe und Schnecken-Rührer	116
3.6	Oberflächenbewegung	118
3.6.1	Oberflächenturbulenz in bewehrten Behältern	119
3.6.2	Trombenbildung	123
3.7	Nicht-NEWTONsche Fluide	125
3.7.1	Zeitunabhängige viskose Fluide	127
3.7.2	Zeitabhängige viskose Fluide	130

3.7.3	Viskoplastische Fluide	131
3.7.4	Viskoelastische Fluide	132
3.8	Scherbeanspruchungen und örtliche Dissipation	133
3.9	Wellenberechnung, Radialkräfte	133
3.9.1	Dauerbetrieb	135
3.9.2	Anfahren	141
3.9.3	Durchtritt durch die Flüssigkeitsoberfläche	141
3.9.4	Blockieren	142
	Literatur zu Abschn. 3	143
4	Hydrodynamische Untersuchungen im turbulenten Bereich	147
4.1	Experimentelle Untersuchungen	148
4.1.1	Geschwindigkeitsfelder	149
4.1.2.	Ermittlung globaler Größen	154
4.2	Ermittlung der dreidimensionalen Geschwindigkeitsverteilungen mit Hilfe der Numerischen Fluidodynamik	156
4.2.1	Transportbilanzgleichungen	156
4.2.2	Turbulenzmodell	157
4.2.3	Randbedingungen	158
4.2.4	Störfunktion/Volumenkräfte	160
4.2.5	Rechnung mit zwei verschiedenen Gittern	165
4.2.6	Numerische und technische Parameter	165
4.2.7	Ergebnisse	167
4.2.7.1	Rechnungen und Volumenkräfte	167
4.2.7.2	Frozen-Rotor-Rechnungen	173
4.2.8	Zusammenfassung	185
	Literatur zu Abschn. 4	186
5	Homogenisieren	191
5.1	Mischgüte, Kennwerte, Rührerauswahl	191
5.2	Homogenisieren im turbulenten Bereich	200
5.2.1	Rührsysteme mit Stromstörern, zentrischer Rührereinbau	200
5.2.1.1	Homogenisieren bei vollturbulenter Strömung	200
5.2.1.2	Homogenisieren bei nicht vollausgebildeter Turbulenz	206
5.2.2	Rührsysteme ohne Stromstörer	208
5.2.3	Exzentrischer und horizontaler Rührereinbau	210
5.2.4	Mehrrührersysteme	212
5.2.5	Rührerauswahl	213
5.3	Homogenisieren im laminaren und Übergangsbereich	214
5.3.1	Zeitkonstanten und Rührerauswahl	216
5.3.2	Einmischen leichterer Flüssigkeiten	223
5.3.3	Gebiete mit stark behindertem Stofftransport	226
5.3.4	Schleichende Strömungen	229
5.3.5	Nicht-NEWTONsche Fluide	232
5.4	Modelle für Homogenisierprozesse	234
5.4.1	Turbulenter Bereich	234

5.4.2	Modelle für das Makromischen	240
5.4.3	Homogenisieren mit überlagerten Folgereaktionen	247
5.5	Bemerkungen zur Bestimmung der Homogenisierbeiwerte	249
	Bezeichnungen und Literatur zu Abschn. 5	251
6	Dispergieren flüssig-flüssig	255
6.1	Tropfengrößen	256
6.1.1	Einfluß der Rührintensität, Trägheitsunterbereich	257
6.1.2	Einfluß der Viskosität der dispersen Phase	260
6.1.3	Einfluß der Rührzeit	261
6.1.4	Einfluß des Volumenanteils der dispersen Phase	263
6.1.5	Einfluß der nicht vollausgebildeten Turbulenz	264
6.1.6	Dispergieren bei hohen Werten der Dissipation	265
6.2	Tropfengrößenverteilungen	266
6.3	Koaleszenzzeiten	269
6.4	Abbau von Schichtungen	271
6.5	Bewertung der Rührer	272
6.6	Ermittlung der maximalen Dissipation	275
	Bezeichnungen und Literatur zu Abschn. 6	275
7	Suspendieren	281
7.1	Suspendierkriterien	282
7.2	Sedimentations- und Rührerleistung	285
7.2.1	Sedimentationsleistung	285
7.2.2	Rührerleistung und Rührerdrehmoment	291
7.3	1-s-Kriterium	293
7.3.1	Suspendieren bei kleinen Feststoffgehalten	297
7.3.2	Feststoffeinfluß	310
7.4	90%-Höhenkriterium	319
7.5	Rührervergleich	329
7.6	Stoffübergang Feststoff-Flüssigkeit	332
7.6.1	Stoffübergangsintensität, Lösegeschwindigkeit, Kornwachstum	332
7.6.2	Stoffübergangskoeffizienten	333
7.6.2.1	Turbulenzarme Flüssigkeiten	333
7.6.2.2	Turbulenzeinfluß	335
7.7	Zusammenfassung und Scale-up	336
7.7.1	1s-Kriterium	336
7.7.2	90% -Höhenkriterium	338
7.7.3	Experimentelle Ermittlung der Kennwerte	338
	Bezeichnungen und Literatur zu Abschn. 7	341
8	Begasung von Fluiden	347
8.1	Umsatz, Triebkraft, Begasungsintensität	350
8.1.1	Gasphase	353
8.1.2	Flüssige Phase und Kinetik	357
8.1.3	Einfluß örtlich unterschiedlicher Stoffübergangsintensitäten	361

8.1.4	Thermische Stabilität	362
8.2	Stoffeigenschaften, Mikroprozesse	363
8.2.1	Koaleszenzverhalten	363
8.2.2	Stoffdurchgangskoeffizient	366
8.2.2.1	Physikalische Absorption, Blasen mit innerer Zirkulation	366
8.2.2.2	Physikalische Absorption, Blasen ohne innere Zirkulation	369
8.2.2.3	Chemosorption	370
8.2.2.4	Zeitabhängigkeit des Stoffüberganges	374
8.2.2.5	Turbulenzeinfluß	374
8.2.3	Blasengrößen	375
8.2.3	Koaleszenzfrequenz	377
8.3	Hydrodynamik und Leistungseintrag bei Fremdbegasung	378
8.3.1	Überflutungspunkt, radialfördernde Rührer	379
8.3.2	Überflutungspunkt, axialfördernde Rührer	388
8.3.3	Minderung der Leistungsaufnahme	388
8.4	Gasgehalt und Stoffübergangsintensität bei Fremdbegasung	395
8.4.1	Gasgehalt	396
8.4.2	Volumenbezogener Stoffdurchgangskoeffizient	399
8.4.3	Spezifische Phasengrenzfläche	407
8.5	Selbstansaugende Rührer	407
8.6	Bemerkungen zur experimentellen Ermittlung der Sauerstoffeintragskapazität	410
8.6.1.	Dynamische Aufsättigungsmethode, Strippen mit Inertgas	410
8.6.2.	Dynamische Methode, Zugabe von Natriumsulfit	414
8.6.3.	Kurzzeitoxidation	415
8.6.4	Stationäre Prozesse	415
8.6.5	Hydracin-Methode	416
	Bezeichnungen und Literatur zu Abschn. 8	416
9	Behandlung von Zweiphasensystemen durch Mehrbereichs- und strukturierte Modelle sowie mit Methoden der numerischen Fluiddynamik	423
9.1	Mehrbereichs- und strukturierte Modelle für Gas- flüssig-Prozesse	423
9.1.1	Problemstellung	423
9.1.2	Zeitkonstanten und Strukturgrößen	424
9.1.3	Modell für Rühr-, Strahl und Airliftreaktoren	430
9.2	Numerische Berechnung von fest-flüssig-Prozessen in Rührmaschinen	431
9.2.1	Einleitung	432
9.2.2.	Kräfte am Partikel, Partikelbewegungsgleichung	433
9.2.3	Partikelsinkverhalten	435
9.2.4	Kraftwirkungen bei Zweiphasenströmungen	439
9.2.4.1	Partikelstöße mit der Behälterwand	439
9.2.4.2	Kollision zwischen Partikeln	443
9.2.4.3	Kollision Partikel-Rührer	447
9.2.4.4	Radialbeschleunigung der Partikeln	448

9.2.4.5	Turbulenzeinfluß auf die Partikelbewegung	452
9.2.4.6	Quer- und Magnuskraft	455
9.2.4.7	Makroskopische Rückwirkung des Feststoffes auf die Fluidbewegung	458
9.2.5	Lösungen und Ergebnisse	461
9.2.5.1	CFD-Code und Abarbeitungshinweise	461
9.2.5.2	Ergebnisbeispiele	465
9.2.6	Zusammenfassung	486
	Literatur zu Abschn. 9	487
10	Wärmetechnische Auslegung	491
10.1	Wärmebilanz stationärer Betrieb	491
10.2	Aufheiz- und Abkühlzeit	495
10.3	Wärmedurchgangskoeffizient	497
10.4	Wärmeübergangskoeffizient Rührgutseite	501
10.4.1	Turbulenter und Übergangsbereich	502
10.4.1.1	Wärmeübergang zur Behälterwand, bewehrt	502
10.4.1.2	Wärmeübergang zur Behälterwand, unbewehrt	505
10.4.1.3	Vergleich für be- und unbewehrte Systeme	506
10.4.1.4	Einbauwärmübertrager	507
10.4.2	Laminarer und Übergangsbereich	508
10.4.3	Nicht-NEWTONsche Fluide	511
10.4.4	Mehrphasensysteme	511
10.5	Betriebs- und Regelverhalten	512
	Bezeichnungen und Literatur zu Abschn. 10	513
11	Programmsystem RUDI	517
11.1	Installation	517
11.2	Handling	518
11.3	Lernfähigkeit, Normwertdatei	519
11.4	Programminhalt	520
11.4.1	Menüpunkt Stoffwerte	520
11.4.2	Menüpunkt Behälter	521
11.4.3	Menüpunkt Rührer	522
11.4.4	Menüpunkt Grundoperationen	528