
Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	XVI
1 Rühren, allgemein	1
1.1 Rühraufgaben	1
1.2 Rührausrüstungen	2
1.2.1 Rührbehälter und deren Einbauten	2
1.2.2 Rührertypen und ihre Wirkungsweise	4
1.2.3 Düsen und Gaszerteiler	10
1.2.4 Abdichtung von Rührerwellen	11
1.3 Mechanische Belastung	13
1.3.1 Belastung von Stromstörern	13
1.3.2 Belastung von Rührorganen	14
1.3.3 Behälterschwingungen	14
1.3.4 Verschleiß von Rührorganen	14
1.3.5 Scherbeanspruchung des Rührgutes	15
1.4 Strömung und Turbulenz	19
1.4.1 Einführung	19
1.4.2 Statistische Theorie der Turbulenz	20
1.4.2.1 Beschreibung der turbulenten Strömung	22
1.4.2.2 Energie-Spektren	24
1.4.3 Experimentelle Ermittlung des Strömungszustandes und seine mathematische Modellierung	26
1.4.3.1 Homogenes Stoffsystem	26
1.4.3.2 Heterogenes Stoffsystem <i>G/L</i>	31
1.4.3.3 Heterogenes Stoffsystem <i>L/L</i>	31
1.4.4 Flüssigkeitsförderung von Rührern	32
1.4.5 Oberflächenbewegung	33
1.4.5.1 Trombenbildung	33
1.4.5.2 Trombenbegasung	36
1.4.6 Mikromischung und Reaktion	37
1.4.6.1 Einführung	37
1.4.6.2 Theoretische Vorausberechnung der Mikromischung	40
1.4.6.3 Chemische Reaktionen zur Ermittlung der Mikromischung ..	42
1.4.6.4 Experimentelle Bestimmung der Mikromischung	45
1.5 Kurze Einführung in die Rheologie	47
1.5.1 Newtonsche Flüssigkeiten	47

1.5.2	Nicht-Newtonsche Flüssigkeiten	48
1.5.3	Dimensionslose Darstellung von Stoff-Funktionen	55
1.6	Kurze Einführung in die Dimensionsanalyse und in die Modellübertragung	58
1.6.1	Einführung	58
1.6.2	Dimensionsanalyse	59
1.6.2.1	Grundlage	59
1.6.2.2	Dimensionen und physikalische Größen	59
1.6.2.3	Grundgrößen und abgeleitete Größen; Dimensionskonstanten	59
1.6.2.4	Dimensionssysteme	60
1.6.2.5	Dimensionshomogenität eines physikalischen Sachverhaltes ..	60
1.6.2.6	Das pi-Theorem	63
1.6.3	Erarbeitung von pi-Sätzen mittels Matrizenrechnung	63
1.6.3.1	Ermittlung der Relevanzliste des Problems	63
1.6.3.2	Festlegung des sog. charakteristischen geometrischen Parameters	64
1.6.3.3	Aufstellung und Lösung der Dimensionsmatrix	65
1.6.3.4	Ermittlung der Prozeß-Charakteristik	66
1.6.4	Grundlage der Modelltheorie und der Modellübertragung ...	67
1.6.4.1	Modelltheorie	67
1.6.4.2	Modellversuch und Modellübertragung	68
1.6.5	Hinweise zur Relevanzliste und Versuchstechnik	69
1.6.5.1	Berücksichtigung der Erdbeschleunigung g	69
1.6.5.2	Einführung von Zwischengrößen	69
1.6.5.3	Handhabung von Stoffsystemen mit unbekanntem Stoffgrößen	70
1.6.5.4	Versuchstechnik bei der Modellübertragung	70
1.6.6	Schlußfolgerungen	71
1.6.6.1	Vorteile der Dimensionsanalyse	71
1.6.6.2	Anwendbarkeitsbereich der Dimensionsanalyse	72
2	Rührleistung	73
2.1	Rührleistung in homogener Flüssigkeit	73
2.1.1	Newtonsche Flüssigkeiten	73
2.1.2	Nicht-Newtonsche Flüssigkeiten	78
2.2	Rührleistung in begaster Flüssigkeit	79
2.2.1	Newtonsche Flüssigkeiten	79
2.2.2	Nicht-Newtonsche Flüssigkeiten	87
2.3	Überflutungspunkt	90
3	Homogenisieren	93
3.1	Definition der Makro- und Mikromischung	93
3.2	Definition des Mischungsgrades	94
3.3	Bestimmung des Mischungsgrades und der Mischzeit	97
3.3.1	Physikalische Meßmethoden	97

3.3.2	Chemische Meßmethoden	98
3.3.3	Mischungsgrad und molarer Überschuß	98
3.4	Homogenisierungs-Charakteristiken	100
3.4.1	Stoffsysteme ohne Dichte- und Viskositätsunterschiede	100
3.4.2	Stoffsysteme mit Dichte- und Viskositätsunterschieden	105
3.4.3	Nicht-Newtonsche Gemische	107
3.5	Optimieren nach kleinster Mischarbeit	111
3.6	Maßstabsübertragung des Homogenisierprozesses	113
3.7	Homogenisieren in Lagerbehältern	116
3.7.1	Homogenisieren mit Propellern	116
3.7.2	Homogenisieren mit Düsenstrahlen	117
3.7.3	Homogenisieren mit aufsteigenden Gasblasen	118
4	Begasen	120
4.1	Einleitung	120
4.2	Physikalische Grundlage des Stofftransportes	120
4.2.1	Bestimmung der treibenden Kraft	120
4.2.2	Temperaturabhängigkeit des $k_L a$	123
4.2.3	Sättigungskonzentration c_s des Gases in der Flüssigkeit	123
4.2.4	Definition der charakteristischen Konzentrationsdifferenz Δc .	124
4.2.5	Betrachtung des Absorptionsvorganges aus physikalischer und technischer Sicht	125
4.3	Bestimmung von $k_L a$	126
4.3.1	Instationäre Meßmethoden	126
4.3.1.1	Messung mit O_2 -Elektroden	126
4.3.1.2	Manometrische Methode	127
4.3.1.3	Dynamische Ansprechmethoden	128
4.3.2	Stationäre Meßmethoden	128
4.3.2.1	Sulfit-Methode	128
4.3.2.2	Hydrazin-Methode	130
4.3.2.3	Na_2SO_3 -Zuspeisetechnik	131
4.3.2.4	H_2O_2 -Methode	131
4.4	Stofftransport-Charakteristiken für das System G/L	132
4.4.1	Aufstellung der Stofftransport-Beziehung	132
4.4.2	Stofftransport-Beziehung; Versuchsergebnisse	133
4.4.3	Sorptions-Charakteristik im koaleszierenden System Wasser/Luft	134
4.4.4	Sorptions-Charakteristik in koaleszenzgehemmten Systemen .	137
4.4.5	Sorptions-Charakteristik in rheologischen Stoffsystemen	138
4.4.6	Sorptions-Charakteristik in biologischen Stoffsystemen	143
4.5	Volumenbezogene Phasengrenzfläche a	144
4.5.1	Definition von a	144

4.5.2	Bestimmung von a	145
4.5.2.1	Physikalische Methoden	145
4.5.2.2	Chemische Methoden	145
4.5.3	Prozeßbeziehungen für a	145
4.6	Gasanteil in der Flüssigkeit (Gas hold-up)	146
4.6.1	Definition von ε	147
4.6.2	Bestimmung von ε	147
4.6.3	Prozeßbeziehungen für ε	148
4.7	Der Gasblasendurchmesser und sein Einfluß auf k_L	148
4.8	Gas-Absorption in Öl/Wasser-Dispersionen	153
4.9	Chemisorption	154
4.10	Blasenkoaleszenz	157
4.11	Schaumzerstörung	168
4.11.1	Methoden und Vorrichtungen zur Schaumzerstörung	168
4.11.2	Schaumzentrifuge und Schaumturbine	169
4.11.3	Mindest-Umfangsgeschwindigkeit des Rotors	170
4.11.4	Prozeß-Charakteristik des Schaumzerstörers und seine Dimensionierung	172
4.12	Spezielle Begasungstechniken	174
4.12.1	Hohlrührer	174
4.12.1.1	Einsatzgebiete	175
4.12.1.2	Sog-, Leistungs- und Effizienz-Charakteristik	176
4.12.1.3	Gegenüberstellung Hohlrührer – Scheibenrührer	178
4.12.1.4	Sorptions-Charakteristiken	180
4.12.2	Oberflächenbelüfter	180
4.12.2.1	Kreiselbelüfter	181
4.12.2.2	Leistungs-Charakteristik	181
4.12.2.3	Sorptions-Charakteristik	183
4.12.2.4	Wasserstrahlbelüfter	185
4.12.2.5	Liegende Zylinder mit waagerechter Rührwelle	186
4.12.3	Gaszerteiler	189
4.12.3.1	Fritten und Lochböden	189
4.12.3.2	Zweistoffdüsen/Injektoren	190
4.12.3.3	Trichterdüse als Ejektor	194
5	Aufwirbeln im System S/L	195
5.1	Klassifizierung des Aufwirbelungszustandes	195
5.1.1	Vollständige Aufwirbelung	195
5.1.2	Homogene Suspension	196
5.2	Feststoffverteilung beim Aufwirbeln	197
5.3	Aufwirbelungs-Charakteristiken	200
5.3.1	Relevanzlisten und π -Räume	200

5.3.1.1	Spezifizierung nach der Art der Zielgröße n_x	200
5.3.1.2	Spezifizierung nach der Partikeleigenschaft: d_p und/oder w_{ss} ..	200
5.3.2	Aufwirbelungs-Charakteristiken mit d_p als charakteristische Partikelabmessung	201
5.3.2.1	Die Relevanzliste und der pi-Raum	201
5.3.2.2	Die Prozeß-Beziehung	202
5.3.2.3	Leistungsbedarf beim Aufwirbeln	204
5.3.2.4	Leistungsbedarf bei der kritischen Rührerdrehzahl n_x	205
5.3.2.5	Modellübertragung beim Aufwirbeln nach dem Kriterium n_x ..	205
5.3.3	Aufwirbelungs-Charakteristik mit w_{ss} als charakteristische Partikeleigenschaft	206
5.3.3.1	Bestimmung der Partikel-Sinkgeschwindigkeit im Schwarm w_{ss}	206
5.3.3.2	Die Relevanzliste und der pi-Raum	208
5.3.3.3	Die Prozeß-Beziehung	209
5.3.3.4	Abschließende dimensionsanalytische Betrachtung	218
5.3.3.5	Festlegung der Maßstabsübertragungs-Kriterien	218
5.3.4	Aufwirbelungs-Charakteristik mit der Energiedissipations- Kennzahl E^*	219
5.3.5	Einfluß geometrischer und apparativer Gegebenheiten auf die Aufwirbelungs-Charakteristik	221
5.4	Homogenisieren der Flüssigkeit im System S/L	223
5.5	Stofftransport im System S/L	224
5.5.1	Physikalische Grundlage des Stofftransportes im System S/L ..	224
5.5.2	Prozeß-Charakteristiken des Stofftransportes im System S/L ..	225
5.6	Aufwirbeln im System $S/L/G$: Hydrodynamik und Leistungsbedarf	228
5.7	Stofftransport im System $S/L/G$	228
6	Dispergieren im System L/L	230
6.1	Die kleinste Rührerdrehzahl zum Dispergieren	230
6.2	Dispergier-Charakteristik	232
6.2.1	Die Zielgröße d_{32}	232
6.2.2	Koaleszenzprozeß im System L/L	232
6.2.3	Bestimmungsmethoden für d_{32}	233
6.2.4	Dimensionsanalytische Formulierung	233
6.2.5	Die Prozeß-Charakteristiken	234
6.2.6	Einfluß von Koaleszenzneigung und von φ_v	236
6.2.7	Einfluß der Viskosität	237
6.2.8	Einfluß der Rührdauer	238
6.3	Tropfengrößenverteilungen	238
6.3.1	Grundbegriffe	238
6.3.2	Einfluß der Rührerdrehzahl	239
6.3.3	Einfluß des Rührertyps und des Stoffsystems	240
6.3.4	Einfluß der Rührdauer	245

6.4	Rührleistung beim Dispergieren	247
6.5	Modellübertragung beim Dispergieren	247
6.6	Stoff- und Wärmeaustausch beim Dispergieren	248
6.7	Modellieren des Dispergiervorganges	251
7	Intensivieren des Wärmetransportes durch Rühren	256
7.1	Physikalische Grundlage des Wärmetransportes	256
7.1.1	Bestimmung von α_i	257
7.1.2	Dimensionsanalytische Beschreibung	257
7.2	Wärmetransport zwischen der homogenen Flüssigkeit und der Wärmeübertragungsfläche	259
7.2.1	Strömungsbereich $Re = 10^2 - 10^6$	259
7.2.2	Strömungsbereich $Re < 10^2$	261
7.3	Verallgemeinerte Darstellung der Wärmetransport- Charakteristik durch das Hinzuziehen der volumen- bezogenen Rührleistung	266
7.4	Einfluß des <i>Vis</i> -Termes	267
7.4.1	Berücksichtigung nicht-Newtonscher Viskosität	268
7.5	Optimieren von Rührern für eine maximale Abfuhr der Reaktionswärme	271
7.6	Wärmetransport beim Stoffsystem <i>G/L</i>	273
7.6.1	Dimensionsanalytische Beschreibung	274
7.7	Wärmetransport beim Stoffsystem <i>S/L</i>	276
7.7.1	Direkter Wärmeaustausch Eiswürfel/Wasser	276
7.7.2	Indirekter Wärmeaustausch bei $\Delta\rho > 0$	276
7.7.3	Indirekter Wärmeaustausch bei $\Delta\rho \approx 0$	277
7.8	Wärmetransport beim Stoffsystem <i>L/L</i>	279
7.8.1	Direkter Wärmeaustausch	279
7.8.2	Indirekter Wärmeaustausch	279
7.9	Wärmetransport beim Stoffsystem <i>G/L/S</i>	280
8	Mischen und Rühren in Rohren	281
8.1	Mischen und Homogenisieren	281
8.1.1	Gerades, glattes oder rauhes Rohr ohne Einbauten	281
8.1.2	Rohre mit Düsen (Strahlmischer) oder Öffnungen (T-Stück) ..	283
8.1.2.1	Strahlmischer	283
8.1.2.2	T-Stück	285
8.1.3	Strömungsumlenkende Einbauten („statische Mischer“)	286
8.2	Stofftransport <i>G/L</i>	290
8.2.1	Stofftransport in der Rohrströmung	290

8.2.2	Stofftransport in Rohren mit statischen Mixchern	290
8.3	Wärmetransport	291
8.3.1	Stofftransport in der Rohrströmung	291
8.3.2	Stofftransport in Rohren mit statischen Mixchern	292
8.4	Dispergieren L/L	294
8.4.1	Dispergieren in der Rohrströmung	294
8.4.2	Dispergieren in Rohren mit statischen Mixchern	295
8.5	Mikromischung und chemische Reaktion	297
8.5.1	Rohrströmung	297
8.5.2	Rohr mit Strahlmischer	299
8.5.3	Rohr mit statischen Mixchern	300
8.6	Modellieren des Mischvorganges	303
8.6.1	Rohrströmung	303
8.6.2	Rohr mit T-Stück	303
8.6.3	Rohr mit statischen Mixchern	304
8.7	Rühren in Rohren: Rührkolonnen	305
	Literatur	309
	Sachverzeichnis	337