

---

# Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis .....	XVI
<b>1 Rühren, allgemein .....</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Rührleistung</b> .....	<b>73</b>
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
<b>3</b>	<b>Homogenisieren</b> .....	<b>93</b>
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
<b>4</b>	<b>Begasen</b> .....	<b>120</b>
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 $\Delta c$ .	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 $\varepsilon$ .....	147
4.6.2	Bestimmung von $\varepsilon$ .....	147
4.6.3	Prozeßbeziehungen für $\varepsilon$ .....	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
<b>5</b>	<b>Aufwirbeln im System S/L .....</b>	<b>195</b>
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 pi-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
<b>6</b>	<b>Dispergieren im System <math>L/L</math></b> .....	<b>230</b>
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 $\varphi_v$ .....	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
<b>7</b>	<b>Intensivieren des Wärmetransportes durch Rühren .....</b>	<b>256</b>
7.1	Physikalische Grundlage des Wärmetransportes .....	256
7.1.1	Bestimmung von $\alpha_i$ .....	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
<b>8</b>	<b>Mischen und Rühren in Rohren .....</b>	<b>281</b>
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 Mischern .....	290
8.3	Wärmetransport .....	291
8.3.1	Stofftransport in der Rohrströmung .....	291
8.3.2	Stofftransport in Rohren mit statischen Mischern .....	292
8.4	Dispergieren <i>L/L</i> .....	294
8.4.1	Dispergieren in der Rohrströmung .....	294
8.4.2	Dispergieren in Rohren mit statischen Mischern .....	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 Mischern .....	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 Mischern .....	304
8.7	Rühren in Rohren: Rührkolonnen .....	305
	<b>Literatur</b> .....	309
	<b>Sachverzeichnis</b> .....	337