

Dipl.-Ing. Andreas Klippe, Berlin

**Theoretische Untersuchung
der Strömung und des
Ausgleiches von Konzentra-
tionsunterschieden in
Newtonschen und nicht-
Newtonschen Flüssigkeiten
im Rührreaktor**

Reihe **3**: Verfahrenstechnik

Nr. **449**

<u>Inhaltsverzeichnis</u>		<u>Seite</u>
1	Einleitung	1
2	Grundlagen und bekannte Ergebnisse	4
2.1	Aufbau eines Rührreaktors	4
2.2	Strömung im Rührreaktor	5
2.2.1	Strömung Newtonscher Flüssigkeiten	6
2.2.1.1	Beschreibung der Strömung	6
2.2.1.2	Bedeutung der Turbulenz beim Rühren	11
2.2.1.3	Beschreibung des Leistungseintrages	14
2.2.2	Strömung nicht-Newtonscher Flüssigkeiten	16
2.2.2.1	Schubspannungsansatz für nicht-Newtonsche Flüssigkeiten	16
2.2.2.2	Beschreibung der Strömung nicht-Newtonscher Flüssigkeiten	20
2.2.2.3	Beschreibung des Leistungseintrages bei der Strömung nicht-Newtonscher Flüssigkeiten	21
2.2.3	Theoretisch-numerische Untersuchungen zur Strömung	22
2.3	Homogenisieren im Rührreaktor	24
2.3.1	Grundlagen des Konzentrationsausgleiches	24
2.3.2	Experimentelle Untersuchungen zum Homogenisieren	25
2.3.3	Theoretisch-numerische Untersuchungen zum Homogenisieren	27
2.4	Schlußfolgerungen für die eigene Arbeit	31
3	Mathematische Behandlung des Problems	32
3.1	Beschreibung eines zweistufigen Modellrührers	32
3.2	Berechnung der Strömung im Rührgefäß	33
3.2.1	Kontinuitätsgleichung	33
3.2.2	Bewegungsgleichungen mit Randbedingungen	34
3.2.3	Stromfunktion	35
3.2.4	Volumenströme für Primär- und Sekundärströmung	36
3.2.5	Energieinhalt von Primär- und Sekundärströmung	38
3.2.6	Vom Rührsystem an die Flüssigkeit übertragene Leistung	38

3.3	Berechnung des Konzentrationsausgleiches im Rührgefäß	40
3.3.1	Differentialgleichung für das Konzentrationsfeld mit Anfangs- und Randbedingungen	40
3.3.2	Definition von Mischgüte und Mischzeit	42
4	Numerische Lösung des Differentialgleichungssystems	43
4.1	Methode der finiten Elemente	43
4.2	Vorbereiten der Lösung mit gewichteten Residuen	44
4.3	Auswahl der Ansatz- und Wichtungsfunktionen	46
4.4	Koordinatentransformation	49
4.5	Numerische Integration	50
4.6	Lösen der Gleichungen für das Strömungsfeld	50
4.6.1	Aufstellen des lokalen integralen Gleichungssystems	51
4.6.2	Newton-Raphson-Verfahren	54
4.7	Lösen der Gleichung für das Konzentrationsfeld	56
4.8	Frontlösungsmethode	58
4.9	Hinweise zu verwendeter Software und Hardware	58
5	Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse für das Strömungsfeld	60
5.1	Stromlinienfelder der Sekundärströmung	60
5.2	Diskussion der Geschwindigkeiten	63
5.2.1	Lokale Geschwindigkeiten in einer Newtonschen Flüssigkeit mit $m = 1,0$ und für $Re_m = 100$	64
5.2.2	Lokale Geschwindigkeiten in einer nicht- Newtonschen Flüssigkeit mit $m = 0,4$ und für $Re_m = 100$	68
5.3	Diskussion des Druckes	69
5.4	Diskussion der scheinbaren Viskosität	71
5.5	Diskussion der Volumenströme und der Energien	73
5.5.1	Einfluß der Reynolds-Zahl und des Flüssigkeitsindex	74
5.5.2	Grenzwerte für die Volumenströme und die Energien	75
5.5.2.1	Grenzwerte für $Re_m \rightarrow 0$	75
5.5.2.2	Grenzwerte für $Re_m \rightarrow \infty$	78
5.6	Diskussion der Leistungsübertragung	79

6	Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse für den Ausgleich von Konzentrationsunterschieden	83
6.1	Diskussion der zeitlich veränderlichen Konzentrationsfelder	83
6.1.1	Konzentrationsausgleich in einer Newtonschen Flüssigkeit mit $m = 1,0$ für $Re_m = 100$ und $Sc_m = 50$	84
6.1.2	Konzentrationsausgleich in einer nicht- Newtonschen Flüssigkeit mit $m = 0,4$ für $Re_m = 100$ und $Sc_m = 50$	88
6.1.3	Konzentrationsausgleich in einer nicht- Newtonschen Flüssigkeit mit $m = 0,4$ für $Re_m = 1$ und $Sc_m = 1 \cdot 10^6$	91
6.2	Diskussion der maximalen Konzentration	93
6.3	Diskussion der Mischgüte	95
6.4	Diskussion der Mischzeit	97
6.4.1	Erläuterung der Struktur des Mischzeitdiagrammes	98
6.4.2	Physikalische Erläuterung der Grenzwerte	99
6.4.3	Vereinfachte Darstellung der bezogenen Mischzeit FO_{95}	99
7	Zusammenfassung	103
	Tabellen mit Formelzeichen	106
	Bildanhang	118
	Literaturverzeichnis	204