

Numerische Simulation der Strömung in Bioreaktoren

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo – Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Christina Appel

aus

Gifhorn

eingereicht am: 12.06.2009

mündliche Prüfung am: 05.10.2009

1. Referent: Prof. Dr. R. Krull

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. R. Radespiel

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Einführung	4
2.1	Numerische Strömungssimulation für Rührreaktorströmungen	4
2.1.1	Zielsetzung und Verifizierung der Verfahren	4
2.1.2	Turbulenzmodellierung	6
2.2	Messtechnik für Rührreaktorströmungen	8
2.3	Wechselwirkung von Strömung und biologischem System	10
3	Simulationen	14
3.1	Grundgleichungen	14
3.2	Turbulenzmodellierung	15
3.3	Randbedingungen	23
3.4	Geometrische Anforderungen	26
3.5	Netzgenerierung	27
3.6	Verifizierung der Simulation	30
3.6.1	Räumliche Diskretisierung	30
3.6.2	Diskretisierung des Zeitschritts	35
4	Particle Image Velocimetry (PIV)	40
4.1	Funktionsprinzip	40
4.2	Auswertetechnik	41
4.3	Stereo-PIV	43
4.4	Fehlerquellen	43
4.5	Post-Processing von PIV-Daten	45
5	PIV-Messungen	48
5.1	Versuchsaufbau	48
5.2	Abschätzung der erreichbaren Auflösung	50
5.3	PIV-Messungen im Vergleich zu CFD-Simulationen	51

5.3.1	Wirbelsysteme in der Rührwerkströmung	51
5.3.2	Radialgeschwindigkeit	54
5.3.3	Tangentialgeschwindigkeit	59
5.3.4	Axialgeschwindigkeit	64
5.3.5	Turbulente kinetische Energie	69
6	Mechanische Beanspruchung von Partikeln	75
6.1	Experimentelle Bestimmung der mechanischen Beanspruchung	75
6.2	Integrale Größen	86
6.2.1	Globale Datensätze	86
6.2.2	Dimensionen turbulenter Strukturen	93
6.2.3	Mechanische Beanspruchung	96
6.3	Charakterisierung mit Beanspruchungsklassen	98
6.3.1	Definition der Beanspruchungsklasse	98
6.3.2	Turbulente kinetische Energie	99
6.3.3	Reynoldsspannungen	101
6.3.4	Umverteilung hoch beanspruchten Volumenelemente .	106
7	Zusammenfassung und Ausblick	109
8	Symbolverzeichnis	112
	Literaturverzeichnis	115
	Tabellenverzeichnis	124
	Abbildungsverzeichnis	125