

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	XVII
Lateinische Symbole	XVII
Griechische Symbole	XIX
Indizes	XX
Kennzahlen	XXI
Differentialoperatoren	XXI
Abkürzungsverzeichnis	XXII
 1 Einleitung	 1
1.1 Problemstellung	2
1.2 Zielsetzung und Inhalt der Arbeit	4
 2 Stand der Technik und Literaturübersicht	 7
2.1 Verfahrenstechnische Entwicklung der Gärung in einem Fermenter	8
2.2 Experimentelle Untersuchungen zur Temperaturverteilung in Fermentern . .	12
2.3 Experimentelle Untersuchungen zu Strömungsfeldern in Fermentern	16
2.4 Entwicklung relevanter Messtechniken für die Untersuchung	21
2.5 Numerische Simulation der Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder in Fermentern	24
 3 Theoretische Grundlagen	 29
3.1 Der Prozess der Gärung und Reifung in einem Fermenter	29
3.2 Antriebsmechanismen der Strömung im Fermenter	30
3.3 Strömungsmechanische Grundgleichungen	33
3.4 Grundlagen der numerischen Strömungsmechanik	34
3.5 Dimensionslose Kennzahlen	37
 4 Experimentelle Methoden	 41
4.1 Aufbau, Inbetriebnahme und Funktion des modularen Fermenters	41
4.1.1 Der modulare Fermenter	42
4.1.2 Prozess- und Steuerungstechnik	43
4.1.3 Kalibrierung und Temperaturfeldmessung	45
4.1.4 Aufbau der Geschwindigkeitsmessfelder	47
4.2 Versuchsstand Blasenturm	49
4.2.1 Aufbau, Inbetriebnahme und Funktion des Blasenturms	49
4.2.2 Prozess- und Steuerungstechnik	51
4.3 Versuchsstand Taylor-Couette-Strömung	53
4.3.1 Aufbau, Inbetriebnahme und Funktion	53

4.3.2	Prozess- und Steuerungstechnik	54
4.4	Versuchsstand Umlaufkanal	55
4.5	Versuchsstand Partikelbecken	56
4.6	Particle Image Velocimetry (PIV)	56
4.7	Ultraschall-Doppler-Messtechnik (UDV)	57
4.7.1	Grundlagen der UDV-Messung	57
4.7.2	Die Messung mittels Transducer	59
4.7.3	Ein- und zweidimensionale Messung	60
4.7.4	Einfluss der realen Gärung auf die Messung	62
5	Einfluss einer Schutzvorrichtung auf die UDV-Messung	71
5.1	Problemstellung und Zielsetzung	71
5.2	Experimentelle Ergebnisse im Umlaufkanal	71
5.2.1	Einfluss von PMMA	73
5.2.2	Einfluss von Stahl	74
5.3	Auswahl und Einfluss einer Schutzvorrichtung	75
6	Vergleich der UDV mit dem PIV in einer Taylor-Couette-Strömung	77
6.1	Problemstellung und Zielsetzung	77
6.2	Einleitung in die Untersuchung	77
6.2.1	Taylor-Couette-Strömung	78
6.2.2	Physikalische Eigenschaften des Fluides	79
6.3	Experimentelle Ergebnisse in einer Taylor-Couette-Strömung	80
6.3.1	Messung der Geschwindigkeiten mittels UDV	80
6.3.2	Messung der Geschwindigkeiten mittels PIV	82
6.3.3	Vergleich der PIV- und UDV-Messungen	84
7	Untersuchungen zum Einfluss der Gasblasen auf die UDV-Messung	87
7.1	Problemstellung und Zielsetzung	87
7.2	Theoretische Betrachtungen zur Interaktion zweier Phasen (gasförmig/flüssig)	88
7.2.1	Geometrische Form einer Gasblase	88
7.2.2	Aufstiegsgeschwindigkeiten von Gasblasen	90
7.2.3	Aufstiegsverlauf von Gasblasen	91
7.3	Untersuchung der Blasenbildung und des Blasenanstiegs	92
7.3.1	Lokales Geschwindigkeitsfeld einer aufsteigenden Gasblase mittels PIV	94
7.3.2	Geschwindigkeitsmessung der aufsteigenden Gasblase mittels UDV . .	96
7.4	Der Einfluss von Gasblasen auf die UDV	97
8	Numerische Simulation der Gärung mit ANSYS-Fluent	103
8.1	Einführung in die numerische Simulation der Gärung	103
8.2	Vernetzung der Geometrie für die numerische Simulation	103
8.3	Simulation der natürlichen Konvektion im Fermenter	105
8.3.1	Simulation der natürlichen Konvektion mittels Boussinesq-Modell . .	105
8.3.2	Simulation der natürlichen Konvektion mittels „User-Defined Function“	106
8.3.3	Vergleich der Ergebnisse	106

8.4	Simulation von Blasensäulen im Fermenter	108
8.4.1	Relevante Modelle	108
8.4.2	Phaseninteraktionsmodelle für die Euler-Euler-Simulation	110
8.4.3	Validierung mit den experimentellen Ergebnissen im Blasenturm	113
8.4.4	Validierung mit den experimentellen Ergebnissen im Fermenter	115
8.5	Simulation der Hefepartikel im Fermenter	117
8.5.1	Relevante Modelle	119
8.5.2	Bewegungsgleichungen für Partikel	119
8.5.3	Experimentelle Validierung der Partikelmodelle	120
8.6	Ergebnisse der numerischen Mehrphasensimulation im Fermenter	122
9	Simulierte Gärung im Fermenter und numerischer Vergleich	125
9.1	Problemstellung und Zielsetzung	125
9.2	Einleitung in die simulierte Gärung	125
9.3	Randbedingungen für den Versuch	127
9.4	Experimentelle und numerische Ergebnisse	127
9.4.1	Auswertung der Temperaturfelder	128
9.4.2	Auswertung der Geschwindigkeitsfelder	130
9.5	Ergebnisse der simulierten Gärung	132
10	Experimentelle Untersuchung der realen Gärung im Fermenter	133
10.1	Einleitung in die reale Gärung, Reifung und Lagerung	133
10.2	Experimentelle Untersuchung im Fermenter mit Halbkugelboden	134
10.2.1	Darstellung und Diskussion der Temperaturfelder	134
10.2.2	Darstellung und Diskussion der Geschwindigkeitsfelder	137
10.3	Experimentelle Untersuchung im Fermenter mit konischem Boden	141
10.3.1	Darstellung und Diskussion der Temperaturfelder	142
10.3.2	Darstellung und Diskussion der Geschwindigkeitsfelder	145
10.4	Vergleich der Ergebnisse im modularen Fermenter	149
11	Topologie der Strömung im modularen Fermenter	153
11.1	Topologie während der Gärung	153
11.2	Topologie während der Reifung	156
11.3	Topologie während der Lagerung	158
12	Zusammenfassung/Summary	161
13	Bibliografie, Verzeichnisse und Lebenslauf	175
13.1	Literaturverzeichnis	175
13.2	Abbildungsverzeichnis	190
13.3	Tabellenverzeichnis	194
13.4	Wissenschaftlicher Lebenslauf	195
13.5	Veröffentlichungen und Vorträge	197