

Scale-Down von Photobioreaktoren

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
von der Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)
genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Iris Perner

aus Jülich

Tag des Kolloquiums: 19. September 2003

Referent: Prof. Dr.-Ing. Clemens Posten

Korreferent: Prof. Dr. André M. Braun

1	Einleitung	1
1.1	Photobioreaktoren.....	1
1.2	Technischer Nutzen von Mikroalgen.....	1
1.3	Problemstellung	2
2	Grundlagen, Stand des Wissens.....	5
2.1	Biologische Grundlagen.....	5
2.1.1	Mikroalgen	5
2.1.2	<i>Chlorella vulgaris</i>	6
2.1.3	Photosynthese.....	7
2.1.4	Überlegungen zur Photonenausbeute	10
2.1.5	Wirkung von Blitzlicht	12
2.1.6	Kultivierung phototropher Mikroorganismen.....	14
2.1.7	Lichtabschwächung in Biosuspensionen.....	15
2.2	Technische Reaktoren unterschiedlichen Typs	16
2.2.1	Offene Systeme.....	17
2.2.2	Geschlossene Systeme	17
2.2.2.1	Bestehende geschlossene Systeme.....	18
2.2.2.2	Rohr-Photobioreaktoren	19
2.2.2.3	Vorteile und Nachteile von Rohr-Photobioreaktoren	19
2.3	Statische Mischer.....	20
2.3.1	Typen von statischen Mixern und ihre Einsatzgebiete	20
2.3.2	Einsatz in der Bioverfahrenstechnik	21
2.3.3	Wendelmischer.....	22
2.4	Numerische Strömungssimulation.....	22
2.4.1	Anwendung von Computational Fluid Dynamics (CFD).....	24
2.4.2	Turbulente Strömungen	25
2.4.3	Eingesetzte Turbulenzmodelle	26
2.4.4	Wandmodelle.....	29
2.5	Erstellung und Auswertung von Partikelbahnen	29
2.5.1	Stochastische Partikelverfolgung.....	29
2.5.2	Diskretes Random Walk (DRW) Modell	30
2.5.3	Signalanalyse bei der Auswertung von Partikelbewegungen	32
2.5.3.1	Fourier-Transformation.....	32
2.5.3.2	Wavelet Transformation	33
2.6	Konzept	35
3	Methoden und Materialien	41
3.1	Computersimulationen	41
3.1.1	Numerische Strömungssimulation (CFD).....	41

3.1.1.1 Hardware	41
3.1.1.2 Software	41
3.1.2 Eingesetzte Modelle für CFD und Partikelverfolgung	41
3.1.3 Mathematische Software	42
3.2 Laser Doppler Anemometrie	42
3.3 Experimente mit <i>Chlorella vulgaris</i>	43
3.3.1 Medienvergleich	43
3.3.2 Sterilitätstest	44
3.3.3 Biomassen- und Zellzahlbestimmung	44
3.3.4 Gravimetrische Bestimmung der Biotrockenmasse	45
3.3.5 Zellzahlbestimmung	45
3.3.6 Chlorophyll-Konzentration	46
3.3.7 Messung der Lichtintensität	46
3.3.8 Wachstumskinetik	46
3.3.9 Bestimmung der CO ₂ -Aufnahmerate bzw. O ₂ -Bildungsrate	47
3.3.10 Bestimmung des photosynthetischen Quotienten	48
3.4 Untersuchte Reaktoren	48
3.4.1 Platten-Photobioreaktor (PBR 10)	48
3.4.2 Neu konstruierter Rohr-Photobioreaktor	49
3.4.2.1 Aufbau des Rohr-Photobioreaktors	49
3.4.2.2 Betrieb des Reaktors	50
4 Experimentelle Ergebnisse	51
4.1 Verfahrenstechnische Charakterisierung des PBR10	51
4.1.1 Drehzahl / Volumenstrom	51
4.1.2 Laser-Doppler-Anemometrie (LDA)	51
4.1.3 Druckverlustmessungen	52
4.1.4 Beleuchtung	53
4.2 Neu konstruierter Reaktor	53
4.2.1 Beschreibung des Reaktors	54
4.2.2 Technische Charakterisierung	55
4.2.2.1 Pumpe	56
4.2.2.2 Strömungsgeschwindigkeit	56
4.2.2.3 Begasung und Entgasung	59
4.2.2.4 Gasanteil im Reaktor	61
4.2.2.5 Volumetrischer Stoffübergangskoeffizient (k_a)	62
4.2.2.6 Licht und Lampen	63
4.3 Experimente im Reaktor	64
4.3.1 Vorversuch Medienvergleich	65

4.3.2 Einfluss von statischen Mischern.....	66
4.3.2.1 Experiment bei $0,4 \text{ ms}^{-1}$	66
4.3.2.2 Experimente bei $0,5 \text{ ms}^{-1}$	71
4.3.3 Kontrollversuch ohne statische Mischer	75
5 Simulation	79
5.1 Numerische Strömungssimulation (CFD).....	79
5.2 Simulation der Reaktoren	79
5.2.1 Platten-Photobioreaktor	79
5.2.1.1 Rechnerische Randbedingungen.....	79
5.2.1.2 Vergleich von Geschwindigkeiten aus Simulation (CFD) und Experiment.....	80
5.2.1.3 CFD-Simulationen und Druckverlust im Vergleich	82
5.2.1.4 Pumpenleistung / Reibungsverluste	83
5.2.1.5 Geometrische Variationen.....	83
5.2.2 Neuer Reaktor	85
5.2.2.1 Geometrie und verwendetes Gitter	85
5.2.2.2 Einstellungen von FLUENT	86
5.2.2.3 Berechnete Strömungsfelder	86
5.2.2.3.1 mittlere Strömungsgeschwindigkeit.....	87
5.2.2.3.2 Radialkomponenten der Strömung.....	88
5.2.2.3.3 Druckverluste	89
5.2.2.3.4 Turbulenzen	90
5.2.2.4 Partikelverfolgung.....	91
5.2.2.5 Diskussion der Partikelverfolgung.....	96
5.3 Auswertung der simulierten Partikelbahnen.....	98
5.3.1 Fast Fourier-Transformation (FFT) der Partikelbahnen	98
5.3.2 Wavelet-Transformation der Partikelbahnen	101
5.3.2.1 Partikelbahnen in einer Rohrströmung	102
5.3.2.2 Rohr mit statischen Mischern.....	104
5.3.3 Vergleich der Frequenzbereiche aus FFT und Wavelet-Transformation	104
5.3.4 Überlagerung der Partikelbahnen mit Lichtverteilungen	105
5.3.4.1 Zeitkonstanten aus den Frequenzanalysen.....	105
5.3.4.2 Binärverteilung.....	105
5.3.4.3 Wavelet-Transformation der Lichtverteilung.....	108
6 Diskussion.....	111
6.1 Platten-Photobioreaktor	111
6.2 Simulationen des Rohr-Photobioreaktors	113
6.2.1 Statische Mischer	113

6.2.1.1 Strömungsfeld / Durchmischung.....	114
6.2.1.2 Druckverlust.....	115
6.2.2 Partikelbahnen	116
6.2.3 Transformation der Partikelbahnen	118
6.2.4 Errechnung der Hell- und Dunkelzeiten.....	122
6.2.4.1 Binärverteilung.....	122
6.2.4.2 Wavelet-Transformation der Lichtverteilung.....	123
6.3 Vergleich des neu konstruierten PBR mit bestehenden	124
6.4 Experimente im Rohr-Photobioreaktor	125
6.4.1 Vergleich der Experimente.....	126
6.4.2 Säureeinfluss.....	127
6.4.3 pH-Wert, Kohlendioxid, Sauerstoff	127
6.4.4 Abgasdaten	128
6.4.5 Chlorophyll a / Medium	129
6.4.6 Vergleich mit anderen Systemen.....	132
6.4.7 Lichtabschwächung.....	133
6.4.8 Vergleich Hell-Dunkel-Zyklen.....	134
6.4.9 Fazit aus den Experimenten	135
7 Zusammenfassung	137
8 Literaturverzeichnis.....	141
9 Anhang.....	i