

Dipl.-Ing. Cornelia F. B. Laudamus, Berlin

**Verfahrenstechnische  
Konzeptionierung  
einer wasserarmen Gas/  
Feststoff-Wirbelschicht  
für biotechnische  
Anwendungen**

Reihe **17**: Biotechnik

Nr. **149**

## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	VIII
Zusammenfassung	XII
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Stand des Wissens</b>	<b>3</b>
2.1. Grundlagen der Gas/Feststoff-Wirbelschichttechnik	3
2.1.1. Klassifizierung von Strömungsregimen	3
2.1.2. Klassifizierung von Partikeln nach dem Fluidisationsverhalten	6
2.1.3. Charakteristische Parameter und deren Ermittlung	9
2.2. Gas/Feststoff-Wirbelschicht in der Biotechnologie	14
2.2.1. Stoffliche Grundsysteme	14
2.2.2. Anwendungsbeispiele	15
2.2.3. Regelungstechnische Aspekte	20
2.3. Automatisierung	21
2.3.1. Fuzzy-Logic	22
2.3.2. Künstliche Neuronale Netze	23
2.3.3. Expertensysteme	25
2.3.4. Prozeßvisualisierung	27
<b>3. Problemstellung</b>	<b>30</b>
<b>4. Material und Methoden</b>	<b>33</b>
4.1. Wirbelschichtanlagen	33
4.1.1. Pilotanlage	33
4.1.2. Laboranlagen	37
4.2. Inbetriebnahme und Charakterisierung des Pilotsystems	40
4.2.1. Kalibrierung der Meßeinrichtungen	40
4.2.2. Überprüfung der Reglerverschaltung	42
4.2.3. Dichtigkeitstest	42
4.2.4. Filterintegritätstest	42
4.2.5. Sterilttest	43
4.2.6. Bestimmung des Gesamtdruckverlustes	44
4.2.7. Energiebetrachtung	44
4.3. Prozeßleitsystem	44
4.3.1. Hardware	45
4.3.2. Software	47
4.4. Verwendete Partikelarten	48
4.5. Bestimmung fluidisationsrelevanter Parameter	49
4.5.1. Partikeldurchmesser und Sphärizität	49
4.5.2. Lückengrad, scheinbare Dichte und Partikeldichte	49
4.5.3. Druckverlust und Geschwindigkeit am Lockerungspunkt	50
4.5.4. Archimedes-, Reynolds-Zahl und Widerstandskoeffizient	50
4.6. Herstellung von Alginatvollkugeln	50

4.7.	Aufnahme der Druckverlustcharakteristiken	51
4.8.	Abriebversuche	51
4.9.	Bioprozesse	52
4.9.1.	Mikroorganismus	52
4.9.2.	Nährmedien	52
4.9.3.	Anzuchtbedingungen	53
4.9.4.	Immobilisierung	53
4.9.5.	Standardprozeßbedingungen	54
4.10.	Überprüfung des Regelungskonzeptes	55
4.11.	Analytik	55
4.11.1.	Keimzahlbestimmung	55
4.11.2.	Bestimmung der Glucosekonzentration	56
4.11.3.	Biomassebestimmung	56
4.11.4.	Bestimmung der Gesamtalkaloide	56
4.11.5.	Ermittlung des extrazellulären Flüssigkeitsgehaltes	56
4.11.6.	Bestimmung des Wassergehaltes	56
4.11.7.	Bestimmung der Wasseraktivität ( $a_w$ -Wert)	57
4.11.8.	Erstellung von Sorptionsisothermen	57
<b>5.</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>58</b>
5.1.	Inbetriebnahme und Charakterisierung des Pilotsystems	58
5.1.1.	Kalibrierung der Meßeinrichtungen	58
5.1.2.	Verschaltung der Regler	60
5.1.3.	Dichtigkeits- und Sterilttest	62
5.1.4.	Gesamtdruckverlust	64
5.1.5.	Energiebetrachtung	66
5.2.	Automatisierung	70
5.2.1.	Implementierung des Prozeßleitsystems	70
5.2.2.	Prozeßvisualisierung und -steuerung	71
5.3.	Untersuchungen verschiedener Partikel und Partikelschüttungen	76
5.3.1.	Charakterisierung der Partikel	77
5.3.2.	Druckverlustcharakteristiken	82
5.3.3.	Sorptionsisothermen fester Substrate	87
5.3.4.	Abriebverhalten fester Substrate	91
5.3.5.	Bioprozeß mit immobilisierten Zellen	91
5.4.	Regelungskonzept	93
5.4.1.	Wasserbilanz	94
5.4.2.	Steuerung des Wasserzudosierung	97
5.4.3.	Überprüfung des Regelungskonzeptes	97
5.5.	Entwurf und Konstruktion einer Laboranlage	100
5.5.1.	Auslegung	100
5.5.2.	Anlage im Labormaßstab	107
<b>6.</b>	<b>Fehlerbetrachtung</b>	<b>110</b>
6.1.	Grundlagen und Formeln der statistischen Fehlerrechnung	110
6.2.	Gerätefehler	111
6.3.	Kenngrößen der Partikel	112
6.3.1.	Partikeldurchmesser und Sphärizität	112

---

6.3.2.	Scheinbare Dichte, Partikeldichte und Lückengrad .....	113
6.3.3.	Minimale Fluidisationsgeschwindigkeit .....	115
6.3.4.	Archimedes-, Reynolds-Zahl und Widerstandskoeffizient .....	116
6.4.	Analysenfehler .....	118
6.5.	Regelungskonzept .....	118
<b>7.</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>119</b>
7.1.	Inbetriebnahme und Charakterisierung des Pilotsystems .....	119
7.1.1.	Inbetriebnahme .....	119
7.1.2.	Charakterisierung .....	121
7.2.	Automatisierung .....	123
7.3.	Untersuchungen verschiedener Partikel und Partikelschüttungen .....	125
7.3.1.	Charakterisierung der Partikel .....	125
7.3.2.	Druckverlustcharakteristiken .....	130
7.3.3.	Sorptionsisothermen fester Substrate .....	131
7.3.4.	Abriebverhalten fester Substrate .....	133
7.3.5.	Bioprozeß mit immobilisierten Zellen .....	134
7.4.	Regelungskonzept .....	134
7.5.	Entwurf und Konstruktion einer Laboranlage .....	135
<b>8.</b>	<b>Ausblick</b> .....	<b>139</b>
<b>9.</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>140</b>
9.1.	Berechnung des Druckverlusts der Rohrleitungen und Armaturen .....	140
9.2.	Berechnung des Druckverlusts der Füllkörperkolonnen .....	143
9.3.	Kanalbelegung des Prozeßleitsystems .....	146
9.4.	Prozeßbilder .....	150
<b>10.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>154</b>