

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand des Wissens</b>	<b>5</b>
2.1 Fermentationsparameter	5
2.2 Solid State-Fermentation	7
2.2.1 Klassifizierung der Solid State-Fermentation	8
2.2.2 Reaktorsystem	9
2.2.2.1 Festbettreaktor	10
2.2.2.2 Trommelreaktor	10
2.2.2.3 Gas-Feststoff-Wirbelschichtreaktor	11
2.2.3 Industrielle Anwendungen der Solid State-Fermentation	11
2.2.3.1 Konventionelle Solid State-Fermentation	11
2.2.3.2 Solid State-Fermentation in der Gas-Feststoff-Wirbelschicht	12
2.3 Gas-Feststoff-Wirbelschicht	14
2.3.1 Verfahrensprinzip	14
2.3.2 Hydrodynamik von Gas-Feststoff-Wirbelschichten	14
2.4 Immobilisierung von Mikroorganismen	18
2.5 Prozeßkinetische Modellierung von heterogenen Bioprozessen in der Gas-Feststoff-Wirbelschicht	20
2.5.1 Stofftransport	23
2.5.1.1 Diffusion	23
2.5.1.2 Stoffübergang	25
2.5.2 Biokinetik	27
2.5.2.1 Einsubstrat-Kinetik (Monod-Kinetik)	28
2.5.2.2 Multi-Substrat-Kinetik	29
2.5.2.3 Verzögerungsglied	29
2.5.2.4 Inhibierungskinetik	29
2.5.2.5 Produktbildungskinetik	30
2.5.2.6 Substratverbrauch und Ertragskoeffizient	30
2.5.3 Dynamische Modelle	31
2.5.4 Numerische Lösungsalgorithmen	31
<b>3 Zielsetzung</b>	<b>32</b>

<b>4</b>	<b>Material und Methoden</b>	<b>34</b>
4.1	Wirbelschichtanlage	34
4.2	Ionotrope Gelierung und Immobilisierung von <i>P. putida</i> in Calciumalginat	35
4.3	Off-line Analytik	37
4.3.1	Koloniebildende Einheiten	37
4.3.2	Biotrockenmasse	38
4.3.3	Kohlenhydratanalytik	38
4.4	Mikroorganismus	39
4.5	Trägermaterialscreening	41
4.5.1	Sterilisation und Aseptik der Träger	42
4.5.2	Physiologische Verträglichkeit	43
4.5.3	Hydrodynamische Untersuchungen	44
4.5.3.1	Trägerabrasion	44
4.5.3.2	Fluidisationsgrenzwasserbeladung der Träger	45
4.5.3.3	Minimale Fluidisationsgeschwindigkeit	45
4.6	Submers-Fermentation von <i>P. putida</i>	46
4.7	Solid State-Fermentation	48
4.7.1	Solid State-Fermentation von adsorptiv immobilisierten <i>P. putida</i>	49
4.7.1.1	Sprühimmobilisierung von <i>P. putida</i> auf Calciumalginat-Beads	49
4.7.1.2	Wachstum von <i>P. putida</i>	49
4.7.2	Solid State-Fermentation von in Calciumalginat-Beads eingeschlossenen <i>P. putida</i>	50
<b>5</b>	<b>Orientierende Voruntersuchungen</b>	<b>52</b>
5.1	Sterilisation und Aseptik der Träger	52
5.2	Physiologische Verträglichkeit	52
5.3	Hydrodynamische Untersuchungen	54
5.3.1	Trägerabrasion	54
5.3.2	Fluidisationsgrenzwasserbeladung der Träger	55
5.3.3	Minimale Fluidisationsgeschwindigkeit	56
5.4	Schlußfolgerungen	58
<b>6</b>	<b>Modellierung</b>	<b>59</b>
6.1	Modellierungskonzept	59
6.2	Formalkinetik	60
6.2.1	Analyse des Stoffwechsellusters von <i>P. putida</i>	60
6.2.2	Formalkinetische Ansätze für die Teilprozesse	63

## VII

6.2.2.1	Biomassewachstum auf Glucose	63
6.2.2.2	Gluconsäurebildung	65
6.2.2.3	2-Ketogluconatbildung	67
6.2.2.4	Biomassewachstum auf 2-Ketogluconat	69
6.2.3	Formalkinetisches Gesamtmodell	70
6.3	Stoffbilanzen am Einzelbead	70
6.4	Stofftransport	77
6.4.1	Stofftransport in den Poren	77
6.4.2	Stofftransport im Film	79
6.5	Integrale Konzentrationen	80
6.6	Datenbedarf für die prozeßkinetische Modellierung	81
6.7	Numerische Modellierung	81
6.7.1	Lösung des formalkinetischen Modells für die Submers-Fermentation	81
6.7.2	Lösung des prozeßkinetischen Modells für die Solid State-Fermentation	83
<b>7</b>	<b>Experimentelle Ergebnisse</b>	<b>84</b>
7.1	Submers-Fermentation von <i>P. putida</i>	84
7.1.1	Analyse des Wachstumsstoffwechsels	84
7.1.1.1	Biomassewachstum und Produktbildung	84
7.1.1.2	Sauerstoffaufnahme- und Sauerstofftransferrate	86
7.1.1.3	Endogener Stoffwechsel	88
7.1.2	Quantifizierung der kinetischen Parameter	90
7.1.2.1	Intermediatbildung	90
7.1.2.2	Biomassewachstum	91
7.1.2.3	Sauerstoffabhängiges Wachstum	92
7.2	Solid State-Fermentation von immobilisierten <i>P. putida</i> in der Gas-Feststoff-Wirbelschicht	93
7.2.1	Solid State-Fermentation von adsorptiv immobilisierten <i>P. putida</i> in der Gas-Feststoff-Wirbelschicht	93
7.2.1.1	Sprühimmobilisierung von <i>P. putida</i> auf Calciumalginat-Beads	93
7.2.1.2	Wachstumsuntersuchungen	95
7.2.2	Solid State-Fermentation von in Calciumalginat-Beads eingeschlossenen <i>P. putida</i> in der Gas-Feststoff-Wirbelschicht	97
7.2.2.1	Korngrößenverteilung	97
7.2.2.2	Analyse des Wachstumsstoffwechsels	99
7.2.2.2.1	Biomassewachstum	99
7.2.2.2.2	Endogener Stoffwechsel	101
7.2.2.2.3	Sauerstoffaufnahme- und Sauerstofftransferrate	102

7.2.2.3	Zellverteilung in den Calciumalginat-Beads	103
7.2.2.4	Einfluß des Beaddurchmessers auf den Wachstumsstoffwechsel	105
7.2.2.4.1	Biomassewachstum und Verlauf der koloniebildenden Einheiten	105
7.2.2.4.2	Sauerstofftransfer- und Sauerstoffaufnahme- rate	107
7.2.2.4.3	Endogener Stoffwechsel	109
<b>8</b>	<b>Vergleich der Versuchsergebnisse mit der Modellierung</b>	<b>110</b>
8.1	Submers-Fermentation / Formalkinetik	110
8.1.1	Anpassung der Reaktionsparameter	111
8.1.2	Überprüfung des formalkinetischen Modells	112
8.2	Solid State-Fermentation / Prozeßkinetik	114
8.2.1	Modellanpassung	114
8.2.1.1	Parameter-Signifikanzanalyse	115
8.2.1.2	Anpassung der Reaktionsparameter für ausgewählte Rechenläufe	116
8.2.1.3	Überprüfung des prozeßkinetischen Modells	118
8.2.2	Modellierungsergebnisse	119
8.2.2.1	Konzentrationsverläufe in den Calciumalginat-Beads	119
8.2.2.2	Sensitivität ausgewählter Parameter auf den Wirkungsgrad	123
8.2.2.2.1	Einfluß des Diffusionskoeffizienten	124
8.2.2.2.2	Einfluß des Beadradius	125
8.2.2.2.3	Einfluß des Stoffübergangskoeffizienten	126
<b>9</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>128</b>
9.1	Trägerscreening	128
9.2	Solid State-Fermentation in der Gas-Feststoff-Wirbelschicht	129
9.2.1	Solid State-Fermentation von adsorptiv immobilisierten <i>P. putida</i>	129
9.2.2	Solid State-Fermentation von in Calciumalginat-Beads eingeschlossenen <i>P. putida</i>	130
9.3	Modellierung	131
9.3.1	Formalkinetische Modellierung	131
9.3.2	Prozeßkinetische Modellierung	132
9.3.2.1	Überprüfung und Anpassung des Modells	132
9.3.2.2	Konzentrationsverläufe in den Beads	133
9.3.2.3	Einfluß physikalischer Prozeßparameter	133
9.4	Technische Konsequenzen	134
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>136</b>

<b>11</b>	<b>Anhang</b>	<b>139</b>
11.1	Berechnung des Stoffübergangskoeffizienten $\beta$ in der expandierten Gas-Feststoff-Wirbelschicht	139
11.2	Berechnung der Gelöstsauerstoffkonzentration abhängig vom Sauerstoffpartialdruck	139
11.3	Quantifizierung der Reaktionsparameter für das formalkinetische Modell	141
11.3.1	Intermediatbildung	141
11.3.2	Biomassewachstum	142
11.4	Prozeßtechnischer Vergleich des Wirbelschichtfermenters mit konventionellen Submers-Reaktoren	145
11.4.1	Raum-Zeit-Ausbeute für die Biomassesynthese	146
11.4.2	Vergleich des Sauerstoffeintrages Submers-Reaktoren (freie Zellen) - Wirbelschichtfermenter	147
11.4.3	Vergleich des Sauerstoffeintrags Airlift-Reaktor (immobilisierte Zellen) - Wirbelschichtfermenter	148
11.4.3.1	Solid State-Fermentation	149
11.4.3.2	Submers-Fermentation mit immobilisierten Zellen	149
11.4.3.3	Submers-Fermentation mit frei suspendierten Zellen	151
11.4.3.4	Graphische Auswertung	151
11.5	Fortranprogramme für die Modellierungen	152
11.5.1	Fortranprogramm für die Modellierung der Submers-Fermentation von <i>P. putida</i> im idealen Rührreaktor (Formalkinetik)	152
11.5.2	Fortranprogramm für die Modellierung der Solid State-Fermentation von <i>P. putida</i> in der Gas-Feststoff-Wirbelschicht (Prozeßkinetik)	154
11.6	Zusammensetzung der Medien	156
11.7	Kohlenhydratanalytik	157
11.8	Physikalische und reaktionskinetische Parameter für die formalkinetische und prozeßkinetische Modellierung	158
11.8.1	Gegenüberstellung der Reaktionsparameter Solid State-Fermentation - Submers-Fermentation	158
11.8.2	Physikalische Parameter für die prozeßkinetische Modellierung	158
<b>12</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>159</b>