

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Zusammenfassung.....	V
Summary.....	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	IX
Symbolverzeichnis.....	XI
1 Einleitung und Zielsetzung.....	1
2 Theoretischer Hintergrund.....	3
2.1 Bioraffinerie.....	3
2.2 Produkte einer Bioraffinerie.....	10
2.3 Lignocellulose als Rohstoff für eine Bioraffinerie.....	13
2.3.1 Struktur lignocelluloser Biomasse.....	15
2.4 Vorbehandlung von lignocellulosehaltiger Biomasse.....	18
2.5 Hydrolyse von Cellulose und Hemicellulosen.....	22
2.6 Fermentation der Holzzucker zu Ethanol.....	28
2.7 Simultane Verzuckerung und Fermentation von Cellulose-Faserstoff.....	33
3 Material und Methoden.....	35
3.1 Substrate.....	35
3.2 Verwendete Enzyme.....	38
3.3 Enzymatische Hydrolyse von Cellulose-Faserstoffen.....	39
3.3.1 Hydrolyse im Rührkesselreaktor.....	40
3.3.2 Hydrolyse mit Wendelrührer, im Knetmischer und im Terrafors-Feststofffermenter.....	41
3.3.3 Hydrolyse im Repeated-Fed-Batch (RFB) Verfahren.....	46
3.3.4 Hydrolyse Dampfdruck-vorbehandelter Faserstoffe.....	48
3.3.5 Enzymstabilitätsuntersuchungen.....	48
3.3.6 Bindung der eingesetzten Enzyme an Substratbestandteile.....	49
3.4 Verwendete Mikroorganismen.....	49
3.5 Fermentationen zur Ethanolproduktion.....	50
3.6 Simultane Verzuckerung und Fermentation (SSF).....	51
3.7 Produktion von Biomasse auf Faserstoff-Hydrolysaten.....	52
3.8 Zucker Analytik.....	53
3.8.1 Glucoseoxidase-Assay (GOD-Assay).....	53
3.8.2 Bestimmung reduzierender Zucker.....	54
3.8.3 High Performance Liquid Chromatographie (HPLC).....	54

3.9	Proteinbestimmung.....	56
3.10	Bestimmung der Ethanolkonzentration	56
3.11	Bestimmung der Biomassekonzentration	57
3.11.1	Messung der Optischen Dichte	57
3.11.2	Bestimmung der Biotrockenmasse.....	57
3.11.3	Biomassebestimmung bei der SSF.....	58
4	Enzymatische Hydrolyse von Cellulose-Faserstoff.....	61
4.1	Auswahl geeigneter Enzyme	61
4.2	Hydrolyse unterschiedlicher Cellulose-Faserstoffe.....	64
4.3	Optimierung der enzymatischen Hydrolyse	68
4.3.1	Enzymatische Hydrolyse in ungepufferten Lösungen	68
4.3.2	Ergänzung der Enzyme durch eine Hemicellulase.....	69
4.3.3	Durchführung der Hydrolyse im Fed-Batch.....	70
4.3.4	Steigerung der Enzymdosis.....	72
4.3.5	Durchführung der Hydrolyse als Repeated-Fed-Batch	75
4.3.6	Steigerung der Substratkonzentration	77
4.3.7	Hydrolyse im Rührkesselreaktor.....	81
4.3.8	Hydrolyse höherer Substratkonzentrationen mit alternativen Ansätzen zur Durchmischung	82
4.4	Enzymstabilität und Bindung der Enzyme an das Substrat.....	87
4.5	Zusammenfassender Vergleich verschiedener Verfahrensvarianten.....	90
4.6	Hydrolyse von Dampfdruck-vorbehandelten Faserstoffen.....	91
5	Fermentation von Faserstoff-Hydrolysaten zur Produktion von Ethanol.....	103
5.1	Co-Fermentationen der Faserstoff-Hydrolysate im Batch-Verfahren	104
5.2	Co-Fermentationen der Faserstoff-Hydrolysate im Fed-Batch-Verfahren.....	107
5.3	Fermentation der Hemicelluloselösung.....	110
5.4	Co-Fermentation der Hydrolysate aus Faserstoffen nach Dampfdruck-Vorbehandlung.....	111
5.5	Fermentation von Faserstoff-Hydrolysaten mit „Turbo-Hefen“	113
5.6	Zusammenfassende Betrachtung der Fermentation von Lignocellulose-Hydrolysaten	115
6	Simultane Verzuckerung und Fermentation	119
6.1	Einfluss der Ethanolkonzentration auf die enzymatische Hydrolyse	119
6.2	Enzymatische Hydrolyse von Faserstoffen bei einer Temperatur von 30 °C	120
6.3	Simultane Verzuckerung und Fermentation (SSF) von Organosolv-vorbehandelten Faserstoffen	123
6.3.1	SSF in der Fed-Batch-Betriebsweise.....	125
6.3.2	Durchführung der SSF im 1 L Bioreaktor.....	126

6.3.3	Erhöhung der Biomassekonzentration in der SSF.....	127
6.3.4	Erhöhung der Substratkonzentration in der SSF.....	129
6.4	Simultane Verzuckerung und Fermentation (SSF) von Dampfdruck-vorbehandelten Faserstoffen.....	130
6.5	Zusammenfassende Diskussion der SSF.....	132
7	Biomasseproduktion mit <i>Saccharomyces cerevisiae</i> auf Faserstoff-Hydrolysaten.	137
8	Modellierung von enzymatischer Hydrolyse und SSF.....	145
9	Stoffstrom-Simulation von Hydrolyse und Fermentation mit SuperPro Designer®.....	161
9.1	Simulation der enzymatischen Hydrolyse von Cellulose-Faserstoff.....	163
9.2	Vergleich der Simulationen von SHF und SSF.....	165
10	Diskussion und Ausblick.....	169
	Literaturverzeichnis.....	175
	Abbildungsverzeichnis.....	193
	Tabellenverzeichnis.....	203
	Anhang A.....	207
	Anhang B.....	211
	Anhang C.....	215
	Anhang D.....	217
	Anhang E.....	221
	Betreute studentische Arbeiten.....	223
	Veröffentlichungen.....	225
	Tagungsbeiträge.....	225
	Lebenslauf.....	227