

Dipl.-Ing. Sylvia Kretschmer, Leinfelden-Echterdingen

**Untersuchungen zur Verkürzung
der Verweilzeit bei der
Hydrolyse von Cellulose und bei
der anaeroben Fermentation
lignocellulosehaltiger Lebens-
mittelreststoffe am Beispiel von
Biertrebern**

Reihe **17**: Biotechnik/
Medizintechnik

Nr. **165**

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG.....	1
2 ZIELSETZUNG	4
3 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	6
3.1 Chemisch-physikalische Eigenschaften lignocellulosehaltiger Reststoffe	6
3.1.1 Cellulose.....	6
3.1.1.1 Morphologie der Cellulosefaser.....	6
3.1.1.2 Enzymatische Spaltung der Cellulose durch Cellulasen	8
3.1.1.3 Struktur und Kristallinität der Cellulose als limitierende Faktoren im enzymatischen Abbau	10
3.1.2 Hemicellulosen	12
3.1.3 Lignin.....	13
3.1.4 Lignocellulose am Beispiel von Biertrebern	14
3.2 Grundlagen der Biogaserzeugung	16
3.2.1 Die Verdauung pflanzlicher Zellen im Pansen von Wiederkäuern	16
3.2.2 Anaerober Abbau von Biomasse unter Verwendung von Pansenkulturen	17
3.2.2.1 Hydrolyse und Versäuerung	20
3.2.2.2 Acetogenese und Methanogenese	23
3.2.3 Mehrstufige Methanisierung von Biertrebern.....	24
3.2.4 Einflußfaktoren auf die mehrstufige Methanisierung	25
3.3 Aufbereitungsmöglichkeiten zum Abbau von lignocellulosehaltigen Lebensmittelreststoffen	29
3.3.1 Biologisch-biochemische Behandlungsverfahren.....	29
3.3.2 Mechanische Vorbehandlungsverfahren	31
3.3.3 Chemische Vorbehandlungsverfahren	33
3.3.4 Kombinierte Behandlungen	37
3.4 Stand der Technik	39
4 ANALYSENMETHODEN	41
4.1 Biogas	41
4.1.1 Quantitative Biogasbestimmung	41
4.1.2 Qualitative Biogasbestimmung	41
4.2 Chemischer Sauerstoffbedarf.....	42
4.3 Feststoff.....	42
4.3.1 Bestimmung des Feststoffgehaltes.....	42
4.3.2 Berechnung der Feststoffabnahme	43
4.4 Freie Fettsäuren.....	43
4.5 Aromatische Abbauprodukte	45

4.6 Partikelgröße	45
4.7 Energiebetrachtung während des Mahlvorgangs	46
4.8 Physikalisch-chemische Analysen	47
4.8.1 Glucose	47
4.8.2 pH-Wert	47
4.8.3 Reduzierende Zucker	47
4.8.4 Berechnung des Verzuckerungsgrades	48
4.8.5 Trockensubstanz	48
4.9 Statistik	48
5 VERSUCHSMATERIAL	49
5.1 Cellulose	49
5.2 Cellulasen	50
5.3 Puffer	50
5.4 Biertreber	50
5.5 Digestat	51
5.6 Inokulum	51
5.7 Prozeßwasser	51
6 VORVERSUCHE MIT DER MODELLSUBSTANZ REINCELLULOSE	52
6.1 Batchansätze	52
6.1.1 Versuchsaufbau und Durchführung	52
6.1.1.1 Alkalische Vorbehandlung	52
6.1.1.2 Mechanische Vorbehandlung	53
6.1.1.3 Alkalisch/mechanische Vorbehandlung	54
6.1.1.4 Enzymatische Hydrolyse	54
6.1.2 Ergebnisse und Diskussion der Abbaubersuche mit Reincellulose	56
6.1.2.1 Enzymatische Hydrolyse in Abhängigkeit der variierten Parameter	56
6.1.2.1.1 Einfluß der Enzymkonzentration	56
6.1.2.1.2 Einfluß der Hydrolysezeit	60
6.1.2.1.3 Einfluß der Cellulosekonzentration auf deren Abbau ...	62
6.1.2.2 Vorbehandlungsverfahren	64
6.1.2.2.1 Alkalische Vorbehandlung	64
6.1.2.2.2 Mechanische und mechanisch/alkalische Vorbehandlung	65
6.1.2.3 Enzymatische Hydrolyse nach unterschiedlichen Vorbehandlungen	68
6.2 Kontinuierliche Vorbehandlung	71
6.2.1 Versuchsaufbau	71
6.2.2 Durchführung der kontinuierlichen Behandlung	73
6.2.2.1 Mechanische Behandlung	73
6.2.2.2 Alkalisch/mechanische Behandlung	74

6.2.3 Enzymatische Hydrolyse nach der kontinuierlichen Vorbehandlung.....	74
6.3 Ergebnisse und Diskussion	74
6.3.1 Kontinuierliche Vorbehandlung	74
6.3.2 Enzymatische Hydrolyse	77
6.3.2.1 Amorphe Cellulosen	77
6.3.2.2 Kristalline Cellulose	81
7 ABBAUVERSUCHE MIT LIGNOCELLULOSEN AM BEISPIEL VON BIERTREBERN IM BATCHANSATZ	84
7.1 Versuchsaufbau und Durchführung.....	84
7.1.1 Vorbehandlungsart und -dauer.....	84
7.1.1.1 Mechanische Behandlung	85
7.1.1.1.1 Vorzerkleinerung.....	85
7.1.1.1.2 Feinstzerkleinerung	85
7.1.1.2 Alkalische Vorbehandlung	86
7.1.1.3 Kombinierte alkalisch/mechanische Vorbehandlung	86
7.1.2 Hydrolyse.....	86
7.2 Ergebnisse und Diskussion	87
7.2.1 Einfluß verschiedener Vorbehandlungsverfahren	87
7.2.2 Hydrolyse.....	88
8 QUASIKONTINUIERLICHE ABBAUVERSUCHE MIT BIERTREBERN.....	93
8.1 Aufbau und Durchführung	94
8.1.1 Zwischenbehandlung.....	94
8.1.1.1 Mechanische Behandlung	94
8.1.1.1.1 Vorzerkleinerung.....	94
8.1.1.1.2 Feinstzerkleinerung	95
8.1.1.2 Alkalische Behandlung	95
8.1.1.3 Alkalische Feinstzerkleinerung	95
8.1.1.4 Alkalische Feinstzerkleinerung für die quasikontinuierliche Hydrolyse	96
8.1.2 Hydrolyse.....	96
8.1.2.1 Versuchsaufbau der zweistufigen Hydrolyse.....	96
8.1.2.2 Versuchsdurchführung in der ersten Hydrolysestufe.....	97
8.1.2.3 Versuchsdurchführung in der zweiten Hydrolysestufe.....	98
8.1.3 Methanisierung	98
8.1.3.1 Versuchsaufbau.....	98
8.1.3.2 Versuchsdurchführung.....	99
8.2 Ergebnisse und Diskussion	101
8.2.1 Zwischenbehandlung.....	101
8.2.2 Hydrolyse der leicht abbaubaren Fraktion.....	103
8.2.3 Hydrolyse der schwer abbaubaren Fraktion.....	108
8.2.4 Methanstufe nach der ersten Hydrolyse.....	112

8.2.5 Methanstufe nach der zweiten Hydrolyse.....	116
8.2.6 Gesamtbetrachtung der mehrstufigen Methanisierung.....	119
9 UNTERSUCHUNGEN DER ANAEROBEN BIERTREBERFERMENTATION IM TECHNIKUMSMAßSTAB.....	122
9.1 Versuchsaufbau der Technikumsanlage	122
9.2 Versuchsdurchführung in der Hydrolysestufe	123
9.3 Versuchsdurchführung in der Methanstufe	124
9.4 Ergebnisse und Diskussion der zweistufigen anaeroben Fermentation im Technikumsmaßstab.....	124
10 PROJEKTIERUNGSGRUNDLAGEN	129
11 SCHLUßFOLGERUNGEN.....	131
12 ZUSAMMENFASSUNG	136
13 ANHANG	139
14 LITERATURVERZEICHNIS.....	143