

SCHRIFTENREIHE

des Lehrstuhls Abfallwirtschaft und
des Lehrstuhls Siedlungswasserwirtschaft

17

Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
Lehrstuhl Abfallwirtschaft
Lehrstuhl Siedlungswasserwirtschaft

99423 Weimar, Coudraystraße 7

RHOMBOS-VERLAG • BERLIN

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar



**© 2006 RHOMBOS-VERLAG, Berlin
Printed in Germany**

Das Werk ist in allen seinen Teilen urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeisung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Impressum

Schriftenreihe des Lehrstuhls Abfallwirtschaft und
des Lehrstuhls Siedlungswasserwirtschaft
7. Jahrgang 2006

Herausgeber

Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen,
Lehrstuhl Abfallwirtschaft, Lehrstuhl Siedlungswasserwirtschaft

Schriftleitung

Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Bidlingmaier
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Londong

Anschrift:

Bauhaus-Universität Weimar, Coudraystraße 7, D-99423 Weimar

Verlag

RHOMBOS-VERLAG,
Kurfürstenstr. 17, 10785 Berlin
Internet: www.rhombos.de, eMail: verlag@rhombos.de
VK-Nr. 65 859

Druck

dbusiness GmbH, Berlin

ISBN 3-938807-35-0

ISSN 1862-1406

Stephan Voß

**Charakterisierung von Stoffen
hinsichtlich ihres Gasertrages
bei anaerober Behandlung durch die
Parameter Kohlenhydrate, Fett und
Eiweiß**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor - Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen

der

Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

aus Güstrow

Weimar, Januar 2006

1. Prof. Dr.-Ing. habil. Bidlingmaier

2. Prof. Dr.-Ing. Widmann

3. Prof. Dr.-Ing. Jörg Londong

Tag der Disputation: 15. Mai 2006

Bauhaus-Universität Weimar, 2006

Zum Geleit

Vor vier Jahren starteten mein Kollege Dr. Kraft und ich an der Bauhaus-Universität Weimar ein Promotionsprojekt zum Thema Anaerobtechnik. In der Praxis hatte sich nach vielen Jahren der Beschränkung auf die Klärschlammbehandlung diese Technik auch in der Abfallwirtschaft, Landwirtschaft und der Energiegewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen etabliert. Es zeigte sich aber bald, dass eine Reihe von Problemfeldern nicht gelöst waren und einer dringenden Bearbeitung bedurften. Dies waren die Fragen der Steuerung der Anlagen, des Einfahrens und der Prognose über die Eignung von potentiellen Inhaltsstoffen.

Mit der Arbeit von Herrn Voß liegt nun die erste von vier Dissertationen aus diesem Forschungsschwerpunkt vor. Herr Voß hat sich mit dem Komplex der Eignung von Inhaltsstoffen und der zu erzielenden Gasausbeute beschäftigt. Dieses Thema ist spezifisch bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen und Anlagen zur Verarbeitung von Mischungen aus Monochargen wichtig. In klarer Systematik zeigt Herr Voß die Entgasungsraten und Entgasungsverläufe für Monochargen und Mischungen auf. Er entwickelt in seiner Arbeit die Mengen- und Verlaufskurven und weist nach, wie bei Mischungen diese zu überlagern sind, um eine Gesamtprognose zu erstellen.

Mit dem aufgestellten und geprüften Verfahrensschema ist dem Betreiber damit ein Instrumentarium in die Hand gegeben, seinen Anlagenbetrieb sicher zu gestalten und vor allem durch gezielte Produktmischungen seine Gasausbeute zu optimieren, vor allem aber Schwankungen zu glätten.

Die Arbeit von Herrn Voß stellt damit nicht nur neue wissenschaftliche Erkenntnisse zur Verfügung sondern auch ein hilfreiches Handwerkzeug für den Praktiker.

Weimar, im August 2006

Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Bidlingmaier

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in Kooperation mit der Firma GEMES Abfallentsorgung und Recycling GmbH am Lehrstuhl Abfallwirtschaft der Fakultät Bauingenieurwesen an der Bauhaus-Universität Weimar. Die für diese Arbeit gewonnenen Ergebnisse beruhen auf Untersuchungen, die im Rahmen des AiF – Kooperationsprojektes „Anaerobe Behandlung von Fäkalien und organischen Abfällen und Reststoffen in Kleinreaktoren – Schaffung von Verfahrensgrundlagen für Regel- und Steuerungsprozesse“ durchgeführt wurden.

Ich möchte mich zunächst bei meiner Freundin und Kollegin Nicole bedanken. Ihr Verständnis und ihre Geduld machten es mir erst möglich, diese Arbeit zu erstellen. Sie unterstützte mich bei der gemeinsamen Arbeit während der Versuchsphase im Labor, spendete ermunternde Worte zur Überwindung von Stimmungstiefs und gab mir immer wieder neue Kraft. Ich danke Ihr besonders für die Geduld und das Verständnis im letzten halben Jahr, wenn ich nach der Arbeit am Abend aus Saalfeld nach Hause kam und oft keine Lust hatte überhaupt irgendetwas zu tun. Sie schaffte es immer wieder mich zu motivieren.

Herrn Prof. Bidlingmaier danke ich für die Betreuung der Arbeit, die fachliche Unterstützung und die hilfreichen Anregungen beim Verfassen der Arbeit. Der gewährte große Handlungsspielraum ermöglichte mir eine weitgehend eigenverantwortliche Entwicklung des Themas und der damit verbundenen Untersuchungen. Ohne die unkomplizierte Zusammenarbeit mit Prof. Kraft und die fachliche Diskussion im Kollegenkreis wäre die Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen. Herrn Prof. Wiedmann danke ich für das Angebot, das Koreferat zu übernehmen. Gleichmaßen danke ich Herrn Prof. Londong für die konstruktive Diskussion, die zum Gelingen meiner Disputation beigetragen hat und für das Angebot der Übernahme des Koreferats.

Weiterhin möchte ich mich bei Gerd für die Unterstützung während der Promotionsphase bedanken und dafür, dass er mir den Gedankenanstoß gegeben hat, über eine Promotion nachzudenken. Besonderer Dank gilt auch Ursula für die oft kurzfristige und zu später Stunde erbetene Korrekturarbeit am Manuskript. Durch ihre konstruktiven Verbesserungsvorschläge war sie mir eine große Hilfe.

Darüber hinaus möchte ich mich bei meinen Freunden bedanken, die mich auch nach mehreren Monaten und vielen nicht eingehaltenen Versprechen zurückrufen. Danke für Euren indirekten Zuspruch aus der Ferne.

Schließlich möchte ich besonders meinen Eltern danken, die es mir erst ermöglichen eine sehr gute Ausbildung zu genießen. Ich danke Ihnen für die sanfte, aber

dennoch wegweisende Erziehung und den Weitblick, dass Bildung die Sicherung der Zukunft ist. Danke für Eure warmherzige Fürsorge, Danke für die Unterstützung im Abitur und Danke für die uneingeschränkte Hilfe im Studium. Ich danke Euch auch für das Gefühl, das Ihr mir gegeben habt, alles im Leben schaffen zu können, wenn man nur will.

Nicht zuletzt möchte ich mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die zum Gelingen meiner Dissertation beigetragen haben und die ich nicht namentlich genannt habe.

Weimar, im August 2006

Stephan Voß

Inhaltsverzeichnis

Begriffsverzeichnis/ Abkürzungen.....	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	IX
1 Einleitung und Problemstellung	1
2 Stand des Wissens der anaeroben Vergärung	3
2.1 Biologie des anaeroben Abbaus.....	3
2.1.1 Grundprinzip des Stoffwechsels und Funktionsweise der Enzyme	3
2.1.2 Stufen des anaeroben Abbaus.....	5
2.2 Einflussfaktoren auf den anaeroben Abbau	9
2.2.1 Temperatur	9
2.2.2 pH-Wert	11
2.2.3 Substratzusammensetzung.....	12
2.2.4 Ammoniak.....	12
2.2.5 Organische Säuren	14
2.3 Substrate für die anaerobe Vergärung	15
2.4 Erkenntnisse.....	16
3 Möglichkeit der Charakterisierung und Zusammensetzung der Inputstoffe.....	17
3.1 Charakterisierung und Prognose der Biogas-Zeit-Kurve	17
3.1.1 Charakterisierung der Inputstoffe.....	17
3.1.2 Beschreibung der Biogas-Zeit-Kurve	21
3.1.3 Möglichkeit der Prognose	24
3.2 Zusammensetzung der Inputstoffe.....	26
3.2.1 Kohlenhydrat – Einteilung und anaerober Abbau	27
3.2.2 Eiweiß – Einteilung und anaerober Abbau.....	33
3.2.3 Fett – Einteilung und anaerober Abbau	37
3.2.4 Möglichkeiten zur Bestimmung der Hauptkomponenten	40
3.2.4.1 Kohlenhydrat.....	41
3.2.4.2 Eiweißanteil	50
3.2.4.3 Fettanteil	53
3.3 Erkenntnisse.....	55
4 Material und Methoden	57
4.1 Versuchsgeräte und –apparaturen	57
4.2 Analytische Methoden	67

4.2.1	Allgemeine Methoden.....	67
4.2.2	Bestimmung der Hauptkomponenten	68
4.2.2.1	Kohlenhydrat	68
4.2.2.2	Eiweiß	68
4.2.2.3	Fett.....	72
4.3	Ausgangsmaterial.....	74
4.3.1	Impfschlamm.....	74
4.3.2	Kohlenhydrat - Stärke	74
4.3.3	Eiweiß - Gelatine	75
4.3.4	Fett - Sonnenblumenöl	75
4.4.4	Lebensmittel/ Speisereste.....	76
5	Experimentelle Untersuchungen, sowie Darstellung und Diskussion der Versuchsergebnisse	77
5.1	Versuchsziel.....	77
5.2	Experimentelle Untersuchungen	77
5.2.1	Versuchsprogramm	78
5.2.2	Einzelversuche.....	80
5.2.2.1	Kohlenhydrat	81
5.2.2.2	Eiweiß	84
5.2.2.3	Fett.....	87
5.2.2.4	Zusammenfassende Erkenntnisse der Einzelversuche	91
5.2.3	Mischversuche.....	92
5.2.3.1	Kohlenhydrat – Eiweiß Gemisch	94
5.2.3.2	Kohlenhydrat – Fett Gemisch.....	98
5.2.3.3	Eiweiß – Fett Gemisch	104
5.2.3.4	Kohlenhydrat – Eiweiß – Fett Gemisch	109
5.2.3.5	Zusammenfassende Erkenntnisse der Mischversuche	115
5.2.4	Lebensmittel.....	117
5.2.4.1	Untersuchung der einzelnen Lebensmittel	117
5.2.4.2	Untersuchung von Lebensmittelmischungen.....	130
5.2.4.3	Zusammenfassende Erkenntnisse der Versuche mit Lebensmitteln	138
6	Bewertung der Versuchsergebnisse und Schlussfolgerungen.....	139
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	149
8	Literaturverzeichnis.....	153

Begriffsverzeichnis/ Abkürzungen

0,1E	oTR-Eiweiß zu oTR-Impfeschlamm = 0,1 (andere Zahlen entsprechen dem jeweiligen Verhältnis)
0,1K	oTR-Kohlenhydrat zu oTR-Impfeschlamm = 0,1 (andere Zahlen entsprechen dem jeweiligen Verhältnis)
0,1S	oTR-Stärke zu oTR-Impfeschlamm = 0,1 (andere Zahlen entsprechen dem jeweiligen Verhältnis)
0,1Z	oTR-Zucker zu oTR-Impfeschlamm = 0,1 (andere Zahlen entsprechen dem jeweiligen Verhältnis)
Ansysco	Analytische Systeme und Componenten GmbH
AOAC	Association Official Analytical Chemists
AUA	Agrar- und Umweltanalytik GmbH
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
DC	Dünnschichtchromatograph
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DOC	gelöst organischer Kohlenstoff (dissolved organic carbon)
Fa.	Firma
GV	Glühverlust = organischer Trockenrückstand
HPLC	Hochleistungs-Flüssigchromatographie
MTW	Wissenschaftlich Technische Werkstätten GmbH
NL	Normliter
oTR	organischer Trockenrückstand = Glühverlust
pH	pH-Wert
TC	Gesamtkohlenstoff (total carbon)
TOC	gesamt organischer Kohlenstoff (total organic carbon)
TR	Trockenrückstand
u.a.	und andere
UIT	Umwelt- und Ingenieurtechnik GmbH
prog.	prognostiziert
korr.	korrigiert

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Michaelis – Menten – Beziehung [SCHMELZ, 2000]	5
Abbildung 2.2:	Anaerober Abbau in vier Stufen [JUNGHANS, 1987]	6
Abbildung 2.3:	Thermodynamisches Fenster [SAHM, 1981]	9
Abbildung 2.4:	Temperaturoptima bei der Versäuerung von Glucose [ZOETEMEYER et al. 1982 aus SCHMELZ, 2000]	11
Abbildung 2.5:	Zusammenhang von Konzentration an freiem NH ₃ und pH-Wert [BRAUN, 1982]	13
Abbildung 2.6:	Hemmung der Methanbildung in Abhängigkeit von der Essigsäurekonzentration und dem pH-Wert [KROISS, 1986 aus SCHMELZ, 2000]	14
Abbildung 3.1:	Einfluss des Rohfasergehalts auf den Abbaugrad [PALMOWSKI, 2000]	20
Abbildung 3.2:	Einfluss des Ligningehalts auf den Abbaugrad [PALMOWSKI, 2000]	20
Abbildung 3.3:	Technische Faulzeit ausgewählter Substrate [PALMOWSKI, 2000]	21
Abbildung 3.4:	Wachstumskurve einer Bakterienkultur [SCHLEGEL, 1985]	22
Abbildung 3.5:	Fliessschema des Grundgedankens zur Charakterisierung des Substrates	25
Abbildung 3.6:	Fließschema zur optimalen Substratmischung	26
Abbildung 3.7:	Einteilung der Kohlenhydrate (Saccharide) [verändert nach MATISSEK et al, 1992]	28
Abbildung 3.8:	Schema des anaeroben Abbaus von Kohlenhydraten [SEYFRIED et al., 1994]	30
Abbildung 3.9:	Einfluss des Wasserstoffpartialdruckes auf die Änderung der freien Energie bei der Acetogenese [SEYFRIED et al., 1994]	32
Abbildung 3.10:	Einteilung der Eiweiße [verändert nach MATISSEK et al, 1992]	34
Abbildung 3.11:	Schema des anaeroben Abbaus von Eiweißen [SEYFRIED et al., 1994]	35
Abbildung 3.12:	Einteilung der Lipide	39
Abbildung 3.13:	Schema des anaeroben Abbaus von Fetten [SEYFRIED et al., 1994]	40
Abbildung 3.14:	Methoden zur Bestimmung von Mono- und Oligosacchariden	41

Abbildung 3.15:	Löslichkeit von Pflanzenprotein und Kohlenhydraten in siedenden Lösungsmitteln bei verschiedenen pH-Werten [v.LENGERKEN et al., 1991].....	48
Abbildung 4.1:	Schematische Darstellung der 30 Liter Versuchsanlage	58
Abbildung 4.2:	Versuchsanlage mit einem Reaktorvolumen von 30 Liter.....	58
Abbildung 4.3:	Trommelgaszähler TG 05/5	59
Abbildung 4.4:	Gasanalysegerät der Firma Awite	59
Abbildung 4.5:	Screenshot alle Reaktoren.....	60
Abbildung 4.6:	Screenshot Datenlogger	61
Abbildung 4.7:	Rührwerksmotor	62
Abbildung 4.8:	Rührwellendurchführung.....	62
Abbildung 4.9:	Versuchsanlage mit einem Reaktorvolumen von 2 Liter.....	63
Abbildung 4.10:	Versuchsreaktor mit einem Volumen von 1 Liter.....	64
Abbildung 4.11:	Versuchsreaktor mit einem Volumen von 2 Liter.....	64
Abbildung 4.12:	Klimakammer	65
Abbildung 4.13:	Eudiometer 1-Literanlage.....	65
Abbildung 4.14:	Deponiegasmonitor Modell GA 90.....	66
Abbildung 4.15:	pH/mV-Messgerät pH 330.....	66
Abbildung 4.16:	Extraktionsapparatur nach Soxhlet [MATISSEK et al., 1992].....	73
Abbildung 5.1:	Gassummenlinie 0,1S; 0,1Z	81
Abbildung 5.2:	pH-Wertverlauf - Kohlenhydrat.....	83
Abbildung 5.3:	Gassummenlinie 0,05K; 0,1K; 2x0,05K; 0,5x0,1K	83
Abbildung 5.4:	pH-Wertverlauf – Eiweiß.....	85
Abbildung 5.5:	Gassummenlinie 0,05E; 0,1E; 0,2E; 0,4E; 0,6E.....	85
Abbildung 5.6:	Gassummenlinie 0,4E; 0,6E; 1,5x0,4E.....	86
Abbildung 5.7:	pH-Wertverlauf – Fett.....	88
Abbildung 5.8:	Gassummenlinie 0,1F; 0,2F; 0,3F; 0,4F	88
Abbildung 5.9:	Einfluss des Impfschlammalters auf den Verlauf der Vergasung des Substratkohlenstoffs [TABASARAN, 1967].....	89
Abbildung 5.10:	Gassummenlinie 0,2F; 0,4F; 2x0,2F	90
Abbildung 5.11:	Gassummenlinie 0,1F; 0,3F; 3x0,1F	91
Abbildung 5.12:	Gassummenlinie Gemisch0,1K/0,1E; 0,1K; 0,1E; Summe 0,1K/0,1E.....	94
Abbildung 5.13:	Gassummenlinie Gemisch 0,1K/0,2E; 0,1K; 0,2E; Summe 0,1K/0,2E.....	96

Abbildung 5.14:	Gassummenlinie Gemisch 0,2K/0,1E; 0,2K; 0,1E; Summe 0,2K/0,1E	97
Abbildung 5.15:	Gassummenlinie Gemisch 0,1K/0,1F; 0,1K; 0,1F; Summe 0,1K/0,1F.....	98
Abbildung 5.16:	Gassummenlinie Gemisch 0,1K/0,2F; 0,1K; 0,2F; Summe 0,1K/0,2F.....	99
Abbildung 5.17:	Gassummenlinie Gemisch 0,1K/0,2F; verschoben-gestreckt 0,1K; 0,2F; Summe verschoben- gestreckt 0,1K/0,2F.....	100
Abbildung 5.18:	Gassummenlinie Gemisch 0,05K/0,1F; 0,05K; 0,1F; Summe 0,05K/0,1F.....	101
Abbildung 5.19:	Gassummenlinie Gemisch 0,05K/0,1F; 0,05K; verschoben 0,1F; Summe 0,05K/verschoben 0,1F	102
Abbildung 5.20:	Gassummenlinie Gemisch 0,2K/0,1F; 0,2K; 0,1F; Summe 0,2K/0,1F.....	102
Abbildung 5.21:	Gassummenlinie Gemisch 0,2K/0,1F; 0,2K; verschoben 0,1F; Summe 0,2K/verschoben 0,1F	103
Abbildung 5.22:	Gassummenlinie Gemisch 0,1E/0,1F; 0,1E; 0,1F; Summe 0,1E/0,1F.....	104
Abbildung 5.23:	Gassummenlinie Gemisch 0,1E/0,1F; gestreckt 0,1E; 0,1F; Summe 0,1E/0,1F	105
Abbildung 5.24:	Gassummenlinie Gemisch 0,1E/0,2F; 0,1E; 0,2F; Summe 0,1E/0,2F.....	106
Abbildung 5.25:	Gassummenlinie Gemisch 0,1E/0,2F; verschoben- verlangsamt 0,1E; 0,2F; Summe verschoben-verlangsamt 0,1E/0,2F	107
Abbildung 5.26:	Gassummenlinie Gemisch 0,2E/0,1F; 0,2E; 0,1F; Summe 0,2E/0,1F.....	108
Abbildung 5.27:	Gassummenlinie Gemisch 0,2E/0,1F; verschoben- verlangsamt 0,2E; 0,1F; Summe verschoben-verlangsamt 0,2E/0,1F	109
Abbildung 5.28:	Gassummenlinie Gemisch 0,1K/0,1E/0,1F; 0,1K; 0,1E; 0,1F Summe 0,1K/0,1E/0,1F	110
Abbildung 5.29:	Gassummenlinie Gemisch 0,2K/0,1E/0,1F; 0,2K; 0,1E; 0,1F Summe 0,2K/0,1E/0,1F	111
Abbildung 5.30:	Gassummenlinie Gemisch 0,2K/0,1E/0,1F; 0,2K; 0,1E; verschoben0,1F Summe 0,2K/0,1E/verschoben0,1F	112
Abbildung 5.31:	Gassummenlinie Gemisch 0,1K/0,2E/0,1F; 0,1K; 0,2E; 0,1F Summe 0,1K/0,2E/0,1F	113

Abbildung 5.32:	Gassummenlinie Gemisch 0,1K/0,2E/0,1F; verschoben und 1/3 verzögert 0,1K; 0,2E; 0,1F Summe verschoben und 1/3 verzögert 0,1K/0,2E/0,1F	113
Abbildung 5.33:	Gassummenlinie Gemisch 0,1K/0,1E/0,2F; 0,1K; 0,1E; 0,2F Summe 0,1K/0,1E/0,2F	114
Abbildung 5.34:	Gassummenlinie Gemisch 0,1K/0,1E/0,2F; verschoben und 1/2 verzögert 0,1K; 0,1E; 0,2F Summe verschoben und 1/2 verzögert 0,1K/0,1E/0,2F	115
Abbildung 5.35:	Gassummenlinie Nesquick; 0,1K; 0,1Z; E; F; Summe 0,1Z/E/F	119
Abbildung 5.36:	Gassummenlinie Milchreis; 0,1K; E; F; Summe 0,1K/E/F	120
Abbildung 5.37:	Gassummenlinie Haferflocken; 0,1K; E; F; Summe 0,1K/E/F	121
Abbildung 5.38:	Gassummenlinie Haferflocken; geschoben 0,1K; E; F; Summe geschoben 0,1K/E/F	122
Abbildung 5.39:	Gassummenlinie Harzer Handkäse; 0,4E; F; Summe 0,4E/F	122
Abbildung 5.40:	pH-Wertverlauf Harzer Handkäse	123
Abbildung 5.41:	Gassummenlinie Weichkäse; 0,2E; F; K; Summe 0,2E/F/K	124
Abbildung 5.42:	Gassummenlinie Fleischwurst; 0,2F; E; K; Summe 0,2F/E/K	125
Abbildung 5.43:	Gassummenlinie Fleischwurst; 0,2F; verschoben E; K; Summe 0,2F/verschobenE/K	126
Abbildung 5.44:	Gassummenlinie Sesamsaat; 0,2F; K; E; Summe 0,2F/K/E	127
Abbildung 5.45:	Gassummenlinie Sesamsaat; verschoben und auf 1/3 verzögert 0,2F; verschoben K; E; Summe verschoben und auf 1/3 verzögert 0,2F/verschoben K/E	128
Abbildung 5.46:	Gassummenlinie Sonnenblumenkern; 0,2F; K; E; Summe 0,2F/K/E	129
Abbildung 5.47:	Gassummenlinie Sonnenblumenkern; verschoben und auf 1/3 verzögert 0,2F; verschoben K; E; Summe verschoben und auf 1/3 verzögert 0,2F/verschoben K/E....	129
Abbildung 5.48:	Gassummenlinie Gemisch Sesamsaat/Milchreis; prog. Sesamsaat; prog. Milchreis; Summe prog. Sesamsaat/prog. Milchreis	131

Abbildung 5.49:	Gassummenlinie Gemisch Sesamsaat/Milchreis; prog. Sesamsaat; gestreckt prog. Milchreis; Summe prog. Sesamsaat/gestreckt prog. Milchreis	132
Abbildung 5.50:	Gassummenlinie Gemisch Milchreis/Fleischwurst; prog. Milchreis; prog. Fleischwurst; Summe prog. Milchreis/prog. Fleischwurst	133
Abbildung 5.51:	Gassummenlinie Gemisch Milchreis/Fleischwurst; verschoben prog. Milchreis; prog. Fleischwurst; Summe verschoben prog. Milchreis/prog. Fleischwurst ...	133
Abbildung 5.52:	Gassummenlinie Gemisch Kartoffel/Fleischwurst; Kartoffel; prog. Fleischwurst; Summe Kartoffel/ prog. Fleischwurst	134
Abbildung 5.53:	Gassummenlinie Gemisch Kartoffel/Fleischwurst; Kartoffel; verschoben prog. Fleischwurst; Summe Kartoffel/verschoben prog. Fleischwurst.....	135
Abbildung 5.54:	Gassummenlinie Gemisch Kartoffel/Milchreis/ Fleischwurst; Kartoffel; prog.Milchreis; prog. Fleischwurst; Summe Kartoffel/prog. Milchreis/ prog. Fleischwurst	136
Abbildung 5.55:	Gassummenlinie Gemisch Kartoffel/Milchreis/Fleisch- wurst; Kartoffel; verschoben prog.Milchreis; prog. Fleischwurst; Summe Kartoffel/ verschoben prog. Milchreis/ prog. Fleischwurst	137
Abbildung 6.1:	Handlungsanweisung für Substrate mit einem und zwei Anteilen	145
Abbildung 6.2:	Handlungsanweisung für Substrate drei Anteilen	147

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Biogasertrag und Methangehalt von Kohlenhydrat, Eiweiß und Fett [OTTOW et al., 1997].....	17
Tabelle 3.2:	Zusammensetzung von ausgewählten Substraten [PALMOWSKI, 2000]	18
Tabelle 3.3:	Rohfaser- und Ligningehalt von ausgewählten Substraten [PALMOWSKI, 2000].....	19
Tabelle 3.4:	Mittlere Elementarzusammensetzung von Kohlenhydrat, Eiweiß und Fett in Massenprozenten [w/w-%] [PALMOWSKI, 2000]	23
Tabelle 3.5:	Analysenverfahren zur Rohfaser-/ Ballaststoffbestimmung [MEUSER et al., 1982].....	49
Tabelle 3.6:	Analysenverfahren zur Eiweißbestimmung [Vgl. v. LENGERKEN et al, 1991]	51
Tabelle 4.1:	Analyseverfahren.....	67
Tabelle 4.2:	Faktoren zur Eiweißbestimmung in Abhängigkeit vom Substrat [MATISSEK et al., 1992; SOUCI et al., 1994].....	71
Tabelle 4.3:	Zusammensetzung verwendeter Lebensmittel/ Speisereste.....	76
Tabelle 5.1:	Durchgeführte Untersuchungen.....	78
Tabelle 5.2:	Analysenprogramm	80
Tabelle 6.1:	Übersicht der Versuchsergebnisse zum anaeroben Abbauverhalten (K-Kohlenhydrat, E-Eiweiß, F-Fett, v-Abbaugeschwindigkeit)	141
Tabelle 6.2:	Experimentell ermittelter und prognostizierter Gasertrag der untersuchten Lebensmittel.....	142