

SCHRIFTENREIHE

des Lehrstuhls Abfallwirtschaft und
des Lehrstuhls Siedlungswasserwirtschaft

19

Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
Lehrstuhl Abfallwirtschaft
Lehrstuhl Siedlungswasserwirtschaft

99423 Weimar, Coudraystraße 7

RHOMBOS-VERLAG • BERLIN

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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



**© 2007 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
8. Jahrgang 2007

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 978-3-938807-74-3

ISSN 1862-1406

Nicole Meisgeier

Verkürzung der Einfahrphase bei der anaeroben Behandlung von Fäkalien, organischen Abfällen und Reststoffen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor - Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen

der

Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Nicole Meisgeier

aus Jena

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Bidlingmaier
2. Prof. Dr.-Ing. Renatus Widmann
3. Prof. Dr.-Ing. Klaus Fricke

Tag der Disputation: 19. Februar 2007

Bauhaus-Universität Weimar, 2007

Danksagung

An dieser Stelle spreche ich meinen Dank an all diejenigen aus, die mich während der Bearbeitung der Dissertation begleitet haben und mir Mut und Kraft gaben, um den eingeschlagenen Weg zu gehen.

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des AiF – Kooperationsprojektes „Anaerobe Behandlung von Fäkalien und organischen Abfällen und Reststoffen in Kleinreaktoren – Schaffung von Verfahrensgrundlagen für Regel- und Steuerungsprozesse“. Dieses Projekt wurde als Kooperation zwischen der Firma GEMES Abfallentsorgung und Recycling GmbH und dem Lehrstuhl Abfallwirtschaft der Fakultät Bauingenieurwesen an der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt.

Meinem akademischen Lehrer Herrn Prof. Werner Bidlingmaier danke ich für die Betreuung der Arbeit, die inhaltlichen Anregungen und Fachgespräche. Herrn Prof. Renatus Widmann und Herrn Prof. Klaus Fricke gilt ebenfalls mein Dank für ihre Bereitschaft die Korreferate meiner Dissertationsschrift zu übernehmen und für die damit verbundenen Mühen. Diskussionen mit Jun.-Prof. Eckhard Kraft, Jan Liebetrau und allen anderen Kollegen haben meine Zeit als Doktorand, und damit auch diese Arbeit, bereichert.

Mein ganz besonderer Dank gilt jedoch meinem Freund und Kollegen Stephan, durch dessen unermüdlichen moralischen Beistand, die Mithilfe bei der gemeinsamen Arbeit im Labor und die vielen anregenden oft auch kritischen Diskussionen diese Arbeit erst die vorliegende Form annehmen konnte. Er gab mir den notwendigen emotionalen Halt und machte mir Mut. Durch seine Unterstützung war es möglich, die teilweise krisenhaften Phasen abzupuffern und gut zu überstehen.

An meine Familie richtet sich ein spezieller Dank für das uneingeschränkte Verständnis, die aufopfernde Hilfsbereitschaft und die Unterstützung zu jeder Zeit. Ich danke ihr für die anregenden Diskussionen während der letzten Jahre und die unermüdliche Arbeit beim Korrekturlesen. Ferner gab es durch sie immer wieder Anlässe für angenehme Unterbrechungen. Diese ermöglichten auch den zeitweise notwendigen Abstand zur Arbeit.

Ein besonders herzlicher Dank gilt dabei meinen Eltern, denen ich diese Arbeit widme. Ihre uneingeschränkte Förderung meiner Ausbildung und ihre liebevolle Unterstützung hat die Anfertigung der vorliegenden Arbeit erst ermöglicht.

Zum Geleit

Biogasgewinnung. War in der Vergangenheit dies fast ausschließlich ein Verfahren zur Klärschlammbehandlung und später eine weitere Option zur Verwertung von Bioabfällen, so hat es sich zunehmend als Energiegewinnungsverfahren auf der Basis nachwachsender Rohstoffe etabliert. Diese erfreuliche Entwicklung sollte jedoch nicht darüber hinweg täuschen, dass nach wie vor eine Reihe von Fragen im Kontext der Biogasgewinnung nicht befriedigend geklärt sind, geschweige denn, technische Lösungen existieren.

Eine dieser offenen Punkte ist die Klärung der Modalitäten der Einfahrphase. Traditionell ist die Einfahrphase ein langwieriger, oft mehrere Monate dauernder und oft schwieriger Prozess, da die biologischen Abläufe noch nicht in einer stabilen Phase verlaufen. Für die Praxis ist es daher von Bedeutung, Mechanismen an die Hand zu bekommen, die eine Verkürzung dieser Phase ermöglichen, bei gleichzeitiger Prozessstabilität. Dies ist von besonderer Bedeutung, wenn mobile Anlagen in Betracht kommen oder wenn Anlagen mit sehr spezifischen Materialien als Substrat beaufschlagt werden oder das Aufgabegut saisonal starken Schwankungen in der Zusammensetzung unterworfen ist.

Mit diesem Themenkomplex hat sich Frau Meisgeier in ihrer Arbeit auseinandergesetzt.

Die Untersuchungen haben deutlich gezeigt, dass revolutionäre neue Techniken nicht zu entdecken waren – wie sollte dies auch sein, bei gleichbleibender Biozönose – wohl aber Strategien sich entwickeln ließen, die die Einfahrphase verkürzen, stabiler gestalten vor allem aber planbar machen. Planungssicherheit ist aus technisch betrieblichen Gründen insbesondere aber aus ökonomischen Gründen ein großer Schritt vorwärts.

Damit bietet die vorliegende Arbeit nicht nur akademische Erkenntnis sondern auch direkten Nutzen für den praktischen Betrieb.

Weimar, im Oktober 2007

Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Bidlingmaier

INHALTSVERZEICHNIS

Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis.....	XVII
Abkürzungsverzeichnis	XIX
1 Einleitung	1
2 Biologische Prozesse des anaeroben Stoffabbaus.....	3
2.1 Die vier Phasen des anaeroben Abbaus	3
2.2 Die Physiologie und das Wachstum der anaeroben Mikroorganismen..	10
2.3 Stoffwechselaktivitäten	15
3 Wichtige prozessbeeinflussende Parameter.....	21
3.1 Die Temperatur.....	21
3.2 Die Rolle des pH-Wertes	22
3.3 Der Feststoffgehalt	23
3.4 Die Rolle von Ammoniak und H ₂ S bei der anaeroben Vergärung.....	24
3.5 Organische Säuren.....	29
4 Die Einfahrphase des anaeroben Abbauprozesses	33
4.1 Die am anaeroben Abbau beteiligten Mikroorganismen	33
4.2 Der Impfschlamm.....	38
4.3 Das Einfahren von Vergärungsanlagen	41
4.4 Zusammenfassende Erkenntnisse im Hinblick auf die durchzuführenden Versuche.....	47
5 Versuchsplanung	51
5.1 Versuchsziel	51
5.2 Das Untersuchungsprogramm.....	51
5.3 Untersuchung des optimalen Volumenanteils Impfschlamm	54
5.4 Herstellung und Einsatz von adaptiertem Impfschlamm	56
5.5 Untersuchung einer kontinuierlichen Erhöhung der Substratdosierung bis zu einer maximalen Raumbelastung	57
5.6 Vorhalten und Bereitstellen der Impfschlämme	58
6 Material und Methoden	61
6.1 Eingesetzte Inputstoffe	61
6.2 Versuchsapparaturen und -geräte	62
6.2.1 Laborreaktoren	62
6.2.2 Messtechnik	67
6.3 Analytische Methoden	71

7	Darstellung der Versuchsergebnisse	73
7.1	Vorversuche zur Untersuchung des optimalen Volumenanteils Impf Schlamm	73
7.1.1	Untersuchungen mit dem Substrat Speisereste	74
7.1.2	Untersuchungen mit dem Substrat Fäkalien	79
7.2	Einsatz von adaptierten Impfschlämmen	83
7.3	Untersuchungen zur Ermittlung des minimalen Volumenanteil Impf Schlamm für eine Optimierung der Einfahrphase	89
7.4	Untersuchung einer kontinuierlichen Erhöhung der Substratdosierung bis zu einer maximalen Raumbelastung	97
7.4.1	Untersuchungen mit dem Substrat Cellulose	97
7.4.2	Untersuchungen mit dem Substrat Maissilage	105
7.5	Untersuchungen zum Vorhalten und Bereitstellen der Impfschlämme	111
8	Diskussion und Bewertung der Versuchsergebnisse	115
8.1	Untersuchungen mit dem Substrat Speisereste	115
8.2	Untersuchungen mit dem Substrat Fäkalien	127
8.3	Untersuchungen zum Einsatz von mehrfach adaptierten Impfschlämmen	134
8.4	Ermittlung des minimalen Volumenanteils Impf Schlamm für eine Optimierung der Einfahrphase unter Einsatz von Cellulose	140
8.5	Kontinuierliche Erhöhung der Substratdosierung bis zu einer maximalen Raumbelastung	146
8.5.1	Untersuchungen mit dem Substrat Cellulose	147
8.5.2	Untersuchungen mit dem Substrat Maissilage	154
8.6	Vorhalten und Bereitstellen von Impfschlämmen	157
9	Einfahrstrategien und Handlungsanweisungen	161
9.1	Einfahren im Batchbetrieb	162
9.2	Einfahren im kontinuierlichen Betrieb	168
10	Zusammenfassung und Ausblick	173
11	Literaturverzeichnis	177

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	vierstufig anaerober Abbau [Schmelz, 2000] und rechts der Kohlenstoff-Fluss beim anaeroben Abbau von Cellulose [Seyfried et al., 1994]	5
Abbildung 2.2:	Wachstumsphasen einer Batchkultur [Braun, 1982] x = Organismenkonzentration	12
Abbildung 2.3:	Generationszeiten aerober und anaerober Mikroorganismen (Anhaltswerte) [nach Seyfried et al., 1986].....	13
Abbildung 2.4:	Vergleich der Wachstumsgeschwindigkeit für die acetat-spaltenden Organismen Methanotrix und Methanosarcina [Gujer und Zehnder, 1983]	14
Abbildung 2.5:	die anaerobe Nahrungskette [Schlegel, 1992]	16
Abbildung 2.6:	Struktur der Adenosinphosphate [Schmelz, 2000]	17
Abbildung 2.7:	Überblick über den Stoffwechsel methanogener Archaeen [Cypionka, 1999]	19
Abbildung 3.1:	Einfluss des Feststoffgehaltes auf die spezifische Gasproduktion [Kaltwasser, 1980]	24
Abbildung 3.2:	Überblick über einige Einflussgrößen der Methanvergärung in Relation zum pH-Wert Essigsäure, Propionsäure, Schwefelwasserstoff und Ammoniak [Friedmann, 1993].....	25
Abbildung 3.3:	Anteil von HS ⁻ und H ₂ S am Gesamtsulfid in Abhängigkeit vom pH-Wert [Kroiss, 1985]	27
Abbildung 3.4:	Verteilung der Sulfidfraktionen auf Gas und Wasser [Kroiss, 1985]	28
Abbildung 3.5:	Hemmung der Methanbildung aus Essigsäure in Abhängigkeit der Konzentration an undissoziiertem Schwefelwasserstoff in der umgebenden Flüssigkeit [Kroiss, 1985]	29
Abbildung 3.6:	Prozentualer Anteil der undissoziierten Säuren an den Gesamtsäuren in Abhängigkeit vom pH-Wert [Kroiss, 1985]	30
Abbildung 3.7:	Hemmung der Methanbildung in Abhängigkeit von der Essigsäurekonzentration und dem pH-Wert [Kroiss, 1985]	30
Abbildung 4.1:	Abhängigkeit des Energiegewinns acetogener Reaktionen vom Wasserstoffpartialdruck [Bischofsberger, 2005]	36
Abbildung 4.2:	der Einfluss des Impfschlammalters auf den Verlauf der Vergasung des Substratkohlenstoffs [Tabasaran, 1967].....	40
Abbildung 6.1:	Versuchsreaktor der 1 Liter-Versuchsanlage	63
Abbildung 6.2:	Klimakammer	64
Abbildung 6.3:	1 Liter-Versuchsanlage	64
Abbildung 6.4:	Versuchsreaktor der 2 Liter- Versuchsanlage	65
Abbildung 6.5:	2 Liter-Versuchsanlage	65

Abbildung 6.6:	Duran-Glas Versuchsreaktor (linkes Bild) und Plexiglas-reaktor (rechtes Bild) der 10 Liter-Versuchsanlage	66
Abbildung 6.7:	10 Liter-Versuchsanlage.....	67
Abbildung 6.8:	Eudiometer der 1 Liter-Versuchsanlage (linkes Bild) und der 2 Liter-Versuchsanlage (rechtes Bild)	68
Abbildung 6.9:	Eudiometer der 10 Liter-Versuchsanlage	69
Abbildung 6.10:	pH/ mV-Messgerät pH 330	69
Abbildung 6.11:	Ansyco Deponiegasmonitor Modell GA 90	70
Abbildung 6.12:	Gasanalysegerät der Firma Awite	71
Abbildung 7.1:	VR 4-pH-Wertverlauf der Verhältnisse 0,5 und 1,0 mit Speiseresten	74
Abbildung 7.2:	VR 4-Gassummenlinien der Verhältnisse 0,5 und 1,0 mit Speiseresten	75
Abbildung 7.3:	VR 4-CH ₄ -Gehalt im produzierten Biogas der Verhältnisse 0,5 und 1,0 mit Speiseresten.....	76
Abbildung 7.4:	VR 5 und 6-Gassummenlinien der Verhältnisse 0,25, 0,75 und 0,85 mit Speiseresten.....	77
Abbildung 7.5:	VR 5 und 6-Biogasproduktion der Verhältnisse 0,25, 0,75 und 0,85 mit Speiseresten.....	78
Abbildung 7.6:	VR 6-pH-Wertverlauf des Verhältnisses 0,85 mit Speiseresten	79
Abbildung 7.7:	VR 7 und 8-pH-Wertverlauf der Verhältnisse 0,5, 0,75 und 1,0 mit Fäkalien	80
Abbildung 7.8:	VR 7 und 8-Biogasproduktion der Verhältnisse 0,5, 0,75 und 1,0 mit Fäkalien	81
Abbildung 7.9:	VR 7 und 8-Gassummenlinien der Verhältnisse 0,5, 0,75 und 1,0 mit Fäkalien	82
Abbildung 7.10:	VR 7 und 8-CH ₄ -Gehalt im produzierten Biogas der Verhältnisse 0,5, 0,75 und 1,0 mit Fäkalien.....	83
Abbildung 7.11:	VR 9-pH-Wertverlauf der Verhältnisse 0,25 und 0,5 mit Cellulose.....	84
Abbildung 7.12:	VR 9-Gassummenlinien der Verhältnisse 0,25 und 0,5 mit Cellulose.....	85
Abbildung 7.13:	VR 15 bis 19 – pH-Wertverlauf für die Ansätze mit 1-fach bis 4-fach adaptiertem Impfschlamm und Cellulose im Verhältnis 0,5	86
Abbildung 7.14:	VR 15 bis 19 – Biogasproduktion für die Ansätze mit 1- fach bis 4-fach adaptiertem Impfschlamm und Cellulose im Verhältnis 0,5	87
Abbildung 7.15:	VR 15 bis 19 – spezifische Biogasproduktion der Ansätze mit 1-fach bis 4-fach adaptiertem Impfschlamm und Cellulose im Verhältnis 0,5.....	88

Abbildung 7.16:	VR 1 – Biogasproduktion für die Ansätze mit 20, 35 und 50 Vol.-% Impfschlamm und Cellulose.....	90
Abbildung 7.17:	VR 1 – Gassummenlinien der Ansätze mit 20, 35 und 50 Vol.-% Impfschlamm und Cellulose.....	91
Abbildung 7.18:	VR 2 – Gassummenlinien der Ansätze mit 20, 35 und 50 Vol.-% adaptiertem Impfschlamm (nach 10 Tagen Adaption) und Cellulose	92
Abbildung 7.19:	VR 5 – Biogasproduktion der Ansätze mit 20, 35 und 50 Vol.-% Impfschlamm und Cellulose.....	94
Abbildung 7.20:	VR 6 – Biogasproduktion der Ansätze mit 20, 35 und 50 Vol.-% adaptiertem Impfschlamm (nach 5 Tagen Adaption) und Cellulose	95
Abbildung 7.21:	VR 6 – Gassummenlinien der Ansätze mit 20, 35 und 50 Vol.-% adaptiertem Impfschlamm (nach 5 Tagen Adaption) und Cellulose	96
Abbildung 7.22:	VR 8 – pH-Wertverlauf Cellulose – 3-stufige Dosierungserhöhung nach jeweils 5 Tagen 0,5 / 0,75 / 2,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,0 / 2,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 2,0 g oTS/ l*d	98
Abbildung 7.23:	VR 8 – Biogasproduktion Cellulose – 3-stufige Dosierungserhöhung nach jeweils 5 Tagen 0,5 / 0,75 / 2,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,0 / 2,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 2,0 g oTS/ l*d	99
Abbildung 7.24:	VR 8 – Gassummenlinien Cellulose – 3-stufige Dosierungserhöhung nach jeweils 5 Tagen 0,5 / 0,75 / 2,0 g oTS/ l*; 0,5 / 1,0 / 2,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 2,0 g oTS/ l*d	101
Abbildung 7.25:	VR 9 – pH-Wertverlauf Cellulose – 3-stufige Dosierungserhöhung nach jeweils 2 Tagen 0,5 / 1,25 / 2,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 2,5 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 3,5 g oTS/ l*d	102
Abbildung 7.26:	VR 9 – Biogasproduktion Cellulose – 3-stufige Dosierungserhöhung nach jeweils 2 Tagen 0,5 / 1,25 / 2,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 2,5 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 3,5 g oTS/ l*d	103
Abbildung 7.27:	VR 10 – Biogasproduktion Cellulose – 3-stufige Dosierungserhöhung nach jeweils 2 Tagen 0,5 / 1,25 / 3,5 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 4,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 5,0 g oTS/ l*d	104
Abbildung 7.28:	VR 10 – Gassummenlinien Cellulose – 3-stufige Dosierungserhöhung nach jeweils 2 Tagen 0,5 / 1,25 / 3,5 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 4,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 5,0 g oTS/ l*d	105
Abbildung 7.29:	VR 11 – pH-Wertverlauf Maissilage – 3-stufige Dosierungserhöhung nach jeweils 2 Tagen 0,5 / 1,25 / 2,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 3,5 g oTS/ l*d.....	106
Abbildung 7.30:	VR 11 – Biogasproduktion Maissilage – 3-stufige Dosierungserhöhung nach jeweils 2 Tagen 0,5 / 1,25 / 2,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 3,5 g oTS/ l*d.....	107

Abbildung 7.31:	VR 11 – CH ₄ -Gehalt im Biogas von Maissilage – 3-stufige Dosierungserhöhung nach jeweils 2 Tagen 0,5 / 1,25 / 2,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 3,5 g oTS/ l*d	108
Abbildung 7.32:	VR 13 – pH-Wertverlauf Maissilage – 3-stufige Dosierungserhöhung nach jeweils 5 Tagen 0,5 / 1,25 / 2,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 3,5 g oTS/ l*d	109
Abbildung 7.33:	VR 13 – Biogasproduktion Maissilage – 3-stufige Dosierungserhöhung nach jeweils 5 Tagen 0,5 / 1,25 / 2,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 3,5 g oTS/ l*d	110
Abbildung 7.34:	VR 13 – Gassummenlinien Maissilage – 3-stufige Dosierungserhöhung nach jeweils 5 Tagen 0,5 / 1,25 / 2,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 3,5 g oTS/ l*d	111
Abbildung 7.35:	VR 12 – pH-Wertverlauf der Ansätze mit getrocknetem und gefrorenem Impfschlamm und Cellulose	112
Abbildung 7.36:	VR 12 – Biogasproduktion der Ansätze mit getrocknetem und gefrorenem adaptiertem Impfschlamm und Cellulose	113
Abbildung 7.37:	VR 12 – Gassummenlinien der Ansätze mit getrocknetem und gefrorenem adaptiertem Impfschlamm und Cellulose	114
Abbildung 8.1:	pH-Wertverlauf der Verhältnisse 0,25, 0,5, 0,75 und 1,0 mit Speiseresten und ausgefautem Klärschlamm	116
Abbildung 8.2:	Biogasproduktion der Verhältnisse 0,25, 0,5, 0,75 und 1,0 mit Speiseresten und ausgefautem Klärschlamm	120
Abbildung 8.3:	spezifische Biogasproduktion der Verhältnisse 0,25, 0,5, 0,75 und 1,0 mit Speiseresten und ausgefautem Klärschlamm.....	121
Abbildung 8.4:	zeitliche Verzögerung bis zum Erreichen des Wendepunktes bei den untersuchten Verhältnissen mit dem Substrat Speisereste	123
Abbildung 8.5:	pH-Wertverlauf der Verhältnisse 0,5, 0,75 und 1,0 mit Fäkalien und ausgefautem Klärschlamm.....	128
Abbildung 8.6:	Biogasproduktion der Verhältnisse 0,5, 0,75 und 1,0 mit Fäkalien und ausgefautem Klärschlamm.....	130
Abbildung 8.7:	spezifische Biogasproduktion der Verhältnisse 0,5, 0,75 und 1,0 mit Fäkalien und ausgefautem Klärschlamm.....	130
Abbildung 8.8:	Methan- und Kohlendioxid-Gehalt im produzierten Biogas der Verhältnisse 0,5, 0,75 und 1,0 mit Fäkalien und ausgefautem Klärschlamm	133
Abbildung 8.9:	pH-Wertverlauf der Ansätze mit ausgefautem Klärschlamm, 1-fach bis 4-fach adaptiertem Impfschlamm und Cellulose im Verhältnis 0,5.....	135
Abbildung 8.10:	Biogasproduktion der Ansätze mit ausgefautem Klärschlamm, 1-fach bis 4-fach adaptiertem Impfschlamm und Cellulose im Verhältnis 0,5.....	137

Abbildung 8.11:	spezifische Biogasproduktion der Ansätze mit ausgefautem Klärschlamm, 1-fach bis 4-fach adaptiertem Impfschlamm und Cellulose im Verhältnis 0,5.....	138
Abbildung 8.12:	zeitliche Verkürzung [in %] bis zum Erreichen des Wendepunktes beim Einsatz von adaptierten Impfschlämmen	139
Abbildung 8.13:	pH-Wertverlauf der Ansätze mit 20, 35 und 50 Vol.-% adaptiertem Impfschlamm und Cellulose (nach 5 und 10 Tagen Adaption).....	143
Abbildung 8.14:	Biogasproduktion der Ansätze mit 20, 35 und 50 Vol.-% adaptiertem Impfschlamm und Cellulose (nach 5 und 10 Tagen Adaption).....	144
Abbildung 8.15:	spez. Biogasproduktion der Ansätze mit 20, 35 und 50 Vol.-% adaptiertem Impfschlamm und Cellulose (nach 5 und 10 Tagen Adaption), sowie Cellulose und ausgefauter Klärschlamm (im Verhältnis 0,5) in VR 8 und 13	145
Abbildung 8.16:	zeitliche Verzögerung [in %] bis zum Erreichen des Wendepunktes bei den Ansätzen mit 20, 35 und 50 Vol.-% adaptiertem Impfschlamm und Cellulose (nach 5 und 10 Tagen Adaption), sowie Cellulose und ausgefauter Klärschlamm (im Verhältnis 0,5)	146
Abbildung 8.17:	pH-Wertverlauf der Ansätze mit dem Substrat Cellulose – 3-stufige Dosierungserhöhung nach jeweils 5 Tagen 0,5 / 0,75 / 2,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,0 / 2,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 2,0 g oTS/ l*d.....	148
Abbildung 8.18:	Gassummenlinie der Ansätze mit dem Substrat Cellulose – 3-stufige Dosierungserhöhung nach jeweils 5 Tagen 0,5 / 0,75 / 2,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,0 / 2,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 2,0 g oTS/ l*d.....	149
Abbildung 8.19:	pH-Wertverlauf der Ansätze mit dem Substrat Cellulose – 3-stufige Dosierungserhöhung nach jeweils 2 und 5 Tagen 0,5 / 1,25 / 2,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 2,5 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 3,5 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 4,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 5,0 g oTS/ l*d.....	151
Abbildung 8.20:	Biogasproduktion der Ansätze mit dem Substrat Cellulose – 3-stufige Dosierungserhöhung nach 2 Tagen 0,5 / 1,25 / 2,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 2,5 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 3,5 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 4,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 5,0 g oTS/ l*d.....	152
Abbildung 8.21:	Biogasproduktion der Ansätze mit dem Substrat Cellulose – 3-stufige Dosierungserhöhung nach jeweils 2 (VR 9 und 10) und 5 Tagen (VR 8) 0,5 / 1,25 / 2,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 2,5 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 3,5 g oTS/ l*d	153

Abbildung 8.22:	pH-Wertverlauf der Ansätze mit dem Substrat Maissilage – 3-stufige Dosierungserhöhung nach jeweils 2 (VR 11) und 5 Tagen (VR 13) 0,5 / 1,25 / 2,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 3,5 g oTS/ l*d.....	155
Abbildung 8.23:	Biogasproduktion der Ansätze mit dem Substrat Maissilage – 3-stufige Dosierungserhöhung nach jeweils 2 (VR 11) und 5 Tagen (VR 13) 0,5 / 1,25 / 2,0 g oTS/ l*d; 0,5 / 1,25 / 3,5 g oTS/ l*d.....	156
Abbildung 8.24:	spezifische Biogasproduktion der Ansätze mit dem Substrat Cellulose und getrocknetem sowie zuvor eingefrorenem adaptierten Impfschlamm	159
Abbildung 9.1:	Dauer der Einfahrphase bei Anwendung der Handlungs- anweisung für das einzustellende Verhältnis oTR Substrat/ oTR Impfschlamm im Batchbetrieb	165
Abbildung 9.2:	Empfehlung beim Einfahren im Batchbetrieb für das einzustellende Verhältnis oTR Substrat/ oTR Impfschlamm.....	166
Abbildung 9.3:	Dauer der Einfahrphase bei Anwendung der Handlungs- anweisung mit adaptiertem Impfschlamm im Batchbetrieb.....	167
Abbildung 9.4:	Empfehlung beim Einfahren im Batchbetrieb für die Verwendung von an das zu vergärende Substrat adaptierten Impfschlamm....	168
Abbildung 9.5:	Dauer der Einfahrphase bei Anwendung der Handlungs- anweisung im kontinuierlichen Betrieb (3-stufige Erhöhung der Raumbelastung)	170
Abbildung 9.6:	Empfehlung beim Einfahren im kontinuierlichen Betrieb mit einer 3-stufigen Erhöhung der Raumbelastung	171

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Auflistung einiger taxonomisch klassifizierter methanogener Bakterien, deren Substrat sowie pH- und Temperaturoptimum [nach Spendlin, 1991 und Hartmann, 1992].....	10
Tabelle 5.1:	das Untersuchungsprogramm (IS-Impf Schlamm).....	53
Tabelle 6.1:	gemessene Parameter und zugehörige Analyseverfahren.....	72
Tabelle 7.1:	VR 5 – Verlauf der pH-Werte bei den Verhältnissen 0,25 und 0,75 mit Speisereste.....	76
Tabelle 7.2:	VR 7 und 8 – Verlauf der pH-Werte bei den Verhältnissen 0,5, 0,75 und 1,0 mit Fäkalien	81
Tabelle 7.3:	VR 15 bis 19 – Werte der Biogasproduktion für die Ansätze mit 1- fach bis 4- fach adap. Impfschlamm und Cellulose	87
Tabelle 7.4:	VR 1 – pH-Werte für die Ansätze mit 20, 35 und 50 Vol.-% Impfschlamm und Cellulose (10 Versuchstage)	89
Tabelle 7.5:	VR 5 – pH-Werte für die Ansätze mit 20, 35 und 50 Vol.-% Impfschlamm und Cellulose (5 Versuchstage)	94
Tabelle 7.6:	VR 8 – Werte der Biogasproduktion mit Cellulose-3-stufige Dosierungserhöhung nach jeweils 5 Tagen	100
Tabelle 7.7:	VR 11 – Werte der Biogasproduktion mit Maissilage – 3-stufige Dosierungserhöhung nach jeweils 2 Tagen.....	107
Tabelle 7.8:	VR 13 – Werte der Biogasproduktion mit Maissilage – 3-stufige Dosierungserhöhung nach jeweils 5 Tagen.....	110
Tabelle 8.1:	zeitliche Verkürzung bzw. Verlängerung [in %] der Einfahrphase bezüglich des pH-Wertwertverlaufes bei den untersuchten Verhältnissen 0,25, 0,5, 0,75, 0,85 und 1,0 mit dem Substrat Speisereste	118
Tabelle 8.2:	Zusammensetzung von Speiseresten [Oechsner, 1996].....	119
Tabelle 8.3:	Werte des CO ₂ -Anteils [Vol.-%] im Biogas bei den Verhältnissen 0,25, 0,5, 0,75, 0,85 und 1,0 mit Speiseresten	125
Tabelle 8.4:	abbauspezifische Faulgas- und Methanmenge [Roediger, 1990].....	126
Tabelle 8.5:	niedrigster gemessener pH-Wert [-] in den Versuchen mit Speiseresten und Fäkalien.....	127
Tabelle 8.6:	zeitliche Verkürzung bzw. Verlängerung [in %] bis zum Erreichen des Wendepunktes bei den untersuchten Verhältnissen 0,5, 0,75 und 1,0 mit dem Substrat Fäkalien	131
Tabelle 8.7:	Schwankungsbreiten und durchschnittliche Biogaszusammensetzung (% v/v) [Braun, 1982 und DVGW, 2006]	133

Tabelle 8.8:	zeitliche Verkürzung [in %] der Einfahrphase bezüglich des pH-Wertverlaufes beim Einsatz mehrfach adaptierter Impfslämme	136
Tabelle 8.9:	gebildete Gasmenge in den Versuchen mit ausgefaultem Klärschlamm im Verhältnis oTR Cellulose/ oTR Impfschlamm = 0,5.....	141
Tabelle 8.10:	pH-Werte [-] der Ansätze mit 20, 35 und 50 Vol.-% Impfschlamm	142
Tabelle 8.11:	Untersuchungen zur Erhöhung der Substratdosierung mit dem Substrat Cellulose	150
Tabelle 9.1	Dauer der Einfahrphase in Abhängigkeit vom eingestelltem Verhältnis von oTR Substrat/ oTR Impfschlamm.....	163

Abkürzungsverzeichnis

µmax	maximale Wachstumsgeschwindigkeit
Abb.	Abbildung
ADP	Adenosindiphosphat
AMP	Adenosinmonophosphat
Ansyco	Analytische Systeme und Componenten GmbH
atm	physikalische Atmosphäre (Druckeinheit, 1 atm = 101,325 Pa = 1013,25 mbar)
ATP	Adenosintriphosphat
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BR	Raumbelastung
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
°C	Grad Celsius
d	Tag
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOC	gelöst organischer Kohlenstoff (dissolved organic carbon)
FAD	Flavin-Adenin-Dinucleotid
H ₂	Wasserstoff
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
IS	Impf Schlamm
l	Liter
max.	maximal
NAD	Nicotinamid-Adenin-Dinucleotid
NH ₃	Ammoniak
NI	Norm-Liter
Nml	Norm-Milliliter
oTR	organischer Trockenrückstand
pH ₂	Wasserstoffpartialdruck
pH	pH-Wert
ppm	parts per million
Tab.	Tabelle
TC	Gesamtkohlenstoff (total carbon)
TOC	gesamt organischer Kohlenstoff (total organic carbon)
TS	Trockensubstanz
u.a.	und andere
UASB	Kämpfer, 2001
UV	Ultraviolett (-Bestrahlung)
VR	Versuchsreihe
Wdh.	Wiederholung
z.B.	zum Beispiel