

Versuche zur Vergärung von dünnflüssigen, eiweißreichen Substraten unter Nutzung der ASBR-Technologie

Anja Gerbeth, Bernhard Gemende, Gunter Krauthelm,
Jürgen Pröter, Andreas von Bresinsky, Rüdiger Lange

1 Einleitung

Die Vergärung besonders dünnflüssiger Substrate (d. h. solchen mit Trockensubstanzgehalten von teilweise weniger als 1 Ma.-%) stellt besondere Ansprüche an die Prozessführung. Um trotz der geringen Raumbelastungen eine zufrieden stellende Biogasausbeute erreichen zu können, werden dabei Verfahren eingesetzt, die eine Biomasserückhaltung und -anreicherung im Reaktor gewährleisten. Ein solches Verfahren ist die so genannte ASBR (anaerobic sequencing batch reactor) -Technologie. Ein Beispiel für Substrate, bei denen sich der Einsatz dieser Technologie als vorteilhaft erweist, stellt der im Zuge der Abtrennung mittels Membrantechnik anfallende Überschuss-Biomasseschlamm – im Wesentlichen bestehend aus Mikroorganismen, die zur Wasserreinigung in der industriellen Fischzucht (Aquakultur-Kreislaufanlagen) eingesetzt werden – dar.

Die prinzipielle Eignung derartiger Substanzen zur Vergärung konnte in Batchversuchen im Labormaßstab mit mäßigen bis moderaten Biogasausbeuten (maximal 0,23 m³ i. N./kg organischer Trockensubstanz (oTS) bei einem Trockensubstanz(TS)-Gehalt von 0,8 Ma.-%) nachgewiesen werden (vgl. u. a. [GERBETH ET AL., 2005]).

Zusätzlich zu der Problematik der niedrigen Trockensubstanzgehalte konnten bereits bei diesen Versuchen weitere kritische Aspekte – insbesondere im Hinblick auf die potentielle Nutzung des entstehenden Biogases, aber auch auf die Stabilität des Gesamtprozesses – festgestellt werden. So wurden aufgrund der originären Zusammensetzung des Gärsubstrates (Anteil von über 40 % Rohprotein in der Trockenmasse) z. T. sehr hohe Schwefelwasserstoff-Konzentrationen im Biogas (in Einzelfällen deutlich über 1.000 ppm) festgestellt. Diese lassen einerseits Schwierigkeiten bei der potentiellen Nutzung des Gases, z. B. in Gasmotoren oder Blockheizkraftwerken, erwarten. Sie führen z. B. aufgrund der Bildung von Schwefel- oder schwefliger Säure zu Korrosionserscheinungen an Motor, Leitungen aber auch Betonbehältern, zur schnelleren Versäuerung des Motorenöls sowie zur Bildung von Schwefeldioxyden bei der Verbrennung des Biogases. Andererseits ist jedoch auch bekannt, dass überhöhte Schwefelwasserstoffgehalte mikrobiologische Prozesse hemmen können. [PESTA ET AL., 2004]. Es war daher zu prüfen, in wie weit die Bildung des Schwefelwasserstoffes durch geeignete Maßnahmen verhindert werden kann.

Im Folgenden werden die Ergebnisse ausgewählter Laborversuche zur Vergärung dünnflüssiger, eiweißreicher Bakterienbiomasseschlämme unter Einsatz der ASBR-Technologie (durchgeführt am IfE – Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig) vorgestellt sowie diese – insbesondere im Hinblick auf die Parameter Prozessstabilität und Qualität des erzeugten Biogases – diskutiert und bewertet.

2 Material und Methoden

2.1 ASBR-Technologie

Die Besonderheit der Prozessführung bei der ASBR-Technologie ist die zyklische Fahrweise des Reaktors. In Abb. 1 ist der Ablauf eines solchen Zyklus zusammenfassend dargestellt.

Der Zyklus beginnt mit dem Befüllen des Reaktors mit dem Substrat. Während der anschließenden Reaktionsphase wird der Reaktorinhalt intensiv durchmischt – meist gerührt. Die im Substrat enthaltenen verwertbaren organischen Bestandteile werden durch Mikroorganismen in Biogas umgewandelt. An diese Phase schließt sich die so genannte Sedimentationsphase an. Während dieser wird die Durchmischung des Substrates unterbrochen, die aktive Biomasse setzt sich ab. Begünstigt wird dies dadurch, dass diese in der Regel – stimuliert durch die zyklischen Schwankungen des Verhältnisses zwischen Substratangebot und im Reaktor vorherrschender Mikroorganismen-Konzentration – in Form von Granula oder ähnlichen sedimentierbaren Agglomeraten vorliegt. Der am Ende der Sedimentationsphase vorliegende geklärte Überstand wird schließlich aus dem Reaktor abgezogen. Während dieses Vorgangs muss – ebenso wie während des Füllzyklus – der Druckausgleich unter Sauerstoffabschluss realisiert werden.

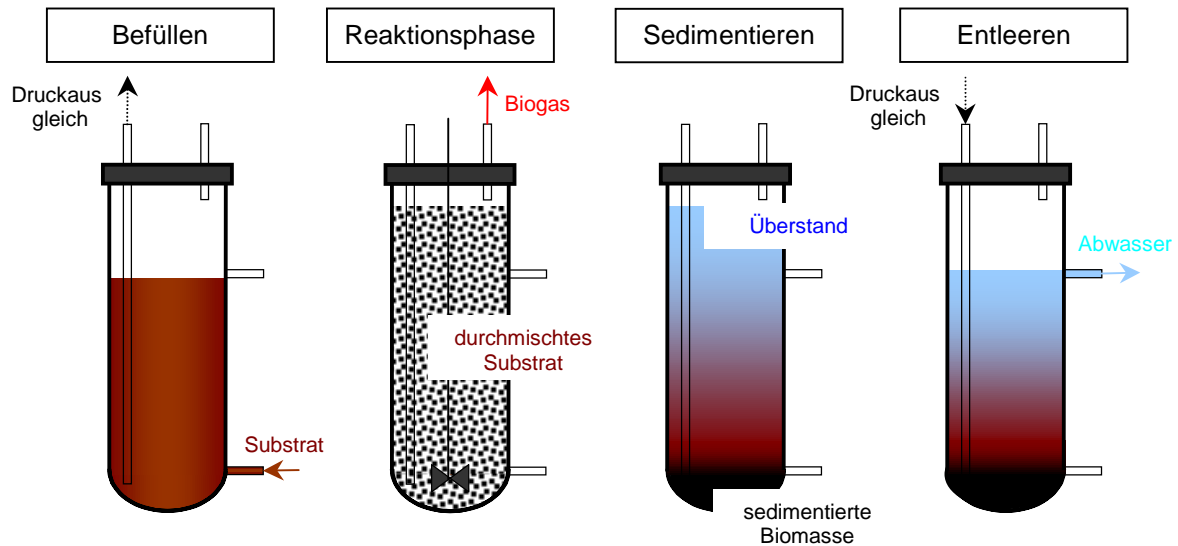


Abb. 1: Teilschritte im Ablauf eines Zyklus im ASB-Reaktor (u. a. nach [DAGUE ET AL., 1992])

Die ASBR-Technologie bietet – neben der effizienten Feststoffabtrennung und den hohen realisierbaren Biomasseverweilzeiten – Vorteile hinsichtlich einer einfachen Prozessführung, einer weitgehenden Unempfindlichkeit gegenüber stoßartigen Belastungen sowie insbesondere aufgrund der Ausnutzung des Gasbildungspotentiales der eingesetzten Substrate. [FICHTER, 2005], [PRÖTER, 2005]

2.2 Versuchsaufbau und verwendete Messtechnik

Für die im Folgenden dargestellten Versuche wurde ein doppelwandiger Glasfermenter mit einem Arbeitsvolumen von maximal 6,5 l (Labfors 3, Infors GmbH) eingesetzt. Die Steuerung des ASBR-Zyklus erfolgte automatisch, wobei folgende Zykluszeiten realisiert wurden:

- Befüllen/Entleeren (ohne Durchmischung): 3 Stunden
- Reaktionszeit (intensive Durchmischung des Fermenterinhaltens durch Rühren): 10 Stunden
- Sedimentationsphase (ohne Durchmischung): 11 Stunden

Die Substratvorlage wurde gekühlt und das Frischsubstrat ständig gerührt, um Inhomogenitäten bei der Zuführung zu vermeiden. Diese erfolgte simultan zur Abführung des flüssigen Gärrestes mit gleichem Volumenstrom, um konstante Druckverhältnisse im Fermenter aufrecht zu erhalten. Die Vergärung erfolgte im mesophilen Bereich bei einer Temperatur von 37 °C. Das Volumen des gebildeten Gases wurde mit Hilfe eines an einen Datenlogger angeschlossenen Durchflussmessgerätes (Milligascounter MGC-1, Dr.-Ing. Ritter Apparatebau GmbH & Co. KG) erfasst. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abb. 2 dargestellt.

Die Bestimmung der Zusammensetzung des gebildeten Biogases erfolgte in regelmäßigen Abständen. Zur Messung der Komponenten Methan, Kohlendioxid und Sauerstoff kam ein Gasmessgerät mit Infrarot- sowie elektrochemischen Sensoren (Gasanalyser GA 94, ansyco GmbH) zum Einsatz. Für die Ermittlung der Schwefelwasserstoff-Konzentration wurde ein Eingasmessgerät mit elektrochemischem Sensor (Single Gas Monitor Pac III, Dräger Safety AG) verwendet.

Im Fermenterzu- und -ablauf wurden außerdem die Parameter pH-Wert und Redoxpotential überwacht und es erfolgte in periodischen Abständen die Bestimmung der aktuellen Gehalte an Trockensubstanz, organischer Trockensubstanz sowie der organischen Säuren (Titration nach der Methode von KAPP).

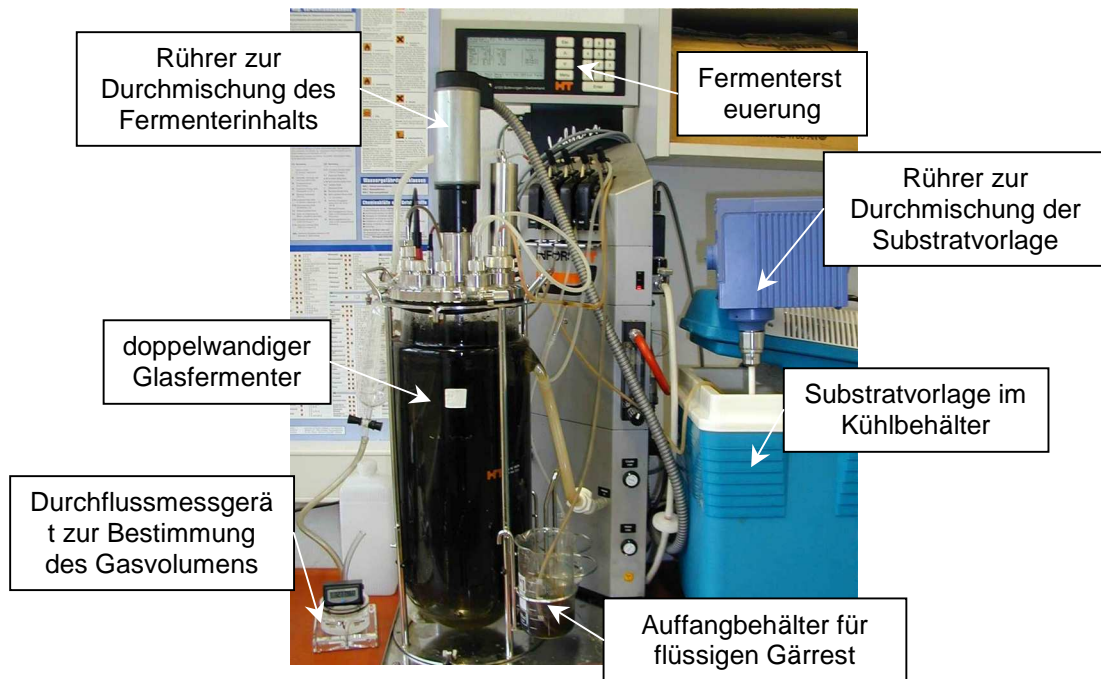


Abb. 2: Versuchsaufbau ASB-Reaktor am Institut für Energetik und Umwelt gGmbH

2.3 Charakterisierung des Ausgangsmaterials und Daten zur Versuchsdurchführung

Bei dem für die Versuche eingesetzten Substrat handelt es sich um Biomasseschlämme aus der industriellen Fischzucht. Sie bestehen im Wesentlichen aus den Mikroorganismen, die bei einem neuartigen Verfahren zur Reinigung von Wässern aus einer Aquakultur-Kreislaufanlage eingesetzt werden (siehe hierzu z. B. [PAUSCH ET AL., 2006]), sowie in geringerem Umfang aus weiteren partikulären Verunreinigungen (Fischkot, Reste von unverbrauchtem Futter etc.). Die Abtrennung dieser Schlämme erfolgte unter Einsatz von Mikrofiltrationsmembranen – im originären Zustand liegen sie daher mit einem TS-Gehalt von maximal ca. 1,5 Ma.-% vor. Tab. 1 fasst die wichtigsten Kenndaten für die beiden vorgestellten Versuche zusammen.

Tab. 1: Charakteristische Parameter des Ausgangssubstrats sowie Kenndaten der ASBR-Versuche

Parameter		Versuch 1	Versuch 2
Ausgangssubstrat	Trockensubstanzgehalt, TS (in Ma.-%)	0,5...0,6	0,4...0,6
	organischer Trockensubstanzgehalt (in Ma.-% von TS)	84...95	89...95
	pH-Wert	4,4...6,1	5,3...6,1
Gesamtfüllvolumen des Fermenters (in l)		6,5	6,0
Impf-/Start-Substrat		6,5 l aktive Lösung aus einem Fermentationsversuch (Substrat: gesiebte Schweinegülle)	5 l ausgefauter Klärschlamm und 1 l Biomasseschlamm aus Fischzuchtanlage
täglich zugeführtes Substratvolumen ¹		ab 1. Versuchstag: 0,35 l ab 7. Versuchstag: 0,70 l ab 15. Versuchstag: 1,05 l ab 45. Versuchstag: 0,525 l	während des gesamten Versuches: 0,3 l
pH-Wert-Regulierung ²		erst ab dem 43. Versuchstag	während des gesamten Versuches
sonstige Zugabestoffe		ab dem 27. Versuchstag tägliche Zugabe von 1,0 ml bzw. 0,75 ml des	tägliche Zugabe von 0,75 ml des Präparates Deuto-Clear Sulfo während des

	Präparates Deuto-Clear Sulfo	gesamten Versuches
--	------------------------------	--------------------

¹... entspricht dem täglich abgeführten Volumen flüssigen Gärrestes

²... Dosierung von 5%iger Natronlauge – Einstellung eines Ablauf-pH-Wertes von 7,8

Der Zugabestoff Deuto-Clear Sulfo ist ein Produkt der Firma Lukeneder Umweltschutz und Spezialpräparate. Es handelt sich um ein eisenhaltiges Präparat, dessen Zugabe zur Sulfidfällung im Fermenter führt. Dieser Vorgang stellt eine prinzipielle Möglichkeit zur Reduktion der Schwefelwasserstoff-Konzentration im gebildeten Biogas dar.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Versuch 1 – Variable Substratzuführungsvolumina und Verzicht auf pH-Wert-Regulierung

Bei Versuch 1, der insbesondere der Orientierung und Untersuchung der prinzipiellen Anwendbarkeit der ASBR-Technologie für die Vergärung der vorliegenden Substrate diente, wurde die tägliche Zu- und Ablaufmenge so gewählt, dass sich am Versuchsbeginn hydraulische Verweilzeiten von 18,6 Tagen (in den ersten 7 Versuchstagen) bzw. 9,3 Tagen ergaben. Ab dem 15. Versuchstag wurde die täglich ausgetauschte Substratmenge weiter erhöht und damit eine Verweilzeit von nur noch 6,2 Tagen eingestellt. Abb. 3 zeigt den Verlauf der Gasbildungsrate und des pH-Wertes in der ausgeschleusten Flüssigkeit während des Versuches, Abb. 4 die Methan- und Kohlendioxidanteile sowie Schwefelwasserstoffgehalte im Biogas an ausgewählten Versuchstagen.

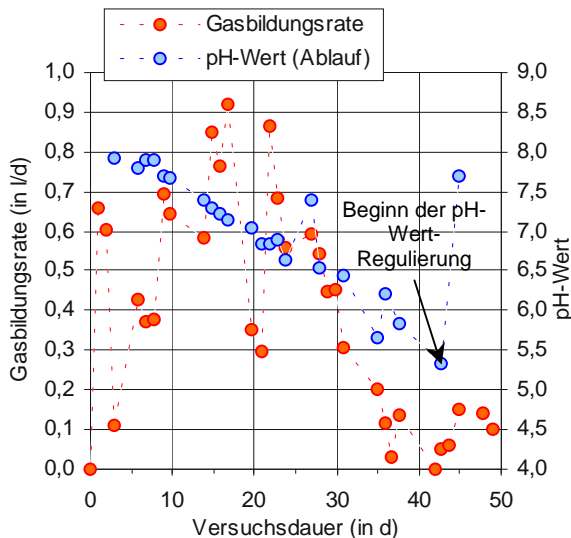


Abb. 3: Gasbildungsrate und pH-Wert im Fermenterablauf während Versuch 1

Abb. 4: Zusammensetzung des gebildeten Biogases für Versuch 1 (ausgewählte Versuchstage)

Die Gasbildungsrate schwankt in der Anfahrphase sehr stark. Dies ist ein durchaus übliches Phänomen – insbesondere bei kleinen Fermentern. Allerdings ist auffallend, dass die Gasbildung ab dem 22. Versuchstag stetig abnimmt und schließlich vollständig zum Erliegen kommt.

Dabei ist eine Korrelation mit der stetigen Abnahme des Ablauf-pH-Wertes festzustellen. Der relativ niedrige Ausgangs-pH-Wert des Substrates führt, in Zusammenhang mit einer durch die Verkürzung der hydraulischen Verweilzeit hervorgerufenen Überfütterung, zur Versäuerung des Fermentationsprozesses. D. h., durch das zu hohe Substratangebot kommt es zunächst zu einem starken Anstieg der Aktivität der hydrolisierenden und acidogenen Bakterien. Bei erschöpfter Pufferkapazität des während des Abbaus der organischen Substanz gleichzeitig gebildeten Kohlendioxids resultiert aus dem weiteren Absinken des pH-Wertes eine Hemmung der methanogenen Bakterien (diese benötigen unbedingt einen pH-Wert im Bereich zwischen 6,8 und 7,5 – vgl. [FNR, 2005]). Die gebildeten organischen Säuren werden nicht mehr abgebaut – ihre Anreicherung führt dazu, dass der pH-Wert stetig weiter absinkt und schließlich der Methanbildungsprozess vollständig zum Stillstand kommt. Eine Anhebung des pH-Wertes durch Zugabe von 5%iger Natronlauge zeigte, ebenso wie die Reduzierung der Substrat-Zugabemenge, nicht den gewünschten Erfolg, so dass der Versuch nach 49 Tagen schließlich abgebrochen wurde.

Ein weiterer deutlicher Hinweis für das Vorliegen einer – offensichtlich irreversiblen – Schädigung der methanogenen Bakterien ist die Veränderung der Zusammensetzung des Biogases während des Versuches (vgl. Abb. 4). Der gemessene Methangehalt sinkt mit zunehmender Versuchsdauer. Am 35. Versuchstag enthält das gebildete Biogas in etwa gleiche Volumenanteile von Kohlendioxid und Methan. Das in der Folge beobachtete weitere Ansteigen des Kohlendioxidgehaltes im Gas lässt den Schluss zu, dass sich im Fermenter Bedingungen der autotrophen Gärung einstellen [PRÖTER, 2005]. Nicht zweifelsfrei zu klären ist, in wie weit die hohen Schwefelwasserstoffgehalte (bis zu 4.000 ppm gemessen am 22. Versuchstag) im gebildeten Biogas die mikrobiologischen Prozesse zusätzlich hemmen. Nach erstmaliger Zugabe des eisenhaltigen Präparates Deuto-Clear Sulfo am 27. Versuchstag konnte jedoch die Reduktion der Schwefelwasserstoffgehalte auf Werte von im Mittel deutlich unter 500 ppm beobachtet werden.

3.2 Versuch 2 – Konstante Substratzuführungsvolumina, pH-Wert-Regulierung und Zugabe eines eisenhaltigen Präparates zur Senkung des Schwefelwasserstoffgehaltes

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurde im zweiten Versuch eine geringere tägliche Substratzuführung (hydraulische Verweilzeit von konstant 20 Tagen während des gesamten Versuches) realisiert. Gleichzeitig erfolgte ab dem Versuchsbeginn die Regulierung des pH-Wertes auf einen Wert von 7,8 und die Zugabe des eisenhaltigen Präparates Deuto-Clear Sulfo zur Unterdrückung der Bildung großer Mengen gasförmigen Schwefelwasserstoffes. Abb. 5 zeigt den Verlauf der Gasbildungsrate während des Versuches (die Unterbrechung resultiert aus einer Störung durch Luftentzug in das Fermentersystem, die beseitigt werden konnte), Abb. 6 die Methan- und Kohlendioxidanteile sowie Schwefelwasserstoffgehalte im Biogas an ausgewählten Versuchstagen.

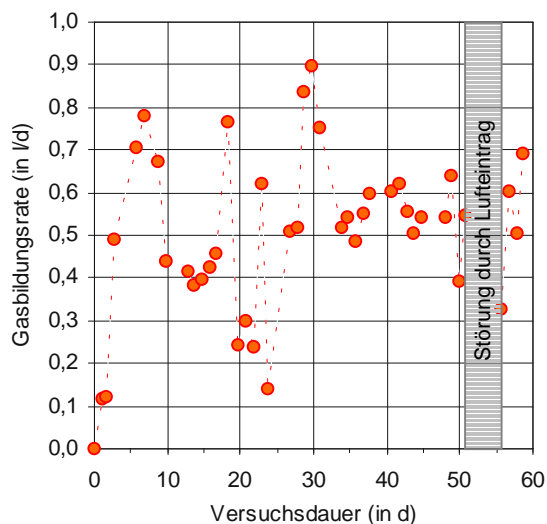


Abb. 5: Gasbildungsrate während Versuch 2

Abb. 6: Zusammensetzung des gebildeten Biogases für Versuch 2 (ausgewählte Versuchstage)

Auch hier schwanken die Gasbildungsraten in der Anfahrphase (etwa bis zum 30. Versuchstag) sehr stark – sie stabilisieren sich danach jedoch auf einen Wert von ca. 0,55 l/d (entspricht 0,48 l i. N./d). Die Störung am 51. Versuchstag führte zum vollständigen Erliegen der Methanproduktion, nach deren Beseitigung jedoch eine relativ schnelle Restabilisierung des Prozesses beobachtet werden konnte. Während des Versuches wurde bei einer Raumbelastung von im Mittel 0,24 g oTS/(l Fermentervolumen * d) eine spezifische Biogasausbeute von 0,34 l i. N./g oTS erreicht.

Die Methangehalte im Biogas erreichen bereits nach einer kurzen Anlaufphase Werte von über 70 Vol.-%. Die am 58. und 59. Versuchstag ermittelten Methananteile zeigen ebenfalls, dass sich der Prozess nach Beseitigung der eingetretenen Störung schnell wieder stabilisierte. Die Schwefelwasserstoffgehalte konnten durch Zugabe des Präparates Deuto-Clear Sulfo auf Werte unter 0,008 Vol.-% (im Mittel sogar auf weniger als 20 ppm) verringert werden.

4 Zusammenfassung

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich die ASBR-Technologie als Verfahren für die Vergärung dünnflüssiger, eiweißreicher Biomasseschlämme – wie sie z. B. in der industriellen Fischzucht anfallen – geeignet ist. Bei stabilem Prozessverlauf (Versuch 2) wurde eine Biogasausbeute von im Mittel $0,34 \text{ m}^3 \text{ i. N./kg oTS}$ bei einer hydraulischen Verweilzeit des Substrates von 20 Tagen erreicht. Diese liegt im Bereich der in verschiedenen Quellen angegebenen Ausbeuten für die Vergärung von Gülle oder auch diversen Schlempen (vgl. u. a. [FNR, 2005], [BAYLFU, 2004]). Die Methangehalte im erzeugten Biogas stabilisierten sich auf einen Wert von 73 Vol.-%. In Bezug auf den Heizwert (bei einem Methananteil von 70 Vol.-% beträgt dieser ca. 7 kWh/m^3 [PLÖCHL, 2003]) ist die Gasqualität daher als sehr gut einzustufen.

Als problematisch erwies sich – neben der starken Neigung des Substrates zur Versäuerung, der mit einer pH-Wert-Regulierung entgegengewirkt werden konnte – der hohe Schwefelwasserstoffgehalt im gebildeten Biogas. Durch die Zugabe eines eisenhaltigen Präparates konnte dieser erfolgreich reduziert werden. Die Verlagerung des Schwefelaustrages in den Gärrest ist insofern relativ unproblematisch, als dass bei dessen weiterer Nutzung, z. B. in der Landwirtschaft (sofern dieser nicht andere Inhaltsstoffe, wie angereicherte Schwermetalle o. ä., entgegenstehen) das enthaltene Eisensulfid einen Eisen-Schwefel-Depotdünger darstellt. Die erreichten stabilen Schwefelwasserstoffgehalte unter 80 ppm liegen deutlich niedriger als die von den Herstellern von Blockheizkraftwerken geforderten Grenzgehalte von $\leq 0,15 \text{ Vol.-%}$ [FNR, 2005].

Es ist jedoch anzumerken, dass die im Rahmen der Versuche erreichten Schwefelwasserstoffgehalte für sensiblere Anwendungsfälle noch nicht ausreichend niedrig sind. Gegenwärtig werden an der WHZ z. B. Untersuchungen zum Einsatz von Biogas in Hochtemperatur-Brennstoffzellen (SOFC) durchgeführt (hier werden Gesamtschwefel-Grenzwerte unter 1 ppm angegeben – vgl. dazu u. a. [OTT ET AL., 2003]). Die aktuellen Versuche konzentrieren sich daher insbesondere auf die Entwicklung, den Vergleich und die Optimierung verschiedener Verfahren zur Entschwefelung von Biogas.

5 Danksagung

Die beschriebenen Arbeiten und Ergebnisse sind Bestandteil des durch die Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft geförderten Projektes „Entfeuchtung und Verwertung von entwässelter mikrobieller Biomasse aus Kreislaufwasser von Fischzuchtanlagen“ (Förderkennzeichen 1-67-000-0101-14-2004-59-2). Bedanken möchten wir uns an dieser Stelle insbesondere bei der Projektbegleiterin Frau Ulrike Bobach.

Unser besonderer Dank gilt den MitarbeiterInnen des Instituts für Energetik und Umwelt gGmbH für die Durchführung der Versuche, die Bereitstellung des Datenmaterials sowie für die Anregungen und die ständige Diskussionsbereitschaft.

6 Literatur

- BAYLFU – BAYRISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (HRSG.): Biogashandbuch Bayern – Materialienband. Augsburg: LfU-Onlineveröffentlichung, Dezember 2004.
- DAGUE, R. R.; HABBEN, C. E.; PIDAPARTI, S. R.: Initial Studies on the Anaerobic Sequencing Batch Reactor. *Water Science Technology* **26** (No. 9-11), S. 2429-2432; 1992.
- FICHTER, E.: Untersuchungen zur Hochleistungsfermentation mittels anaerober SBR-Verfahren in Kombination mit Trägerkörpern. Diplomarbeit, Leipzig, 2005.
- FNR – FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (HRSG.): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. Gülzow, 2005.
- GERBETH, A.; GEMENDE, B.; PAUSCH, N.; KRAUTHEIM, G.; PRÖTER, J.; VON BRESINSKY, A.; LANGE, R.: Versuche zur Biogasgewinnung und Verwertung von Biomassen aus einer Fischzuchtanlage. Vortrag EU Sokrates Intensiv-Programm „Distributed Power Systems“, Pernink; 23.-27.05.2005.
- OTT, M.; TAMM, D.: Anforderungen beim Einsatz von Biogas in Brennstoffzellen. Gülzower Fachgespräch: Workshop „Aufbereitung von Biogas“, Braunschweig 17.-18.06.2003.
- PAUSCH, N.; GERBETH, A.; GEMENDE, B.; VEIT, M.; KEMBOLO, K.; VON BRESINSKY, A.; MÜLLER, R. H.: Untersuchungen zum Prozessverhalten eines neuen Verfahrens zur Wasserreinigung in der Intensivfischzucht. Vortrag EU Sokrates Intensiv-Programm „Distributed Power Generation Systems“, Pernink; 22.-26.05.2006.

PESTA, G.; RUß, W.: Die zuverlässige Reinigung von Biogas – Verfahren und Lösungsansätze. Fachtagung der Regierung von Niederbayern und der Fachhochschule Deggendorf „Innovationen in der Biogastechnologie“, Deggendorf, 02.12.2004.

PLÖCHL, M.: Technische Nutzung von Biogas. aus: MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, UMWELTSCHUTZ UND RAUMORDNUNG BRANDENBURG (HRSG.): Biogas in der Landwirtschaft. Potsdam, 2003.

PRÖTER, J.: Kontinuierlicher Vergärungsversuch von Biomasse aus der Aufbereitung von Kreislaufwässern aus der Fischzucht. Kurzbericht, Leipzig, 2005.

7 Adressen der Autoren

Dipl.-Ing. (FH) Anja Gerbeth, Prof. Dr.-Ing. Bernhard Gemende, Prof. Dr. rer. nat. habil. Gunter Krautheim

Westfälische Hochschule Zwickau, Fachbereich Physikalische Technik/Informatik

Postfach 201037, D-08012 Zwickau

Telefon: +49-375/536-1787 (1501); Fax: 1503; E-Mail: bernhard.gemende@fh-zwickau.de

Dr.-Ing. Jürgen Pröter

Institut für Energetik und Umwelt gGmbH

Torgauer Str. 116, D-04347 Leipzig

Telefon: +49-341/2434-517; E-Mail: juergen.proeter@ie-leipzig.de

Andreas von Bresinsky

Fischwirtschaftsbetrieb Andreas von Bresinsky

Thomas-Müntzer-Str. 6, D-04579 Oelzschau

Telefon: +49-34347/81679, Fax: 81701; E-Mail: a.v.bresinsky@arcor.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Rüdiger Lange

Technische Universität Dresden, Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik

D-01062 Dresden

Telefon: +49-351/436-35181, Fax: 37057; E-Mail: ruediger.lange@tu-dresden.de