

LANDTECHNIK

AGRICULTURAL ENGINEERING

65. Jahrgang

3.2010

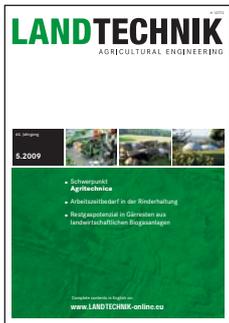


- Schwerpunkt **Traktoren**
- Schaumbildung und -bekämpfung im Prozess der anaeroben Gärung
- comRoBS – Flexible Forschungsplattform für den kooperativen Maschinenbetrieb

Contents in English on:

www.LANDTECHNIK-online.eu

Das Wissenschaftsjournal für die Agrartechnik



LANDTECHNIK AGRICULTURAL ENGINEERING

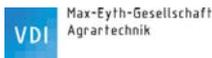
Die LANDTECHNIK ist die agrartechnische Zeitschrift auf wissenschaftlichem Niveau für den deutschsprachigen Raum. Renommierte Autoren und aufstrebende Nachwuchskräfte aus den Forschungs- und Entwicklungsabteilungen wissenschaftlicher Institute und landtechnischer Herstellerfirmen finden hier eine fundierte Plattform für ihre Fachbeiträge. Hier werden aktuelle Themengebiete und Trends aufgezeigt und zur Diskussion gestellt. Inhaltlich sind alle relevanten landtechnischen Bereiche vertreten.

Die Leser der LANDTECHNIK sind hauptsächlich Führungskräfte aus Wissenschaft, Industrie, Verbänden, Beratung, Praxis und Verwaltung. Die Zeitschrift erreicht als zweisprachige Version im Internet Fachleute in Deutschland, Europa und weltweit.

Printausgabe und Online-Portal gehören zusammen.

Abonnieren Sie die Zeitschrift und nutzen Sie gleichzeitig das Online-Portal der Landtechnik.

Herausgeber



Bitte beachten Sie, dass die Printausgabe der Zeitschrift ausschließlich auf deutsch erhältlich ist.

Redaktion

Gernot Raiser

Tel.: +49 6151 7001-127

E-Mail: landtechnik@ktbl.de

Abonnementservice

Bartningstraße 49

64289 Darmstadt

Tel.: +49 6151 7001-119

Fax: +49 6151 7001-123

E-Mail: abonnement@ktbl.de

Abonnement

Kombi-Jahresabonnement

Ein Kombi-Jahresabonnement der LANDTECHNIK (6 Printausgaben und die Online-Version) kostet

162,60 Euro im Inland, 165,- Euro im Ausland (einfacher Postweg).

Die Mindestlaufzeit für ein Abonnement beträgt 12 Kalendermonate (Bezugsjahr) und verlängert sich automatisch um ein weiteres Bezugsjahr; eine Kündigung ist jeweils zum Ende eines Bezugsjahres unter Einhaltung einer Frist von 2 Wochen möglich.

Alle Preise inklusive der gesetzlichen Mehrwertsteuer.

Probe-Abonnement

Ein Probe-Abonnement der LANDTECHNIK (2 Printausgaben) kostet 35,- Euro im Inland,

37,- Euro (einfacher Postweg) im Ausland.

Das Probe-Abonnement endet automatisch.

Alle Preise inklusive der gesetzlichen Mehrwertsteuer.

Studenten-Abonnement

Ein Studenten-Jahresabonnement der LANDTECHNIK (6 Printausgaben und die Online-Version) kostet 81,30 Euro im Inland, 82,50 Euro im Ausland (einfacher Postweg). Bitte schicken Sie uns eine Kopie Ihres Studentenausweises.

Die Mindestlaufzeit für ein Studenten-Abonnement beträgt 12 Kalendermonate (Bezugsjahr) und verlängert sich automatisch um ein weiteres Bezugsjahr; eine Kündigung ist jeweils zum Ende eines Bezugsjahres unter Einhaltung einer Frist von 2 Wochen möglich.

Alle Preise inklusive der gesetzlichen Mehrwertsteuer.

LANDTECHNIK

Das neue Wissenschaftsportal
für die Agrartechnik

Lucie Moeller, Carsten Herbes, Roland A. Müller und Andreas Zehnsdorf

Schaumbildung und -bekämpfung im Prozess der anaeroben Gärung

Prozessstörungen bei der Biogaserzeugung durch unkontrollierte Schaumbildung können die Wirtschaftlichkeit der Anlagen deutlich verschlechtern. Die Ursachen übermäßigen Schäumens in Biogasanlagen sind im Detail jedoch weitgehend unerforscht. Um die Schaumbildung perspektivisch kontrolliert zu vermeiden, wurde ein Projekt zur Erforschung der Ursachen gestartet.

Schlüsselwörter

Biogas, Schaum, anaerobe Vergärung, Betriebsprobleme

Keywords

Biogas, foam, anaerobic digestion, operational problems

Abstract

Moeller, Lucie; Herbes, Carsten; Müller, Roland A. and Zehnsdorf, Andreas

Formation and removal of foam in the process of anaerobic digestion

Landtechnik 65 (2010), no. 3, pp. 204-207, 2 figures, 24 references

Process upsets in biogas production which are induced by unregulated foam formation can have a negative impact on the efficiency of biogas plants. However, the causes of excessive foam formation in the biogas production process have not yet been researched in detail. A new research project on the controlled avoidance of foaming was started, which investigates the causes of foam formation in biogas plants.

■ Durch die Förderung von erneuerbaren Energien wurden in Deutschland im letzten Jahrzehnt viele Biogasanlagen in Betrieb genommen. Biogas kann sehr vielfältig genutzt werden. Es eignet sich gut im Energiemix der erneuerbaren Energieträger und ist nach Aufbereitung auch für die Nutzung als Kraftstoff oder für die Wärmeerzeugung einsetzbar. Weil die Biogasanlagen oft an der Grenze der Wirtschaftlichkeit arbeiten, können technische Probleme und Prozessstörungen, die mit längeren Ausfallzeiten bzw. Reparaturkosten verbunden sind,

für den Betreiber einer Biogasanlage ernsthafte ökonomische Folgen haben. Eine Untersuchung in 10 ausgewählten Anlagen in Mecklenburg-Vorpommern zeigte, dass zu den häufigsten Störungen des Biogasprozesses die Schaumbildung im Reaktor zählt [1] (**Abbildungen 1 und 2**). Auch die Amerikanische Gesellschaft der Bauingenieure stellte fest, dass für die Betreiber von Kläranlagen die Schaumentstehung in Faultürmen das hartnäckigste Betriebsproblem darstellt [2]. Im Bundesmessprogramm wird ebenfalls von Schaumproblemen berichtet [3]. Daher ist es wichtig, nach den Ursachen und nach geeigneten Vorbeugungs- bzw. Bekämpfungsmöglichkeiten der Schaumentstehung zu suchen.

Ursachen der Schaumbildung bei anaerober Gärung

Die Erfahrungen der Biogasanlagenbetreiber zeigen, dass Probleme mit der Schaumbildung häufig durch die Verwendung mangelhafter Substrate hervorgerufen werden, aber auch während des Anfahrprozesses und bei schneller Steigerung des Getreideeinsatzes auftreten. Außerdem kann eine starke Schaumbildung ein Indikator für einen nicht-optimalen Betriebszustand bzw. eine ungeeignete Betriebsführung sein.

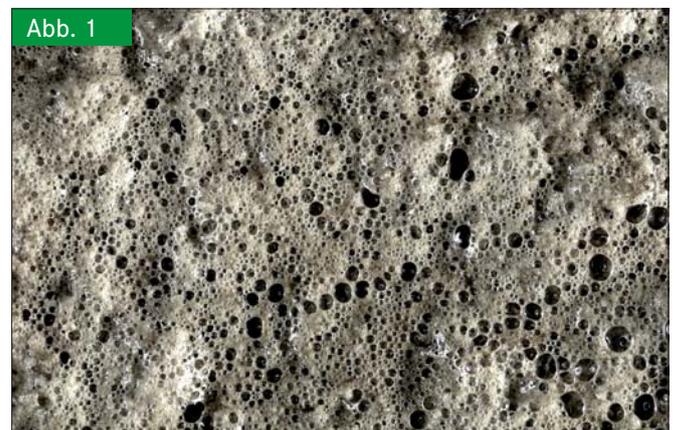
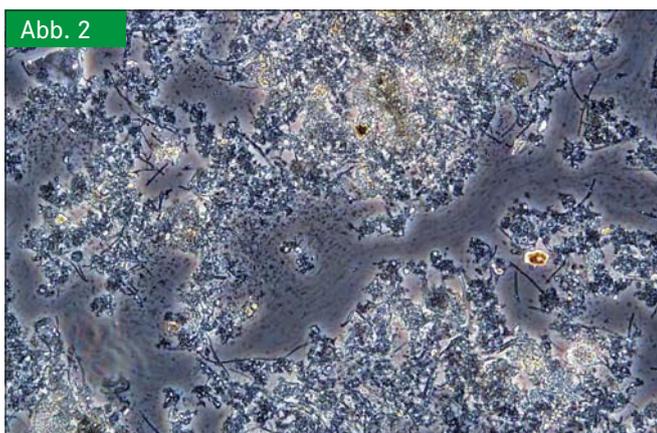


Abb. 1

Schaum kann auch in Biogasanlagen zum Problem werden.

Foto: A. Künzelmann, UFZ

Fig. 1: Foam can be a problem in biogas plants.



Mikroskopische Aufnahme von Schaum aus einer Biogasanlage.

Foto: L. Moeller, UFZ

Fig. 2: Microscope image of foam in a biogas plant.

Eine bedeutende Rolle bei der Schaumentstehung spielen Proteine. Diese sind in der Gärflüssigkeit als gelöste mikrobielle Produkte oder in Form von extrazellulären Polymeren, die an Feststoffe gebunden sind, bereits von Anfang an vorhanden [4]. Außerdem werden Proteine auch mit Substraten in den Gärprozess eingetragen. Substrate mit hohem Eiweißanteil sind z. B. Getreide, Klee gras oder Hühnermist [5]. Durch den Proteinabbau im Biogasfermenter entsteht Ammonium, das auf den Biogasbildungsprozess hemmend wirken kann und dadurch die Schaumentstehung unterstützt. Das Ammonium steht im Dissoziationsgleichgewicht mit Ammoniak, das als starkes Zellgift wirkt. Die Verschiebung des Gleichgewichts in Richtung Ammoniak hängt u. a. mit der Erhöhung der Temperatur und/oder des pH-Wertes zusammen [5].

Die Unterstützung der Schaumbildung durch hohe Stickstoffkonzentrationen wurde in Anlagen beobachtet, die zum Anmischen der Substrate Rezirkulat verwenden. Durch die ständige Rückführung von Gärrest in den Prozess kommt es allmählich zur Anreicherung von Stickstoffverbindungen [1].

Der Einfluss von Kohlenhydraten und Lipiden auf die Schaumbildung ist weniger markant als der von Proteinen. Ein Grund dafür ist u. a. ihre leichtere Abbaubarkeit. Lipide tendieren aufgrund ihrer hydrophoben Natur dazu, zur Oberfläche aufzusteigen. Dort scheiden sie sich vom Wasser ab und tragen zur Stabilität des Schaums bei, indem sie sich an Feststoffe anheften [4]. In der Gärflüssigkeit werden Lipide, die dort meistens als Öle oder Fette vorkommen, in ihre Bestandteile – Glycerin und Fettsäuren – hydrolysiert. Die entstandenen Fettsäuren werden weiter abgebaut und bis zum Methan umgesetzt. Als Zwischenprodukte entstehen in diesem Prozess auch flüchtige organische Säuren, die ebenfalls mit der Schaumbildung im Zusammenhang gebracht werden [6]. Den größten Anteil der produzierten Säuren stellt meistens die Essigsäure (Acetat) dar, die in der Literatur am häufigsten im Vergleich mit anderen organischen Säuren in Verbindung mit Schäumen genannt wird [2]. Aktuelle Ergebnisse zeigen, dass die Konzentration der flüchtigen Fettsäuren offensichtlich anlagenspezifisch ist und von der Betriebsführung der Biogas-

anlage abhängen. Während für die in der Abwasserreinigung eingesetzten Hochleistungsreaktoren eher geringe Acetatkonzentrationen typisch sind, wurden in Ansätzen mit Maissilage im Monobetrieb bis zu 3 g/L Essigsäure gemessen [7]. Obwohl die flüchtigen Fettsäuren oberflächenaktiv sind, ist umstritten, ob ihre Anwesenheit im Biogasreaktor eher Ursache oder Folge der Unausgewogenheit des Gärprozesses ist, die sich dann im Schäumen offenbart. Ihre Anreicherung in der Gärflüssigkeit widerspiegelt die kinetische Entkoppelung zwischen den Säureproduzenten und -konsumenten und ist typisch für eine Stresssituation [2]. Diese kann verschiedene Ursachen haben, wie z. B. organische Überbelastung des Systems bzw. übermäßige Dosierung leicht abbaubarer Co-Substrate (z. B. Obst- und Gemüseabfälle) [8].

Zur Schaumbildung und zur Instabilität des Gärprozesses können auch Stoffwechselprodukte der Schimmelpilze, sogenannte Mykotoxine, beitragen, die durch mangelhaftes Silieren in Maissilage vorkommen können [9]. Für Fusariensporen wurde allerdings gezeigt, dass diese durch Biogasanlagen unschädlich gemacht werden und keine negative Wirkung auf den Prozess der anaeroben Gärung haben [10].

Im Gegensatz dazu wird die Anwesenheit von fadenförmigen Mikroorganismen sehr häufig mit Schaumbildung in Verbindung gebracht, vor allem im Fall der anaeroben Stabilisierung des Klärschlammes bei Abwasserbehandlung. Zu den Schaumverursachern gehören vor allem die Bakterienarten *Microthrix parvicella* und *Nostocoida limicola*. Die Hydrophobizität der Zelloberfläche begünstigt die Schaumbildung, indem sich Gasbläschen in den Fadenstrukturen einlagern und der Schlamm flotiert [11]. Die im Schlamm des Faulbehälters gefundenen dominanten fadenförmigen Mikroorganismen kommen auch im Belebtschlamm und im Schaum der aeroben Stufe vor. Daraus folgt, dass das Ausfäulen des Sekundärschlammes aus der aeroben Stufe der Kläranlagen zu einer Anreicherung fädiger Mikroorganismen in Faulbehältern führt [12]. Wie Herzberg und Houy [13] berichteten, führte im Fall der Kläranlage in Meldorf (Schleswig-Holstein) das Auftreten dieser Mikroorganismen mehrmals zu einem Übersäumen des Faulbehälters und zu Problemen bei der Gasverwertung. Die Schaumentwicklung war teilweise so stark, dass bis zu einem Drittel des gesamten Faulturminhalts austrat und sich über die Gebäude und das Gelände der Kläranlage verteilte.

Thermophil betriebene Faultürme zeigen ein geringeres Risiko der Schaumbildung, die aus der Anwesenheit von fadenförmigen Mikroorganismen resultiert. Mikrobiologische Untersuchungen des Klärschlammes zeigten eine effizientere Zerstörung der Filamente in der thermophilen Behandlung und dadurch auch ein geringeres Schaumbildungspotenzial [14].

Außer den mit dem Substrat eingetragenen Faktoren spielt für die Schaumbildung auch die Betriebsführung eine erhebliche Rolle. Wird beispielsweise das Dosierintervall sehr lang gewählt, muss das Substrat in entsprechend großen Mengen zugeführt werden. Hohe Beschickungsraten von über 4 kg oTS/m³ verursachen eine starke Überlastung des Prozesses [15]. In der

Folge kann es zur Anreicherung von Neben- bzw. Abbauprodukten mit hydrophoben oder oberflächenaktiven Eigenschaften kommen, z. B. flüchtige organische Säuren, wodurch die Mikroorganismen überlastet werden. Dies kann eine starke Schaumbildung verursachen [4; 16]. Es wird empfohlen, vor allem leicht abbaubares Material in häufigere Gaben von kleineren Chargen zu verteilen und mit anderen Co-Substraten zu kombinieren oder durch Zugabe von alkalischen Puffern zu stabilisieren [5; 17].

Schaumprobleme wurden sehr häufig im Anfahrprozess beobachtet. Die Ursachen hierfür sind allerdings noch unklar.

Die Schaumbildung hängt auch mit ungeeigneten Heiz- und Umwälzeinrichtungen zusammen. Wird das Heizsystem falsch dimensioniert und betrieben, kann der unzureichende Wärmeübergang in Verbindung mit ungenügender Durchmischung des Reaktorinhaltes ebenfalls zum Schäumen führen [18]. Starkes Rühren kann auch eine starke Schaumbildung verursachen, da Sinkschichten aufgerührt werden und/oder eine Instabilität des Prozesses durch Störung mikrobieller Strukturen hervorgerufen wird [8; 19].

Die Schaumbildung kann also viele unterschiedliche Ursachen haben. Da nur wenige Anlagen über umfangreiche Messtechnik zur Prozessüberwachung verfügen, bleiben diese Ursachen aber häufig unbekannt [1].

Folgen der übermäßigen Schaumbildung

Die schaumbedingten Probleme in Biogasreaktoren reichen von Krustenbildung an der Reaktorwand, dem Ausfall von Schiebern, der Verschmutzung und Verstopfung der Gas- bzw. Kondensatleitungen und der Rezirkulatspumpe aufgrund der Zurückhaltung der Schaumfeststoffe bis hin zum Übersäumen und kompletten Stillstand der Anlage [4; 18; 20]. Des Weiteren treten Probleme mit der Prozesssteuerung im Gärbehälter auf, die Messsonden werden durch den Schaum gestört. Schäumen kann auch zu einem umgekehrten Feststoffprofil mit höheren Feststoffkonzentrationen im oberen Teil des Reaktors und zur Reduzierung des aktiven Volumens des Gärbehälters führen, sodass es zur Verkürzung der Faulzeit kommt [4; 21]. Bei starker Schaumbildung verschlechtert sich ebenfalls der Mischzustand im Medium. Dadurch werden die Mikroorganismen in der Schaumphase nicht ausreichend mit Nährstoffen versorgt, womit die Effizienz der Biogasbildung beeinträchtigt wird [22].

Die ökonomischen Folgen, die aus Energieverlusten, zusätzlichen Arbeitsstunden und Reinigungskosten entstehen, stellen eine bedeutende Belastung für den Betreiber dar [6; 20, 23]. Westlund et al. [6] beschrieben ein zehnwöchiges Schaumereignis im Frühjahr 1996 in der Stufe der anaeroben Gärung einer schwedischen Kläranlage, die 2000 m³/d Biogas produziert. Das Schaumproblem führte zur Reduktion der Gasproduktion um 40 %. Durch die Minderung der Elektrizitätsproduktion, zusätzliche Personalkosten, erhöhten Ölverbrauch und Polymernutzung in der Entwässerungsphase wurde der Gesamtschaden auf 150 000 US-Dollar beziffert.

Darüber hinaus erfordert der Schutz vor den Folgen der Schaumbildung zusätzliche teure Anlagenteile und Messtechnik, wie z. B. Schaumsensoren, Schaumfallen und Dosiereinrichtungen für Antischaummittel.

Maßnahmen zur Schaumbekämpfung

Die Schaumbekämpfung sollte bereits bei der Planung einer Biogasanlage berücksichtigt werden. Durch verschiedene bauliche Maßnahmen kann dazu beigetragen werden, die Wahrscheinlichkeit einer Schaumbildung zu minimieren. Zu den Möglichkeiten solch einer Vermeidung von Schaum gehören z. B. die Beachtung der Strömungsführung in der Anlage und die Vermeidung von Reaktorteilen, die die Bewegung des Mediums behindern und Strömungen oder Aufwirbelungen an der Oberfläche des Reaktors verursachen. Darüber hinaus können rotierende Einbauten installiert werden, die den Schaum einer Scherbeanspruchung aussetzen. Ihre Installation im Gärbehälter führt aber natürlich auch zur Erhöhung der Investitionskosten. Dazu sind diese Vorrichtungen allein nicht vollkommen effektiv, ihre Wirkung wird mit gleichzeitiger Verwendung von chemischen Antischaummitteln in möglichst niedrigen Konzentrationen verbessert [22].

Weiterhin ist vor allem in der Anfahrphase, aber auch im laufenden Betrieb, durch angemessenes Nachdosieren des Substrats die Überfütterung zu vermeiden, die zu Prozessproblemen führen kann. Deshalb sollte bei der Inbetriebnahme und bei der Wartung einer Biogasanlage genügend Zeit eingeplant werden, um durch moderates Anfahren Prozessstörungen weitestgehend zu vermeiden. Ist bereits Schaum aufgetreten, können eine Reduzierung oder gar eine Aussetzung der Substratzufuhr sowie die Minimierung der Rührintensität helfen, den Prozess zu stabilisieren.

Die Methoden der Schaumzerstörung, die in der biotechnologischen Praxis genutzt werden, werden in physikalische (thermische und mechanische) und chemische Verfahren unterteilt. Mit diesen Methoden werden in der Regel nicht die eigentlichen Ursachen des Schäumens bekämpft, sondern dessen Wirkung minimiert [21].

Die thermische Schaumbekämpfung wird mithilfe von Erwärmung durch Kontakt mit Heizflächen oder Dampf erreicht. Diese universelle Methode ist jedoch wegen des hohen Energiebedarfs für die Anwendung in Biogasanlagen weniger geeignet.

Die mechanische Zerstörung des Schaums wird u. a. mithilfe von bereits erwähnten rotierenden Einbauten erreicht. Für die Bekämpfung von fadenförmigen Mikroorganismen wurde mit Erfolg eine Ultraschall-Desintegration eingesetzt [11; 13]. Dabei werden die Schaum verursachenden Fäden aufgespalten bzw. zerstört. Beim Zellaufschluss wird der Schlamm verflüssigt, sodass dieser für die Schlamm abbauenden Mikroorganismen besser verfügbar ist [13]. Hinzu kommt, dass eine Ultraschall-Behandlung schwer abbaubare Strukturstoffe aufschließen und dadurch für Bakterien besser zugänglich machen kann [5]. So werden der anaerobe Abbau und die Bakterienleistung unterstützt.

Barjenbruch et al. [23] untersuchten die Auswirkung der mechanischen und thermischen Vorbehandlung des Überschussschlammes auf das Schaumbildungspotenzial im Faulturm. Während die mechanische Desintegration des Schlammes mithilfe eines Hochdruckhomogenisators nur eine minimale Reduktion der Schaumphase verursachte, wurde mithilfe der thermischen Vorbehandlung des Klärschlammes bei 121 °C dem Schaum im Faulturm effektiv vorgebeugt. Alle diese Maßnahmen müssen im Einzelfall auf ihre Effizienz und Wirtschaftlichkeit überprüft werden.

Die chemische Schaumbekämpfung beruht auf der Zugabe von Chemikalien in den Reaktorinhalt. Diese Methode ist sehr wirkungsvoll, doch bei der Auswahl des Antischaummittels ist höchste Vorsicht geboten. Es ist bekannt, dass die Nutzung bestimmter Antischaummitteln die Biologie des Gärprozesses stört. Es muss darauf geachtet werden, dass der eingesetzte Entschäumer silikonfrei ist, da es sonst im Biogas zur Bildung von Siloxan kommt. Das kann bei der Verbrennung des Gases zum Verschleiß im Motor durch Siliziumablagerungen führen [24].

Westlund et al. [6] benutzten in Faultürmen der Abwasseraufbereitungsanlage in der Nähe von Stockholm im Kampf gegen mikrobiell (*M. parvicella*) verursachten Schaum mit Erfolg Polyaluminiumsalze (PAX-21). Mit gutem Erfolg werden auch Naturöle, aus Triglyceriden und freien Fettsäuren bestehende organische Stoffe, als Antischaummittel genutzt. Ihr Vorteil gegenüber anderen chemischen Antischaummitteln ist, dass sie einfach erhältlich sind, mikrobiell umgesetzt werden und deswegen die Biogasausbeute erhöhen können [22].

Es ist jedoch notwendig, eine ökonomische Bewertung des jeweiligen Antischaummittels vor seinem Einsatz im Gärprozess durchzuführen. Dabei sind die eingesetzte Menge und deren Effektivität in Schaumzerstörung zu berücksichtigen. Es muss auch darauf geachtet werden, dass die richtige Konzentration des Antischaummittels genutzt wird, denn zu niedrige oder zu hohe Konzentrationen können zur Stabilisierung des bereits existierenden Schaums beitragen [22].

Schlussfolgerungen

Bei der Schaumentstehung und -bekämpfung in Biogasanlagen sind noch viele Fragen zu beantworten. Aus diesem Grund wurde ein Projekt zur Erforschung der Ursachen der Schaumbildung in Biogasanlagen gestartet. Ein Schwerpunkt der Arbeiten ist ein verbessertes Prozessverständnis, mit dem Ziel, zu ermitteln, wann und warum ein biologischer Prozess zum Schäumen neigt und welche Anzeichen dem Auftreten der Schaumbildung vorausgehen. Der Schaumentstehung soll gezielt entgegenge wirkt werden. Darauf aufbauend sollen Strategien zur Schaumvermeidung erarbeitet und in die Praxis überführt werden.

Literatur

- Bücher sind durch ● gekennzeichnet
- [1] ● Schumann, W. und A. Gurgel: Schwachstellenanalyse an ausgewählten Biogasanlagen in Mecklenburg-Vorpommern. In: 1. Rostocker Bioenergieforum. Bioenergieforum Mecklenburg-Vorpommern (2007), Universität Rostock, S. 155-169
 - [2] Ross, R. D. and Ellis, L.-A. M.: Laboratory-scale investigation of foaming in anaerobic digesters. *Water Environ. Res.* 64 (1992), pp. 154-162
 - [3] Weiland, P.; B. Gemmeke und C. Rieger: Biogas-Messprogramm II - 61

Biogasanlagen im Vergleich. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2009

- [4] Ganidi, N.; Tyrrel, S. and Cartmell, E.: Anaerobic digestion foaming causes - A review. *Bioresour. Technol.* 100 (2009), pp. 5546-5554
- [5] ● Eder, B. und H. Schulz: Der Biogas-Prozess. In: Eder, B. und H. Schulz: Biogas-Praxis, Ökobuch Verlag GmbH, Staufen, 2007, S. 17-40
- [6] Westlund, Å. D.; Hagland, E. and Rothman, M.: Foaming in anaerobic digesters caused by *Microthrix parvicella*. *Wat. Sci. Tech.* 37 (1998), pp. 51-55
- [7] Lebuhn, M. und A. Gronauer: Mikroorganismen im Biogasprozess - die unbekanntes Wesen. *Landtechnik* 64 (2009), H. 2, S. 127-130
- [8] Switzenbaum, M. S.; Giraldo-Gomez, E. and Hickey, R. F.: Monitoring of the anaerobic methane fermentation process. *Enzyme Microb. Technol.* 12 (1990), pp. 722-730
- [9] ● Effenberger, M.; M. Lebuhn und A. Gronauer: Fermentermanagement - Stabiler Prozess bei NawaRo-Anlagen. In: Biogas im Wandel, Tagungsband zur 16. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V., 2007, S. 99-105
- [10] Frauz, B.; B. U. Weinmann und H. Oechsner: Abtötung von Fusariensporen während des Gärprozesses in Landwirtschaftlichen Biogasanlagen. *Landtechnik* 61 (2006), H. 4, S. 61-62
- [11] ● Neis, U.: Bekämpfung von Bläh- und Schwimmschlamm mit Ultraschall. In: Neis, U. (Hg.): Ultraschall in der Umwelttechnik - III. Hamburger Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, GFEU an der TU Hamburg-Harburg, 2005, S. 109-121
- [12] ● Kunst, S. und S. Knoop: Schaum in Faulbehältern, In: Lemmer, H.; Griebe, T. und Flemming, H.-C. (Hg.): Ökologie der Abwasserorganismen. Springer-Verlag, Berlin und Heidelberg, 1996, S. 273-289
- [13] Herzberg, W. und A. Houy: Schaumbekämpfung im Faulbehälter durch Ultraschall-Desintegration. *KA-Betriebs-Info*, 38 - Beilage zur KA Korrespondenz Abwasser, 55 (2008), H. 3, S. 1559-1562
- [14] Dohányos, M.; Zábranská, J.; Kutil, J. and Jeníček, P.: Improvement of anaerobic digestion of sludge. *Wat. Sci. and Tech.*, 49 (2004), pp. 89-96
- [15] Oelsner, E.: Vergärung von Gülle und Hühnermist in der Mörsdorfer Agrar GmbH. Biogas im Wandel, Tagungsband zur 16. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V., 2007, S. 131-139
- [16] Baserga, U.: Vergärung organischer Reststoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. In: Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon (Hg.), FAT-Berichte, Nr. 546/2000, 2000
- [17] Hills, D. J. and Roberts, D. W.: Anaerobic Digestion of Dairy Manure and Field Crop Residues. *Agric. Wastes* 3 (1981), pp. 179-189
- [18] Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft: Biogastechnologie zur umweltverträglichen Flüssigmistverwertung und Energiegewinnung in Wasserschutzgebieten. LfL-Schriftenreihe, H. 23, 2006
- [19] ● Wetter, C. und E. Brüggling: Inbetriebnahme. Leitfaden zum Bau einer Biogasanlage, Band IV, Fachhochschule Münster, 2006, S. 111-192
- [20] Pagilla, K. R.; Craney, K. C. and Kido, W. H.: Causes and effects of foaming in anaerobic sludge digesters. *Wat. Sci. Tech.* 36 (1997), pp. 463-470
- [21] ● Kopplow, U.: Maßnahmen zur Minderung des Schäumens im Faulbehälter unter besonderer Berücksichtigung der Klärschlamm-Desintegration. Dissertation. Institut für Umweltingenieurwesen, Uni Rostock, 2006
- [22] Vardar-Sukan, F.: Foaming: consequences, prevention and destruction. *Biotechnol. Adv.* 16 (1998), pp. 913-948
- [23] Barjenbruch, M.; Hoffmann, H.; Kopplow, O. and Tränckner, J.: Minimizing of foaming in digesters by pre-treatment of the surplus-sludge. *Wat. Sci. Tech.* 42 (2000), H. 9, pp. 235-241
- [24] Hofmann, R.: Einsatz von Kemwater-Entschäumern besänftigt schlaflose Mitarbeiter. *Der Kemwaterspiegel - Das Magazin für Wasseraufbereitung von Kemira Kemwater*, 2003, S. 5

Autoren

Lucie Moeller ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Arbeitsgebiet Störfalldiagnostik und Prozessstabilisierung am Umwelt- und Biotechnologischen Zentrum des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ), Permoserstr. 15, 04318 Leipzig, E-Mail: lucie.moeller@ufz.de

Dr. Carsten Herbes ist Prokurist und Leiter Forschung und Entwicklung bei der NAWARO BioEnergie AG, Liviast. 8, 04105 Leipzig, E-Mail: carsten_herbes@nawaro.ag

Dr. Roland A. Müller ist Leiter des Umwelt- und Biotechnologischen Zentrums des UFZ, E-Mail: roland.mueller@ufz.de

Dr.-Ing. Andreas Zehnsdorf leitet die Arbeitsgruppe Bioprozesstechnik am Umwelt- und Biotechnologischen Zentrum des UFZ, E-Mail: andreas.zehnsdorf@ufz.de

Danksagung

Das Projekt wird finanziert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.