

Bildung und Vermeidung von Schaum im Vergärungsprozess bei der Produktion von Biogas

Kumulative Habilitationsschrift

von Dr.-Ing. Lucie Moeller

geb. am 24. Juli 1980 in Pelhřimov, CZ

zur Verleihung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur habitata
(Dr.-Ing. habil.)**

Genehmigt von der Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg am 5. März 2024

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Krause

Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Wiese

Prof. Dr. mont. Michael Nelles

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
1 Einleitung.....	6
1.1 Motivation und Zielstellung der Arbeit.....	6
1.2 Liste der verfassten Arbeiten	8
2 Entstehung von Schaum in Biogasanlagen.....	10
2.1 Definition „Schaum“.....	10
2.2 Oberflächenaktive Substanzen	11
3 Häufigkeit und Folgen der Schaumbildung im Biogasfermenter	14
3.1 Einleitung	14
3.2 Umfrage zur Häufigkeit und Folgen der Schaumbildung in abfallwirtschaftlichen Biogasanlagen	16
3.3 Schlussfolgerungen	18
4 Methoden zur Analyse der Schaumeigenschaften und der Ursachen der Schaumbildung im Biogasfermenter.....	19
4.1 Einleitung	19
4.2 Bubble-Test (Begasungsmethode).....	19
4.3 Bestimmung der Oberflächenspannung.....	22
4.4 Schaumtest.....	23
4.5 Schlussfolgerungen	26
5 Ursachen der Schaumbildung in Biogasanlagen	27
5.1 Einleitung	27
5.2 Zuckerrübe als Ursache der Schaumbildung in Biogasanlagen	29
5.3 Getreide als Ursache für Schaumbildung in Biogasanlagen	31
5.4 Schlussfolgerungen	32
6 Maßnahmen gegen Schaumbildung in Biogasanlagen.....	34
6.1 Einleitung	34
6.2 Nutzung von Entschäumern in Biogasanlagen	35
6.3 Einsatz von Puffersubstanzen als Maßnahme gegen Schaumbildung	37
6.4 Wirkung der Substratvorbehandlung auf die Schaumbildung im Biogasprozess..	40
6.5 Schlussfolgerungen	45
7 Zusammenfassung und Ausblick	46
Literaturverzeichnis.....	49

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau einer Schaumschicht über einer Flüssigkeit	10
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Ausbildung einer Lamelle mit Adsorptionsdoppelschicht in einer wässrigen Tensidlösung	12
Abbildung 3: Schaumereignisse an Praxisbiogasanlagen.....	16
Abbildung 4: Schema des Schaumgenerators zur Bestimmung des Schaumpotenzials im Digestat.	21
Abbildung 5: Oberflächenspannung der Zentrifugate von Digestaten aus drei Faultürmen und Schaum aus einem Gärrest-Sammelbehälter im Vergleich zum gesamten täglichen Verbrauch des Antischaummittels in der Kläranlage Leipzig-Rosental	23
Abbildung 6: Testset zur Bestimmung der Schaumneigung von Substrat für Biogasanlagen.	24
Abbildung 7: Schaumgehalt in Schaumtests zur Bewertung des Einflusses der Substratdosierung auf die Schaumbildung.	25
Abbildung 8: Korrelogramme zur Analyse der physiko-chemischen Eigenschaften des Faulschlammes der Faultürme des Klärwerks Rosental aus dem Zeitraum von 01.05.2016 bis 31.12.2016 mit Hilfe einer Korrelationsmatrix	28
Abbildung 9: Intensität der Schaumbildung in Schaumtests mit zusätzlich 2,5 g/kg stickstoffhaltigen Verbindungen	38
Abbildung 10: Tägliche Stromproduktion als Indikator der Biogasproduktion und der Methangehalt während und nach zwei Schaumereignissen im Biogasfermenter einer Praxisanlage	40
Abbildung 11: Biogasproduktion und Methangehalt im Verlauf von Batchversuchen mit 1 cm großen Rübenwürfeln (n = 3) und geriebenen Rüben (n = 2)	41
Abbildung 12: Biogasausbeute im Verlauf der Fermentationsbatchversuche von gemahlenem Triticale (Partikelgröße $\leq 0,5$ mm und ≤ 4 mm) und Triticalekorn.....	43
Abbildung 13: Biogasproduktionsrate und Methankonzentration im Biogas im Verlauf der semikontinuierlichen Fermentation bei gleichzeitiger Beschickung mit gemahlenem Triticale (mit Partikelgrößen ≤ 1 mm und ≤ 4 mm) im linken Viereck und gemahlenem Triticale (Partikelgröße ≤ 4 mm) und Getreidekorn im rechten Viereck	45

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnisse der Umfrage von Betreibern von Biogasanlagen zur Behandlung von biogenen Abfällen zum Schaum in Fermentern	17
Tabelle 2: Parameter und Bedingungen von Belüftungsversuchen in der Literatur	20
Tabelle 3: Zusammenfassung der Ergebnisse der Entwicklung eines Schaumtests zur Beurteilung der Schaumneigung von Substraten.	25
Tabelle 4: Betriebliche Daten einer schäumenden Biogasanlage und einer schaumfreien Biogasanlage	29
Tabelle 5: Analysedaten von Digestaten und Schäumen aus drei parallelen Schaumtests mit 40 g Zuckerrübensilage und Digestat aus dem Kontrollkolben ohne Zusatz von der Zuckerrübensilage (Kontrolle).....	31
Tabelle 6: Analytische Daten von Digestaten und Schäumen aus den Schaumversuchen mit gemahlenem Getreide	32
Tabelle 7: Ermittlung des Einflusses der Zugabe von Antischaummitteln auf den Biogasprozess.	37
Tabelle 8: Einfluss der Zugabe von Stickstoffdüngern auf den Biogasprozess	39
Tabelle 9: Einfluss der Getreideart und Mahlstufe auf die Intensität der Schaumbildung.	42
Tabelle 10: Einfluss der Zugabe von Sojaöl auf die Schaumbildung bei Vergärung von Getreideschrot.	43

Kurzfassung

Die Habilitationsschrift hat zum Ziel, eine Zusammenfassung der Arbeiten zu einer der häufigsten Störungen des Biogasproduktionsprozesses – der übermäßigen Schaumbildung – zu geben. Die Bildung von Schaum in Biogasanlagen führt zu volkswirtschaftlichen Schäden im Sinne von Produktionseinbußen, sowie erhöhten betrieblichen Kosten. Dabei ist dieses Problem bisher nur wenig erforscht und auf dem Markt gibt es außer Antischaummitteln, die - wenn überhaupt - nur kurzfristig wirken, sehr wenig Lösungen für die Stabilisierung einer schäumenden Biogasanlage. Die Autorin fasst das bisherige Wissen zusammen, wobei sie nicht nur ihre eigenen Arbeiten zur Analyse des Problems, der Ursachen, sowie der Suche nach wirksamen Mitteln gegen übermäßige Schaumbildung beschreibt, sondern auch gründliche Analyse des bestehenden Wissens durchführt. Die entwickelten Maßnahmen reichen von der Entwicklung von Tests zur Bestimmung der Substrate, die zur Schaumbildung neigen, sowie zur Ermittlung eines geeigneten Entschäumers für das jeweilige Schaumereignis, über die Empfehlungen zur Vorbehandlung von Substraten bis zur Anwendung von puffernden Substanzen in spezifischen Fällen der Schaumbildung. Die Arbeit der Autorin bringt neue Erkenntnisse, die bereits in zahlreichen Biogasanlagen zur Anwendung gekommen sind.

The aim of the habilitation thesis is to summarise the work on one of the most frequent disturbances in the biogas production process - excessive foaming. The formation of foam in biogas plants leads to economic damage in the sense of production losses, as well as increased operational costs. However, this problem has been little researched so far and there are very few solutions on the market for stabilising a foaming biogas plant apart from anti-foaming agents, which - if at all - are only effective in the short term. The author summarises the knowledge to date, describing not only her own work in analysing the problem, the causes, and the search for effective means to combat excessive foaming, but also conducting extensive analyses of existing knowledge. The measures developed range from the development of tests to determine which substrates are prone to foaming and to identify a suitable defoamer for the particular foaming event, to recommendations for pre-treatment of substrates and the use of buffering substances in specific cases of foaming. The author's work brings new insights that have already been applied in numerous biogas plants.

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielstellung der Arbeit

Der immer größere Hunger der zivilisierten Welt nach Energie steht den Maßnahmen gegenüber, die notwendig sind, um den Klimawandel zu verlangsamen. Darüber hinaus geraten traditionelle Methoden der Strom- und Wärmeproduktion zunehmend in Kritik, weil sie nicht nachhaltig sind und/oder nicht tragbare Folgen für die nachfolgenden Generationen mit sich bringen. Dies führte zur Entscheidung, in Deutschland auf umweltverträglichere Methoden der Energieumwandlung umzustellen.

Im Zusammenhang mit der Energiewende stehen im Wesentlichen vier erneuerbare Energiequellen zur Verfügung: Sonne, Wind, Wasser und Biomasse. Biomasse hat vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Sie wird in fester, flüssiger und gasförmiger Form angewendet. Dabei wird sowohl Strom als auch Wärme produziert. Darüber hinaus kann Biomasse zur Produktion von Biokraftstoffen genutzt werden (BMWk, 2021). Innerhalb der erneuerbaren Energien trägt derzeit die Biomasse mit 86 % zum Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte, mit 88 % zum Endenergieverbrauch im Verkehr und mit 23 % zur Stromerzeugung bei. Biogas an sich bildet nur unter erneuerbaren Energien einen Anteil von 11 % an der Stromerzeugung (BMWk, 2021).

Seit dem Inkrafttreten des ersten Erneuerbaren Energie Gesetzes (EEG) in 2000 ist die Anzahl der Biogasanlagen in Deutschland stets angestiegen. Der erste Ausbau bis 2014 erfolgte rasant, später stagnierte der Anstieg durch diverse Novellierungen des EEGs allerdings stark. Derzeit wird in Deutschland Biogas an 8.600 Standorten erzeugt, mit einer installierten elektrischen Leistung von ca. 6,5 GW (FNR, 2022a). Darüber hinaus wird in 222 Biogasanlagen Biomethan produziert mit einer Biomethan-Einspeisekapazität von ca. 147.810 Nm³/h (FNR, 2022b). Der Bau von neuen Biogasanlagen ist der Umrüstung der Bestandsanlagen für flexible Biogasproduktion in den letzten Jahren gewichen. Die Vorteile des Biogases im erneuerbaren Energiemix liegen in der Speicherbarkeit des Energieträgers Methan und in der Möglichkeit der flexiblen Bereitstellung von Strom und gleichzeitiger Produktion von Wärme. Aus diesem Grund bildet die Biogaserzeugung auch einen festen Bestandteil im Energiemix der Zukunft.

Den Kern der Biogasproduktion bildet die biologische Umwandlung von polymeren Substanzen in die C1-Moleküle Methan und Kohlendioxid, die die Hauptbestandteile von Biogas bilden. Diese Umwandlung ist ein komplexer Prozess mit zahlreichen Schritten, die im Biogasfermenter parallel stattfinden. Für einen reibungslosen Ablauf des biologischen Abbaus müssen zahlreiche Faktoren in ihrem Optimum liegen. Gibt es eine Abweichung, droht eine Prozessstörung, wie eine Studie des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) zeigte. Neben technischen Problemen an Blockheizkraftwerken,

Rührwerken, Pumpen und Feststoffdosierern gehört auch der Biogasprozess selbst zu den fünf häufigsten Störungsursachen an Biogasanlagen (KTBL, 2009). Während beschädigte Anlagenteile relativ schnell repariert oder ersetzt werden können, ist im Fall der Stabilisierung des Biogasprozesses meistens ein Zeitraum von mehreren Wochen notwendig.

Zu den häufigsten Störungen des Biogasprozesses gehören die Übersäuerung des Fermenterinhalt, die Bildung von Schwimmschichten und übermäßige Schaumbildung (Lienen et al., 2013). Während die ersten beiden Prozessstörungen gut erforscht sind und mit relativ einfachen Mitteln behoben werden können (s. z.B. Griehl et al., 2010, Kleyböcker et al., 2012, Tian et al., 2015), fehlen für die Bekämpfung bzw. Vermeidung der Schaumereignisse bisher praktische Ansätze, wenn man von der Antischaummittelbenutzung absieht. Die ökonomischen Folgen eines Schaumereignisses können je nach Ausmaß der Schaumbildung unterschiedlich ausfallen; sie reichen von zusätzlichen Ausgaben für Antischaummittel, Biogasverluste aufgrund von verstopften Gasleitungen bis zu Reinigungs- und Reparaturkosten bei Konstruktionsschäden. Die Schaumbildung im Biogasfermenter kann dabei sehr vielfältige Ursachen haben. Diese reichen von einer unvorsichtigen Nutzung von risikoreichen Substraten, über inadäquates Betriebsmanagement bis zu technischen Fehlern. Nicht selten bleibt die direkte Ursache des Schäumens ungeklärt. Dies macht die Entwicklung von Gegenmaßnahmen zu einer schwierigen Aufgabe. Dabei gewinnt dieses Thema künftig deutlich an Bedeutung. Um Biogas in das System der erneuerbaren Energien der Zukunft implementieren zu können, sind flexible Produktionsbedingungen unabdingbar. Die Stabilität des Produktionsprozesses ist in diesem Zusammenhang ein entscheidendes Thema.

Ziel der dieser Habilitationsschrift zugrunde liegenden Arbeit war es daher, die Ursachen der Schaumbildung zu ermitteln und Gegenmaßnahmen dafür zu entwickeln, um diese dann in der Praxis zu erproben und zu ertüchtigen. Mit Hilfe von Umfragen unter Biogasanlagenbetreibern wurde das aktuelle Wissen gesammelt und sortiert. Für die vor-Ort-Ermittlung von Ursachen für die Schaumbildung im Biogasfermenter wurde ein praktischer Test zur Einschätzung der Schaumneigung von Substraten entwickelt. Basierend auf diesem Test konnten Gegenmaßnahmen entwickelt werden und in Praxisanlagen erfolgreich getestet werden. In einem Workshop, der vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ organisiert wurde, kamen Experten aus Wissenschaft und Praxis zusammen und diskutierten die Thematik der Schaumbildung in Biogasanlagen. Als Ergebnis dieses Workshops wurde ein Fokusheft veröffentlicht (**Moeller et al., 2015**).

1.2 Liste der verfassten Arbeiten

Diese Habilitationsschrift basiert auf folgenden Publikationen, deren Inhalt aktualisiert und ergänzt wurde:

- **Moeller, L.**, Herbes, C., Müller, R.A., Zehnsdorf, A., 2010. Schaumbildung und -bekämpfung im Prozess der anaeroben Gärung. Landtechnik (Agricultural Engineering), 65/3, 204-207. (English version online: Formation and removal of foam in the process of anaerobic digestion).
- **Moeller, L.**, Goersch, K., Neuhaus, J., Zehnsdorf, A., Mueller, R.A., 2012a. Comparative review of foam formation in biogas plants and ruminant bloat. Energy, Sustainability and Society 2:1-9.
- **Moeller, L.**, Görsch, K., Müller, R., Zehnsdorf, A., 2012b. Bildung von Schaum in Biogasanlagen und seine Bekämpfung – Erfahrungen aus der Praxis. Landtechnik, 67/2, 110-113. (English version online: Formation and suppression of foam in biogas plants – practical experiences).
- UFZ – Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (**L. Moeller**, A. Zehnsdorf, D. Bayer), 2013. Gebrauchsmuster, DE 202013000693.5, C12M 1/107, 1. Februar 2013.
- **Moeller, L.**, Görsch, K., Köster, Y., Müller, R.A., Zehnsdorf, A., 2013. Schaumbildung und Schaumvermeidung in Biogasanlagen: Schlussbericht. UFZ-Bericht 1/2013. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Leipzig, 129 S.
- **Moeller, L.**, Görsch, K., 2015. Foam formation in full-scale biogas plants processing biogenic waste. Energy, Sustainability and Society 5:1.
- **Moeller, L.**, Zehnsdorf, A., Thrän, D., Pfeiffer, D. (Ed.), 2015a. FOCUS ON “Schaumbildung in Biogasanlagen”, Fokusheft aus der Publikationsserie des BMWi-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“, ISSN 2192-1156, 76 S.
- **Moeller, L.**, Eismann, F., Wißmann, D., Nägele, H.-J., Zielonka, S., Müller, R.A., Zehnsdorf, A., 2015b. Innovative test method for the estimation of the foaming tendency of substrates for biogas plants. Waste Management 41, 39-49.
- **Moeller, L.**, Lehnig, M., Schenk, J., Zehnsdorf, A., 2015c. Foam formation in biogas plants caused by anaerobic digestion of sugar beet. Bioresource Technology 178, 270-277.
- **Moeller, L.**, Krieg, F., Zehnsdorf, A., Müller, R.A., 2016. How to avoid foam formation in biogas plants by coarse grain anaerobic digestion. Chemical Engineering & Technology 39/4, 673-679.
- **Moeller, L.**, Zehnsdorf, A., 2016. Process upsets in a full-scale anaerobic digestion bioreactor: over-acidification and foam formation during biogas production. Energy, Sustainability and Society 6:30.

- **Moeller, L.**, Zehnsdorf, A., 2017. Mittel gegen Schaumbildung bei der Zuckerrübenvergärung in Biogasanlagen. Landtechnik 72(1), 13–22. (English version online: Measures to prevent foam formation in the anaerobic digestion of sugar beet in biogas plants).
- **Moeller, L.**, Zehnsdorf, A., Pokorná, D., Zábranská, J., 2018a. Foam formation in anaerobic digesters. Book chapter in: Li, Y. Ge, X. (Ed.): Advances in Bioenergy, Volume 3, 1. Auflage, ISBN 978-0-12-815199-0, S. 1-42.
- **Moeller, L.**, Zehnsdorf, A., Müller, R.A., 2018b. Effect of triticale milling coarseness on biogas production. Chemie Ingenieur Technik 90 (1-2), 249 – 255.
- **Moeller, L.**, Görsch, K., 2020a. Determination of the foaming potential by means of the "bubble test", in: Liebetrau, J., Pfeiffer, D., Thrän, D. (Eds.), Collection of Methods for Biogas. Series of the funding programme "Biomass energy use" Volume 7, DBFZ, ISBN 978-3-946629-47-4, S. 172-173.
- **Moeller, L.**, Köster, Y., Zehnsdorf, A., 2020b. Leipzig foam tester – Test set for the determination of the tendency of a substrate to foam, in: Liebetrau, J., Pfeiffer, D., Thrän, D. (Ed.), Collection of Methods for Biogas. Series of the funding programme "Biomass energy use" Volume 7, DBFZ, ISBN 978-3-946629-47-4, S. 174-176.
- **Moeller, L.**, Goersch, K., 2020c. Determination of the surface tension, in: Liebetrau, J., Pfeiffer, D., Thrän, D. (Eds.), Collection of Methods for Biogas. Series of the funding programme "Biomass energy use" Volume 7, DBFZ, ISBN 978-3-946629-47-4, S 171.

Anmerkung: Alle Arbeiten, die am UFZ durchgeführt wurden und in dieser Arbeit erwähnt sind, wurden von der Autorin selbst durchgeführt oder betreut.

2 Entstehung von Schaum in Biogasanlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Entstehung von Schaum in Flüssigkeiten und komplexen Medien dargestellt. Diese Kenntnisse dienen als Grundlage für das Verständnis der in Kapiteln 3-6 vorgestellten Untersuchungen.

2.1 Definition „Schaum“

Schaum ist im Allgemeinen eine grobe Dispersion eines Gases in einer Flüssigkeit. Der überwiegende Teil des Schaums besteht aus gasförmiger Phase. Die flüssige Phase befindet sich in glatten Lamellen zwischen den Gasblasen und im Plateaukanal (Abbildung 1) (Mollet und Grubenmann, 2000). Der Schaum im Biogasfermenter ist allerdings ein komplexes dreiphasiges System, bei dem neben der Gas- und Flüssigphase auch die feste Phase eine wichtige Rolle spielt (Subramanian und Pagilla, 2015, Moeller et al., 2018a).

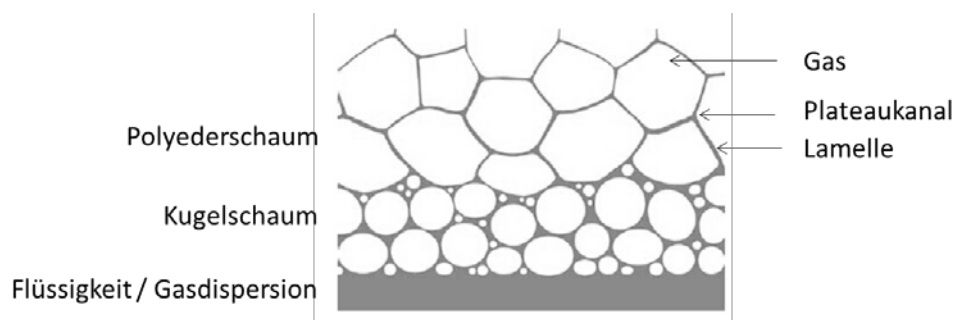


Abbildung 1: Aufbau einer Schaumschicht über einer Flüssigkeit (in Anlehnung an www.sita-china.com)

Für die Bildung von Schaum müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein: das Gas muss in der Flüssigkeit entstehen/erzeugt werden oder der Flüssigkeit zugeführt werden und die flüssige Phase muss eine oberflächenaktive Substanz enthalten (z. B. Tenside, Proteine, Cellulosederivate, Polyelektrolyte oder Polysaccharide) (Moeller et al., 2018a). Reine Flüssigkeiten bilden extrem instabile Schäume mit einer Lebensdauer von weniger als einer Sekunde (Mollet und Grubenmann, 2000). Die Zuführung von Gas in eine Flüssigkeit führt zur Diffusion oberflächenaktiver Stoffe aus der flüssigen Phase an die neu gebildete Gas-Flüssigkeit-Grenzfläche (Borcherding, 2004; Junker, 2007).

Suspendierte Stoffe, die in der flüssigen Phase vorkommen, wie Faserbruchstücke (Zellstoff-, Kunststoff- und Mineralfasern), Pigmente, Kalkseifen und Metallhydroxide, können unter bestimmten Bedingungen zur Stabilisierung des Schaums beitragen (Ganidi et al., 2009). Die Intensität der Schaumbildung hängt dann von der Konzentration (direkt proportional) und der Größe (umgekehrt proportional) dieser Partikel ab (Subramanian und Pagilla, 2015).

Im Allgemeinen gibt es zwei Arten von Schaum: Kugelschaum und Polyederschaum (Mollet und Grubenmann, 2000). Kugelschaum enthält einzelne kugelförmige Gasblasen mit dicken Lamellen ohne Plateaukanäle und ist instabiler als der Polyederschaum. Für die Bildung von

Kugelschaum ist das Vorhandensein von oberflächenaktiven Substanzen jedoch nicht unbedingt erforderlich. Für die Stabilität des Schaums spielen auch die Viskosität und die Dichte der Flüssigkeit eine wichtige Rolle (Mollet und Grubenmann, 2000). Zu hohe Viskositäten verhindern allerdings eine Schaumbildung. Eine Viskositätserhöhung wird z. B. durch die Anwesenheit von Polysacchariden wie Stärke oder Pektin verursacht (Moeller et al., 2018a).

Darüber hinaus wurden für den speziellen Fall des Gärprozesses bei der Biogasproduktion zwei Arten von Schaumblasen beschrieben (Barjenbruch et al., 2000; Subramanian und Pagilla, 2015), die sich in der Blasengröße unterscheiden. Während der herkömmlichen Schaumbildung bilden sich große Blasen an der Oberfläche. Der großblasige Schaum ist meist instabil und wird unter anderem durch Fett oder fadenförmige Mikroorganismen gebildet. Für Ereignisse mit schneller Volumenexpansion und Gasstau im gesamten Fermentervolumen sind eher kleine Blasen typisch. Diese können nicht zerstört werden.

Laut diverser Umfragen unterscheiden auch Biogasanlagenbetreiber selbst meist zwischen großblasigem und kleinblasigem Schaum (Wissmann, 2014; **Moeller et al., 2012b**). Großblasiger Schaum an der Oberfläche des Digestates wird als nicht gefährlich eingestuft, da er mit einfachen Maßnahmen verhindert werden kann. Kleinblasiger Schaum (auch "Teufelsschaum" oder "Hefeteig-Effekt" (Lindorfer, 2015) genannt) wurde dagegen in der Regel als problematischer gesehen, weil er schwere Schäden an Fermentern verursacht (Moeller et al., 2018a).

2.2 Oberflächenaktive Substanzen

Oberflächenaktive Substanzen spielen bei der Bildung einer Schaumblase eine wichtige Rolle. Es handelt sich um Stoffe, die die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit herabsetzen. Sie können unterschiedlich groß sein: Es gibt sowohl niedermolekulare Tenside (z. B. Phospholipide) und hochmolekulare organische Verbindungen, die sich an der Grenzfläche zwischen Wasser und Luft anreichern können (Borcherding, 2004), wie z. B. Proteine, Saponine, Polysaccharide, Cellulosederivate, Huminsäuren und Polyelektrolyte. Diese Substanzen können zu einer sehr starken Stabilisierung der gebildeten Schäume beitragen. Solche Schäume sind beständig, stabil und elastisch, charakterisiert durch einen kleinen Blasendurchmesser (Moeller et al., 2018a).

Das Molekül eines Tensids ist typischerweise amphiphil, d. h. es enthält einen hydrophoben Teil (z. B. eine Phosphatgruppe) und einen hydrophilen Teil (z. B. eine lange Kohlenstoffkette). Diese Verbindungen befinden sich an der Grenzfläche zwischen Gas und Flüssigkeit, wobei ihr hydrophiler Teil in Richtung Wasser und der hydrophobe Teil des Moleküls in Richtung Gasphase zeigt (Abbildung 2) (Moeller et al., 2018a). Diese Ausrichtung führt zu einer

Verringerung der freien Energie des Systems und der Grenzflächenspannung (Borcherding, 2004). Es entsteht eine monomolekulare Schicht aus Tensidmolekülen. Dieser dünne Film ist die Voraussetzung für die Bildung stabiler Schäume (Moeller et al., 2018a). Die Wirkung eines Tensids hängt von seiner Konzentration ab; bei niedrigen Konzentrationen haben diese Stoffe kaum Einfluss auf die Schaumentstehung. Die Fähigkeit einer Flüssigkeit, bei Gaszufuhr Schäume zu bilden, nimmt zu, wenn eine bestimmte Konzentration überschritten wird (Moeller et al., 2018a). Diese Konzentration wird als die kritische Mizellenkonzentration (CMC-Konzentration) bezeichnet (Ganidi, 2008). Folgerichtig sind Tenside umso effizientere Schaumbildner, je niedriger ihre CMC ist (Mollet und Grubenmann, 2000).

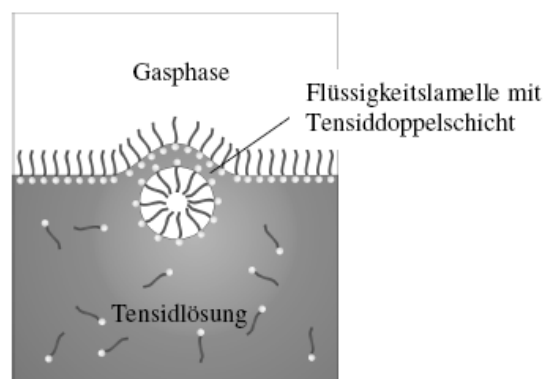


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Ausbildung einer Lamelle mit Adsorptions-doppelschicht in einer wässrigen Tensidlösung (Pahl und Franke, 1995)

Auch die Biotenside (extrazelluläre polymere Substanzen) spielen in der Problematik der Schaumbildung in biotechnologischen Prozessen eine wichtige Rolle (Moeller et al., 2018a). Dabei handelt es sich um Naturstoffe, die von den Mikroorganismen selbst im Biogasreaktor produziert werden - als deren extrazelluläre Speicherstoffe oder als Grundlage für die Bildung einer Polymermatrix, in der einzelne mikrobielle Zellen aggregiert sind (Ganidi et al., 2009). Filamentöse Mikroorganismen (z. B. *Microthrix parvicella*) spielen hier eine wichtige Rolle. Diese Bakterien befinden sich im Belebtschlamm, wo sie sich unter bestimmten Bedingungen - unter Nährstoffentzug und im Winter - schnell vermehren und in Belebungsbecken starke Schaumbildung verursachen können (Moeller et al., 2018a). In der Folge kann der Überschusschlamm, der zur anaeroben Stabilisierung geführt wird, Schaumprobleme in Faultürmen verursachen (Frølund et al. 1994, Westlund und Hagland, 1998). Barjenbruch et al. (2000) stellten fest, dass nicht nur die fadenförmige Struktur der Mikroorganismen zur starken Schaumbildung im Fermenter führt, sondern auch die extrapolymeren Substanzen, die von diesen Mikroorganismen produziert werden, selbst den Schaum stabilisieren. Diese werden unter bestimmten Bedingungen (Temperaturwechsel, Nährstoffmangel) durch Mikroorganismen ausgeschieden, um eine Kohäsion mit anderen Zellen oder Partikeln sowie ihre Bindung an Oberflächen zu ermöglichen (Barjenbruch et al., 2000). Auch durch

mechanische Einflüsse, wie z. B. Rühren, werden durch die Scherbeanspruchung der Zellwände Substanzen mit oberflächenaktiven Eigenschaften freigesetzt und können zur Bildung von Schaumblasen beitragen (Kopplow, 2006; Vardar-Sukan, 1998).

Eine bedeutende Gruppe von oberflächenaktiven Substanzen sind Proteine, die häufig mit den Substraten in die anaeroben Fermenter eingebracht werden. Sie werden aber auch im Fermenter von den Mikroorganismen selbst produziert. Ihre Freisetzung erfolgt während des Zellstoffwechsels und im Ergebnis des enzymatischen Abbaus während der Autolyse der toten Zellen. (Moeller et al., 2018a) Die Fütterung mit proteinreichen Substraten wie Klee und Luzerne kann genauso wie im Fermenter auch im Pansen von Wiederkäuern zur Bildung einer schäumenden Masse führen (ein umfassender Vergleich der Schaumbildung in anaeroben Fermentern mit Blähung im Pansen von Wiederkäuern wurde in **Moeller et al., 2012a** veröffentlicht). Es wurde festgestellt, dass während des Verdauungsprozesses im Pansen sogenannte Fraktion-I-Proteine aus den Chloroplasten freigesetzt werden. Diese Proteine sind in Lösung kugelförmig. Wenn sie jedoch die Oberfläche erreichen, rollen sie sich ab, werden unlöslich und stabilisieren den Schaum (Clarke und Reid, 1973, Moeller et al., 2018a).

Auch die Stoffwechselprodukte der Proteine haben einen Einfluss auf die Schaumbildung im Biogasprozess. Proteine enthalten Stickstoff, der in Form von Aminogruppen gebunden ist. Im Verlauf des Abbauprozesses wird der Stickstoff in Form von Ammonium freigesetzt. Durch verschiedene Einflüsse wie Temperaturerhöhung und/oder pH-Veränderung kann Ammonium zu Ammoniak, einem starken Zellgift, dissoziieren (Chen et al. 2008). Das Absterben von Mikroorganismen durch die Wirkung von Ammoniak erhöht die Wahrscheinlichkeit einer übermäßigen Schaumbildung (Moeller et al., 2018a).

Mehrere Autoren brachten eine erhöhte Konzentration von flüchtigen organischen Säuren, die als Zwischenprodukte des Biogasprozesses immer im Fermenter vorhanden sind, in Verbindung mit übermäßiger Schaumbildung (Ross und Ellis, 1992; Westlund und Hagland, 1998). Es wurde bisher jedoch nicht festgestellt, ob der Anstieg der Konzentration dieser kurzkettigen Fettsäuren die Ursache der Schaumbildung war oder vielmehr die Folge der Störungen, die zur Schaumbildung führten (Moeller et al., 2018a).

3 Häufigkeit und Folgen der Schaumbildung im Biogasfermenter

3.1 Einleitung

Weltweit wurden mehrere Erhebungen durchgeführt, um die Häufigkeit der Schaumbildung in großtechnischen Fermentern verschiedener Typen zu erfassen. Die Forschung auf dem Gebiet der Schaumbildung in anaeroben Fermentern konzentriert sich meistens nur auf den Biogasprozess in Kläranlagen, so dass die meisten Erhebungen nur diesen Typ von anaeroben Fermentern berücksichtigen (Moeller et al., 2018a). In der Umfrage von van Niekerk et al. (1987) in Kalifornien berichteten 54 % von 26 Kläranlagenbetreibern über Probleme mit der Schaumbildung in der Vergärung. Eine weitere Umfrage im Vereinigten Königreich ergab, dass 56 % von 16 Betreibern Erfahrungen mit der Schaumentwicklung in Faultürmen von Kläranlagen machen mussten (Ganidi, 2008). Dabei trat die Schaumbildung regelmäßig (sieben Anlagen) und manchmal nur saisonal im Winter/Frühjahr (drei Anlagen) auf. In drei Kläranlagen wurde eine starke, permanente Schaumbildung festgestellt.

Rodríguez-Roda et al. (2013) berichteten über etwas höhere Anzahl der betroffenen Anlagen (Moeller et al., 2018a). So hatten in spanischen Kläranlagen 60,5 % von 36 Befragten Erfahrungen mit übermäßiger Schaumbildung. Die Häufigkeit der Schaumbildung war bei sieben Kläranlagen saisonal, bei 13 Anlagen unregelmäßig und bei drei Anlagen anhaltend (Rodríguez-Roda et al., 2013). Ergebnisse aus der Überwachung von 72 Kläranlagen in der Tschechischen Republik zeigten, dass der Anteil der Fälle von Schaumbildung in Systemen zur Nährstoffentfernung deutlich höher ist. Schaumbildung trat in 69 % der Kläranlagen mit Stickstoffentfernung, in 63 % mit Stickstoff- und Phosphorentfernung, aber nur in 37 % der Kläranlagen mit alleiniger Entfernung organischer Verunreinigungen auf (Wanner et al., 1999).

Kougias et al. (2014a) berichteten, dass in 15 von 16 dänischen landwirtschaftlichen Biogasanlagen Probleme mit der Schaumbildung aufgetreten waren. Schaumbildung trat nicht nur in den Fermentern auf, sondern häufig auch in der Substratvorlage (Moeller et al., 2018a). Wissmann (2014) referierte über eine Befragung von Biogasexperten und Biogasanlagenbetreibern in Baden-Württemberg. Die Ergebnisse zeigten, dass etwa 10 % der landwirtschaftlichen Biogasanlagen Probleme mit der Schaumbildung hatten (Moeller et al., 2018a). Lindorfer und Demmig (2016) veröffentlichten eine umfassende Statistik von 3.100 deutschen Biogasanlagen (96 % landwirtschaftliche Biogasanlagen zur Vergärung von Energiepflanzen und Gülle, und 4 % abfallwirtschaftliche Biogasanlagen). Dabei gaben 10,5 % der befragten Betreiber an, dass Schaumbildung ein enormes Problem in ihrem Fermenter darstellt. Die Schaumbildung findet ihren Angaben zufolge hauptsächlich im Hauptfermenter (82 %), aber auch in Nachgärern (18 %) und in Hydrolysebehältern (0,3 %) statt. Es ist davon auszugehen, dass Schaum in Hydrolysebehältern noch häufiger auftritt; aufgrund der starken Durchmischung und des Fehlens von Gasleitungen wird dieser Schaum allerdings nicht als

Problem erkannt. Im Gegensatz dazu ist die Schaumbildung in Nachgärbehältern oft viel problematischer, da die Ursachen für die Schaumbildung grundsätzlich nicht erkennbar sind und die Anwendung von Antischaummitteln aufgrund des fehlenden Zugangs zum Inneren des Nachgärbehälters im Allgemeinen nicht möglich ist (Moeller et al., 2018a).

Das Auftreten von Schaum in einem Biogasfermenter kann verschiedene Auswirkungen haben. Im Allgemeinen führt eine heftige Schaumbildung meist zu Leistungs- und Betriebsproblemen von Biogasanlagen (Subramanian und Pagilla, 2015). Die häufigste Folge ist eine Verstopfung von Gasleitungen in Biogasfermentern (Ganidi et al., 2009; Wissmann, 2014). Darüber hinaus können auch Überdrucksicherungen verstopfen (Wissmann, 2014), Gasmischvorrichtungen blockiert werden (Dalmau et al., 2010; Pagilla et al., 1997).

Pagilla et al. (1997) beschrieben ein inverses Gesamtfeststoffprofil in Schlammfaulbehältern während des Aufschäumens. Darüber hinaus zeigten die Autoren, dass starkes Schäumen zu einer um 20 % geringeren Gasproduktion führte (Pagilla et al., 1997). Das Reaktorvolumen wird deutlich verringert und infolgedessen verkürzt sich die Faulzeit (Barjenbruch et al., 2000).

Die Anlagenbetreiber sehen sich oftmals während den Umfragen nicht in der Lage, die wirtschaftlichen Auswirkungen eines Schaumereignisses auf den Biogasanlagenbetrieb zu quantifizieren (Ganidi, 2008; Wissmann, 2014). Der Grund dafür ist, dass die Kosten zu viele verschiedene Positionen umfassen, wie z. B. die Kosten für Antischaummittel, Personalkosten bei Überstunden, Kosten für die Reinigung, Fermenter-Stillstandzeiten/aktiver Volumenverlust und auch die Reparaturkosten für zerstörte Fermenterteile (Subramanian und Pagilla, 2015; Wissmann, 2014). Zusätzlich müsste die Menge des Methans berücksichtigt werden, die durch die Überdrucksicherung aufgrund verstopfter Rohre, die zum BHKW führen, in die Atmosphäre abgegeben wird. Eine Erhöhung der Rührintensität führt auch zu einem erheblichen Anstieg der Betriebskosten, da im Normalbetrieb etwa 50 % des Eigenstrombedarfs einer Biogasanlage für den Antrieb der Rührorgane im Fermenter aufgewendet wird (Nägele, 2015).

Es gibt jedoch einige Daten zur Abschätzung der Kosten, die durch ein Schaumereignis entstehen. Wissmann (2014) berichtete von Kosten in Höhe von 10.000-30.000 € für Schaumereignisse, bei denen das Fermenterdach angehoben wurde. Im Nachgang mussten die betroffenen Fermenterdächer neu installiert werden, da Leckagen auftraten. Westlund et al. (1998) berichteten über den Fall einer schwedischen Kläranlage, die einen Biogasverlust von 40 % nach einer zehnwöchigen Schaumbildung verzeichnete. Die Gesamtkosten wurden auf 150.000 USD geschätzt, einschließlich der erhöhten Personalkosten, der durch die geringere Methanproduktion verursachten Verringerung der Stromproduktion, des zusätzlichen Ölverbrauchs und des höheren Polymerbedarfs für die Entwässerung der Anlage. Laut der in Kougiyas et al. (2014a) veröffentlichten Studie verzeichneten Biogasanlagen

während der Schaumbildung Biogasverluste von 20-50 %. Einige der Betreiber berichteten sogar über einen Verlust von bis zu 90 % der Biogasproduktion oder einen kompletten Prozessausfall (Kougias et al., 2014a).

3.2 Umfrage zur Häufigkeit und Folgen der Schaumbildung in abfallwirtschaftlichen Biogasanlagen

Um die Häufigkeit der Schaumbildung in abfallwirtschaftlichen Biogasanlagen einzuschätzen wurde 2015 von **Moeller und Görsch (2015b)** eine Umfrage durchgeführt. Die Autorinnen kontaktierten Betreiber aller in Sachsen (6), Sachsen-Anhalt (6) und Thüringen (6) betriebenen abfallverwertenden Biogasanlagen. Fünfzehn Stakeholder waren bereit, ihre Erfahrungen zu teilen. Die Ergebnisse der Umfrage sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Zwölf Betreiber (das entspricht 80 %) berichteten über Probleme mit Schaumbildung in anaeroben Fermentern. Die Hälfte der Schaumereignisse in anaeroben Fermentern trat regelmäßig auf, 17 % hatten bis zum Tag der Umfrage nur ein einziges Schaumereignis, und 25 % der Befragten gaben an, ihre früheren Schaumprobleme durch Anpassung der Betriebsbedingungen endgültig gelöst zu haben (Tabelle 1). Abbildung 3 zeigt drei Fälle von übermäßiger Schaumbildung im biologischen Prozess der Biogasproduktion.



A



B



C

Abbildung 3: Schaumereignisse an Praxisbiogasanlagen.

(A) Schaum tritt am Überlauf aus dem Fermenter raus und beschmutzt die Umgebung, (B) Schaum in der separierten Flüssigphase (Autor: A. Zehnsdorf, UFZ), (C) Bullauge mit Strichen zur Ermittlung der Stärke der Schaumschicht an einer chronisch schäumenden Praxisanlage (Fotos: L. Moeller, UFZ).

Tabelle 1: Ergebnisse der Umfrage von Betreibern von Biogasanlagen zur Behandlung von biogenen Abfällen zum Schaum in Fermentern (Moeller & Görsch, 2015b)

Beschreibung der untersuchten Biogasanlagen				Ergebnisse der Umfrage				
	Substrate	Kapazität	Verfahren	Schaum	Häufigkeit der Schaumbildung	Mutmaßliche Ursachen für Schaumbildung	Maßnahmen zur Schaumkontrolle	Verwendung von Entschäumern
1	Klärschlamm, getrennt gesammelte Bioabfälle und Gewerbeabfälle	55.000 t/a	2 Fermenter á 2,300 m ³	Ja	Einmal pro Jahr	Tenside, tierisches Eiweiß usw.	Verdünnung, Absenkung des Füllstands im Fermenter, Kalkzugabe	Ja
2	Getreideabfälle, Fettabscheiderinhalte	24.000 t/a	Zweiphasig, mesophil	Ja	Immer	unbekannt	Rühren	Nein
3	Rindergülle, Geflügelmist, Fettabscheiderinhalte	28.000 t/a	Zweiphasig, mesophil	Ja	Nur am Anfang	unbekannt	Keine Angabe	Keine Angabe
4	Abfälle und Schlämme aus der Kartoffelverarbeitung	36.500 t/a		Ja	Früher	Nährstoffmangel, org. Überlastung	“Hungerkur”, Einstellung des Fütterungssystems	Nein
5	Bioabfall, Lebensmittelabfälle vom Discounter	50.000 t/a	Gekoppelte Trocken- und Flüssigvergärung	Ja	Einmal	Keine weiteren Informationen verfügbar.		
6	Biogener Abfall	30.000 t/a	Einphasig, thermophil	Keine				
7	Reste aus der Bioethanolproduktion	100.000 t/a	Keine Angabe	Keine (Schaumbildungsprobleme nur in der Entschwefelungsstufe)				
8	Maische aus einer Brennerei, Prozessabwasser aus einer Kartoffelschälanlage	2.400 m ³ /a	Einphasig (1,200 m ³)	Ja	Keine Angabe	Tenside	Keine Angabe	Keine Angabe
9	Geflügelabfälle (Einstreu aus der Geflügelhaltung, Flotationsrückstände und Abwasser aus der Schlachtung), Fett und Pizzareste	12.400 t/a	Zweiphasig, mesophil	Ja	Zweimal pro Jahr	Nährstoffmangel	Zugabe einer Nährstoffmischung	Ja
10	Grünabfälle, Gewerbeabfälle, Bioabfälle	21.000 t/a	Einphasig, mesophil	Ja	Regelmäßig	unbekannt	Verdünnung des Substrats mit Wasser	Ja
11	Lebensmittel, Gewerbeabfälle	46.000 t/a	Keine Angabe	Ja	Einmal	Überfütterung	Verringerung der organischen Belastung	Nein
12	Lebensmittelreste	72.000 t/a	Einphasig, mesophil	Ja	Manchmal	Keine Angabe	Keine Angabe	Keine Angabe
13	Schweinegülle, Reststoffe aus Papierfasern, Schlachthofabfälle	Keine Angabe	Einphasig, mesophil	Ja	Früher	Eiweißhaltige Schlachtabfälle, zellulosehaltige Papierfabrikabfälle	Der Betreiber hat Verschiedenes versucht, aber nichts hat wirklich geholfen.	Keine Angabe
14	Prozessabwässer aus der Papierverarbeitung	Keine Angabe	Keine Angabe	Keine (Schaumbildungsprobleme nur in der Entschwefelungsstufe)				
15	Rindergülle, Bioabfall, Fettabscheiderinhalte	30.000 t/a	Einphasig (2x 800 m ³), thermophil	Ja	Regelmäßig	Fettabscheiderinhalte	Verringerung der Substratbelastung	Keine Angabe

Als Folgen übermäßiger Schaumbildung wurden in der Umfrage die Verstopfung von Gasleitungen in Biogasfermentern, Beschädigung von Messgeräten und Umwälzpumpen und Anhebung von Fermenterdächern und anschließende Undichtigkeiten beschrieben (**Moeller et al., 2010, Moeller und Görsch, 2015b**). In einfachen Fällen fallen 500-600 € für Personal und Entschäumer pro Schaumereignis an (**Moeller et al., 2012**). Es wurden jedoch auch wesentlich schwerwiegendere Fälle beschrieben; so z. B. hatte ein Biogasanlagenbetreiber Kosten in Höhe von 500.000 € für den Austausch eines Fermenterdachs nach einem Schaumereignis angegeben (**Moeller und Goersch, 2015b**).

3.3 Schlussfolgerungen

Eine Umfrage unter Betreibern von Biogasanlagen gibt erste Einblicke in die Vielfalt der Problematik und zeigt die Relevanz der Forschungsfrage. In der hier beschriebenen Befragung wurde deutlich, dass Schaumbildung während des Biogasprozesses ein sehr häufiges Phänomen mit zahlreichen Unbekannten ist, die es zu erforschen gilt. Allerdings bedarf es weiterer umfassender Untersuchungen zur Einschätzung der ökonomischen und ökologischen Auswirkungen der Schaumbildung im Praxisbetrieb. Ebenso wichtig und interessant wäre es, Angaben zu Erfahrungen zur Anlagensicherheit (vor allem *in puncto* Ex-Schutz-Problematik), sowie der Arbeitssicherheit zu erhalten. Diese wurden nicht abgefragt, sind aber logischerweise von Bedeutung, da bei übermäßiger Schaumbildung Extremsituationen entstehen, bei denen Biogas entweichen kann und daher arbeitssicherheitstechnisch richtig gehandelt werden muss.

4 Methoden zur Analyse der Schaumeigenschaften und der Ursachen der Schaumbildung im Biogasfermenter

4.1 Einleitung

Da es sich bei der Schaumbildung im Biogasfermenter um ein komplexes Phänomen handelt, gibt es aktuell noch wenige Methoden zur Erkennung der Ursachen der Schaumbildung und auch keine praktisch anwendbaren Frühwarnindikatoren. Die allgemein bekannte Begasungsmethode (Bubble-Test) wurde für die Bestimmung des Schaumpotenzials und Schaumstabilität von Digestaten aus Biogasanlagen mit geringem Fasergehalt wie Faultürme an Kläranlagen oder Gülleanlagen entwickelt (Moeller et al., 2018a). Diese Methode wurde häufig nur im Labormaßstab zum Beispiel zum Vergleich der Wirkung von Antischaummitteln angewendet. Für Digestate mit hohem Fasergehalt zum Beispiel aus Biogasanlagen, die nachwachsende Rohstoffe verarbeiten, musste diese Methode weiterentwickelt werden. Auch für die vor-Ort Anwendung an Biogasanlagen für die Beurteilung der Effektivität von Antischaummitteln waren Anpassungen notwendig (s. Kapitel 4.2).

Der Bubble-Test liefert nur Informationen zu Eigenschaften des Digestates bzw. der qualitativen Einschätzung der Anwesenheit von oberflächenaktiven Substraten. Eine quantitative Messung der Oberflächenspannung ist beispielsweise mit Hilfe eines Tröpfchenvolumentensiometers möglich und kann zur Analyse der Ist-Situation im Fermenter herangezogen werden (s. Kapitel 4.3). Diese Methode lässt allerdings häufig keine Rückschlüsse auf die Ursachen der Schaumbildung im Digestat ziehen. Aus diesem Grund wurde am UFZ ein Schaumtest entwickelt, mit derer Hilfe es möglich ist, Substrate, deren Vergärung zur übermäßigen Schaumbildung im Fermenter führt, zu identifizieren (s. Kapitel 4.4). Dieser Test bildet die Basis für das kommerzielle Produkt „Leipziger Schaumtester“.

4.2 Bubble-Test (Begasungsmethode)

Das Prinzip der Methode besteht im Einleiten eines Gases in das Digestat oder ein Gemisch aus Digestat und schäumenden flüssigen Substanzen (Moeller et al., 2018a). Bei der Apparatur handelt es sich um eine Säule mit einem Diffusor, der am Boden der Säule angebracht ist (Abbildung 4). Das zu prüfende Gemisch wird in die Säule gefüllt und über einen bestimmten Zeitraum mit einer bestimmten Gasflussrate begast. Nach Beendigung der Begasung kann die Stabilität des Schaums während einer bestimmten Zeit ermittelt werden. Die Parameter und Bedingungen variieren in der Literatur recht stark (Tabelle 2).

Tabelle 2: Parameter und Bedingungen von Belüftungsversuchen in der Literatur.

Referenz	Herkunft der Digestate	Gasflussrate	Gas	Dauer der Begasung	Ermittlung der Stabilität nach der Begasung	Volumen des Gefäßes	Menge des Digestats
		[L/min]		[min]	[min]	[L]	[mL]
Ganidi (2008)	Kläranlage	0,5	Luft	10	60	2	keine Angabe
Zábranská et al. (2002)	Kläranlage	1	Stickstoff	5	5	2	1.000
Boe et al. (2012)	Güllevergärung	0,06	Luft	10	60	keine Angabe	50
Ross and Ellis (1992)	Kläranlage	keine Angabe	Inertgas	keine Angabe	1	2	Nicht spezifiziert
Pagilla et al. (1997)	Kläranlage	5	Luft	10	10	2	1.000
Wongfaed et al. (2015)	Palmölmühle	0,03	Luft	10	60	keine Angabe	50
Subramanian et al. (2015)	Kläranlage	0,015	Luft	keine Angabe	keine Angabe	2	200
Suhartini et al. (2014)	Vergärung von Zuckerrübenschnitzeln	1	Luft	5	33	keine Angabe	100
Blackall und Marshall (1988)	Kultivierung von <i>Nocardia</i>	0,2	Luft	2	10-15	keine Angabe	50
Jiang et al. (2021)	Faultürme in dänischen Kläranlagen	0,5	Luft	10	keine Angabe	0,6	50
Gannavarapu (2021)	Landwirtschaftliche Biogasanlagen	1,3	Luft	5	2	6	1.000

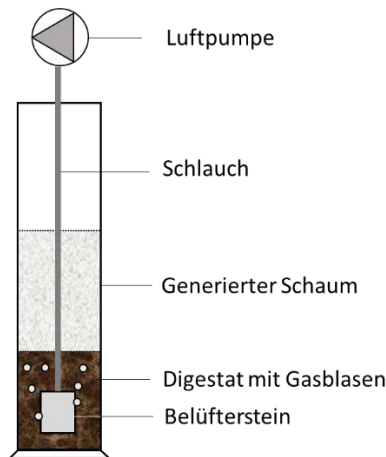


Abbildung 4: Schema des Schaumgenerators zur Bestimmung des Schaumpotenzials im Digestat.

Am UFZ wurde ein Bubble-Test entwickelt, der es ermöglicht, die Eignung eines Antischaummittels für ein bestimmtes Digestat direkt vor Ort zu testen (Gannavarapu, 2021). Die Testapparatur beinhaltet einen 6-L-Behälter aus Plexiglas und eine Aquariumluftpumpe mit einem Belüfterstein. Zur Überprüfung der Effektivität eines Antischaummittels wird zunächst 1 L des zuvor gesiebten Digestats 5 min mit Luft begast, um Schaum zu erzeugen (Tabelle 2). Die Schaumneigung wird dann als Höhe des Schaums nach der Begasung, bezogen auf das Gewicht der Trockensubstanz nach 5 Minuten Begasung, ermittelt [1] (Ganidi, 2008, **Moeller und Görsch, 2020a**).

$$\text{Schaumneigung} = \frac{h_{\text{Schaum}}[\text{mm}]}{m_{\text{TS}}[\text{g}]} \quad [1]$$

Danach werden zwei Tropfen des zu testenden Antischaummittels hinzugefügt und nach weiteren 2 min wird die Reduzierung der Schaumhöhe ermittelt. Durch die Bestimmung der Schaumhöhe nach erneutem Begasen wird die Nachhaltigkeit der Wirkung des Antischaummittels überprüft. Die Schaumreduktion in Bezug auf das Volumen wird mit Hilfe der Gleichung [2] berechnet (Gannavarapu, 2021).

$$\text{Schaumreduktion} = \left(1 - \frac{V_{\text{ASM}} - V_0}{V_{\text{B}} - V_0}\right) * 100 \text{ [%]} \quad [2]$$

(V_0 = Anfangsvolumen des Digestates im Schaumgenerator, V_{B} = Volumen des Digestates nach der initialen Begasung, V_{ASM} = Volumen des Digestates nach der Zugabe des Antischaummittels und erneuter Begasung)

Die Vorteile dieser Testmethode sind, dass a) nur geringe Mengen einer Testung im gesamten Biogasfermenter, b) die Methode schnell ist und innerhalb kurzer Zeit mehrere Antischaummittel auf ihre Eignung getestet werden können, und c) der Test an sich sehr einfach ist und alle Komponenten frei verfügbar sind. Eine Einarbeitung des Personals entfällt. Dieser angepasste Bubble-Test wurde mit Hilfe von vor-Ort-Tests an Biogasanlagen erfolgreich getestet.

4.3 Bestimmung der Oberflächenspannung

Wie in Kapitel 2 bereits erwähnt wurde, ist meistens für die Schaumbildung das Vorhandensein oberflächenaktiver Stoffe notwendig. Oberflächenaktive Stoffe lagern sich an den Grenzflächen zwischen Gas und Flüssigkeit ab und verringern die Oberflächenspannung. Die Oberflächenspannung ist das Verhältnis zwischen der Kraft zur Vergrößerung der Oberfläche und der Oberflächenveränderung und ist abhängig von Temperatur und Druck (Kopplow, 2006). Wasser hat eine Oberflächenspannung von 72,7 mN/m (bei 20 °C) und der Grad der Verringerung der Oberflächenspannung lässt Rückschlüsse auf das Vorhandensein oberflächenaktiver Substanzen in einer Lösung zu (Moeller et al., 2018a).

Für den Nachweis der Oberflächenspannung in Flüssigkeiten stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, z. B. Ring-, Platten- oder Ablösemethoden. In der Erforschung zu Schaumbildung im Biogasprozess erfolgte mit Hilfe der Wilhelmy-Platten-Methode (Blackall und Marshall, 1988; Ganidi, 2008), der Blasendruckmethode (Kopplow, 2006) und der Tropfenvolumenmethode (**Moeller und Görsch, 2020c**, Moeller et al., 2018a).

Das Prinzip der Wilhelmy-Platten-Methode basiert auf der Messung der zeitlichen Änderung der Oberflächenspannung beim Eintauchen und Herausheben einer Papierplatte in und aus der Lösung mit einem Tensiometer (Ganidi, 2008). Hierfür muss die gemessene Flüssigkeit unbedingt zellfrei sein. Aus diesem Grund wird nur der Überstand nach einer durchgeführten Zentrifugation verwendet (Moeller et al., 2018a). Bei der Blasendruckmethode wird ein Blasetensiometer verwendet. Der Luftstrom wird durch eine Kapillare in die Flüssigkeit geleitet, wobei dabei eine Blase entsteht. Der Radius dieser Blase ist umgekehrt proportional zum Luftdruck (Moeller et al., 2018a). Der Luftdruck, der für die Erzeugung einer Blase erforderlich ist, ist wiederum proportional zur Oberflächenspannung (Kopplow, 2006). Das Tropfenvolumentensiometer misst das Volumen eines zellfreien Flüssigkeitstropfens, der aus einer Kanüle freigesetzt wird. Der Tropfen fällt ab, nachdem er ein kritisches Volumen erreicht hat. Dieses kritische Volumen ist proportional zur Oberflächenspannung der Flüssigkeit (Lauda, 1993, Moeller et al., 2018a).

Die Messung der Oberflächenspannung von Digestaten aus Biogasanlagen als Methode zur vor-Ort-Bestimmung der Schaumneigung des Fermenterinhalt ist aufgrund der Notwendigkeit der Anschaffung von speziellen Geräten (Zentrifuge, Tensiometer) nicht geeignet. Nichtsdestotrotz können diese Methoden im Laborbetrieb genutzt werden. So wurde am UFZ mit Hilfe des Tropfenvolumentensimeters die Oberflächenspannung der Zentrifugate der Inhalte der drei Faultürme des Klärwerks Leipzig-Rosental über einen Zeitraum von sechs Monaten dokumentiert (**Moeller et al., 2018**), wobei während der ersten drei Monaten in allen drei Faultürmen starke Schaumbildung zu verzeichnen war, die durch die Zugabe eines Antischaummittels bekämpft wurde. In Abbildung 5 sind der

Entschäumerverbrauch und die Oberflächenspannung der Digestate und des Schaums aus einem Gärrest-Sammelbehälter dargestellt. Die Oberflächenspannung lag zu Anfang der Beprobung im Bereich von 45 mN/m, was auf die Anwesenheit von oberflächenaktiven Substanzen hindeutet. Mit zunehmender Abnahme der Schaumintensität (zu sehen in der Abnahme des Entschäumerverbrauchs) stieg die Oberflächenspannung bis zu Werten zwischen 55 und 64 nM/m an. Die Oberflächenspannung des Schaums war stets niedriger als die der Digestate.

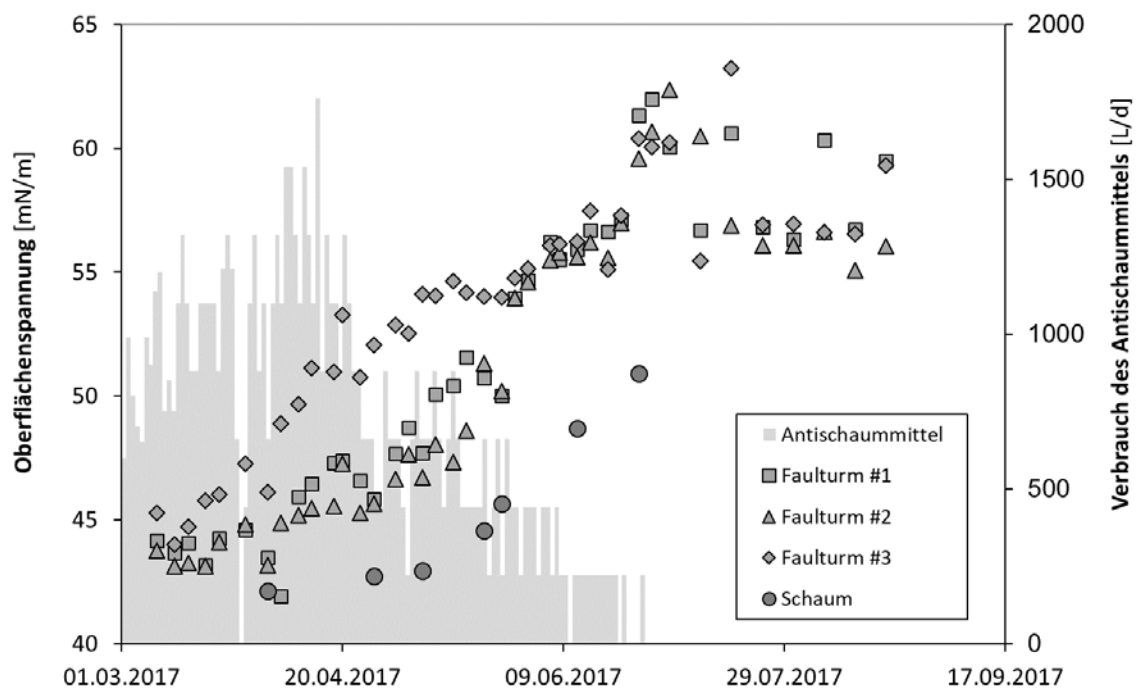


Abbildung 5: Oberflächenspannung der Zentrifugate von Digestaten aus drei Faultürmen und Schaum aus einem Gärrest-Sammelbehälter im Vergleich zum gesamten täglichen Verbrauch des Antischaummittels in der Kläranlage Leipzig-Rosental (Moeller et al., 2018, Wappler 2018).

4.4 Schaumtest

Zur Ermittlung der Schaumneigung von Substraten in Biogasanlagen, die erneuerbare Energien und biogene Abfälle verwerten, wurde am UFZ ein Schaumtest entwickelt, der die Basis für den Leipziger Schaumtester bildet (Moeller et al., 2020b; UFZ, 2013). Der Leipziger Schaumtester ist ein Testset, der in der Praxis leicht zu handhaben ist. Er besteht aus einem gehärteten 1-L-Glas mit einem Deckel, der mit einer Schaumfalle versehen ist (Abbildung 6).

Für den Schaumtest werden 500 mL eines kurz zuvor gesiebten Digestates mit 2 % (w/w) Substrat (bezogen auf den Trockensubstanzgehalt) vermischt und im Leipziger Schaumtester bei konstanter Temperatur ohne Durchmischung vergoren. Die Testdauer beträgt bis zu 24 Stunden, je nach Stagnation der Schaumexpansion. Die Versuchstemperatur wird

entsprechend der Betriebsart des anaeroben Reaktors, aus dem das Digestat stammt, gewählt. Die Intensität der Schaumbildung wird nach Gleichung [3] berechnet.

$$\text{Intensität der Schaumbildung [\%]} = \frac{V_{\text{Schaum}} [\text{mL}]}{V_{\text{Gesamt}} [\text{mL}]} * 100 [\%] \quad [3]$$

Mit dem Leipziger Schaumtester ist es ohne Aufwand und spezielle Vorkenntnisse möglich, Substrate vor Ort auf ihre Neigung zu untersuchen, Schaumbildung im Biogasfermenter zu verursachen. Dabei soll erkennbar werden, wie stark die geplante neue Komponente im Futtermix zur Schaumbildung neigt, und ob dieser Einsatzstoff entweder gar nicht oder zunächst besser nur in geringen Dosen zugesetzt werden sollte.

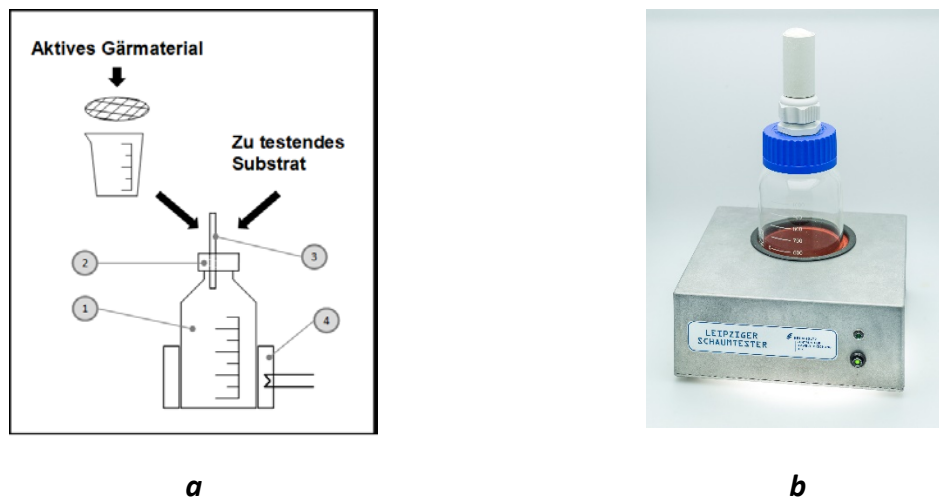


Abbildung 6: Testset zur Bestimmung der Schaumneigung von Substrat für Biogasanlagen, a) ein Schema: 1. Testflasche, 2. Deckel mit einer Schaumfalle, 3. Schaumfalle, 4. Heizelement; b) das Produkt Leipziger Schaumtester (Foto: André Künzelmann, UFZ).

In **Moeller et al. (2015b)** werden die Versuche zur Spezifikation und Anwendung des Schaumtests vorgestellt. In Abbildung 7 wird beispielsweise der Effekt der Substratdosierung auf die Schaumbildung bei der Vergärung von Zuckerrübensilage mit einem Trockensubstanzgehalt (TS) von 21,2 % dargestellt. Zu niedrige Dosierung von 10 g Feuchtmasse (entspricht einer organischen Belastung von 3,7 g oTS/L) führte zu einer schwachen Schaumbildung, während eine zu hohe Dosierung von 100 g Feuchtmasse (45,3 g oTS/L) das Reaktionsgemisch zum Überschäumen brachte. Aus diesem Grund wurde für die Schaumtests die Menge des Ausgangssubstrates von 10 g Substrat (bezogen auf TS) auf 500 mL Reaktionsvolumen festgelegt. Diese optimale Substratmenge wurde auch für weitere Substanzen, wie Eiweißpulver und Pektin, bestätigt. Die weiteren festgelegten Bedingungen für den Schaumtest sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

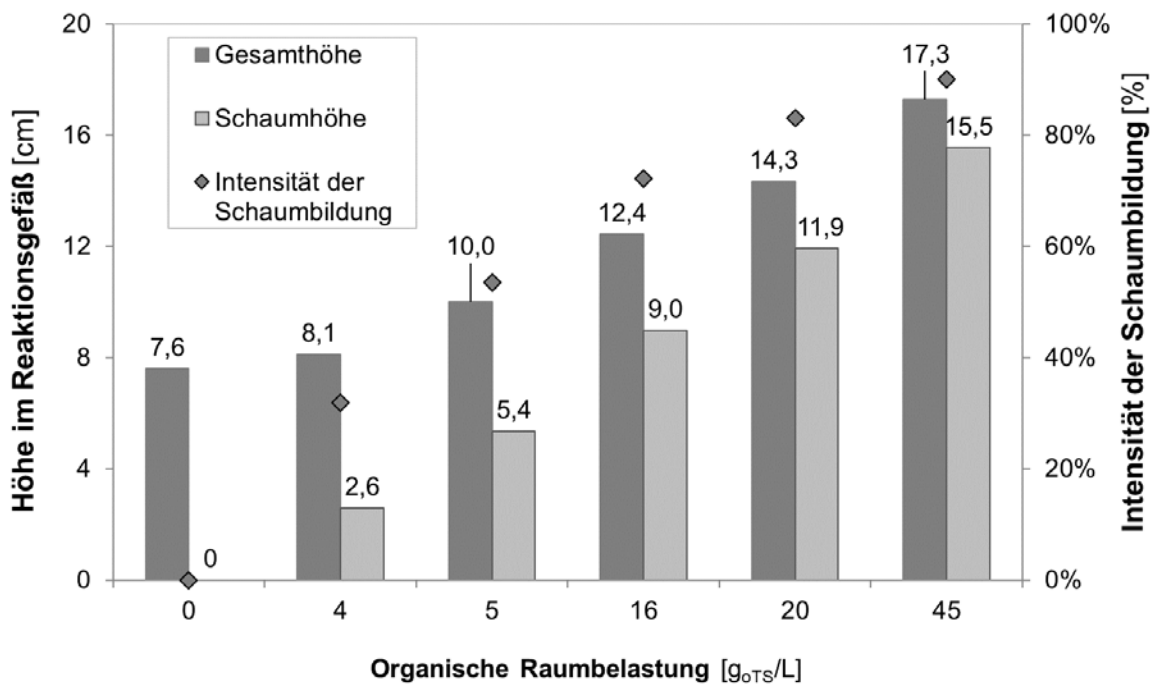


Abbildung 7: Schaumgehalt in Schaumtests zur Bewertung des Einflusses der Substratdosierung auf die Schaumbildung.

Versuchsanordnung: Substrat: Zuckerrübensilage (TS = 21,2 %, oTS = 82 % TS), Digestat (TS = 6,8 %, oTS = 79 % TS), 37 °C, Versuchsdauer: 20 h (Moeller et al., 2015b).

Der Schaumtest wurde zur Entwicklung verschiedener Strategien zur Schaumunterdrückung und -vermeidung verwendet, wie in Kapitel 6 beschrieben ist.

Tabelle 3: Zusammenfassung der Ergebnisse der Entwicklung eines Schaumtests zur Beurteilung der Schaumneigung von Substraten (Moeller et al., 2015 b).

Volumen des Gefäßes zur Durchführung eines Schaumtests	1 L, der untere Teil enthält ein temperaturgeregeltes Digestat-Substrat-Gemisch, der obere Teil ermöglicht die optische Beurteilung einer möglichen Schaumbildung
Volumen der Reaktionsmischung und Dosierung des Substrats	Masse des Substrats ist der Quotient aus 1.000 geteilt durch den TS-Gehalt des Substrats in %, aufgefüllt mit Gärsubstrat bis zu einem Volumen von 500 mL
Herkunft des Digestats	aus dem zu modellierenden Biogasreaktor, vorzugsweise frisch; Digestat sollte keine Partikel größer als 10 mm enthalten; für selbstschäumende Digestate wird ein Kontrollgefäß ohne Substratzugabe empfohlen
Versuchsdauer	von 8 h bis 24 h
Versuchstemperatur	gleich der Prozesstemperatur des Biogasreaktors, aus dem das Digestat stammt

4.5 Schlussfolgerungen

Für die experimentelle Erforschung der Schaumbildung in Biogasanlagen wurden Methoden entwickelt, die es ermöglichen, die Schaumbildung zu provozieren und somit den Prozess der Entstehung an sich untersuchen zu können. Mit Hilfe dieser Testmethoden war es später letztendlich auch möglich, Maßnahmen gegen die Bildung von Schaum während des Biogasbildungsprozesses zu entwickeln (s. Kapitel 6). Die Methoden wurden so weiterentwickelt, dass sie auch in der Praxis Anwendung finden.

Für vertiefende Untersuchungen wäre die Möglichkeit der Messung von Viskosität im kleinen Maßstab von Vorteil. Die bestehenden Methoden der Viskositätsmessungen sind entweder auf große Anlagen ausgelegt oder eignen sich nicht für Messung in faserhaltigem Material, wie es bei Digestaten häufig der Fall ist. Hier besteht weiterhin Forschungsbedarf.

5 Ursachen der Schaumbildung in Biogasanlagen

5.1 Einleitung

Die Suche nach Ursachen der Schaumbildung im Biogasfermenter ist häufig nicht nur für Biogasanlagenbetreiber, sondern auch für Beraterfirmen und biologische Services, eine große Herausforderung. Im Allgemeinen unterscheiden sich die Ursachen für die Schaumbildung in landwirtschaftlichen und abfallwirtschaftlichen Biogasanlagen von den Ursachen in einem anaeroben Fermenter einer Kläranlage grundlegend (Moeller et al., 2018a). Der Grund dafür liegt in den unterschiedlichen Betriebsweisen, vor allem in Bezug auf Konzentration und Beschaffenheit der Substrate, aber auch im Temperaturregime und der Rührwerkkonstellation. Dabei ist die Schaumbildung in Faultürmen von Kläranlagen gut untersucht und es gibt zahlreiche Publikationen zu dieser Thematik. So wurden Hinweise auf die Auswirkungen der Durchmischung des Fermenters (Pagilla et al., 1997) und der Temperatur im Faulturm (Zábranská et al., 2002) auf die Schaumbildung im Gärprozess beschrieben. Auch die Anwesenheit von bestimmten Mikroorganismen spielt vor allem in Faultürmen von Kläranlagen für die Schaumbildung eine bedeutende Rolle. Dabei handelt es sich vornehmlich um fadenförmige Mikroorganismen, wie *Microthrix parvicella* und *Nocardia amarae*, die die Gasblasen stabilisieren. Kürzlich wurden aber auch mehrere neue Arten aus den Gattungen *Candidatus Brevefilum* und *Tetrasphaera*, den Familien ST-12K33 und Rikenellaceae sowie der archaischen Gattung *Methanospirillum*, die in Verbindung mit der Schaumbildung in Faultürmen stehen, nachgewiesen (Jiang et al., 2021). Darüber hinaus gibt es Hinweise auf die Verbindung der Anwesenheit von Mikroorganismen des *Clostridium*-Clusters, des *Sporolactobacillus* und der *Bacteroides* mit Schaumereignissen in Labor-Batch-Versuchen (Duan et al., 2021). Darüber hinaus zeigte eine Korrelationsanalyse der physikochemischen Analysen mit der Menge des zugegebenen Entschäumers einen starken Zusammenhang der Intensität der Schaumbildung mit der Gesamt-Phosphor-Konzentration des Faulschlammes der Faultürme im Klärwerk Rosental in Leipzig (Abbildung 8) (Wappler, 2018).

Die unterstützende Wirkung hoher organischer Belastung auf die Schaumbildung wurde von mehreren Forschern beschrieben (siehe Ganidi et al. (2009) für einen Überblick). **Moeller et al. (2015b)** beobachteten im Batchversuch mit Zuckerrübensilage bereits bei 3,7 g oTS/(L*d) eine Schaumbildung mit einem Schaumgehalt von 32 % in Schaumtests (Abbildung 7). Allerdings zeigten die Autoren auch, dass mit unterschiedlichen Substraten aber derselben organischen Belastung von 5 g oTS/(L*d) eine unterschiedlich starke Schaumbildung erreicht wurde. Während eine Vergärung von Eiweißpulver zum Überschäumen führte, bildeten Pektin und Stärke zwar auch eine Schaumschicht, zeigten aber eine wesentlich geringere Schaumneigung (25 Vol.-% Schaumgehalt bei Pektin, 9 Vol.-% Schaumgehalt bei Stärke). Diese

Beobachtung führte zu vertiefenden Untersuchungen, die in Kapiteln 5.2 und 5.3 beschrieben sind.

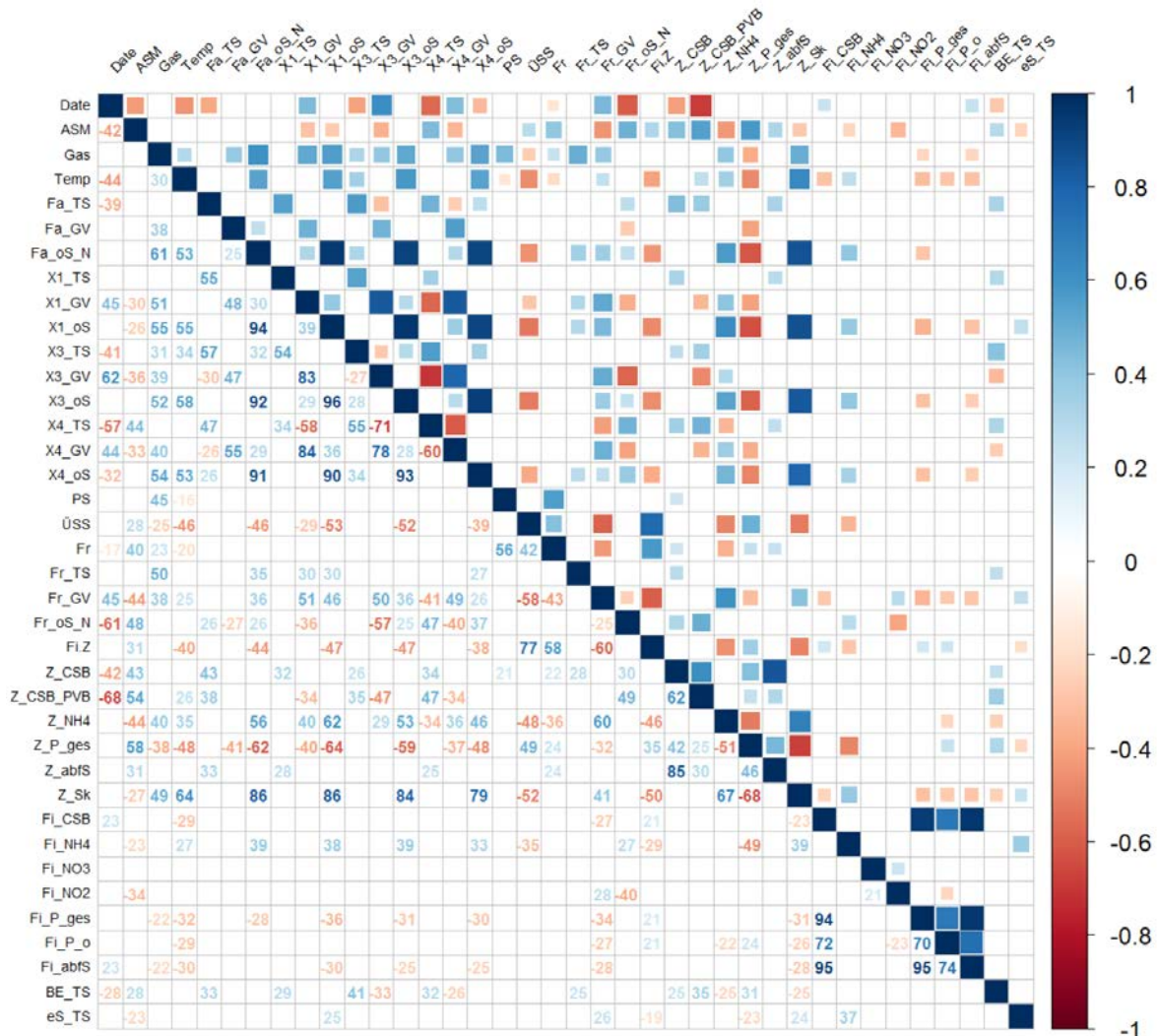


Abbildung 8: Korrelogramme zur Analyse der physiko-chemischen Eigenschaften des Faulschlammes der Faultürme des Klärwerks Rosental aus dem Zeitraum von 01.05.2016 bis 31.12.2016 mit Hilfe einer Korrelationsmatrix (Wappler, 2018).

Angezeigte Werte und Quadrate bestehen den Test mit einem Signifikanzniveau (p -values) von 0,05. Unter der Diagonalen befinden sich die Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman in Prozent, oberhalb der Diagonale sind Quadrate mit der jeweiligen Farbe (siehe Skala rechts) und Größe proportional zu dem Korrelationskoeffizienten.

Legende: ASM = Menge des Antischaummittels [L/d], Gas = tägliche Biogasproduktion [Nm³/d], Temp = mittlere Temperatur der Faulung [°C], Fa_TS = Trockensubstanzgehalt im Faulschlamm [g/L], Fa_GV = Glühverlust im Faulschlamm [%], Fa_oS_N = Konzentration der organischen Säuren (nach Nordmann) im Faulschlamm [mg/L], x_TS = TS im Zirkulationsschlamm des Faulbehälters x (x = 1,3,4) [g/l], x_GV = Glühverlust im Zirkulationsschlamm des Faulbehälters x (x=1,3,4) [%], x_oS = Konzentration der organischen Säuren im Zirkulationsschlamm des Faulbehälters x (x=1,3,4) [mg/L], PS = tägliche Menge des Primärschlammes [m³/d], ÜSS = tägliche Menge des Überschussschlammes [m³/d], Fr = tägliche Menge des Frischschlammes [m³/d], Fr_TS = Trockensubstanzgehalt des Frischschlammes [g/L], Fr_GV = Glühverlust des Frischschlammes [%], Fr_oS_N = Konzentration der organischen Säuren im Frischschlamm [mg/L], Fi_Z = tägliche Menge des Filtrats/Zentrats [m³/d], Z_CSB = chemischer Sauerstoffbedarf des Zentrats [mg/L], Z_CSB_PVB = CSB des Zentrats nach Probenvorbereitung [mg/L], Z_NH4 = Ammonium-N-Konzentration im Zentrat [mg/L], Z_P_ges = Phosphat-P-Konzentration (gesamt) im Zentrat [mg/L], Z_abfS = abfiltrierbare Stoffe im Zentrat [mg/L], Z_Sk = Säurekapazität des Zentrats [mmol/L], Fi_CSB = chemischer Sauerstoffbedarf des Filtrats [mg/L], Fi_NH4 = Ammonium-N-Konzentration im Filtrat [mg/L], Fi_NO3 = Nitrat-N-Konzentration im Filtrat [mg/L], F_NO2 = Nitrit-N-Konzentration im Filtrat [mg/L], Fi_P_ges = Phosphat-P-Konzentration (gesamt) im Filtrat [mg/L], Fi_P_o = ortho-Phosphat-P-Konzentration im Filtrat [mg/L], Fi_abfS = abfiltrierbare Stoffe im Filtrat [mg/L], BE_TS = Trockensubstanzgehalt (Mittelwert) des Schlammes am Bändeindicker [%], eS_TS = Trockensubstanzgehalt (Mittelwert) des entwässerten Schlammes [%]

5.2 Zuckerrübe als Ursache der Schaumbildung in Biogasanlagen

Moeller et al. (2015c) untersuchten die Schaumbildung in zwei Praxisbiogasanlagen, die saisonal Zuckerrübe vergoren haben, wobei eine starke Schaumbildung entwickelte (BGA 1) und eine nicht zum schäumen neigte (BGA 2). Die Betriebsdaten der beiden Biogasanlagen sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Betriebliche Daten einer schäumenden Biogasanlage (BGA 1) und einer schaumfreien Biogasanlage (BGA 2) (Moeller et al., 2015c)

Biogasanlage	BGA 1	BGA 2
Schaumbildung im Fermenter	Ja	Nein
Rührzyklus in schaumfreien Phasen	6 min/h	kontinuierlich
Rührwerke	horizontales Paddelrührwerk und Tauchmotorrührwerk	horizontales Paddelrührwerk
Beschickungszyklus	1x pro Stunde	kontinuierlich
Trockensubstanzgehalt des Digestats	7 %	13 %
Substratzusammensetzung	30 m ³ /d Rindermist, 8 t/d Zuckerrüben, 6 t/d Maissilage, 1 t/d Grassilage, 2 t/d Restfutter, 1,5 t/d Weizenschrot	49 t/d Maissilage, 32 t/d Pflanzensilage, 20–40 t/d Zuckerrüben, 16 t/d Grassilage, 3 t/d Roggenschrot
Zusatzstoffe	keine	Harnstoff, Eisenhydroxid
Vorbehandlung von Zuckerrüben	Einmal pro Woche mit einem Holzhäcksler zu Brei verarbeitet	Nach Bedarf mit Maschinen der Zuckerindustrie grob zerkleinert.

Es wurden fünf Hauptaspekte identifiziert, die die unterschiedliche Schaumneigung in den beiden Fermentern erklären können:

1. Durchmischung der Digestate: Bei starker Schaumbildung im Fermenter hilft bei der Biogasanlage BGA 1 nur kontinuierliches Rühren. Bei der Biogasanlage BGA 2 rührt das Horizontal-Flügelrührwerk dauerhaft mit 50 % seiner Nennleistung unabhängig von der Substratmischung.
2. Fermenterform: Die nicht schäumende BGA 2 hatte eine quadratische, horizontal „liegende“ Form. BGA 1 hatte eine runde Form, die für landwirtschaftliche Biogasanlagen in Deutschland typisch ist.
3. Fütterungszyklus: Die Stoßbelastung bei BGA 1 unterstützt die Überlastung vor allem durch die leicht verdauliche Saccharose in der Zuckerrübe. Die Analysedaten von Proben aus dem

Fermenter von BGA 1 während der Zuckerrübenvergärung während und nach einem Schaumereignis zeigten unterschiedliche Konzentrationen an flüchtigen organischen Säuren. Die Konzentrationen von Acetat und Propionat waren während des Schaumereignisses signifikant höher als danach (451 mg/L Acetat und 98 mg/L Propionat während der Schaumbildung vs. 22 mg/L Acetat und > 1 mg/L Propionat in Phasen ohne Schaum). Auch die Ammonium-Stickstoff-Konzentration des Digestates war mit 1,19 g/L während des Schäumens höher als danach (0,77 g/L).

4. Substratvorbehandlung: Beide Biogasanlagen unterschieden sich hinsichtlich des Zuckerrübenaufschlusses vor der Beschickung des Fermenters. Die Wirkung der Zuckerrübenvorbehandlung auf die Schaumbildung wird im Kapitel 6.4 näher erläutert.
5. Vorhandensein von Substanzen, die die Schaumbildung bei der Zuckerrübenvergärung hemmen oder begünstigen: Die Wirkung von Dolomitkalk, der in Rindergülle von BGA 1 vorhanden war, sowie von Harnstoff, der in BGA 2 verwendet wird, auf die Zuckerrübenschaumbildung wurde weiter untersucht. Die Experimente zur Wirkung von Harnstoff auf die Schaumentstehung werden in Kapitel 6.3 näher vorgestellt.

Um die genaue Ursache der Schaumbildung bei Vergärung von Zuckerrübe zu ermitteln, wurden Schaumtests bei einer organischen Raumbelastung von 14,8 g oTS/L durchgeführt (**Moeller et al., 2015c**). Die Autoren trennten die Schaumschicht vom restlichen Digestat und analysierten beide Fraktionen auf die Anwesenheit von oberflächenaktiven Substanzen. Die Schaumschicht enthielt eine 4,4-fach höhere Kohlenhydratkonzentration als das Digestat, im Schaum wurde jedoch im Vergleich zum Digestat eine nur 2,2-fach höhere Rohprotein-konzentration ermittelt (Tabelle 5). Im Gegensatz dazu waren die Konzentrationen von flüchtigen organischen Säuren im Digestat höher als im Schaum.

In weiteren Schaumtests wurde nachgewiesen, dass sowohl Saccharose als auch Pektin einen additiven Effekt auf die Schaumbildung zeigten (**Moeller et al., 2015c**): eine Mischung dieser beiden Substanzen führte in Schaumtests zu 41 % mehr Schaum als bei Schaumtests mit nur Saccharose oder Pektin. Neben Saccharose zeigten auch zweiwertige Kationen (Calcium und Magnesium) eine unterstützende Wirkung auf die Intensität der Schaumbildung in Schaumtests mit Pektin oder Zuckerrübensilage. Durch Zugabe von Calciumchlorid zu Zuckerrübensilage erreichte die Intensität der Schaumbildung in Schaumtests $52,8 \pm 2,5$ Vol.-%, in Kombination von Zuckerrübensilage mit Magnesiumchlorid lag diese sogar bei $57,2 \pm 1,7$ Vol.-%. Die Intensität der Schaumbildung bei alleiniger Zuckerrübensilage war $48,2 \pm 0,0$ Vol.-%. Im Fall einer Zugabe von Salzen mit einwertigen Kationen (Kochsalz und Kaliumsulfat) erreichte die Intensität der Schaumbildung ähnliche Werte von $47,9 \pm 2,3$ % (bei Kochsalz) und $47,8 \pm 1,8$ Vol.-% (bei Kaliumsulfat). Die Zugabe von Ammoniumchlorid bewirkte allerdings sogar eine deutliche Verringerung der Intensität der Schaumbildung in den Testflaschen auf

Werte von 40 ± 2 Vol.-%. Dieser Effekt wurde weitergehend untersucht (s. Kapitel 6.3). Der Digestat in der Kontrolltestflasche ohne Zugabe von Substrat oder anderen Substanzen zeigte kein Schäumen.

Tabelle 5: Analysedaten von Digestaten und Schäumen aus drei parallelen Schaumtests mit 40 g Zuckerrübensilage ($n = 3$) und Digestat aus dem Kontrollkolben ohne Zusatz von der Zuckerrübensilage (Kontrolle) (Moeller et al., 2015c).

	Kontrolle	Schaumtests	
		Digestat	Schaum
Kohlenhydrate [g/L]	0,88	$0,97 \pm 0,03$	$4,28 \pm 0,37$
Pektin [g Galakturonsäure /kg]	0,37	$0,50 \pm 0,00$	$0,71 \pm 0,09$
Gesamtstickstoff [g/L]	2,95	$2,82 \pm 0,11$	$3,85 \pm 0,20$
NH ₄ -N [g/L]	1,91	$1,56 \pm 0,36$	$1,11 \pm 0,12$
Rohprotein [g/L]	6,45	$7,86 \pm 1,74$	$17,2 \pm 1,73$
Acetat [g/L]	0,11	$4,25 \pm 0,26$	$2,24 \pm 0,66$
Propionat [g/L]	0,08	$3,27 \pm 0,11$	$1,86 \pm 0,46$
Butyrat [g/L]	0,03	$0,84 \pm 0,06$	$0,45 \pm 0,17$
Kalzium [g/L]	0,08	$0,25 \pm 0,02$	$0,20 \pm 0,04$
Magnesium [g/L]	0,15	$0,26 \pm 0,01$	$0,24 \pm 0,01$
Kalium [g/L]	2,82	$2,79 \pm 0,08$	$2,56 \pm 0,02$

Die Schaumbildung ist unter anderem ein Hinweis auf einen unausgewogenen Biogasprozess. Hier kann unter Umständen auch das ungünstige C/N-Verhältnis im Substrat eine Rolle spielen. Moeller et al. (2015c) sowie Moeller und Zehnsdorf (2017) ermittelten in Eluaten von geschnittenen Zuckerrüben ein C/N-Verhältnis von bis zu 30 (Moeller et al., 2015c), bei fein geraspelten Zuckerrüben sogar von bis zu 48 (Moeller und Zehnsdorf, 2017). Suhartini et al. (2014) identifizierten ein C/N-Verhältnis von etwa 25 als günstig für die Vergärung von Zuckerrübenschnitzeln. Es ist davon auszugehen, dass sich eine Co-Vergärung der Zuckerrübe und ihrer Derivate mit einem stickstoffreichen Substrat oder die Zugabe eines stickstoffreichen Supplements günstig auf die Stabilität des Biogasprozesses auswirken sollte (Brooks et al., 2008; Moeller und Zehnsdorf, 2017) (s. Kapitel 6.3).

5.3 Getreide als Ursache für Schaumbildung in Biogasanlagen

Getreidekorn erreichte 2020 in Deutschland einen Anteil von 2,1 % der nachwachsenden Rohstoffe für die Biogasproduktion (FNR, 2020). Allerdings kann die Nutzung von Getreide zu Störungen des Biogasprozesses führen, die sich mit Schaumbildung äußern. Die Eigenschaften des während der Getreidevergärung produzierten Schaums unterscheiden sich je nach verwendeter Getreideart. Moeller et al. (2016) testeten sechs Getreidearten in Schaumversuchen. Die höchste Schaumschicht wurde mit Weizen und Triticale erreicht, Roggen und

Gerste zeigten glattere Schaumschichten. Hafer produzierte einen sehr instabilen Schaum, und Hirse zeigte keine Schaumneigung während der Vergärung. Die bei der Vergärung von Weizen und Triticale entstandenen Schäume enthielten höhere Mengen an Rohprotein als die entsprechenden Digestate unter der Schaumphase (Weizen: 23,6 g/L Rohprotein im Schaum und 17,7 g/L Rohprotein im Digestat; Triticale: 17,4 g/L Rohprotein im Schaum und 15,7 g/L im Digestat, Tabelle 6). Die bei der Vergärung von Roggen und Gerste produzierten Schäume enthielten im Vergleich zu ihren Digestaten mehr Kohlenhydrate (Roggen: 2,47 g/L Kohlenhydrate im Schaum und 1,81 g/L im Digestat; Gerste: 2,50 g/L Kohlenhydrate im Schaum und 1,87 g/L im Digestat). Dies deutet darauf hin, dass bei der Vergärung von Getreide je nach Getreideart unterschiedliche Substanzen bei der Schaumentstehung eine Rolle spielen. In weiteren Versuchen zeigte auch der Mahlgrad des Getreides einen deutlichen Effekt auf die Intensität der Schaumbildung, in diesem Fall allerdings unabhängig von der Getreideart (s. Kapitel 6.4).

Tabelle 6: Analytische Daten von Digestaten (D) und Schäumen (S) aus den Schaumversuchen mit gemahlenem Getreide (Moeller et al., 2016).

Versuchsdurchführung: Schaumtests, 10 g Getreide + 490 g Digestat, 37 °C, Versuchsdauer: 23 h.

Getreideart	Mahlgrad [mm]	Rohprotein [g/L]		Kohlenhydrate [g/L]		Acetat [g/L]	Propionat [g/L]	Butyrat [g/L]
		D	S	D	S	D	D	D
Weizen	4	14,7	17,6	1,59	1,53	1,67	0,22	0,06
	0,5	17,7	23,6	1,92	1,81	4,87	0,96	0,78
Triticale	4	17,9	20,4	1,79	1,56	2,24	0,43	0,07
	0,5	15,7	17,4	2,11	1,31	5,32	1,12	0,60
Roggen	4	17,8	17,1	1,72	1,70	2,47	0,43	0,18
	0,5	19,3	18,6	1,81	2,05	4,65	1,13	0,49
Gerste	4	19,3	16,6	1,87	2,50	0,93	0,09	<0,001
	0,5	20,7	19,6	2,12	2,19	4,46	0,80	0,44
Hafer	4	18,6	-	1,79	-	2,99	0,52	0,26
	0,5	23,5	-	1,66	-	5,95	1,14	0,39
Hirse	4	20,1	-	1,06	-	0,15	0,00	<0,001
	0,5	19,0	-	1,35	-	0,82	0,08	0,04

5.4 Schlussfolgerungen

In der Praxis ist es meist nicht möglich Proben von Schaum aus einem Biogasfermenter zu erhalten, um die Beschaffenheit des Schaums zu untersuchen und Rückschlüsse auf die Ursachen des Schäumens zu ziehen. Dank des entwickelten Schaumtests (Kapitel 4.4) konnten Proben von Schaum gesammelt und analysiert werden. Es wurde nachgewiesen, dass im Fall von Zuckerrübe Kohlenhydrate, vor allem Pektin, den Schaum stabilisieren. Bei Getreide spielten je nach Getreideart entweder Kohlenhydrate oder Proteine eine wesentliche Rolle.

Diese Erkenntnisse sind von Bedeutung für das Verständnis des Prozesses der Schaumentstehung, aber auch für die Entwicklung von Maßnahmen gegen das Schäumen während der Co-Vergärung von diesen Substraten. Die Erforschung der Ursachen wurde hier sehr stark auf Substrate fokussiert. Die Wirkung von weiteren Faktoren wie die Geometrie des Fermenters und/oder der Rührwerke, die Optimierung der Entgasung des Digestates, aber auch der Effekt von Temperatur auf die Intensität der Schaumbildung sollten auch unbedingt erforscht werden.

6 Maßnahmen gegen Schaumbildung in Biogasanlagen

6.1 Einleitung

Kommt es zu starker Schaumbildung im Biogasfermenter, die einen Einfluss auf den Betrieb einer Biogasanlage hat, müssen Gegenmaßnahmen getroffen werden. Die Methoden zur Schaumbekämpfung in biotechnologischen Prozessen werden im Allgemeinen in mechanisch-physikalische (Unterrühren des Schaums, Einsatz von Ultraschall, Bewässerung), thermische (Kontakt mit den Heizflächen oder Dampf) oder chemische Maßnahmen (Einsatz von Entschäumern oder Puffersubstanzen) unterteilt (Moeller et al., 2018a). Im Biogasbetrieb kommen mechanisch-physikalische und chemische Maßnahmen zum Einsatz.

Zu den mechanischen Maßnahmen gehören der Einsatz von Rührwerken zur Durchmischung des Schaums, sowie mechanische Einwirkungen auf die schäumende Schicht, wie z. B. durch Besprühen mit Wasser (Moeller et al., 2018a). Beim Rühren werden in der Regel Änderungen der Ausrichtung der Rührwerke, der Mischintervalle oder der Propellerdrehzahl vorgenommen, um den Schaum unter Kontrolle zu bringen (Lindorfer und Demmig, 2006). In der Praxis ist üblich, den Fermenterinhalt mit einem Zyklus von mehreren Minuten pro Stunde in Zeiten des stabilen Betriebs zu rühren. Die Ausweitung des Rührzyklus von 6 min pro Stunde auf kontinuierliche Durchmischung wurde von einem Biogasanlagenfahrer als einzige funktionierende Maßnahme gegen Schaumbildung in einem Fermenter, die durch saisonale Co-Vergärung von Zuckerrüben verursacht war, berichtet (s. auch Kapitel 5.2) (Moeller et al., 2018a). Subramanian und Pagilla (2014) zeigten, dass Durchmischung und Fütterung genau abgestimmt werden müssen, um Schaum zu vermeiden oder zu unterdrücken, da bei der Zersetzung organischer Stoffe Biogasblasen freigesetzt werden, die die natürliche Durchmischung gewährleisten (Moeller et al., 2018a). Brooks et al. (2008) beschrieben ein Beispiel eines einstufigen Pilotversuchs, bei dem die Schaumbildung durch das Pumpen von Schlamm von unten nach oben in den Reaktor und durch Besprühen der Oberfläche des Fermenterinhalt unterdrückt wurde (Moeller et al., 2018a).

Chemische Maßnahmen beinhalten die Nutzung von Entschäumern und anderen Additiven (z.B. Puffersubstanzen). In Kapiteln 6.2 und 6.3 werden die chemischen Maßnahmen und deren Erforschung am UFZ näher vorgestellt. Darüber hinaus ist bekannt, dass Spurenelemente für anaerobe Mikroorganismen wichtig sind und eine angemessene Versorgung für die Aufrechterhaltung der spezifischen Gasproduktion und Prozessstabilität notwendig ist (Suhartini et al., 2019). Eine Nachdosierung von Spurenelementen wurde auch von Lindorfer und Demmig (2016) als Mittel für die Behebung von Störungen im Prozess während eines Schaumereignisses beschrieben. Dabei üben die Spurenelemente weniger die Rolle eines Entschäumers aus. Vielmehr sorgen sie für eine ausgewogene Mikroflora, die

resilienter gegenüber Schwankungen wird. Suhartini et al. (2019) führten parallele Versuche zur Vergärung von Zuckerrübenschnitzeln durch. Bei einer organischen Belastung von 5 g oTS / (L*d) wurde im Fermenter mit Zugabe von einer Spurenelementlösung kein Schaum gebildet. Im Fermenter ohne Spurenelementzugabe wurde hingegen starke Schaumbildung beobachtet. Es ist daher angebracht, im Fall eines langanhaltenden Schaumereignisses eine Analyse der Spurenelemente im Digestat zu veranlassen.

Als spezifische Maßnahme kann die Vorbehandlung der Substrate vor derer Vergärung im Biogasfermenter betrachtet werden. Die Erforschung des Einflusses der Substratvorbehandlung auf die Intensität der Schaumbildung im Biogasprozess wird im Kapitel 6.4 zusammengefasst dargestellt.

6.2 Nutzung von Entschäumern in Biogasanlagen

Entschäumer sind Hilfsstoffe, die in einen Biogasfermenter zugeführt werden, um sofortige Minderung der Schaumschicht zu bewirken und somit die drohende Gefahr der Verstopfung von Gasleitungen abzuwenden.

Anmerkung: Entschäumer und Antischaummittel sind zwei Bezeichnungen für eine Gruppe von Chemikalien, die den Schaum zerstören (im Fall von Antischaummitteln) oder den Schaum hemmen (im Fall von Entschäumern). Ihre Wirkungsweise ist jedoch die gleiche (Pelton, 2002); diese Begriffe werden hier als Synonyme verwendet.

Die Wirkungsweise von Entschäumern wurde in **Moeller et al. (2013)** ausführlich beschrieben. Die gebräuchlichste Methode der Anwendung von Entschäumern ist die Ausbringung auf die Oberfläche des Fermenterinhaltens mit Hilfe des Berieselungssystems, das im Kopfteil des Fermenters angebracht ist. Eine andere Methode ist das Mischen des Entschäumers mit dem Substrat vor dessen Einbringung in den Fermenter (Moeller et al., 2018a). Obwohl es auf dem Markt eine große Auswahl an Entschäumern für Biogasanlagen gibt, ist die Wahl des geeigneten Entschäumers für einen bestimmten Schaum letztlich ein Prozess, bei dem Versuch und Irrtum entscheiden (Moeller et al., 2018a). Darüber hinaus kann die Langzeitanwendung von Entschäumern zu einem Betriebskostenproblem werden (Lindorfer und Demmig, 2016). Silikonhaltige Entschäumer sind für Biogasanlagen generell nicht geeignet, da das Silikon in Form von Siloxan in das Biogas übergeht und durch die Bildung von Kieselsäure (Quarz) bei der Gasverbrennung zu einer Störung des Motors im Blockheizkraftwerk führt (Hofmann, 2003).

In der Literatur findet man nur wenige Informationen über die Art des verwendeten Entschäumers (Moeller et al., 2018a). Suhartini et al. (2014) beschrieben den Einsatz von nicht näher spezifizierten Entschäumern bei der Vergärung von Zuckerrübenschnitzeln bei hoher organischer Belastung. Diese Maßnahme war nur über kurze Zeiträume wirksam, danach trat die Schaumbildung wieder auf (Moeller et al., 2018a). Brooks et al. (2008) beschrieben ebenfalls den Einsatz eines Entschäumungsmittels bei der Vergärung von Zucker-

rübenpressschnitzeln. Westlund et al. (1998) setzten erfolgreich in einem Faulturm einer Kläranlage Polyaluminiumsalze PAX-21 als Entschäumer ein bei Schaumbildung, die durch *M. parvicella* verursacht wurde (Moeller et al., 2018a). Kougias et al. (2013) untersuchten die schaumunterdrückende Wirkung von 14 chemischen Verbindungen in Biogasfermentern bei Nutzung von Gülle als Substrat. Sie fanden heraus, dass natürliches Öl, Fettsäuren, Siloxan und Tributylphosphat die Schaumbildung wirksam unterdrückten. Was natürliche Öle betrifft, so hatte Rapsöl bessere entschäumende Eigenschaften als das Sonnenblumenöl. In einer weiteren Veröffentlichung zeigten diese Forscher, dass Tributylphosphat den Biogasprozess stark hemmt und daher nicht zur Schaumminderung in Biogasanlagen geeignet ist (Kougias et al., 2014b). Darüber hinaus stellten die Autoren fest, dass sich Rapsöl am besten für die Unterdrückung der Schaumbildung im kontinuierlichen Reaktorbetrieb bei der Co-Vergärung von Rindergülle eignet (Kougias et al., 2014b), aber auch von Gülle, die mit Proteinen, Lipiden oder Kohlenhydraten angereichert ist (Kougias et al., 2015a, Kougias, 2015b). Sie kamen zu dem Schluss, dass die optimale Dosierung mit Rapsöl vom Schweregrad des Schaumvorfalls abhängt, da die schaumhemmende Wirkung dieses Entschäumers mit steigender Dosierung zunimmt (Moeller et al., 2018a). Lindorfer und Demmig (2016) berichteten, dass viele Biogasanlagen Pflanzenöle (oder Biodiesel) zur Schaumminderung mit guten Ergebnissen verwenden. Die Entscheidung für den Einsatz von Pflanzenölen hatte wirtschaftliche Gründe, da sie aufgrund der geringen Anschaffungskosten billiger waren als kommerzielle Entschäumer (Lindorfer und Demmig, 2016). Praktischer Erfahrungen von Anlagenbetreibern zeigen, dass jedoch nur solche Pflanzenöle verwendet werden sollten, bei denen die Schleimstoffe (z.B. Phosphoglyceride) entfernt wurden (**Moeller et al., 2012b**). Darüber hinaus können Pflanzenöle auch als Substrat für biogasproduzierende Mikroorganismen dienen. Die Anpassung des Stoffwechsels an dieses Substrat führt zu der Notwendigkeit, immer höhere Dosierungen einzusetzen (Moeller et al., 2018a). Dies gilt auch für andere Antischaummittel: von sechs untersuchten kommerziellen Antischaummitteln wurden in einem Gärversuch drei anaerob abgebaut (Tabelle 7) (**Moeller et al., 2013**).

Lindorfer und Demmig (2016) stellten fest, dass Antischaummittel nicht erfolgreich gegen Fettschäume und verschiedene Arten von Schäumen auf Proteinbasis wirken. Ähnliche Beobachtungen wurden von Biogasanlagenbetreibern gemacht, die an einer von **Moeller und Görsch (2015b)** beschriebenen Umfrage teilnahmen (Tabelle 1). Nur drei von achtzehn Befragten gaben an, dass sie Entschäumer verwenden (Moeller et al., 2018a). Das Meinungsspektrum war recht vielfältig; das meist genannte Problem war, dass es nicht den einen Entschäumer für alle Arten von Schaum gibt (**Moeller et al., 2012b**). Aus diesem Grund wurde kürzlich am UFZ ein praktischer Test entwickelt, der von Technikpersonal genutzt werden kann, um die Eignung eines Antischaummittels für eine bestimmte Biogasanlage direkt vor Ort zu testen (Gannavarapu, 2021) – siehe auch Kapitel 4.2 .

Tabelle 7: Ermittlung des Einflusses der Zugabe von Antischaummitteln auf den Biogasprozess ($n=3$) (Moeller et al., 2013).

Versuchsaufbau: Biogas-Batchtests, 1,5 g Glucose + 2 mL ASM (Kontrolle ohne ASM) in 200 mL Versuchsansatz mit verdünntem ausgegastem Digestat, 36 °C, Versuchsdurchführung nach VDI-Richtlinie 4630, Messung der Methankonzentration mit GC-WLD; ASM = Antischaummittel.

	Versuchsdauer [d]	Mit Antischaummittel		Ohne Antischaummittel (Kontrolle)	
		V _{Biogas} [mL _N]	V _{Methan} [mL _N]	V _{Biogas} [mL _N]	V _{Methan} [mL _N]
ASM 1	42	1.417 ± 26	1.073 ± 4	882 ± 96	605 ± 23
ASM 2	48	984 ± 67	742 ± 26	935 ± 7	682 ± 34
ASM 3	23	871 ± 25	614 ± 17	970 ± 23	611 ± 7
ASM 4	29	1.587 ± 151	1.062 ± 11	1.115 ± 10	665 ± 17
ASM 5	19	1.024 ± 3	686 ± 5	983 ± 9	642 ± 17
ASM 6	19	964 ± 20	655 ± 4	983 ± 9	642 ± 17
Rapsöl	56	2.682 ± 177	2.025 ± 51	1.109 ± 163	739 ± 47

6.3 Einsatz von Puffersubstanzen als Maßnahme gegen Schaumbildung

Neben Entschäumern setzen Biogasanlagenbetreiber auch Pufferprodukte zur Stabilisierung des Biogasprozesses hinsichtlich der Schaumbildung ein (Moeller et al., 2018a). Puffersubstanzen wie Karbonate und Bikarbonate, kombiniert mit Natrium oder Kalium, Kalziumkarbonat (Kalk) und Salzsäure, stellen die Alkalität und den pH-Wert ein (Schnürer, 2016). Die am häufigsten verwendeten Puffersubstanzen sind Natriumbicarbonat, Natriumcarbonat und Harnstoff (Lindorfer und Demmig, 2016). Diese Stoffe zeigten bei der Bekämpfung der Schaumbildung in Fermentern von Kläranlagen und Güllefermentern eine positive Wirkung (Kougias et al., 2014a). Darüber hinaus wurde berichtet, dass sie auch gegen Fettschäume wirksam sind (Lindorfer und Demmig, 2016).

Die Verwendung von Puffersubstanzen ist auf anaerobe Fermenter beschränkt, die keine erhöhte Alkalität aufweisen (Lindorfer und Demmig, 2016). Alkalische Substanzen wie Kalk, Ammoniak, Lauge und Harnstoff können ebenfalls zur pH-Pufferung eingesetzt werden, sind aber problematisch, da sie leicht überdosiert werden können. So kann die genaue Menge an Puffersubstanzen zur Veränderung der Alkalinität zwischen den einzelnen Biogasprozessen variieren und hängt von vielen Faktoren wie Bikarbonatgehalt, Temperatur, pH-Wert, Fettsäurekonzentration, Ammoniakgehalt ab (Schnürer, 2016) (Moeller et al., 2018a).

In Kapitel 5.2 wurde dargestellt, dass in einer Biogasanlage, die Zuckerrüben vergoren hat ohne Probleme mit übermäßiger Schaumbildung zu haben, unter anderem Harnstoff als Hilfsstoff verwendet wurde (Moeller et al., 2015c). Darüber hinaus gab es Hinweise auf einen Einfluss der Zugabe von Stickstoffverbindungen allgemein auf die Intensität der Schaumbildung (Moeller et al., 2015c). Aus diesem Grund ist der Frage nachgegangen, ob die Zugabe verschiedener Stickstoffdünger, wie Harnstoff und Ammoniumnitrat, die in der landwirtschaftlichen Praxis häufig verwendet werden, eine schaummindernde Wirkung bei

der Vergärung von Zuckerrübensilage zeigen (**Moeller und Zehnsdorf, 2017**). Im Ergebnis hatten alle genutzten Substanzen eine reduzierende Wirkung auf die Schaumbildung (Abbildung 9). Den stärksten Einfluss zeigte der Kalkstickstoff, derer Zugabe zu keiner Schaumbildung führte.

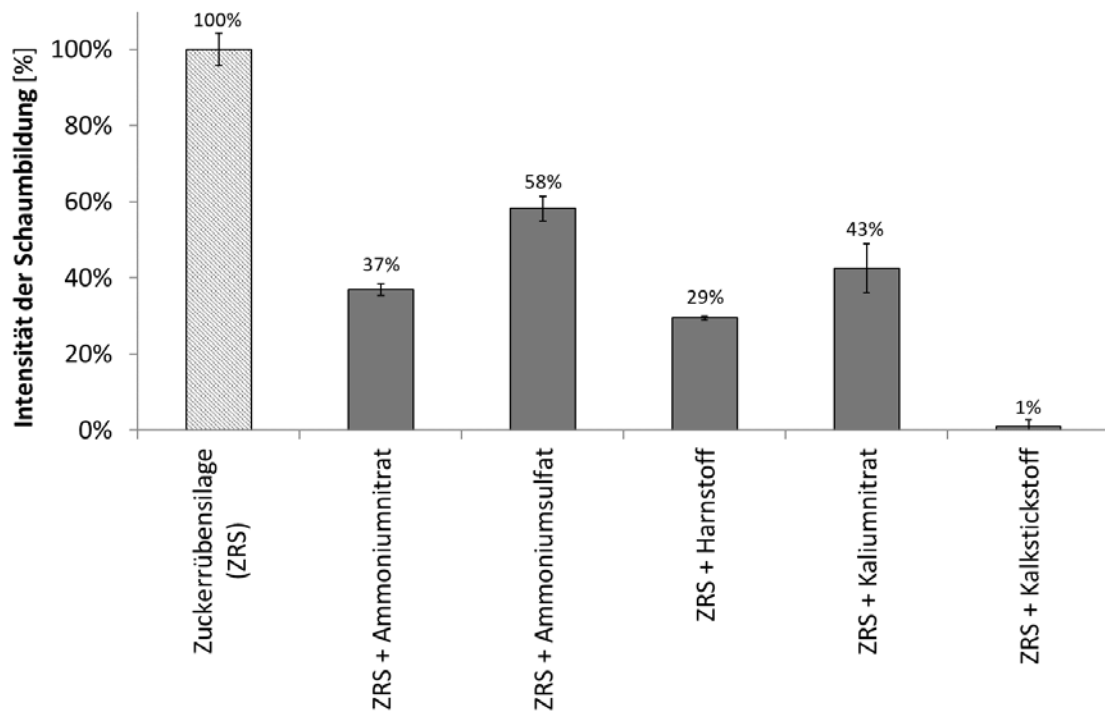


Abbildung 9: Intensität der Schaumbildung in Schaumtests mit zusätzlich 2,5 g/kg stickstoffhaltigen Verbindungen (**Moeller und Zehnsdorf, 2017**).

Versuchsdurchführung: Schaumtests, 40 g Zuckerrübensilage + 460 g Digestat, 38 °C, Dauer: 18 h.

Die Zugabe der Stickstoffdünger bewirkte auch eine leichte pH-Verschiebung zu basischen Werten, was auf eine puffernde Wirkung hindeutet, und etwas höhere Methankonzentrationen in Gärversuchen im Vergleich zu Kontrolle ohne Zugabe der Substanzen (Tabelle 8). Höhere Konzentrationen von Harnstoff und Ammoniumnitrat von 1,25 g/kg verursachten jedoch Hemmungen in der Biogasproduktion. Kalkstickstoff zeigte sich als völlig ungeeignet, weil dieser Stoff bereits bei niedriger Konzentration die Biogasbildung inhibierte und bei höheren Konzentrationen zu komplettem Stillstand des Gärprozesses führte (Tabelle 8).

Die Überführung der Ergebnisse in die Praxis war erfolgreich. **Moeller und Zehnsdorf (2016)** beschrieben die Anwendung von Harnstoff für die Co-Vergärung mit Zuckerrüben in einer Praxisanlage, die die langanhaltende Schaumbildung zum Stillstand brachte. Im Fermenter (1.800 m³ Arbeitsvolumen, mesophile Betriebsweise) kam es während der saisonalen Co-Vergärung von Zuckerrüben zu einem starken Schaumereignis. Der Rührzyklus im Fermenter betrug 6 min pro Stunde bei stabilem Betrieb; ein kontinuierlicher Rührzyklus war während der Phasen der Schaumbildung erforderlich. Dies führte zu einem Anstieg der Energiekosten

für Rühren um 9.000 € pro Jahr. Eine einmalige Gabe von 100 L Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung (AHL) führte zu einer nachhaltigen Rückbildung der Schaumschicht; zwei Tage nach der Zudosierung war eine Rückkehr zu einem Rührzyklus von 6 min pro Stunde möglich (Moeller et al., 2018a). Eine hemmende Beeinflussung der Biogasproduktion wurde nicht festgestellt (Abbildung 10). Die Dosierung von Harnstoff wurde nach einem weiteren Schaumereignis einige Wochen später mit gleichem Effekt wiederholt. Die Unkosten beliefen sich auf 21 € pro 100 L AHL (Stand 2014).

Tabelle 8: Ermittlung des Einflusses der Zugabe von Stickstoffdüngern auf den Biogasprozess ($n=3$) (Moeller und Zehndorf, 2017)

Versuchsaufbau: Biogas-Batchtests, 5 g Zuckerrübensilage (ZRS) in Kombination mit verschiedenen Masseanteilen von stickstoffhaltigen Verbindungen Harnstoff (HS), Ammoniumnitrat (AN) und Kalkstickstoff (KS) (Kontrolle ohne Düngemittel) in 400 mL Versuchsansatz mit verdünntem ausgegastem Digestat, 37 °C, Versuchsdurchführung nach VDI-Richtlinie 4630, Messung der Methankonzentration mit GC-WLD.

Ansatz	Biogasausbeute	Methankonzentration im Biogas am Versuchsende	pH-Wert am Versuchsende
	[L _N /kg oTS]	[% CH ₄]	[-]
Harnstoff (HS):			
Zuckerrübensilage (ZRS)	735 ± 43	59 ± 2,0	7,21 ± 0,00
ZRS + 0,25 g/kg HS	728 ± 21	59 ± 1,9	7,23 ± 0,01
ZRS + 1,25 g/kg HS	571 ± 15	60 ± 3,0	7,34 ± 0,01
ZRS + 2,5 g/kg HS	349 ± 78	65 ± 0,1	7,53 ± 0,01
Ammoniumnitrat (AN):			
ZRS	677 ± 16	59 ± 0,4	7,28 ± 0,06
ZRS + 0,25 g/kg AN	688 ± 36	58 ± 1,3	7,25 ± 0,01
ZRS + 1,25 g/kg AN	494 ± 2,6	61 ± 1,1	7,33 ± 0,02
ZRS + 2,5 g/kg AN	431 ± 1,7	59 ± 1,0	7,48 ± 0,02
Kalkstickstoff (KS):			
ZRS	752 ± 0,0	58 ± 0,0	7,17 ± 0,01
ZRS + 0,25 g/kg KS	577 ± 34	59 ± 2,8	7,18 ± 0,02
ZRS + 1,25 g/kg KS	0	21 ± 1,6	6,93 ± 0,01
ZRS + 2,5 g/kg KS	0	nicht bestimmbar	7,14 ± 0,05

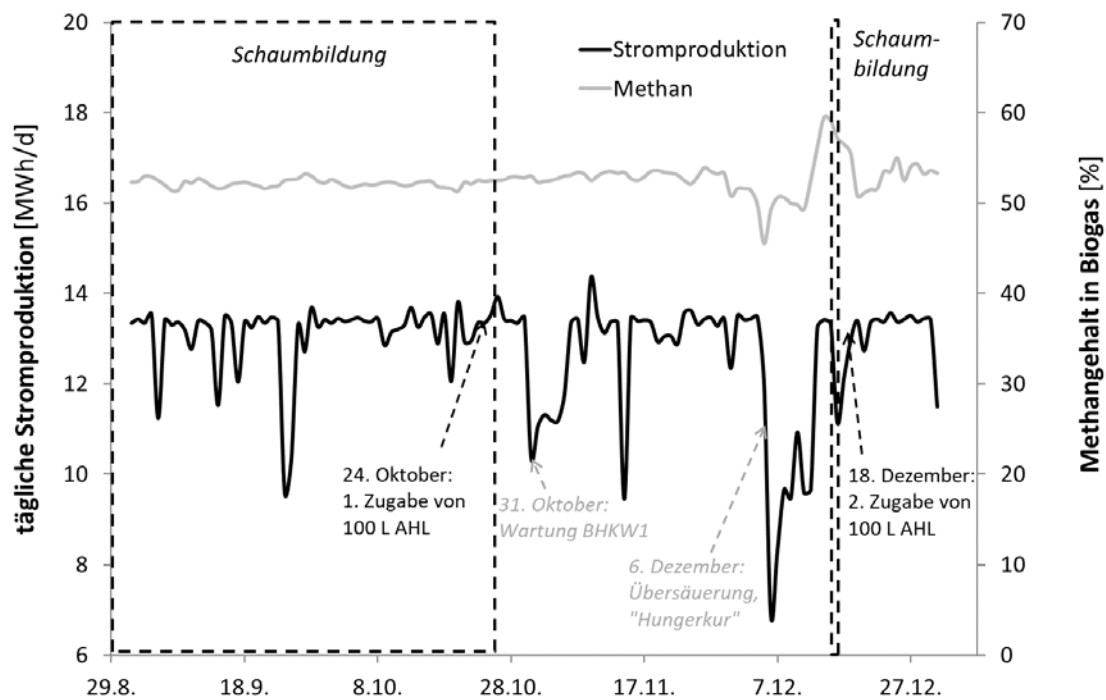


Abbildung 10: Tägliche Stromproduktion als Indikator der Biogasproduktion und der Methangehalt während und nach zwei Schaumereignissen im Biogasfermenter einer Praxisanlage (Moeller und Zehnsdorf, 2016)

6.4 Wirkung der Substratvorbehandlung auf die Schaumbildung im Biogasprozess

Generell wird empfohlen, Substrate vor ihrer Zugabe in Biogasfermenter so weit wie möglich zu zerkleinern (Moeller et al., 2018a). Dies wird nicht nur aus technischen Gründen (als Voraussetzung für die Fütterungstechnik, für einen geringen Energiebedarf beim Rühren und zur Vermeidung von Sink- oder Schwimmschichten) als notwendig erachtet, sondern liegt auch im Interesse einer möglichst schnellen biologischen Umsetzung und vollständigen Verwertung der Substrate. Die Zerkleinerung vergrößert die reaktive Oberfläche der Partikel und fördert die Verwertung der Inhaltsstoffe durch Bakterien (Weißbach et al., 2015). Allerdings bewirkt dieser Aufschluss auch die Freisetzung von oberflächenaktiven Substanzen und führt in der Folge zur Schaumbildung (Moeller et al., 2018a).

6.4.1 Zerkleinerung von Zuckerrübe

Der Einfluss des Zerkleinerungsgrades auf die Intensität der Schaumbildung wurde von Moeller et al. (2015c) für Zuckerrüben untersucht. Die Autoren beschreiben verschiedene Methoden zur Vorbehandlung von Zuckerrüben vor dem Einsatz in Biogasanlagen, die sie an Praxisanlagen beobachtet haben: die Rüben können mit einem Schredder zu Brei verarbeitet oder mit Maschinen der Zuckerindustrie in handgroße Stücke zerkleinert werden. Die Autoren zeigten in ihren Versuchen, dass die Schaumbildung umso intensiver war, je mehr die

Zuckerrübenwurzel zerkleinert war: Bei Schaumversuchen mit 1 cm großen Würfeln von Zuckerrübenwurzeln lag der Schaumgehalt bei 51,4 % des Gesamtvolumens. Bei Halbierung der Stücke auf Würfel mit 0,5 cm langer Kante stieg die Schaumschicht auf 56,7 % des Gesamtvolumens auf. Vergärung von geriebenen Rüben führte zum Überschäumen der Testflasche. Die Autoren zeigten auch, dass der Zerkleinerungsgrad keinen Einfluss auf die Biogasproduktion hatte (Abbildung 11): Die spezifische Biogasausbeute von ein Zentimeter großen Würfeln betrug 588 L_N/kg oTS und von geriebenen Rüben lag sie bei 573 L_N/kg oTS. Es ist daher empfehlenswert, Zuckerrüben für die Vergärung in Stücke und nicht zu Mus zu zerkleinern, um Schaumbildung in Biogasfermentern zu verhindern (Moeller et al., 2018a).

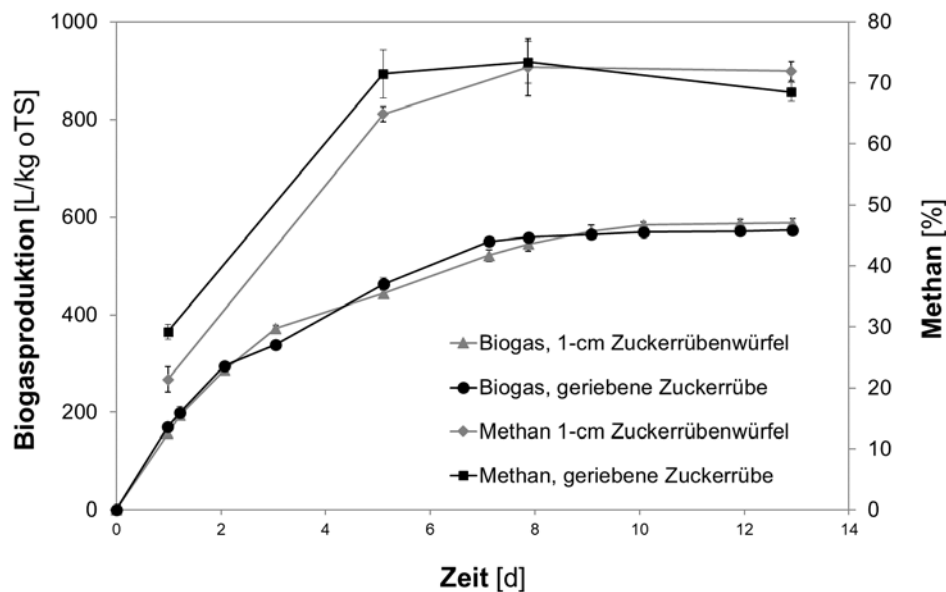


Abbildung 11: Biogasproduktion und Methangehalt im Verlauf von Batchversuchen mit 1 cm großen Rübenwürfeln ($n = 3$) und geriebenen Rüben ($n = 2$) (Moeller et al., 2015c).

Versuchsaufbau: Biogas-Batchtests, 11,2 g Zuckerrübe in 400 mL Versuchsansatz mit verdünntem ausgegastem Digestat, 37 °C, Versuchsdurchführung nach VDI-Richtlinie 4630, Messung der Methankonzentration mit GC-WLD.

6.4.2 Desintegration von Getreide

Getreidekorn wird in der Regel vor der Beschickung in die Biogasanlage zerkleinert (Moeller et al., 2018a). Dies kann allerdings zu Problemen führen, die bereits aus der Veterinärmedizin bekannt sind: Fein gemahlenes Getreide kann bei Wiederkäuern gesundheitliche Probleme verursachen, die sich als Blähungen im Pansen äußern (Majak et al., 2003). Da die Pansenblähung einige Ähnlichkeiten mit der Schaumbildung im Biogasproduktionsprozess aufweist (Moeller et al., 2012a), kann der gleiche Effekt auch in Biogasanlagen erwartet werden, die gemahlenes Getreide als Co-Substrat verwenden. Moeller et al. (2016) untersuchten die Wirkung des Mahlgrads von sechs Getreidearten auf die Intensität der Schaumbildung im Biogasprozess. Die Autoren beobachteten eine klare Tendenz zur Intensivierung der Schaumbildung mit zunehmender Feinheit des groben Korns (von 4 bis 0,5 mm) (Moeller et al., 2018a). Die höchste Schaumschicht wurde bei Schaumversuchen mit fein

gemahlenem Weizen (Partikelgröße $\leq 0,5$ mm) beobachtet, gefolgt von fein gemahlenem Triticale (Partikelgröße $\leq 0,5$) (Tabelle 9).

Tabelle 9: Einfluss der Getreideart und Mahlstufe auf die Intensität der Schaumbildung (Moeller et al., 2016).

Versuchsdurchführung: Schaumtests, 10 g Getreide + 490 g Digestat, 37 °C, Versuchsdauer: 23 h.

	Maximale Partikelgröße	Gesamthöhe des Ansatzes	Höhe des Schaums im Schaumtest	Intensität der Schaumbildung
	[mm]	[cm]	[cm]	[%]
Weizen	4	10,8	3,7	34
	2	12,7	5,7	45
	0,5	14,0	6,7	48
Triticale	4	9,7	2,7	28
	2	11,5	4,5	39
	0,5	14,0	6,5	46
Roggen	4	9,7	3,5	33
	2	11,5	4,0	35
	0,5	14,0	4,5	38
Gerste	4	9,0	2,0	22
	2	10,8	3,8	35
	0,5	11,3	4,3	38
Hafer	4	9,5	1,7	18
	2	9,7	2,0	21
	0,5	10,5	2,3	22
Hirse	4	7,3	0	0
	2	7,9	0	0
	0,5	8,5	0	0

Um diese Erkenntnisse in der Praxis anwenden zu können, ist es wichtig zu wissen, wie sich die Mahlstufe auf die Biogasbildung auswirkt (Moeller et al., 2018a). Die Gärversuche zeigten nur in den ersten beiden Versuchstagen einen geringen Unterschied zwischen fein und grob geschrotetem Triticale und erreichten am Ende der Batch-Gärung die gleiche Biogasausbeute von 652 L_N/kg oTS (Abbildung 12) (Moeller et al., 2018b) (Moeller et al., 2018a). Der Grund, warum die Partikelgröße die Schaumbildung, jedoch nicht die Biogasausbeute beeinflusst, liegt höchstwahrscheinlich in der Geschwindigkeit der Biogasbildung. Durch die Zerkleinerung werden leicht abbaubare Stoffe frei und können sofort umgesetzt werden. Auf der anderen Seite sind immer noch polymere Substanzen anwesend, die den Schaum stabilisieren können. Die stürmische Gärung des fein gemahlene Getreides, die durch schnelle Umsetzung der frei gewordenen leicht abbaubaren Substanzen entsteht, produziert vergleichsweise viel Biogas in kurzer Zeit, das durch die Polymere in der Matrix eingeschlossen wird. Beim grob gemahlene Getreide läuft durch längere Hydrolysephase aufgrund der kleineren anfänglichen Zersplitterung der Polymere die Gasbildung langsamer an und somit ist die Dynamik der Schaumbildung gebremst. Allerdings steht bei gleicher Menge Getreide auch gleich viel

organischer Substanz zur Verfügung, sodass aus beiden Formen – grob und fein zerkleinert – am Ende die gleiche Menge Biogas entsteht.

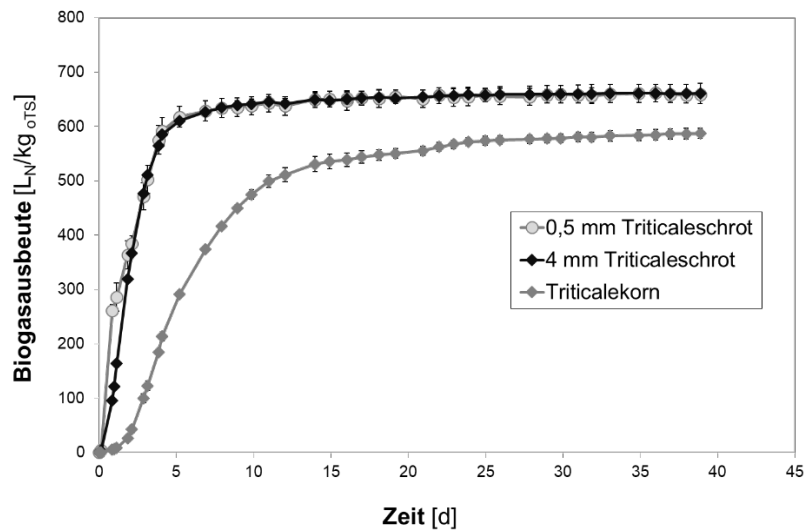


Abbildung 12: Biogasausbeute im Verlauf der Fermentationsbatchversuche von gemahlenem Triticale (Partikelgröße $\leq 0,5$ mm und ≤ 4 mm) und Triticalekorn (Moeller et al., 2018b).

Versuchsaufbau: $V = 31$ L, 39 °C, kontinuierliches Rühren, Substatmix: Maissilage, Rindergülle, Triticale, organische Raumbelastung: 2 g oTS/(L*d), Einzelheiten s. Moeller et al., 2018b.

Fein vermahlene Getreide kann auch mit Pflanzenöl gemischt werden, um die Schaumbildung im Fermenter zu verhindern, wenn das Mahlverfahren nicht geändert werden kann (Moeller et al., 2018a). Die Zugabe von Sojaöl zu feingemahlenem Getreide führte in Schaumversuchen zu einer Reduktion der Intensität der Schaumbildung um bis zu 64 % im Fall von Triticale (Tabelle 10) (Moeller et al., 2016). Ein weiterer positiver Effekt ist die Vermeidung von Staubentwicklung bei der Handhabung des gemahlene Getreides, wie von einem Biogasanlagenfahrer berichtet wurde (Kirsten, persönliche Mitteilung) (Moeller et al., 2018a).

Tabelle 10: Einfluss der Zugabe von Sojaöl auf die Schaumbildung bei Vergärung von Getreideschrot (Partikelgröße $\leq 0,5$ mm) (Moeller et al., 2016).

Versuchsdurchführung: Schaumtests, 10 g Getreide + 490 g Digestat, 37 °C, Versuchsdauer: 23 h.

	Zugabe von Sojaöl	Gesamthöhe des Ansatzes	Höhe des Schaums im Schaumtest	Intensität der Schaumbildung	Reduktion der Schaumbildung
		[cm]	[cm]	[%]	[%]
Weizen	Ohne Sojaöl	11,5	3,7	32	59
	Mit Sojaöl	9,0	1,2	13	
Triticale	Ohne Sojaöl	11,0	3,4	31	64
	Mit Sojaöl	9,0	1,0	11	
Roggen	Ohne Sojaöl	9,5	2,0	21	62
	Mit Sojaöl	8,5	0,7	8	
Gerste	Ohne Sojaöl	11,0	3,2	29	45
	Mit Sojaöl	9,4	1,5	16	

Weißbach et al. (2015) testeten die Möglichkeit der Vergärung von ganzen Getreidekörnern für Roggen in mesophilen einstufigen Biogasfermentern mit einem Arbeitsvolumen von 2.580 m³. Mit Hilfe einer ausgearbeiteten Methodik für die Analyse der Stärkekonzentration im Digestat zeigten die Autoren, dass die Roggenkörner während einer hydraulischen Verweilzeit von 86-90 Tagen vollständig abgebaut wurden. Die Autoren gaben allerdings an, dass noch nicht bekannt ist, für welche anderen Getreidesorten als Roggen und unter welchen anlagentechnischen und betrieblichen Bedingungen der jeweiligen Biogasanlage dies noch gilt. Aus diesem Grund wurden am UFZ weitere Untersuchungen zunächst mit Triticale im Technikumsmaßstab und später mit Gerste in einer Praxisanlage durchgeführt (Moeller et al., 2018a). **Moeller et al. (2018b)** untersuchten den Unterschied der Biogasproduktion aus Getreidekorn und gemahlenem Getreide. In Biogas-Batch-Tests war die spezifische Methanausbeute von Triticalekorn mit 361 ± 6 L/kg_{OTS} niedriger als die von fein (Partikelgröße $\leq 0,5$ mm) und grob (Partikelgröße ≤ 4 mm) gemahlenem Triticaleschrot (416 ± 4 L/kg_{OTS} und 394 ± 26 L/kg_{OTS}) (Abbildung 12). Im semikontinuierlichen Betrieb hat sich allerdings eine eindeutige Tendenz zur Adaptation des Systems auf die Vergärung von Getreidekorn: in zwei parallel laufenden Versuchen mit Zugabe von Triticalekorn und grob gemahlenem Triticale wurde nach der Einführung von Triticale in den Substratmix in den ersten drei Tagen ein Unterschied in der Biogasproduktion von 11 % zwischen den beiden Systemen festgestellt. Dieser Unterschied verringerte sich jedoch am vierten Tag auf 7 % und am fünften Tag auf 5 %. Im Laufe der weiteren Versuchswoche glichen sich die beiden Systeme an und liefen gleichmäßig bis Ende des Versuchs nach 84 Tagen (Abbildung 13). Die Methankonzentration wurde durch die Änderungen der Substratmischung nicht beeinflusst.

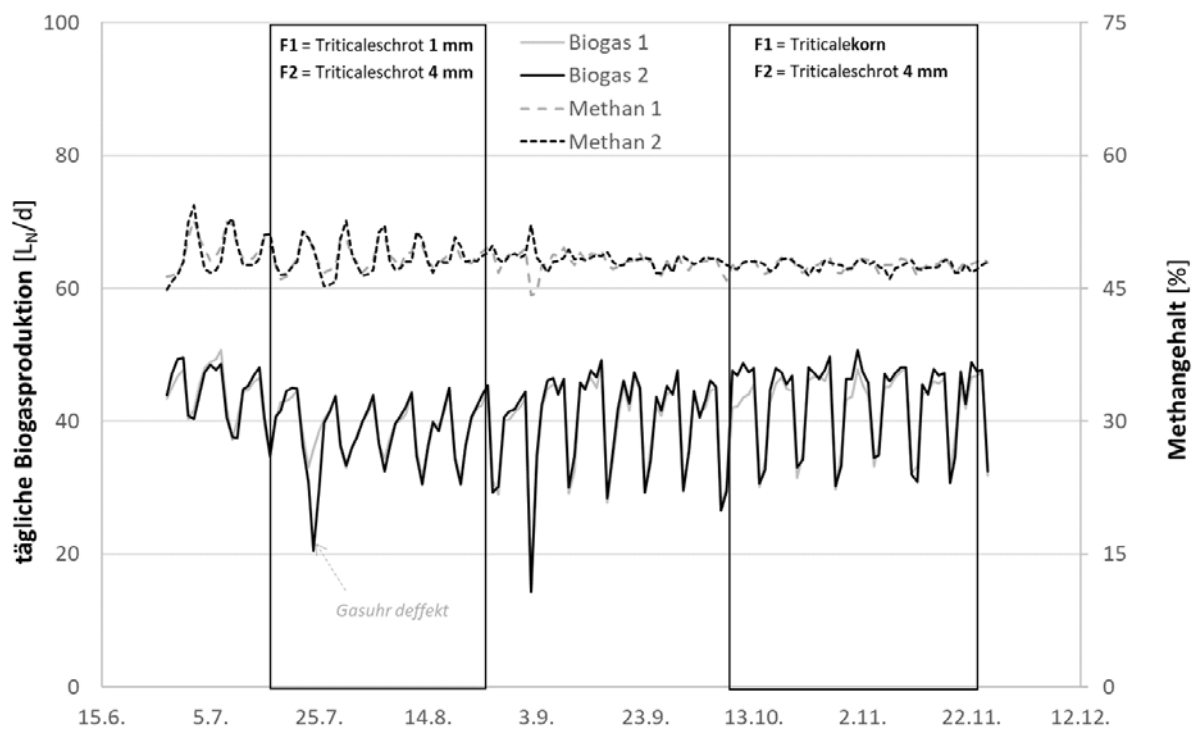


Abbildung 13: Biogasproduktionsrate und Methankonzentration im Biogas im Verlauf der semikontinuierlichen Fermentation bei gleichzeitiger Beschickung mit gemahlenem Triticale (mit Partikelgrößen ≤ 1 mm und ≤ 4 mm) im linken Viereck und gemahlenem Triticale (Partikelgröße ≤ 4 mm) und Getreidekorn im rechten Viereck (Moeller et al., 2018b).

Versuchsaufbau: $V = 31$ L, 39 °C, kontinuierliches Rühren, Substratmix: Maissilage, Rindergülle, Rezirkulat, Triticale (Einzelheiten s. Moeller et al., 2018b), organische Raumbelastung: 2 g oTS/(L*d).

6.5 Schlussfolgerungen

In diesem Kapitel wurde die Entwicklung von Maßnahmen dargestellt, die gegen die Schaumbildung in Biogasanlagen wirksam sind. Diese reichen von Zugabe von Hilfsstoffen bis zur Vorbehandlung von Substraten. Die erworbenen Erkenntnisse wurden direkt an Biogasanlagenbetreibern kommuniziert und konnten dadurch sofort erfolgreich praktisch umgesetzt werden. Es besteht weiterhin ein großer Forschungsbedarf an Maßnahmen, die während einer Schaumbildung oder aber auch präventiv unternommen werden können. Die hier vorgestellten Entwicklungen sind auf spezifische Substrate fokussiert. Allgemein nutzbare Maßnahmen fehlen nach wie vor.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit gibt einen Überblick über die Forschung zur Bildung von Schaum und deren Vermeidung im Gärprozess während der Biogasproduktion. Praktische Erfahrungen und Laboruntersuchungen wurden für alle Arten der Biogasproduktion (landwirtschaftliche und abfallwirtschaftliche Biogasanlagen sowie Faultürme von Kläranlagen) zusammengefasst. Es wurde gezeigt, dass Schaumbildung ein häufiges Phänomen in großtechnischen Biogasanlagen ist, das schwerwiegende Folgen für den Anlagenbetrieb und negative wirtschaftliche Auswirkungen für den Betreiber haben kann. Die Ursachen für die Schaumbildung bleiben in der Praxis oft unerkannt. In dieser Studie wurde ein Überblick über die wichtigsten bekannten Ursachen gegeben: die Verwendung von schaumverursachenden Substraten und eine ungeeignete Prozessführung. Die verfügbaren Gegenmaßnahmen sind entweder prophylaktisch - Substratvorbehandlung, Anpassung der Konzentrationen von Makro- und Mikroelementen, Änderung der Fütterungsstrategie - oder symptomatisch - z.B. Verringerung der Oberflächenspannung durch Zugabe von Entschäumern.

Es besteht immer noch ein erheblicher Forschungsbedarf zur Erkennung von Schaumursachen und zur geeigneten Prozessführung für einen stabilen Betrieb von Biogasanlagen, sowie die Notwendigkeit zusätzlicher Nachweisverfahren für verschiedene Schaumarten. Folgende Fragen geben Impulse für die künftige Erforschung des Phänomens der Schaumbildung im biologischen Prozess der Biogasproduktion:

- ***Welche ökonomischen und ökologischen Auswirkungen hat ein Schaumereignis auf eine Biogasanlage?***

Hierfür sind systematische, fachkundige Interviews mit betroffenen Anlagenbetreibern, sowie betriebswirtschaftliche Analysen der Biogasanlagen im stabilen Zustand im Vergleich zu Phasen mit übermäßiger Schaumbildung erforderlich. Darüber hinaus sind Messungen von Biogasemissionen während der Schaumereignisse an diversen Biogasanlagen notwendig, um die ökologischen Auswirkungen von Schaumereignissen quantifizieren zu können.

- ***Welche Parameter können als verlässliche und einfache Frühwarnindikatoren für Schaumentwicklung in Biogasfermentern dienen?***

Diese komplexe Aufgabenstellung erfordert zahlreiche Experimente im Technikumsmaßstab, wobei eine umfangreiche Analytik gepaart mit Begleitexperimenten vonnöten sind. Durch Korrelationsanalysen können Zusammenhänge erkannt werden und weiter experimentell überprüft werden. Eine engmaschige Begleitanalytik im Praxismaßstab wäre hier auch denkbar und sogar vorteilhafter, allerdings sind akute Schaumereignisse in der Praxis meist unvorhersehbar. Eine Provozierung von Schaumereignissen in Praxismaßstab ist ethisch nicht vertretbar. Bei der Entwicklung von Frühwarnindikatoren ist darauf zu achten, dass diese so

einfach sind, dass sie in der Praxis genutzt werden können, ohne teure und anspruchsvolle Geräte erwerben und betreiben zu müssen.

- ***Haben die Eigenschaften der Digestate, wie die Aktivität der hydrolytischen Enzyme und der Säure-Basen-Haushalt, einen Einfluss auf die Schaumbildung in Biogasfermentern?***

Um diese Fragestellung anzugehen, sind folgende Voraussetzungen notwendig: a) Zugang zu zahlreichen Praxisanlagen mit häufigen Schaumproblemen und b) Entwicklung entsprechender Analytik zur Bestimmung der Aktivität von hydrolytischen Enzymen in komplexen Gemischen. Nur durch eine überkritische Anzahl von Proben ist es möglich entsprechende Muster zu erkennen und mit Experimenten im technischen Maßstab die erkannten Zusammenhänge zu bestätigen.

- ***Kann die Hydrolysephase so gesteuert werden, dass bei Vergärung von leicht abbaubaren Substraten das Risiko der Schaumbildung im Biogasfermenter vermindert wird?***

Versuche zur zweiphasigen Vergärung von leicht abbaubaren Substraten im Technikumsmaßstab bringen für die Beantwortung dieser Frage die notwendigen Erkenntnisse. Durch die räumlich getrennte Hydrolyse kann ihre Rolle bei der Bildung von Schaum im Prozess der Biogasbildung genau untersucht werden und deren optimale Bedingungen (pH, Temperatur, Dauer) erforscht werden.

- ***Lassen sich mikrobielle Indikatoren für ein erhöhtes Risiko zur Schaumbildung oder für einen stabilen Prozess bei der Vergärung leicht abbaubarer Substrate identifizieren?***

Mit Hilfe von molekularbiologischen Untersuchungen sollte der Frage nachgegangen werden, welche Enzyme in Verbindung mit Prozessstörungen oder -stabilisierung aktiv sind und welche Mikroorganismen dafür verantwortlich sind. So kann die Zusammensetzung der Biozönose in Schaumversuchen mit ausgewählten Substraten untersucht werden. Darüber hinaus kann die Zusammensetzung und Dynamik der Biozönose in ein- und zweistufigen Technikumsbiogasanlagen verglichen werden. Die Ergebnisse bringen ein tiefes Verständnis der Prozesse, die für die Entstehung von Schaum von Bedeutung sind.

- ***Wie kann eine bessere Ausgasung des Digestates mit praktischen Methoden erreicht werden?***

Da den wesentlichen Teil des Schaums Gas bildet, wäre eine verbesserte Ausgasung des Digestates vorteilhaft. Zu diesem Zweck könnten sowohl chemische als auch mechanische Hilfsmittel eingesetzt werden. Hierfür wären vermutlich auch neue Wege in der Konstruktion von Biogasanlagen notwendig. Darüber hinaus würde die Entwicklung eines mechanistischen Modells der Schaumbildung, das Faktoren wie rheologische Eigenschaften, Oberflächenspannung sowie Partikel- und Blasengrößenverteilungen berücksichtigt, zum Verständnis des Schaumbildungsprozesses beitragen und die Stellschrauben identifizieren, wie eine bessere Ausgasung ermöglicht werden könnte.

- Welche Messtechnik ist hilfreich für die Vorhersage/Vermeidung/Minderung einer Schaumbildung im Biogasfermenter?

Um dieses Problem zu umgehen, wäre eine vorab-Analyse der vorhandenen Möglichkeiten vorteilhaft: welche Messsysteme gibt es auf dem Markt und in der Forschung, die für die Vorhersage bzw. Detektion eines Schaumereignisses in Frage kommen? Mit ausgewählten Geräten kann eine Forschungsbiogasanlage ausgestattet werden, wobei Messungen sowohl in der Gasphase (z.B. Infrarotspektrometer, mobiler Gaschromatograph oder Ionenmobilitätspektrometer) als auch in der Flüssigphase (mit Hilfe von pH-, Temperatur-, Redoxpotential-, Leitfähigkeit-, NIRS- oder in-line Acetatsensoren) vorgenommen werden. Außerdem können Methoden der automatischen Erkennung der Oberflächenstruktur implementiert werden (Radar und optische Systeme). Um die Messtechnik auf ihre Eignung zu testen, werden Störfälle im Biogasprozess provoziert. Die Messtechnik könnte schrittweise auf das Mindestmaß reduziert werden, sodass die Sicherheit des Betriebs der Biogasanlage maximal gewährleistet ist bei gleichzeitig niedrigen Investitionsmaßnahmen. Basierend auf den Ergebnissen können dann mit Hilfe von künstlicher Intelligenz auf der Basis der Mustererkennung Methoden der automatischen Prozessführung entwickelt werden. Somit wird die Effizienz der Biogasanlagen erheblich erhöht und der Faktor Mensch bei Störfällen gleichzeitig reduziert.

Die Beantwortung all der hier gestellten Fragen würde entscheidende Beiträge zur Bekämpfung bzw. Vermeidung der Schaumbildung in Biogasfermentern liefern und damit zu einer besseren ökonomischen und ökologischen Betriebsführung von Biogasanlagen beitragen. Allerdings ist bei der Forschung wichtig in Betracht zu ziehen, dass die entwickelten Methoden und Analysen auch von den Praktikern ohne langwierige Einarbeitung angewendet werden sollen.

Literaturverzeichnis

Links:

BMWk, 2021: Erneuerbare Energien. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html> (Zugriff am 30. November 2022)

FNR, 2020: Basisdaten Bioenergie Deutschland 2021. https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2020/Mediathek/broschuere_basisdaten_bioenergie_2020_web.pdf (Zugriff am 30. November 2022)

FNR, 2022a: Entwicklung der Anlagenstandorte zur Biogasproduktion. <https://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/bioenergie/biogas/entwicklung-der-anlagenstandorte-zur-biogasproduktion.html> (Zugriff am 30. November 2022)

FNR, 2022b: Entwicklung der Anlagenstandorte zur Biomethan-Produktion. <https://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/bioenergie/biogas/entwicklung-der-anlagenstandorte-zur-biomethan-produktion.html> (Zugriff am 30. November 2022)

http://www.sita-china.com/reads_276.html (Zugriff am 21. November 2022)

Artikel/Bücher:

Barjenbruch, M., Hoffmann, H., Kopplow, O., Tränckner, J., 2000. Minimizing of foaming in digesters by pre-treatment of the surplus-sludge. *Water Sci Technol* 42, 235-241.

Blackall, L.L., Marshall, K.C., 1998. The mechanism of stabilization of actinomycete foams and the prevention of foaming under laboratory conditions. *J Ind Microbiol* 4, 181-188.

Boe, K., Kougiyas, P.G., Pacheco, F., O-Thong, S., Angelidaki, I., 2012. Effect of substrates and intermediate compounds on foaming in manure digestion systems. *Water Sci Technol* 66, 2146-2154.

Borcherding, K.: Untersuchung zur Charakterisierung der Makro- und Mikrostruktur von Milchsäumen, in Agrar- und Ernährungswissenschaftlich Fakultät 2004, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Brooks, L., Parravicini, V., Svardal, K., Kroiss, H., Prendl, L., 2008. Biogas from sugar beet press pulp as substitute of fossil fuel in sugar beet factories. *Water Sci Technol* 58, 1497-1504.

Chen, Y., Cheng, J. J., Creamer, K. S., 2008. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresour Technol* 99, 4044-4064.

Clarke, R.T.J., Reid, C.S.W., 1973. Foamy Bloat in Cattle. A review. *J Dairy Sci* 57(7), 753-785.

Dalmau, J., Comas, J., Rodríguez-Roda, I., Pagilla, K., Steyer, J.-P., 2010. Model development and simulation for predicting risk of foaming in anaerobic digestion systems. *Bioresour Technol* 101, 4306-4314.

Duan, J.-L., Feng, Y., Feng, L.-J., Ma, J.-Y., Sun, X.-D., Wang, Q., Li, X.-Y., Xiao, F., Xu, P.-C., Tian, R.-K., Sun, W.-L., Yuan, X.-Z., 2021. Unraveling Anaerobic Digestion Foaming via Association between Bacterial Metabolism and Variations in Microbiota. *ACS EST Engg* 1 (6), 978-988.

Frølund, B., Palmgren, R., Keiding, K., Nielsen, P.H., 1996. Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin. *Water Res* 30 (8), 1749-1758.

Ganidi, N., 2008. Anaerobic digestion foaming causes - Dissertation. Cranfield University, School of Applied Science.

Ganidi, N., Tyrrel, S., Cartmell, E., 2009. Anaerobic digestion foaming causes – a review. *Bioresour Technol* 100, 5546-5554.

Gannavarapu, K., 2021. Development of tests for estimation of efficiency of counter measures against foaming in full-scale anaerobic digesters. Masterarbeit. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Griehl, C., Hecht, C., Streuber, S., Ganß, Y., Kremp, H., 2010. Bestimmung von Phenyllessigsäure zur Früherkennung von Prozessstörungen in Biogasanlagen. *Chem Ing Technik* 82(12), 2223-2229.

- Hennig, H., 2015. Biogasanlage Ochelmitz, in: Moeller, L., Zehnsdorf, A., Thrän, D., Pfeiffer, D. (Eds.), FOCUS ON: Schaumbildung in Biogasanlagen. ISSN: 2192-1156, S. 66.
- Hofmann, R.: Einsatz von Kemwater-Entschäumern besänftigt schlaflose Mitarbeiter. Der Kemwaterspiegel – Das Magazin für Wasseraufbereitung von Kemira Kemwater, 2003, S. 5.
- Jiang, C., McIlroy, S.J., Qi, R., Petriglieri, F., Yashiro, E., Kondrotaitė, Z., Nielsen, P.H., 2021. Identification of microorganisms responsible for foam formation in mesophilic anaerobic digesters treating surplus activated sludge. *Wat Res* 191, 116779.
- Junker, B., 2007. Foam and Its Mitigation in Fermentation Systems. *Biotechnol Progr* 23 (4), 767-784.
- Kleyböcker, A., Liebrich, M., Verstraete, W., Kraume, M., Würdemann, H., 2012. Early warning indicators for process failure due to organic overloading by rapeseed oil in one-stage continuously stirred tank reactor, sewage sludge and waste digesters. *Bioresour Technol* 123, 534–41.
- Kopplow, O.: *Maßnahmen zur Minderung des Schäumens im Faulbehälter unter besonderer Berücksichtigung der Klärschlamm-Desintegration*, Dissertation, 2006, Universität Rostock.
- Krieg, F., 2013a. Untersuchung der Wirkung von Getreideschrot auf die Schaumentwicklung in Biogasanlagen. Praktikumsbericht. HAW Hamburg. *Arbeit betreut und durchgeführt am UFZ*.
- Krieg, F., 2013b. Untersuchung der Wirkung des Getreidemahlgrades auf die Biogasproduktion. Bachelorarbeit. HAW Hamburg. *Arbeit betreut und durchgeführt am UFZ*.
- Kougias, P., Boe, K., O-Thong, S., Kristensen, L.A., Angelidaki, I., 2014a. Anaerobic digestion foaming in full-scale biogas plants: a survey on causes and solutions. *Water Sci Technol* 69, 889-895.
- Kougias, P., Boe, K., Tsapekos, P., Angelidaki, I., 2014b. Foam suppression in overloaded manure-based biogas reactors using antifoaming agents. *Bioresour Technol* 153, 198-205.
- Kougias, P., Boe, K., Einarsdottir, E.S., Angelidaki, I., 2015a. Counteracting foaming caused by lipids or proteins in biogas reactors using rapeseed oil or oleic acid as antifoaming agents. *Water Res* 79, 119-127.
- Kougias, P., Boe, K., Angelidaki, I., 2015b. Solutions for foaming problems in biogas reactors using natural oils or fatty acids as defoamers. *Energy Fuels*, 29(7), 4046-4051.
- KTBL (Hrsg.) (2009): Schwachstellen an Biogasanlagen verstehen und vermeiden. KTBL-Heft 84. ISBN: 978-3-939371-81-6.
- Lauda, Dr. R. Wobser GmbH & Co., KG: Bedienungsanleitung zum Tropfenvolumensensometer LAUDA TVT2. 2. Auflage.
- Lehnig, M., 2014: Vermeidung der Schaumbildung im Biogasreaktor bei der Vergärung von Zuckerrüben. Bachelorarbeit. Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig. *Arbeit betreut und durchgeführt am UFZ*.
- Lienen, T., Kleyböcker, A., Brehmer, M., Kraume, M., Moeller, L., Görsch, K., Würdemann, H., 2013. Floating layer formation, foaming, and microbial community structure change in full-scale biogas plant due to disruption of mixing and substrate overloading. *Energy Sustain Soc* 3:20.
- Lindorfer, H., Demmig, C., 2016. Foam formation in biogas plants – a survey on causes and control strategies. *Chem Eng Technol* 39, 620-626.
- Majak, W., McAllister, T.A., McCartney, D., Stanford, K., Cheng, K.-J., 2003. Bloat in cattle. Alberta Agriculture and Rural Development, Canada.
- Moeller, L., Herbes, C., Müller, R.A., Zehnsdorf, A., 2010. Schaumbildung und –bekämpfung im Prozess der anaeroben Gärung. *Landtechnik (Agricultural Engineering)*, 65/3, 204-207. (English version online: Formation and removal of foam in the process of anaerobic digestion).
- Moeller, L., Goersch, K., Neuhaus, J., Zehnsdorf, A., Mueller, R.A., 2012a. Comparative review of foam formation in biogas plants and ruminant bloat. *Energy Sustain Soc* 2:1-9.
- Moeller, L., Görsch, K., Müller, R., Zehnsdorf, A., 2012b. Bildung von Schaum in Biogasanlagen und seine Bekämpfung – Erfahrungen aus der Praxis. *Landtechnik*, 67/2, 110-113. (English version online: Formation and suppression of foam in biogas plants – practical experiences).

Moeller, L., Görsch, K., Köster, Y., Müller, R.A., Zehnsdorf, A., 2013. Schaumbildung und Schaumvermeidung in Biogasanlagen: Schlussbericht. UFZ-Bericht 1/2013. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Leipzig, 129 S.

Moeller, L., Görsch, K., 2015. Foam formation in full-scale biogas plants processing biogenic waste. *Energy Sustain Soc* 5:1.

Moeller, L., Zehnsdorf, A., Thrän, D., Pfeiffer, D. (Ed.), 2015a. FOCUS ON "Schaumbildung in Biogasanlagen", Fokusheft aus der Publikationsserie des BMWi-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“, ISSN 2192-1156, 76 S. https://www.ufz.de/export/data/2/87503_FH_schaumbildung_web.pdf

Moeller, L., Eismann, F., Wißmann, D., Nägele, H.-J., Zielonka, S., Müller, R.A., Zehnsdorf, A., 2015b Innovative test method for the estimation of the foaming tendency of substrates for biogas plants. *Waste Manage* 41, 39-49.

Moeller, L., Lehnig, M., Schenk, J., Zehnsdorf, A., 2015c. Foam formation in biogas plants caused by anaerobic digestion of sugar beet. *Bioresour Technol* 178, 270-277.

Moeller, L., Krieg, F., Zehnsdorf, A., Müller, R.A., 2016. How to avoid foam formation in biogas plants by coarse grain anaerobic digestion. *Chem Eng Technol* 39/4, 673-679.

Moeller, L., Zehnsdorf, A., 2016. Process upsets in a full-scale anaerobic digestion bioreactor: over-acidification and foam formation during biogas production. *Energy Sustain Soc* 6:30.

Moeller, L., Zehnsdorf, A., 2017. Mittel gegen Schaumbildung bei der Zuckerrübenvergärung in Biogasanlagen. *Landtechnik* 72(1), 13–22. (English version online: Measures to prevent foam formation in the anaerobic digestion of sugar beet in biogas plants).

Moeller, L., Zehnsdorf, A., Pokorná, D., Záborská, J., 2018a. Foam formation in anaerobic digesters. Book chapter in: Li, Y. Ge, X. (Ed.): *Advances in Bioenergy*, Volume 3, 1. Auflage, ISBN 978-0-12-815199-0, S. 1-42.

Moeller, L., Zehnsdorf, A., Müller, R.A., 2018b. Effect of triticale milling coarseness on biogas production. *Chem Ing Tech* 90 (1-2), 249 – 255.

Moeller, L., Görsch, K., 2020a. Determination of the foaming potential by means of the "bubble test", in: Liebetrau, J., Pfeiffer, D., Thrän, D. (Eds.), *Collection of Methods for Biogas. Series of the funding programme "Biomass energy use" Volume 7, DBFZ, ISBN 978-3-946629-47-4, S. 172-173.*

Moeller, L., Köster, Y., Zehnsdorf, A., 2020b. Leipzig foam tester – Test set for the determination of the tendency of a substrate to foam, in: Liebetrau, J., Pfeiffer, D., Thrän, D. (Ed.), *Collection of Methods for Biogas. Series of the funding programme "Biomass energy use" Volume 7, DBFZ, ISBN 978-3-946629-47-4, S. 174-176.*

Moeller, L., Goersch, K., 2020c. Determination of the surface tension, in: Liebetrau, J., Pfeiffer, D., Thrän, D. (Eds.), *Collection of Methods for Biogas. Series of the funding programme "Biomass energy use" Volume 7, DBFZ, ISBN 978-3-946629-47-4, S. 171.*

Mollet, H., Grubenmann, A., 2000. *Formulierungstechnik. Emulsionen, Suspensionen, Feste Formen*, Weinheim: Wiley-VCH.

Nägele, H.-J., 2015. Das Ende des Schaums. Bekämpfung der chronischen Schaumbildung der Biogasanlage in Andelbach, in: Moeller, L., Zehnsdorf, A., Thrän, D., Pfeiffer, D. (Eds.), *FOCUS ON: Schaumbildung in*

Pagilla, K.R., Crane, K.C., Kido, W.H., 1997. Causes and effects of foaming in anaerobic sludge digesters. *Wat Sci Tech* 36, 463-470.

Pahl, M. H., Franke, D., 1995. Schaum und Schaumzerstörung - ein Überblick *Chem-Ing.-Tech.* 67 (1995) Nr. 3, 300-312.

Pelton, R., 2002. A review of antifoam mechanisms in fermentation. *J Ind Microbiol Biot* 29, 149-154.

Rodríguez-Roda, I., Casellas, M., Grahit, C.E., 2013. Anaerobic digester foaming: occurrence and control in Spain. Conference proceedings 13th World Congress on Anaerobic Digestion, June 25-28, 2013 in Santiago de Compostela, Spain. IWA 11509.

Ross, R.D., Ellis, L.-A. M., 1992. Laboratory-scale investigation of foaming in anaerobic digesters. *Water Environ Res* 62, 151-162.

- Schnürer, A., 2016. Biogas production: Microbiology and Technology, in: Hatti-Kaul, R., Mamo, G., Mattiasson, B. (Eds.), *Anaerobes in Biotechnology. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology 156* (Series Editor: T. Scheper), ISSN 0724-6145, pp. 196-234.
- Subramanian, B., Pagilla K.R., 2015. Mechanisms of foam formation in anaerobic digesters. *Colloid Surface B*, 126, 621-630.
- Subramanian, B., Miot, A., Jones, B., Klibert, C., Pagilla, K.R., 2015. A full-scale study of mixing and foaming in egg-shaped anaerobic digesters. *Bioresour Technol* 192, 461-470.
- Suhartini, S., Heaven, S., Banks, C.J., 2014. Comparison of mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of sugar beet pulp: Performance, dewaterability and foam control. *Bioresour Technol* 152, 202-211.
- Suhartini, S., Heaven, S., Zhang, Y., Banks, C.J., 2019. Antifoam, dilution and trace element addition as foaming control strategies in mesophilic anaerobic digestion of sugar beet pulp. *Int Biodeter Biodegr* 145, 104812.
- Tian, L., Zou, D., Yuan, H., Wang, L., Zhang, X., Li, X., 2015. Identifying proper agitation interval to prevent floating layers formation of corn stover and improve biogas production in anaerobic digestion, *Bioresour Technol* 186, 1-7.
- UBA, 2021: Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2020. Herausgeber: Umweltbundesamt, ISSN 2363-829X.
- UFZ – Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH, 2013. Gebrauchsmuster, DE 202013000693.5, C12M 1/107, 1. Februar 2013.
- van Niekerk, A., Kawahigashi, J., Reichlin, D., Malea, A., Jenkins, D., 1987. Foaming in anaerobic digesters – a survey and laboratory investigation. *Water Pollut Control Fed* 59, 249-253.
- Vardar-Sukan, F., 1998. Foaming: Consequences, prevention and destruction. *Biotechnol Adv*, 16 (5–6), 913-948.
- Wanner, J., Růžičková, I., Krhůtkova, O., Přebyl, M., 1999. Activated sludge population dynamics and wastewater treatment plant design and operation. In: *Proceedings of the 8th IAWQ Conference on Design, Operation and Economics of Large Wastewater Treatment Plants*. September 6–9, Budapest, Hungary.
- Wappler, K., 2018. Einfluss der Faulschlammeigenschaften auf die Stabilität des Biogasprozesses - Untersuchung zu der Schaumbildung in den Faultürmen des Klärwerkes Leipzig-Rosental. Bachelorarbeit. Hochschule Zittau-Görlitz. *Arbeit betreut und durchgeführt am UFZ*.
- Weickardt, I., 2015. Einfluss von stickstoffhaltigen Substraten auf die Intensität der Schaumbildung bei der anaeroben Vergärung von Zuckerrübe. Praxisarbeit. Berufsakademie Sachsen. *Arbeit betreut und durchgeführt am UFZ*.
- Weißbach, F., Wolf, L., Strubelt, V., Strubelt, C., 2015. Unzerkleinerte Getreidekörner in Biogasanlagen. Methode zur Kontrolle der Ausnutzung von Getreide durch Untersuchung des Gärrestes, in: Moeller, L., Zehnsdorf, A., Thrän, D., Pfeiffer, D. (Eds.), *FOCUS ON: Schaumbildung in Biogasanlagen*. S. 18-24. ISSN: 2192-1156.
- Westlund, Å.D., Hagland, E., 1998. Foaming in anaerobic digesters caused by *Microthrix parvicella*. *Water Sci Technol* 37, 51-55.
- Wissmann, D., 2014. Untersuchungen zur Schaumbildung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Diplomarbeit. Universität Hohenheim.
- Wongfaed, N., Kongjan, P., O-Thang, S., 2015. Effect of Substrate and Intermediate Composition on Foaming in Palm Oil Mill Effluent Anaerobic Digestion System. *Energy Proced* 79, 930-936.
- Zábranská, J., Dohányos, M., Jeníček, P., Zaplatílková, P., Kutil, J., 2002. The contribution of thermophilic anaerobic digestion to the stable operation of wastewater sludge treatment. *Water Sci Technol* 46, 447-453.