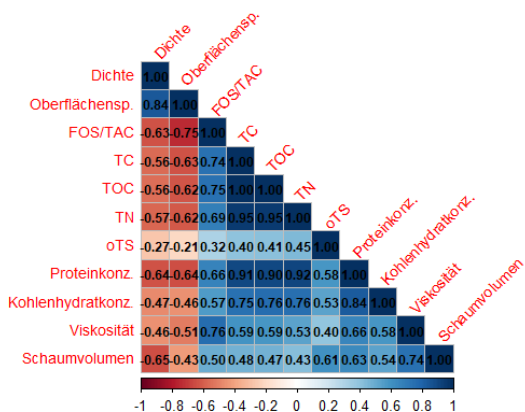
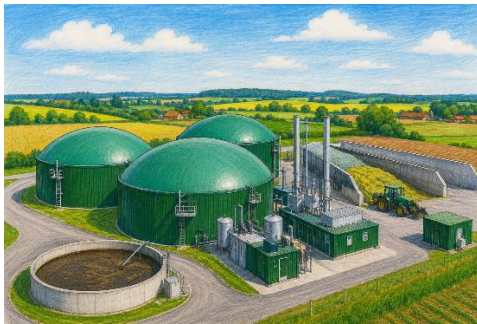


Leitfaden

„Maßnahmen gegen Prozessstörungen bei flexibler Vergärung von leicht abbaubaren Substraten“



Autor*innen: Dr.-Ing. Lucie Moeller¹, Dipl.-Ing. Frederik Bade¹, Dr. Sabine Kleinsteuber¹, Dr. Anastasia Oskina², Dr. Muhammad Tahir Khan²

¹ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Leipzig

² Universität Hohenheim, Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie 740, Stuttgart

Der Leitfaden ist auf der Basis der Ergebnisse des Forschungsprojektes „Prozessstabilität bei Vergärung leicht abbaubarer Substrate als Baustein für flexible Biogas-Produktion (LAS-Flex)“ (gefördert durch: Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (BMLEH) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages, FKZ: 2220NR310) und vorheriger Forschungsergebnisse am UFZ entstanden und ist als Empfehlung zu verstehen ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Die Autoren übernehmen keine Haftung.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	3
1. Grundlagen des Biogasprozesses	3
2. Ursachen der Prozessstörungen.....	4
2.1. Ursachen der Übersäuerung	4
2.2. Ursachen der Schaumbildung.....	4
3. Kritische Prozessparameter.....	5
3.1. Indikatoren der Übersäuerung.....	5
3.2. Indikatoren der Schaumbildung.....	6
4. Maßnahmen und Vorbeugung vor Prozessstörungen	6
4.1. Maßnahmen bei Übersäuerung	6
4.2. Maßnahmen bei Schaumbildung	6
5. Fazit	7
Referenzen und weiterführende Literatur	8

Einleitung

Zur Erreichung der Ziele der Energiewende bietet flexible Biogasproduktion und -verstromung einen wichtigen Baustein zur Ergänzung der wetterabhängigen und saisonal fluktuierenden erneuerbaren Energielieferanten. Neben dem Erweitern der Biogasspeicherkapazitäten besteht die Möglichkeit der bedarfsgerechten Biogasproduktion mit Hilfe der flexiblen Fütterung von leicht abbaubaren Substraten.

Die flexible Vergärung leicht abbaubarer Substrate stellt hohe Anforderungen an die Prozessstabilität von Biogasanlagen. Besonders bei schwankender Substratzusammensetzung oder kurzfristigen Laständerungen können Prozessstörungen auftreten, die die Biogasproduktion und die biologische Stabilität beeinträchtigen.

Ziel des Leitfadens ist es, auf bekannte Prozessstörungen der Biogasproduktion bei flexibler Vergärung von leicht abbaubaren Substraten hinzuweisen, mögliche Ursachen aufzuzeigen und geeignete Maßnahmen zur Prävention, Früherkennung und Behebung vorzustellen.

Der Leitfaden richtet sich an Betreiber*innen und Fahrer*innen von Biogasanlagen, Anlagenplaner*innen, landwirtschaftliche Betriebe mit integrierter Biogasproduktion und Fachpersonal im Bereich Biologie im Biogassektor.

1. Grundlagen des Biogasprozesses

Unter dem Begriff „flexible Vergärung“ wird die bedarfsorientierte Beschickung des Biogasfermenters verstanden, die mit Hilfe von schwankender Substratzufuhr bewerkstelligt wird. Für diesen Zweck eignen sich besonders leicht abbaubare Substrate, die sich durch einen vergleichsweise hohen Gehalt an bestimmten Kohlenhydraten wie Zucker, Pektin oder Stärke auszeichnen. Im landwirtschaftlichen Bereich gehören vor allem Zuckerrüben oder fein gemahlenes Getreideschrot dazu.

Die Verwendung von leicht abbaubaren Substraten kann jedoch im Biogasfermenter zu Prozessstörungen wie Übersäuerung oder Schaumbildung führen. Diese entstehen durch einen unausgewogenen Biogasprozess (siehe Kasten „Exkurs Biogasprozess“), wobei einer der vier Schritte der Umwandlung der komplexen organischen Moleküle zu Biogas nicht schnell genug ist und zum Flaschenhals wird. Bei unzureichender Geschwindigkeit der Acetogenese und/oder Methanogenese kommt es zur Anreicherung organischer Säuren, wodurch sich zunächst die Pufferkapazität im Biogasfermenter verringert und später der pH-Wert sinkt. Dadurch verschlechtern sich die Bedingungen für die sich langsam vermehrenden Mikroorganismen der Acetogenese und/oder Methanogenese, und die Kaskade endet in sog. **Übersäuerung**. Diese Prozessstörung hat zur Folge, dass die Methanogenese zum Erliegen kommt und kein Biogas mehr gebildet wird. Als Ursachen gelten Faktoren wie organische Überladung, schnelle Substratumstellung oder hohe Zucker- bzw. Stärkegehalte im Substrat. Zur Überladung kann es auch durch Ablagerungen im unteren Teil des Fermenters kommen,

Exkurs Biogasprozess: Komplexe organische Moleküle werden mit Hilfe von hydrolytischen Enzymen zu einfachen Molekülen gespalten (→ **Hydrolyse**), die weiter zu Wasserstoff und CO₂ sowie verschiedenen organischen Säuren vergoren werden (→ **Acidogenese**). Anschließend werden die Gärprodukte weiter zu Essigsäure abgebaut (→ **Acetogenese**). Aus Essigsäure sowie Wasserstoff und CO₂ entsteht im weiteren Prozess Biogas, welches hauptsächlich aus Methan und CO₂ besteht (→ **Methanogenese**). Diese vier Schritte sind eng verzahnt, insbesondere die Acetogenese kann nur gemeinsam mit der Methanogenese ablaufen.

welche das aktive Volumen verringern und somit bei gleichbleibender Substratbeschickung die Raumbelastung erhöhen.

Kommt es zur Überlastung der Hydrolyse, droht ein ungenügender Abbau der polymeren Substanzen. Das gebildete Biogas kann nicht optimal entweichen und es entsteht **Schaum**. Der Schaum äußert sich entweder in Form von Blasen auf der Oberfläche des Digestats oder durch Aufblähen des gesamten Fermenterinhalt. Häufig ist Schaumbildung harmlos und der Schaum verschwindet rasch. Ist der Schaum allerdings raumfordernd, kann es zu Verschmutzung von Gasleitungen oder auch zu Undichtigkeiten bzw. Konstruktionsschäden auf dem Dach des Fermenters kommen.

Unzureichend schnelle Hydrolyse kann auch zur Bildung von **Schwimmschichten** im Biogasfermenter führen. Diese sind aber meist auf die Beschickung mit schwer abbaubaren Substraten mit hohem Fasergehalt zurückzuführen, sodass sie in diesem Leitfaden nicht weiter betrachtet werden. Schwimmschichten können auch als Folge von unzureichender Durchmischung des Fermenters entstehen.

Bei Vergärung von Substraten mit hohem Stickstoffgehalt kann auch **Hemmung durch Ammoniakbildung** vorkommen. Die Folge ist die Störung der Methanogenese, die sich in einem Rückgang der Biogasproduktion äußert. Da dieses Phänomen auf spezielle Substrate wie z. B. Hühnertrockenkot zurückzuführen ist, wird auch diese Prozessstörung in diesem Leitfaden nicht weiter behandelt.

2. Ursachen der Prozessstörungen

2.1. Ursachen der Übersäuerung

Eine Übersäuerung kann bei flexibler Beschickung vorkommen, wenn zum Fermenterinhalt mit vergleichsweise **niedriger Pufferkapazität große Mengen Substrat** hinzugefügt werden, das leicht abbaubar ist und daher in kurzer Zeit zu großen Mengen an organischen Säuren vergoren wird. Eine weitere Ursache der Übersäuerung kann eine **Störung der Methanogenese** sein, die zur Akkumulation nicht umgesetzter Gärprodukte führt. Dies geschieht bei **Hemmung** durch z. B. Ammoniak, Schwefelwasserstoff oder andere Störstoffe. Dazu gehören Mykotoxine aus schimmelbefallenen Substraten (Moeller & Zehnsdorf, 2016) sowie Antibiotika oder Reinigungs- und Desinfektionsmittelrückstände in Geflügelmist und Gülle, wobei hier die Reaktion der Mikroorganismen auf solche Toxine sehr schnell erfolgt (Lindorfer & Demmig, 2015). Darüber hinaus können sich plötzliche Temperatur- oder pH-Schwankungen negativ auf den Biogasprozess auswirken. In kontinuierlich betriebenen Systemen spielen die Temperaturbedingungen und die damit verbundene Abbaukinetik leicht abbaubarer Substrate eine wichtige Rolle. Während in einem thermophil betriebenen einstufigen System die Vergärung von Zuckerrübensickersaft selbst bei einer hohen Dosierung (bis zu 75 % bei einer organischen Raumbelastung von 4,6 g oTS/(L*d)) problemlos möglich war, führte unter mesophilen Bedingungen eine hohe Dosierung von Zuckerrübensickersaft zu Übersäuerung (Oskina et al., 2026).

2.2. Ursachen der Schaumbildung

Die Ursachen der übermäßigen Schaumbildung im Biogasfermenter sind häufig schwer festzustellen. Bei flexibler Substratbeschickung liegt die Ursache allerdings an der Dynamik des Prozesses. Kommt es zur plötzlichen Schaumentwicklung im Biogasfermenter, liegt die Ursache meist in der Zusammensetzung der Substratmischung. Gerade bei Substraten mit hohem Gehalt an **Protein** und/oder **Polysacchariden** (Stärke, Pektin) ist das Risiko der Schaumbildung besonders hoch.

Typische Substrate, die zum Schäumen im Biogasfermenter einer landwirtschaftlichen Biogasanlage neigen, sind neben **Zuckerrübe** (in Form von Silage und Sickersaft) **und Getreide** auch **Hühnermist**, der Reste von Eiern beinhaltet, **Gülle** (Lindorfer & Demmig, 2014), aber auch **Maissilage**, die **aus überständigem Mais** hergestellt wurde und einen hohen Trockensubstanzgehalt hat (Nägele, 2015).

Eine zu intensive **Zerkleinerung der Substrate** kann, je nach Ausstattung des Fermenters mit Mikroorganismen der jeweiligen Phasen des Biogasprozesses, zu einer Prozessstörung führen. Eine Verringerung der Partikelgröße des Substrats vergrößert die für mikrobielle Angriffe zugängliche, spezifische Oberfläche und führt somit zu schnelleren Reaktionsgeschwindigkeiten einzelner Schritte des Biogasprozesses (Alavi-Borazjani et al., 2020). Ist die Hydrolyse bestimmter Polymere wie z.B. Protein oder Pektin der Flaschenhals, kann es zur Bildung von Schaum kommen. Sind es die nachfolgenden Schritte des Biogasprozesses, steigt die Gefahr einer Übersäuerung.

Zu weiteren unerwünschten Eigenschaften des Substrats gehört ein **niedriger pH-Wert** (Lindorfer & Demmig, 2015). Durch die lokale Absenkung des pH-Wertes im Fermenter bei der Beschickung mit solchen Substraten kommt es zur sofortigen Entgasung von Kohlendioxid und somit zur Schaumbildung. Ein Beispiel eines solchen Substrates ist der Sickersaft von Silagen; der pH-Wert von Zuckerrübensickersaft liegt beispielsweise bei 3,4. Den chemischen Analysen zufolge enthält dieser eine hohe Menge an organischen Säuren, insbesondere Essigsäure und Milchsäure. Weiterführende Untersuchungen zeigten, dass vor allem Alpha-Hydroxy-Säuren (z.B. Milchsäure) die stärkste Schaumbildung verursachen (Oskina & Khan, persönliche Mitteilung).

Für langanhaltende Schaumprobleme können aber auch andere Faktoren eine Rolle spielen, beispielsweise **Nährstoffmangel**, **Ablagerungen im unteren Bereich des Biogasfermenters**, **plötzliche Temperaturschwankungen** oder die Nutzung von **Desinfektionsmitteln** in der Tierhaltung (Moeller et al., 2012). Die Intensität der Schaumbildung kann durch die **Kombination von Effekten verstärkt** werden. Eine solche Kombination ist z. B. die Streuung von Dolomitkalk im Rinderstall bei Vergärung von zuckerrübenhaltigen Substratmischungen (Moeller et al., 2015). Schaumbildung, die durch Anwesenheit von Pektin verursacht wird, wird durch Saccharose oder Calcium-/Magnesiumsalze intensiviert (Moeller et al., 2015).

Die Intensität der Schaumbildung hängt signifikant mit den **physikalischen Eigenschaften des Fermenterinhalt**s wie der Viskosität zusammen (Bade et al., 2025).

Nach wie vor gibt es ungeklärte Fälle von Schaumbildung. So neigt bei der **Trockenfermentation** (Biogasproduktion unter Verwendung stapelbarer Substrate ohne Gülle) der Fermenterinhalt nach einer gewissen Zeit zur chronischen Schaumbildung. Hier spielt die Rückführung der Flüssigphase eine entscheidende Rolle. Da diese ein wesentlicher Bestandteil der Technologie ist, kann die Entwicklung von Gegenmaßnahmen nur auf der Bekämpfung von Symptomen beruhen.

3. Kritische Prozessparameter

3.1. Indikatoren der Übersäuerung

Zur Beurteilung der Funktionsfähigkeit der Methanogenese und zur Vorbeugung der Übersäuerung wird routinemäßig der **FOS/TAC-Wert**, der das Puffervermögen des Fermenterinhalt widerspiegelt, gemessen. Dieser Wert beurteilt das Vermögen des Fermenterinhalt, höhere Konzentrationen von organischen Säuren abzupuffern, und sollte optimal bei Werten unter 0,3 liegen (Scherer et al., 2021). Als weiterer Frühwarnindikator wurde das **Verhältnis aus dem Gehalt der organischen Säuren zur Calciumkonzentration** identifiziert, der die Übersäuerung bereits drei bis sieben Tage vor deren Eintreten ankündigt (Kleyböcker & Würdemann, 2012). Der **pH-Wert** eignet sich nur bedingt als Parameter für Übersäuerung, da dieser erst nach dem Ausschöpfen der Pufferkapazität reagiert, wenn

die Aktivität der Mikroorganismen bereits irreversibel beeinträchtigt ist. Als Optimum gilt ein pH-Wert zwischen 6,8-8 (Eder & Schulz, 2007). Auch die **Produktionsrate von Biogas und dessen Methangehalt** können zur Beurteilung der Prozessbiologie dienen, allerdings auch hier mit deutlicher Verzögerung.

3.2. Indikatoren der Schaumbildung

Keiner der genannten Parameter eignet sich für die Vorhersage der übermäßigen Schaumbildung im Biogasfermenter, weil dieses Phänomen auf die unausgewogene Belastung der vorherigen Stufen der Biogasbildung (vor allem der Hydrolyse) zurückzuführen ist. Die Hydrolyse kann anhand der **Aktivitäten spezifischer hydrolytischer Enzyme** quantifiziert werden, jedoch hat dieser Parameter keine allgemeine Gültigkeit, sodass keine Grenzwerte ermittelt werden können. Eine Vorhersage der Schaumneigung von Substraten ist mit Hilfe eines **Schaumtests** möglich, der das Verhalten im Biogasfermenter nachahmt (Moeller et al., 2013). Hierbei wird das Digestat der Biogasanlage mit dem zu testenden Substrat in einem Gärgefäß vermischt und bei konstanter Temperatur inkubiert. Bildet sich eine Schaumschicht auf der Oberfläche, ist davon auszugehen, dass die Beschickung des Biogasfermenters mit diesem Substrat auch zur Schaumbildung führen wird.

4. Maßnahmen und Vorbeugung vor Prozessstörungen

Bei jeglicher Störung des Prozesses ist es wichtig, die **Beschickung mit Substrat** zunächst **auszusetzen**. Ist eine akute Hemmung einer Stufe des Biogasprozesses die Ursache der Prozessstörung, kann diese Maßnahme allein schon reichen, um den Prozess wieder ins Gleichgewicht zu bringen.

4.1. Maßnahmen bei Übersäuerung

Neben der Einstellung der Beschickung helfen auch weitere Sofortmaßnahmen, wie **partieller Austausch des Digestates zwischen Fermenter und Nachgärer** (Moeller & Zehnsdorf, 2016) oder **Zugabe von puffernden Substanzen** (z. B. kalkhaltige Produkte). Auch die Erhöhung des Anteils an **Rindergülle** im Substratmix verbessert die Pufferkapazität des Fermenterinhalt. Gleichzeitig kann ein höherer Rindergülleanteil auch die Prozessleistung positiv beeinflussen: Bei der Vergärung eines Gemisches aus 50 % ZRS und 50 % Rindergülle bei einer organischen Raumbelastung von 3,6 g oTS/(L*d) wurden die höchsten spezifischen Methanerträge erzielt, ohne dass unter mesophilen oder thermophilen Bedingungen Prozessstörungen auftraten (Oskina et al., 2026).

Allgemein wird die **Co-Vergärung von Substraten mit unterschiedlichen Eigenschaften** als eine Maßnahme zur Vorbeugung einer Übersäuerung empfohlen (Alavi-Borazjani et al., 2020). Außerdem kann die Prozessbiologie durch fluktuierende Substratbeschickung an eine flexible Fahrweise des Biogasfermenters angepasst werden. So wurde gezeigt, dass die diskontinuierliche Beschickung mit größeren Unterbrechungen zu einem robusteren Mikrobiom führt, welches flexibler auf Schwankungen der Raumbelastung reagiert und widerstandsfähiger gegenüber Übersäuerung ist (Bonk et al., 2018). Die Aktivität der methanbildenden Mikroorganismen kann, vor allem bei Beschickung mit rein pflanzlichen Substraten, durch Spurenelementmangel beeinträchtigt sein. Diesem kann durch Verwendung von Eisenadditiven oder speziellen **Spurenelementmischungen** vorgebeugt werden.

4.2. Maßnahmen bei Schaumbildung

Als Erstmaßnahme bei akuter Schaumbildung ist auch hier die Unterbrechung der Beschickung angebracht. Zusätzlich ist das **Besprühen der Oberfläche des Fermenterinhalt mit Wasser** oder einem für Biogasanlagen zugelassenen **Antischaummittel** notwendig. Dabei ist zu beachten, dass es kein generell wirkendes Antischaummittel gibt. Die Eignung des Antischaummittels für die

Bekämpfung des Schaums in einer Biogasanlage kann mit Hilfe des sog. **Bubble-Test** geprüft werden (Moeller & Görsch, 2013). Dieser Test kann vor Ort durchgeführt werden, indem mittels einer Aquarien-Luftpumpe mit Sprudelstein Luft in eine Digestat-Probe eingeführt und die Schaumbildung vor und nach Zugabe des Antischaummittels verglichen wird (Gannavarapu, 2021).

Als Antischaummittel können auch **Pflanzenöle** genutzt werden. Ein Vergleich von sechs reinen Pflanzenölen zeigte, dass **Sonnenblumenöl** die Schaumbildung bei Vergärung von Zuckerrübe und Getreide am effektivsten unterdrückt (Bade et al., 2025). Dabei kann das Pflanzenöl entweder als Antischaummittel auf den Schaum gesprüht oder direkt zum Substrat zugegeben werden. Letzteres hat bei Getreideschrot den Vorteil, dass die Benetzung der Partikel mit Öl die Staubbildung verringert. Aus ökotoxikologischen Gründen ist es nicht vertretbar, Biodiesel als Antischaummittel zu nutzen.

Neben Antischaummitteln werden in spezifischen Fällen Puffersubstanzen angewendet. Bei übermäßiger Schaumbildung, wie sie bei der Vergärung von Zuckerrübe auftreten kann, kann die Zugabe von **stickstoffhaltigen Düngemitteln** (Harnstoff, Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung) zur Stabilisierung führen (Moeller & Zehnsdorf, 2016). Jedoch ist bei der Auswahl des Mittels Vorsicht geboten: Kalkstickstoff führt zur Hemmung des Biogasprozesses, daher ist von seiner Verwendung abzuraten (Moeller & Zehnsdorf, 2017).

Zur Unterstützung der Hydrolyse können **hydrolytische Enzyme** wie Pektinase bei Zuckerrübenvergärung (Bade et al., 2025) oder proteinspaltende Enzyme (Proteasen) bei der Vergärung von Triticale (Bade et al., in Vorbereitung) angewendet werden. Im Substrat vorhandene hydrolytische Enzyme können durch Anmischen mit Wasser aktiviert werden, wie für Triticale-Schrot demonstriert wurde (Bade et al., in Vorbereitung).

Eine wesentliche Auswirkung auf die Intensität der Schaumbildung hat das Maß der **Zerkleinerung des Substrates**. Ist das Substrat fein gemahlen (Getreide) oder zu Mus verarbeitet (Zuckerrübe), kommt es zur Bildung von wesentlich höheren Schichten von Schaum als bei grob gemahlenem oder gequetschten (Getreide) bzw. stückigem Substrat (Zuckerrübe) (Moeller et al., 2015 und 2016). Der Biogaspeak wird durch die gröbere Verarbeitung des Substrats zwar flacher, dennoch ist die Biogasausbeute mit der des fein verarbeiteten Substrates vergleichbar.

Bei länger andauernden Problemen mit übermäßiger Schaumbildung unbekannter Ursache wird der **Pegel im Biogasfermenter gesenkt**, um dem Schaum Raum zu geben und zu verhindern, dass dieser in die Gasleitungen gelangt (Hennig, 2015). Es werden auch **Anpassungen der Fermenterkonstruktion** durchgeführt, beispielsweise durch den Einbau einer großvolumigen Überlaufleitung direkt auf Höhe des Füllstands (Lindorfer & Demmig, 2015). Darüber hinaus wird der **Rührzyklus verlängert** (Moeller et al., 2015) bzw. werden die **Tauchmotorrührwerke in der Höhe verstellt** (Lindorfer & Demmig, 2015), um den Schaum zu unterrühren. Bei zweistufigen Biogasanlagen ermöglicht die Verlängerung der Verweilzeit in der ersten Stufe die Reduktion der Schaumbildung im Hauptfermenter. Saure Substrate werden in manchen Fällen bereits vor ihrer Beschickung neutralisiert (Lindorfer & Demmig, 2015).

5. Fazit

Die flexible Vergärung leicht abbaubarer Substrate bietet hohe Potenziale für eine bedarfsgerechte Biogasproduktion, erfordert jedoch eine sorgfältige Prozessführung und kontinuierliche Überwachung. Durch geeignete Präventions- und Gegenmaßnahmen können Prozessstörungen frühzeitig erkannt und vermieden werden.

Referenzen und weiterführende Literatur

- Alavi-Borazjani, S.A., Capela, I., Tarelho, L.A.C. (2020): Over-acidification control strategies for enhanced biogas production from anaerobic digestion: A review. *Biomass and Bioenergy*, 143, 105833. doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105833
- Bade, F., Kleinsteuber, S., Moeller, L. (2025): Foam formation during anaerobic digestion of sugar beet silage: causes and countermeasures. *Bioresource Technology* 437, 133180. doi: 10.1016/j.biortech.2025.133180
- Bade, F., Ranjit, M., Moeller, L. (2025): Einfluss der Eigenschaften des Gärmaterials auf die Schaumbildung bei der Vergärung von Triticale. In: Nelles, M. (Hrsg.) 19. Rostocker Biomasseforum: am 19. und 20. Juni 2025. Tagungsband Schriftenreihe Umweltingenieurwesen 131, Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Rostock, S. 139 – 149. doi: 10.18453/rosdok_id00004784
- Bonk, F., Popp, D., Weinrich, S., Sträuber, H., Kleinsteuber, S., Harms, H., Centler, F. (2018): Intermittent fasting for microbes: how discontinuous feeding increases functional stability in anaerobic digestion. *Biotechnology for Biofuels* 11, 274. doi: 10.1186/s13068-018-1279-5
- Eder, B., Schulz, H. (2007): *Biogas Praxis*, 4. Auflage, ISBN 978-3-936896-13-8, S.24.
- Gannavarapu, K. (2021): Development of tests for estimation of efficiency of counter measures against foaming in full-scale anaerobic digesters. Diploma Thesis, Otto von Guericke University Magdeburg.
- Hennig, H. (2015): Biogasanlage Ochelmitz. In: Moeller, L., Zehnsdorf, A., Thrän, D., Pfeiffer, D. (Hrsg., 2015), Focus on: Schaumbildung in Biogasanlagen. Fokusheft energetische Biomassenutzung DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig, S. 66.
- Kleyböcker, A.; Würdemann, H. (2012): Verfahren zur Prozesssteuerung von Bioreaktoren (Process control of biogas plant comprises measuring quantities of organic acids and calcium ions during operation of biogas plant in predetermined intervals, determining ratio of these quantities and comparing it with previous intervals), 102008044204 B4 (erteiltes Patent, 2013), 102008044204 A1 (erste Veröffentlichung, 2010).
- Lindorfer, H., Demmig, C. (2015): Foam Formation in Biogas Plants – A Survey on Causes and Control Strategies. *Chemical Engineering and Technology* 39/4, 620-626. doi: 10.1002/ceat.201500297
- Moeller, L., Görsch, K., Müller, R.A., Zehnsdorf, A. (2012): Bildung von Schaum in Biogasanlagen und seine Bekämpfung - Erfahrungen aus der Praxis. Formation and suppression of foam in biogas plants - practical experiences. *Landtechnik* 67 (2), 110 – 113. doi: 10.15150/lt.2012.280
- Moeller, L., Köster, Y., Zehnsdorf, A. (2013): Leipziger Schaumtester – Testset zur Bestimmung der Schaumneigung von Substrat im aktiven Gärmaterial. In: Liebetrau, J., Pfeiffer, D., Thrän, D. (Hrsg.): Messmethodensammlung Biogas. Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“, Band 7, 2. Auflage, ISSN 2192-1803, S. 103-1051.
- Moeller, L., Görsch, K. (2013): Bestimmung des Schaumpotenzials mit dem „Bubble-Test“. In: Liebetrau, J., Pfeiffer, D., Thrän, D. (Hrsg.): Messmethodensammlung Biogas. Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“, Band 7, 2. Auflage, ISSN 2192-1803, S. 101-103.
- Moeller, L., Lehnig, M., Schenk, J., Zehnsdorf, A. (2015): Foam formation in biogas plants caused by anaerobic digestion of sugar beet. *Bioresource Technology* 178, 270 – 277. doi: 10.1016/j.biortech.2014.09.098

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. doi: 10.1002/ceat.201500300

Moeller, L., Zehnsdorf, A. (2017): Process upsets in a full-scale anaerobic digestion bioreactor: over-acidification and foam formation during biogas production. *Energy, Sustainability and Society*, 6:30. doi: 10.1186/s13705-016-0095-7.

Moeller, L., Zehnsdorf, A. (2017): Mittel gegen Schaumbildung bei der Zuckerrübenvergärung in Biogasanlagen. Measures to prevent foam formation in the anaerobic digestion of sugar beet in biogas plants. *Landtechnik* 72 (1), 13 – 22. doi: 10.15150/lt.2017.3149

Nägele, H. (2015): Das Ende des Schaums. Bekämpfung der chronischen Schaumbildung der Biogasanlage in Andelbach. In: Moeller, L., Zehnsdorf, A., Thrän, D., Pfeiffer, D. (Hrsg., 2015), Focus on: Schaumbildung in Biogasanlagen. Fokusheft energetische Biomassenutzung DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig, S. 37-43.

Oskina A., Khan M.T., Lemmer A. (2026): Prozessstabilität bei Vergärung leicht abbaubarer Substrate als Baustein für flexible Biogas-Produktion (Poster). *Biogas Infotage*, Ulm, 28.01.-29.01.2026.

Scherer, P., Pydde, M., Antonczyk, S., Krakat, N. (2021): The FOS/TAC (VOA/TIC) value put to the test. *Biogas Journal* (Zeitschrift des Fachverbandes Biogas, Freising) Englische Ausgabe 1-2021, S. 28–32.

Alle am Department Systemische Umweltbiotechnologie des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung veröffentlichten Publikationen zum Thema sind auf der Webseite www.ufz.de/biogas-schaum aufgelistet.