



Professor Dr.-Ing. Manfred Greger

Jahrgang 1955

Nach dem Studium des Chemieingenieurwesens promovierte er 1987 zum Dr.-Ing. an der Universität Karlsruhe. Es folgten Tätigkeiten als Entwicklungsingenieur bei der Fa. Henkel in Düsseldorf (1987-1996) und als Betriebsleiter der Pulverproduktion der Fa. Chemolux (1996-2001) und schließlich 2002 die Berufung zum Professor für Werkstoffkunde und Prozess-/Verfahrenstechnik am Institut Supérieur de Technologie (IST), das 2003 in die neugeschaffene Universität Luxemburg integriert wurde. Der Schwerpunkt der Forschung liegt im Bereich der Biogastechnologie.



Dipl. Ing. Katarzyna Golkowska

Jahrgang 1982

Nach dem Studium der Umwelttechnik am Internationalen Hochschulinstitut Zittau (D) ist sie seit 2007 als wissenschaftliche Assistentin an der Fakultät der Wissenschaften, Technologie und Kommunikation der Universität Luxemburg tätig. Im Rahmen eines Biogas-Forschungsprojekts führt sie Untersuchungen zur Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen durch.

Einführung

Die Idee Energie aus Biogas zu gewinnen ist keine Neuerung. Schon um 1770 führte Alessandro Volta die ersten Untersuchungen mit der Verbrennung vom Sumpfgas durch. Dabei war es damals noch nicht klar, welche Komponenten das Biogas ausmachen (Schulz & Eder, 2001).

Die wirkliche Entwicklung der Biogas-Branche erfolgt allerdings erst seit der Mitte der achtziger Jahre. Die ursprünglich aus den Kläranlagen stammenden anaerobe (unter Luftausschluss) Abbautechnologien wurden im Agrarbereich immer öfters zur Ver-

gärung von Gülle implementiert. Die Preisentwicklung und Verfügbarkeit der fossilen Energieträger, der CO₂-neutrale und dadurch umweltschonende Erzeugungsvorgang¹, sowie die entsprechende Gesetzgebung haben der Biogastechnologie ab Anfang dieses Jahrzehntes einen neuen Aufschwung verliehen (Bischofsberger et al., 2005).

¹ Bei der Vergärung von Biomasse entstehen zwar erhebliche Mengen an CO₂, die freigesetzt werden. Es handelt sich allerdings dabei um das CO₂, was beim Pflanzenwachstum der Luft entzogen wurde - im Gegensatz zu den fossilen Energieträgern, die das seit Millionen Jahren gespeicherte CO₂ der Atmosphäre zufügen.

Dabei versucht man heutzutage die Produktivität der Biogasanlagen zu steigern, um höchst mögliche Biogaserträge bezogen auf den organischen Trockensubstanzgehalt (oTS) des Substrates zu erreichen. Dies ist auf drei Art und Weisen möglich: (1) Cofermentation von Gülle mit verschiedenen Substraten², (2) die alleinige Fermentation von nachwachsenden Rohstoffen bzw. (3) Optimierung des Gärprozesses selbst.

² Es handelt sich dabei um die Substrate, die einen hohen oTS-Gehalt aufweisen, wie z.B. nachwachsende Rohstoffe (Gras, Mais, Sudangras etc.), organische Abfälle, Stroh.

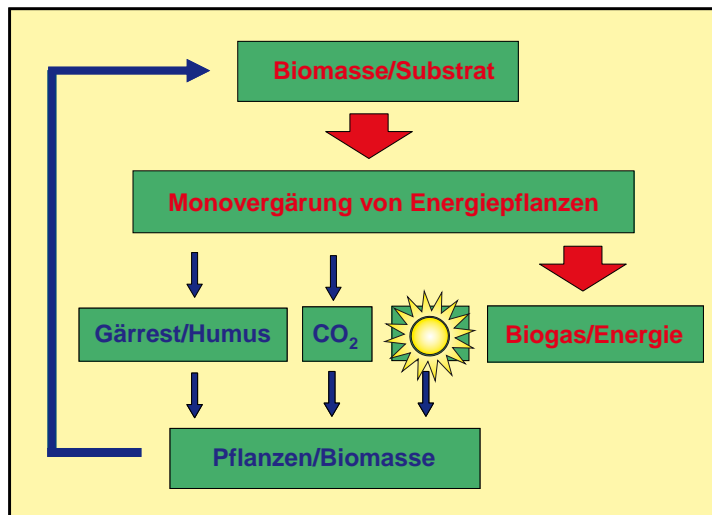


Abb. 1: Nachhaltiger Biomassekreislauf bei der Herstellung von Biogas

Die effiziente Vergärung von Biomasse in Kombination mit der Verwertung von anfallenden nährstoffreichen Gärresten kann lokal für private Personen sowie ganze Gemeinden eine umweltfreundliche Alternative sein, Strom-, Wärme bzw. Bio-Erdgas zu gewinnen (s. **Abb. 1**). Dank der Kreislaufführung der Nährstoffe bleibt die gesamte Ökobilanz der Biogaserzeugung recht günstig im Vergleich z.B. zur Biodiesel-Erzeugung (Maier, 2006; WBGU, 2008).

Trotz des großen wirtschaftlichen Potenzials besteht im Bereich der Biogaserzeugung noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf besonders bei der Co- und Trockenfermentation. Die Vergärung der Biomasse ist auch für Luxemburg eine besonders interessante Energieversorgungsalternative. Deshalb wird auch an der Universität Luxemburg daran gearbeitet, die entstandene Forschungslücke zu schließen. Das geschieht sowohl in diskontinuierlichen Versuchen im Kleinmaßstab (Batch) als auch mit quasi-kontinuierlich betriebenen Technikumsfermentern, die in Zusammenarbeit mit der Fa. IGLux s.à.r.l.(Rumelange) betrieben werden.

Komplexe Biologie des Biomasseabbaus

Die Zersetzung der komplex aufgebauten Biomasse zu den einfachen CO_2 - und CH_4 -Molekülen ist ein sequentieller Prozess, an dem viele Bakteriengruppen beteiligt sind. Die Umsatzprodukte von den hydrolysierenden Bakterien stellen das Substrat für die Säure bildenden Bakterien dar, die wiederum den Einsatzstoff für die methanogenen Bakterien schaffen. Das vereinfachte Prozessschema ist in **Abb. 2** dargestellt. In der Realität können die Bakterien Methan nicht nur direkt über den Weg des Essigsäureabbaus, sondern auch über den Weg der Oxidation aus dem als Zwischenprodukt gebildeten Wasserstoff und Kohlendioxid erzeugen. Neben den genannten Abbaupfaden sind marginal auch andere Reaktionswege mit anderen Zwischenprodukten bei der Zersetzung der Biomasse möglich (Roediger et al., 1990; Kaltschmitt & Hartmann, 2001; Bischofsberger et al., 2005). Da die methanogenen Bakterien sich nur unter Sauerstoffausschluss

(anaerob) vermehren und arbeiten können, muss die Vergärung ohne Luftzutritt stattfinden. Technisch interessant sind die Abbauprozesse im thermophilen (45°C - 60°C) sowie mesophilen (35°C - 45°C) Temperaturbereich.

Die optimalen pH-Bedingungen für die Bakteriengruppen innerhalb der Biozönose reichen von 4,5 bis zu 7,5 und schließen sich teilweise aus. Weiterhin unterscheiden sich die Bakterien gravierend, was ihre Generationszeiten³ angeht (Roediger et al., 1990). Die Lebensbedingungen der methanogenen Biozönose sowie die jeweiligen Generationszeiten sind in **Abb. 3** zusammengefasst. Die verschiedenen Lebensoptima der einzelnen Bakteriengruppen haben zur Folge, dass in einem vollkommen durchgemischten Fermenter (wie derzeit üblich) mit einem überall gleichen pH-Wert von 7,0-7,5 die hydrolysierenden und Säure bildenden Bakterien benachteiligt sind.

In einem Forschungsprojekt wird die komplexe Biologie von Modell- bzw. repräsentativen Substanzen untersucht. Beim Einsatz von unterschiedlichen Substraten und Belastungen wird das Verhalten einer methanogenen Biozönose bei der Unterversorgung, optimaler Beschickung, sowie an der oberen Belastungsgrenze bis zum Zusammenbruch der Gasproduktion untersucht. Die Experimente werden in Batch-Betrieb unter thermophilen bzw. mesophilen Bedingungen durchgeführt. Über einen längeren Zeitraum werden die relevanten Reaktionsparameter wie pH-Wert, Redoxpotenzial, Pufferkapazität(TAC)⁴, Fettsäuremuster (FS), sowie die Menge und Zusammensetzung (CH_4 , CO_2 , O_2 , H_2S) des produzierten Biogases erfasst.

³ die Zeit zur Verdopplung der Zellenzahl einer bakteriellen Kultur

⁴ nach Nordmann (1985)

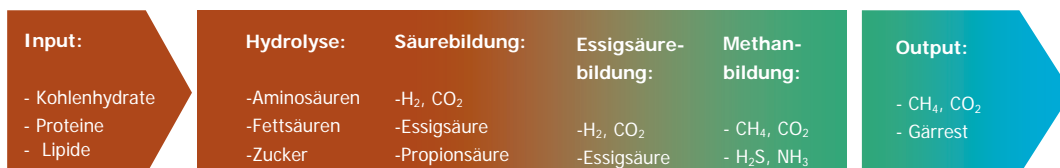


Abb. 2: Biomasseabbaustufen durch eine methanogene Biozönose- Der Farbwechsel während der Zersetzung weist auf die unterschiedlichen optimalen pH-Bedingungen im Verlauf des Abbaus hin (rot – sauer, grün – neutral, blau – alkalisch)

Bakterien	hydrolysierende und versäuernde	acetogene	methanogene
pH - Bereich	4,5 – 8,0	4,5 – 8,5	6,5 – 8,5
pH optimal	4,5 – 6,3	6,8 – 7,5	6,8 – 7,5
Generationszeit	einige min bis 1h	1- 4 d	5-15 d

Abb. 3: Die möglichen und optimalen Lebensbedingungen sowie die Verdopplungszeit für die Bakterien der methanogenen Biozönose (nach Roediger et al., 1990, Amon et al., 2002)

Abb. 4 zeigt beispielhaft die zeitliche Entwicklung der Biogas-, Methan- und CO₂-Produktion sowie den Verlauf der Summe kurzketziger Fettsäuren (FS), die als Zwischenprodukt im Vergärungsvorgang vorkommen (hier: bei der thermophilen Vergärung von Zellulose - Stoßbelastung 11,4kg oTS/m³). Sowohl der Verlauf der Gasbildung als auch der FS zeigt deutlich, dass die Fermentation nach 9 Tagen nahezu abgeschlossen ist. Lediglich für die noch vorhandenen FS ist nach dem 9. Tag ein weiterer Abbau zu beobachten. Die Methankonzentration im gesamten Biogas liegt mit 53% auf dem Niveau, das für den Abbau von Kohlenhydraten typisch ist.

Nicht nur die in Abb. 4 dargestellte Summe kurzketziger FS ist für die Beurteilung des Systemzustandes wichtig. Auch die zeitliche Entwicklung der einzelnen FS ist für den Fermentationsvorgang von großer Bedeutung. Während die Produktion von Essigsäure (CH₃COOH)

und entsprechend kleineren Mengen Propionsäure (C₂H₅COOH) für einen gesunden Vergärungsprozess notwendig ist, deutet schon ein sehr kleiner Konzentrationsanstieg der längerketzigen FS (Butter- und Valeriansäure) auf inhibierende Verhältnisse bei der Fermentation hin. Nach Schattauer & Weiland (2006) wirkt ein Gehalt an Buttersäure von mehr als 0,05 g/l produkthemmend.

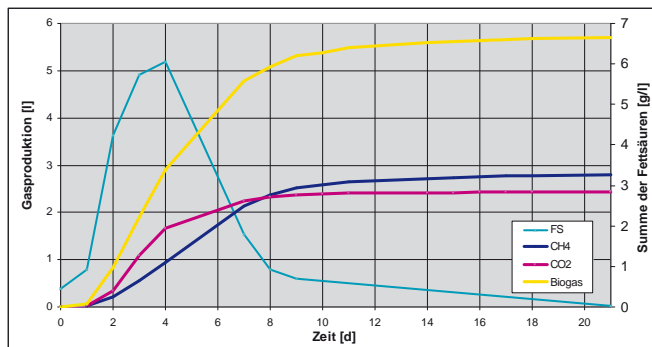


Abb. 4: Biogas-, Methan- und CO₂-Produktion sowie Fettsäureakkumulierung und -abbau bei der thermophilen Vergärung von Zellulose (Stoßbelastung 11,4 kg oTS/m³)

Abb. 5 zeigt ein typisches Muster des

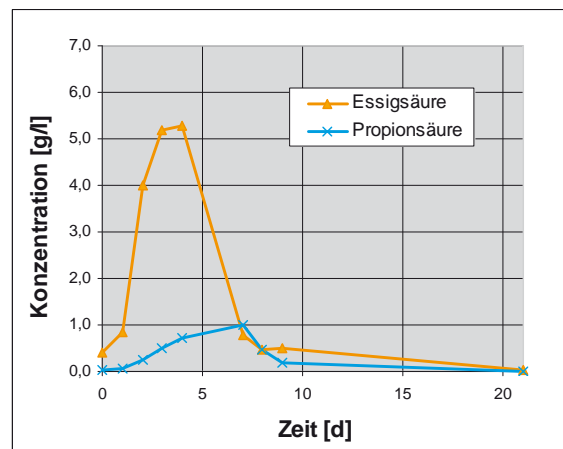
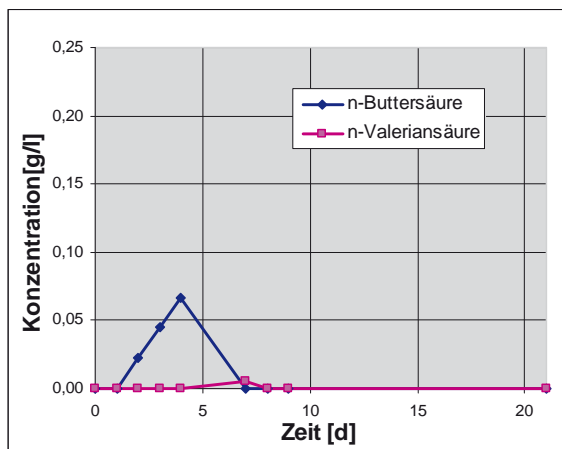


Abb. 5: Verlauf der Fettsäurebildung beim Abbau von Zellulose (Stoßbelastung 11,4 kg oTS/m³). Der erkennbare Anstieg von Buttersäure oberhalb von 0,05g/l kann schon ein Zeichen leichter Produkthemmung sein (Schattauer & Weiland, 2006).

Konzentrationsverlaufs der einzelnen Fettsäuren beim Abbau von Zellulose. In einem solchen Fall müsste man von einer Inhibition ausgehen, die allerdings in diesem Test in keinem der anderen Betriebsparameter zu beobachten war.

Ferner hängt der Betriebszustand eines Fermenters auch von dem sog. Carbonatpuffer (TAC) ab, d.h. von den Carbonaten, die in der gärenden Biomasse gelöst vorliegen. Diese werden anhand einer Titration mit H₂SO₄ bestimmt (Nordmann, 1985). Der Verbrauch an H₂SO₄ zum Erreichen des pH-Wertes von 5,0 ist ein Maß für die puffernde Wirkung der Gärmasse (d.h. Empfindlichkeit gegen Übersäuerung). Abb. 6 zeigt die Entwicklung des Carbonatpuffers als Funktion der Zeit im Vergleich zu FS. Wird die Stoßbelastung in Batch-Reaktoren so hoch gesetzt, dass die Biozönose überlastet ist, führt es zu einer Verlängerung der Abbauzeiten sowie einer Veränderung der Fettsäuremuster.

Reaktortechnologie

Die bislang auch in der Landwirtschaft eingesetzte Reaktortechnologie für die Biogasgewinnung wurde aus dem Abwasserbereich übernommen. Das Ziel anaerober Vergärung im Abwasserbereich ist den anfallenden Klärschlamm so zu deaktivieren, dass das entstehende Produkt ohne jegliche Gefährdung transportiert, deponiert, getrocknet und verbrannt bzw. auf die Felder gebracht werden kann. Auch in der Landwirtschaft wurden die ersten Biogasanlagen mit dem Ziel errichtet, den organischen Anteil der Gülle zu reduzieren, so dass die verbliebene Biomasse als Düngemittel eingesetzt werden durfte.

Da sowohl Klärschlamm als auch Gülle eine weitgehend homogene Mischung bilden (deren Viskosität etwas höher als die des Wassers ist) und einen niedrigen Trockensubstanz (TS)- und oTS-Gehalt haben, sind solche Substrate in einem als Rührkessel betriebenen Fermenter (CSTR) leicht zu behandeln (s. *Abb. 7a*). In einem solchen Reaktionsapparat herrschen überall gleiche Bedingungen (Konzentrationen). Die meisten Fermenter im landwirtschaftlichen Bereich mit Viehhaltung sind hauptsächlich „Entsorgungsanlagen“ und werden als kontinuierlich durchgemischte Reaktoren betrieben. In solchen Anlagen steht nicht die Energiegewinnung im Vordergrund, ihre Effizienz ist relativ gering.

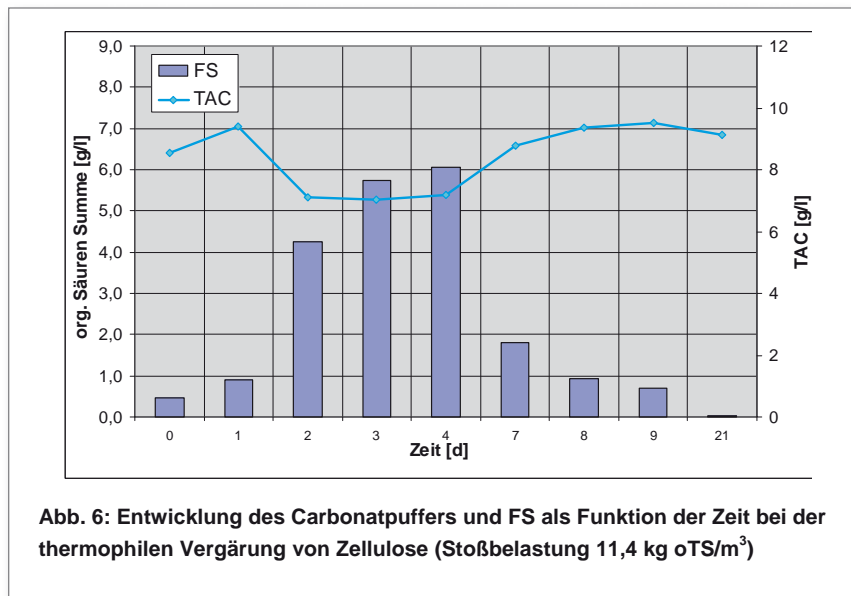


Abb. 6: Entwicklung des Carbonatpuffers und FS als Funktion der Zeit bei der thermophilen Vergärung von Zellulose (Stoßbelastung 11,4 kg oTS/m³)

Soll ein Biogasreaktor jedoch lokal die Funktion eines Kraftwerkes übernehmen und dementsprechend eine höhere Leistung bringen, muss auch die Effizienz der Gasproduktion gesteigert werden. Um dieses Ziel zu erreichen, werden in einem Reaktor pflanzliche Silagen mit einem vielfach höheren Gehalt an TS und oTS eingesetzt. Dadurch verändert sich die Konsistenz der Biomasse im Fermenter, so dass viel mehr Energie aufgewendet werden muss, um ein solches Substrat in CSTR-Reaktor homogen zu halten. Weiterhin werden während der Vergärung höhere Mengen

an organische Säuren freigesetzt, die den pH-Wert absenken und dadurch teilweise die Methanproduktion hemmen können. Als eine bessere Lösung erscheint deshalb ein Reaktor, in dem die Biomasse sich in einem Pfropfstrom innerhalb des Reaktorkörpers bewegt und in den aufeinander folgenden Abschnitten stufenweise wechselnde Bedingungen erreicht (s. *Abb. 7b*). Die Entwicklung solcher Pfropfstromfermenter (PFR) steht derzeit im Mittelpunkt der Forschung von z.B. Fa.Linde und Kompogas (Weiland, 2006).

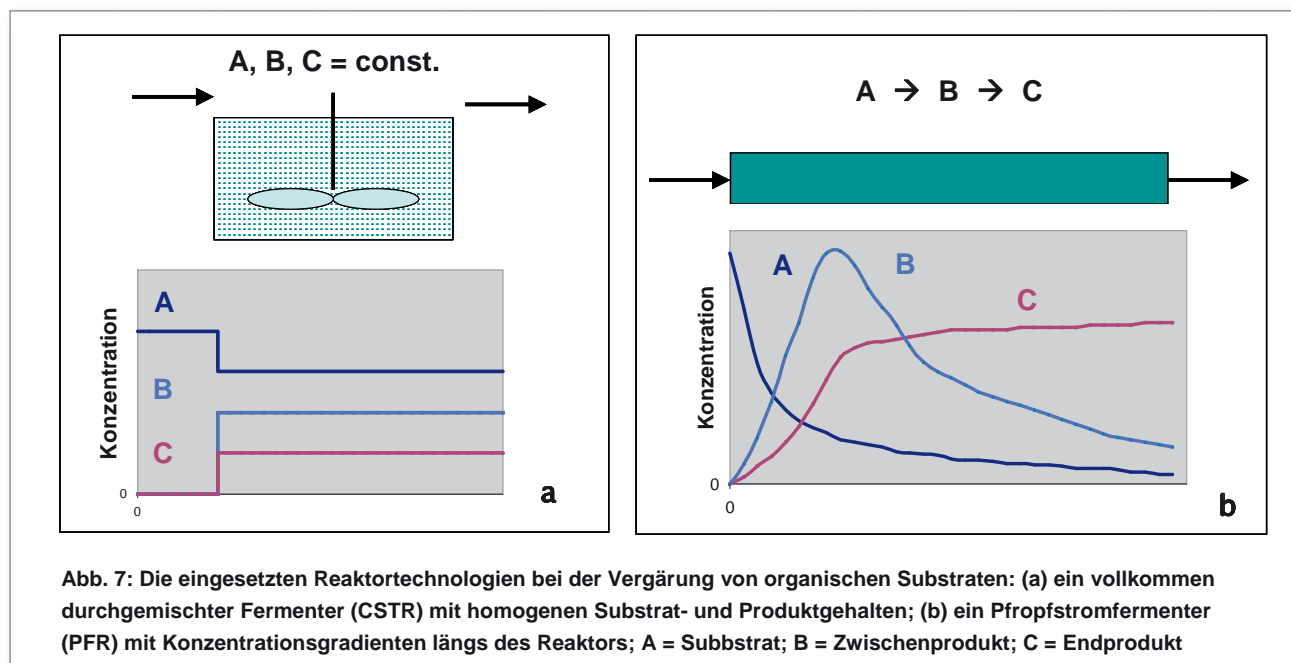


Abb. 7: Die eingesetzten Reaktortechnologien bei der Vergärung von organischen Substraten: (a) ein vollkommen durchgemischter Fermenter (CSTR) mit homogenen Substrat- und Produktgehalten; (b) ein Pfropfstromfermenter (PFR) mit Konzentrationsgradienten längs des Reaktors; A = Substrat; B = Zwischenprodukt; C = Endprodukt

Betriebsparameter

Der Betrieb einer Biogasanlage wird über variable Prozessparameter gesteuert. Hierzu gehören die organische Raumbelastung⁵ und die hydraulische Verweilzeit⁶ (Schattauer & Weiland, 2006).

Bei niedriger Raumbelastung (B), also langer Verweilzeit (HRT) werden hohe Biogasausbeuten erreicht. Gleichzeitig liegt die Biogasbildungsrate relativ niedrig. Wird die HRT, d.h. zeitliche Substratzufuhr vermindert, sinkt die Biogasausbeute (den Bakterien bleibt weniger Zeit für den Abbau), dafür steigt aber die Produktivität der Bakterien. Durch die optimale Auswahl dieser Parameter kann die Prozessleistung gesteigert werden. Die Aussage über den Prozesszustand kann anhand von Biogasausbeute⁷ und Gasbildungsrate⁸ getroffen werden. **Abb. 8** zeigt schematisch diesen Zusammenhang.

Die maximale Gasbildungsrate wird bei relativ niedrigen Verweilzeiten erreicht, bei denen kein vollständiger Abbau von Biomasse erreicht werden kann. Darum geht die Biogasausbeute in diesem Bereich stark zurück. Eine weitere Senkung der Verweilzeit führt zum Zusammenbruch des Biomasseabbaus aufgrund der zu starken Versäuerung des Reaktors. Ebenso kritisch ist der Fall, dass die Verweilzeit (HRT) kleiner ist als die Verdopplungszeit der methanogenen Bakterien. Idealerweise sollte eine Biogasanlage bei einer solchen HRT betrieben werden, die das Optimum der Biogasausbeute und Gasbildungsrate darstellt (s. die rot markierte Kreuzungsstelle in der **Abb. 8**). Bei einer solchen Einstellung der Prozessparameter wird die optimale Ausnutzung der Silage garantiert. Zugleich erlauben die noch relativ kurzen Verweilzeiten eine kompaktere Konstruktion des Fermenters, was die Investitions- und Betriebskosten verringert.

⁵ B - zugeführte Menge Organik pro Volumen und Zeit ausgedrückt in kg oTS/(m³·d)

⁶ HRT - Quotient von Fermentervolumen geteilt durch zugeführten Substratmengenstrom in m³/(m³·d)

⁷ Biogasmenge, die aus einem kg Substrat hergestellt wird, angegeben in m³/kg oTS

⁸ Maß der Produktivität von Bakterien (Biogasmenge bezogen auf Fermentervolumen und die Zeit in m³/m³·d)

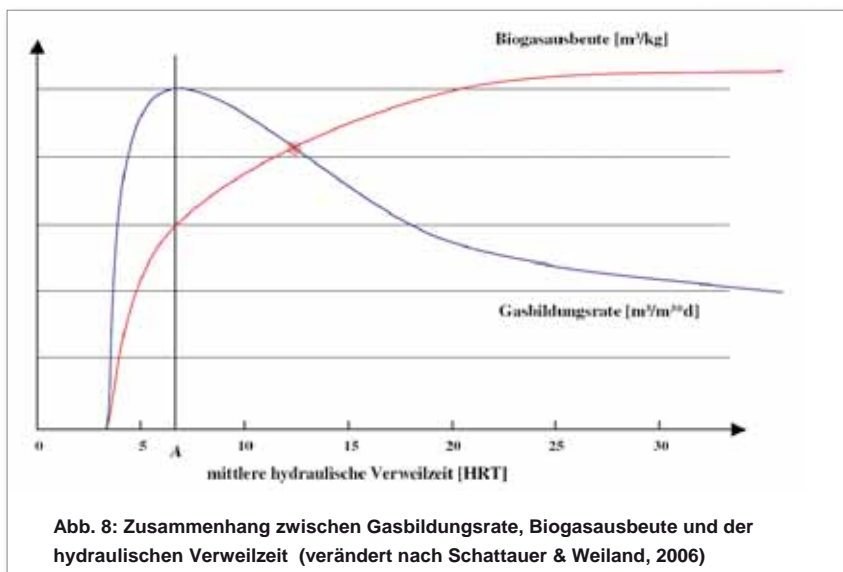


Abb. 8: Zusammenhang zwischen Gasbildungsrate, Biogasausbeute und der hydraulischen Verweilzeit (verändert nach Schattauer & Weiland, 2006)

Forschungsaktivität und Ausblick

Sowohl die technologische Entwicklung als auch die Optimierung der Betriebsparameter der Trockenfermentation stehen im Mittelpunkt des Forschungsprojekts an der Universität Luxemburg. In Zusammenarbeit mit der Fa. IGLux s.à.r.l. wird eine auf dem Pfropfstromprinzip basierende Fermentertechnologie (derzeit noch in 40-l-Fermentern) untersucht. Die Erkenntnisse bilden die Grundlage für den Bau einer 1m³-Pilotanlage.

Die Ergebnisse aus der diskontinuierlichen, sowie kontinuierlichen Fermentation sollen die Basis zur Erstellung eines universalen Simulationsmodells liefern, das in Kooperation mit der Université de Liège entwickelt wird.

Literatur:

1. Amon et al., (2002): *Biogas, Strom aus Gülle und Biomasse*. Landwirtschaftsverlag, Münster
2. Bischofsberger, W. Dichtl, N., Rosewinkel, K.-H., Seyfried, C., Böhnke, B., (2005): *Anaerobtechnik*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
3. Kaltschmitt, M., Hartmann, H., (hrsg.) (2001): *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur.

4. Maier, J., (2006): *Energie aus Biomasse – Konkurrenz zur Nahrungsproduktion?* In: Entwicklung und ländlicher Raum, Gastkommentar. (<http://www.oeko.de/service/bio/de/index.htm>, 11.12.08).
5. Nordmann, W., (1985): *Eine einfache Methode zur Bestimmung der organischen Säuren und der Kalkreserve im Faulwasser*. In: Korrespondenz Abwasser. Heft 4, S. 231.
6. Roediger, H., Roediger, M., Kapp, H., (1990): *Anaerobe alkalische Schlammfäulung*. Oldenbourg Verlag, München, Wien.
7. Schattauer, A., Weiland, P., (2006): *Grundlagen der anaeroben Fermentation*. In: Handreichung – Biogasgewinnung und -nutzung, FNR, Gülzow.
8. Schulz, H., Eder, B., (2001): *Biogas – Praxis*. Ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg.
9. WBGU, (2008): *Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung. Kurzfassung für die Entscheidungsträger*. In: Welt im Wandel (http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008_kurz.pdf, 11.12.2008)
10. Weiland, P., (2006): *Stand der Technik bei der Trockenfermentation – Aktuelle Entwicklungen*. In: Trockenfermentation – Stand der Entwicklungen und weiterer F+E-Bedarf. Gülzower Fachgespräche, Band 24, FNR, Gülzow.