

Biomüll als Energiequelle

Biogasproduktion durch anaerobe thermophile Fermentation biogener Abfallstoffe

von

Christoph REITSCHULER & Paul ILLMER *)

Biowaste as energy source Biogas production by anaerobic thermophilic fermentation of biogenic waste materials

Synopsis: The anaerobic fermentation of organic waste in a digester is an efficient way to reduce the amount of it, while at the same time a highly energetic product – methane – is built. Even though, the concept of anaerobic fermentation and biogas production is well established, more intense research is needed to get a better insight into the microbial community and furthermore to optimize reactor performance.

1. Biogas – eine erneuerbare Energiequelle:

Im Zuge des gestärkten gesellschaftlichen Interesses natürliche Ressourcen nicht länger irreversibel auszubeuten und einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten, gewinnen erneuerbare Energiequellen immer mehr an Bedeutung. Eine derartige Form der Energiegewinnung stellt die anaerobe (thermophile) (Trocken-)Fermentation zur Biogasproduktion dar.

Biogas bezeichnet die Gesamtheit der gasförmigen Produkte, die im Zuge der anaeroben (in Abwesenheit von Sauerstoff) Verstoffwechslung organischer Substanzen durch mikrobielle Aktivität anfällt (KÄMPFER et al. 2001). Biogas enthält zu etwa 2/3 Methan (CH_4) (APPELS et al. 2008) und ist somit aus energetischer Sicht hochinteressant. Das restliche Drittel entfällt auf Kohlendioxid (CO_2). Wasserstoff (H_2), Schwefelwasserstoff (H_2S), Wasserdampf (H_2O), Stickstoff (N_2), Ammoniak (NH_3), Siloxane und andere gasförmige Komponenten sind in Spuren nachweisbar (APPELS et al. 2008).

Im überwiegenden Maße werden zur Anaerob-Vergärung eigens Futterpflanzen, wie etwa Mais, angebaut, um im Anschluss fermentiert zu werden (APPLES et al. 2008). Die

*) Anschrift der Verfasser: MMag. Christoph Reitschuler, Inst. f. Mikrobiologie der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Technikerstr. 25, 6020 Innsbruck; E-mail: Christoph.Reitschuler@uibk.ac.at; Univ.-Prof. Mag. Dr. Paul Illmer, Inst. f. Mikrobiologie der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Technikerstr. 25, 6020 Innsbruck, E-mail: Paul.Illmer@uibk.ac.at.

ausschließliche Verwendung von Abfallprodukten (Haushalts-Biomüll, Gülle etc.) ohne energiereiches Co-Substrat, ist aus energetischer Sicht zwar weniger effektiv (WEILAND 2003), aber aufgrund ökologischer Überlegungen zu favorisieren. Die Verwendung von Lignozellulose als Gärsubstrat ist ebenfalls möglich, bis dato jedoch wenig etabliert (APPLES et al. 2008).

2. Im Fermenter – Leben unter extremen Bedingungen:

Mikroorganismen die in einem thermophilen Fermenter lebensfähig und vermehrungsfähig sein können, müssen vor allen anderen zwei Voraussetzungen mitbringen: die Fähigkeiten hohe Temperaturen zu tolerieren (Thermotoleranz bzw. Thermophilie) und ohne Sauerstoff auszukommen (Anaerobie). Derartige Prokaryonten kommen innerhalb der Bacteria und der Archaea vor. Wie das möglich ist und welche Mechanismen hierzu im Laufe der Evolution entwickelt worden sind, soll im Anschluss geklärt werden. Auf die Betrachtung von Pilzen wird bewusst verzichtet, da sie innerhalb der methanogenen Nahrungskette keine direkte funktionelle Rolle einzunehmen scheinen.

2.1. Leben unter hohen Temperaturen:

Organismen deren Wachstumsoptimum im Temperaturbereich von 45 bis 80 °C liegt, gelten definitionsgemäß als thermophil. Das Verhältnis von Eukaryota zu Prokaryota, ebenso wie das von Bacteria zu Archaea, nimmt mit zunehmender Temperatur ab. Hohe Temperaturen stellen insbesondere für die Integrität und Funktionalität polymerer, hochmolekularer und komplexer Zellbestandteile eine starke Belastung dar. Proteine zählen zu jenen Strukturen die am raschesten auf eine Temperaturerhöhung, in Form von Denaturierungserscheinungen und folgendem Funktionsverlust, reagieren. Im Laufe der Evolution entwickelten sich daher spezielle Strukturen und Mechanismen, um Leben unter hohen Temperaturen zu ermöglichen.

So führen ein entsprechender Einbau von Aminosäuren, die eine erhöhte Zahl kath- und anionischer Interaktionen (Salzbrücken) untereinander ermöglichen, und hydrophobe Wechselwirkungen in Proteinen dazu, dass diese sich bei erhöhten Temperaturen weniger leicht entfalten und somit ihre Funktion nicht verlieren. Ein erhöhter intrazellulärer Gehalt an Chaperoninen (Hitzeschockproteinen), die teilweise denaturierten Proteinen ihre Konformation zurückgeben bzw. ein Milieu schaffen, um Polypeptidstrukturen eine korrekte Faltung zu ermöglichen, stellt ebenfalls eine charakteristische Anpassung an thermophile Habitats dar (MADIGAN et al. 2003). Neben Proteinen, einschließlich des Proteinsyntheseapparats, werden vor allem Membranstrukturen bei hohen Temperaturen in Mitleidenschaft gezogen. Um zu verhindern, dass Membranen instabil bzw. unkontrolliert durchlässig werden, erfolgt ein verstärkter Einbau gesättigter Fettsäuren, die den Zusammenhalt untereinander durch stärkere hydrophobe Wechselwirkungen gewährleisten (MADIGAN et al. 2003).

Eine hohe Temperatur hat ebenfalls Auswirkungen auf metabolische bzw. chemisch-physiologische Vorgänge im Fermenter. Generell werden unter höheren Temperaturen

endergone Reaktionen, wie der Propionat-Abbau, gegenüber exergonen, wie der hydrogeotropen Methanogenese, begünstigt (APPLES et al. 2008).

Daneben wirken sich hohe Temperaturen auf die Stabilität des Gärsubstrats aus. So ist z. B. der Propionat- und Butyrat-Abbau bei Temperaturen über 70 °C beeinträchtigt. Eine erhöhte Umgebungstemperatur hat unter anderem Auswirkungen auf den H₂-Partialdruck und wirkt somit indirekt auf syntrophe metabolische Interaktionen. Weiters kommt es zum Konzentrationsanstieg freien Ammoniaks, was inhibierend auf die mikrobielle Flora wirkt und den pKa-Wert volatiler Fettsäuren (VFAs ... volatile fatty acids) erhöht, mit negativer Wirkung auf die Stabilität des anaeroben Abbaus (APPLES et al. 2008).

Die Temperatur hat somit entscheidenden Einfluss auf strukturelle und funktionelle Zellbestandteile, auf chemisch-physiologische Umsetzungen, indirekt auf den pH, sowie auf die Verfügbarkeit und Toxizität diverser Verbindungen.

Im nächsten Teil betrachten wir die Herausforderungen und Möglichkeiten, die sich durch die Abwesenheit von Sauerstoff ergeben.

2.2. Leben ohne Sauerstoff:

Innerhalb der Domänen Bacteria und Archaea finden sich zahlreiche Vertreter die unter anoxischen Bedingungen, sprich in Abwesenheit von Sauerstoff, existieren. Während Sauerstoff für obligate Anaerobier im Zuge des Energiestoffwechsels nicht nutzbar ist und mitunter letal wirkt, können fakultative Anaerobier ihren Stoffwechsel so adaptieren, dass sie den Sauerstoff energetisch nutzen bzw. auch in dessen Abwesenheit Energie gewinnen können. Aerotolerante Arten ertragen die Gegenwart von O₂, können jedoch keinen energetischen Nutzen daraus ziehen (MADIGAN et al. 2003).

Sauerstoff bzw. bestimmte Umformungsprodukte davon wirken auf Organismen, denen ein entsprechender Entgiftungsapparat fehlt, toxisch. Zu den wichtigsten Enzymen die zu dessen Entgiftung beitragen, zählen die Katalase, die Wasserstoffperoxid (H₂O₂) umsetzt, die Peroxidase, die ebenfalls H₂O₂ umsetzt, und die Superoxid-Dismutase (SOD), welche Superoxid (O₂⁻) entgiftet. Daneben wirken auch Hydroxylradikale (OH•) und Singulett-sauerstoff (¹O₂) als starke Zellgifte, wenn entsprechende Strukturen zur Entgiftung fehlen. Dazu zählen neben Enzymen unter anderem auch Carotinoide (MADIGAN et al. 2003).

Anaerobe Prokaryota finden sich nicht nur in oben erwähnten Vergärungsanlagen für Bioabfall. Global gesehen spielt ihr Vorkommen in Habitaten, wie etwa Böden, Sümpfen, tiefen Wasserkörpern und tierischen Darmtrakten, eine wesentlich größere und bedeutendere Rolle. Aus ökologischer Sicht ist deren physiologische Tätigkeit für das Funktionieren zentraler Stoffkreisläufe, allen voran Kohlenstoff- und Stickstoffkreislauf, unerlässlich (MADIGAN et al. 2003).

2.2.1. Anoxische Energiegewinnung:

Im Laufe der Evolution haben sich eine Reihe von Atmungstypen und Gärungsformen entwickelt und etabliert, die prokaryotischen Mikroorganismen einen Energiegewinn im anaeroben Milieu ermöglichen. Während bei der Atmung Elektronen von einem Donor,

über eine Kaskade von membrangebundenen und -assoziierten Elektronentransportern und Redoxenzymen, auf einen externen terminalen Elektronenakzeptor übertragen werden, stellt die Gärung eine Disproportionierung eines bestimmten Substrats in eine oxidierte und eine reduzierte Verbindung dar (REINEKE et al. 2007). Der Energiegewinn erfolgt bei allen Atmungsformen über eine Elektronentransportphosphorylierung, bei Gärungen über eine Substratkettenphosphorylierung (BRECHNER 2001). Bei der anaeroben Atmung dienen Verbindungen wie Nitrat, Fumarat, Sulfat und Kohlendioxid als terminale Elektronenakzeptoren, im Gegensatz zu Sauerstoff, der bei der aeroben Atmung diese Funktion übernimmt (MADIGAN et al. 2003). Daneben sind einige alternative bzw. ungewöhnliche Akzeptoren, wie etwa Mangan und Uranyl, bekannt (REINEKE et al. 2007). Die verschiedenen Gärungstypen werden üblicherweise nach dem Garendprodukt(en) oder, bei speziellen bzw. ungewöhnlichen Verbindungen, nach dem Ausgangssubstrat klassifiziert. Zu den bedeutendsten Formen zählen unter anderem die Acetat-, Ethanol-, Butyrat- und Lactat-Fermentation (GERARDI 2003).

Ein wesentlicher Nachteil der anaeroben Lebensweise ist der beträchtlich geringere Energiegewinn, im Vergleich zu aerob lebenden Organismen. Am anschaulichsten wird dieser Umstand, wenn man die anaerobe Vergärung von einem Mol Glukose der aeroben Verstoffwechslung dieses Monosaccharids gegenübergestellt und die ATP-Ausbeute vergleicht. Demnach stehen 2 Mol 38 Mol ATP gegenüber (MADIGAN et al. 2003). Daraus resultierende deutlich geringere Biomassezunahmen anaerober Mikroorganismen und die höhere Abgabe an gasförmigen Kohlenstoff (vor allem CH_4 und CO_2) sind im Bezug auf den Betrieb eines Biogasreaktors hingegen von Vorteil.

2.2.2. Anaerober Stoffumsatz – die methanogene Nahrungskette:

Als ein wesentliches Charakteristikum des anaeroben Abbaus organischer Substanz kann der Umstand betrachtet werden, dass der prozentuell größte Kohlenstoff-Fluss in Richtung gasförmiger Verbindungen, allen voran Methan und Kohlendioxid, geht, während im Vergleich dazu aerobe Mikroorganismen den Hauptanteil an Kohlenstoff in Form von Zellsubstanz speichern (GERARDI 2003). Zudem fällt beim anaeroben Energiestoffwechsel weit weniger ATP an, als es bei der aeroben Atmung der Fall ist. Hiermit erklären sich auch die daraus resultierende geringere durchschnittliche Biomassezunahme und Wachstumsrate von Anaerobiern, verglichen mit Aerobiern (KÄMPFER et al. 2001). Die lange Anlaufphase (start-up) anaerober Prozesse, bis zum Einsetzen eines effizienten Abbaus und der Biogasproduktion, stellt beim Betrieb kommerzieller Anlagen ein Problem dar (GERARDI 2003), da bei industriellen Anwendungen das Bestreben besteht möglichst rasch den größtmöglichen wirtschaftlichen Nutzen zu generieren.

Anaerobe Mikroorganismen sind üblicherweise Glieder einer (verzweigten) Kette, die den charakteristischen sukzessiven Abbau organischer Substanz im Anaerob-Milieu wiedergibt. Des Weiteren sind physiologische Abhängigkeiten und eine gegenseitige Kooperation bei Abbauprozessen (syntrophe Interaktionen) im Anaerob-Milieu üblich. Folglich ergibt sich eine verstärkte Anfälligkeit gegenüber Störungen, die zum Kippen

anaerober Prozesse führen können (GERARDI 2003). Bezogen auf Fermentations-/Biogasanlagen resultiert diese hohe Störungsanfälligkeit in einer mangelhaften Fermenter-Performance, die bis hin zum kompletten Zusammenbruch des Reaktorbetriebs führen kann.

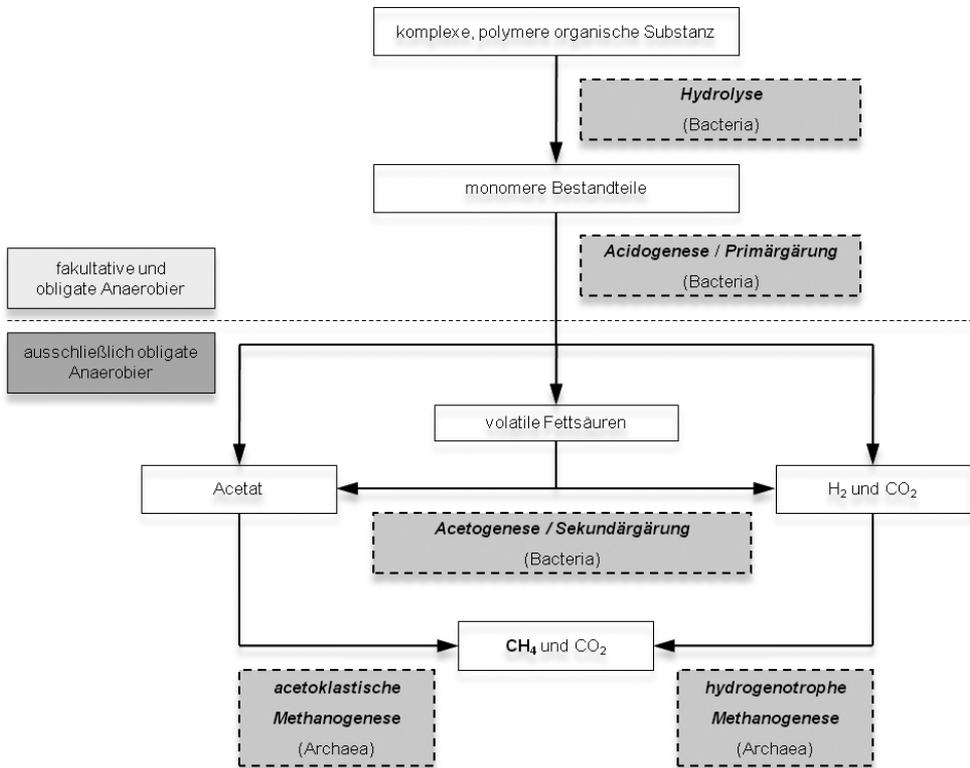


Abb 1: Die anaerobe, methanogene Nahrungskette: Schematischer Überblick des anaeroben Abbaus von Biopolymeren bis hin zur Biogasproduktion, inklusive der wichtigsten am Metabolismus beteiligten prokaryotischen Gruppen (modifiziert nach APPLES et al. 2008 und MADIGAN et al. 2003).

Das zentrale physiologische Gebilde in einem thermophilen Trockenfermenter stellt die anaerobe methanogene Nahrungskette dar (s. Abb.1). Diese ist durch die Phasen der Hydrolyse, Gärung (mit primärer Gärung und sekundärer Gärung bzw. syntropher metabolischer Interaktion), Acetogenese und Methanogenese charakterisiert (KÄMPFER et al. 2001). Eine alternative Einteilung der Abbauphasen untergliedert diese in die Abschnitte Hydrolyse, Acidogenese, Acetogenese und Methanogenese (APPLES et al. 2008), wobei die Acidogenese, als Äquivalent zur Gärung, als eigenständige Phase herausgehoben wird. Acetogenese und Methanogenese verlaufen simultan und stellen die wesentlichen H_2 - und CO_2 -verbrauchenden Prozesse unter anaeroben Verhältnissen dar. Während an den anfänglichen Stadien der

Metabolisierungskaskade organischer Substanz teils noch Aerobier beteiligt sind, dominieren in weiterer Folge fakultative und obligate Anaerobier (MADIGAN et al. 2003).

Das Verhältnis der drei mengenmäßig dominanten Stoffklassen (Kohlenhydrate, Proteine und Lipide) zueinander und die daraus resultierenden Abbauprodukte haben wesentlichen Einfluss auf die mikrobielle Flora und die Performance des Fermenters (Abbaurate und -grad der Verbindungen, sowie Methanausbeute) (KÄMPFER et al. 2001).

Es ist nicht möglich die drei zentralen Phasen der methanogenen Nahrungskette in Kürze vollständig und umfassend zu beschreiben, aufgrund der Vielzahl an beteiligten Organismen sowie der großen Anzahl an unterschiedlichsten physiologischen Abläufen und syntropher Interaktionen. Im nachfolgenden Teil sollen jedoch die wesentlichen Aspekte angesprochen werden.

► **Syntrophie:**

Die komplexen Wechselwirkungen sowie gegenseitigen Abhängigkeiten und syntrophen Interaktionen von prokaryotischen Mikroorganismen in anaeroben Habitaten, wie etwa dem eines thermophilen Trockenfermenters, sind hinlänglich bekannt (KÄMPFER et al. 2001). Syntrophie bezeichnet den Umstand, dass zwei oder mehr Organismen in der Lage sind eine bestimmte Stoffwechselleistung in Kooperation zu erbringen und daraus einen energetischen Nutzen zu ziehen. So entsteht im Zuge des Stoffwechsels fettsäureoxidierender Mikroorganismen H_2 , der von Methanogenen sowie sulfatreduzierenden Bakterien (SRB) energetisch genutzt werden kann. Nur durch metabolische Kooperation weisen diese Organismen eine positive Energiebilanz auf und können im Anaerob-Milieu (über-)leben (MADIGAN et al. 2003).

► **Hydrolyse und Gärung:**

Die Hydrolysephase ist dadurch gekennzeichnet, dass polymere Verbindungen in deren monomere Ausgangsverbindungen gespalten werden. Die hydrolytische Spaltung hochmolekularer Verbindungen erfolgt über sogenannte Exoenzyme, die aktiv von Mikroorganismen sezerniert werden. Erst die monomeren und niedermolekularen Abbauprodukte können aufgenommen – Prokaryota sind nicht zur Phagozytose im Stande – und in den Intermediärstoffwechsel integriert werden, entweder für katabole, energieliefernde oder für anabole, energieverbrauchende Prozesse (REINEKE et al. 2007).

Der Abbau der ersten der drei großen Gruppen organischer Substanzen, der Kohlenhydrate, erfolgt mittels hydrolytischer Spaltung in wasserlösliche Di- und Monomere (REINEKE et al. 2007). Beim extrazellulären Abbau von Lipiden entstehen Glycerin und Fettsäuren. Während die kurzkettigen C_1 - bis C_6 -Fettsäuren (Ameisen-, Essig-, Propion-, Butter-, Valerian- und Kapronsäure) volatil, gut wasserlöslich und im Grunde leicht verstoffwechselbar sind, ist der Abbau langkettiger und ungesättigter Fettsäuren in weiterer Folge ein komplexerer Vorgang (GERARDI 2003). Hohe Konzentrationen undissoziierter Fettsäuren, vor allem Acetat, haben einen negativen Effekt auf die Methanbildung. Erhöhte Propionat-Werte gelten generell als Indikator für einen gestörten Fermenter-Betrieb

(SPENDLIN 1991). Im Zuge des Propionatabbaus fällt H_2 an, welches in großen Mengen inhibierend wirkt (KÄMPFER et al. 2001). Durch hydrolytischen Abbau von Polypeptiden entstehen Aminosäuren, die wiederum durch spezialisierte Organismen (z. B. proteolytische Clostridien) vergoren werden können. Dies geschieht für eine einzelne Aminosäure oder kombiniert in einer sogenannten Stickland-Reaktion. Dabei fungiert eine Aminosäure als Wasserstoff-Donor, während eine weitere als H-Akzeptor dient (REINEKE et al. 2007). Durch die Desaminierung der Aminosäuren fällt in großen Mengen Ammoniak an, der einerseits zur Anhebung des pH in der Umgebung führt und zudem zytotoxische Eigenschaften aufweist (MADIGAN et al. 2003). Schwefelwasserstoff (H_2S), der ebenfalls in beträchtlichen Mengen anfällt, schadet der Mikroorganismen-gesellschaft ebenfalls durch sein zytotoxisches Potential (KÄMPFER et al. 2001).

Primäre Gärer setzen im Allgemeinen Produkte der Hydrolyse zu den Hauptgärprodukten Acetat, Propionat, Succinat, diversen Alkoholen, H_2 und CO_2 um. Bei sekundären Gärern handelt es sich um syntrophe Organismen, die Stoffwechselprodukte der primären Gärung weiterführend metabolisieren und im Endeffekt Acetat, CO_2 und H_2 produzieren. Erst durch die Aktivität wasserstoffverbrauchender Organismen (Homoacetogene, Methanogene und Sulfatreduzierer) sind diese syntrophen Organismen im Stande einen energetischen Nutzen aus der Verstoffwechslung ihrer Substrate zu ziehen (REINEKE et al. 2007). Durch das Zusammenwirken hydrolytischer und gärender Mikroorganismen ist der Abbau der meisten organischen Verbindungen möglich.

Als überaus abbauresistent erweisen sich gesättigte aliphatische Kohlenwasserstoffe, die jedoch unter bestimmten Bedingungen durch sulfatreduzierende Bakterien umgesetzt werden können. Lignin, ein äußerst komplexes Polymer aus aromatischen Phenylpropaneinheiten, ist unter anoxischen Bedingungen gegenüber mikrobiellem Abbau praktisch inert (MADIGAN et al. 2003).

Zahlreiche Vertreter der Hydrolyse- und Gärungs-Phase sind fakultativ anaerob (KÄMPFER et al. 2001). Infolge der mikrobiellen Aktivität kommt es im Laufe dieser Phasen zum Sauerstoffverbrauch und zur Ansäuerung der Umgebung (SPENDLIN 1991). Die Hydrolyse-Phase gilt als der entscheidende limitierende Abschnitt innerhalb der methanogenen Kette (APPLES et al. 2008).

► Acetogenese:

Acetogene Prokaryota sind obligat anaerob (KÄMPFER et al. 2001). Neben anderen Verbindungen fungiert üblicherweise H_2 als Elektronendonator, während CO_2 als terminaler Akzeptor (Carbonatatmung) dient (REINEKE et al. 2007). Die Acetat-Bildung erfolgt über den Acetyl-CoA-Weg (Ljungdahl-Wood-Weg), der eine autotrophe Lebensweise ermöglicht. Unter bestimmten Bedingungen, z. B. bei niedrigem pH und niedrigen Temperaturen, sind diese Organismen im Konkurrenzvorteil gegenüber Methanogenen, wobei aus energetischer Sicht die Acetogenese mit $\Delta G^{0'} = -105$ kJ gegenüber der Methanogenese mit $\Delta G^{0'} = -136$ kJ deutlich benachteiligt ist (MADIGAN et al. 2003).

► Methanogenese:

Methanogene Mikroorganismen gehören ausschließlich der Domäne Archaea (Abteilung: Euryarchaeota) an und sind strikte Anaerobier (KÄMPFER et al. 2001). Die ideale Wachstumstemperatur der meisten Methanogenen liegt im mesophilen Bereich, wobei auch extremophile (thermophile, psychrophile und halophile) Vertreter bekannt sind (MADIGAN et al. 2003). Ein niedriger pH-Wert wird üblicherweise nicht toleriert (KÄMPFER et al. 2001). Die Organismen sind zumeist eng mit syntrophen (Sekundär-)Gäern, in einer mutualistischen Beziehung, vergesellschaftet. Die Autotrophie ist über die CO₂-Fixierung mittels des Acetyl-CoA-Wegs gegeben (MADIGAN et al. 2003). Vertreter, die in der Lage sind Stickstoff zu fixieren, wurden ebenfalls beschrieben (GERARDI 2003).

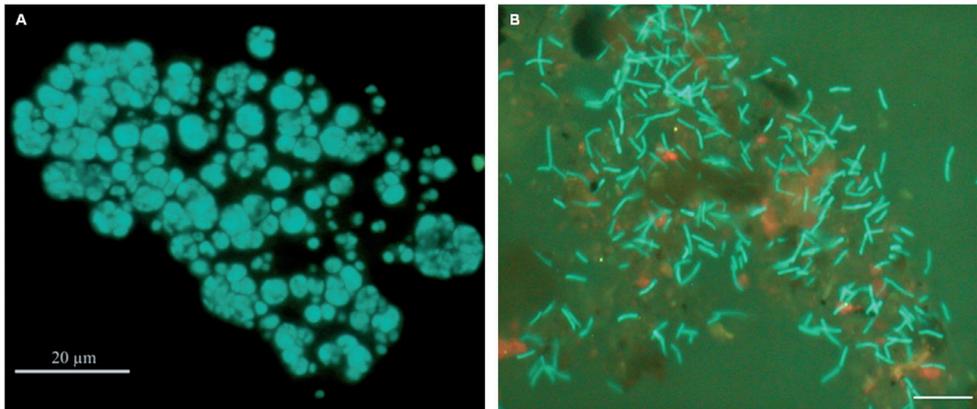


Abb 2: Fluoreszenzmikroskopische Aufnahme methanogener Archaea, A: kugelige Morphologie, Reinkultur; B: stäbchenförmige Vertreter, in syntrophen Vergesellschaftung mit anderen Prokaryota, Balken entspricht 10 µm; (Aufnahmen: Philipp Lins).

Die Abbildungen 2A und 2B zeigen kugelige (kokkale) bzw. stäbchenförmige Vertreter anaerober, methanogener Archaea. Die Fluoreszenz der einzelnen Zellen ergibt sich dadurch, dass ein Co-Faktor (F420) der Elektronentransportkette der Cytoplasmamembran bei Anregung mit Licht der Wellenlänge 420 nm dieses absorbiert und bei 520 nm emittiert (bläulich-grün). Dieser Co-Faktor ist charakteristisch für methanogene Archaea (MADIGAN et al. 2003).

Methanogene stehen in Konkurrenz zu homoacetogenen und sulfatreduzierenden Bakterien (SRBs) (MADIGAN et al. 2003), da sie auf dieselben Substrate, nämlich die Ausscheidungsprodukte fermentativer Organismen, angewiesen sind (APPLES et al. 2008). Die Umstände bei denen Homoacetogene einen Konkurrenzvorteil gegenüber Methanogenen genießen wurden bereits zuvor erläutert. SRBs dominieren üblicherweise unter mesophilen Bedingungen und bei erhöhtem Sulfat-Gehalt (MADIGAN et al. 2003), während in thermophilen Umgebungen und bei Sulfat-Mangel Methanogene die zahlmäßige Mehrheit bilden. Vor allem hydrogenotrophe Methanogene werden durch SRBs verdrängt, da diese eine

höhere Affinität zu H_2 aufweisen (APPLES et al. 2008). SRBs gliedern sich in die Gruppen der vollständigen und unvollständigen Oxidierer.

Erstere setzen Verbindungen wie Lactat in Acetat und CO_2 um, während zweitere Gruppe Acetat in CO_2 und HCO_3^- umsetzt. Der Propionat-Abbau scheint hauptsächlich durch die Aktivität von Sulfat-Reduzierern zu erfolgen (APPLES et al. 2008).

Eine grobe Einteilung Methanogener kann anhand der verwendeten Elektronenakzeptoren in drei Gruppen erfolgen:

■ *Hydrogenotrophe Methanogene*

Organismen dieser Gruppe verwenden entweder Kohlendioxid (CO_2), Kohlenmonoxid (CO) oder Formiat ($HCOO^-$) als terminalen Elektronenakzeptor. Einige Vertreter sind somit autotroph. Die für den Energiegewinn notwendigen Elektronen werden durch Spaltung von Wasserstoff freigesetzt (MADIGAN et al. 2003).

■ *Methylotrophe Methanogene*

Als terminale Elektronenakzeptoren fungieren in dieser Gruppe Verbindungen wie Methanol (CH_3OH), Methylamin ($CH_3NH_3^+$) oder Methylmercaptan (CH_3SH). Reduktionskraft wird dabei entweder in Form von Wasserstoff zur Verfügung gestellt oder dadurch, dass ein Teil des Substrats oxidiert wird (MADIGAN et al. 2003).

■ *Acetotrophe (acetoklastische) Methanogene*

Acetotrophe oder acetoklastische methanogene Archaea setzen Acetat (CH_3COO^-) um und können so ihren Energiebedarf decken. Zwar ist die Mannigfaltigkeit derartiger Vertreter überschaubar, deren ökologische Bedeutung hingegen durchaus groß (MADIGAN et al. 2003). In etwa 65 – 80% des Methans in einem thermophilen Trockenfermenter stammen aus derartigem Acetat-Umsatz (AHRING 1994).

Methanogene sind üblicherweise in terrestrischen und limnischen Habitaten, die durch Auftreten konstanter oder periodischer anaerober Phasen gekennzeichnet sind, wie etwa Wald- und Steppenböden, Sümpfen oder Reisfeldern, anzutreffen, kommen jedoch auch marin vor. Auch tierische Verdauungstrakte, wie etwa Därme von Wiederkäuern, zählen zu den Lebensräumen Methanogener (MADIGAN et al. 2003). Die biogene Methanogenese macht in etwa 80 – 83% der globalen Methanbildung aus (MADIGAN et al. 2003). Methan trägt mit circa 15% zudem einen wesentlichen Teil zum Treibhauseffekt bei (REINEKE et al. 2007). Der Effekt als Treibhausgas ist bei CH_4 um den Faktor 23 höher als bei CO_2 (WEILAND 2003).

3. Anaerobe Verwertung biologischer Abfälle:

Es bestehen die Möglichkeiten biologische Abfälle, direkt oder gasförmige Spaltprodukte bzw. flüssige Inhaltsstoffe daraus indirekt, zu verbrennen, oder sie einer aeroben Kompostierung zuzuführen, um so energetischen bzw. wirtschaftlichen Nutzen

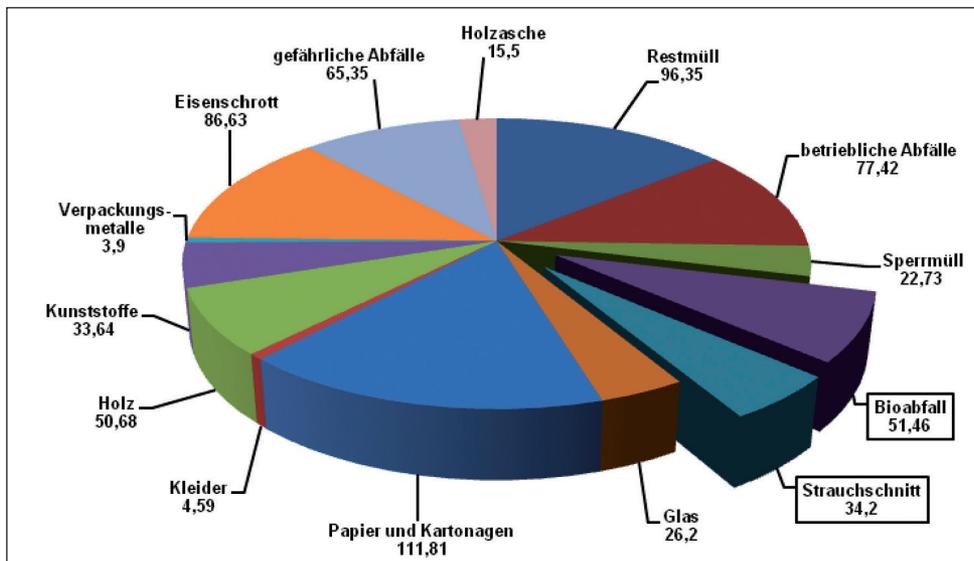


Abb 3: Anfallende Abfallmenge (680.460 Tonnen insgesamt) und Zusammensetzung desselben im Land Tirol für das Jahr 2009 (Angaben in 1000 t). Baurestmassen und Klärschlamm sind nicht inkludiert. Quelle: Amt der Tiroler Landesregierung (<http://www.tirol.gv.at/buerger/umwelt/abfall/>).

daraus zu ziehen (WELLINGER 1991). Im Sinne der Nachhaltigkeit und Ökonomie ist die anaerobe Fermentation biogenen Abfalls diesen beiden Alternativen vorzuziehen. Die Anaerob-Kompostierung bietet nämlich eine deutliche Reduktion von biogenen Abfällen, die Abtötung von Pathogenen, sowie eine Verringerung der Geruchsbelastung nach erfolgter Gärung und nur diese Form der Abfallverwertung liefert ein energetisch hochwertiges Produkt – nämlich Biogas (CH_4) (APPLES et al. 2008).

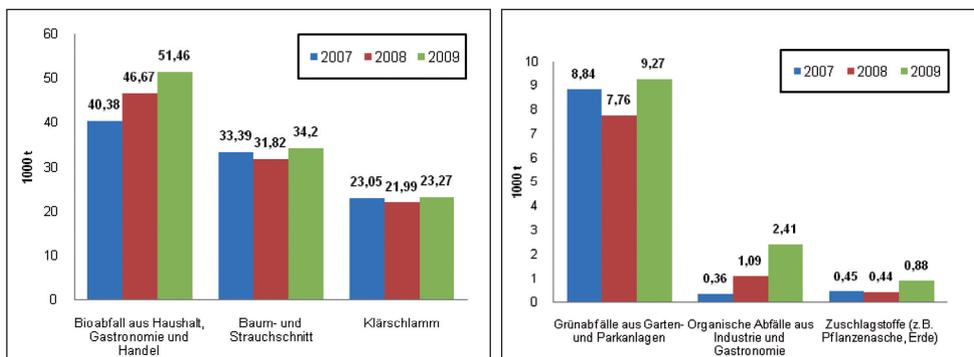


Abb 4A und 4B: Mengenmäßige Zusammensetzung des biogenen, auf Kompostierungs- und Biogasanlagen entfallenden, Abfalls und dessen Entwicklung über die Jahre 2007 bis 2009 im Land Tirol. Quelle: Amt der Tiroler Landesregierung (<http://www.tirol.gv.at/buerger/umwelt/abfall/>).

Wie wichtig eine ökologisch und ökonomisch verträgliche Entsorgung organischer Abfälle ist, veranschaulichen die hohen Zahlen der Abfallmengen (s. v. a. Bioabfall und Strauchschnitt), die im Land Tirol pro Jahr anfallen (Abb. 3). In Roppen (Tirol/Österreich) werden jährlich 8000 t biologischer Abfälle mittels Anaerob-Fermentation verwertet. Der tägliche Substratinput beträgt in etwa 21 Tonnen (ILLMER & GSTRALTHALER 2009). Abbildungen 4A und 4B geben Auskunft über die mengenmäßige Zusammensetzung des organischen Abfalls, der auf die im Land Tirol vorhandenen Kompostier- und Biogasanlagen entfällt.

3.1. Technische Umsetzung – thermophile Trockenfermentation:

Zur Anaerob-Fermentation wurden eine Reihe unterschiedlicher Reaktortypen und Systeme entwickelt. In der simplen „Kalt“-Fermentation erfolgt keine Erhitzung oder Durchmischung des Gärguts. Eine Steigerung der Umsatzrate wurde erreicht, indem man begann das Substrat zu erhitzen und zu durchmischen. In der 2-Phasen-Fermentation wird ein derartiger Gärbehälter mit einem zweiten Tank gekoppelt, der, weder erhitzt noch durchmischt, zur Speicherung von Gärrückständen oder Dekantierung des Überstands Verwendung findet. Moderne Fermenter beruhen überwiegend auf den Methoden der mesophilen oder thermophilen Vergärung. Die thermophile bietet gegenüber der mesophilen (30 bis 38 °C) Umsetzung die Vorteile, dass bei Temperaturen zwischen 50 bis 57 °C ein höherer Stoffumsatz, ein effizienterer Wasserentzug und eine verstärkte Abtötung pathogener Keime gegeben sind. Nachteilig sind vor allem die hohen Energieanforderungen, eine erhöhte Geruchsbelastung für die Umgebung und eine wesentlich geringere Prozess-Stabilität (APPLES et al. 2008).

Um Anlaufschwierigkeiten bei der Fermentation entgegen zu wirken und den fortfolgenden Abbau zu erleichtern, ist es empfehlenswert das Gärsubstrat vorzubehandeln. Genauer gesagt möchte man dabei eine Desintegration der organischen Substanz erreichen. Dabei werden äußerst widerstandsfähige Komponenten, wie etwa Zellwände, rupturiert und hochmolekulare Verbindungen zerlegt, um in weiterer Folge leichter verstoffwechselt werden zu können. Verfahren die hierzu verwendet werden sind unter anderen die thermische Zersetzung (bei 150–200 °C), mechanische Vorrichtungen, wie etwa Mühlen, Impeller und Hochdruck-Homogenisatoren, chemische Reagenzien (unter anderem hydrolytische, saure oder alkalische Verbindungen und Ozon) und die bakterielle bzw. enzymatische Hydrolyse. Als wirkungsvollste Methode hat sich bisher die Behandlung mit Ultraschall erwiesen (APPLES et al. 2008).

Im Folgenden soll speziell auf die Herausforderungen und Problemstellungen, die mit der thermophilen Anaerob-Fermentation verbunden sind, eingegangen werden. Der Roppener Fermenter (s. Abb. 5) wird seit einigen Jahren, im Rahmen einer Bund-Bundesländerkooperation unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr. Paul Illmer am Institut für Mikrobiologie der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, untersucht. Der Trommelfermenter umfasst ein Volumen von 750,000 Liter und wird nach dem KOMPOGAS Trockenfermentations-Prinzip betrieben (ILLMER et al. 2009, ILLMER & GSTRALTHALER

2009). Der durchschnittliche Trockengewichtsanteil derartiger Anlagen liegt bei 20 – 40 % (WEILAND 2003), im konkreten Fall liegt dieser bei etwa 27,1% (+/- 3,33), bei einem organischen Gewichtsanteil von 61,9% (+/- 3,37) (ILLMER et al. 2009).

Die wesentlichen Schritte des Fermentationsbetriebs umfassen die Beladung mit Substrat, die kurzzeitige Aerobisierung des Materials, um die im Zuge des Verrottungsprozesses entstehenden hohen Temperaturen zu erreichen und die Rezirkulierung von Ausschwemmungen, zur gleichmäßigen Verteilung von Feuchtigkeit, Umverteilung methanogener Archaea und löslicher Substrate.

Die Durchmischung des Gärsubstrats ist unerlässlich für einen effizienten Fermenterbetrieb. So werden ein enger Kontakt zwischen Substrat und Mikroorganismen bzw. deren Enzymen, eine homogene Temperatur, sowie eine gleichmäßige Verteilung von Substraten und anderen Molekülen ermöglicht. Zu den gängigen Mischsystemen zählen Rezirkulationssysteme (Pumpen), mechanische Rührwerke und Gasinjektoren. Letztere Möglichkeit bietet den Vorteil gegenüber den beiden vorig genannten Systemen, dass es hierbei zu keiner ausgedehnten Schaumbildung kommt, jedoch zeichnen sich Pumpen und Rührer durch eine effizientere Durchmischung aus. Um den Fermenter zu heizen werden entweder externe Wärmetauscher oder Dampf injektoren verwendet (APPLES et al. 2008).

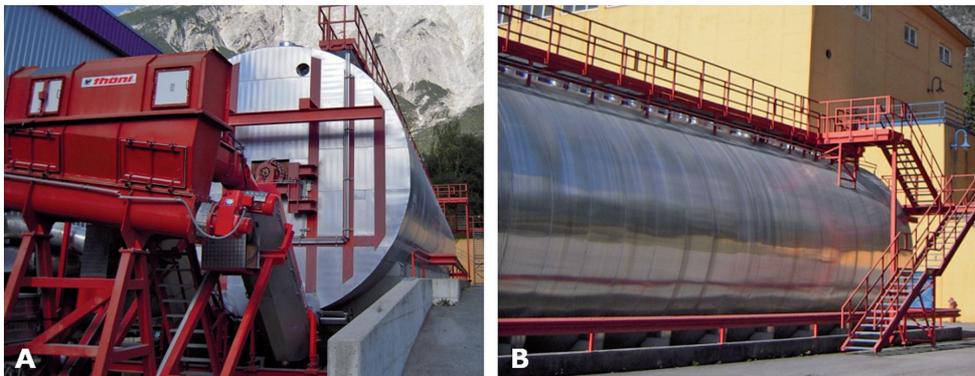


Abb 5: Thermophiler (Trommel-)Trockenfermenter (32 m lang und 6 m im Durchmesser) zur anaeroben Bioabfallfermentation und Biogasproduktion in Roppen (Tirol, Österreich); A: Frontansicht, B: Seitenansicht.

Die Endprodukte, die im Zuge der Fermentation anfallen, sind einerseits Biogas, welches direkt oder nach erfolgter Aufwertung genutzt werden kann, andererseits Fermenterschlamm, der nach Entwässerung als Dünger verwendet werden kann (APPLES et al. 2008).

3.2. Kennzeichen und Schwierigkeiten beim Fermenterbetrieb:

Um die Reaktor-Performance zu beschreiben und zu bewerten, werden im Wesentlichen die Parameter pH, Wasserstoffkonzentration, Konzentrationen und Verhältnisse bestimmter flüchtiger Fettsäuren (z. B. Acetat/Propionat Verhältnis) und die Konzentrationen verschie-

dener Stickstoffverbindungen, allen voran Ammonium, herangezogen. Ein sinkendes Acetat/Propionat Verhältnis deutet auf ein baldiges Abfallen der Gesamt-Biogasproduktion hin und eignet sich daher als Indikator für eine schlechte Reaktor-Performance (ILLMER & GSTRATHALER 2009). Zuverlässige Aussagen sind bei Verhältnissen ≥ 2 möglich (ILLMER et al. 2009). Der Fermentationsverlauf in Roppen über das Jahr lässt sich grob in vier Phasen unterteilen, die signifikante Unterschiede bezüglich Gesamtgasmenge, pH, Acetat, Propionat und Gesamtfettsäuremenge aufweisen (ILLMER et al. 2009). Wichtig ist, den Einfluss der saisonalen Änderungen an qualitativem und quantitativem Input von organischem Material auf die Reaktor-Performance zu berücksichtigen (s. Abb. 6, ILLMER & GSTRATHALER 2009).

Die meisten Untersuchungen bezüglich der Reaktorleistung stützen ihre Aussagen auf eine biochemische Analytik. Daneben gibt es aber auch den Ansatz bestimmte Indikatororganismen für die Bewertung des Fermenterbetriebs heranzuziehen (ILLMER & GSTRATHALER 2009). Insbesondere methanogene Archaea scheinen hierfür geeignet zu sein. Bezogen auf das Untersuchungsobjekt stellen *Methanoculleus thermophilus* und *Methanosarcina siciliae* zwei Indikator-Organismen dar, die beim Vorliegen hoher Abundanzen auf einen effizienten Betrieb schließen lassen, während ein gehäuftes Auftreten von *Methanothermobacter wolfei* auf eine ineffiziente Reaktor-Performance hinweist (ILLMER et al. 2008). Im Folgenden wird auf die wichtigsten physikalischen und (bio-)chemischen Parameter eingegangen, die entscheidenden Einfluss auf die mikrobielle Flora und die Fermenter-Performance haben.

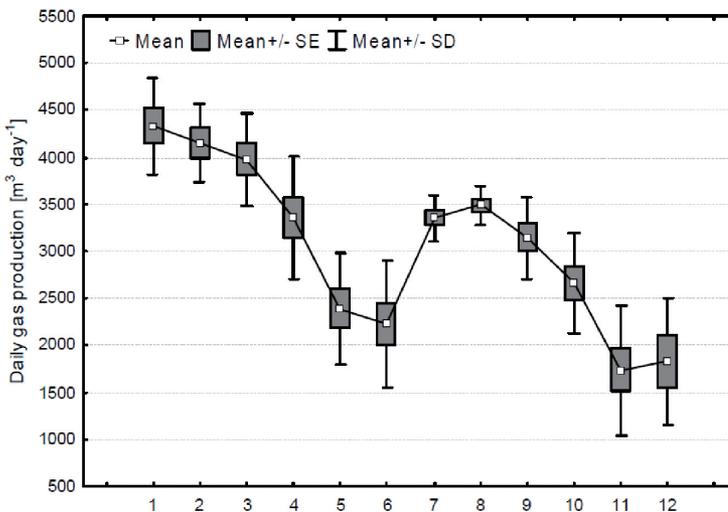


Abb 6: Änderungen in der täglichen Gasproduktion (Jahre 2003 und 2004 zusammengefasst) als Resultat der saisonal variablen Quantität und Qualität an Substrat-Input, im Zuge der touristischen Nächtigungsmaxima beginnend im Frühsommer bzw. zu Winterbeginn (nach ILLMER & GSTRATHALER 2009).

■ Temperatur:

Die Betriebstemperaturen thermophiler Fermenter liegen in etwa bei 52 – 56 (- 60) °C, im optimalen Wachstumsbereich zahlreicher thermophiler Mikroorganismen (AHRING 1994). Die Durchschnittsbetriebstemperatur des Roppener Fermenters liegt bei 53,3 °C (+/- 0,92) (ILLMER et al. 2009).

Ein thermophiler Fermenterbetrieb bietet gegenüber der mesophilen Variante die Vorteile, dass höhere Abbauraten, eine gesteigerte Methanausbeute sowie eine Hygenisierung des Gärguts erreicht werden (WEILAND 2003). Die Beibehaltung einer stabilen Temperatur ist besonders entscheidend. Schwankungen wirken sich negativ auf mikrobielle Vorgänge aus, insbesondere auf die Methanogenese. Thermophile Prokaryoten sind außerordentlich sensitiv gegenüber Temperaturschwankungen. Fluktuationen über 0,6 °C pro Tag sollten vermieden werden. Spitzenwerte über 1 °C Temperaturabweichung pro Tag können in weiterer Folge bereits zum Systemzusammenbruch führen (APPLES et al. 2008).

■ Retentionszeit:

Um einen möglichst umfangreichen Abbau der Gärsubstanz und hohe Biogasausbeuten zu erreichen, ist es notwendig die Retentionszeit (Aufenthaltszeit organischen Materials im Fermenter) nicht zu kurz zu wählen, so dass keine Auswaschung von Mikroorganismen erfolgt. Als minimal notwendige Zeit werden ca. 8 bis 10 Tage angegeben. Der Lipid-Abbau startet erst etwa nach dieser Zeitspanne (APPLES et al. 2008). Im Roppener Fermenter beträgt die durchschnittliche Retentionszeit 3 bis 4 Wochen (ILLMER & GSTRATHALER 2009).

■ Wasserstoff:

Wasserstoff nimmt eine Schlüsselrolle innerhalb des VFA-Abbaus ein (ILLMER & GSTRATHALER 2009). Wie in Abb. 7 ersichtlich, führen stark erhöhte H₂-Konzentrationen zur Inhibition von Abbauprozessen und infolge dessen zu einem Abfall der Biogasausbeute. Wasserstoff, der als Produkt im Zuge der Oxidation verschiedenster Fettsäuren, wie etwa Propionat, anfällt, bewirkt in großen Mengen eine Inhibition dieser, ihn bildenden Prozesse (Endprodukt-Hemmung). Erst durch die Aktivität H₂-verbrauchender und auf diesen angewiesene Organismen, wie hydrogenotrophe Methanogene, kommt es zum Absinken des Wasserstoffs. Für das funktionsfähige Zusammenspiel von H₂-Produzenten und H₂-Verwertern im Fermenter ist es entscheidend, dass die Wasserstoffkonzentration bestimmte Grenzwerte nicht unterschreitet bzw. übersteigt. Man nennt diesen Idealbereich, in dem die Organismengruppen in einer syntrophen Gemeinschaft voneinander profitieren können, „energetisches Substratfenster“ (KÄMPFER et al. 2001).

■ pH:

Der systemische pH wird generell über die CO₂-Konzentration der Gasphase, sowie über die HCO₃⁻Menge der flüssigen Phase bestimmt (APPLES et al. 2008). Für einen optimalen Fermenterbetrieb sind pH-Werte im neutralen Bereich (pH 6,8 – 7,2) günstig

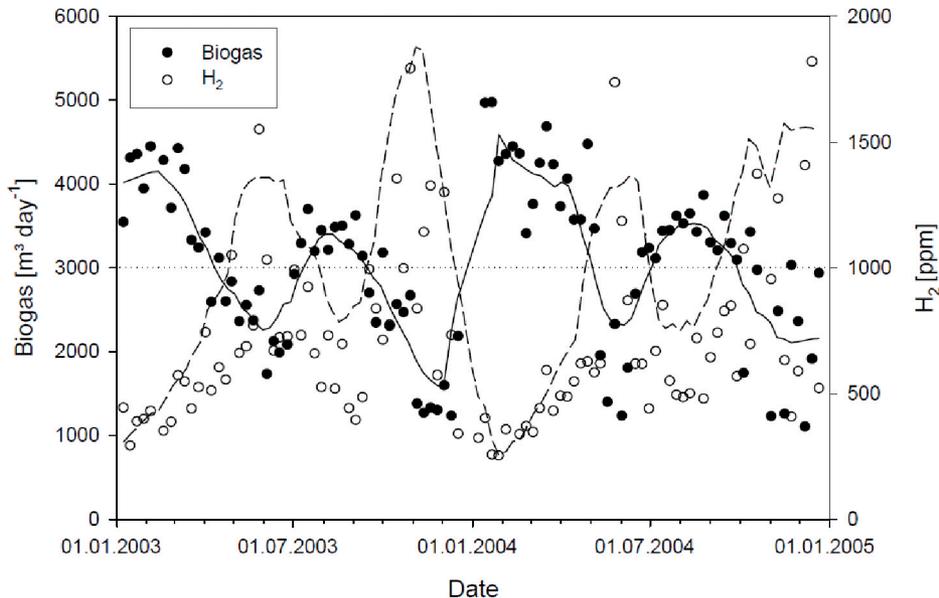


Abb 7: Inverse Beziehung der täglichen Biogasproduktion und der Wasserstoffkonzentration über ein Jahr betrachtet (nach ILLMER & GSTRATHALER 2009).

(GERARDI 2003). Im Untersuchungsobjekt in Roppen liegt der pH im Jahresmittel bei 7,8 (+/- 0,51) (ILLMER et al. 2009).

Eine Ansäuerung wirkt sich insbesondere auf methanogene Archaea negativ aus (KÄMPFER et al. 2001). Fermentative Mikroorganismen sind weniger sensitiv als Methanogene und finden in einem weiteren pH-Bereich (4,0 – 8,5) ideale Wachstumsbedingungen vor. Der pH-Wert wird im Fermenter insbesondere durch die Produktion volatiler Fettsäuren durch die Aktivität fermentativer Bacteria reduziert. Methanogene Archaea wirken dem durch Erhöhung der Alkalinität, über Produktion von CO_2 , NH_3 und HCO_3^- (Bikarbonat), entgegen (APPLES et al. 2008).

Der pH hat zudem entscheidenden Einfluss auf die Toxizität diverser Substanzen. So sind Verbindungen wie Ammoniak und Schwefelwasserstoff in ihrem nicht-dissoziierten bzw. protonierten Zustand toxischer als im dissoziierten bzw. deprotonierten Zustand, da sie leichter in Zellen eindringen und dort ihre zytotoxische Aktivität entfalten können (GERARDI 2003). Im Folgenden sind die wichtigsten anorganischen und organischen Verbindungen vor allem hinsichtlich ihrer inhibitorischen Wirkung dargestellt. Insbesondere für methanogene Organismen ist eine breite Palette toxischer Verbindungen und Hemmstoffe bekannt, die vor allem in höheren Konzentrationen schädlich bzw. inhibierend wirken können. Dazu zählen unter anderem alternative Elektronenakzeptoren (z. B. NO_3^- und SO_4^{2-}), alkalische Kationen (z. B. Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ und Na^+), Benzen-Verbindungen (z. B. Phenol), chlorierte Kohlenwasserstoffe (z. B. Chloroform), Cyanide (CN^-) sowie feedback-Inhibitoren wie organische Säuren (GERARDI 2003).

■ anorganische Verbindungen:

Schwermetalle (z. B. Cd und Cr) stellen ein großes Problem für einen störungsfreien Fermenterbetrieb dar (GERARDI 2003). Sie sind überwiegend auf industriellen Einfluss zurückzuführen und wirken zumeist durch Interaktionen mit Proteinen toxisch. Desweiteren stellt deren Vorhandensein bei einer möglichen Dünger-Applikation ein Problem dar (APPLES et al. 2008).

Eine inhibierende Wirkung von Na^{2+} und K^{+} entfaltet sich erst bei höheren Konzentrationen (für Na^{2+} : ab 3500 mg L^{-1} , für K^{+} : ab 400 mg L^{-1}). Darunter sind diese Ionen essentiell für das Funktionieren des mikrobiellen Stoffwechsels. Erhöhte Kalium-Werte sind insbesondere für die thermophile Gemeinschaft problematisch. Für beide Elemente gilt, dass eine Adaption bis zu bestimmten Grenzwerten möglich ist, sofern ein ausreichender Anpassungszeitraum zur Verfügung steht. Man muss jedoch beachten, dass die Konzentration anderer Salz-Ionen, wie etwa Kalzium (Ca^{2+}) und Magnesium (Mg^{2+}), entscheidenden Einfluss auf die Toxizität von Natrium und Kalium haben, indem sie regulierend oder neutralisierend wirken können (APPLES et al. 2008).

Proteine und Harnstoff sind die Hauptquellen der Ammoniak-Entstehung. Hohe Temperaturen führen zu einer verstärkten Freisetzung von NH_3 , was mitunter einen Grund für die gesteigerte Instabilität thermophiler Systeme darstellt. Werte unter 200 mg L^{-1} gelten als förderlich für Fermenter-Populationen, da der im Ammoniak enthaltene Stickstoff einen essentiellen Nährstoff darstellt (APPLES et al. 2008). NH_3 kann in höheren Konzentrationen toleriert werden, wenn die mikrobielle Population einen ausreichenden Adaptionszeitraum zur Verfügung hatte (GERARDI 2003). Eine gesteigerte Alkalinität und fortfolgend höhere Ammoniak-Toxizität führen zur Abtötung eines Teils der mikrobiellen Gemeinschaft, insbesondere innerhalb methanogener Archaea. Diese Destabilisierung führt zu einem Anstieg an VFAs, was wiederum den pH senkt und den Anteil freien Ammoniaks reduziert. Der pH ist nun zwar wieder stabilisiert, aber die Methanproduktion bleibt niedrig (APPLES et al. 2008).

Sulfide – Salze des Schwefelwasserstoffs – entstehen vor allem durch Aktivität von SRBs durch Sulfat-Reduktion im Zuge der anaeroben Atmung. Sulfide rufen bei erhöhter Konzentration bei SRBs eine Substrat-Konkurrenz hervor und führen zu generellen toxischen Erscheinungen innerhalb der mikrobiellen Gemeinschaft. Die toxischen Eigenschaften beruhen vor allem auf der Proteindenaturierung und der Interaktion mit dem assimilatorischen Schwefel-Metabolismus. Bereits geringe Konzentrationen, im Bereich von $0,003 - 0,006 \text{ mol L}^{-1} \text{ S}$ oder $0,002 - 0,003 \text{ mol L}^{-1} \text{ H}_2\text{S}$, können inhibierend wirken. Auch im Bezug auf Sulfide weisen Methanogene, innerhalb der mikrobiellen Flora, die niedrigste Toleranzgrenze auf (APPLES et al. 2008).

■ organische Verbindungen:

Häufen sich VFAs an, sinkt der pH und wirkt auf Hydrolyse und Acetogenese, die zwei anfänglichen Phasen innerhalb der methanogenen Nahrungskette, inhibierend. Die Toxizität ergibt sich dadurch, dass in der nicht-dissoziierten/apolaren Form die Passage

durch die Zellmembran wesentlich leichter und in größeren Mengen erfolgen kann (APPLES et al. 2008).

Die Toxizität langkettiger, nicht-flüchtiger Fettsäuren, ist dadurch gegeben, dass sich diese an Zellwände bzw. Zellmembranen anlagern und somit die Transport- und Barriere-Funktion dieser außer Kraft setzen. Weiters führt deren Anlagerung zur Flotation und erleichterten Auswaschung von Biomasse. Langkettige Fettsäuren wirken bereits bei niedrigen Konzentrationen inhibierend auf grampositive Bakterien. Thermophile Mikroorganismen, insbesondere acetoklastische Methanogene, werden durch sie im Speziellen inhibiert. Ursache hierfür ist die Zusammensetzung der Zellwand bzw. -membran. Auffallend ist, dass keine Adaption stattzufinden scheint (APPLES et al. 2008).

Nicht nur die Verbindung selbst und deren Konzentration, sondern auch Mengenverhältnisse verschiedener Elemente und Moleküle untereinander, spielen eine wichtige Rolle und entscheiden über Qualität und Effizienz des mikrobiellen Abbaus. So sind das richtige Verhältnis von Makronährstoffen, speziell das C:N-Verhältnis (SPENDLIN 1991), sowie die Konzentrationen bestimmter Mikronährstoffe (z. B. Co und Ni) entscheidend für das Funktionieren anaerober Abbauprozesse im Reaktor (GERARDI 2003).

Man erkennt, dass das Zusammenspiel von v. a. Temperatur, Retentionszeit, Wasserstoffkonzentration, pH und diverser anorganischer wie organischer Verbindungen äußerst vielfältig und komplex ist und viele potentielle Ansatzpunkte bietet, die zu einer Störung der Homöostase im Fermenter führen können.

4. Biomüll als Energiequelle – Perspektiven:

Organische Abfälle wiederzuverwerten bzw. die Menge an Biomüll zu reduzieren und dabei ein energetisch hochwertiges Produkt, nämlich Biogas, zu generieren, stellt eine ökonomisch und ökologisch sinnvolle und nachhaltige Form der Abfallwirtschaft und Energiegewinnung dar. Die Methode bietet allerdings nicht nur Vorteile, sondern weist auch etliche Ansatzpunkte zur Verbesserung auf. Zu den größten Schwierigkeiten und Limitierungen die anaerobe Fermentation betreffend, zählen unter anderen ein unvollständiger Abbau organischen Materials, eine niedrige Abbaurate, die Notwendigkeit großer Fermenter-Volumina sowie die damit verbundenen hohen Kosten bei Errichtung und Betrieb dieser, die hohe Störanfälligkeit gegenüber Inhibitoren und störende Gaskomponenten (APPLES et al. 2008).

Für das Endprodukt Biogas stehen im Wesentlichen vier Anwendungen zur Verfügung. Dazu zählen die Erzeugung von Wärme und Dampf, von Elektrizität, die Verwendung als Treibstoff und als Ausgangsverbindung in der chemischen Industrie. Bei einer herkömmlichen Verbrennung wird keine außerordentlich hohe Biogas-Qualität vorausgesetzt. Möchte man Biogas hingegen zum Betrieb von Kraftfahrzeugen verwenden oder in das Gasnetz einspeisen, sind höhere Qualitätsstandards und die Erhöhung des Brennwertes notwendig. Störende Gaskomponenten, die etwa 1/3 des Gesamtbio-gases ausmachen, müssen hierzu entfernt werden. Eine Vielzahl schwefelhaltiger Verbindungen (z. B. Schwefelwasserstoff, Sulfide, Disulfide und Thiole) wirken vor allem in Gegenwart von Wasser korrosiv,

Siloxane bilden unlösliche Ablagerungen und Ammoniak führt bei Verbrennung zur Stickoxid-Bildung (NO_x). H_2S kann durch Zugabe von Fe^{3+} -Salzen entfernt werden, wobei unlösliche Sulfide entstehen, durch Adsorption an Aktivkohle, durch Reduktion mittels NaOH , oder durch bestimmte Mikroorganismen, die Schwefelwasserstoff zu S^0 oder SO_4^{2-} oxidieren können. Bei letzterer Methode ist jedoch die Zugabe von Sauerstoff notwendig und da Methan im Bereich zwischen 5 bis 15 % in Luft explosiv ist, ist deshalb Vorsicht geboten.

Ein zusätzlicher Vorteil ist hingegen mit dieser Methode verbunden, denn die meisten H_2S -Oxidierer sind autotroph und verwerten und reduzieren somit den CO_2 -Gehalt des Biogases. Störende, in Spuren vorkommende Gase treten vor allem bei industriell erzeugten Produkten zu Tage. Besonders problematisch hierbei sind volatile, cyclische Siloxane, die zur Bildung von äußerst widerstandsfähigen Quarz-Krustierungen führen. Durch die Entfernung von CO_2 wird der Heizwert erhöht. Dies kann unter anderem durch Absorption von CO_2 , H_2S wird dabei übrigens gleichzeitig mit entfernt, in einem polaren Lösungsmittel erreicht werden oder durch Adsorption an z. B. Aktivkohle. Ebenso die Entfernung von Wasser ist notwendig. Auch hier erfolgt entweder eine Adsorption an Kieselgel oder Al_2O_3 oder eine Absorption in Glykol oder mittels hygroskopischer Salze (APPLES et al. 2008).

Die Arbeitsgruppe um Dr. Illmer hat es sich insbesondere zum Ziel gemacht, Phasen verminderter bzw. schlechter Fermenter-Performance rechtzeitig erkennen zu können und diesen gezielt entgegenzuwirken, um einen möglichst konstanten und vollständigen Abbau organischen Materials zu erreichen und die Biogasausbeute zu steigern. Desweiteren sind wir bemüht mehr über grundsätzliche mikrobielle und physiologische Vorgänge im extremophilen Habitat thermophiler Anaerob-Fermenter in Erfahrung zu bringen.

5. Literatur:

- AHRING B. K., 1994: Status on science and application of thermophilic anaerobic digestion. *Water Science and Technology* 30, 241 – 249.
- APPELS L., BAEYENS J., DEGREVE J., DEWIL R., 2008: Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science* 34: 755 – 781.
- BRECHNER E. (Red.), 2001: *Kompaktlexikon der Biologie: in drei Bänden*. Spektrum, Akademischer Verlag Heidelberg, Berlin.
- GERARDI M. H., 2003: *Wastewater Microbiology Series: The Microbiology of Anaerobic, Digesters*. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey.
- ILLMER P., GSTRAUNTHALER G., LIEBENSTEINER M., LINS P., MALIN C., SCHWARZENAUER T., WAGNER A., 2008: Evaluierung von Steuerungsparametern bei der Vergärung von Bioabfällen: Endbericht. Institut für Mikrobiologie, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck.
- ILLMER P., GSTRAUNTHALER G., 2009: Effect of seasonal changes in quantities of biowaste on full scale anaerobic digester performance. *Waste Management* 29: 162 – 167.
- ILLMER P., SCHWARZENAUER T., MALIN C., WAGNER A. O., MILLER L. M., GSTRAUNTHALER G., 2009: Process parameters within a 750.000 litre anaerobic digester during a year of disturbed fermenter performance. *Waste Management* 29: 1838 – 1843.

- KÄMPFER P., WEISSENFELS W. D., 2001: Biologische Behandlung organischer Abfälle. Springer-Verlag Heidelberg, Berlin.
- MADIGAN M. T., MARTINKO J. M., PARKER J., 2003: Brock: Mikrobiologie. Spektrum, Akademischer Verlag GmbH Heidelberg, Berlin.
- REINEKE W., SCHLÖMANN M., 2007: Umweltmikrobiologie. Elsevier GmbH, Spektrum, Akademischer Verlag, München.
- SPENDLIN H.-H., 1991: Untersuchungen zur frühzeitigen Initiierung der Methanbildung bei festen Abfallstoffen. Economica Verlag, Bonn.
- WEILAND P., 2003: Production and Energetic Use of Biogas from Energy Crops and Wastes in Germany. Applied Biochemistry and Biotechnology 109: 263 – 274.
- WELLINGER A., 1991: Biogas-Handbuch, Grundlagen – Planung – Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen. Verlag Wirz AG, Aarau.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte des naturwissenschaftlichen-medizinischen Verein Innsbruck](#)

Jahr/Year: 2013

Band/Volume: [98](#)

Autor(en)/Author(s): Reitschuler Christoph, Illmer Paul

Artikel/Article: [Biomüll als Energiequelle - Biogasproduktion durch anaerobe thermophile Fermentation biogener Abfallstoffe 153-171](#)