



**LfL**

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

## Sicherung der Prozessstabilität in landwirtschaftlichen Biogasanlagen



**LfL-Information**

**Impressum:**

Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)  
Vöttinger Straße 38, 85354 Freising-Weihenstephan  
Internet: <http://www.LfL.bayern.de>

Redaktion: Institut für Landtechnik und Tierhaltung  
Vöttinger Str. 36, 85354 Freising-Weihenstephan  
E-Mail: [TierundTechnik@LfL.bayern.de](mailto:TierundTechnik@LfL.bayern.de)  
Tel.: 08161/71-3450

2. Auflage September / 2008

Druck: Lerchl Druck, 85354 Freising

© LfL



# **Sicherung der Prozessstabilität in landwirtschaftlichen Biogasanlagen**

**Dipl.-Ing. agr. M.Sc. Felipe Kaiser**  
**Dipl.-Ing. (FH) Tim Metzner**  
**Dipl.-Ing. M.Sc. Mathias Effenberger**  
**Dr. Andreas Gronauer**



<b>Inhaltsverzeichnis</b>		Seite
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Ablauf des anaeroben Abbauprozesses</b> .....	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Einflussfaktoren des anaeroben Abbauprozesses</b> .....	<b>8</b>
3.1	Verfahrenstechnische (physikalische) Einflussfaktoren .....	8
3.1.1	Raumbelastung und Verweilzeit .....	9
3.1.2	Durchmischung .....	9
3.1.3	Prozesstemperatur .....	9
3.2	Chemische Einflussfaktoren .....	10
3.2.1	pH-Wert .....	10
3.2.2	Flüchtige Fettsäuren .....	10
3.2.3	FOS/TAC .....	11
3.2.4	Nährstoffversorgung und Spurenelemente.....	11
3.2.5	Hemmstoffe.....	12
3.3	Mikrobiologische Einflussfaktoren.....	12
<b>4</b>	<b>Milieuansprüche und Grenzwerte</b> .....	<b>13</b>
	<b>Literatur</b> .....	<b>14</b>

## 1 Einleitung

Die Sicherung der Prozessstabilität in landwirtschaftlichen Biogasanlagen spielt eine entscheidende Rolle zur Vorbeugung von Problemen im Anlagenbetrieb und damit zur Gewährleistung einer konstanten Abbaueffizienz, Rentabilität und Betriebssicherheit. Unter Prozessstabilität wird verfahrenstechnisch eine gleichmäßige Gasproduktion und -zusammensetzung bei kontinuierlicher Leistungsabgabe verstanden. Biochemisch bedeutet Prozessstabilität ein stabiles Fließgleichgewicht der Vorgänge innerhalb der anaeroben Abbaukette.

Bei der Beurteilung der Prozessstabilität müssen eine Vielzahl von Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Hierbei sind die Anlagenvarianten ebenso vielfältig wie die eingesetzten Inputmaterialien, die Art der Biogasnutzung und die Verwertung der Gärreste. Allerdings bestehen bei zahlreichen Biogasanlagen nur ungenaue Kenntnisse über deren Prozesskinetik, Stoffverhalten, Substrateigenschaften, Erträge und die Auswirkungen auf die Ökonomie der Anlage.

In diesem Infoblatt wird zunächst ein allgemeiner Einblick in die Vorgänge beim anaeroben Abbauprozess gegeben. Es folgt ein Überblick über die verfahrenstechnischen Einflussmöglichkeiten sowie die chemischen und mikrobiologischen Wirkungsmechanismen im Fermenter. Anschließend werden die Milieuanprüche der beteiligten Bakteriengruppen bzw. Archaea sowie die Grenzwerte der wichtigsten Prozessparameter tabellarisch zusammengefasst.

## 2 Ablauf des anaeroben Abbauprozesses

Unter Sauerstoffabschluss entsteht aus organischer Substanz ein Gasgemisch, das sich zum größten Teil aus Methan und Kohlenstoffdioxid zusammensetzt. In geringeren Mengen kommen auch Sauerstoff, Wasserstoff, Schwefelwasserstoff, Ammoniak und andere Spurengase vor. Um den entstehenden Biogasprozess zu veranschaulichen, gliedert man diesen in mehrere Teilschritte. Einen Überblick über den anaeroben Abbauprozess zeigt Abbildung 1.

In der **Hydrolyse** wird das Ausgangsmaterial (z.B. Kohlenhydrate, Eiweiße, Fette) aus seiner komplexen Verbindung in einfachere organische Verbindungen (z.B. Zucker, Aminosäuren, Fettsäuren) zerlegt. Dies geschieht dadurch, dass Bakterien Enzyme freisetzen, die das Ausgangsmaterial auf biochemischem Weg abbauen.

Im nächsten Schritt, der **Acidogenese** (Versäuerungsphase), werden die in der Hydrolyse gebildeten Zwischenprodukte zu niederen Fettsäuren, Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff abgebaut. Zu den niederen Fettsäuren, auch als flüchtige Fettsäuren bezeichnet, zählen hauptsächlich Essig-, Propion- und (iso-) Buttersäure. Unter ungünstigen Bedingungen können aber auch (iso-) Valerian-, Capron- und Oenanthsäure gebildet werden. Letztere sind eindeutige Indikatoren für eine zunehmende Prozesshemmung durch Versäuerung.

In der folgenden **Acetogenese** (Essigsäurebildung) werden die flüchtigen Fettsäuren zu Essigsäure, Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid abgebaut. Dies sind bereits die Vorläufersubstanzen für die Bildung des Biogases. Als Ergebnis der Acetogenese steigt der Wasserstoffgehalt im Fermenter an und kann für die essigsäurebildenden Bakterien schädlich sein. Zur Senkung des Wasserstoffgehalts gehen diese deshalb eine Art Symbiose mit den Bakterien

der Methanogenese ein. Die methanogenen Bakterien nutzen den Wasserstoff zur Bildung von Methan, und sorgen so für tragbare Lebensbedingungen der acetogenen Bakterien.

Im letzten Schritt des anaeroben Abbauprozesses, der **Methanogenese**, erfolgt die Bildung von Methan aus den Produkten der Acetogenese.

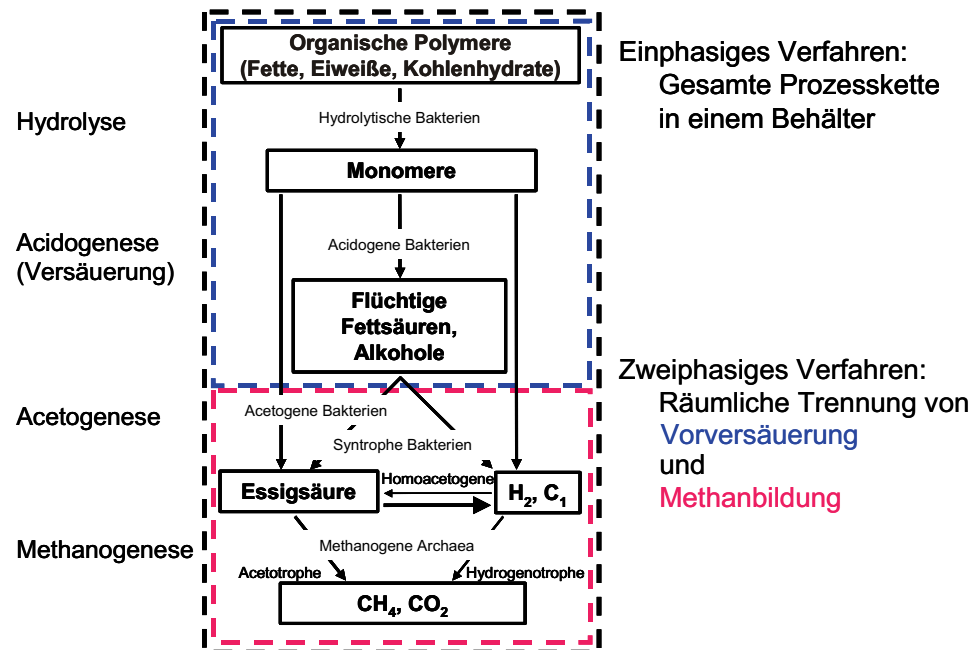


Abbildung 1: Schema des anaeroben Abbauprozesses

Laufen diese Schritte gemeinsam in der Biogasanlage ab, wird das System als **einphasiges Verfahren** bezeichnet. Erfolgt eine räumliche Trennung von Vorversäuerung (Hydrolyse mit Acidogenese) und Methanbildung (Acetogenese mit Methanogenese), bezeichnet man das System als **zweiphasiges Verfahren**.

Da die Mikroorganismen in den einzelnen Biogasbildungsschritten verschiedene Anforderungen an ihre Umgebung stellen, muss ein Kompromiss bezüglich der Prozessbedingungen gefunden werden. Methanogene sind hierbei am anfälligsten gegenüber Störungen. In der Praxis werden deshalb die Bedingungen an diese Organismengruppe angepasst. Methanogene Organismen sind auf ein sauerstoffreies Milieu angewiesen. Da es sich bei den meisten Anlagen um Durchfluss-Fermenter handelt, kann jedoch ein geringer Sauerstoffeintrag über die Substratzufuhr nicht ausgeschlossen werden. Sauerstoff kann die Aktivität der Methanbakterien herabsetzen und bei weiterem Anstieg komplett hemmen. Einige am anaeroben Abbauprozesse beteiligte Bakteriengruppen besitzen die Fähigkeit, eingetragenen Sauerstoff zu verbrauchen. Diese bezeichnet man als fakultativ anaerob lebende Bakterien, das heißt sie können sowohl unter Sauerstoffeinfluss als auch ohne Sauerstoff leben. Solange der Sauerstoffeintrag nicht zu groß ist, können diese Bakterien den Sauerstoff verbrauchen, bevor er die Bakteriengruppen schädigt, die auf eine sauerstofffreie Umgebung zwingend angewiesen sind.

### 3 Einflussfaktoren des anaeroben Abbauprozesses

Die Parameter zur Beurteilung der Prozessstabilität lassen sich in verfahrenstechnische, chemische und mikrobiologische Einflussfaktoren einteilen. Hierbei nimmt die Verfahrenstechnik Einfluss auf die chemischen und mikrobiologischen Parameter. Des Weiteren beeinflussen sich chemische und mikrobiologische Parameter untereinander.

#### 3.1 Verfahrenstechnische (physikalische) Einflussfaktoren

Am einfachsten zu steuern und zu messen sind die verfahrenstechnischen Einflussfaktoren. Hierzu zählen die Reaktorbauform, das Gärverfahren (Batch-, Speicher-, Durchflussverfahren und als Mischform das Durchfluss-Speicherverfahren), die Art der Fermenterdurchmischung, der Prozessdruck, die Prozess Temperatur, die Substratauswahl sowie die hydraulische Verweilzeit und die Raumbelastung.

Abbildung 2 zeigt zur Veranschaulichung das Verfahrensschema einer zweistufigen landwirtschaftlichen Biogasanlage (Fermenter und Nachgärer) zur Verwertung flüssiger und fester Substrate. Die Zufuhr von frischem Substrat erfolgt hierbei in die erste Stufe, während im Nachgärer der Gärrest aus der ersten Stufe weiter vergoren wird. Zweck des Nachgärers ist der weitere Abbau der im Eingangssubstrat enthaltenen organischen Bestandteile und damit die Steigerung des Methanertrags.

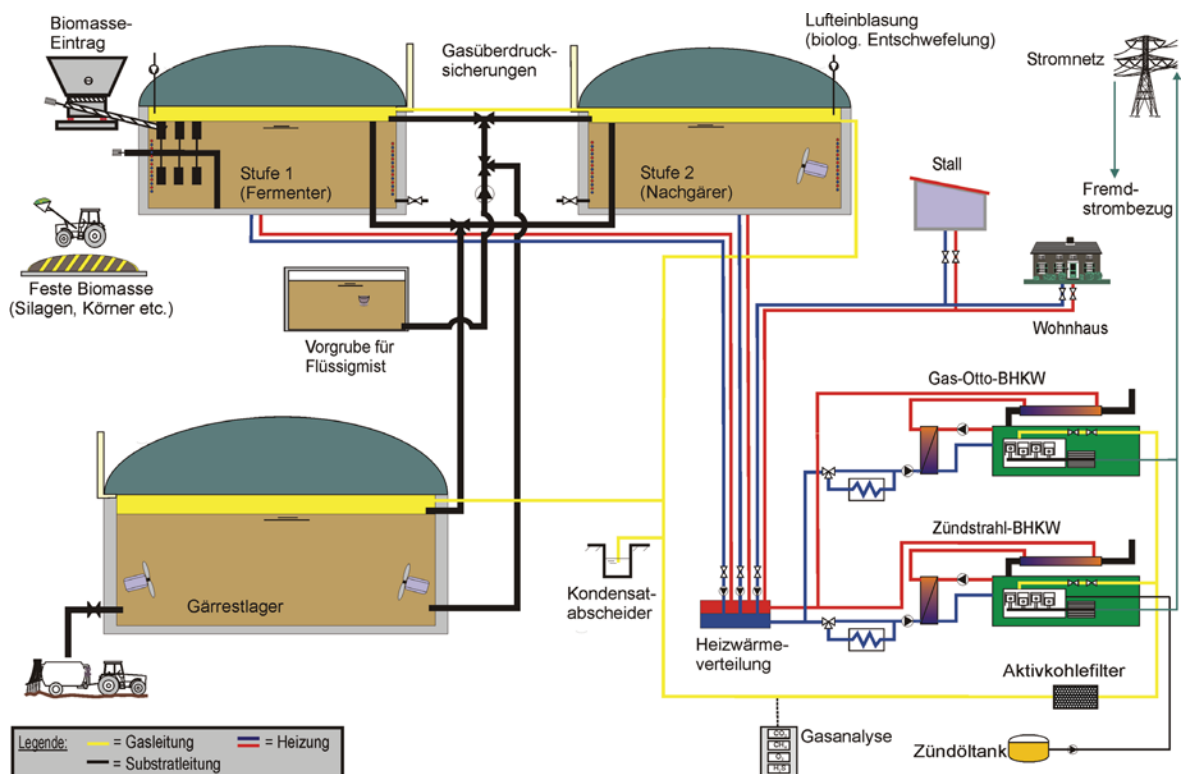


Abbildung 2: Schema einer landwirtschaftlichen Biogasanlage zur Verwertung flüssiger und fester Substrate



### 3.1.1 Raumbelastung und Verweilzeit

Bei der Festlegung von Raumbelastung und hydraulischer Verweilzeit für eine Biogasanlage muss ein Kompromiss gefunden werden zwischen möglichst hohen Durchsatzraten und möglichst geringem Fermentervolumen. Dieser Kompromiss wird anhand ökonomischer Kenngrößen abgeleitet. Hierzu gibt die Raumbelastung an, wieviel Kilogramm organische Trockensubstanz (oTS) dem Fermenter je Kubikmeter Nutzvolumen und Zeiteinheit zugeführt wird. Die Verweilzeit beschreibt die durchschnittliche theoretische Aufenthaltszeit des Substrates im Fermenter.

Zwischen den beiden Parametern besteht ein enger Zusammenhang, da dem Fermenter mit steigender Raumbelastung mehr Substrat zugeführt wird und somit die Verweilzeit zurück geht. Es ist notwendig, die Verweilzeit an die spezifische Abbaugeschwindigkeit der verwendeten Substrate anzupassen. Mit längeren Verweilzeiten kann eine bessere Abbauleistung und damit auch eine höhere Gasproduktion erzielt werden. Zusätzlich führt eine längere Verweilzeit zu gesteigerter Methanfreisetzung, was wiederum den Heizwert des Gasgemisches steigert.

In der Praxis liegen die maximalen Raumbelastungen für die Vergärung von NawaRo mit Gülle derzeit erfahrungsgemäß bei 3,0 bis 4,0 kg oTS\*(m<sup>3</sup>\*d)<sup>-1</sup>. Bei Anlagen mit reiner NawaRo-Vergärung, das heißt ohne die externe Zufuhr von Gülle, werden Maximalwerte von 2,0 bis 3,0 kg oTS\*(m<sup>3</sup>\*d)<sup>-1</sup> empfohlen.

### 3.1.2 Durchmischung

Die Durchmischung des Gärbehälters ist notwendig, um den Kontakt zwischen Bakterien mit Gärsubstrat zu intensivieren. Des Weiteren sorgt das Rühren für einen Ausgleich von Temperatur- und Konzentrationsunterschieden im Gärsubstrat. Entfällt die Durchmischung, ist eine Schichtenbildung im Fermenter zu beobachten, welche durch Dichteunterschiede verursacht wird. Häufig sinkt ein Großteil der Bakterienmasse zu Boden, während sich abzubauenendes Substrat in oberen Schichten ansammelt. Der Kontaktbereich zwischen Mikrobiologie und Substrat beschränkt sich hierdurch auf den Grenzbereich der beiden Schichten. Die sich bildende Schwimmschicht erschwert zudem den Gasaustritt. Die Durchmischung fördert den Kontakt zwischen Bakterien und Substrat.

Im Gegenzug führt eine zu heftige Durchmischung zur Beeinträchtigung des anaeroben Abbauprozesses. Wie bereits beschrieben, bilden die methanogenen Bakterien eine enge Lebensgemeinschaft mit den acetogenen Bakterien und siedeln sich hierfür in unmittelbarer Nähe an. Durch zu hohe Scherkräfte infolge kräftigen Rührens kann diese Lebensgemeinschaft zerstört werden.

Als Kompromiss zwischen Intensivierung des Kontakts von Substrat mit Bakterien und möglichst geringen Scherkräften, werden in der Praxis langsam rotierende Rührwerke eingesetzt, welche den Reaktorinhalt in zeitlichen Intervallen durchmischen. Hierbei gilt der Grundsatz: „Rühre so wenig wie möglich und so oft wie nötig“.

### 3.1.3 Prozesstemperatur

Grundsätzlich steigen in der Natur die Umsetzungsgeschwindigkeiten mit Erhöhung der Temperatur. Dies gilt bei Mikroorganismen jedoch nur in bestimmten Bandbreiten. Für die am anaeroben Abbauprozess beteiligten Bakteriengruppen existieren verschiedene Temperaturoptima. Diese lassen sich grob in die Hauptgruppen psychrophile (bis 25°C), mesophile (32°C bis 42°C) und thermophile (50°C bis 57°C) Mikroorganismen einteilen. Da der größte Anteil der bekannten Methanbakterien sein Wachstumsoptimum im mesophilen Bereich

besitzt, werden die meisten Biogasanlagen im Temperaturbereich zwischen 38°C und 42°C betrieben. Ein kleinerer Teil der Anlagen wird im thermophilen Bereich betrieben. Thermophil betriebene Anlagen sollten hierbei nicht bei Substraten mit hohem Stickstoffgehalt (beispielsweise Hühnermist, Klee gras, Getreidekörner) eingesetzt werden, da mit steigenden Temperaturen eine zunehmende Ammoniakhemmung eintritt. Zur Einhaltung der optimalen Temperaturbedingungen ist es zwingend notwendig, den Fermenter extern zu beheizen und auch dementsprechend zu isolieren.

### **3.2 Chemische Einflussfaktoren**

Wesentliche Einflüsse auf den anaeroben Abbauprozess gehen vom Chemismus und der Zusammensetzung der Einsatzstoffe aus. Hierzu zählen auch Zwischenprodukte, welche im Laufe der Prozesskette der Biogasbildung entstehen. Je nach Verfügbarkeit der Nährstoffe und nach Konzentration von prozesshemmenden Stoffen kann die Einbringung von Zusatz- und Hilfsstoffen erforderlich sein, um einen stabilen Anlagenbetrieb sicherzustellen.

#### **3.2.1 pH-Wert**

Analog zur Prozesstemperatur haben die Mikroorganismen unterschiedlicher Prozessstufen unterschiedliche pH-Optima (Tabelle 2). Die hydrolisierenden und säurebildenden Bakterien haben ein Optimum bei pH 4,5 bis 6,3. Dieser Bereich ist aber nicht zwingend für das Überleben der Bakterien notwendig. Bei geringen Abweichungen aus dem Optimalbereich können diese Mikroorganismen weiter überleben, arbeiten jedoch mit einer niedrigeren Effizienz. Für essigsäure- und methanbildende Organismen ist dagegen unbedingt ein pH-Wert zwischen 6,8 bis 7,5 einzuhalten. Zur Aufrechterhaltung des Gärprozesses im einphasigen Verfahren ist deshalb die Einstellung des pH-Wertes auf die beiden letzteren Organismengruppen maßgeblich.

Normalerweise stellt sich sowohl bei einphasigen als auch bei zweiphasigen Systemen der pH-Wert automatisch durch alkalische und saure Stoffwechselfvorgänge ein. Dieses Gleichgewicht kann aber gestört werden, wenn der pH-Wert durch das freigesetzte Kohlendioxid nicht mehr ausreichend gepuffert wird. Die Stoffwechselaktivität der Methanogenen wird zunehmend gehemmt und es kommt zu einer Anreicherung der Säuren aus der Acidogenese. Sinkt infolgedessen der pH-Wert stark ab, spricht man von einer Versäuerung des Gesamtprozesses. Der Versäuerung kann durch einen Stopp der Substratzufuhr abgeholfen werden, wodurch die methanogenen Organismen Zeit zum Abbau der überschüssigen Säuren bekommen. Gegebenenfalls ist eine Regulierung des pH-Wertes durch Zugabe von basischen Zuschlagstoffen (z.B. Kalk) erforderlich.

Bei mit Wirtschaftsdüngern betriebenen Anlagen eignet sich der pH-Wert nicht als Indikator für die Anreicherung von Fettsäuren, da steigende Säurekonzentrationen durch das enthaltene Carbonat abgepuffert werden. In der Regel wird deshalb unter anderem der Gehalt an flüchtigen Fettsäuren und der FOS/TAC zur Beurteilung der Prozessstabilität verwendet.

#### **3.2.2 Flüchtige Fettsäuren**

Der Gehalt an flüchtigen (niederer) Fettsäuren (FFS), die als Zwischenprodukte im anaeroben Abbau entstehen, gibt Auskunft über den Zustand des Fermentationsprozesses. Es handelt sich hierbei um Monocarbonsäuren mit 2 bis 7 Kohlenstoffatomen. Die Einzelkonzentrationen der Fettsäuren werden hierbei in Milligramm je Liter Probe angegeben, die Gesamtkonzentration wird in Milligramm Essigsäureäquivalenten pro Liter Probe ( $\text{mg}_{\text{eq}} \cdot \text{L}^{-1}$ ) ausgedrückt. Die am häufigsten gebildeten niederen Fettsäuren sind Essig-, Propion- und iso-Buttersäure.

Die Erfahrung zeigt, dass die Gesamtkonzentration an flüchtigen Fettsäuren im Fermenter unter einem Wert von  $4000 \text{ mg}_{\text{eq}} \cdot \text{L}^{-1}$  liegen sollte. Die Konzentration der Essigsäure sollte unter  $3000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  liegen, die der Propionsäure unter  $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  und die der iso-Buttersäure bei kleiner  $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . Das optimale Verhältnis von Essig- zu Propionsäure beträgt 2:1. Die Grenzwerte dieser und weiterer Parameter sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

### 3.2.3 FOS/TAC

Im anaeroben Abbauprozess können Säuren akkumuliert werden, ohne dass es zu einer Änderung des pH-Wertes kommt. Dieser eignet sich deshalb nicht als Indikator für die durch flüchtige Fettsäuren hervorgerufene Hemmung der Methanbildung.

Zur Beschreibung des biochemischen Zustands im Fermenter gilt deshalb der Quotient aus dem Gehalt an flüchtigen Fettsäuren (flüchtige organische Säuren „FOS“) und dem Gehalt an Carbonatpuffer (total anorganic carbon „TAC“) als geeignet. Letzterer kann allgemein auch als Alkalinität bezeichnet werden, da bei Substraten mit hohem Stickstoffgehalt neben Carbonat auch Ammonium titriert wird.

Ist im Betriebsverlauf ein ansteigender Trend des Wertes erkennbar, besteht die Gefahr einer Versäuerung. Die Erfahrung zeigt, dass ab einem FOS/TAC von größer 0,8 mit Prozesshemmungen zu rechnen ist.

### 3.2.4 Nährstoffversorgung und Spurenelemente

Wichtig für die effiziente Methanproduktion einer Biogasanlage ist die optimale Nährstoffversorgung der Bakterien. Entscheidend hierfür ist die Zusammensetzung des zugeführten Substrates, das heißt, welche Anteile an Proteinen, Fetten und Kohlenhydraten in ihm enthalten sind. Des Weiteren spielt das C/N-Verhältnis eine entscheidende Rolle. Ist dieses Verhältnis zu hoch, kann der Kohlenstoff nicht optimal abgebaut werden. Dies führt unweigerlich zu einer geringeren Ausnutzung des Methanbildungspotenzials. Kommt es andererseits zu einem Stickstoffüberschuss, erfolgt die Bildung von Ammoniak, welcher die Bakterien bereits in geringen Konzentrationen schädigt.

Als Zielwert für einen ungestörten Prozessablauf gilt ein C/N-Verhältnis im Bereich 20 bis 30. Eine ausreichende Nährstoffversorgung ist bei einem C/N/P/S-Verhältnis von etwa 450/15/5/1 gewährleistet.

Zusätzlich sind für das Wachstum und Überleben der Mikroorganismen Spurenelemente, insbesondere Eisen, Nickel, Kobalt, Selen, Molybdän und Wolfram notwendig. Diese können sich allerdings in zu hohen Konzentrationen auch hemmend auf den Biogasprozess auswirken. Tabelle 1 zeigt günstige Konzentrationsbereiche einiger Spurenelemente aus dem Abwasserbereich. Diese Werte können jedoch nur zur groben Orientierung herangezogen werden.

Tabelle 1: Günstige Konzentrationen gelöster Spurenelemente im Anaerobreaktor aus dem Abwasserbereich (MUDRACK ET AL. 2003 in BISCHOFBERGER ET AL. 2005)

Spurenelement	Konzentrationsbereich [ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ]
Fe (Eisen)	1 – 10
Ni (Nickel)	0,005 – 0,5
Co (Kobalt)	0,003 – 0,06
Mo (Molybdän)	0,005 – 0,05

### 3.2.5 Hemmstoffe

Bei Hemmstoffen handelt es sich in der Regel um Stoffe, die in zu hoher Konzentration giftig auf die Bakterien wirken und den Abbauprozess negativ beeinflussen. Allgemein muss man unterscheiden zwischen Stoffen, die durch das Substrat eingebracht werden können (Antibiotika, Desinfektionsmittel, Herbizide, Salze oder Schwermetalle) und solchen die als Zwischenprodukte in den einzelnen Stufen der Vergärung entstehen (siehe Kapitel 2). Bei der Beschickung des Reaktors muss unbedingt die richtige Dosierung berücksichtigt werden, da eine übermäßige „Fütterung“ zur Hemmung des Abbauprozesses führen kann.

Selbst essentielle Spurenelemente können in zu hohen Konzentrationen toxisch für die Bakterien sein. Die Grenzkonzentrationen sind nur schwer zu bestimmen, da sich die Bakterien bis zu einem gewissen Maße auch an solche Stoffe anpassen können. Des Weiteren existieren für einige Hemmstoffe Wechselwirkungen mit anderen Stoffen. Schwermetalle wirken beispielsweise nur dann schädigend auf den Gärprozess, wenn sie in gelöster Form vorliegen. Durch gebildeten Schwefelwasserstoff können diese gebunden und ausgefällt werden. Gleichzeitig zeigt Schwefelwasserstoff hierbei bereits ab einer gelösten Konzentration von etwa  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  eine toxische Wirkung. Schwefel ist allerdings auch ein essentielles Spurenelement und damit ein wichtiger Mineralstoff der methanbildenden Bakterien.

Beim Gärprozess entsteht Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ). Bei der Lösung in Wasser steht dieser mit Ammonium ( $\text{NH}_4$ ) im chemischen Gleichgewicht. Ein steigender pH-Wert, also eine zunehmende  $\text{OH}^-$ -Konzentration führt zu einem Anstieg der Ammoniakkonzentration im Gärsubstrat. Während Ammonium den meisten Bakterien als Stickstoffquelle dient, kann sich Ammoniak schon in geringen Mengen hemmend auf die Bakterien auswirken. Eine Gesamtkonzentration von über  $3000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  ( $\text{NH}_3$  und  $\text{NH}_4$ ) beziehungsweise  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{NH}_3$  kann bereits hemmend für den gesamten Biogasprozess sein. Darüber hinaus nimmt die Hemmwirkung des Ammoniaks mit steigender Temperatur zu, was sich insbesondere in thermophil betriebenen Biogasanlagen problematisch auswirken kann.

## 3.3 Mikrobiologische Einflussfaktoren

Mit ihrer hohen Biodiversität (Artenvielfalt) besitzen Gemeinschaften aus Mikroorganismen die Fähigkeit, sich an gegebene Lebensumstände anzupassen, und sich auf diese zu spezialisieren. In einem mikrobiologischen System gilt, dass eine Mikrobiologie mit zunehmender Biodiversität flexibler auf Substratänderungen reagieren kann. Gleichzeitig erzielt eine spezialisierte Biozönose höhere Abbauquoten „ihres“ speziellen Substrates. Derzeit sind weniger als 1 % der am anaeroben Abbauprozess beteiligten Mikroorganismen bekannt. Es kön-

nen deshalb nur allgemeine Aussagen über mikrobiologische Einflussfaktoren getroffen werden. Da die Ausbildung der Mikrobiologie in direkter Wechselwirkung mit verfahrenstechnischen und chemischen Einflussfaktoren steht, sind hierbei insbesondere die Einhaltung von Temperatur- und pH-Optima sowie eine optimale Nährstoffversorgung und die Einhaltung von Konzentrationsgrenzen für Hemmstoffe zu nennen.

Bei der Substratzufuhr ist zu beachten, dass wechselnde Substratzusammensetzungen für die Bakterien auch wechselnde Lebensbedingungen bedeuten, an die sie sich wieder neu adaptieren müssen. Zur Förderung einer stabilen Entwicklung und damit einer konstanten Gasproduktion sollte die Substratzusammensetzung und -menge deshalb möglichst geringe Schwankungen aufweisen.

Zu Beginn der Anfahrphase ist es wichtig, dass die Raumbelastung nur langsam und in kleinen Schritten erhöht wird, um insbesondere den methanogenen Organismen genügend Zeit für ihr Wachstum zu geben. Wird zu viel Substrat zugegeben, können die in den vorhergehenden Abbaustufen gebildeten Zwischenprodukte nicht schnell genug durch die nur langsam wachsenden Methanogenen abgebaut werden. Dies kann, wie zuvor beschrieben, zu einer Hemmung durch Versäuerung des anaeroben Abbauprozesses führen.

## 4 Milieuanprüche und Grenzwerte

Die folgenden Tabellen geben eine Übersicht über die Milieuanprüche der einzelnen Organismengruppen (Tabelle 2) sowie der Grenzwerte von wichtigen Parametern zur Beurteilung der Prozessstabilität (Tabelle 3).

Tabelle 2: Milieuanprüche der am anaeroben Abbauprozess beteiligten Organismengruppen eingeteilt nach der Abbaustufe

Abbaustufe	Temperatur [°C]	pH-Wert	Aerophilie
Hydrolyse	bis über 70 (je höher, desto raschere Umsetzung)	4,5 – 6,3	aerob, (fakultativ) anaerob
Acidogenese			strikt anaerob
Acetogenese	max. 52 – 56	6,8 – 7,5	strikt anaerob
Methanogenese	bis ca. 70		

Tabelle 3: Empfohlene Grenzwerte wichtiger Einflussfaktoren des anaeroben Abbauprozesses

Parameter	Einheit	Fermenter	Nachgärer
TS-Gehalt	%-Frischmasse	8 - 15	< 8
oTS-Gehalt	%-TS	70 – 80	< 70
pH-Wert	--	7,0 – 7,5	> 8,0
NH <sub>4</sub> -N	mg*L <sup>-1</sup>	50 – 2000	< 3000
KS 4,3	mMol*L <sup>-1</sup>	250 – 500	250 – 500
Essigsäure	mg*L <sup>-1</sup>	< 3000	< 1000
Propionsäure	mg*L <sup>-1</sup>	< 1000	< 500
iso-Buttersäure	mg*L <sup>-1</sup>	<< 500	<< 500
Gesamtfettsäuren	mg <sub>eq.</sub> *L <sup>-1</sup>	< 4000	< 2000
FOS/TAC	--	< 0,8	< 0,5
Methangehalt	Vol.-%	> 48 (Gesamtanlage)	

## Literatur

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., FNR (Hrsg.) (2004): Handreichung Biogasgewinnung und –nutzung. Gefördert durch Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (FKZ 22027200), Leipzig 2004.

Bischofsberger, W.; Dichtl, N.; Rosenwinkel, K.-H.; Seyfried, C. F. und Böhnke, B. (2005): Anaerobtechnik, 2. Auflage, Springer Verlag, S. 48,  
 Primärquelle: Mudrack K. und Kunst S. (2003): Biologie der Abwasserreinigung, 5. Auflage, Spektrum Verlag.