

Grundlagen der anaeroben Fermentation



2.1 Entstehung von Biogas

Wie schon der Name vermuten lässt, entsteht das „Bio“-Gas in einem biologischen Prozess. Unter Abschluss von Sauerstoff entsteht dabei aus organischer Masse ein Gasgemisch, das sogenannte Biogas. Dieser in der Natur weit verbreitete Prozess findet beispielsweise in Mooren, auf dem Grund von Seen, in der Güllegrube sowie im Pansen von Wiederkäuern statt. Hierbei wird die organische Masse fast vollständig zu Biogas umgewandelt und es entstehen nur geringe Mengen an neuer Biomasse oder Wärme.

Das gebildete Gasgemisch besteht zu ca. zwei Dritteln aus Methan und ca. einem Drittel aus Kohlendioxid. Daneben befinden sich im Biogas noch geringe Mengen an Wasserstoff, Schwefelwasserstoff, Ammoniak und anderen Spurengasen. Um den Entstehungsprozess des Biogases deutlich zu machen, kann dieser in mehrere Teilschritte unterteilt werden (siehe Abb. 2-1) /2-1/, /2-2/, /2-3/, /2-4/.

In dem ersten Schritt, der „**Hydrolyse**“, werden die komplexen Verbindungen des Ausgangsmaterials (z. B. Kohlenhydrate, Eiweiße, Fette) in einfachere, organische Verbindungen (z. B. Aminosäuren, Zucker, Fettsäuren) zerlegt. Die daran beteiligten Bakterien setzen hierzu Enzyme frei, die das Material auf biochemischem Weg zersetzen.

Die gebildeten Zwischenprodukte werden dann in der sogenannten „**Versäuerungsphase**“ (Acidogenese) durch säurebildende Bakterien weiter zu niederen Fettsäuren (Essig-, Propion- und Buttersäure) sowie Kohlendioxid und Wasserstoff abgebaut. Daneben werden aber auch geringe Mengen an Milchsäure und Alkohole gebildet.

Diese Produkte werden anschließend in der Acetogenese, der „**Essigsäurebildung**“, durch Bakterien zu Vorläufersubstanzen des Biogases (Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid) umgesetzt. Da ein zu hoher Wasserstoffgehalt für die Bakterien der Essig-

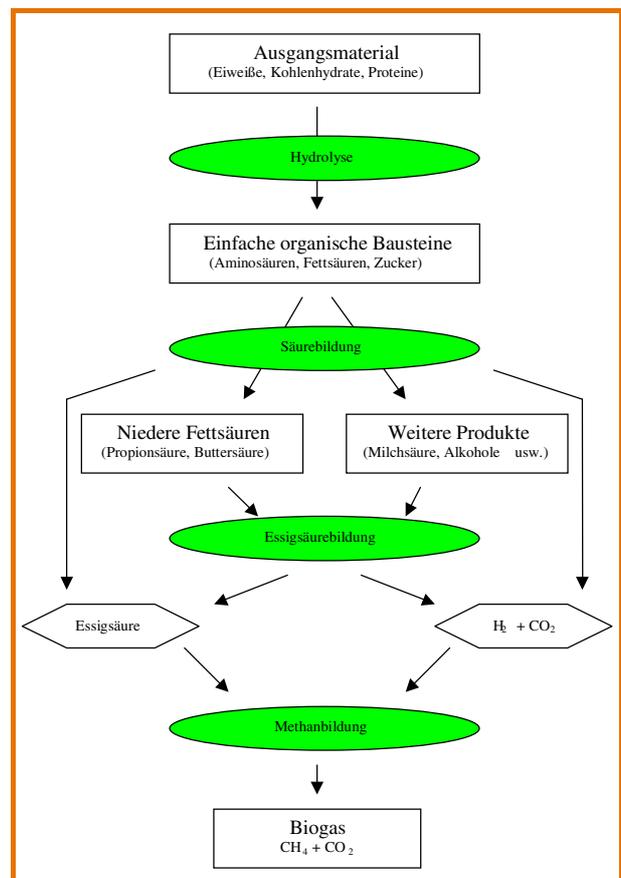


Abb. 2-1: Schematische Darstellung des anaeroben Abbaus

säurebildung schädlich ist, müssen die Essigsäurebildner mit den Bakterien der Methanogenese eine enge Lebensgemeinschaft bilden. Diese verbrauchen bei der Bildung von Methan den Wasserstoff und sorgen so für akzeptable Lebensbedingungen für die acetogenen Bakterien.

In der anschließenden „**Methanogenese**“, dem letzten Schritt der Biogasbildung, wird aus den Produkten der Acetogenese das Methan gebildet.

Laufen die vier Abbauschritte gemeinsam in einem Fermenter ab, spricht man von einstufigen Anlagen. Da die Bakterien der einzelnen Stufen aber

2 unterschiedliche Anforderungen an ihren Lebensraum stellen, muss hier ein Kompromiss gefunden werden. Da die Methanbakterien am empfindlichsten gegenüber Störungen sind und sich nur langsam vermehren, werden die Milieubedingungen in solchen Systemen normalerweise an sie angepasst. Hingegen werden in zweistufigen Anlagen die Hydrolyse und die Acidogenese von den nachfolgenden Abbaustufen räumlich getrennt. Dadurch können die Umgebungsbedingungen besser an die Bakteriengruppen angepasst werden und es lassen sich höhere Abbauleistungen erreichen.

2.2 Milieubedingungen

Bei der Beschreibung der Milieubedingungen muss zwischen Nassfermentation und Trockenfermentation unterschieden werden, da sich insbesondere im Hinblick auf den Wassergehalt Unterschiede zwischen den beiden Verfahren ergeben. Auf Grund der weiteren Verbreitung soll im Folgenden nur auf die Nassfermentation eingegangen werden.

2.2.1 Sauerstoff

Methanbakterien gehören zu den ältesten Lebewesen auf unserer Erde und entstanden vor etwa drei bis vier Milliarden Jahren, lange bevor sich die Atmosphäre, wie wir sie kennen, gebildet hatte. Aus diesem Grund sind diese Bakterien auch heute noch auf eine Lebensumgebung angewiesen, in der kein Sauerstoff vorkommt. Denn einige Arten werden schon durch geringe Sauerstoffmengen abgetötet. Oft lässt sich aber ein Sauerstoffeintrag in den Fermenter nicht vollkommen vermeiden. Der Grund, dass die Methanbakterien nicht sofort in ihrer Aktivität gehemmt werden oder sogar ganz absterben liegt darin, dass sie in Gemeinschaft mit Bakterien aus den vorhergehenden Abbauschritten leben /2-1/, /2-2/. Einige von ihnen sind sogenannte fakultativ anaerob lebende Bakterien, das heißt sie können sowohl unter Sauerstoffeinfluss als auch vollkommen ohne Sauerstoff überleben.

Solange der Sauerstoffeintrag nicht zu groß ist, können diese Bakterien den Sauerstoff verbrauchen, bevor er die Bakterien schädigt, die auf eine sauerstofffreie Umgebung zwingend angewiesen sind.

2.2.2 Temperatur

Man kann grundsätzlich sagen, dass chemische Reaktionen umso schneller ablaufen, je höher die Umge-

Eine strikte Unterteilung der Verfahren in Nass- und Trockenfermentation ist aus biologischer Sicht eigentlich irreführend, da die am Vergärungsprozess beteiligten Bakterien in jedem Fall ein flüssiges Medium für ihr Überleben benötigen.

Auch bei der Definition über den Trockenmassegehalt des zu vergärenden Substrates kommt es immer wieder zu Missverständnissen, da häufig mehrere Substrate mit unterschiedlichen Trockenmassegehalten eingesetzt werden. Hier muss dem Betreiber klar sein, dass nicht der Trockenmassegehalt der Einzelsubstrate maßgebend für die Einteilung des Verfahrens ist, sondern der Trockenmassegehalt des in den Fermenter eingebrachten Substratgemisches.

Deswegen erfolgt hier die Einteilung in Nass- oder Trockenfermentation über den Trockenmassegehalt des Fermenterinhalts.

Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die Bakterien in ihrer unmittelbaren Umgebung in beiden Fällen ausreichend Wasser benötigen.

Zwar gibt es keine genaue Definition der Grenze zwischen Nass- und Trockenfermentation, jedoch hat es sich in der Praxis eingebürgert, dass man bis zu einem Trockenmassegehalt im Fermenter von 12-15 % von Nassfermentation spricht, da der Fermenterinhalt bei diesem Wassergehalt noch pumpbar ist. Steigt der Trockenmassegehalt im Fermenter auf über 16 %, so ist das Material in der Regel nicht mehr pumpbar und man bezeichnet den Prozess als Trockenvergärung.

bungstemperatur ist. Dies lässt sich aber nur bedingt auf biologische Abbau- und Umsetzungsprozesse anwenden. Es muss hier bedacht werden, dass für die an den Stoffwechselprozessen beteiligten Bakteriengruppen unterschiedliche Temperaturoptima existieren /2-1/. Werden diese optimalen Temperaturbereiche unter- bzw. überschritten, kann dies zu einer Hemmung und im Extremfall zur unwiderruflichen Schädigung der beteiligten Bakterien führen. Für den Biogasprozess hat dies folgende Auswirkungen:

Die am Abbau beteiligten Bakterien lassen sich auf Grund ihrer Temperaturoptima in drei Gruppen einteilen. Es wird hier zwischen psychrophilen, mesophilen und thermophilen Bakterien unterschieden /2-1/.

- Psychrophile Bakterien haben ihr Optimum bei Temperaturen bis ca. 25 °C. Bei solchen Temperaturen entfällt das Aufheizen der Substrate bzw. des Fermenters, jedoch sind Abbauleistung und Gasproduktion stark vermindert.



- Der größte Teil der bekannten Methanbakterien hat sein Wachstumsoptimum im mesophilen Temperaturbereich zwischen 32 und 42 °C. Anlagen, die im mesophilen Bereich arbeiten, sind in der Praxis am weitesten verbreitet, da in diesem Temperaturbereich eine relativ hohe Gasausbeute sowie eine gute Prozessstabilität erreicht werden /2-5/.
- Sollen durch Hygienisierung (s. auch Kap. 4.3) des Substrates gesundheitsschädliche Keime abgetötet werden oder werden Substrate verwendet, die mit hoher Eigentemperatur anfallen (z. B. Prozesswasser), bieten sich thermophile Bakterienkulturen für die Vergärung an. Diese haben ihr Optimum im Temperaturbereich zwischen 50 und 57 °C. Es wird hier durch die hohe Prozesstemperatur eine höhere Gasausbeute erreicht. Jedoch ist zu bedenken, dass auch mehr Energie für das Aufheizen des Gärprozesses benötigt wird. Auch ist der Gärprozess in diesem Temperaturbereich empfindlicher gegenüber Störungen oder Unregelmäßigkeiten in der Substratzufuhr oder der Betriebsweise des Fermenters /2-4/.

Da die Bakterien bei ihrer „Arbeit“ nur geringe Mengen an Eigenwärme produzieren, die nicht für das Erreichen der nötigen Umgebungstemperatur ausreicht, muss bei mesophiler und thermophiler Betriebsweise des Fermenters dieser in jedem Fall isoliert und extern beheizt werden, damit die optimalen Temperaturbedingungen der Bakterien erreicht werden können.

2.2.3 pH-Wert

Für den pH-Wert gelten ähnliche Zusammenhänge wie für die Temperatur. Die Bakterien der einzelnen Prozessstufen haben unterschiedliche pH-Werte bei denen sie optimal wachsen können. So liegt das pH-Optimum der hydrolisierenden und säurebildenden Bakterien bei pH 4,5 bis 6,3 /2-6/. Sie sind aber nicht zwingend darauf angewiesen und können auch bei geringfügig höheren pH-Werten noch überleben, ihre Aktivität wird dadurch nur gering gehemmt. Dagegen benötigen die essigsäure- und methanbildenden Bakterien unbedingt einen pH-Wert im neutralen Bereich bei 6,8 bis 7,5 /2-2/. Findet der Gärprozess in nur einem Fermenter statt, muss demzufolge dieser pH-Bereich eingehalten werden.

Unabhängig davon, ob der Prozess ein- oder zweistufig ist, stellt sich der pH-Wert innerhalb des Systems meist automatisch durch die alkalischen und sauren Stoffwechselprodukte ein, die während des anaeroben Abbaus gebildet werden /2-1/. Wie empfindlich jedoch dieses Gleichgewicht ist, zeigt folgende Kettenreaktion.

Im Normalfall wird der pH-Wert durch das freigesetzte Kohlendioxid im neutralen Bereich gepuffert /2-1/. Sinkt der pH-Wert trotzdem ab, ist also die Pufferkapazität erschöpft, werden die Methanbakterien in ihrer Stoffwechselaktivität gehemmt. Da der methanogene Abbau nun aber nicht mehr schnell genug funktioniert, kommt es zu einer Anhäufung der Säuren aus der Acidogenese, was den pH-Wert noch weiter absinken lässt. Der Prozess versauert und die Methanbakterien stellen ihre Arbeit ganz ein. Wird ein solches Absinken des pH-Wertes bemerkt, muss die Substratzufuhr sofort gedrosselt oder gestoppt werden, um den Methanbakterien Zeit zu geben, die vorhandenen Säuren abzubauen.

2.2.4 Nährstoffversorgung

Die Prozesse im Fermenter lassen sich mit denen vergleichen, die im Verdauungstrakt von Wiederkäuern ablaufen. Deshalb reagieren die Bakterien genauso negativ wie die Tiere auf „Fütterungsfehler“. Zwar soll sich mit den verwendeten Substraten möglichst viel Methan produzieren lassen, jedoch sind Spurenelemente und Nährstoffe wie Eisen, Nickel, Kobalt, Selen, Molybdän und Wolfram für das Wachstum und Überleben der Bakterien gleichermaßen notwendig /2-2/. Wie viel Methan sich letztendlich aus den eingesetzten Substraten gewinnen lässt, wird durch die Anteile an Proteinen, Fetten und Kohlenhydraten bestimmt.

Weiterhin ist für den stabilen Prozessablauf ein ausgewogenes C/N-Verhältnis des eingesetzten Substrates wichtig. Ist dieses Verhältnis zu hoch (viel C und wenig N), kann der vorhandene Kohlenstoff nicht vollständig umgesetzt werden und es wird mögliches Methanpotenzial nicht genutzt. Im umgekehrten Fall kann es durch Stickstoffüberschuss zur Bildung von Ammoniak (NH₃) kommen, der schon in geringen Konzentrationen die Bakterien in ihrem Wachstum hemmt und sogar zum völligen Zusammenbruch der gesamten Bakterienpopulation führen kann /2-2/. Für einen ungestörten Prozessablauf muss das C/N-Verhältnis deswegen im Bereich 10-30 liegen. Um die Bakterien ausreichend mit Nährstoffen zu versorgen sollte das C:N:P:S-Verhältnis bei 600:15:5:1 liegen /2-7/.

2.2.5 Hemmstoffe

Ist die Gasproduktion bzw. der Prozessablauf gehemmt, kann dies unterschiedliche Gründe haben. Dies können zum Einen betriebstechnische Gründe



sein (vgl. Kapitel 2.4). Zum Anderen können Hemmstoffe den Prozessfortschritt verzögern. Dies sind Stoffe, die unter Umständen schon in geringen Mengen toxisch auf die Bakterien wirken und den Abbauprozess behindern. Will man diese Stoffe beschreiben, muss man zwischen Hemmstoffen unterscheiden, die durch die Substratzugabe in den Fermenter gelangen, und solchen, die als Zwischenprodukte aus den einzelnen Abbauschritten hervorgehen.

Bei der „Fütterung“ eines Fermenters muss man sich im Klaren sein, dass auch eine übermäßige Substratzugabe den Gärprozess hemmen kann, da sich grundsätzlich jeder Inhaltsstoff eines Substrates in zu hohen Konzentrationen schädlich auf die Bakterien auswirken kann. Dies gilt aber besonders für Substanzen wie Antibiotika, Desinfektions- oder Lösungsmittel, Herbizide, Salze oder Schwermetalle, die auch schon in geringen Mengen den Abbauprozess hemmen können. Aber auch essentielle Spurenelemente können in zu hohen Konzentrationen toxisch für die Bakterien sein. Da sich die Bakterien bis zu einem gewissen Maße auch an solche Stoffe anpassen können, ist die Konzentration, ab der ein Stoff die Bakterien schädigt, nur schwer zu bestimmen /2-1/, /2-2/. Auch existieren für einige Hemmstoffe Wechselwirkungen mit anderen Stoffen. So wirken Schwermetalle nur dann schädigend auf den Gärprozess, wenn sie in gelöster Form vorliegen. Sie werden aber durch Schwefelwasserstoff, der ebenfalls im Gärprozess gebildet wird, gebunden und ausgefällt /2-1/.

Auch während des Gärprozesses werden Stoffe gebildet, die den Prozess hemmen können. Insbesondere Ammoniak (NH₃) wirkt schon in geringen Konzentrationen schädigend auf die Bakterien. Dieser steht im Gleichgewicht mit der Ammoniumkonzentration (NH₄) des Fermenters (Ammoniak reagiert hierbei mit Wasser zu Ammonium und einem OH⁻-Ion und umgekehrt). Das bedeutet, dass sich bei einem zunehmend basischen pH-Wert, also bei zunehmender OH⁻-Ionen-Konzentration, das Gleichgewicht verschiebt und die Ammoniakkonzentration zunimmt. Während Ammonium den meisten Bakterien jedoch als N-Quelle dient, wirkt Ammoniak schon in geringen Konzentrationen (ab 0,15 g/l) hemmend auf die Mikroorganismen /2-2/. Darüber hinaus kann auch eine hohe Gesamtkonzentration an NH₃ und NH₄ ab ca. 3000 mg/l zu einer Hemmung des Biogasprozesses führen /2-6/.

Ein anderes Produkt des Gärprozesses ist Schwefelwasserstoff (H₂S), welcher in gelöster Form als Zellgift schon in Konzentrationen von ca. 50 mg/l den Abbauprozess hemmen kann. Schwefel ist allerdings

ebenfalls ein essentielles Spurenelement und damit ein wichtiger Mineralstoff der methanbildenden Bakterien. Außerdem werden Schwermetalle durch Sulfidionen (S²⁻) gebunden und ausgefällt /2-2/.

Eine mögliche Hemmwirkung verschiedener Stoffe hängt also von mehreren Faktoren ab und eine Festlegung auf feste Grenzwerte ist nur schwer durchzuführen. Eine Auflistung einiger Hemmstoffe ist in Tab. 2-1 abgebildet.

Tabellen 2-1: Hemmstoffe und deren schädigende Konzentrationen /2-1/

Hemmstoff:	Konzentration:
Natrium	zwischen 6-30 g/l (in adaptierten Kulturen bis zu 60 g/l)
Kalium	ab 3 g/l
Calcium	ab 2,8 g/l CaCl ₂
Magnesium	ab 2,4 g/l MgCl ₂
Ammonium	2,7-10 g/l
Ammoniak	ab 0,15 g/l
Schwefel	ab 50 mg/l H ₂ S, 100 mg/l S ²⁻ , 160 mg/l Na ₂ S (in adaptierten Kulturen bis zu 600 mg/l Na ₂ S und 1000 mg/l H ₂ S)
Schwermetalle	<u>Als freie Ionen:</u> ab 10mg/l Ni, ab 40 mg/l Cu, ab 130 mg/l Cr, ab 340 mg/l Pb, ab 400 mg/l Zn <u>In Carbonatform:</u> ab 160 mg/l Zn, ab 170 mg/l Cu, ab 180 mg/l Cd, ab 530 mg/l Cr ³⁺ , ab 1750 mg/l Fe Schwermetalle können durch Sulfid gefällt und neutralisiert werden
Verzweigte Fettsäuren	Iso-Buttersäure: schon ab 50 mg/l hemmend

2.3 Betriebsparameter

2.3.1 Raumbelastung und Verweilzeit des Fermenters

Beim Bau von Biogasanlagen stehen meistens ökonomische Überlegungen im Vordergrund. So wird auch bei der Wahl der Fermentergröße nicht unbedingt die maximale Gasausbeute bzw. der vollständige Abbau der im Substrat enthaltenen organischen Masse angestrebt. Würde man einen vollständigen Abbau der organischen Inhaltsstoffe realisieren wollen, müsste man mitunter mit sehr langen Aufenthaltszeiten des Substrates im Fermenter und damit auch entsprechenden Behältergrößen rechnen, da einige Stoffe – wenn überhaupt – erst nach längeren Zeiträumen abgebaut



werden. Es muss also angestrebt werden, bei vertretbarem wirtschaftlichem Aufwand ein Optimum an Abbauleistung zu erreichen.

In dieser Hinsicht ist die Raumbelastung ein wichtiger Betriebsparameter. Sie gibt an, wie viel Kilogramm organischer Trockensubstanz (oTS) dem Fermenter je m^3 Volumen und Zeiteinheit zugeführt werden kann /2-1/.

$$B_R = \frac{\dot{m} \times c}{V_R}$$

*Gleichung 2-1: Raumbelastung B_R
(\dot{m} = zugeführte Substratmenge
je Zeiteinheit [kg/d]; c = Konzentration
der organischen Substanz [%];
 V_R = Reaktorvolumen [l])*

Ein weiterer Parameter bei der Dimensionierung der Behältergröße ist die hydraulische Verweilzeit. Dies ist die Zeitdauer, die ein zugeführtes Substrat im Mittel bis zu seinem Austrag im Fermenter verbleibt /2-1/. Zur Berechnung setzt man das Reaktorvolumen (V_R) ins Verhältnis zur zugeführten Substratmenge (\dot{V}), es ergibt sich die hydraulische Verweilzeit (HRT; hydraulic retention time) des Fermenters /2-2/.

$$HRT = \frac{V_R}{\dot{V}}$$

Gleichung 2-2: Hydraulische Verweilzeit

Zwischen diesen beiden Parametern besteht ein enger Zusammenhang, da mit steigender Raumbelastung mehr Substrat dem Fermenter zugeführt wird und somit die Verweilzeit zurück geht. Um den Gärprozess aufrecht halten zu können, muss die hydraulische Verweilzeit so gewählt werden, dass durch den ständigen Austausch des Reaktorinhalts nicht mehr Bakterien ausgespült werden als in dieser Zeit nachwachsen können (z. B. liegt die Verdopplungsrate einiger anaerober Bakterien bei 10 Tagen und länger) /2-1/. Außerdem muss man bedenken, dass bei geringer Verweilzeit den Bakterien nur wenig Zeit bleibt, das Substrat abzubauen und so zwar ein guter Substratdurchsatz, aber nur eine unzureichende Gasausbeute erzielt wird. Es ist also in gleichem Maße wichtig, die Verweilzeit an die spezifische Abbaugeschwindigkeit der verwendeten Substrate anzupassen. Bei bekannter täglicher Zugabemenge kann in

Verbindung mit der Abbaubarkeit des Substrates und der angestrebten Verweilzeit das benötigte Reaktorvolumen errechnet werden.

2.3.2 Durchmischung

Um eine hohe Biogasproduktion zu erreichen, ist ein intensiver Kontakt von Bakterien und Substrat erforderlich, welcher im Allgemeinen durch Durchmischen des Gärbehälters erreicht wird /2-1/.

In einem nicht-durchmischten Gärbehälter lässt sich nach einiger Zeit eine Entmischung des Inhaltes mit gleichzeitiger Schichtenbildung beobachten, was auf die Dichteunterschiede der einzelnen Inhaltsstoffe der eingesetzten Substrate zurückzuführen ist. Dabei findet sich der Großteil der Bakterienmasse, bedingt durch die hohe Dichte, im unteren Teil wieder, während sich das abzubauen Substrat häufig in der oberen Schicht ansammelt. In einem solchen Fall ist der Kontaktbereich auf den Grenzbereich dieser beiden Schichten beschränkt und es findet nur wenig Abbau statt. Zudem bildet sich aus aufschwimmenden Stoffen eine Schwimmschicht, welche den Gasaustritt erschwert /2-8/.

Es ist also wichtig, den Kontakt von Bakterien und Substrat durch Mischen des Gärbehälters zu fördern. Dennoch sollte ein zu starkes Durchmischen vermieden werden. Vor allem die Essigsäure-bildenden Bakterien (aktiv in der Acetogenese) und die Bakterien der Methanogenese bilden eine enge Lebensgemeinschaft, die für einen ungestörten Biogasbildungsprozess von großer Wichtigkeit ist. Wird diese Lebensgemeinschaft durch zu große Scherkräfte infolge intensiven Rührens zerstört, kann es im schlimmsten Fall zu einem völligen Erliegen des gesamten Prozesses kommen.

Es gilt also einen Kompromiss zu finden, der beiden Bedingungen hinreichend gerecht wird. In der Praxis wird dies zum Einen durch langsam rotierende Rührwerke erreicht, die nur sehr geringe Scherkräfte bewirken, und zum Anderen dadurch, dass der Reaktorinhalt in Intervallen (d. h. nur für eine kurze, vorher definierte Zeitspanne) durchmischt wird.

2.3.3 Gasbildungspotenzial und methanogene Aktivität

2.3.3.1 Mögliche Gasausbeute

Wie viel Biogas in einer Biogasanlage produziert wird, hängt im Wesentlichen von der Zusammensetzung der eingesetzten Substrate ab.



In der Praxis ist eine entsprechende Berechnung des Biogasertrages kaum durchzuführen, da in der Regel die Konzentrationen der Einzelnährstoffe insbesondere bei Substratgemischen nicht bekannt sind. Zudem wird bei einer solchen Berechnung von einem hundertprozentigen Abbau der organischen Substanz ausgegangen, der in der Praxis nicht erreicht wird.

Da zwischen den Abbauvorgängen in einer Biogasanlage und den Verdauungsvorgängen bei Wiederkäuern Parallelen bestehen, kann anhand der Inhaltsstoffe sowie deren Verdaulichkeiten der theoretisch erreichbare Biogasertrag errechnet werden /2-9/. Die hierfür benötigten Kennzahlen können den DLG-Futterwerttabellen entnommen werden, in der die Gehalte an Asche (RA), Rohfaser (RF), Fett (RL), Eiweiß (RP) und N-freien Extraktstoffen (NfE) bezogen auf die Trockensubstanz (TS) aus der WEENDER FUTTERMITTEL-ANALYSE sowie deren Verdaulichkeiten (VQ) zusammengefasst werden. Die Anteile an RF und NfE ergeben zusammen den Gehalt an Kohlenhydraten.

Den einzelnen Stoffgruppen lassen sich spezifische Gaserträge sowie Methangehalte zuordnen, die sich aus den unterschiedlichen relativen Kohlenstoff-Anteilen ergeben (Tabelle 2-2) /2-7/:

Tabelle 2-2: Spezifischer Biogasertrag und Methangehalt

	Biogasertrag [l/kg oTS]	Methangehalt [Vol.-%]
Verdauliches Eiweiß (RP)	600-700	70-75
Verdauliches Fett (RL)	1.000-1.250	68-73
Verdauliche Kohlenhydrate (RF + NfE)	700-800	50-55

Aus diesen Vorgaben lassen sich nun die organische Trockensubstanz sowie die jeweilige Masse der verdaulichen Stoffgruppen je kg Trockensubstanz errechnen /2-9/:

- oTS-Gehalt: $(1000 - \text{Rohasche}) / 10$ [% TS]
- Verdauliches Eiweiß: $(\text{Rohprotein} \cdot VQ_{RP}) / 1000$ [kg/kg TS]
- Verdauliches Fett: $(\text{Rohfett} \cdot VQ_{RL}) / 1000$ [kg/kg TS]
- Verdauliche Kohlenhydrate: $((\text{Rohfaser} \cdot VQ_{RF}) + (\text{NfE} \cdot VQ_{NfE})) / 1000$ [kg/kg TS]

Wie schon am Anfang dieses Kapitels beschrieben, bestehen zwar durchaus Parallelen zwischen den Vorgängen im Pansen der Wiederkäuer und den Abbauvorgängen in einer Biogasanlage, jedoch sind beide Vorgänge nur bedingt vergleichbar, da es in beiden „Systemen“ zu unterschiedlichen Synergieeffekten kommen kann, die die Biogasproduktion beeinflussen.

Deswegen kann die eben vorgestellte Berechnungsmethode die tatsächliche Gas- bzw. Methan- ausbeute nur grob wiedergeben und darf deshalb **nicht** für betriebliche oder ökonomische Kalkulationen herangezogen werden!

Jedoch lässt die vorgestellte Methode eine tendenzielle Abschätzung der Biogausausbeute und einen Vergleich zwischen verschiedenen Substraten zu.

Die weitere Berechnung soll am Beispiel **Silomais** (Beginn Teigreife, körnerreich) verdeutlicht werden (Tabelle 2-3).

Tabelle 2-3: Silomais, Beginn Teigreife, körnerreich (Bsp.)

TS [%]	Rohasche (RA) [g/kg TS]	Rohprotein (RP) [g/kg TS]	VQ _{RP} [%]	Rohfett (RL) [g/kg TS]	VQ _{RL} [%]	Rohfaser (RF) [g/kg TS]	VQ _{RF} [%]	NfE [g/kg TS]	VQ _{NfE} [%]
29	53	92	57	42	82	185	63	628	78

Daraus errechnet sich:

oTS-Gehalt:

$$(1000 - 53) / 10 = 94,7 \% \text{ (TS)}$$

Verdauliches Eiweiß:

$$(92 \cdot 57\%) / 1000 = 0,0524 \text{ kg/kg TS}$$

Verdauliches Fett:

$$(42 \cdot 87\%) / 1000 = 0,03654 \text{ kg/kg TS}$$

Verdauliche Kohlenhydrate:

$$((185 \cdot 63\%) + (628 \cdot 78\%)) / 1000 = 0,606 \text{ kg/kg TS}$$

Die Massen der Stoffgruppen je kg oTS errechnen sich daraus wie folgt:

Verdauliches Eiweiß:

$$0,0524 \text{ kg/kg TS} \cdot 94,7 \% \text{ oTS} = 0,0496 \text{ kg oTS}$$

Verdauliches Fett:

$$0,0365 \text{ kg/kg TS} \cdot 94,7 \% \text{ oTS} = 0,0346 \text{ kg oTS}$$

Verdauliche Kohlenhydrate:

$$0,606 \text{ kg/kg TS} \cdot 94,7 \% \text{ oTS} = 0,574 \text{ kg oTS}$$

Die Ergebnisse werden nun mit den Werten aus Tabelle 2-2 multipliziert und man erhält die in Tabelle 2-4 dargestellten Biogas- und Methan- ausbeuten.



Tabelle 2-4: Biogasausbeute und Methanausbeute von Silomais (Mittelwerte)

	Biogas [l/kg oTS]	Methan [l/kg oTS]
Verdauliches Eiweiß (RP)	34,72	25,2
Verdauliches Fett (RL)	43,25	30,5
Verdauliche Kohlenhydrate (RF + NfE)	453,46	238,1
Summe (je kg oTS)	513,43	293,8

Je kg Frischmasse ergeben sich daraus 145,9 Liter Biogas mit einem Methangehalt von ca. 57 %. Wie am Beispiel zu sehen, lässt sich auf relativ einfache Weise die zu erwartende Biogasausbeute sowie der Methangehalt im Biogas für beliebige Substrate errechnen.

Allerdings beeinflussen noch weitere Faktoren, wie die Verweilzeit der Substrate im Fermenter, der Trockensubstanzgehalt, evtl. vorhandene Hemmstoffe und die Gärtemperatur den erreichbaren Biogasertrag. So ergibt sich durch Steigerung der Verweilzeit eine bessere Abbauleistung und damit auch eine höhere Gasproduktion. Mit fortschreitender Verweilzeit wird mehr und mehr Methan freigesetzt, was dann den Heizwert des Gasgemisches steigert.

Durch eine Steigerung der Temperatur wird auch die Geschwindigkeit der Abbauvorgänge gesteigert. Dies ist allerdings nur in bestimmtem Maße möglich, da nach Überschreiten der Maximaltemperatur die Bakterien geschädigt werden können und der umgekehrte Effekt erreicht wird. Zusätzlich zur gesteigerten Gasproduktion wird allerdings auch mehr Kohlendioxid aus der flüssigen Phase freigesetzt, was wiederum zu einem schlechteren Heizwert des Gasgemisches führt.

Der Gehalt an Trockensubstanz im Fermenter (TS-Gehalt) kann die Gasausbeute in zweierlei Hinsicht beeinflussen. Zum Einen können sich die Bakterien bei hohen TS-Gehalten nur schlecht bewegen und so nur das Substrat in ihrem unmittelbarem Umfeld abbauen. Bei sehr hohen Trockensubstanzgehalten von 40 % und mehr kann die Gärung sogar ganz zum Erliegen kommen, da hier nicht mehr genügend Feuchtigkeit für ein Bakterienwachstum vorhanden ist. Zum Anderen kann es infolge der hohen Trockensubstanzgehalte zu Problemen mit Hemmstoffen kommen, da diese durch den niedrigen Wassergehalt in konzentrierter Form vorliegen können. Auch eine Vorbehandlung der eingesetzten Substrate (Zerkleinern, Homogenisieren etc.) kann die Ausbeute steigern, da das Substrat den Bakterien so besser zur Verfügung steht /2-4/.

2.3.3.2 Gasqualität

Biogas ist ein Gasgemisch, welches zu ca. einem Drittel aus Kohlendioxid (CO₂) und zu zwei Dritteln aus Methan (CH₄) sowie Wasserdampf und diversen Spurengasen besteht.

Interessant für den Betreiber einer Biogasanlage ist jedoch in erster Linie der Methangehalt, also der prozentuale Anteil des Methans am Gasgemisch, da hieraus die zu gewinnende Energie resultiert. Zwar kann die Zusammensetzung des Biogases nur begrenzt beeinflusst werden. Jedoch hängt der Gehalt von Methan im Biogas von mehreren Faktoren wie Wassergehalt des Substrates, Gärtemperatur, Verweilzeit sowie Substrataufbereitung und dem Grad des Substratsaufschlusses ab /2-1/.

Die erzielbare Ausbeute an Methan ist dabei im wesentlichen durch die Zusammensetzung des eingesetzten Substrates, also durch die Anteile an Fetten, Proteinen und Kohlenhydraten bestimmt /2-10/. Hierbei nehmen die spezifischen Methanausbeuten der eben genannten Stoffgruppen in der genannten Reihenfolge ab. Bezogen auf die Masse lässt sich mit Fetten eine höhere Methanausbeute erreichen als mit Kohlenhydraten.

Im Hinblick auf die Reinheit des Gasgemisches ist die Konzentration des Spurengases Schwefelwasserstoff (H₂S) wichtig. Sie sollte zum Einen nicht zu hoch sein, da Schwefelwasserstoff schon in geringen Konzentrationen hemmend auf den Abbauprozess wirkt. Zum Anderen führen hohe H₂S-Konzentrationen im Biogas zu Korrosionsschäden an Blockheizkraftwerken und Heizkesseln /2-1/.

Ein Überblick über die durchschnittliche Zusammensetzung des Biogases gibt Tabelle 2-5.

Tabelle 2-5: Durchschnittliche Zusammensetzung von Biogas (nach /2-1/)

Bestandteil	Konzentration
Methan (CH ₄)	50-75 Vol.-%
Kohlendioxid (CO ₂)	25-45 Vol.-%
Wasser (H ₂ O)	2-7 Vol.-% (20-40 °C)
Schwefelwasserstoff (H ₂ S)	20-20000 ppm
Stickstoff (N ₂)	< 2 Vol.-%
Sauerstoff (O ₂)	< 2 Vol.-%
Wasserstoff (H ₂)	< 1 Vol.-%

2.4 Ursachen für Prozessstörungen

2.4.1 Temperatur

Im praktischen Betrieb von Biogasanlagen gibt es viele Ursachen, warum es zu einem Abfall der Prozesstemperatur kommen kann. Der Heizung des Fermenters kommt gerade bei den gemäßigten Temperaturen in Deutschland eine zentrale Bedeutung zu und bei einem Ausfall kann die Gärtemperatur relativ schnell um mehrere Grad abfallen. Dabei muss nicht unbedingt die Heizung an sich defekt sein, was das folgende Szenario zeigt.

Durch Ausfall des BHKW fehlt nach einiger Zeit die nötige Abwärme für die Fermenterheizung. Der Temperaturabfall hemmt die Aktivität der Methanbakterien, da sie nur in einem engen Temperaturfenster überleben /2-3/. Die Bakterien der Hydrolyse und Acidogenese sind in dieser Hinsicht weniger spezialisiert und können auch bei einem Temperaturabfall zunächst überleben. Dadurch kommt es aber zu einer Anreicherung der Säuren im Fermenter, vor allem wenn die Substratzufuhr nicht rechtzeitig gedrosselt oder ausgesetzt wird.

In einem solchen Fall kommt zu der schon vorhandenen Temperaturhemmung auch noch ein Abfall des

pH-Wertes mit einer Versäuerung des gesamten Prozesses. Aber auch die Zugabe großer Mengen nicht vorgewärmten Substrates oder eine ungenügende Beheizung des Fermenters z.B. durch Ausfall der Temperatursensoren können einen Abfall der Fermentertemperatur zur Folge haben. Deswegen ist eine regelmäßige Kontrolle der Gärtemperatur von großer Wichtigkeit für einen erfolgreichen Anlagenbetrieb.

2.4.2 Ammoniakbildung (NH_3)

Wie schon in Kapitel 2.2.5 erläutert wurde, steht die Bildung von Ammoniak in enger Beziehung zu dem vorherrschenden pH-Wert in der Lösung. Das Gleichgewicht zwischen Ammonium (NH_4) und Ammoniak (NH_3) wird dabei mit steigendem pH-Wert zugunsten des Ammoniak verschoben /2-11/. Darüber hinaus nimmt die Hemmwirkung des Ammoniaks mit steigender Temperatur zu, was sich insbesondere auf thermophil betriebene Biogasanlagen auswirkt (vgl. Abb. 2-2).

Aber auch die Wahl der Substrate wirkt sich auf die Ammoniakbildung aus, vor allem durch Vergärung von Substraten mit hohem Eiweißgehalt wird vermehrt Ammoniumstickstoff freigesetzt /2-7/.

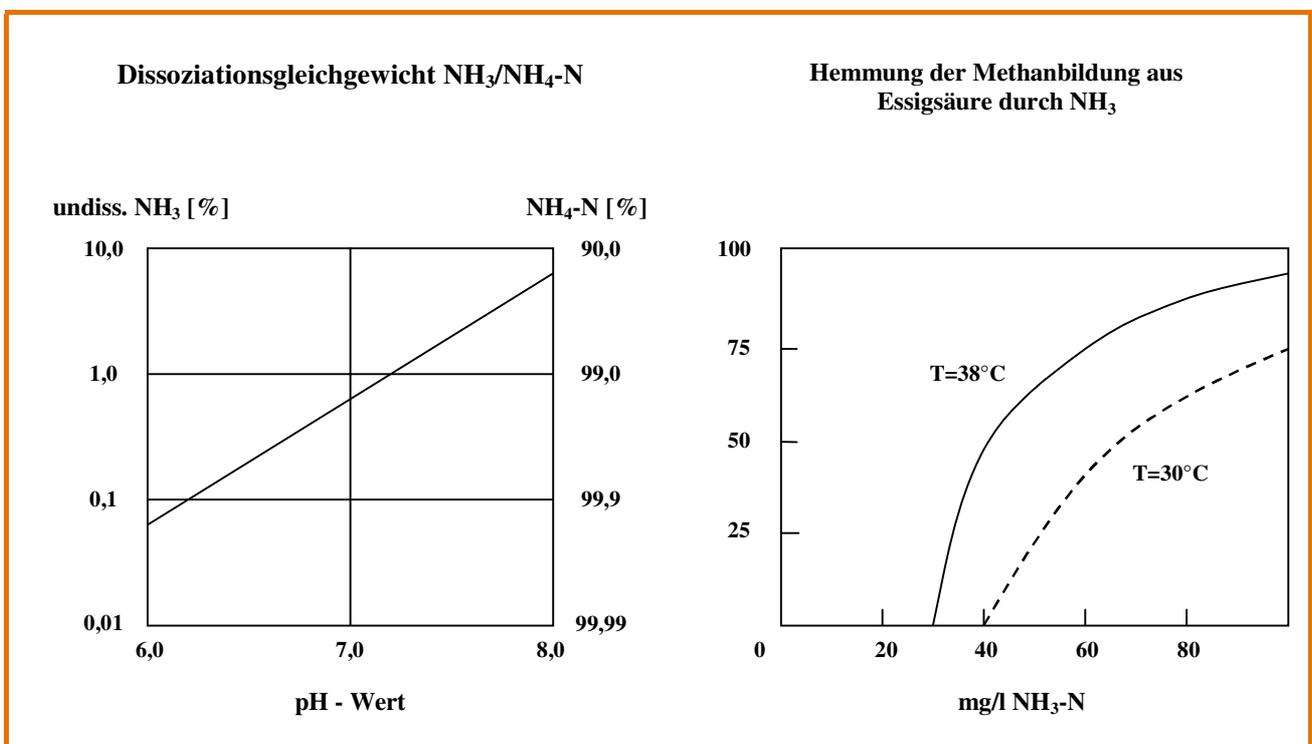


Abb. 2-2: Hemmung der Methanbildung aus Essigsäure durch NH_3 (nach /2-11/)



2.4.3 Schwefelwasserstoff (H₂S)

Für die Bildung von Schwefelwasserstoff gelten ähnliche Zusammenhänge wie für die Ammoniakbildung. Schwefel liegt hier entweder in undissoziierter Form (HS⁻, S²⁻) in der Flüssigphase oder als Schwefelwasserstoff (H₂S) im Gasmisch und in der Flüssigkeit vor (siehe Abb. 2-3) /2-11/.

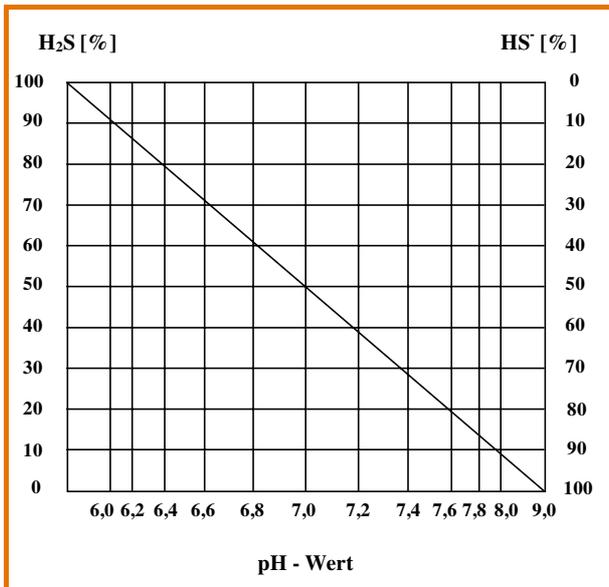


Abb. 2-3: Anteil von HS⁻ und H₂S in Abhängigkeit vom pH-Wert (nach /2-11/)

Wie hoch der Anteil an gelöstem H₂S in der Flüssigphase ist, hängt von der H₂S-Konzentration in der Flüssigphase sowie vom Partialdruck des Schwefelwasserstoffs in der Gasphase ab (Henrysches Gesetz). Darüber hinaus wird dieses Gleichgewicht aber noch durch andere Faktoren beeinflusst. Mit steigender Temperatur nimmt der Anteil an gelöstem H₂S in der Flüssigphase ab, jedoch steigt mit der Gasproduktion auch der Partialdruck in der Gasphase und damit der Anteil an gelöstem H₂S /2-7/, /2-11/. Wie aus Abb. 2-3 zu ersehen ist, besteht zudem ein Zusammenhang mit dem vorherrschenden pH-Wert. Die Konzentration an gelöstem H₂S im Reaktor nimmt mit sinkendem pH-Wert zu.

2.4.4 Fehler bei der Substratzugabe

Oft kommt es bei neu gebauten Anlagen schon gleich in der Anfangsphase zu Problemen wie zu geringer Gasausbeute oder zu hohen Säurekonzentrationen, was im schlimmsten Fall den kompletten Austausch des Reaktorinhalts und ein erneutes Anfahren des Fermentationsprozesses nach sich ziehen kann.

Animpfen des Fermenters

Gerade beim Animpfen eines Fermenters müssen einige Grundsätze beachtet werden, um später einen stabilen Prozess mit guter Gasausbeute zu erreichen. Das Animpfen geschieht bei den meisten Biogasanlagen mit vergorener Rindergülle, da in diesem Substrat schon eine genügende Konzentration der benötigten Bakterien vorhanden ist. Allerdings ist deren Aktivität durch das niedrige Nahrungsangebot nur gering und muss erst auf die maximale Abbauleistung gebracht werden /2-2/.

Wichtig während dieser sogenannten Anfahrphase ist, dass das zugegebene Substrat in seiner Zusammensetzung möglichst konstant bleibt, damit sich die Bakterien stabil entwickeln können. Starke Schwankungen in der Substratzusammensetzung bzw. ständig wechselnde Substrate bedeuten für die Bakterien auch ständig wechselnde Lebensbedingungen, an die sie sich in einem solchen Fall immer neu anpassen müssen. Und da sich die Bakterien substratspezifisch entwickeln, kann es so zu keinem stabilen Abbau kommen.

Gerade am Beginn der Anfahrphase ist es wichtig, dass die Menge an Substrat, also die Raumbelastung, nur langsam und in kleinen Schritten erhöht wird, um insbesondere den Methanbakterien genügend Zeit für ihr Wachstum zu geben /2-2/. Wird zu viel Substrat zugegeben, können auf Grund der nur langsam wachsenden Methanbakterien die in den vorhergehenden Abbaustufen gebildeten Zwischenprodukte nicht schnell genug abgebaut werden und es kommt zu einer Versäuerung des gesamten Prozesses.

Kontinuierlicher Betrieb

Direkt an die Anfahrphase schließt sich der „reguläre“ Betrieb des Fermenters an (Abb. 2-4). Durch langsames Steigern der Substratzufuhr wurde innerhalb der Anfahrphase die maximale Wachstumsrate der Bakterien erreicht.

Die Verweilzeit gibt die Aufenthaltsdauer des zugegebenen Substrates bis zu seinem Austausch gegen neues Substrat wieder und ist damit auch ein indirektes Maß für die Belastung des Fermenters mit organischem Material, da den Bakterien mit kürzer werdender Verweilzeit weniger Zeit für den Abbau des Materials bleibt.

Abb. 2-4 zeigt, dass bei geringer Belastung (und damit hoher Verweilzeit) des Fermenters auch eine hohe Biogausausbeute je kg zugegebenem Substrat erreicht wird. Die abgebildete Gasbildungsrate als Maß der Produktivität ist bei dieser Betriebsweise niedrig.

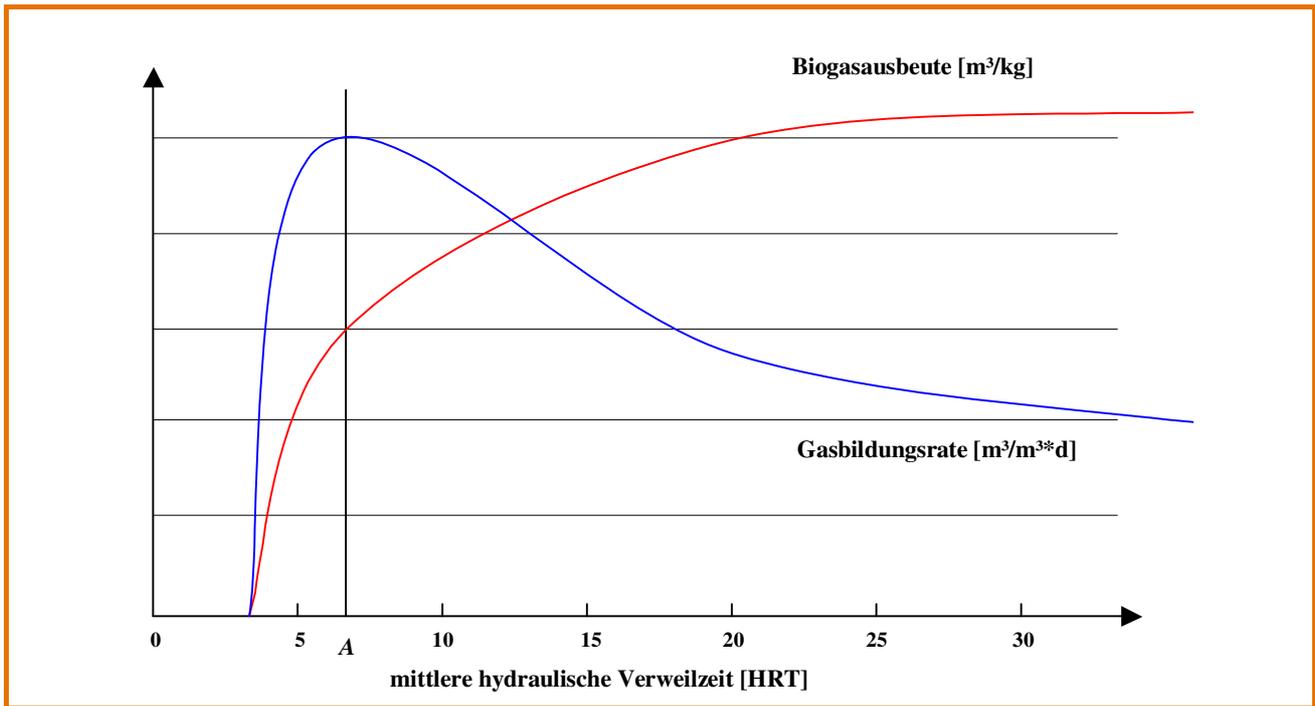


Abb. 2-4: Biogasausbeute und Gasbildungsrate in Abhängigkeit von der Verweilzeit (nach/2-12/)

Mit steigender Substratzufuhr bzw. kürzer werdender Verweilzeit nimmt allerdings die Produktivität der Bakterien zu, jedoch geht auf Grund der zunehmenden Belastung sowie der kürzeren Verweilzeit die Biogasausbeute leicht zurück. Die Gasbildungsrate steigt mit zunehmender Belastung des Fermenters zunächst auf ein Maximum (Punkt A) an. Auf Grund der steigenden Substratzugabe je Zeiteinheit kann das Material nicht mehr vollständig von den Bakterien abgebaut werden, weswegen die Gasbildungsrate zurückgeht.

Wird die Verweilzeit weiter verkürzt, kommt es sehr schnell zu einem Zusammenbruch der Gasproduktion, da in einem solchen Fall durch den schnellen Substrataustausch mehr Bakterienmasse mitausgespült wird als neu gebildet werden kann.

Es muss also auch beim Regelbetrieb des Fermenters darauf geachtet werden, dass die Substratzufuhr nur langsam gesteigert wird und dass die maximale Zufuhrmenge nicht überschritten wird. Auch plötzliche Veränderungen in der Substratzusammensetzung wirken sich negativ auf die Gasproduktion aus und sollten deshalb vermieden werden. Sollen neue Substrate verwendet werden, sollte die Änderung nur behutsam erfolgen, um den Bakterien ein Anpassung an die neuen Lebensbedingungen zu ermöglichen.

In der Praxis wird die maximale Produktion jedoch nicht erreicht und man bewegt sich im Bereich rechts neben Punkt A, da hier der Prozess weniger

anfällig für Schwankungen in der zugegebenen Substratmenge oder der Substratzusammensetzung ist. Je näher man sich Punkt A nähert, um so instabiler wird der Abbauprozess hinsichtlich Schwankungen und Unregelmäßigkeiten in der Betriebsführung. Hier können schon kleine Fehler zum völligen Zusammenbruch des Abbauprozesses führen. Es muss daher ein Kompromiss zwischen der Stabilität des Gärprozesses und der Gasproduktion gefunden werden.

Einfluss der Substrate auf den Gärprozess

Die Qualität des Substrates beeinflusst die Menge und die Qualität des erzeugten Biogases, weshalb gegebenenfalls eine Vorbehandlung des Substrates durchgeführt werden muss. Grundsätzlich muss darauf geachtet werden, dass die Substrate eine gute Qualität aufweisen. Beispielsweise kann der Einsatz von Futterresten oder Substraten, die stark verschimmelt oder verdorben sind, zu einem Einbruch der Gasproduktion und starker Schaumbildung führen. Die Einhaltung der Grundregel, nur die Substrate in die Biogasanlage einzubringen, die auch gut für die Viehfütterung geeignet sind, kann hier mögliche Probleme vermeiden helfen.

Durch eine vorhergehende Behandlung der eingesetzten Substrate wird die Verfügbarkeit des Materials für den biologischen Abbau und damit auch die erzielbare Gasausbeute beeinflusst. Aber auch für den störungsfreien Betrieb der Biogasanlage kann eine

Aufbereitung nötig sein. So müssen z. B. unerwünschte Fremdstoffe (Steine, Metallstücke, Plastik etc.) und nicht abbaubare Stoffe (Sand, Holz etc.) vorher entfernt werden.

Insbesondere Substrate wie Stroh oder Ernterückstände sollten vorher zerkleinert werden, da durch das Zerkleinern die Oberfläche des Substrates und damit auch die Angriffsfläche für die Bakterien vergrößert und der Abbau beschleunigt wird bzw. ein Abbau überhaupt ermöglicht wird. Ansonsten kann es bei einigen Substraten passieren, dass auf Grund der angestrebten kurzen Verweilzeiten das Substrat nur zum Teil abgebaut wird und so Biogaspotenzial teilweise ungenutzt bleibt.

Auch der pH-Wert der Substrate hat Einfluss auf den gesamten Prozess. Das ist darauf zurückzuführen, dass innerhalb des Prozesses ein empfindliches pH-Gleichgewicht besteht, welches nur bis zu einem gewissen Punkt Schwankungen ausgleichen kann.

Werden große Mengen Substrat mit niedrigem pH-Wert (z. B. saure Abwässer oder auch Silagen) in den Fermenter gegeben, kann dies zu einer Hemmung des Abbauprozesses führen. Hier muss dann vor der Einspeisung in den Fermenter eine pH-Wert Regulierung durch z. B. Laugen vorgenommen werden. Auch kann es durch starke pH-Wert-Unterschiede zwischen Fermenterinhalt und Substrat zu starker Schaumbildung kommen, da dann in der flüssigen Phase gelöstes CO₂ freigesetzt wird und auströmt.

Aber auch durch die Wahl der Substrate bzw. der Substratzusammensetzung kann es zu Störungen des Gärprozesses kommen. Da Gasausbeute und -qualität im Wesentlichen durch die Anteile an Fetten, Proteinen und Kohlenhydraten im verwendeten Substrat bestimmt werden, läge es nahe, möglichst Substrate zu verwenden, die besonders hohe Konzentrationen dieser Stoffgruppen enthalten. Dies kann in einigen Fällen oder auch über einen gewissen Zeitraum durchaus funktionieren. Da aber die Bakterien für ihr Überleben neben diesen Komponenten auch andere Nährstoffe sowie Spurenelemente benötigen, kann es durch die Unterversorgung der Bakterien zu einer völligen Verarmung des Prozesses kommen und der erwünschte Erfolg bleibt aus. Es muss also auch hier ein Kompromiss zwischen einer hohen Gasproduktion und guter Nährstoffversorgung gefunden werden.

2.5 Literaturverzeichnis

- /2-1/ Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.: Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren; Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2001
- /2-2/ Braun, R.: Biogas – Methangärung organischer Abfallstoffe; Springer Verlag Wien, New York, 1982
- /2-3/ Kloss, R.: Planung von Biogasanlagen; Oldenbourg Verlag München, Wien, 1986
- /2-4/ Schattner, S.; Gronauer, A.: „Methangärung verschiedener Substrate – Kenntnisstand und offene Fragen“, Gülzower Fachgespräche, Band 15: Energetische Nutzung von Biogas: „Stand der Technik und Optimierungspotenzial“, S. 28-38, Weimar 2000
- /2-5/ Weiland, P., „Stand und Perspektiven der Biogasnutzung und –erzeugung in Deutschland“, Gülzower Fachgespräche, Band 15: Energetische Nutzung von Biogas: „Stand der Technik und Optimierungspotenzial“, S. 8-27, Weimar 2000
- /2-6/ Wellinger, A.; Baserga, U.; Edelmann, W.; Egger, K.; Seiler, B., Biogas-Handbuch, Grundlagen – Planung – Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen, Verlag Wurz – Aarau, 1991
- /2-7/ Weiland, P.: Grundlagen der Methangärung – Biologie und Substrate; VDI-Berichte, Nr. 1620 „Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven“; S. 19-32; VDI-Verlag 2001
- /2-8/ Maurer, M.; Winkler, J-P., Biogas – Theoretische Grundlagen, Bau und Betrieb von Anlagen, Verlag C.F.Müller, Karlsruhe, 1980
- /2-9/ Biogasanlagen zur Vergärung nachwachsender Rohstoffe; Tagungsband; Barnstorfer Biogastagung 2000; Ländliche Erwachsenenbildung Niedersachsen (LEB)
- /2-10/ Merkblatt ATV-DVWK-M 363 „Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogasen“, ATV-DVWK, 2002
- /2-11/ Kroiss, H.: Anaerobe Abwasserreinigung; Wiener Mitteilungen Bd. 62; Technische Universität Wien, 1985
- /2-12/ Biogas in der Landwirtschaft – Leitfaden für Landwirte und Investoren im Land Brandenburg; Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg; Potsdam 2001

