Friedrich Weißbach, Elmenhorst

Ausnutzungsgrad von Nawaros bei der Biogasgewinnung

Für die Bewertung des Gasbildungspotenzials der Substrate wurde der Parameter „Gehalt an fermentierbarer organischer Trockensubstanz" (FoTS) vorgeschlagen. Dieser Parameter ermöglicht es auch, die Effizienz des Fermentationsprozesses zu bewerten, indem der Ausnutzungsgrad der FoTS bei der Biogaserzeugung gemessen wird.

Schlüsselwörter
Biogas, Biogasausbeute, nachwachsende Rohstoffe, Gasbildungspotenzial, fermentierbare organische Substanz, Abbaugrad, Biogasfermenter

Keywords
Biogas, biogas yield, renewable primary products, biogas forming potential, fermentable organic matter, degree of degradation, biogas fermenter

Abstract
Weißbach, Friedrich

Degree of utilization of renewable primary products in biogas production

Landtechnik 64 (2009), no. 1, pp. 18 - 21, 2 figures, 3 tables, 6 references

For the prediction of gas forming potential, the parameter „content of fermentable organic matter" (FOM) was proposed. The use of this parameter also enables the evaluation of the efficiency of the fermentation process by measuring the degree of utilization of FOM.

Bei der Biogasgewinnung wird unter dem Abbaugrad „die auf den Ausgangsgehalt der Substrate bezogene Verminderung der Konzentration an organischer Substanz durch anaeroben Abbau" verstanden [3]. Gegenstand der Bilanzierung sind üblicherweise entweder die organische Trockensubstanz (oTS) oder der chemische Sauerstoffbedarf (CSB). Derartige Bilanzen liefern als Ergebnis stets nur einen partiellen Abbau, da die Bezugsgröße (oTS oder CSB) auch den biologisch nicht abbaubaren Anteil einschließt. Sie lassen keine Aussagen darüber zu, in welchem Umfang der Abbaugrad durch nicht abbaubare Anteile der oTS oder durch ungenügende Effizienz des Fermentationsprozesses begrenzt worden ist. Durch Bilanzierung der „fermentierbaren organischen Trockensubstanz" (FoTS) erscheint es dagegen möglich, den Ausnutzungsgrad des tatsächlichen Gasbildungspotenzials der Substrate zu bestimmen. Ziel der vorliegenden Studie war es, diesen Ausnutzungsgrad unter Praxisbedingungen zu messen. Außerdem sollte überprüft werden, ob sich die bisher unterstellte Gasausbeute aus nachwachsenden Rohstoffen, nämlich 800 Liter Biogas und 420 Liter Methan je kg FoTS [6], in der Praxis bestätigen lässt.

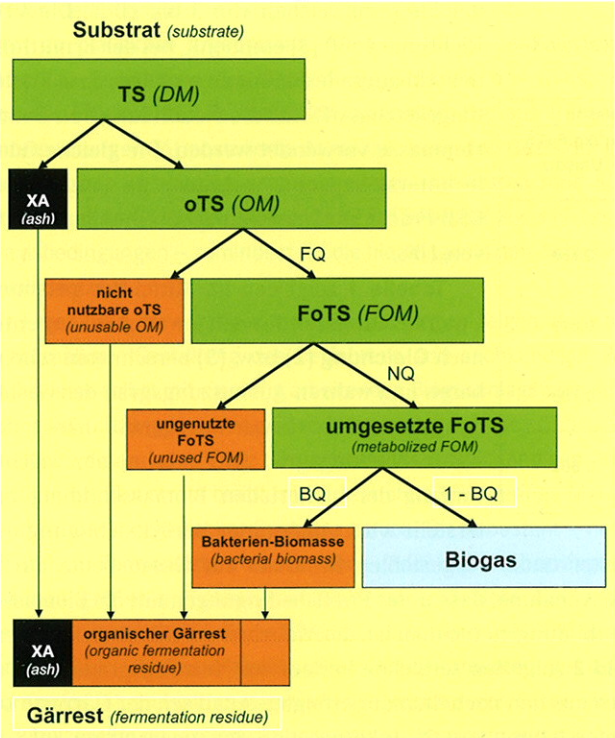
Material und Methode

Im Rahmen dieser Studie wurden 3 Fermenter einer industriellen Anlage zur Biogaserzeugung untersucht, die nebeneinander mit einer identischen Substratration betrieben wurden. Bei den Fermentern handelt es sich um Behälter von 2 575 m³ nutzbarem Volumen. Diese wurden zur einstufigen Fermentation unter mesophilen Temperaturbedingungen mit einer Raumbelastung von rund 3 kg oTS je m³ und Tag bei quasi-kontinuierlicher Beschickung genutzt (etwa 32 Substratportionen pro Tag nach Vermischung mit Rezirkulat). Die hydraulische Verweilzeit betrug etwa 90 Tage. Die Substratration bestand – nach oTS-Anteilen gerechnet – zu 2 % aus Gülle, 15 % aus Getreideschrot und 83 % aus Maissilage.

Über eine Dauer von 3 Monaten wurden in regelmäßigen Zeitabständen und getrennt nach den 3 Fermentern Proben von den Substraten und vom Gärrest gezogen und untersucht. Insgesamt wurden 67 Proben von der Maissilage, 36 vom Getreideschrot, 23 von der Gülle und 126 vom Gärrest analysiert. In allen Proben wurden Trockensubstanz (TS) und Rohasche (XA), in denen von Maissilagen und Getreide zusätzlich Rohfaser bestimmt. Der TS-Gehalt der Maissilagen ist auf flüchtige Stoffe korrigiert worden [5]. Der FoTS-Gehalt wurde aus den entsprechenden Schätzgleichungen berechnet [6]. Für die Gülle wurde ein fiktiver FoTS-Gehalt unter Nutzung des Richtwertes des KTBL[2] für die Gasausbeute aus „Rindergülle mit Futterrest" berechnet (370 Liter/kg oTS dividiert durch 800 Liter/kg FoTS = 0,46; FoTS = 0,46 • oTS).

Die hier gewählte Methode der Bilanzierung kommt ohne Mengenerfassung des Gärrestes aus. Sie beruht allein auf

Bild 1



Fraktionen der Substrat-TS und ihr Schicksal im Fermenter
FQ = Fermentationsquotient [FoTS / oTS]
NQ = Nutzungsquotient [umgesetzte FoTS / zugeführter FoTS]
BQ = Biomassebildungsquotient [oTS in Bakterienbiomasse / umgesetzter FoTS]
Fig. 1: Fractions of substrate DM and its fate in the fermenter
FQ = fermentation quotient [FOM / OM]
NQ = utilization quotient [metabolized FOM / FOM input]
BQ = biomass generation quotient [OM in bacterial biomass / metabolized FOM]

einem Vergleich der XA-Gehalte von Substrat und Gärrest. Infolge des Abbaus der organischen Substanz bei der Fermentation von nachwachsenden Rohstoffen steigt der XA-Gehalt in der TS erheblich an. Diese drastische Veränderung lässt sich für die Bilanzierung nutzen.

Ergebnisse zum Ausnutzungsgrad

Bild 1 zeigt ein Schema, in dem die einzelnen Fraktionen des Substrats und ihr Schicksal im Fermenter dargestellt sind. Die TS besteht aus der XA und der oTS. Die oTS lässt sich in die „unter anaeroben Bedingungen biologisch nicht nutzbare organische Substanz" und die FoTS teilen. Das Ausmaß der Nutzbarkeit ist durch den Parameter FQ (Fermentationsquotient) beschrieben. Die FoTS ist in der Praxis der Biogasgewinnung aus technologischen Gründen möglicherweise nicht vollständig umsetzbar. Die gesamte FoTS kann man demgemäß in den ungenutzten und den bakteriell umgesetzten Anteil aufgliedern. Der Ausnutzungsgrad ist durch den Parameter NQ (Nutzungsquotient) zu beschreiben.

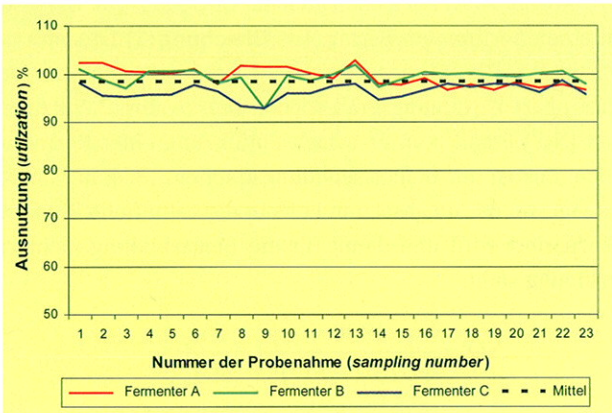
Durch die folgende Gleichung kann ein Erwartungswert für den Rohaschegehalt des Gärrestes (XA_R) in Abhängigkeit von den Gehalten an Rohasche (XA_S) und FoTS im Substrat (jeweils in g/kg TS) sowie von NQ berechnet werden:

$$XA_R[g/kgTS] = \frac{1000 XA_S}{1000 - FoTS + (1 - NQ)FoTS} \qquad (1)$$

Löst man diese Gleichung nach NQ auf, so lässt sich ein Erwartungswert für den Ausnutzungsgrad wie folgt berechnen, wenn die Rohaschegehalte von Substrat und Gärrest sowie der Gehalt an FoTS bekannt sind:

$$NQ = \frac{1000}{FoTS}\left(1 - \frac{XA_S}{XA_R}\right) \qquad (2)$$

Bild 2



Prozentualer Ausnutzungsgrad des Biogasbildungspotenzials bei optimaler Prozessführung unter Praxisbedingungen
Fig. 2: Utilization percentage of biogas formation potential at optimal fermenter operation under practical conditions

Tab. 1

Scheinbarer und wahrer Ausnutzungsgrad (NQ bzw. NQ') der fermentierbaren organischen Trockensubstanz (FoTS) in Abhängigkeit vom Ausmaß der Inkorporation in Bakterien-Biomasse
Table 1: Apparent and true utilization degree (NQ and NQ', respectively) of fermentable organic matter (FoTS) depending on degree of incorporation into bacterial biomass

Fermenter	FoTS der Ration g/kg TS	XA der Ration g/kg TS	XA des Gärrests g/kg TS	NQ	NQ' bei Inkorporation der umgesetzten FoTS von			
					3%	5%	7%	9%
A	810,2	48,4	206,7	**0,945**	0,974	**0,995**	1,016	1,038
B	816,3	46,4	202,2	**0,944**	0,973	**0,994**	1,015	1,037
C	819,6	48,7	195,2	**0,916**	0,944	**0,964**	0,985	1,007
Mittel	815,1	48,0	201,3	**0,934**	0,963	**0,983**	1,004	1,026

Tab. 2

Biogasausbeute je kg fermentierbarer organischer Trockensubstanz (FoTS) unter Praxisbedingungen (NQ' = wahrer Nutzungsquotient)
Table 2: Biogas yield per kg of fermentable organic matter (FoTS) under practical conditions (NQ' = true utilization quotient)

FoTS Input kg/Tag	NQ'	Biogas m³/Tag berechnet aus FoTS	Biogas m³/Tag gemessen (Normvolumen)	relativ % (gemessen = 100)	Biogas gemessen m³/kg FoTS Input	Biogas gemessen m³/kg FoTS Umsatz
Fermenter A						
6.622	0,995	5.271	5.197	**101,4**	0,785	**0,789**
Fermenter B						
6.182	0,994	4.916	5.032	**97,7**	0,814	**0,819**
Fermenter C						
6.683	0,964	5.154	5.143	**100,2**	0,770	**0,798**
Mittel						
6.497	0,983	5.109	5.124	**99,7**	0,789	**0,802**

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei der bakteriellen Umsetzung der FoTS nicht nur Biogas entsteht, sondern dass ein geringer Teil der FoTS auch in bakterielle Biomasse inkorporiert wird [1,3]. Die oTS dieser neu gebildeten Biomasse verbleibt im Gärrest und vermindert den eigentlich allein aus dem FoTS-Abbau zu erwartenden hohen XA-Gehalt des Gärrestes um einen bestimmten Betrag. Die **Gleichung (2)** ist somit unvollständig. Die mit ihr berechnete Größe NQ gibt nur den „scheinbaren" Nutzungsgrad wieder. Den „wahren" Nutzungsgrad (NQ') erhält man erst nach Einführung einer Korrekturgröße. Das ist der Biomassebildungsquotient (BQ), der angibt, wie viel von der umgesetzten FoTS in die bakterielle Biomasse inkorporiert wird und damit für die Biogasbildung nicht zur Verfügung steht:

$$NQ' = \frac{1000}{FoTS(1-BQ)}\left(1-\frac{XA_S}{XA_R}\right) \qquad (3)$$

Tab. 3

Methanausbeute je kg fermentierbarer organischer Trockensubstanz (FoTS) unter Praxisbedingungen (NQ' = wahrer Nutzungsquotient)
Table 3: Methane yield per kg of fermentable organic matter (FoTS) under practical conditions (NQ' = true utilization quotient)

FoTS Input kg/Tag	NQ'	kWh/Tag	Methan m³/Tag berechnet aus FoTS	Methan m³/Tag berechnet aus kWh	relativ % (berechnet aus kWh = 100)	Methan berechnet aus kWh m³/kg FoTS Input	Methan berechnet aus kWh m³/kg FoTS Umsatz
Fermenter A							
6622	0,995	10.084	2.767	2.669	**103,7**	0,403	**0,405**
Fermenter B							
6182	0,994	9.619	2.581	2.545	**101,4**	0,412	**0,414**
Fermenter C							
6683	0,964	10.252	2.706	2.713	**99,7**	0,406	**0,421**
Mittel							
6497	0,983	9.985	2.682	2.642	**101,5**	0,407	**0,414**

Über die Biomasseneubildung liegen keine allgemeingültigen Zahlen vor. Die Angaben in der Literatur reichen von 3 bis 10 %. Die VDI-Richtlinie 4630 [3] empfiehlt, bei der Ermittlung des Abbaugrades damit zu rechnen, dass 7% der umgesetzten oTS für die Neubildung von Bakterienmasse verwendet werden. Die gleiche Quelle unterstellt einen Verbrauch an umgesetzter CSB-Fracht zur Neubildung von Biomasse sogar von 10%.

Tabelle 1 zeigt den im Mittel der gesamten Untersuchungszeit für den jeweiligen Fermenter nach **Gleichung (2)** bzw. **(3)** berechneten scheinbaren und wahren Ausnutzungsgrad des Gasbildungspotenzials. Erwartungsgemäß hängt der wahre Nutzungsgrad (NQ') davon ab, welcher Umfang der bakteriellen Biomassebildung unterstellt wird. Auch unter Berücksichtigung der weiter unten vorgestellten Resultate zur Gasausbeute dürfte die Annahme, dass unter Praxisbedingungen mit 5% Biomasseneubildung zu rechnen ist, der Wahrheit am nächsten kommen. **Bild 2** zeigt den zeitlichen Verlauf des Nutzungsgrades, wie er sich aus den nacheinander erfolgten Analysen der Gärreste bei Unterstellung von 5% Inkorporation der umgesetzten FoTS in bakterielle Biomasse errechnet.

Ergebnisse zur Biogasausbeute

In **Tabelle 2** sind die aus dem FoTS-Input berechneten Erwartungswerte für die Biogaserzeugung den gemessenen und auf Normbedingungen korrigierten Mengen an Biogas gegenübergestellt. Die Berechnung der Erwartungswerte erfolgte aus der zugeführten Menge an FoTS, multipliziert mit dem Nutzungsquotienten NQ' (bei Annahme einer Biomasseneubildung von 5 %) sowie der angenommenen Biogasausbeute von 800 Litern je kg FoTS [6]. Wie sich zeigt, wurde im Mittel eine gute Übereinstimmung gefunden, was als Bestätigung der getroffenen Annahmen gewertet werden kann.

Eine analoge Gegenüberstellung wird in **Tabelle 3** für das Methan vorgenommen. Die Berechnung der Erwartungswerte erfolgte wieder aus der zugeführten Menge an FoTS, aus dem Nutzungsquotienten NQ' (bei Annahme einer Biomasseneubildung von 5 %) sowie hier aus einer angenommenen Methanausbeute von 420 Litern je kg FoTS [6]. Diesen Erwartungswerten werden die aus der nachgewiesenen elektrischen Arbeit (kWh) abgeleiteten Methanmengen gegenübergestellt. Für die Ableitung wurde ein Heizwert von 35,8 MJ/m³ Methan und ein Wirkungsgrad der Stromerzeugungsaggregate von 38 % unterstellt. Auch hier, ergab sich im Mittel eine gute Übereinstimmung zwischen dem aus dem Substrat-Input erwarteten und dem technisch nachgewiesenen (oder genauer gesagt: aus den kWh berechneten) Methanertrag.

Schlussfolgerungen

Die hier angewandte Methode zur Bestimmung des Ausnutzungsgrades der Substrate in Biogasanlagen unter Praxisbedingungen führt zu plausiblen Ergebnissen. Sie ermöglicht erstmalig eine getrennte Beurteilung des Gasbildungspotenzials des Substrats und der Effizienz des Fermentationsprozesses. Die aus früheren Untersuchungen [6] postulierte Annahme, dass das Gasbildungspotenzial der wichtigsten nachwachsenden Rohstoffen rund 800 Liter Biogas und 420 Liter Methan je kg FoTS beträgt, hat sich unter Praxisbedingungen – zumindest für die hier eingesetzten Substrate – voll bestätigt.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass bei zweckmäßiger Gestaltung des Verfahrens und sachkundiger Betriebsweise selbst mit einstufig arbeitenden Biogasanlagen ein sehr hoher Ausnutzungsgrad des Gasbildungspotenzials der Substrate erreicht werden kann. Trotz der weitestgehend vollständigen Ausnutzung des Substrats bleibt im Gärrest stets eine geringe Menge an abbaubarer organischer Substanz zurück. Diese besteht – nach effizientem Fermenterbetrieb wie hier – jedoch ganz überwiegend aus neu gebildeter bakterieller Biomasse und nicht aus ungenutztem Substrat. Wird dieser Gärrückstand erneut bei 37 °C anaerob inkubiert, wie das versuchsweise in Laborfermentern gemacht worden ist [4], so kommt es erwartungsgemäß durch Entwicklung und Sukzession neuer Baterienpopulationen zu einem allmählichen Abbau auch dieser mikrobiellen Biomasse und dabei zu weiterer Freisetzung geringer Mengen an Biogas. Die Größenordnung des in den genannten Batch-Versuchen mit Gärresten als unvermeidbar gefundenen Restgaspotenzials stimmt gut mit der hier als wahrscheinlich ermittelten Biomasseneubildung im Fermenter überein. Dieses unvermeidbare Restgaspotenzial ist stets erheblich geringer als das von unvergorener Gülle.

Literatur

[1] Khanal, S.K.: Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production. Wiley-Backwell, Ames, Iowa, 2008, S. 1-301

[2] KTBL: Gasausbeuten in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. KTBL-Arbeitsgruppe „Biogaserträge" (2005), 1-24

[3] VDI-Richtlinie 4630 „Vergärung organischer Stoffe". VDI-Gesellschaft Energietechnik, Düsseldorf 2006, ICS 13.030.30; 27.190, S. 1-91

[4] Vogtherr, J., H. Oechsner, A. Lemmer und Th. Jungbluth: Restgaspotential NaWaRo-beschickter Biogasanlagen in Baden-Württemberg. Tagungsband. Internationale Konferenz „Fortschritte beim Biogas", Universität Hohenheim, 2007, Teil 1, S. 71-75

[5] Weißbach, F., und C. Strubelt: Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Maissilagen als Substrat für Biogasanlagen. Landtechnik 63 (2008), H. 2, S. 82-83

[6] Weißbach, F.: Zur Bewertung des Gasbildungspotenzials von nachwachsenden Rohstoffen. Landtechnik 63 (2008), H. 6, S. 356-358

Autor

Prof. Dr. agr. habil. Friedrich Weißbach war bis 1999 Leiter des Instituts für Grünland- und Futterpflanzenforschung der damalige Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig (FAL) und ist jetzt als freischaffender Firmenberater tätig.
Kontakte über E-Mail: prof.f.weissbach@web.de

Danksagung

Der Autor dankt der NAWARO® BioEnergie AG für die finanzielle Förderung und die versuchstechnische Unterstützung des Projektes, dessen Ergebnisse hier dargestellt sind.

www.agritechnica.com