



Masse- und Trockensubstanzbilanz in landwirtschaftlichen Biogasanlagen

Langfassung der Veröffentlichung
Reinhold, G.: „Genau bilanzieren“
in Neue Landwirtschaft
Heft 12/2005,
S. 68 bis 72

Masse- und Trockensubstanzbilanz in landwirtschaftlichen Biogasanlagen

G. Reinhold, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft

1. Einleitung

Mit der Novellierung des Erneuerbaren Energien-Gesetzes im Jahr 2004 wurden die ökonomischen Voraussetzungen für den Einsatz landwirtschaftlicher Primärprodukte in Biogasanlagen geschaffen. Die Einführung des Nawaro-Bonus von sechs bzw. vier Cent/kWh ermöglicht es dem Landwirt, den Einsatz von landwirtschaftlichen Feldfrüchten in Biogasanlagen auf eine ökonomisch tragfähige Basis zu stellen.

Neben den Veränderungen der Eigenschaften des Produktes Gülle durch den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen, wie die Erhöhung des Nährstoffgehaltes und die Veränderung der Nährstoffbindungsformen, ergeben sich durch den Einsatz landwirtschaftlicher Ko-Substrate Konsequenzen für den Biogasgülleanfall sowie für die Abschätzung des Trockensubstanzgehaltes nach der Biogaserzeugung.

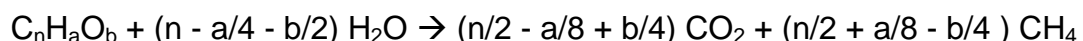
Hierfür sind neben der Kenntnis des biologischen Prozesses der Biogaserzeugung auch Kenntnisse im chemischen Bereich insbesondere in der Stöchiometrie erforderlich.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methode zur Ermittlung der Anfallsmengen von Biogasgülle bei Ko-Fermentation zu entwickeln und daraus folgend Richtwerte abzuleiten. Mittels dieser Richtwerte ist es dann möglich den Bedarf an Lagerraum abzuschätzen. Die sich weiter ergebende Möglichkeit zur Berechnung des Trockensubstanzgehaltes in der Biogasgülle nach der Biogaserzeugung hat zudem Bedeutung für die Rührwerksauslegung.

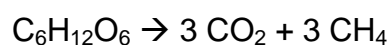
Aus dem experimentell ermittelten TS-Gehalt der Ausgangssubstrate und der Biogasgülle ist darüber hinaus eine Abschätzung der Gaserzeugung möglich. Prinzipiell lassen sich so auch die Gasbildungsanteile im Haupt- und Nachfermenter bestimmen.

2. Chemische Grundlagen der Biogaserzeugung

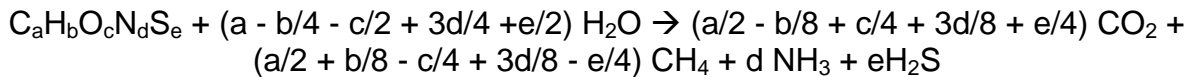
Nach Buswell ergibt der anaerobe Abbau von Biomasse mit bekannter chemischer Zusammensetzung in guter Näherung die folgende Umwandlung:



Für die reine Vergärung von Kohlenhydraten in Form von Glukose ergibt sich dann:



Die entstehenden jeweils 3 mol CO₂ und CH₄ würden einen Methangehalt im Biogas von 50 % ergeben. Wasser wäre hierbei nicht zuzuführen. Die Erweiterung der Formel Buswell für die Vergärung von N- und S-haltigen Substanzen führt zu folgender Beziehung:



Entstände Biogas zu gleichen Anteilen aus Kohlenhydraten, Fetten und Eiweißen, so ergäbe sich ein Methangehalt im Biogas von 53 %.

Für mittlerer Zusammensetzung von Ganzpflanzen ist von folgenden Molanteilen auszugehen:

Kohlenstoff 38 mol,
Wasserstoff 60 mol,
Sauerstoff 26 mol.

Nach der stöchiometrischen Berechnung ergibt sich, dass unter Zusatz von 10 mol Wasser 18 mol Kohlendioxid und 20 mol Methan entstehen (Tabelle 1). Im folgenden ist als Beispiel die Berechnung des notwendige Einsatz von 10 mol Wasser zur Sicherung des stöchiometrischen Gleichgewichtes dargestellt:

$$(n - a/4 - b/2) H_2O = (38 - 60/4 - 26/2) H_2O = 10 H_2O$$

Tabelle 1: Stöchiometrisches Gleichgewicht der vollständigen Umwandlung von Biomasse zu Biogas

	Biomasse	+	Wasser	→	Kohlendioxid	+	Methan
Summenformel	C₃₈ H₆₀ O₂₆	+	10 H₂O	→	18 CO₂	+	20 CH₄
Molare Masse	932		180		792		720
Massenbilanz	1,0		0,193		0,850		0,343
Volumenanteil	-		-		47,4 %		52,6 %
Masseanteil	83,8 %		16,2 %		71,3 %		28,7 %

Aus der Massenbilanz folgt, dass aus 1,0 kg organischer Trockensubstanz und 0,193 kg Wasser 0,85 kg CO₂ und 0,34 kg CH₄ entstehen. Entsprechend den molaren Anteilen von 18 mol CO₂ und 20 mol CH₄ ergibt sich ein mittlerer CH₄-Gehalt von 52,6 %. Exakt gelten diese getätigten Aussagen allerdings nur für Biomasse mit der dargestellten Summenformel sowie bei vollständiger Umwandlung.

Für praktische Verhältnisse kann dennoch geschlussfolgert werden, dass 15 bis 18 % der entstehenden Biogasmasse aus der Zufuhr von Wasser entstehen. Bei der Berechnung des TS-Gehaltes der Biogasgülle ist nur die, aus der organischen Substanz konvertierte, Gasmenge zu berücksichtigen.

3. Masse und Zusammensetzung von Biogas

Die Biogasmenge wird maßgeblich durch die Hauptbestandteile CO₂ und CH₄ bestimmt. Die Ermittlung der Biogasmasse erfolgt hier zur Vereinfachung ohne Berücksichtigung des Schwefelwasserstoff- und Ammoniakgehaltes. Entsprechend der unterschiedlichen molaren Masse von CO₂ (44 g/mol) und CH₄ (16 g/mol) ist die Masse des Gasgemisches von deren Anteilen abhängig. Bei näherungsweise Berücksichtigung des molaren Volumens von 22,4 l/mol folgt, dass 1 m³ Biogas mit 45 bis 65 % Methan zwischen 1,4 und 1,15 kg wiegt (Abbildung 1). Ohne Kenntnis des Methangehaltes kann für praktische Betrachtungen mit einer mittleren Biogasmasse von 1,25 kg/m³ kalkuliert werden.

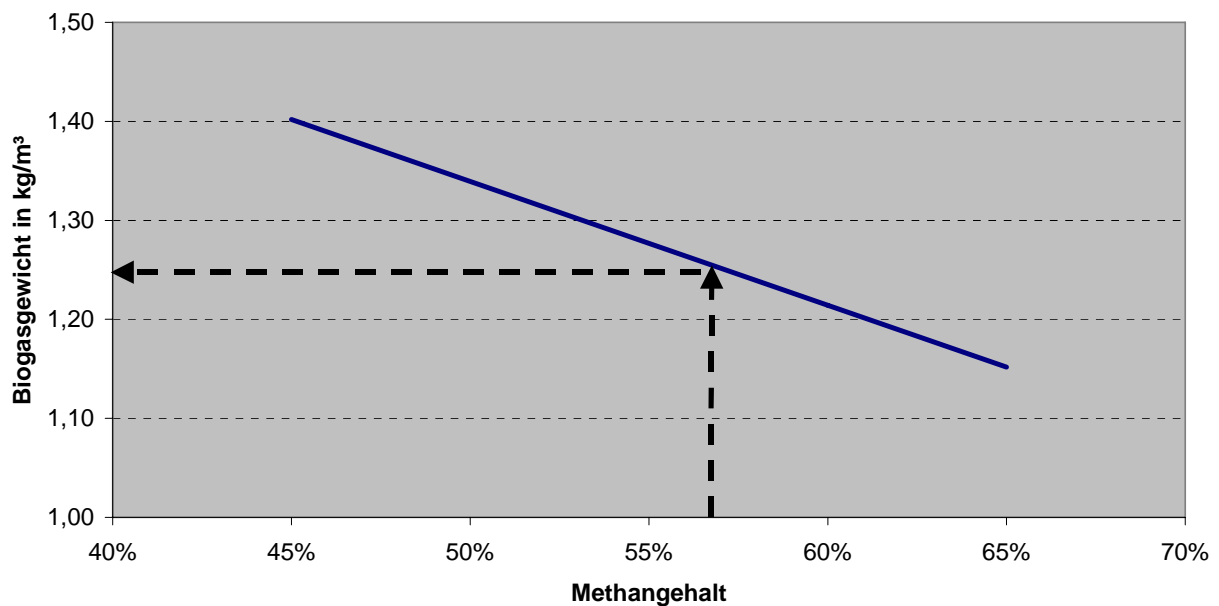


Abbildung 1: Biogasgewicht Abhängigkeit vom Methangehalt

(Normzustand: trocken ; 0°C, 760 Torr)

In landwirtschaftlichen Biogasanlagen wird der Methangehalt üblicherweise in der Zuleitung zum Blockheizkraftwerk, d.h. nach der biologischen Entschwefelung gemessen. Da die meisten Anlagen über eine biologische Entschwefelung verfügen, ist die damit zugeführte Luft zu berücksichtigen. Die eingetragene Luft enthält 21 % Sauerstoff und rund 79 % Stickstoff und führt zur Verringerung des Methangehaltes im Biogas.

Wird z. B. ein Methangehalt von 50 % und ein Sauerstoffgehalt von 1 % vor dem BHKW gemessen, so ist vor der Entschwefelung ein Methangehalt von 52,5 % vorhanden. Zusätzlich zu Methan (50 %) und Kohlendioxid (45,2 %) enthält das entschwefelte Biogas noch 4,8 % Luft (1 % Sauerstoff und 3,8 % Stickstoff). Die biologische Entschwefelung, bzw. die damit im Zusammenhang stehende Lufteinspeisung in den Gasraum, erhöht im dargestellten Beispiel somit das Biogasvolumen um etwa 5 %.

Unter praktischen Verhältnissen kann die Reduzierung des Methangehaltes noch stärker ausfallen, als aus dem Restsauerstoffgehalt im Biogas berechenbar. Im Reaktor kann eine Sauerstoffzehrung durch den Abbau von organischer Substanz an den Besiedlungsflächen für die schwefelwasserstoffreduzierenden Bakterien erfolgen. Die erzeugte Methanmenge d.h. Energieerzeugung wird aber durch die Luftzufuhr nicht beeinflusst. Die Reduzierung des Methangehaltes kann sich jedoch bei manchen Blockheizkraftwerken, und speziell bei Gas-Otto-Motoren, nachteilig auswirken. Zum Teil treten Startschwierigkeiten auf.

Weiterhin ist festzustellen, dass bedingt durch Unstetigkeiten in der Methanproduktion bzw. in der Methanaustreibung aus dem Substrat, z.B. durch den diskontinuierlichen Betrieb der Rührwerke bei konstanter Luftzuspeisung, Unterschiede im Methangehalt für die BHKW-Anlage erzeugt werden. Besonders bei kleinen Gasspeichern kann dieses zu Störungen im BHKW-Betrieb und zu

Verschlechterungen des elektrischen Wirkungsgrades führen, da die Motoren dann nicht im optimalen Betriebsbereich arbeiten.

Als Vorteilhaft hat sich deswegen eine nach dem Sauerstoffgehalt im Biogas vor der Verwertung geregelte Luftzuführung herausgestellt.

4. Richtwerte für den Masseabbau in landwirtschaftlichen Biogasanlagen

Flüssige Substrate wie Gülle werden näherungsweise in landwirtschaftlichen Biogasanlagen meist mit einer Dichte von 1 kg/l bewertet. Für die Beurteilung des Masseabbaus ist es somit nicht erforderlich, die Dichte der eingesetzten Feststoffe (Getreide, Silage, ...) zu definieren, da die Mengenermittlung meist über Wägung erfolgt. Die zum Teil erfolgende Nutzung der Schüttdichte ist hier wenig zielführend, da die Zwischenräume im Biogasreaktor mit Wasser aufgefüllt sind.

Die in landwirtschaftlichen Biogasanlagen zusätzlich zur Gülle eingesetzte Biomasse (Ko-Substrate) besteht aus Wasser, organischer Trockensubstanz und Asche (Mineralien). Die Ascheanteile sind bei den Wirtschaftsdüngern mit 20 bis 30 % deutlich höher als bei den Nachwachsenden Rohstoffen (> 10 %). Auch sind die TS-Gehalten der Ko-Substrate sehr unterschiedlich. Sie reichen von 30 bis 40 % bei Silagen (d. h. 600 bis 700 l Wasser/t Substrat) bis zu 86 % Trockensubstanz bei Getreide (d. h. 140 l Wasser/t Substrat).

Ausgehend von den Richtwerten der Methan- bzw. Biogausausbeute für unterschiedliche Substrate (KTBL-Broschüre „Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen 2005“), lässt sich unter Beachtung der Ergebnisse der Tabelle 1 der Masseabbau durch den Biogasprozess berechnen.

Beim Masseabbau ist die gesamte in Biogas konvertierte Masse zu berücksichtigen, d.h. für 1 m³ Biogas ist entsprechend des Methangehaltes mit 1,15 bis 1,4 kg anzunehmen (vgl. Abbildung 1). Die aus dem Substrat erzeugbare Biogasmenge ist mit dem Biogsgewicht zu multiplizieren. Eine Umrechnung auf Normbedingungen ist hier zwingend. Das Ergebnis stellt den Masseabbau dar, um welchen die eingesetzte Substratmenge im Verlauf des Gärprozesses reduziert wird (Tab. 2).

Tabelle 2: Richtwerte für den Masseabbau und den TS-Gehalt nach der Vergärung für unterschiedliche Einzelsubstrate

	Einheit	Rinder- gülle	Schwei- negülle	Stall- mist	HTK ¹⁾	Mais- Silage	GPS ²⁾	CCM ³⁾	Ge- treide
TS -Gehalt	%	8%	6%	25%	45%	32%	40%	65%	86%
oTS -Gehalt	% d. TS	80%	80%	80%	75%	95%	95%	98%	98%
Methangehalt	%	55%	60%	55%	65%	52%	53%	55%	55%
Biogasaus- beute ⁴⁾	l/kg oTS	280	400	450	500	600	520	680	700
	m ³ /t FM	18	19	90	169	182	198	433	590
Biogasgewicht	kg/m ³	1,28	1,21	1,28	1,15	1,31	1,30	1,28	1,28
Masseabbau	kg/t FM	23	23	115	194	240	257	553	753
	%	2,3%	2,3%	11%	19%	24%	26%	55%	75%
Biogasgülle- menge	m ³ /t Substrat	0,977	0,977	0,885	0,806	0,760	0,743	0,447	0,247
	%	98%	98%	89%	81%	76%	74%	45%	25%
TS-Gehalt nach Vergärung	%	5,8%	3,8%	15,3%	31,7%	10,6%	19,2%	21,7%	43,3%

1) HTK = Hühnertrockenkot

2) GPS = Ganzpflanzensilage

3) CCM = Corn-Cob-Mix

4) Nach Gasausbeuten in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, KTBL 2005

Für Gülle ergeben sich Masseabbauraten von 2 bis 2,5 %. Die Reduzierung der Güllemenge auf ca. 98 % hat allerdings für praktische Belange keine Relevanz. Auch für Stallmist ist der Masseabbau in der Größenordnung von 10 bis 15 % nur bedingt relevant. Wichtig ist hierbei, dass stapelfähiger Stallmist zu flüssigen Wirtschaftsdünger umgewandelt wird, was bei der Lagerräum Bilanz berücksichtigt werden muss. Überschlägig entstehen aus einer Tonne Stallmist 0,9 m³ Biogasgülle als flüssiger Wirtschaftsdünger mit 15 % TS. Bei Einsatz von Hühnertrockenkot sind es je Tonne rund 0,8 m³ Biogasgülle mit 25 % TS.

Im Bereich der Silagen ist, in Abhängigkeit vom TS-Gehalt der Silage, eine Mengenreduktion auf 70 bis 80 % festzustellen. Diese Größenordnung sollte bei der Berechnung des Lagerräumbedarfs Beachtung finden.

Deutlich höhere Abbauraten werden bei Getreide erreicht. Aufgrund des hohen Trockensubstanzgehaltes und des hohen Konvertierungsfaktors der organischen Trockensubstanz in Biogas, ergeben sich hier Werte von 0,25 m³ Biogasgülle pro t Getreide.

Prinzipiell gilt somit, dass der Masseabbau mit dem TS-Gehalt und der Gasbildungsrate steigt. Der Methangehalt hat auf den Masseabbau nur unwesentlichen Einfluss.

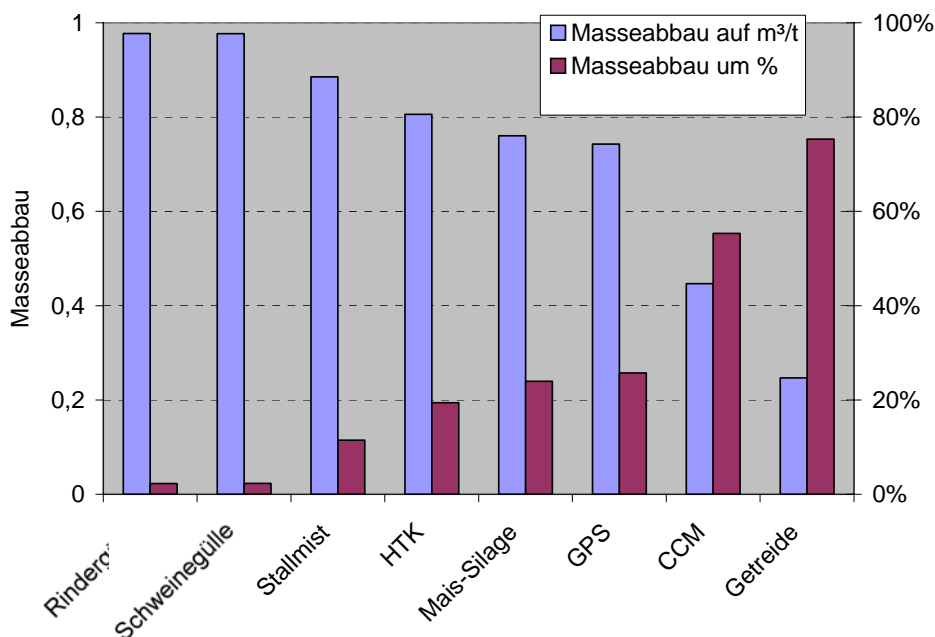


Abbildung 2: Masseabbau unterschiedlicher Substratarten in landwirtschaftlichen Biogasanlagen

Für einen einfachen Überschlag kann davon ausgegangen werden, dass 1 m³ Biogas 1,25 kg wiegt und diese zu Biogas konvertierte Masse von der Substratmenge abzurechnen ist. Zu beachten ist, dass von der im Biogas gebundenen Masse (z.B. 1,25 kg/m³) ca. 0,2 kg/m³ aus der Einbindung von Wasser stammt, wie unter Punkt 2 belegt wurde.

Für Berechnungen des Trockensubstanzgehaltes nach der Vergärung ist also von der täglich eingesetzten Menge an TS die, in Biogas konvertierte Menge (1,05 kg/m³) abzuziehen. Die sich ergebende Restmenge an TS (Angabe in kg/d) ist durch die Gesamtmenge des Substrates zu dividieren, um den TS-Gehalt (%) in der Biogasgülle zu errechnen. Bei Biogasanlagen mit nur einem Reaktor entspricht dieser Wert dem TS-Gehalt im Reaktor und kann für die Auslegung der Rührwerke genutzt werden.

Für eine Biogasanlage die täglich 20 m³ Rindergülle (9 % TS) und 5 t Maissilage (32 % TS) einsetzt, errechnet sich der oTS-Einsatz wie folgt:

$$\text{Gülle: } 20 \text{ t} * 9 \% \text{ TS} * 80 \% \text{ oTS an der TS} = 1,44 \text{ t oTS/d}$$

$$\text{Maissilage: } 5 \text{ t} * 0,32 \% \text{ TS} * 0,95 \% \text{ oTS an der TS} = 1,52 \text{ t oTS/d}$$

$$\underline{\text{Summe der eingesetzten oTS}} = 2,96 \text{ t/d oTS/d}$$

Dividiert man die Menge der täglich eingesetzten oTS durch die Reaktorgröße erhält man den Wert für die Reaktorbelastung in kg /m³ d.

Mit einer Biogasproduktion (nach Tabelle 2) von 403 m³/d aus der Gülle (280 l/kg oTS * 1440 kg/d) und 912 m³/d aus der Silage (600 l/kg oTS * 1520 kg/d) errechnet sich folgender Abbau für die:

$$\text{Substratmenge } (403 \text{ m}^3/\text{d} + 912 \text{ m}^3/\text{d}) * 1,25 \text{ kg/m}^3 = 1643 \text{ kg/d bzw.}$$

$$oTS \quad (403 \text{ m}^3/\text{d} + 912 \text{ m}^3/\text{d}) * 1,05 \text{ kg}/\text{m}^3 = 1381 \text{ kg}/\text{d}$$

Aus den 1,64 t/d Masseabbau folgt eine Verringerung der Substratmenge auf 93,4 %. Aus 25 t/d Substrateinsatz mit 13,6 % TS werden somit 23,4 t Biogasgülle mit 8,6 % TS wie folgende Rechnung zeigt:

$$(20 \text{ t} * 9 \%) + (5 \text{ t} * 0,32 \%) - 1,38 \text{ t}/\text{d} / (25 \text{ t}/\text{d} - 1,643 \text{ t}/\text{d}) = 8,6 \%$$

Ausgehend von den dargestellten Berechnungsmethoden ergibt sich für bestehende Biogasanlagen zusätzlich auch die Möglichkeit, durch Probenahme im Eingangssubstrat und in der Biogasgülle den Trockensubstanzabbau zu ermitteln. Die so bestimmbare, täglich abgebaute Trockensubstanzmenge ist durch $1,05 \text{ kg}/\text{m}^3$ zu dividieren, um die Biogaserzeugung zu errechnen. Unter Beachtung des Methangehaltes und des Wirkungsgrades des Blockheizkraftwerkes, lässt sich hierdurch auf die Stromproduktion zurückrechnen.

5. Zusammenfassung

Durch die Kenntnis der stöchiometrischen Bedingungen beim Abbau von Biomasse zu Biogas ist es möglich einerseits den Masseabbau für Biogasanlagen zu berechnen. Andererseits ist eine Abschätzung des Trockensubstanzgehaltes in der Biogasgülle gegeben. Hier ausfolgen eröffnen sich Möglichkeiten zur Qualifizierung der Rührwerksauslegung.

Mittels der vorgestellten Methode erfolgte die Ableitung von Richtwerten für den Masse- und oTS-Abbau bei Ko-Fermentation. Diese gestatten die Berechnung des Bedarfs an Güllelagerraum. Zusätzlich ergibt sich die Möglichkeit zur Abschätzung der Gaserzeugung aus experimentell ermittelten TS-Gehalt der Ausgangssubstrate und der Biogasgülle. Prinzipiell lassen sich so auch die Gasbildungsanteile im Haupt- und Nachfermenter bestimmen.