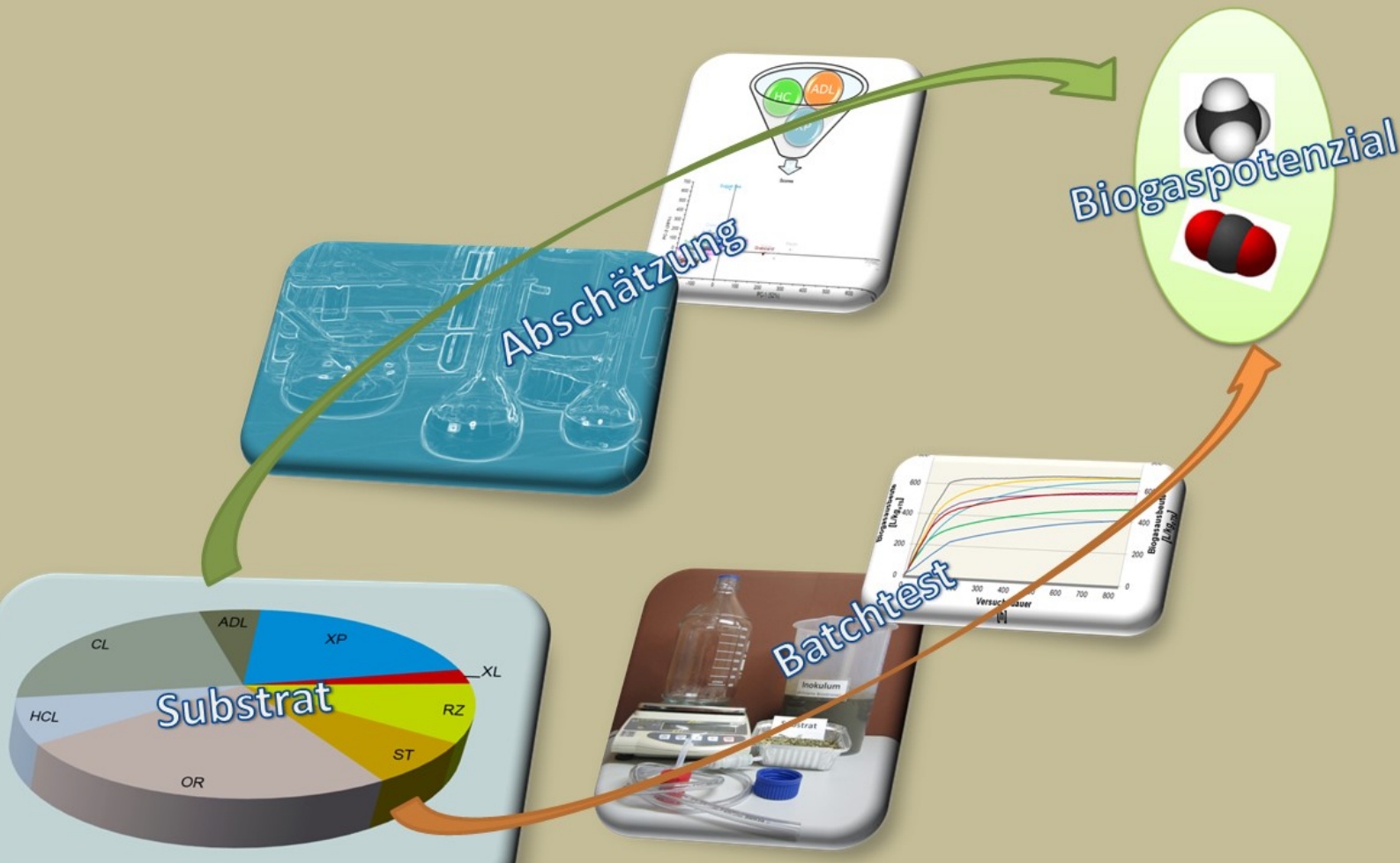


Erklärung verschiedener Methoden und Tests zur Bestimmung der

Gasausbeute



www.biogas-forum-bayern.de/bif16

Biogas Forum Bayern, Verfasser:

Dr. Vasilis Dandikas
Dr. Michael Lebuhn
 Bayerische Landesanstalt
 für Landwirtschaft



Matthias Post
 WESSLING GmbH



Dr. Maendy Fritz
 Technologie- und Förderzentrum
 im Kompetenzzentrum für
 Nachwachsende Rohstoffe



Dr. Konrad Koch
 Technische Universität
 München



Inhaltsverzeichnis

Seite

1. Definitionen und Begriffserklärungen	5
2. Einleitung	6
3. Grundsätzliches zur Probenahme und zu Laboranalysen	7
4. Gemessene Biogasausbeute	7
4.1 Volumetrisches Verfahren	8
4.2 Manometrisches Verfahren	8
4.3 Gravimetrisches Verfahren	8
5. Berechnete Biogasausbeute	9
5.1 Theoretisches (stöchiometrisches) Biogaspotenzial	10
5.2 Vorhersage des Biogaspotenzials anhand von Stöchiometrie und Verdauungsversuchen...	10
5.3 Vorhersage des Biogaspotenzials anhand empirischer Modelle (Regressionsmodelle).....	10
6. Zusammenfassung	14
7. Quellen	14

Abkürzungen

ADL	Säurelösliches Lignin
CL	Cellulose
EuIOS	Enzymunlösliche organische Substanz
FM	Frischmasse
FoTS	Fermentierbare organische Trockensubstanz
HC	Hemicellulose
LN	Normliter
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe
NfE	Stickstofffreie Extraktstoffe
OR	Organische Reststoffe
oTM	Organische Trockenmasse
oTS	Organische Trockensubstanz
RS	Reduzierende Zucker
ST	Stärke
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
VQ	Verdauungsquotient
XA	Rohasche
XF	Rohfaser
XL	Rohfett
XP	Rohprotein
YB	Biogasausbeute
YM	Methanausbeute

1. Definitionen und Begriffserklärungen

Batchtest: Diskontinuierlicher Gärversuch unter standardisierten anaeroben Messbedingungen. Der Laborfermenter wird einmalig beim Versuchsstart beschickt und der Versuch darf erst dann beendet werden, wenn die Biogasproduktion ein zuvor definiertes Minimum unterschreitet.

Biogasausbeute in L_N/kg_{oTM} oder L_N/kg_{FM} : Trockenens Biogasvolumen bei Normdruck und -temperatur je eingesetzter Substratmenge, das sich bei der Vergärung in einer Biogasanlage ergibt. Die unter Praxisbedingungen erreichbare Biogasausbeute ist in der Regel niedriger als das Biogaspotenzial.

Biogaspotenzial (maximale Biogasausbeute) in L_N/kg_{oTM} : Die maximale Biogasausbeute wird unter Laborbedingungen ermittelt oder kann durch ein empirisches Rechenmodell vorhergesagt werden. Das im Labor ermittelte Biogaspotenzial ist in der Regel niedriger als das theoretische.

Theoretisches Biogaspotenzial (Gaspotenzial) in L_N/kg_{oTM} : Das theoretische Biogaspotenzial wird anhand der Stöchiometrie basierend auf einer Analyse der Inhaltsstoffe ermittelt. Es ist in der Regel höher als das im Versuch ermittelte Biogaspotenzial, da es von einem vollständigen Abbau ausgeht und auch keinerlei Energie für den Stoffwechsel der Mikroorganismen berücksichtigt.

Stöchiometrische Modelle: Grundlegendes Hilfsmittel der Chemie, mit deren Hilfe für bekannte chemische Reaktionen die tatsächlichen Mengenverhältnisse ermittelt werden können. Basierend auf der chemischen Zusammensetzung des Einsatzstoffes kann z. B. das theoretische Biogaspotenzial berechnet werden.

Empirische Modelle: Ein empirisches Modell beruht auf einem großen Datensatz von Messwerten, mit dessen Hilfe man grundlegende Korrelation empirisch (basierend auf den im Datensatz enthaltenen Erfahrungen) ableitet. So kann z. B. das Biogaspotenzial eines Einsatzstoffes von dessen chemischer Zusammensetzung abgeleitet werden.

Empirische Werte: Biogasausbeute bezogen auf Ergebnisse aus möglichst vielen vorhergehenden Analysen bzw. Erfahrungswerten, die durch Gärtests nachgewiesen wurden.

Theoretische Werte: Berechnete Biogasausbeute bezogen auf die Stöchiometrie und biochemische Richtwerte (z. B. Koeffizienten anaerober Mikroorganismen).

Vorhergesagte Werte: Berechnete Biogasausbeute bezogen auf analytische Parameter (Futtermittelanalytik) und empirische Werte oder Regressionsmodelle.

2. Einleitung

Die maximale Biogasausbeute ist eine wichtige Größe zur Beurteilung von Substraten, zur Bewertung der Effizienz von Biogasanlagen, zur Planung von Anlagen und zur Abschätzung des Restmethanpotenzials von Gärresten. Mit dem Wissen um die maximale Biogasausbeute („Biogaspotenzial“) kann die Preiswürdigkeit von Substraten besser eingeschätzt und die Zusammenstellung geeigneter Futtermischungen optimiert werden. Darüber hinaus können durch die Bestimmung des Biogaspotenzials auch Fehler in der Betriebsführung von Biogasanlagen aufgedeckt und Optimierungsmaßnahmen eingeleitet werden.

Das Gaspotenzial kann zwar anhand der Stöchiometrie exakt berechnet werden, ist jedoch in der Realität neben der Substratzusammensetzung von vielen weiteren Faktoren wie dem biologischen Prozessstatus, der Temperatur und der Verweilzeit abhängig. Daher sollte das Biogaspotenzial für praxisrelevante Aussagen unter möglichst realitätsnahen Annahmen bestimmt werden.

Hierfür gibt es zwei verschiedene Ansätze:

► **Messung der Biogasausbeute unter standardisierten Bedingungen**

Bei Gärversuchen wird das organische Material unter vorgegebenen Bedingungen meist im Batchverfahren vergoren. Dafür wird der Einsatzstoff mit einem Impfschlamm gemischt und die Biogasproduktion bis zum deutlichen Abklingen erfasst. Diese Gärtests bestimmen den Biogasertrag unter den gewählten Versuchsbedingungen und liefern einen Wert, der auch in der Praxis unter optimalen Bedingungen erzielt werden kann (maximale Biogasausbeute). Nachteile bei all diesen Gärversuchen sind die lange Analysendauer (allein der Gärtest nimmt mehrere Wochen in Anspruch) und die erheblichen Kosten.

► **Berechnung der Biogasausbeute anhand von chemischen Analysen**

Die Substrate werden chemisch auf ihre Inhaltsstoffe hin untersucht. Diese Werte werden dann in eine Formel eingesetzt, mit der der Biogasertrag ermittelt wird. Vorteile dabei sind die standardisierte und in der Regel auch schnelle und günstige Analytik. Nachteile bei dieser Methode sind, dass die Ergebnisse durch die Berechnungsformel idealisiert werden und nicht immer zu praxisnahen Gaserträgen führen. Zudem sind geeignete Analyseverfahren und Berechnungsformeln nicht für alle Substrate verfügbar.

3. Grundsätzliches zur Probenahme und zu Laboranalysen

Die Probenahme ist im Bereich der Bioenergie sehr fehleranfällig und kann daher starken Einfluss auf die Ergebnisse der Analyse im Labor nehmen, welche wiederum eine wichtige Basis für die Steuerung und den Betrieb einer Biogasanlage sind. Daher ist hier größte Sorgfalt und Genauigkeit gefragt, um keine falschen Rückschlüsse auf den Prozessstatus im Fermenter zu ziehen.

Wie eine repräsentative Probenahme von Biogasanlagen zu erfolgen hat, ist im Detail in der Fachinformation „[Probenahme aus Gülle-, Fermenter- und Gärrestbehältern, Einsatzstofflagern und offenen Silos](#)“ des Biogas Forum Bayern beschrieben.

Die Futtermittelanalytik umfasst etablierte Standardmethoden zur Charakterisierung eines Ein-

satzstoffs. Ringversuche zeigen jedoch immer wieder, dass sich die ermittelten Ergebnisse der Labore trotz standardisierter Verfahren teilweise erheblich unterscheiden (Henkelmann und Fischer-Kaiser, 2014), während innerhalb desselben Labors die Abweichungen normalerweise gering sind und die Wiederholbarkeit im akzeptablen Bereich liegt. Somit sind Analyseergebnisse von Labor zu Labor auch bei einer sachgerechten Probenahme oft nur bedingt vergleichbar, vor allem wenn unterschiedliche Analysemethoden angewandt werden. Darum sollte man möglichst bei einem Labor „seines Vertrauens“ bleiben, um gerade bei Optimierungen immer die Ergebnisse aus einer Hand zu erhalten. Darüber hinaus sollten einmalige Messungen nicht als Basis für Entscheidungen verwendet werden.

4. Gemessene Biogausbeute

Zur Erfassung der Biogausbeute eines Einsatzstoffs werden Batch-Gärversuche (Batchtests) unter standardisierten anaeroben Bedingungen durchgeführt. Neben der Bestimmung des Biogasertrags können je nach Gestaltung des Gärversuchs auch Aussagen zur Abbaugeschwindigkeit und möglichen Hemmwirkungen gemacht werden. Allerdings sind derartige diskontinuierliche Tests zur Beurteilung der Prozessstabilität von Biogasanlagen nicht geeignet, da keine tägliche bzw. kontinuierliche Beschickung stattfindet.

Bei Batchtests ist es entscheidend, dass die Versuchsbedingungen (z. B. verwendetes Impfmateriale, Temperatur, Verweilzeit und Probenvorbereitungsschritte) genau festgelegt werden, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Zu diesem Zweck hat der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) eine Richtlinie für die Bestimmung der Biogas- bzw. Methanausbeute entwickelt, die VDI 4630 (VDI, 2016). Darüber hinaus wurden weitere Hinweise und Regeln zur Versuchsdurchführung und zur Beurteilung der Vergärbarkeit auch auf internationaler Ebene veröffentlicht (Angelidaki et al., 2009; Holliger et al., 2016; VDLUFA, 2011). Einen starken Einfluss auf die

Ergebnisse haben der verwendete Impfschlamm und die Anpassung der Mikroorganismen im Impfschlamm an das Probenmaterial. Da es kein einheitliches Impfmateriale gibt und eventuell Unterschiede zwischen den Labormethoden bestehen, kann es hierdurch zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen kommen (Raposo et al., 2011).

Im Gärversuch wird das Probenmaterial zusammen mit dem Impfschlamm bzw. dem Gärgemisch vergoren und somit das Biogaspotenzial bestimmt. Die Gasproduktion kann durch Auffangen des entstehenden Biogases (volumetrisches Verfahren), durch Messen des ansteigenden Drucks (manometrisches Verfahren) oder durch Ermittlung des Massenverlusts des Gärprodukts oder Probenmaterials (gravimetrisches Verfahren) bestimmt werden. Um die Netto-Biogasproduktion eines Einsatzstoffs bei der Co-Vergärung (Brutto-Biogasproduktion) zu ermitteln, ist immer eine Nullprobe (Ansatz nur mit Impfschlamm) erforderlich. Die Netto-Biogasproduktion des Einsatzstoffes ergibt sich dann als die Differenz von Brutto-Biogasproduktion und Biogasproduktion aus dem Impfschlamm.

4.1 Volumetrisches Verfahren

Um das Biogaspotenzial zu bestimmen, können Testapparaturen mit volumetrischer Gaserfassung eingesetzt werden. Verschiedene Laboratorien haben spezielle Apparaturen zur volumetrischen Gaserfassung entwickelt (z. B. Universität Hohenheim, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft). Darüber hinaus werden aktuell auf dem Markt verschiedene volumetrische Systeme zur Bestimmung des Biogaspotenzials angeboten (z. B. von Bioprocess Control

AB, Lund, SE; BlueSens gas sensor GmbH, Her-ten, DE; Dr.-Ing. RITTER Apparatebau GmbH & Co. KG, Bochum, DE). Die volumetrische Messung ist die am häufigsten gewählte Methode zur Ermittlung des Biogaspotenzials sowie zur Charakterisierung des Abbauprozesses (z. B. Verlauf der Biogasproduktion, Zusammensetzung des Biogases). Das Verfahren ist jedoch sehr personalaufwändig bzw. kostenintensiv.

4.2 Manometrisches Verfahren

Bei der manometrischen Messung des Biogaspotenzials wird ein Druckmessgerät (Manometer) am Gärgefäß installiert. In der Regel wird das Biogas in definierten Zeitzyklen oder bei bestimmten Druckwerten abgelassen. Anhand von Druck und Temperatur kann das Biogasvolumen als Druckanstieg ermittelt werden. Nach VDI 4630 soll der Überdruck im Fermenter 100 mbar nicht überschreiten, da die Löslichkeit von CO₂ stark druckabhängig ist. Holliger et al.

(2016) hat den maximalen Druck im Fermenter auf 3000 mbar begrenzt. Studien haben gezeigt, dass der Druck im Fermenter einen starken Einfluss auf die Biogasproduktion, hingegen keinen bzw. nur einen geringen Einfluss auf die Methanproduktion hat (Himanshu et al., 2017). Hauptvorteil der manometrischen Messung des Biogaspotenzials ist, dass selbst kleine Änderungen der Biogasproduktionsrate zeitlich hochaufgelöst erfasst werden können.

4.3 Gravimetrisches Verfahren

Der gravimetrische Ansatz basiert auf der Tatsache, dass die Entnahme des produzierten Biogases aus dem System einem Massenverlust des Systems gleichkommt. Bei diesem Verfahren wird das Gewicht des Fermenters oder des Substrates zum Versuchsstart und Versuchsende

oder zusätzlich auch während des Versuchs gemessen. Für die Bestimmung ist folglich lediglich eine entsprechende Laborwaage nötig. Der Abbaugrad und das Biogaspotenzial eines Einsatzstoffs kann anhand der Massendifferenz zwischen Versuchsstart und Versuchsende ermittelt werden.

► Bestimmung des Masseverlustes von Gärprodukten

Zur Bestimmung des Massenverlusts von Gärprodukten haben Hafner et al. (2015) eine Methodenbeschreibung veröffentlicht. Nach diesem Verfahren werden die gasdicht verschlossenen Gärgefäße in regelmäßigen Abständen gewogen und das produzierte Biogas wird einfach abgelassen. Wenn das Biogas beim Ablassen darüber hinaus noch volumetrisch erfasst wird (z.B. mittels einer skalierten Gasspritze), kann über Masse und Volumen die Dichte des Biogases ermittelt werden (Justesen et al., 2019). Geht man in erster Näherung davon aus, dass Biogas nur aus Methan und Kohlenstoffdioxid besteht, kann über diese einfache Methode zusätzlich auch der Methangehalt im Biogas bestimmt werden.

► Bestimmung des Masseverlustes von Einsatzstoffen

Bei der Bestimmung des Massenverlusts von Einsatzstoffen wird das Probenmaterial in spezielle Säckchen eingewogen und in einem an einer Biogasanlage angeschlossenen Fermenter oder im Laborfermenter für eine vorher festgelegte Zeit vergoren. Nach diesem Zeitraum wird die Probe aus dem Fermenter entnommen, gewaschen, getrocknet, zurückgewogen und die organische Trockenmasse bestimmt. Zusätzlich wird die organische Trockenmasse der ursprünglichen Probe gemessen. Mit diesen Werten lässt sich der Verlust an organischer Masse kalkulieren (WESSLING GmbH, BagFerm - Post, 2017). Die Berechnung der Biogasausbeute erfolgt anhand der empirischen Werte der fermentierbaren organischen Trockensubstanz (z. B. Biogasausbeute von FoTS nach Weißbach (2008)). Für eine genauere stöchiometrische Bestimmung der Biogasausbeute und der Gaszusammensetzung kann eine Elementaranalyse auf C, H, O, N und S vor und nach der Vergärung durchgeführt werden.

Die gravimetrische Bestimmung des Biogaspotenzials ist ein technisch einfaches und kostengünstiges Verfahren. Allerdings ist der Personalaufwand bei regelmäßigen Wägungen deutlich höher als bei automatisierten volumetrischen Systemen. Um den Methangehalt des Biogases zu bestimmen, sind zusätzliche Messapparaturen (volumetrisches Gaserfassungssystem oder Gasanalysegerät) oder Analysen (Elementaranalyse) erforderlich.

5. Berechnete Biogasausbeute

Die Berechnung der Biogasausbeute eines Substrats beruht auf der chemischen Untersuchung der Inhaltsstoffe. Die gemessenen Werte werden in eine Formel eingesetzt, mit der das Biogaspotenzial berechnet wird. Dazu gibt es unterschiedliche Formeln, die im Laufe der Zeit entwickelt wurden. Diese Formeln gelten aller-

dings nur für bestimmte Pflanzensorten oder -gruppen. Es gibt dabei den Ansatz, über die chemische Formel und die Verdaulichkeit der einzelnen Bestandteile oder über Regressionsmodelle den Gasertrag zu ermitteln. Im Folgenden wird eine Auswahl von gebräuchlichen Berechnungsansätzen vorgestellt:

5.1 Theoretisches (stöchiometrisches) Biogaspotenzial

Die stöchiometrischen Modelle beziehen sich auf die chemische Formel des organischen Substrates (z. B. Zellulose $(C_6H_{10}O_5)_n$). Im Prinzip werden hierbei aus den stöchiometrischen Mengen der enthaltenen Elemente die maximale Biogasausbeute bzw. die Menge an Methan (CH_4) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) berechnet. Da auf diese Weise der biologische Abbaugrad unberücksichtigt bleibt, können für grundverschie-

dene NawaRo sehr ähnliche Ergebnisse herauskommen. Die Berechnung nach der ursprünglichen Methode von Buswell und Mueller (1952) wurde von Boyle (1976) um die chemischen Elemente Stickstoff (N) und Schwefel (S) erweitert, um die entstehenden Mengen an Ammoniak (NH_3) und Schwefelwasserstoff (H_2S) ebenfalls zu ermitteln.

5.2 Vorhersage des Biogaspotenzials anhand von Stöchiometrie und Verdauungsversuchen

Basierend auf der Futtermittelanalytik und den Biogaspotenzialen der drei organischen Hauptstoffgruppen Rohprotein, Rohfett und Kohlenhydrate kann das Biogaspotenzial der Einsatzstoffe berechnet werden. Baserga (1998) hat empirische Werte für die Biogasausbeuten aus diesen drei Hauptstoffgruppen veröffentlicht. Das Biogaspotenzial ist jedoch auch bei Verwendung dieses Verfahrens für viele unterschiedliche NawaRo ähnlich, da keine Differenzierung zwischen schwer abbaubaren Fraktionen (z. B. Fasern) und leicht abbaubaren Fraktionen (z. B. Stärke) erfolgt.

Um Unterschiede in der Abbaubarkeit einzelner Fraktionen besser herauszuarbeiten, haben Keymer und Schilcher (1999) die Berechnung nach Baserga (1998) erweitert und Verdauungsquotienten (VQ) eingeführt, die in Verdauungsversuchen mit Wiederkäuern ermittelt wurden.

Vorteil dieses Verfahrens ist die einfache und für Futtermittel seit langem erprobte Analytik der Rohprotein-, Rohfett- und Kohlenhydratfraktionen. Da das Modell keinen Unterschied zwischen den Faser-Kohlenhydraten (Lignin, Cellulose, Hemicellulose) berücksichtigt, wird das Biogaspotenzial in der Regel unterschätzt. Darüber hinaus kann sich die Verärgbarkeit eines Substrats in der Biogasanlage von der Verdaulichkeit im Wiederkäuermagen deutlich unterscheiden. Verdauungsquotienten, die für die Tierernährung ermittelt wurden, müssen daher nicht zwingend auch für entsprechende Biogasprozesse gelten. Ein weiterer Nachteil ist, dass dieses Verfahren für Gülle, Mist und Gärreste generell nicht anwendbar ist, da Ergebnisse aus Verdauungsversuchen nur für Einsatzstoffe mit Futtermitteleigenschaften ermittelt werden können.

5.3 Vorhersage des Biogaspotenzials anhand empirischer Modelle (Regressionsmodelle)

Um plausible Ergebnisse für die maximale Biogasausbeute vorherzusagen, wurden Regressionsmodelle entwickelt. Diese mathematischen Modelle wurden unter Einbeziehung der chemischen Untersuchungen der Einsatzstoffe und der experimentellen Werte aus Batchtests ent-

wickelt. Die Regressionsmodelle weisen in der Regel einen geringen Schätzfehler auf und liefern plausible Werte, wenn die chemische Zusammensetzung des untersuchten Einsatzstoffes innerhalb des Kalibrierungsbereichs des Modells liegt.

An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass die Abwägung zwischen der Robustheit eines Modells und dessen Schätzfehler entscheidend ist. Normalerweise lässt sich der Schätzfehler über gruppenspezifische Modelle weiter vermindern. Allerdings sind diese Modelle dann weniger robust, d. h. nur für bestimmte Einsatzstoffe geeignet, da externe Faktoren (z. B. neue Pflanzensorten, Wachstumsbedingungen etc.) nur dann berücksichtigt werden können, wenn diese Information im für die Kalibrierung verwendeten Datensatz enthalten ist.

Es wurden mehrere Studien zur Vorhersage der Biogas- und Methanausbeute veröffentlicht. Im Folgenden werden exemplarisch vier Studien dargestellt. Amon et al. (2007) entwickelten Regressionsmodelle zur Abschätzung des Methanpotenzials von Mais, Gras und Getreide. Die Modelle beziehen sich auf vier organische Bestandteile: Rohfaser, Stickstofffreie Extraktstoffe, Rohprotein und Rohfett.

Weißbach (2008) hat Modelle zur Abschätzung der fermentierbaren organischen Trockensubstanz (FoTS) entwickelt. Dafür müssen die analytischen Parameter Rohasche, Rohfaser und enzymunlösliche organische Substanz (EuOS) bestimmt werden. Es wurden 12 Regressionsmodelle für 12 Pflanzengruppen entwickelt. Nachdem der FoTS-Gehalt abgeschätzt wurde, kann das Biogas- und Methanpotenzial ermittelt

werden. Hierfür werden für die Ausbeute empirische Werte von $800 \text{ L}_N/\text{kg}_{\text{FoTS}}$ für Biogas und $420 \text{ L}_N/\text{kg}_{\text{FoTS}}$ für Methan angesetzt.

Rath et al. (2013) entwickelten ein sortenspezifisches Modell für Mais. Bei der Sortendifferenzierung von Zuchtmais stellten sie einen negativen Einfluss von Lignin und Zucker und einen positiven Einfluss von Rohfett und Hemicellulose auf das Biogaspotenzial fest. 2015 wurde das Modell aktualisiert (Rath et al., 2015).

Dandikas et al. (2014) entwickelten ein artübergreifendes Regressionsmodell zur Vorhersage des Biogas- und Methanpotenzials für NawaRo mit einem Ligningehalt unter 10 %. In diesem Fall sind die analytischen Parameter Hemicellulose und Lignin für die Berechnung des Biogasertragspotenzials erforderlich.

Die Ergebnisse anhand der Regressionsmodelle haben eine wesentlich größere Praxisnähe als die Berechnungen auf Basis von Stöchiometrie und Verdauungsquotienten. Darüber hinaus bieten die Regressionsmodelle kostengünstigere und schnellere Ergebnisse als Gärtests. Nachteile sind die beschränkte Anwendbarkeit nur für Einsatzstoffe, für die es auch ein passendes Regressionsmodell gibt, und die teils schwierige Übertragbarkeit der Einzelwerte auf die Vergärung unter Praxisbedingungen.

Tabelle 1 stellt exemplarisch Formeln zur Vorhersage der Biogas- bzw. Methanausbeute dar. Diese Zusammenstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Tabelle 1: Modelle zur Vorhersage des Biogas- und Methanpotenzials gemäß Gliederung

Autoren	Modell	Vorteile	Einschränkungen	Anmerkungen
Buswell und Mueller (1952)	$C_a H_b O_c + \left(a - \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right) H_2O$ $\rightarrow \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4}\right) CH_4 + \left(\frac{a}{2} - \frac{b}{8} + \frac{c}{4}\right) CO_2$	Berechnung des maximalen theoretischen Gasvolumens bei vollständigem Abbau.	Werte sind nicht praxisnah.	Die biochemischen Vorgänge werden nicht berücksichtigt; Elementaranalyse erforderlich.
Boyle (1976)	$C_a H_b O_c N_d S_e + \left(a - \frac{b}{4} - \frac{c}{2} + \frac{3d}{4} + \frac{e}{2}\right) H_2O$ $\rightarrow \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3d}{8} - \frac{e}{4}\right) CH_4$ $+ \left(\frac{a}{2} - \frac{b}{8} + \frac{c}{4} + \frac{3d}{8} + \frac{e}{4}\right) CO_2$ $+ d NH_3 + e H_2S$	Schließt die Bildung von Ammoniak (NH ₃) und Schwefelwasserstoff (H ₂ S) mit ein.	Werte sind nicht praxisnah.	Die biochemischen Vorgänge werden nicht berücksichtigt; Elementaranalyse erforderlich.
Baserga (1998)	$Y_B = 790 (XF + NfE) + 700 XP + 1250 XL$ $Y_M = 395 (XF + NfE) + 497 XP + 850 XL$	Einfache Methode für alle Einsatzstoffe.	Ähnliche Werte selbst für unterschiedliche NawaRos. Keine Differenzierung zwischen den nicht oder schwer abbaubaren Fraktionen (z. B. Lignin) und den leicht abbaubaren Fraktionen (z. B. Stärke).	Für die Berechnung sind die folgenden Parameter erforderlich: TM, oTM, XP und XL.
Keymer und Schilcher (1999)	$Y_B = 790 (XF VQ_{XF} + NfE VQ_{NfE})$ $+ 700 XP VQ_{XP} + 1250 XL VQ_{XL}$ $Y_M = 395 (XF VQ_{XF} + NfE VQ_{NfE})$ $+ 497 XP VQ_{XP} + 850 XL VQ_{XL}$	Standardisierte und erprobte Laboranalytik macht das Verfahren reproduzierbar und auf viele verschiedene Futtermittel anwendbar.	VQ aus Verdauungsversuchen bei Rindern ermittelt, daher nur für Futtermittel verfügbar (nicht Gülle etc.); die berechneten Biogausbeuten unterschätzen in der Regel die in der Praxis erzielten Ausbeuten.	Berechnung der Biogausbeute anhand von Verdauungsquotienten.

Tabelle 1: Modelle zur Vorhersage des Biogas- und Methanpotenzials gemäß Gliederung (Fortsetzung)

Autoren	Modell	Vorteile	Einschränkungen	Anmerkungen
Amon et al. (2007)	<p>Mais: $Y_M = 15,27 XP + 28,38 XL + 4,54 XF + 1,12 NfE$</p> <p>Getreide: $Y_M = 5,904 XP + 3,791 XF + 1,352 NfE$</p> <p>Gras: $Y_M = 2,19 XP + 31,38 XL + 1,48 XF + 1,85 NfE$</p>	Vorhersage des Gasertrages anhand empirischer Werte.	Nur für wenige Einsatzstoffe anwendbar.	Berechnung der Biogasausbeute anhand von Futtermittelanalytik und Batchtests.
Weißbach (2008)	<p>$Y_B = 0,80 FoTS$ $Y_M = 0,42 FoTS$</p> <p>Beispiele für Einsatzstoffe: Mais: $FoTS = 984 - XA - 0,47 XF - 0,00104 XF^2$</p> <p>Getreide: $FoTS = 991 - XA - 1,53 XF$</p> <p>Gras: $FoTS = 1000 - XA - 0,62 EuIOS - 0,000221 EuIOS^2$</p>	Berechnung wurde aus Laborversuchen entwickelt. Die Bestimmung ist damit häufig praxisnah.	Die Formel ist nur so gut wie die zugrunde gelegten Praxisversuche. Nicht für alle Pflanzenarten passende Formeln verfügbar.	Die fermentierbare organische Substanz wird durch chemische Analytik und Regressionsmodelle ermittelt.
Dandikas et al. (2014)	<p>$Y_B = 727 + 0,25 HC - 3,93 ADL$ $Y_M = 371 + 0,13 HC - 2,00 ADL$</p>	Artübergreifendes Modell.	Bis 10 % Schätzfehler.	Nur für NawaRo mit einem ADL-Gehalt unter 10 % TS.
Rath et al. (2015)	<p>$Y_B = 106,41 - 64,24 ADL + 33,89 HC + 97,15 XL - 28,45 RZ$</p>	Speziell für Silomais entwickelt, liefert für diesen in der Regel realistische Ergebnisse.	Nur für Frischmais anwendbar.	Berechnungsformel wurde 2016 durch Rath aktualisiert (www.biogassorten.de).

6. Zusammenfassung

Die Kenntnis des Biogaspotenzials ist eine entscheidende Größe zur Charakterisierung und Bewertung der Einsatzstoffe für Biogasanlagen. Das Biogaspotenzial kann direkt (Erfassung der Biogasproduktion während des Gärversuchs) oder indirekt (Berechnung anhand vom oTM-Abbau bzw. mittels Futtermittelanalytik und Regressionsmodellen) ermittelt werden. Viele Labore bieten unterschiedliche Verfahren zur Messung des Biogaspotenzials an. Um die Aussagekraft der Ergebnisse beurteilen zu können,


müssen die Möglichkeiten und Einschränkungen der unterschiedlichen Verfahren berücksichtigt werden. Gärversuche sind in der Regel hinsichtlich technischer Ausstattung und Versuchsdauer sehr aufwändig, liefern aber praxisnahe Ergebnisse auch für Einzelproben. Die Vorhersage des Biogaspotenzials anhand von Regressionsmodellen liefert schnelle und kostengünstige Informationen in der Praxis, allerdings nur für bestimmte Einsatzstoffe und mit potenziell erheblichem Schätzfehler.

7. Quellen

- ▶ Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Machmüller, A., Hopfner-Sixt, K., Bodiroza, V., Hrbek, R., Friedel, J., Pötsch, E., Wagenristl, H., Schreiner, M., Zollitsch, W., 2007. Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. *Bioresource Technology* 98, 3204–3212. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.07.007>
- ▶ Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J.L., Guwy, A.J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., van Lier, J.B., 2009. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Sci. Technol.* 59, 927–934. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>
- ▶ Baserga, U., 1998. Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen. Biogas aus organischen Reststoffen und Energiegras. *Agricultural co-digestion biogas plants. Biogas from organic waste and energy grass. FAT-Berichte Nr. 512.*
- ▶ Boyle, W.C., 1976. Energy recovery from sanitary landfills – a review. Schlegel, H. G. and S. Barnea (Hrsg.): *Microbial Energy Conversion.* Oxford Pergamon Press 119–138.
- ▶ Buswell, A.M., Mueller, H.F., 1952. Mechanism of Methane Fermentation. *Ind. Eng. Chem.* 44, 550–552. <https://doi.org/10.1021/ie50507a033>
- ▶ Dandikas, V., Heuwinkel, H., Lichti, F., Drewes, J.E., Koch, K., 2014. Correlation between biogas yield and chemical composition of energy crops. *Bioresource Technology* 174, 316–320. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.019>
- ▶ Hafner, S.D., Rennuit, C., Triolo, J.M., Richards, B.K., 2015. Validation of a simple gravimetric method for measuring biogas production in laboratory experiments. *Biomass and Bioenergy* 83, 297–301. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.10.003>
- ▶ Henkelmann, G., Fischer-Kaiser, K., 2014. Die Qualität von Faseranalysen und Untersuchungen im Umfeld von Biogasanlagen, in: *Kongressband - Untersuchen, Bewerten, Beraten, Forschen: 125 Jahre VDLUFA Im Dienste von Landwirtschaft, Umwelt - Und Verbraucherschutz.* VDLUFA-Verlag, Darmstadt, pp. 845–853.
- ▶ Himanshu, H., Voelklein, M.A., Murphy, J.D., Grant, J., O’Kiely, P., 2017. Factors controlling head-space pressure in a manual manometric BMP method can be used to produce a methane output comparable to AMPTS. *Bioresource Technology* 238, 633–642. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.088>

- ▶ Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., Bougrier, C., Buffière, P., Carballa, M., Wilde, V. de, Ebertseder, F., Fernández, B., Ficara, E., Fotidis, I., Frigon, J.-C., Lacos, H.F. de, Ghasimi, D.S.M., Hack, G., Hartel, M., Heerenklage, J., Horvath, I.S., Jenicek, P., Koch, K., Krautwald, J., Lizasoain, J., Liu, J., Mosberger, L., Nistor, M., Oechsner, H., Oliveira, J.V., Paterson, M., Paus, A., Pommier, S., Porqueddu, I., Raposo, F., Ribeiro, T., Pfund, F.R., Strömberg, S., Torrijos, M., Eekert, M. van, Lier, J. van, Wedwitschka, H., Wierinck, I., 2016. Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology* 74, 2515–2522. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>
- ▶ Justesen, C.G., Astals, S., Mortensen, J.R., Thorsen, R., Koch, K., Weinrich, S., Triolo, J.M., Hafner, S.D., 2019. Development and Validation of a Low-Cost Gas Density Method for Measuring Biochemical Methane Potential (BMP). *Water* 11, 2431. <https://doi.org/10.3390/w11122431>
- ▶ Keymer, U., Schilcher, A., 1999. Überlegungen zur Errechnung theoretischer Gasausbeuten vergärbare Substrate in Biogasanlagen. Considerations for calculating the theoretical gas yield of digestible substrates for biogas plants. *Landtechnik-Bericht Nr. 32*.
- ▶ Post, M., 2017. Bestimmung der Gasausbeute von Materialien bei der anaeroben Vergärung. Patentnummer: DE102016107964.
- ▶ Raposo, F., Fernández-Cegrí, V., De la Rubia, M. a., Borja, R., Béline, F., Cavinato, C., Demirer, G., Fernández, B., Fernández-Polanco, M., Frigon, J. c., Ganesh, R., Kaparaju, P., Koubova, J., Méndez, R., Menin, G., Peene, A., Scherer, P., Torrijos, M., Uellendahl, H., Wierinck, I., de Wilde, V., 2011. Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 86, 1088–1098. <https://doi.org/10.1002/jctb.2622>
- ▶ Rath, J., Heuwinkel, H., Herrmann, A., 2013. Specific Biogas Yield of Maize Can Be Predicted by the Interaction of Four Biochemical Constituents. *Bioenerg. Res.* 6, 939–952. <https://doi.org/10.1007/s12155-013-9318-3>
- ▶ Rath, J., Heuwinkel, H., Taube, F., Herrmann, A., 2015. Predicting Specific Biogas Yield of Maize-Validation of Different Model Approaches. *Bioenerg. Res.* 8, 832–842. <https://doi.org/10.1007/s12155-014-9562-1>
- ▶ VDI 4630, 2016. Richtlinie VDI 4630 - Vergärung organischer Stoffe Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. Verein Deutscher Ingenieure.
- ▶ VDLUFA, 2011. Methodenbuch VII Umweltanalytik - Bestimmung der Biogas- und Methanausbeute in Gärtests. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten.
- ▶ Weißbach, F., 2008. Zur Bewertung des Gasbildungspotenzials von nachwachsenden Rohstoffen. *Landtechnik* 63, 356–358.

Zitiervorlage: Dandikas, V., Lebuhn, M., Post, M., Fritz, M., Koch, K. (2020): Biogasausbeute - Erklärung verschiedener Methoden und Tests zur Bestimmung. In: *Biogas Forum Bayern, bif16*, Hrsg. ALB Bayern e.V., <https://www.biogas-forum-bayern.de/bif16>, Stand [Abrufdatum].



Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und
Landwirtschaftliches Bauwesen (ALB)
in Bayern e.V.

Vöttinger Straße 36, 85354 Freising

Telefon: 08161 / 71-3460

Telefax: 08161 / 71-5307

E-Mail: info@alb-bayern.de

Internet: www.alb-bayern.de