

Einfache und verlässliche Berechnung des oTS-Abbaugrades in Biogasanlagen



www.biogas-forum-bayern.de/bif23

Biogas Forum Bayern, Verfasser:

Dr. Konrad Koch
Technische Universität München

Inhaltsverzeichnis

Seite

Zusammenfassung.....	4
1. Online-Anwendung zur Bewertung der Effizienz von Biogasanlagen	4
2. Problemstellung	4
3. Massenverlust über entstehendes Biogas bei der Vergärung von Gülle	5
4. Massenverlust über entstehendes Biogas bei der Vergärung von Grassilage	6
5. Folgerung, Definition der problematischen Parameter.....	7
6. Lösungsansatz	7
7. Induktive Herleitung.....	8
8. Beispiel	10
9. Schlussbemerkungen	10
10. Weiterführende Literatur	11

Zusammenfassung

Der Massenverlust über entstehendes Biogas und Wasserverdunstung ist bei Einsatzstoffen mit einer hohen Energiedichte nicht zu vernachlässigen. Die oTS-Konzentrationen in Input und Output sind wegen der unterschiedlichen Bezugsgröße nicht direkt vergleichbar. Dies erschwert die Erstellung belastbarer Bilanzen deutlich und kann verfälschte Ergebnisse liefern.

Alternativ kann die Effizienz einer Anlage auch über den oTS-Abbaugrad ermittelt werden, wobei lediglich der oTS-Gehalt im Input und Output als Eingangsgrößen nötig sind. Bedingung ist jedoch, dass sich die Anlage in einem Gleichgewichtszustand („steady state“) befindet und ideal durchmischt ist

1. Online-Anwendung zur Bewertung der Effizienz von Biogasanlagen

Auf der Homepage der ALB Bayern findet sich eine Online-Anwendung zur Berechnung des Abbaugrades organischer Substanz:

https://www.alb-bayern.de/De/Biogas/bauen-bewaessern-biogas_OTSAbaugradBiogas.html

2. Problemstellung

Die Steigerung der Effizienz einer Biogasanlage ist eine stetige Herausforderung für den Anlagenbetreiber. Sollen beispielsweise die Auswirkungen der Zugabe von Prozesshilfsstoffen (z.B. Enzyme) oder einer Vorbehandlung der Einsatzstoffe (z.B. mittels mechanischer Zerkleinerung) auf die Effizienz der Biogasanlage abgeschätzt werden (Kosten-Nutzen-Analyse), sollte die Effizienz der Anlage vor und nach der Maßnahme mit einer einfachen und verlässlichen Methode beurteilt werden.

Zur Bewertung der Effizienz der Biogasanlage wird häufig die erzeugte elektrische Leistung ins Verhältnis zum erwarteten spezifischen Methanertrag aus den eingesetzten Einsatzstoffen gesetzt. Während die Stromerzeugung sehr zuverlässig gemessen wird, ist die Erfassung der zugeführten Masse an Einsatzstoffen mitunter mit größeren Fehlern behaftet. Folglich kann auch der zu erwartende Methanertrag lediglich abgeschätzt werden.

Eine Alternative zur indirekten Abschätzung des Abbaugrades über den Methanertrag ist die Gegenüberstellung der jeweiligen Frachten an organischer Substanz in den Einsatzstoffen und im Gärrest. Zur Quantifizierung der Frachten müssen neben den Konzentrationen (z.B. in g organischer Trockensubstanz (oTS) pro m³ Einsatzstoff bzw. Gärrest) auch die entsprechenden Massen für Zu- und Ablauf bekannt sein. Die abgegebenen Massen an Gärrest werden häufig jedoch mit noch geringerer Genauigkeit als die Masse im Zulauf erfasst, wodurch sich eine Bilanzierung der Gesamtanlage mitunter sehr schwierig gestaltet.

Man könnte in erster Näherung annehmen, dass die Masse an produziertem Biogas im Verhältnis zur eingesetzten Masse an Einsatzstoffen vergleichsweise gering ist, und man folglich die jeweilige Masse von Zu- und Ablauf gleichsetzen könne. Zwei einfache Beispiele sollen veranschaulichen, dass diese Annahme nicht immer stimmt. In den Beispielen wird mit dem chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) als Bilanz-

größe gearbeitet. Dieser Parameter stammt aus dem wasserwirtschaftlichen Bereich und ist ein Maß dafür, wie viel oxidierbare Verbindungen in einer Probe vorliegen. Ähnlich wie bei Verwendung der oTS kann damit der Gehalt an organischen (und damit potenziell abbaubaren) Verbindungen abgeschätzt werden. Beide Parameter sind auch entsprechend korreliert (Koch, 2010).

Im Folgenden wird vorgestellt, wie die Effizienz der Anlage in einem alternativen Ansatz über die Bestimmung des oTS-Abbaugrads ermittelt werden kann. Dieser Wert ist gut geeignet, den Status Quo der Anlageneffizienz zu bestimmen und im Vergleich dazu Verbesserungen oder auch Verschlechterungen zu quantifizieren.

3. Massenverlust über entstehendes Biogas bei der Vergärung von Gülle

Im ersten Fall möge unsere Modellbiogasanlage mit reiner Rindergülle gefüttert werden. Der Berechnung des Massenverlustes über das entstehende Biogas sind folgende Annahmen zu Grunde gelegt:

- ▶ CSB-Konzentration der Rindergülle: 70 kg/m³;
- ▶ vereinfachend wird eine Dichte (ρ) von 1.000 kg/m³ angesetzt,

- ▶ 50 % des CSBs (35 kg/d) werden in Biogas umgewandelt,
- ▶ $CSB_{CH_4} = 4 \text{ kg}_{CSB}/\text{kg}_{CH_4}$ und $\rho_{CH_4} = 0,717 \text{ kg}/\text{m}^3$,
- ▶ parallel zu CH₄ wird im gleichen Maße auch CO₂ (Volumenverhältnis 1:1) gebildet, das keinen CSB besitzt und folglich nicht in der CSB-Bilanz auftaucht (d.h. $CSB_{CO_2} = 0 \text{ kg}_{CSB}/\text{kg}_{CO_2}$),
- ▶ $\rho_{CO_2} = 1,977 \text{ kg}/\text{m}^3$.

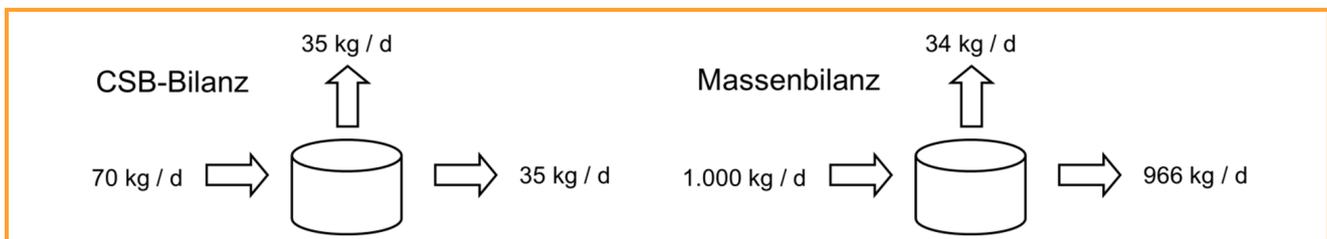


Abbildung 1: CSB-Bilanz (links) und Massenbilanz (rechts) der Modellbiogasanlage bei der Vergärung von Rindergülle

Daraus ergibt sich die CSB-Bilanz der Modellbiogasanlage (Abbildung 1 links). Die abgebaute Masse an CSB wird komplett in Methan umgewandelt. Folglich kann zunächst die entstehende Masse an Methan berechnet werden, indem die täglich abgebaute Masse an CSB (35 kg_{CSB}/d) durch den CSB von Methan (4 kg_{CSB}/kg_{CH₄}) geteilt wird. Anhand dieser kann dann über das

Dichte-Verhältnis auch die Masse an CO₂ ermittelt werden, welches ja im gleichen Volumenverhältnis zu Methan entsteht, jedoch aufgrund der höheren Dichte eine höhere Masse darstellt (24 kg/d vs. 9 kg/d). Der Massenverlust über das entstehende Biogas ergibt sich folglich zu:

Formel 1:

$$m_{\text{Biogas}} = m_{\text{CH}_4} + m_{\text{CO}_2} = \frac{35 \frac{\text{kg}_{\text{CSB}}}{\text{d}}}{4 \frac{\text{kg}_{\text{CSB}}}{\text{kg}_{\text{CH}_4}}} + \frac{35 \frac{\text{kg}_{\text{CSB}}}{\text{d}}}{4 \frac{\text{kg}_{\text{CSB}}}{\text{kg}_{\text{CH}_4}}} \cdot \frac{1,977 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,717 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 8,75 \frac{\text{kg}}{\text{d}} + 24,13 \frac{\text{kg}}{\text{d}} = 32,9 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

Darüber hinaus muss beachtet werden, dass mit dem Biogas auch Wasserdampf den Reaktor verlässt, da das Biogas in der Regel wasserdampfgesättigt ist. Mit Hilfe der Magnus-Gleichung kann die Masse an Wasserdampf pro m³ entstehenden Biogases in Abhängigkeit von der Gärtemperatur ermittelt werden (Tabelle 1). Dazu werden die jeweiligen Massen in Volumina umgerechnet (12,2 m³ + 12,2 m³ = 24,4 m³) und dann mit der Masse an Wasserdampf für 40°C (0,051 kg/m³) multipliziert. Für

die mesophil bei 40°C betriebene Modellbiogasanlage entspricht dies einem zusätzlichen Massenverlust durch Wasserdampf von etwa 1,2 kg. Auch diese Masse fällt also kaum ins Gewicht.

Unter den angegebenen Rahmenbedingungen beträgt der Massenverlust über entstehendes Biogas weniger als 4 % (Abbildung 1 rechts). In diesem Fall können Zulauf und Ablauf massenmäßig in erster Näherung gleichgesetzt werden.

Tabelle 1: Mit Biogas abgeführte Wasserdampfmassen in Abhängigkeit von der Gärtemperatur

Temperatur [°C]	10	40	55
Masse and Wasserdampf [kg/m ³]	0,009	0,051	0,104

4. Massenverlust über entstehendes Biogas bei der Vergärung von Grassilage

Im zweiten Fall möge die Modellbiogasanlage mit Grassilage gefüttert werden. Bei ansonsten identischen Annahmen unterscheiden sich die Grassilage von der Gülle bezüglich ihrer Energiedichte (ausgedrückt als CSB) sowie dem erreichbaren Abbaugrad:

- ▶ CSB-Konzentration der Grassilage: 500 kg/m³ und
- ▶ 80 % des CSBs (400 kg/d) werden in Biogas umgewandelt.

Analog zum ersten Fall ergibt sich die erzeugte Biogasmasse zu:

Formel 2:

$$m_{\text{Biogas}} = m_{\text{CH}_4} + m_{\text{CO}_2} = \frac{400 \frac{\text{kg}_{\text{CSB}}}{\text{d}}}{4 \frac{\text{kg}_{\text{CSB}}}{\text{kg}_{\text{CH}_4}}} \cdot \left(1 + \frac{1,977 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,717 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right) = 376 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

Dazu kommen noch etwa 14,2 kg an Wasserdampf im Biogas. Folglich beläuft sich der Massenverlust über den Gaspfad auf insgesamt 390 kg der zugeführten 1.000 kg (Abbildung 2 rechts). Mit einem fast 40-prozentigen Massenverlust über produziert Biogas können in die-

sem Fall Zulauf- und Ablaufmasse keinesfalls gleichgesetzt werden. Bei der Verwendung von Einsatzstoffen mit einer noch höheren Energiedichte bzw. Abbaubarkeit (z.B. Maissilage), kann dieser Wert sogar noch höher ausfallen.

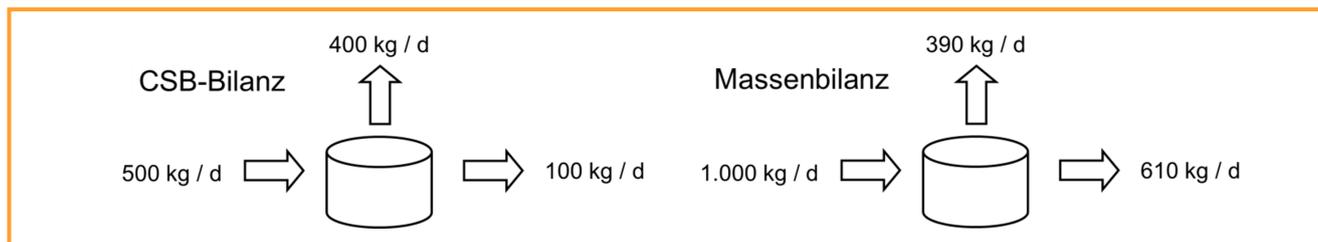


Abbildung 2: CSB-Bilanz (links) und Massenbilanz (rechts) der Modellbiogasanlage bei der Vergärung von Grassilage

5. Folgerung, Definition der problematischen Parameter

Anhand dieser zwei einfachen Beispiele wurde deutlich, dass insbesondere beim Einsatz von Einsatzstoffen mit hoher Energiedichte bzw. relativ geringem Wassergehalt sowie guter Vergärbarkeit der Massenverlust über das entstehende Biogas nicht zu vernachlässigen ist.

Das bedeutet aber auch, dass sich ermittelte Konzentrationen (z.B. des oTS-Gehaltes) im Zu- und im Ablauf auf eine jeweils andere Bezugsgröße beziehen und folglich nicht direkt miteinander vergleichbar sind. Beträgt beispielsweise der oTS-Gehalt der Grassilage der Modellbiogasanlage 90 % (bzw. $0,90 \text{ kg}_{\text{oTS}}/\text{kg}_{\text{TS}}$), und weist

der Gärrest einen oTS-Gehalt von 75 % (bzw. $0,75 \text{ kg}_{\text{oTS}}/\text{kg}_{\text{TS}}$) auf, dann beträgt der oTS-Abbaugrad eben nicht nur 15 %, da sich der jeweilige oTS-Gehalt auf eine veränderte Bezugsgröße, nämlich den Trockensubstanzgehalt, bezieht.

Eine Möglichkeit zur Quantifizierung ist die Aufstellung einer Bilanz. Dazu müssten jedoch mindestens zwei der drei Stoffströme (Zulauf, Ablauf Gärrest, Ablauf Biogas) quantifiziert werden, was sich in der Praxis häufig als schwierig erweist.

6. Lösungsansatz

Alternativ zur Erstellung einer Bilanz kann der Abbaugrad auch über eine Bezugsgröße ermittelt werden, die sich - im Gegensatz zur organischen Substanz - während des Prozesses nicht bzw. kaum ändert. Dazu veranschaulichen wir uns zunächst, wie sämtliche Einsatzstoffe vereinfacht charakterisiert sind (Abbildung 3).

Sowohl die organische Substanz als auch das vorhandene Wasser sind maßgeblich am Stoffumsatz im System beteiligt sind und können folglich nicht als konstant angesehen werden. Anders sieht dies bei den anorganischen Bestandteilen aus. Diese Fraktion besteht v.a. aus den nicht flüchtigen Bestandteilen der Pflanzen (z.B. Mineralien, Metallatome), bei Ernte und Bergung entstehenden Verunreinigungen

sowie ggf. anorganischen Prozesshilfsmitteln. Solche anorganische Stoffe können nicht in Biogas umgewandelt werden und können folglich das System auch nicht über den Gaspfad verlassen.

Alternativ wären auch weitere Bezugsgrößen denkbar, die anaerob ebenfalls nicht oder nur unwesentlich abgebaut werden, wie beispielsweise der Gehalt an Lignin. Die folgenden Überlegungen beziehen sich auf den Anteil an Asche, können aber problemlos auch auf andere Bezugsgrößen übertragen werden.

Geht man von einem voll-durchmischten Reaktor ohne nennenswerte Akkumulationen (Ablagerungen) im stabilen Betriebszustand

(„steady state“, keine Prozessstörung) aus, so muss die pro Zeiteinheit zugeführte Masse an anorganischen Bestandteilen in Zu- und Ablauf identisch sein.

In Ermangelung belastbarer Bilanzen kann also der Gehalt an anorganischer Substanz als Be-

zugsgröße zu Ermittlung des Abbaugrades dienen. Diese Herangehensweise soll beispielhaft anhand der Modellbiogasanlage auf Basis von Grassilage erfolgen. Aufbauend auf das Rechenbeispiel wird abschließend eine allgemeingültige (Voraussetzung: störungsfreier, stabiler Betrieb) Formel hergeleitet.

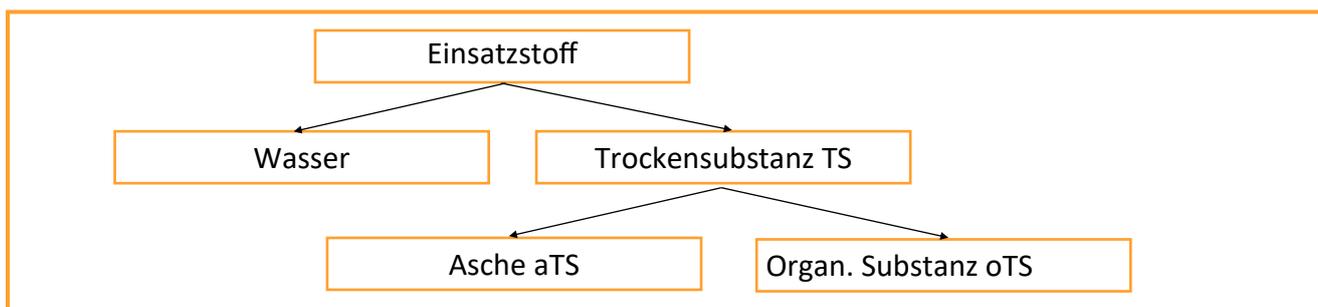


Abbildung 3: Vereinfachte Charakterisierung von Einsatzstoffen

7. Induktive Herleitung

An dieser Stelle kommen wir nun wieder auf die bereits erwähnten oTS-Gehalte unserer Modellbiogasanlage mit Grassilage zurück:

- ▶ oTS-Gehalt der Grassilage: 90 %
(bzw. 0,90 kg_{oTS}/kg_{TS}),
- ▶ oTS-Gehalt des Gärrests: 75 %
(bzw. 0,75 kg_{oTS}/kg_{TS}).

Außerdem nehmen wir an, dass sich die Anlage in einem konstanten Betriebszustand (d.h. konstante Fütterung, eingefahrene Biologie, konstante Gärrestqualität) befindet und anorganische Bestandteile weder im System nennenswert gebildet (z.B. durch Korrosion) noch durch das System entzogen werden (z.B. durch Ablagerungen).

Verfolgen wir dazu, was mit einem kg Trockensubstanz der Grassilage in unserer Anlage passiert. Dieser Wert ist vollkommen frei gewählt und hat keinen Einfluss auf das Ergebnis.

1 kg TS der Silage bestehen aus 900 g organischer Trockensubstanz (oTS oder auch „Glühverlust“) und 100 g Asche bzw. anorganischer Trockensubstanz (aTS oder auch „Glührückstand“). Während der Vergärung wird ein Teil des oTS abgebaut. Wie oben ausgeführt wird aTS weder abgebaut noch gebildet und kann als konstant angesehen werden. Somit stellen die 100 g aTS nach erfolgtem oTS-Abbau 25 % (100 % - 75 %) des noch vorhandenen TS im Gärrest dar. Wenn 100 g aTS 25 % der TS im Gärrest sind, dann beträgt die Trockenmasse im Gärrest 400 g (100 %) und die organische Trockenmasse 300 g (75 %). Folglich wurden von den anfänglichen 1.000 g TS, 600 g umgesetzt. Nun kann der Abbaugrad über die jeweilige Masse an oTS im In- und Output errechnet werden:

Formel 3:

$$\text{Abbaugrad}_{\text{oTS}} = \frac{\text{Input-Output}}{\text{Input}} = \frac{0.90 \cdot 1.000 \text{ g} - 0.75 \cdot 400 \text{ g}}{0.90 \cdot 1.000 \text{ g}} = \frac{900 \text{ g} - 300 \text{ g}}{900 \text{ g}} = 66,7 \%$$

Dieser Wert von knapp 67 % spiegelt den erreichten Abbaugrad unserer Modellbiogasanlage deutlich besser wieder als die anfänglich erwähnten 15 %.

Ausgehend von den Zahlenwerten kann eine allgemeingültige Formel hergeleitet werden:

$$\begin{aligned} \text{Abbaugrad}_{\text{oTS}} &= \frac{0.90 \cdot 1.000 \text{ g} - 0.75 \cdot 400 \text{ g}}{0.90 \cdot 1.000 \text{ g}} = \frac{0.90 \cdot 1.000 \text{ g} - 0.75 \cdot \frac{100 \text{ g}}{0.25}}{0.90 \cdot 1.000 \text{ g}} \\ &= 1 - \frac{0.75 \cdot 100 \text{ g}}{0.25 \cdot 0.90 \cdot 1.000 \text{ g}} = 1 - \frac{0.75 \cdot 0.10 \cdot 1.000 \text{ g}}{0.25 \cdot 0.90 \cdot 1.000 \text{ g}} \end{aligned}$$

Offensichtlich hat der gewählte Bezugswert (1 kg) keinen Einfluss auf das Ergebnis. Werden die im Beispiel verwendeten Zahlenwerte durch

die Parameter ersetzt, so ergibt sich eine allgemeingültige Formel zur Berechnung des Abbaugrades zu:

Formel 4:

$$\text{Abbaugrad}_{\text{oTS}} = 1 - \frac{\text{oTS}_{\text{Output}} \cdot (1 - \text{oTS}_{\text{Input}})}{\text{oTS}_{\text{Input}} \cdot (1 - \text{oTS}_{\text{Output}})}$$

Wobei $\text{oTS}_{\text{Input}}$ der oTS-Gehalt des Inputs bzw. der Einsatzstoffe [% bzw. $\text{kg}_{\text{oTS}}/\text{kg}_{\text{TS}}$] und $\text{oTS}_{\text{Output}}$ der oTS-Gehalt der Outputs bzw. des Gärrestes [% bzw. $\text{kg}_{\text{oTS}}/\text{kg}_{\text{TS}}$] ist. Mit Hilfe dieser Formel kann nun für beliebige oTS-Gehalte der oTS-Abbaugrad berechnet werden.

Die Bestimmung des oTS-Abbaugrades eignet sich also dazu, die aktuelle Anlageneffizienz zu ermitteln und Veränderungen im Vergleich dazu darzustellen. Sie bietet die Möglichkeit, Verbesserungen bzw. Verschlechterungen der Abbaueffizienz zu erkennen, die z.B. bei Optimierungsmaßnahmen erwartet werden oder bei Prozessstörungen zu befürchten sind.

8. Beispiel

Nehmen wir an, Einsatzstoffe und Gärrest einer beliebigen Biogasanlage seien wie in Tabelle 2 charakterisiert. Die Ermittlung des oTS-Gehaltes

der Einsatzstoffmischung erfolgt über ein gewichtetes Mittel:

$$oTS_{\text{Input}} = \frac{100t_{\text{FM}} \cdot 0,3 \frac{t_{\text{TS}}}{t_{\text{FM}}} \cdot 0,9 \frac{t_{\text{oTS}}}{t_{\text{TS}}} + 50t_{\text{FM}} \cdot 0,1 \frac{t_{\text{TS}}}{t_{\text{FM}}} \cdot 0,8 \frac{t_{\text{oTS}}}{t_{\text{TS}}} + 20t_{\text{FM}} \cdot 0,35 \frac{t_{\text{TS}}}{t_{\text{FM}}} \cdot 0,8 \frac{t_{\text{oTS}}}{t_{\text{TS}}}}{100t_{\text{FM}} \cdot 0,3 \frac{t_{\text{TS}}}{t_{\text{FM}}} + 50t_{\text{FM}} \cdot 0,1 \frac{t_{\text{TS}}}{t_{\text{FM}}} + 20t_{\text{FM}} \cdot 0,35 \frac{t_{\text{TS}}}{t_{\text{FM}}}} = 87 \%$$

Tabelle 2: Charakteristik von Einsatzstoffen und Gärrest einer Biogasanlage über einen Bilanzzeitraum von einem Monat

		Eingesetzte Menge [t FM]	TS-Gehalt [% FM]	Glühverlust [% TS]
Einsatzstoff	Maissilage	100	30	90
	Rindergülle	50	10	80
	Grassilage	20	35	80
Gärrest		—	8	70

Mit den entsprechenden oTS-Gehalten von 87 % im Input und von 70 % in Output berechnet sich der oTS-Abbaugrad zu 65 %.

9. Schlussbemerkungen

Der erzielbare oTS-Abbaugrad ist eine anlagen-spezifische Größe und hängt neben der Fahrweise (Gärtemperatur, Raumbelastung, Verweilzeit, Anzahl Gärbehälter, etc.) in erster Linie von den verwendeten Einsatzstoffen ab. Eine pauschale Angabe entsprechender Zielwerte ist daher wenig zielführend. Ähnlich dem sogenannten FOS/TAC-Wert empfiehlt sich daher eine regelmäßige Bestimmung unter identischen Bedingungen und die Beobachtung der zeitlichen Entwicklung.

Allerdings sollte ein hoher oTS-Abbaugrad auch mit einer guten Methanausbeute einhergehen. Eine sinkende Methanausbeute bei gleichzeitig hohem oTS-Abbaugrad könnte aufgrund der systembedingten Trägheit des oTS-Abbaugrades auf eine Prozessübersäuerung hindeuten. Weiterführende Hinweise zur prozessbiologischen Störungen sind der Fachinformation „Prozessbiologische Störungen in NawaRo- und Gülleanlagen: Symptome, Ursachen und mögliche Lösungsansätze“ zu entnehmen.

10. Weiterführende Literatur

- ▶ Koch, K., 2010. Verfahrenstechnische Untersuchungen und mathematische Modellierung der Prozesse bei der Vergärung von Grassilage. Dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft.
- ▶ Koch, K., 2015. Calculating the degree of degradation of the volatile solids in continuously operated bioreactors. *Biomass Bioenergy* 74, 79–83.

Zitiervorlage: K. Koch (2021): Einfache und verlässliche Berechnung des oTS-Abbaugrades in Biogasanlagen. In: Biogas Forum Bayern, <https://www.biogas-forum-bayern.de/bif23>, Hrsg. ALB Bayern e.V., Stand [Abrufdatum].

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

Vöttinger Straße 36, 85354 Freising

Telefon: 08161 / 887-0078

Telefax: 08161 / 887-3957

E-Mail: info@alb-bayern.de

Internet: www.alb-bayern.de