

Werden die bis zum jeweiligen Zeitpunkt entwickelten Methanmengen als Bruchteil (%) der erzielbaren Methanmenge (Endgasausbeute) aufgetragen, **Bild 15**, so zeigt sich, daß innerhalb von 3 Wochen 60 bis 80 % der erzielbaren Methanmenge freigesetzt worden sind.

Berücksichtigt man die in den Batch-Versuchen für die Methanbakterien geringeren Umsatzleistungen im Vergleich zu Durchlaufversuchen, könnten für grüne Pflanzen Verweilzeiten von 5 bis 8 Tagen in mesophil betriebenen Fermentern ausreichend sein. Für Rindermist bestätigt sich dagegen auch durch die Batch-Versuche, daß Verweilzeiten von etwa 3 Wochen, wie sie in der Praxis anzutreffen sind, ausreichend sind.

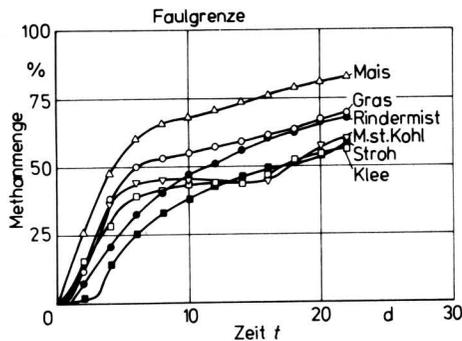


Bild 15. Methanmenge als Bruchteil der insgesamt erzielbaren Methanmenge (Endgasausbeute) in Abhängigkeit von der Zeit für verschiedene Stoffe.

5. Zusammenfassung

Für die Auslegung und den Betrieb von Biogasanlagen ist das Gärverhalten (zeitliche Gasproduktion, Endgasausbeute) der zu vergasenden organischen Stoffe von Bedeutung. Durch Gärtests kann das Gärverhalten erfaßt werden, wenn auch die Unterschiede zwischen Batch- und Durchlaufkulturen berücksichtigt werden müssen. Es wird eine Gärtestanlage mit 5 l-Fermentern beschrieben und über Versuche berichtet, in denen Rindermist, Stroh, Gras, Klee, Mais und Markstammkohl mit Rindermist-Inokulum bei unterschiedlichen Belastungsverhältnissen vergast wurden. Die Endgasausbeute an Methan bezogen auf die Masseneinheit organischer Trockensubstanz liegt für Rindermist und Stroh bei etwa 300 l/kg, für Klee, Gras und Markstammkohl bei etwa 450 l/kg und für Mais bei 600 l/kg. Nach Verweilzeiten von 22 Tagen sind 60 bis 80 % der erzielbaren Methanmenge freigesetzt. Versuchszeiträume von 30 bis 40 Tagen reichen aus, um Aussagen über die Endgasausbeute treffen zu können. Die Versuche werden fortgesetzt.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] *Badger, D.M., M.J. Bogue u. D.J. Stewart:* Biogas production from crops and organic wastes. *New Zealand Journal of Science*, Bd. 22 (1979) S. 11/20.
- [2] ● *Reinhold, F. u. W. Noack:* Laboratoriumsversuche über die Gasgewinnung aus landwirtschaftlichen Stoffen. In: *Liebmann, H.:* Gewinnung und Verwertung von Methan aus Klärschlamm und Mist. München: R. Oldenbourg, 1956.
- [3] *Tabasaran, O.:* Beim anaeroben Abbau organischer Stoffe erzielbare Gasmengen in Abhängigkeit vom Belastungsverhältnis. *Gesundheits-Ingenieur* Bd. 91 (1970) Nr. 11, S. 327/29.

Bestimmung von Kennzahlen zur Wärmeübertragung bei Flüssigmist

Von Hans W. Orth, Braunschweig-Völkenrode*)

Mitteilung aus dem Institut für Technologie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode

DK 631.862:662.767.1:536.24

Biogasanlagen werden im allgemeinen unter mesophilen oder thermophilen Bedingungen betrieben. Dies erfordert sowohl die Erwärmung des Frischsubstrates als auch die Deckung der Transmissionsverluste des Reaktors. Als Grundlage für die Auslegung der hierzu erforderlichen Wärmeaustauscher werden erste Ergebnisse bei der Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten für Flüssigmist in Rohrwärmeaustauschern mitgeteilt.

*) Dr.-Ing. H.W. Orth ist Wissenschaftlicher Oberrat im Institut für Technologie (Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Baader) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

1. Einleitung

Methanbildende Mikroorganismen-Populationen haben bekanntlich besonders günstige Lebensbedingungen bei Temperaturen im mesophilen oder im thermophilen Bereich. Biogasanlagen werden daher entweder bei ca. 35 °C oder bei ca. 55 °C betrieben. Da die Mikroorganismenaktivität nur leicht, im allgemeinen vernachlässigbar exotherm ist, muß dem Prozeß Wärme zur Substraterwärmung und zur Deckung der Wärmeverluste an die Umgebung zugeführt werden.

Zur Erzielung einer guten Energiebilanz des Gesamtverfahrens ist der Prozeßwärmeanteil möglichst gering zu halten, daher kommt der Auslegung und Anordnung der Wärmeeintragssysteme eine entsprechende Bedeutung zu.

Bisher ausgeführte Biogasanlagen verwenden zum Wärmeeintrag Wärmeaustauscher in unterschiedlichster Anordnung, Beispiele hierzu in Bild 1, wobei jeweils heißes Wasser als Wärmeträger benutzt wird. Die Verschiedenheit der Anordnungen ist zu begründen durch unterschiedliche Gewichtung von Reinigungs- und Reparaturmöglichkeiten oder durch Kombination des Wärmeaustausches mit Mischvorgängen, wobei die für das Mischen erzeugten Strömungen für den Wärmeübergang genutzt werden. Für die Auslegung von Wärmeaustauschern für Flüssigmist mit niederem Trockenmassegehalt werden sehr oft die Stoffwerte von Wasser benutzt. Bei hohen Trockenmassegehalten des Flüssigmistes ist dies wegen des anderen Strömungsverhaltens nicht mehr möglich. Aufgabe der hier in einem ersten Teil vorgestellten Arbeit ist die Ermittlung von Kenndaten als Unterlage für die Auslegung von Wärmeaustauschern bei den für Biogasprozesse zur Verwendung kommenden Substraten.

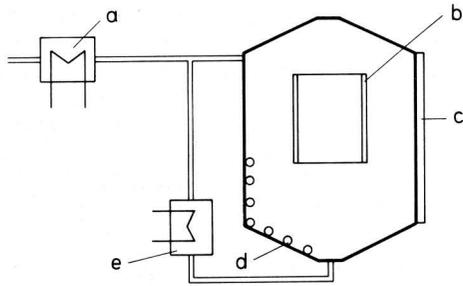


Bild 1. Beispiele für die Anordnung von Wärmeaustauschern zur Wärmezufuhr im Biogasprozeß.

- a Wärmezufuhr ins Frischsubstrat
- b Wärmezufuhr über Zentralrohr in Verbindung mit Rührwerk
- c Wärmezufuhr über Doppelmantel des Reaktors
- d Wärmezufuhr über Rohrschlangen an der inneren Reaktorwand
- e Wärmezufuhr in einen zum Rühren umgepumpten Substratstrom

2. Versuchsanstellung und Meßmethode

Wegen der einfachen Ausführung und der vielseitigen Verwendungsmöglichkeiten wurde als Wärmeaustauschersystem zunächst ein Doppelrohrwärmeaustauscher gewählt. Das Außenrohr wird mit heißem Wasser beaufschlagt, durch das innenliegende Rohr fließt der Flüssigmist. Das gesamte System wurde isoliert. Die für die Messung gewählte Anordnung zeigt Bild 2.

Meßstrecke ist ein 2 m langer gerader Wärmeaustauscher a ($d_a = 120 \text{ mm}$, $d_i = 80 \text{ mm}$), der Flüssigmist wird aus einem Speicher c über eine drehzahleinstellbare Pumpe b durch die Meßstrecke geführt und über eine Schlauchleitung in den Ausgangsbehälter rückgeführt. Die Fließgeschwindigkeit wird mit Hilfe eines induktiven Durchflüssmessers f gemessen.

Der Heizwasser-Kreislauf des Außenrohres wird durch ein thermostatgeregeltes elektrisches Heizgerät e auf jeweils konstanter Temperatur gehalten; die mittlere Strömungsgeschwindigkeit \bar{v} wird über einen Wassermengenzähler kontrolliert.

Die gewünschten Substratzustände werden vor jedem Versuch durch entsprechende Zugaben in den Speicher eingestellt.

Der Wärmeübergang wird aus Temperaturdifferenzen und Mengenstrom bestimmt. Obwohl hierbei die Bestimmung in einem der Ströme ausreicht, wurden in beiden Kreisen entsprechende Thermoelemente installiert, um Kontrollen zu ermöglichen. Außerdem wurde die Substrattemperatur im Speicher gemessen. Als Meßkreis wurde der Flüssigmistkreislauf gewählt. Während der ersten Versuche zeigte sich, daß die Differentialmethode hier bei der Bestimmung des Wärmedurchgangs wegen der relativ kurzen Meßstrecke und der damit verbundenen geringen Temperaturdifferenzen nicht zu ausreichend genauen Ergebnissen führte, vor allem bei niedrigen Geschwindigkeiten und laminarer Strömung, wenn sich ein deutliches Temperaturprofil über den Rohrquerschnitt ausbildet, Bild 3.

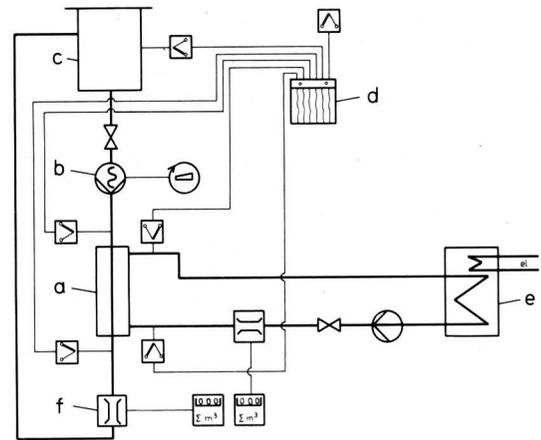


Bild 2. Schema der Versuchsanordnung.

- a Doppelrohrwärmeaustauscher
- b drehzahleinstellbare Pumpe
- c Speicher
- d Registereinrichtung
- e thermostatgeregeltes Heizgerät
- f indukt. Durchflüssmesser mit Anzeige

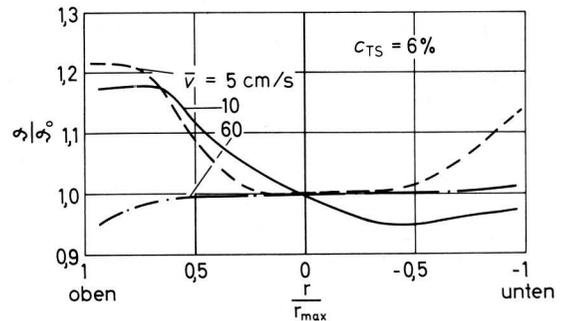


Bild 3. Temperaturprofile bei verschiedenen mittleren Strömungsgeschwindigkeiten von Flüssigmist in einem waagerechten Rohr, dargestellt als auf die Temperatur in Rohrmitte ϑ_0 bezogene Temperatur in Abhängigkeit vom auf den Rohrradius r_{max} (80 mm) bezogenen Radius.

Um mit der in Bild 2 skizzierten Anordnung zu brauchbaren Ergebnissen zu kommen, wurde die integrierende Auswertung gewählt, indem die Temperaturerhöhung des Substrates im Speicher als Maß für den Wärmeeintrag benutzt wurde. Über eine längere Versuchszeit sind ausreichend große Temperaturdifferenzen gegenüber dem Ausgangszustand zu erzielen. Nachteilig ist die zeitliche Veränderung des den Wärmefluß im Wärmeaustauscher bestimmenden Temperaturgradienten und die lange Versuchszeit. Da aber das durchlaufene Temperaturintervall auch der Temperaturveränderung in praxi entspricht, erscheint ersteres nicht schwerwiegend.

3. Versuchsauswertung und bisherige Versuchsergebnisse

Aus den an der Versuchsanlage gemessenen Temperaturen läßt sich über die Bilanzgleichung

$$Q = m_s c_s (\vartheta_2 - \vartheta_1) = k A (\bar{\vartheta}_W - \bar{\vartheta}_S) (t_2 - t_1)$$

mit

- m_s Masse des Substrats in Kreislauf und Speicher
- c_s spez. Wärmekapazität des Substrats
- ϑ_2 Substrattemperatur zur Zeit t_2

- ϑ_1 Substrattemperatur zur Zeit t_1
- k Wärmedurchgangskoeffizient
- A Übergangsfläche des Wärmeaustauschers
- ϑ_W Mittl. Wassertemperatur im Wärmeaustauscher
- ϑ_S Mittl. Substrattemperatur im Wärmeaustauscher

der Wärmedurchgangskoeffizient für das vorhandene System Wasser – Substrat (Flüssigmist) bestimmen. Der Wärmedurchgangskoeffizient enthält nach der Beziehung

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_W} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_S}$$

sowohl den Wärmeübergang vom Wasser an die Zwischenwand (α_W) als auch die Wärmeleitung in der Zwischenwand (λ) und den Wärmeübergang von der Zwischenwand an das Substrat (α_S). Eine Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten α_S für Flüssigmist kann somit erfolgen, wenn die beiden anderen Größen bekannt sind.

Die Wärmeleitfähigkeit des gewählten Werkstoffes ist bekannt; für den Wärmeübergang bei Wasser sind Gebrauchsgleichungen zur Berechnung vorhanden [1, 2].

In Vorversuchen wurden mit Wasser als zu erwärmendem Medium Meß- und Rechenwerte miteinander verglichen und eine zufriedenstellende Übereinstimmung festgestellt, so daß für die weiteren Versuche der α -Wert der heizenden Seite als bekannt vorausgesetzt werden konnte.

In den ersten Versuchsreihen war der Einfluß der mittleren Substratgeschwindigkeit \bar{v} auf den Wärmeübergang zu untersuchen. Für Rinderflüssigmist mit einem Trockenmassegehalt $c_{TS} = 6\%$ zeigt Bild 4 diesen Einfluß.

Zur dimensionslosen Darstellung in Form der Nusselt-Zahl

$$Nu = \frac{\alpha_s d_i}{\lambda}$$

wurde für Flüssigmist die Wärmeleitfähigkeit des Wassers angenommen. Die Streuung der bisherigen Meßwerte kann durch den schraffierten Bereich dargestellt werden. Ein Einfluß der unterschiedlichen Wassergeschwindigkeit im Außenmantel ist nicht eindeutig festzustellen – er dürfte nach der Theorie auch nicht vorhanden sein –, auch wenn bei höheren Geschwindigkeiten eine Tendenz zu höheren α -Werten sich bei den wenigen vorhandenen Werten andeutet.

Mit wachsender Substratgeschwindigkeit nimmt der Wärmeübergang überproportional zu.

Da insbesondere der Bereich kleiner Strömungsgeschwindigkeiten für die Kombination Wärmeaustauschen – Mischen und für die Wärmerückgewinnung von Interesse ist, wurden vorrangig für diesen Bereich Versuche angesetzt.

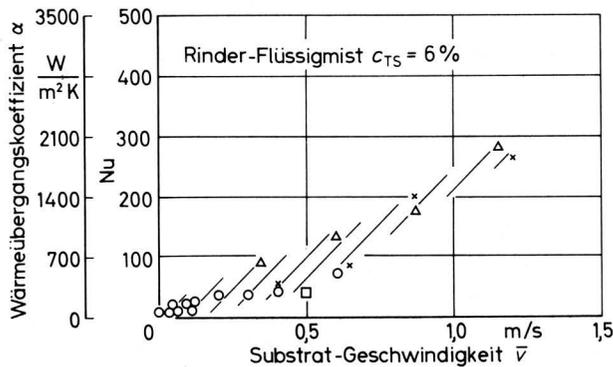


Bild 4. Wärmeübergangskoeffizient und Nusselt-Zahl von Rinder-Flüssigmist in Abhängigkeit von der mittleren Substratgeschwindigkeit.

- △ Versuchsreihe 1, Geschwindigkeit des Heizwassers $\bar{v} = 0,4$ m/s
- Versuchsreihe 3, Geschwindigkeit des Heizwassers $\bar{v} = 0,4$ m/s
- x Versuchsreihe 2, Geschwindigkeit des Heizwassers $\bar{v} = 0,2$ m/s

Bild 5 verdeutlicht die Ergebnisse für diesen Bereich in doppelt-logarithmischer Auftragung. Die niedrigen Werte bei kleinen Geschwindigkeiten ($\bar{v} \rightarrow 0$) weisen aus, daß für die Wärmerückgewinnung aus ausgegorenem Substrat nennenswerte übertragene Wärmemengen nur über große Flächen oder lange Austauschzeiten zu erzielen sind. Die für ruhende Flüssigkeit extrapolierten Daten sind in Übereinstimmung mit eigenen früher durchgeführten Versuchen sowie Angaben von Mills [3].

Im Vergleich mit Werten von Wasser werden bei Flüssigmist bei gleichen Strömungsgeschwindigkeiten etwa 50–60% niedrigere Werte des Wärmeübergangskoeffizienten erreicht.

Dieser Vergleich ist jedoch nur bedingt zulässig, da Flüssigmist aufgrund seiner größeren Zähigkeit ein ganz anderes Strömungsverhalten aufweist. Die Bestimmung der Viskosität bzw. der Fließkurven für Flüssigmist ist verschiedentlich mit recht unterschiedlichen Ergebnissen versucht worden [4, 5].

Zur dimensionslosen Darstellung unter Einbeziehung von Geschwindigkeits-, aber auch Temperatureinflüssen sind weitere Arbeiten erforderlich, z.B. um eine für diesen Anwendungsbereich "repräsentative" Zähigkeit für Flüssigmist zu bestimmen (s. z.B. [2, 6]). Diese Zähigkeit wird sicherlich auch vom Trockenmassegehalt und von der Partikellänge dieser Trockenmasse beeinflusst.

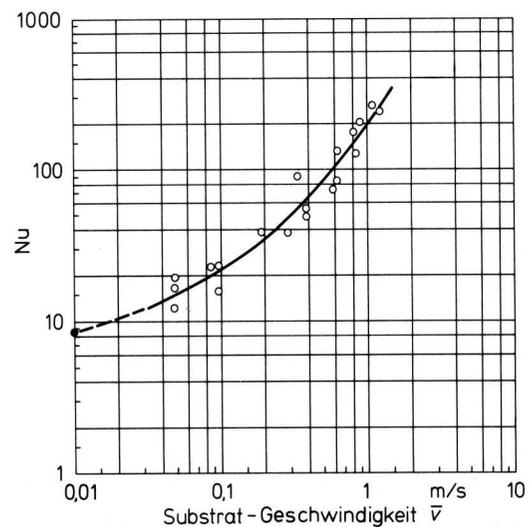


Bild 5. Nusselt-Zahl in Abhängigkeit von der mittleren Substratgeschwindigkeit für Rinder-Flüssigmist mit 6% Trockensubstanzgehalt.

- Meßwert bei ruhendem Substrat

Der erwartete Einfluß des Trockenmassegehaltes auf den Wärmeübergangskoeffizienten konnte in ersten Versuchsreihen nicht festgestellt werden, **Bild 6**. Hierbei wurde Rinderflüssigmist mit einem Trockenmassegehalt $c_{TS} = 9,5\%$ durch Zugabe von Wasser auf die entsprechend niedrigeren Trockenmassegehalte verdünnt.

Eine vertiefende Untersuchung unter Einbezug auch faseriger Flüssigmistbestandteile wie Einstreu scheint erforderlich. Ansätze aus anderen Bereichen der Verfahrenstechnik bei nichtnewtonischen Flüssigkeiten (s. z.B. [7, 8]) sind bezüglich einer Übertragbarkeit zu prüfen.

In den bisherigen Versuchen konnte auch bei erhöhten Heiztemperaturen (bis ca. 100 °C) ein Verkleben der Wärmeaustauscherflächen nicht festgestellt werden, hierzu waren sicherlich auch die jeweiligen Versuchszeiten von wenigen Tagen zu kurz.

Angaben aus der Praxis bezüglich des Verklebens von Wärmeaustauscherflächen und der Verschlechterung der Wärmeübertragung sind widersprüchlich, sie werden bedingt sein durch die Konstruktion des beobachteten Wärmeaustauschers und die Betriebsweise, z.B. ob Flächen teilweise austrocknen können. Auch dieser Effekt muß weiter beobachtet und untersucht werden, da hierdurch die vorher gemessenen Übergangswerte nicht mehr zutreffen könnten.

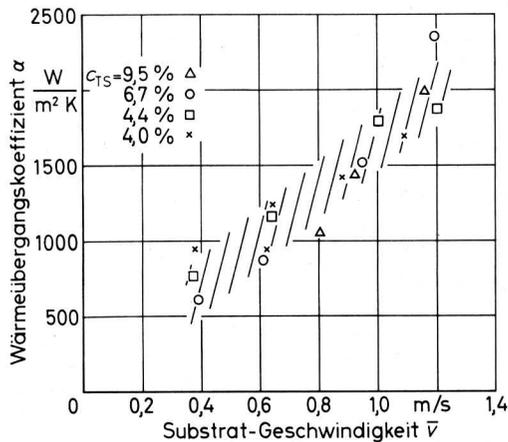


Bild 6. Wärmeübergangskoeffizient für Flüssigmist in Abhängigkeit von der mittleren Substratgeschwindigkeit bei verschiedenen Trockensubstanzgehalten.

4. Zusammenfassung

Zur Auslegung von Wärmeaustauschern, die zur Erwärmung von Flüssigmist in Biogasanlagen, aber auch zum Wärmezug z.B. aus belüftetem Flüssigmist zu Heizzwecken eingesetzt werden, ist die Kenntnis der Wärmeübergangskoeffizienten für Flüssigmist erforderlich.

Die Messungen ergaben aufgrund der größeren Zähigkeit für Flüssigmist kleinere Wärmeübergangskoeffizienten als für Wasser. Insbesondere bei kleinen Substratgeschwindigkeiten, im Extremfall bei ruhendem Substrat, sind die Werte sehr klein. Da dieser Bereich vorzugsweise für die Wärmerückgewinnung in Betracht zu ziehen ist, sind also entsprechend große Wärmeaustauscherflächen oder Austauschzeiten erforderlich.

Ein Einfluß des Trockenmassegehalts konnte entgegen den Erwartungen bisher nicht festgestellt werden. Zur dimensionslosen und damit möglichst allgemeingültigen Darstellung von Ergebnissen sind weitere Arbeiten zur Bestimmung einer "repräsentativen" Zähigkeit sowie Vergleiche mit Werten ähnlicher Stoffe aus anderen Bereichen der Verfahrenstechnik erforderlich.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] ●Hansen, H.: Wärmeübertragung im Gegenstrom, Gleichstrom und Kreuzstrom. 2. Aufl. Berlin: Springer-Verlag 1976.
- [2] ●VDI: VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1974.
- [3] Mills, P.: Minimisation of energy input requirements of an anaerobic digester. Agricultural Wastes Bd. 1 (1979) Nr. 1, S. 57/66.
- [4] Lommatsch, R.: Rheologische Untersuchungen an Rindergülle als Beitrag zur Mechanisierung der Güllewirtschaft. Diss. Univ. Leipzig, 1968.
- [5] Stuhmann, H.: Analytische Betrachtungen und modelltheoretische Untersuchungen zur Bestimmung der optimalen Kanalabmessungen beim Flüssigmistverfahren. Forschungsbericht Agrartechnik der MEG, Nr. 41, Gießen, 1979.
- [6] Hoffmann, L., P. Schümmer u. H. Schwerdt: Strömung viskoelastischer Flüssigkeiten im Ringspalt. Rheol. Acta Bd. 14 (1975) S. 626/30.
- [7] Chmiel, H.: Wärmeübergang in der turbulenten Rohrströmung viskoelastischer Flüssigkeiten. Diss. RWTH Aachen 1971.
- [8] Kipke, K.: Begasen von nichtnewtonschen Flüssigkeiten. BMFT-Forschungsbericht, Bioreaktor VII, Mai 1980.

Erste Erfahrungen mit einem vollständig gefüllten, vertikal durchströmten Biogasgenerator

Von Wolfgang Baader, Braunschweig-Völkenrode*)

Mitteilung aus dem Institut für Technologie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode

DK 631.862:662.767.1

Das Interesse an der anaeroben Gärung, als einer der Möglichkeiten, Energie aus organischen Stoffen bereitzustellen, wird in Zukunft zunehmen. Daher werden vermehrt Biogasanlagen benötigt, die geeignet sind, verschiedenartige Stoffe mit unterschiedlichen physikalischen und biochemischen Eigenschaften zuverlässig zu verarbeiten, und die eine hohe Ausbeute an Nettoenergie über Methan erreichen.

Es wird über Untersuchungen mit einem partiell durchmischten Durchfluß-Biogasreaktor berichtet, mit dem diese Bedingungen erfüllt werden sollen.

*) Prof. Dr.-Ing. W. Baader ist leitender Direktor des Instituts für Technologie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode (FAL).

1. Einleitung

Die in der Landwirtschaft anfallenden organischen Stoffe, die für die Methangewinnung in Frage kommen, weisen je nach den einzelbetrieblichen Gegebenheiten ein breites Artenspektrum auf. Einer Biogasanlage werden daher in der Regel Mischsubstrate zugeführt, die sich nicht nur hinsichtlich ihrer Anteile an mikrobiell abbaubarer organischer Substanz und deren jeweiliger Abbaugeschwindigkeit unterscheiden [1 bis 3], sondern in den meisten Fällen auch hinsichtlich ihrer physikalischen Merkmale, wie Anteile an gelösten und suspendierten Feststoffen sowie Spektrum der Dichte, Form und Größe der Feststoffpartikel. Diese wirken sich wesentlich auf das fluidmechanische Verhalten dieser Medien aus, Bild 1. Zusätzlich werden diese physikalischen Stoffwerte durch die Stoffumsetzung während des biologischen Prozesses verändert.