

Untersuchung der Strömungsverhältnisse in einem Gärkanal ohne mechanisches Rührwerk

Von Jens Hohlfeld und Christoph Zimmermann, Bremen*)

DK 631.862:662.767.1

Bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen haben sich Gärkanalsysteme bewährt. Bei Rindergülle mit hohem Trokensubstanzgehalt findet in der Regel keine Phasentrennung statt. Daher kann für solche Substrate auf Rührsysteme im Fermenter verzichtet werden.

In einer Praxisanlage wurde dieser Sachverhalt nach 2jährigem Betrieb überprüft. Von besonderem Interesse war es in diesem Zusammenhang, die Strömungsverhältnisse und eventuelle Toträume im Fermenter zu ermitteln.

In dem vorliegenden Beitrag werden die Ergebnisse von Traceruntersuchungen an dieser Biogasanlage vorgestellt und die Werte mit der Theorie und Angaben aus dem Schrifttum verglichen. Dabei zeigt sich ein überdurchschnittliches Strömungsverhalten. Toträume im Sinne von inaktiven Zonen waren nicht nachzuweisen.

1. Einleitung

Die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen wird entscheidend beeinflusst durch die Leistungsfähigkeit des gewählten Fermentersystems. Die Parameter für die Leistungsfähigkeit sind die aufzuwendende Prozeßenergie auf der einen Seite und die Gasproduktivität auf der anderen Seite. Der Prozeßenergiebedarf setzt sich zusammen aus dem Energiebedarf für die Faulraumbeheizung (Faulraumtemperatur in der Regel 33–37 °C) und dem Energiebedarf für Pumpen, Mischen und Rühren. Die Gasproduktivität wird beeinflusst durch die Substratzusammensetzung und -eigenschaften, die Faulraumtemperatur, verschiedenste biochemische Faktoren wie pH-Wert, C/N-Verhältnis, Vorhandensein von Spurenelementen und Hemmstoffen sowie von der effektiven Verweilzeit [1 bis 7].

Die Erfahrungen der letzten Jahre haben gezeigt, daß in Abhängigkeit von Substrat, Faulraumgeometrie und der Wirkung eventuell vorhandener Rührsysteme erhebliche Toträume auftreten können [8, 9], die das effektive Faulraumvolumen reduzieren. Infolge von Toträumen können verfahrenstechnische Probleme wie Schwimm- und Sinkschichtenbildung, Verstopfungen etc. auftreten. In jedem Fall reduziert sich jedoch die auf das Faulraumvolumen bezogene Gasleistung und damit die Wirtschaftlichkeit der Anlage.

Bei der Substratführung im Fermenter unterscheidet man zwei grundsätzlich unterschiedliche Strategien. In volldurchmischten Fermentern (Rührkesseln) wird eine möglichst homogene Vermischung des Faulgutes angestrebt. Die Verweilzeit eines Substratteilchens ist eine Zufallsgröße und nur mit statistischen Mitteln zu beschreiben. In den sogenannten Plug-Flow-Systemen (Gärkanälen) wird eine pfropfenartige Strömung angestrebt. Die Verweilzeit aller Substratteile ist im Idealfall gleich.

Rührsysteme in Biogasanlagen haben verschiedene Aufgaben:

- Zerstören, Aufbrechen, Befeuchten der Schwimmdecke
- Verhinderung von Sedimentbildung
- Substratdurchmischung
- Kontakt von Bakterienmasse mit abbaubarem Material
- Abfuhr von Stoffwechselprodukten
- Vermeidung von Temperaturgradienten im Substrat
- Verbesserung des Eintrags thermischer Energie von den Tauscherflächen in das Substrat
- Vermeidung/Verminderung von Totvolumina.

Rührsysteme sind teuer in der Anschaffung, erhöhen den Bedarf an Prozeßenergie (im allgemeinen von elektrischer Energie) einer Anlage, sind als interne Rührsysteme (Propellerrührer, Speichenrührwerke u.ä.) schlecht zu warten, und die Durchführung von Kabeln, Wellen etc. durch die Behälterwandung führt zu zusätzlichen Problemen (z.B. Substrat- und Gasleckagen).

Beim Rührkessel kann in der Regel auf ein Rührwerk nicht verzichtet werden. Gärkanalanlagen werden z.Zt. überwiegend mit langsam laufenden Speichenrührwerken ausgerüstet. Bei Substraten mit hoher Viskosität (geringer Entmischungstendenz), homogener Zusammensetzung und ausreichender Population methanogener Bakterien im Frischsubstrat kann u.U. auf ein Rührwerk verzichtet werden. Da diese Bedingungen für den landwirtschaftlichen Betrieb Köhler in Bremen-Strom gegeben waren, wurde dort durch das Ingenieurbüro UTEC eine Gärkanalanlage ohne Rührsystem installiert.

Da eine solche Konzeption bisher noch nicht im technischen Maßstab umgesetzt worden war, sollte im Rahmen einer begleitenden Forschung¹⁾ untersucht werden, ob das gewählte System unter den dortigen Randbedingungen den Anforderungen genügt. Im einzelnen war die Biogaserzeugung im rührerlosen Gärkanal zu untersuchen hinsichtlich

- Bildung von Schwimm- oder Sinkschichten
- Temperaturverteilung im Fermenter
- Substratvermischung und
- Existenz von Toträumen bzw. Bestimmung der effektiven Verweilzeit.

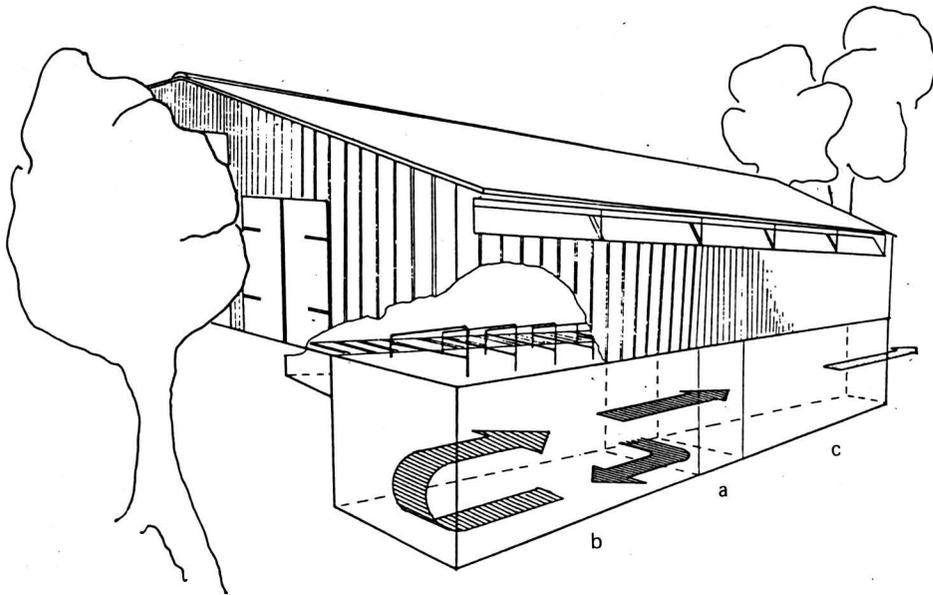
2. Anlagenbeschreibung

Schon beim Bau eines neuen Boxenlaufstalles ließ der Landwirt zwei Gärräume unter dem Stall erstellen, Bild 1. Das Ingenieurbüro UTEC erhielt 1983 den Auftrag, die bereits vorhandenen Gruben zu einer kompletten Biogasanlage [10] umzurüsten.

Der Boxenlaufstall sowie die Altstallungen sind mit einem Treibmist-Kanalsystem ausgerüstet, das in eine Vorgrube a (Grundfläche ca. 1,50 x 2,50 m) mündet. In der Vorgrube ist eine Tauch-

¹⁾ Untersuchungen im Versuchsmaßstab wurden im Institut für Technologie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft durchgeführt. Über sie wird in einem Sonderheft der Landbauforschung Völknerode 1987 berichtet. Der Bau der Biogasanlage sowie die Forschungsaktivitäten wurden freundlicherweise vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten finanziell gefördert. Prof. Dr. Stephan von der Hochschule Bremerhaven unterstützte die wissenschaftliche Begleitung des Projektes.

*) Dipl.-Ing. J. Hohlfeld und Dipl.-Ing. C. Zimmermann sind Geschäftsführer der UTEC GmbH, Ingenieurbüro für Entwicklung und Anwendung umweltfreundlicher Technik, Bremen.



Hauptgärraum und Nachgärraum sind im oberen Bereich mit Hartschaum in 12 bzw. 2 cm Stärke von innen gedämmt. Zusätzlich wurde die Anlage im Außenbereich teilweise mit einer 12 bzw. 6 cm starken Hartschaumdämmung versehen. Die Gasdichtigkeit wird durch ein eingehängtes, PVC-beschichtetes Gewebe sichergestellt. Form, Material und Befestigung wurden bereits an anderer Stelle ausführlich vorgestellt [11].

Auf das Gasleitungs- und -lage-
rungssystem, die Gasverbraucher und das gewählte Heizsystem soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Die technischen Daten der Gäräume und der Gärraumbeheizung sind in Tafel 1 zusammengestellt.

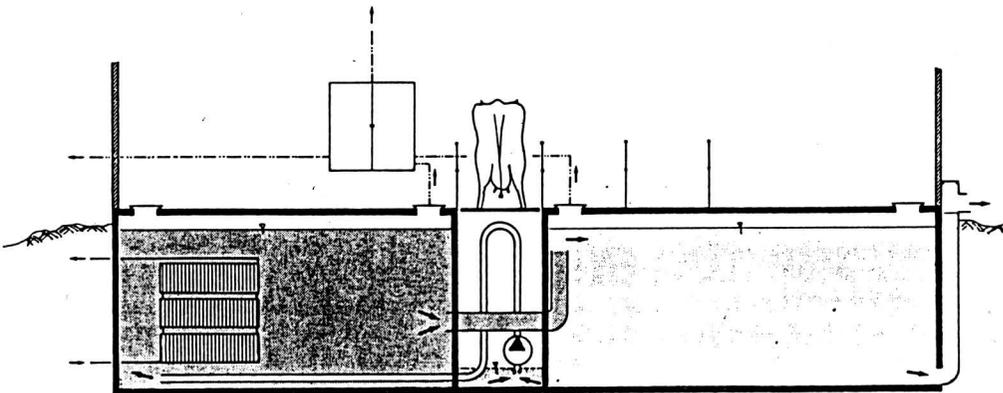


Bild 1. Ansicht und Prinzipskizze der Biogasanlage Köhler.

- a Vorgrube
- b Hauptgärraum
- c Nachgärraum

schneidpumpe installiert, die das Substrat entgegen der Fließrichtung im Fermenter gegen die Stirnwand des Hauptgärraums b pumpt. Durch die Fließrichtungsumkehr soll das Substrat annähernd gleichmäßig über den gesamten Querschnitt verteilt und die Bildung von ausgeprägten Strömungskanälen verhindert werden. Auf eine vorangehende Animpfung des Frischsubstrates kann dabei verzichtet werden, da in der Rindergülle bereits Populationen methanogener Bakterien vorhanden sind.

Nach dem Einpumpen durch das am Boden verlegte Rohr, Bild 2 oben, gelangt das Frischsubstrat in die sogenannte Aufheizzone, bestehend aus 4 Reihen mit jeweils 3 Plattenheizkörpern (Tauscherfläche ca. 24 m²), in der das Substrat auf die Solltemperatur (30–35 °C) aufgeheizt wird. Eine Rohrheizung an der Behälterwandung (20 x 2 mm, ca. 125 m lang, entsprechend 7,5 m² Tauscherfläche) gleicht die Temperaturverluste durch die Fermenterwandung aus. Die Heizkreise werden einzeln geregelt mit Warmwasser (Temperaturniveau Vorlauf/Rücklauf ca. 45/35 °C) versorgt.

Das Faulgut verläßt den Hauptgärraum an der der Aufheizzone gegenüber liegenden Stirnwand im unteren Bereich und fließt in einem Rohr durch die Vorgrube in den Nachgärraum (Bild 2, unten). Der Nachgärraum hat einen identischen Querschnitt wie der Hauptgärraum, ist jedoch etwas länger. Der Überlauf vom Nachgärraum in den Güllelagerbehälter befindet sich seitlich am Ende des Nachgärraums direkt über dem Boden. Der Güllelagerbehälter ist ein offener, rechteckiger Betonbehälter in ca. 6 m Entfernung vom Stall.

Gäräume	
Hauptgärraum:	
Abmaße	13,60 x 2,10 x 2,80 m
Volumen, brutto ca.	80,0 m ³
aktives Faulraumvolumen ca.	68,5 m ³
Nachgärraum:	
Abmaße	15,75 x 2,10 x 2,80 m
Volumen, brutto ca.	92,6 m ³
aktives Faulraumvolumen	76,1 m ³
Heizung/Faulraumtemperatur	
Hauptgärraum:	
Plattenheizkörper	
Anzahl	12 Stück
Abmessungen	200 x 50 cm
Ges. Tauscherfläche	24 m ²
Fußbodenheizungsrohr	
Abmessungen	20 x 2 mm, 125 m
Ges. Tauscherfläche	7,5 m ²
Heizwassertemperatur	
Vorlauf/Rücklauf	45/35 °C
Faulraumtemperatur	ca. 30–35 °C (mesophil)
Nachgärraum:	
kein Heizungssystem	
Faulraumtemperatur	ca. 15–20 °C (psychrophil)

Tafel 1. Technische Daten der Biogasanlage Köhler, Bremen-Strom.

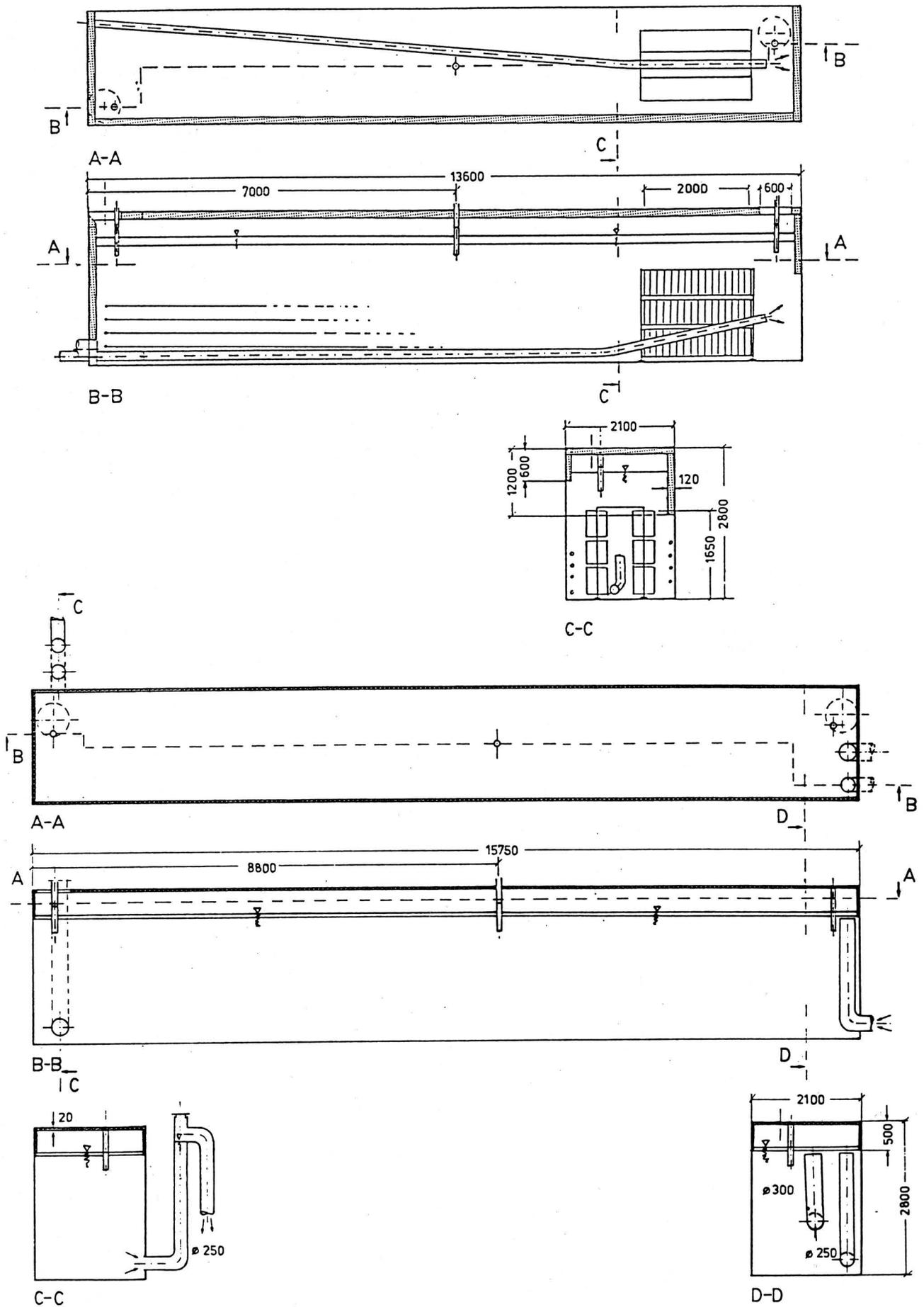


Bild 2. Grundriß und Aufriß von Hauptgärraum (oben) und Nachgärraum (unten) der Biogasanlage Köhler; Darstellung ohne Wand und Folie.

3. Versuchsfragestellung

Das besondere Interesse bei der Beurteilung der beschriebenen Anlage liegt in der Untersuchung der Strömungsverhältnisse. Diese Untersuchung wird auf den Hauptgärraum beschränkt, da für den Nachgärraum ähnliche Ergebnisse zu erwarten sind. Weiterhin soll geprüft werden, inwieweit Sink- und/oder Schwimmschichten auftreten bzw. sich Feststoffe o.ä. in den Toträumen ablagern.

Bei der Untersuchung der Strömungsverhältnisse sollen verschiedene Tracer auf ihre Eignung für den Einsatz bei praktischen Biogasanlagen geprüft werden. Die Versuche sollen Aufschluß darüber geben, inwieweit unter den gegebenen Randbedingungen auf ein Rührwerk verzichtet werden kann. Die Einsparung eines Rührwerks hat Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage und könnte damit einen Beitrag zur weiteren Verbreitung von Biogasanlagen leisten.

4. Versuchsmethodik

Zur Klärung der oben genannten Fragestellung wurden

- optische Kontrollen
- Temperaturmessungen und
- Tracermessungen

durchgeführt.

4.1 Optische Kontrollen

Zur optischen Kontrolle wurden im Haupt- und Nachgärraum je zwei Fenster (ϕ 300 mm) mit Scheibenwischern installiert, über die sich die eventuelle Bildung einer Schwimmdecke sowie der Füllstand der Anlage kontrollieren läßt. Daneben wurde der Nachgärraum zweimal und der Hauptgärraum einmal entleert und begangen.

4.2 Temperaturmessungen

In jedem Gärraum befinden sich drei Tauchrohre, in die Temperaturfühler eingeführt werden können. Es standen bis zu fünf PT-100 Tauchfühler (Typ TWS, Hartmann & Braun und Typ WSK, Siemens) zur Verfügung, die über eine Meßstellenumschaltung mit Hilfe eines digitalen Meßgerätes (Typ 853T, Fa. Lambrecht) abgelesen werden können. Zusätzlich konnten die Meßwerte auf einem 6-Kanal-Schreiber (Typ Galvanograph 7 ND 1230, Siemens) registriert werden.

4.3 Tracermessungen

Als Tracersubstanzen wurden Lithiumchlorid (LiCl) und Rhodamin B (Summenformel $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$) eingesetzt. Die Tracer wurden im Abstand von sieben Tagen über einen Schlauch direkt in den Ansaugbereich der Tauchschneidpumpe eingegeben. Über einen Zeitraum von 38 Tagen wurden täglich einmal Gülleproben (ca. 0,5 l) durch die Tauchrohre gezogen. Die Proben wurden nachfolgend sofort filtriert und in einem Kühlschrank gelagert.

Wegen des apparativen und finanziellen Aufwandes wurden die Proben nicht unmittelbar nach der Probenahme ausgewertet, sondern alle Proben nach Versuchsende geschlossen analysiert. Für die Wahl einer geeigneten Konzentration wurde auf Angaben im Schrifttum zurückgegriffen [8, 9].

Die Konzentrationsmessungen für LiCl erfolgten mit einem Flammen-Filterphotometer (Typ MPQ, Fa. Zeiss). Für die Rhodaminmessungen wurde die gefilterte Flüssigkeit mit destilliertem Wasser im Verhältnis 1 : 100 verdünnt. Die Messung erfolgte mit einem Fluoreszenz-Photometer (Fluorometer, Typ 10-005 R mit Rhodamin-Filtersatz, Fa. Turner-Design, USA).

5. Ergebnisse

5.1 Optische Kontrollen

Es konnte während des 18monatigen Betriebes keine Neigung zur Schwimmdeckenbildung festgestellt werden. Die Faulgutoberfläche war immer gut durchfeuchtet und das Gas trat gleichmäßig an der Oberfläche aus. Das Auspumpen bzw. Ablassen des Faulgutes ergab in keinem Fall Hinweise auf Inhomogenitäten. Bei der Begehung des Nachgärraums wurden keinerlei Sinkschichten – auch nicht in den Ecken und Kanten – festgestellt. Im Güllelagerbehälter (offene Betonrube außerhalb des Stalles) hingegen tritt eine Entmischung mit einer relativ starken Schwimmdeckenbildung auf. Dieses ist auf die lange Lagerzeit (bis zu 6 Monaten) und das Abtrocknen der Oberfläche zurückzuführen.

5.2 Temperaturmessungen

Die Temperaturmessungen, Bild 3, zeigen, daß es in dem Hauptgärraum keinen nennenswerten Temperaturgradienten über der Höhe gibt. Die Temperaturkurven für die übereinanderliegenden Meßpunkte (Meßpunkt 2 ····, Meßpunkt 3 – – –) fallen praktisch zusammen, nur kurzfristig treten geringe Temperaturunterschiede bis maximal 1,5 °C auf. Trotz des Einpumpens einer relativ großen Menge frischer Gülle mit einer Temperatur von ca. 15 °C gibt es keine erkennbaren Temperatureinbrüche an den Meßstellen 1 bis 3 hinter der Aufheizzone. Der Temperaturverlauf zeigt, daß

- nach der Aufheizzone das Substrat homogen erwärmt ist, d.h. die Aufheizzone ist ausreichend groß dimensioniert;
- es keine Kurzschlußströmung kalten Substrats am Boden gibt, wie sie z.B. an einer dänischen Anlage beobachtet wurde [9];
- die Wandheizung ausreicht, die Temperaturverluste durch die Wandung auszugleichen. In dem vorliegenden Fall sorgt sie sogar für eine weitere Aufheizung auf ca. 34–35 °C.

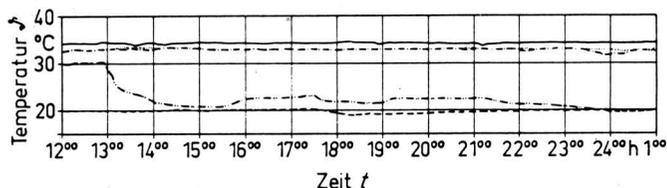


Bild 3. Beispiel für den Temperaturverlauf im Gärraum; 24.4.1984, 12.00 Uhr bis 25.4.1984, 1.00 Uhr.

- Meßpunkt 1: Auslauf Hauptgärraum unten
- Meßpunkt 2: Mitte Hauptgärraum oben
- — — Meßpunkt 3: Mitte Hauptgärraum unten
- · - · - Meßpunkt 4: Einlauf Hauptgärraum oben
- - - - - Meßpunkt 5: Einlauf Nachgärraum oben

In der Zeit vom 1.3. bis 9.3.1985, 18.00 Uhr war die Fermenterheizung wegen eines technischen Defektes außer Betrieb. Bild 4 zeigt für 3 ausgewählte Meßpunkte den Temperaturverlauf im Fermenter nach Wiederinbetriebnahme des Kessels. Um die Anlage schnell wieder auf das gewünschte Temperaturniveau zu bringen, wurde in diesem Fall mit einer besonders hohen Vorlauftemperatur gefahren.

Die ersten Abschnitte der Kurven (9.3., 0.00 bis 18.00 Uhr) zeigen deutlich, daß auch ohne Heizen relativ gleichmäßige Temperaturverhältnisse auftreten. Ohne Einsatz der Wandheizung stellt sich über der Behälterlänge ein Temperaturgefälle von ca. 3 °C ein, wie aus den Temperaturen an den Meßpunkten 3 (Mitte) und 1 (Auslauf des Hauptgärraums) zu extrapolieren ist.

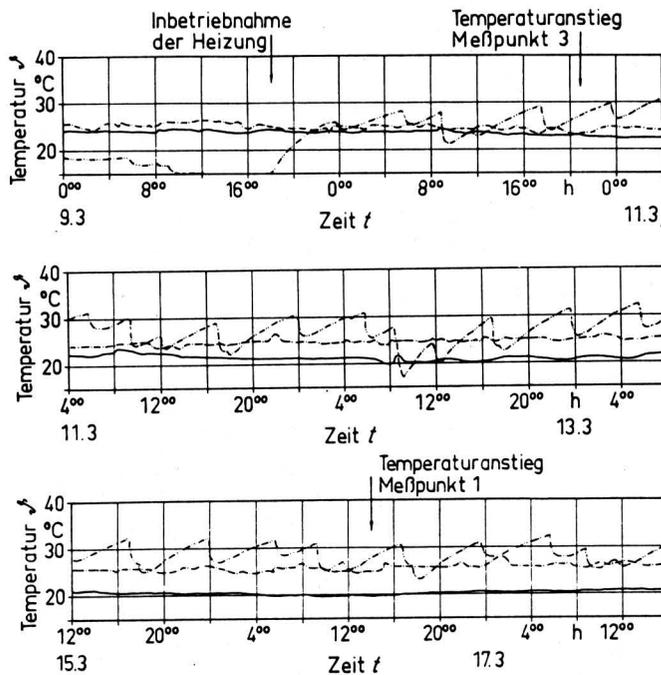


Bild 4. Temperaturverlauf im Gärraum vor und nach Wiederinbetriebnahme der Heizung (9.3.1985, 0.00 Uhr bis 17.3.1985, 16.00 Uhr).

— Meßpunkt 1: Auslauf Hauptgärraum unten
 - - - Meßpunkt 3: Mitte Hauptgärraum unten
 - - - Meßpunkt 5: Einlauf Nachgärraum oben

Für eine homogene Temperaturverteilung im Gärraum ist offensichtlich der über dem Gärraumquerschnitt gleichmäßige Eintrag des Substrats und eine gleichmäßige Erwärmung beim Einpumpvorgang entscheidend. Konvektion spielt nur eine untergeordnete Rolle.

Nach Inbetriebnahme der Heizung wird der Temperaturanstieg am mittleren Fühler (Meßpunkt 3) nach ca. 26 h und am Meßpunkt 1 nach ca. 160 h meßbar. Aus der jeweiligen Entfernung der Meßstellen vom Ende der Aufheizzone ergeben sich folgende Ausbreitungsgeschwindigkeiten für die Wärme (Abmaße in Bild 2):

$$\text{Meßpunkt 3: } V_3 = 3,50 \text{ m}/26 \text{ h} = 0,13 \text{ m/h}$$

$$\text{Meßpunkt 1: } V_1 = 10 \text{ m}/160 \text{ h} = 0,06 \text{ m/h} = 1,44 \text{ m/d.}$$

Im ersten Fall sind für die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wärme die Einflüsse lokaler Mischbewegungen aufgrund großer Temperaturgradienten maßgebend. Der zweite Wert gibt bei der größeren Entfernung und geringen Temperaturgradienten im Faulgut überwiegend die Fließgeschwindigkeit des Faulgutes wieder. Die Fließgeschwindigkeit von ca. 1,40 m/d läßt auf eine effektive Verweilzeit von ca. 10 Tagen schließen.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß sich die Wärme auch in dem sehr dickflüssigen Substrat lokal ausbreitet, große Konvektionsströmungen bilden sich im stationären Betrieb nicht aus. Dieses bedingt auch eine sehr homogene Temperaturverteilung mit einer vernachlässigbaren Temperaturschichtung. Kurzschlußströmungen treten nicht auf. Die Fließgeschwindigkeit ergibt sich zu ca. 1,40 m/d.

5.3 Messungen mit LiCl als Tracer

Mit LiCl wurden zwei verschiedene Arten von Versuchen, nämlich

- Adsorptionsversuche und
- Tracermessungen am Fermenter durchgeführt.

Leider konnten aus den bereits angeführten Gründen beide Versuchsreihen erst nach Abschluß der Meßreihen zusammen ausgewertet werden. Die Ergebnisse aus den Adsorptionsversuchen konnten daher nicht in die Tracerversuche einfließen.

5.3.1 Adsorptionsversuche

Es wurden Faulgutproben, die an verschiedenen Stellen gezogen waren (d.h. in unterschiedlichen Abbaustadien und mit unterschiedlicher Konsistenz), im Labor mit LiCl in Konzentrationen von ca. 2 bis 10 ppm versetzt. Direkt anschließend wurden die Proben gefiltert und gekühlt.

Die Analysen ergaben eine Wiederfindungsrate von 5–7,5 % je nach Anfangskonzentration, Bild 5. Es zeigt sich, daß die Wiederfindungsrate unabhängig von dem Ausfäulungsgrad bzw. dem Feststoffgehalt des Substrates zu sein scheint. Die Wiederfindungsrate nimmt mit der Eingabekonzentration zu. In Bild 5 ist neben den Meßpunkten und deren Ausgleichsgeraden eine Kurve eingezeichnet, unterhalb der die Meßgenauigkeit mit dem eingesetzten Meßverfahren unzureichend wurde.

Die Wiederfindungsrate ist erheblich niedriger als erwartet. Bedenkt man, daß bei Tracerversuchen wegen der längeren Reaktionszeiten die Wiederfindungsrate noch niedriger liegen dürfte, so ist bei dem vorliegenden Substrat bei der Durchführung von Tracerversuchen mit Adsorptionsraten von 95 bis 98 % zu rechnen.

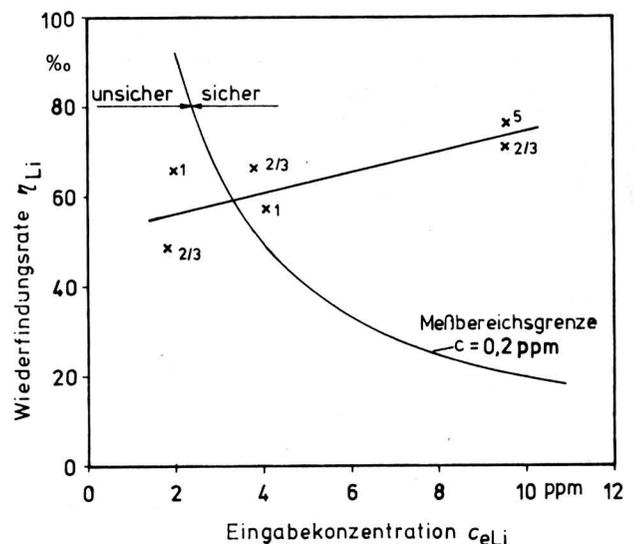


Bild 5. Wiederfindungsrate von Lithium η_{Li} im gefilterten Faulgut in Abhängigkeit von der Konzentration bei der Eingabe c_{eLi} für verschiedene Meßpunkte.

Meßpunkt 1: Auslauf Hauptgärraum unten
 Meßpunkt 2/3: Mitte Hauptgärraum oben/unten
 Meßpunkt 5: Einlauf Nachgärraum oben

5.3.2 Tracerversuche

Es wurde einmalig 1 kg LiCl in Wasser gelöst in den Hauptgärraum gegeben. Dieses entspricht einer Eingabekonzentration von ca. 35 ppm Li.

Die gemessene Konzentration lag in keinem Fall über 1 ppm Li und damit um den Faktor 10 unterhalb der nach Angaben im Schrifttum [9] erwarteten Werte. Werte unterhalb 0,2 ppm Li im gefilterten Faulgut waren nicht mehr sicher meßbar (s. Bild 5). Wegen der großen Unsicherheiten wurde darauf verzichtet, die Proben weiter auszuwerten.

5.4 Messungen mit Rhodamin B als Tracer

Es wurden 50 g Rhodamin B in Essigsäure gelöst und in den Hauptgärraum eingebracht. Dieses entspricht einer Eingabekonzentration von ca. 10 ppm. Die bei diesem Versuch entnommenen Proben wurden ebenfalls gefiltert und gekühlt bis zur Analyse gelagert. Um die Fluoreszenz messen zu können, wurde es erforderlich, die Filtrate im Verhältnis 1 : 100 mit destilliertem Wasser zu verdünnen.

Der Meßbereich für die Rhodamin-Konzentrationen im verdünnten Filtrat lag bei 0 bis 10×10^{-10} . Die Ablesegenauigkeit betrug ca. $\pm 2 \times 10^{-11}$ bzw. $\pm 2\%$ vom maximalen Wert. Während der Analyse wurde das Gerät periodisch mit einer Nullprobe nachgecheckt, um Drifteinflüsse zu eliminieren. Die Eigenfluoreszenz von ungeimpftem Faulgut (sog. background level) wurde zu ca. 4×10^{-10} Rhodamin-Äquivalenten bestimmt. Alle Meßwerte wurden um diesen Wert bereinigt. Die Kurven in Bild 6 geben die an den verschiedenen Meßpunkten gemessenen Konzentrationen über einen Zeitraum von 24 Tagen wieder.

Die Meßwerte an den übereinander in der Mitte des Gärraums liegenden Meßstellen 2 und 3 weisen aus, daß das Rhodamin diese beiden Meßstellen nach zwei Tagen erreicht. Die anfänglich höhere Konzentration mit steilem Anstieg der Kurve am unteren Meßpunkt 3 läßt auf eine geringfügig schnellere Strömung in diesem Bereich schließen. Der weniger steile Anstieg der Meßwerte im oberen Bereich (Meßpunkt 2) deutet auf eine stärkere Durchmischung aufgrund thermischer Einflüsse hin.

Die Kurve für den Meßpunkt 1, unten am Auslauf des Hauptgärraums, ist erheblich ruhiger, d.h. die Meßwerte streuen in geringerem Maße als die für die Mitte des Gärraums. Dieses läßt auf eine gute Durchmischung schließen. Das Rhodamin erreicht Meßpunkt 1 nach ca. 5 Tagen. Das Konzentrationsmaximum liegt hier entsprechend später bei ca. 9 bis 10 Tagen. Das langsame Abklingen der Kurve mit relativ großen Konzentrationswerten auch zum Ende der Versuchsphase läßt auf größere Bereiche niedriger Fließgeschwindigkeit schließen.

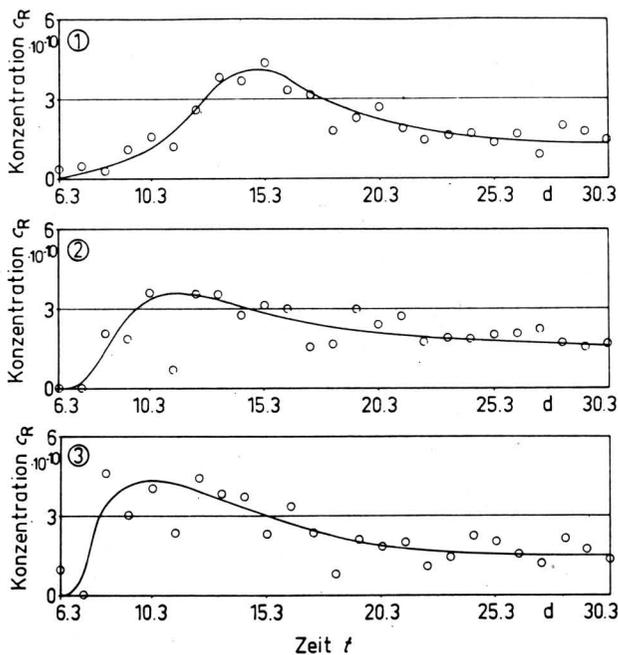


Bild 6. Konzentration des Tracers Rhodamin B in Abhängigkeit von der Zeit für 3 verschiedene Meßorte; Tracerzugabe am 5.3.1985.

oben: Meßpunkt 1 – Auslauf Hauptgärraum unten
Mitte: Meßpunkt 2 – Mitte Hauptgärraum oben
unten: Meßpunkt 3 – Mitte Hauptgärraum unten

Geht man davon aus, daß über den Versuchszeitraum konstante Strömungsverhältnisse herrschten, daß anfänglich eine gute Vermischung mit dem Tracer stattfand und daß die Quervermischung zu vernachlässigen ist, so haben die Summenkurven der Konzentrationen an den verschiedenen Meßorten theoretisch den gleichen Grenzwert (Asymptote), Bild 7.

Die Summenkurven zeigen die relativ gute Übereinstimmung der Gesamtkonzentration. Die Kurven für die unten im Gärraum befindlichen Meßpunkte 1 und 3 laufen auffällig parallel. Sie unterscheiden sich durch eine zeitliche Verschiebung um ca. 4 Tage, was einer effektiven Verweilzeit von ca. 8 Tagen im unteren Bereich entspricht. Der etwas atypische Verlauf der Summenkurve für Meßpunkt 2 läßt sich auf die Geometrie des Gärraums (Auslauf im unteren Bereich) zurückführen. Der zeitliche Versatz zur Kurve 3 deutet auf eine größere Verweilzeit im oberen Fermenterbereich resp. eine langsamere Fließgeschwindigkeit.

Aus dem Produkt von Grenzwert und täglicher Beschickungsmenge läßt sich überschlägig die Wiederfindungsrate berechnen. Der gemeinsame Grenzwert (Asymptote) aller Kurven liegt bei etwa 62×10^{-10} . Aus diesem Grenzwert läßt sich unter Zugrundelegung einer täglichen Beschickungsmenge von ca. 5 m^3 die Wiederfindungsrate η_R berechnen:

$$\eta_R = \frac{62 \cdot 10^{-10} \cdot 100 \cdot 5 \text{ m}^3 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3}{50 \text{ g}} = 6,2\%$$

Auch hier liegt die Wiederfindungsrate sehr niedrig, was u.a. auch durch hohe Eiweißaffinität des Rhodamins zu erklären ist.

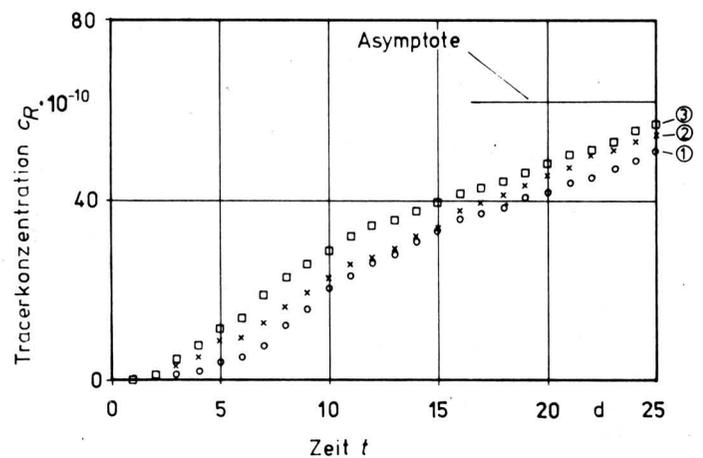


Bild 7. Summe der Tracerkonzentration (Rhodamin B) für 3 verschiedene Meßorte in Abhängigkeit von der Zeit.

- ① Meßpunkt 1 – Auslauf Hauptgärraum unten
- ② Meßpunkt 2 – Mitte Hauptgärraum oben
- ③ Meßpunkt 3 – Mitte Hauptgärraum unten

6. Zusammenfassung

Die optischen Kontrollen bzw. die Begehungen von Haupt- und Nachgärraum ergaben keinerlei Hinweise auf Entmischungsvorgänge bzw. Neigungen zu Schwimmdecken- oder Sinkschichtenbildungen. Dieses Ergebnis wird auch durch die Temperaturmessungen und die Tracerversuche in vollem Umfang gestützt.

Die Temperaturverteilung im Hauptgärraum hinter der Aufheizzone ist als sehr homogen anzusehen. Die Heizsysteme (Plattenheizkörper zur Substraterwärmung, Wandheizung zum Ausgleich von Wärmeverlusten) sind völlig ausreichend zur Faulgutbeheizung. Große Konvektionsströmungen sind nicht nachzuweisen; kleinere lokale Strömungen sorgen jedoch für eine langsame Wärmeausbreitung. Eine kalte Strömung im Bodenbereich, wie sie bei einer dänischen Anlage beobachtet worden ist [9], wurde nicht gemessen.

Die Tracerversuche konnten nicht in der vorgesehenen Weise durchgeführt werden, da die Adsorption der Tracer (hier besonders LiCl) durch Feststoffe o.ä. sehr viel größer war, als bisher angenommen wurde. Aus diesem Grunde konnten die Versuche mit LiCl als Tracer nicht ausgewertet werden. Auch die Versuche mit dem Tracer Rhodamin B wurden durch die extrem hohe Adsorption beeinträchtigt. Wegen der sehr hohen Meßgenauigkeit des Analysengerätes konnten die gezogenen Proben aber ausgewertet werden. Beide Tracer scheinen grundsätzlich für den Einsatz in landwirtschaftlichen Biogasanlagen geeignet zu sein, jedoch muß die sehr hohe Adsorptionsrate bei der Tracerzugabe berücksichtigt werden.

Einflüsse auf die Gasproduktion bzw. den Gärprozeß konnten bei den hier vorliegenden Tracerkonzentrationen nicht festgestellt werden. Für weitere Versuchsreihen empfehlen sich jedoch Vorversuche, um die Adsorptionsrate und die Einflüsse höherer Tracerkonzentrationen auf den Gärprozeß zu erkunden.

Die theoretische Verweilzeit des Faulgutes im Gärraum berechnet sich aus dem aktiven Faulraumvolumen V und der täglichen Frischsubstratmenge q zu

$$t_R = V/q.$$

Im vorliegenden Fall ergeben sich für die beiden Gärräume folgende theoretische Verweilzeiten:

$$\text{Hauptgärraum: } t_R = 68,5 \text{ m}^3/5 \text{ m}^3/\text{d} = 13,7 \text{ d}$$

$$\text{Nachgärraum: } t_R = 76,1 \text{ m}^3/5 \text{ m}^3/\text{d} = 15,2 \text{ d}.$$

Die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Verweilzeiten bzw. den Konzentrationsverläufen für verschiedene Fermentersysteme gibt Bild 8 wieder. Die bei dem Tracerversuch gemessenen Kurven in Bild 6 entsprechen sehr gut den Kurven für einen realen Pfropfenströmer in diesem Bild bzw. früher angegebenen Kurven [7].

Im Gegensatz zur theoretischen Verweilzeit ist die effektive Verweilzeit nicht eindeutig definiert. Der Einfachheit halber soll hier das Maximum der Konzentrationskurve als effektive Verweilzeit angenommen werden, wie es auch in [7] praktiziert wird:

$$t_R' = t(c_{\max}).$$

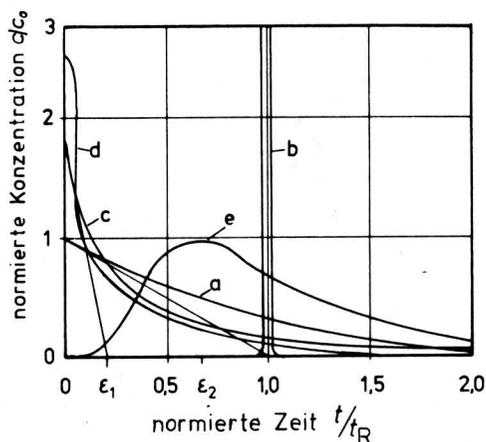


Bild 8. Tracerkonzentration in Abhängigkeit von der normierten Zeit für verschiedene Fermentersysteme; nach Weilemann [6].

- a idealer Rührkessel
- b ideale Pfropfenströmung
- c Rührkessel mit Totvolumen
- d Rührkessel mit Kurzschluß und Totvolumen
- e Rührkesselkaskade bzw. reale Pfropfenströmung
- ϵ_1 Güte eines realen Rührkessels
- ϵ_2 Güte bei realer Pfropfenströmung (Maximum von Kurve e)

Für die hier untersuchte Anlage ergibt sich aus den Traceranalysen nach Bild 6:

$$t_R' = 9 \dots 10 \text{ d}.$$

Das Verhältnis von effektiver zu theoretischer Verweilzeit

$$\epsilon = t_R'/t_R$$

ist ein Maß für die Güte eines Pfropfenströmers.

Für die Biogasanlage Köhler und die Anlagen aus [7] ergeben sich folgende Werte:

$$\text{(Köhler, 10–12 \% TS)} \quad \epsilon = 9,5/13,7 = 70 \%$$

$$\text{(Jewell, 8 \% TS)} \quad \epsilon = 20/30 = 67 \%$$

$$\text{(Jewell, 10–12 \% TS)} \quad \epsilon = 17/30 = 57 \%$$

Die Meßergebnisse sowie obiger Vergleich zeigen, daß die Biogasanlage in Bremen-Strom ein überdurchschnittliches Strömungsverhalten hat. Nicht zuletzt hierin sind auch die Ursachen für die relativ hohe faulraumbezogene Gasproduktionsrate von bis zu $1,5 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ d}$ zu sehen. Toträume im Sinne von nicht aktiven Zonen sind nicht nachzuweisen. Daß die 100 % eines idealen Pfropfenströmers nicht erreicht werden, liegt daran, daß die Fließgeschwindigkeit zu den Randbereichen hin geringer ist.

Die Messungen und die Kontrollen ergeben, daß unter den gegebenen Randbedingungen Rührwerke für beide Faulräume nicht erforderlich sind.

Die Anlage Köhler hat sich unter den hier untersuchten Aspekten sehr gut bewährt. Sie zeigt Möglichkeiten auf, wie für dickflüssige Rindergülle durch geeignete Dimensionierung von Faulraum und Heizungssystem Anlagen gebaut werden können, die sich durch eine überdurchschnittliche Gasproduktivität und geringere Betriebskosten (fehlendes Rührwerk) auszeichnen.

Schrifttum

- [1] Hohlfeld, J. u. L. Sasse: Production and utilization of biogas in rural areas of industrialized and developing countries. Schriftenreihe der GTZ Bd. 97, Eschborn 1986.
- [2] •Wellinger, A. (Hrsg.): Biogas-Handbuch, Grundlagen – Planung – Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen. Aarau (Schweiz): Verlag Wirz 1984.
- [3] •Fortschritte beim Biogas. KTBL-Schrift 285 Darmstadt 1983.
- [4] Verbesserung der biologischen und mechanischen Verfahrenstechnik der Biogasgewinnung aus landwirtschaftlichen Abfallstoffen. Projekt Biogas; Nationaler Energieforschungsfond, Schlußbericht NEFF-Projekt Nr. 146.2, Zürich 1985.
- [5] Perwanger, A. u.a.: Leistungsdaten ausgewählter Biogasanlagen. Landtechnik Weihenstephan 1984.
- [6] Weilenmann, A.: Einfaches und billiges Verfahren zum Tracern von Biogasanlagen. Zürich 1984.
- [7] Fanfoni, K.J., T.D. Hayes u. W.J. Jewell: Anaerobic fermentation of agricultural residue: Potential for improvement and implementation. Final report 1978. US Dep. of Energy, Div. of Solar Technology, Washington D.C.
- [8] Jonkanski, F.: Tracer-Studie (persönliche Mitteilung).
- [9] Peterson, G.: Tracer study on a full scale plug flow digester. 2. Intern. Symp. on anaerobic digestion, Travemünde 1981.
- [10] Zimmermann, C. u. J. Hohlfeld: So funktioniert eine Gärkanal-Biogasanlage. dlz Bd. 35 (1984) Nr. 8, S. 1219/20.
- [11] Zimmermann, C. u.a.: Sealing biogas plants with flexible plastic covers – experiences gained with a german digester. In: BORDA (Hrsg.): Biogas Workshop on Community Plants, Report 1984. Bremen 1984.