

## Biogas aus Festmist

### Entwicklung einer kontinuierlich betriebenen Biogasanlage zur Vergärung von strohreinem Mist

Urs Baserga, Kurt Egger und Arthur Wellinger, INFOENERGIE, c/o Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), CH- 8356 Tänikon

In einem Grossteil der Landwirtschaftsbetriebe fallen die tierischen Exkremente nicht nur in flüssiger Form, sondern auch als Festmist an. Abhängig vom Entmistungs- bzw. Stallsystem wird dabei ausschliesslich Hofdünger in fester Form produziert oder es fällt ein Gemisch aus Festmist und Flüssiggülle (Harngülle, Vollgülle) an. Das Biogaspotential des Festmistes kann in den herkömmlichen landwirtschaftlichen

Biogasanlagen jedoch nicht genutzt werden, da diese ausschliesslich für die Biogaserzeugung aus flüssigen Hofdüngern konstruiert sind.

Die realisierte Pilotanlage zur kontinuierlichen Vergärung von Festmist besteht aus einem kubischen Stahltank mit einem Volumen von 9,6 m<sup>3</sup>. Der Fermenter wird mit einer Kolbenpresse (Maulwurf) mit Festmist beschickt, welcher im Durchlaufverfahren vergärt wird. Der Austrag des

vergorenen Materials erfolgt mit Hilfe eines Kratzbodens und einer Austragsschnecke. Die Pilotanlage hat sich hinsichtlich Betriebssicherheit, Prozess-Stabilität und Energieertrag gut bewährt, so dass das Anlagenkonzept für die Biogaserzeugung aus Festmist empfohlen werden kann. Die Investitions- und Betriebskosten einer Praxisanlage liegen in derselben Grössenordnung wie die einer Flüssiganlage. Durch die zusätzliche Vergärung des Stroh ist der Energieertrag jedoch um 50 bis 70% höher. Gegenüber einer Flüssiganlage, in welcher nur die tierischen Ausscheidungen vergoren werden, erreicht man bei der Festmistvergärung ein deutlich besseres Kosten-Nutzen-Verhältnis.



Abb. 1. Anacom-Pilotanlage zur Biogaserzeugung aus Festmist.

Inhalt	Seite
Problemstellung	2
Feststoffvergärung	2
Anacom-Pilotanlage	
– Konzept	4
– Betrieb	5
– Kennwerte	6
Praxisanlagen	
– Dimensionierung	7
– Kosten und Ertrag	8
Schlussfolgerungen	9
Literatur	9

## Problemstellung

In der Schweiz existieren heute rund 140 landwirtschaftliche Biogasanlagen, die fast ausschliesslich mit Flüssiggülle betrieben werden (INFOENERGIE, 1992). Die intensiven Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen der letzten zehn Jahre haben dazu geführt, dass die Technologie der Flüssiggülle-Vergärung mittlerweile als ausgereift und betriebssicher bezeichnet werden kann. In einem Grossteil der Landwirtschaftsbetriebe fallen jedoch beträchtliche Anteile der tierischen Exkremente in fester Form, das heisst als Mist an. Rund 70% des Kuhbestandes werden über Festmistverfahren entsorgt. Bezogen auf den Gesamtkuhbestand fällt in der Schweiz rund ein Drittel der Kuhexkremente als Mist und der Rest als flüssige Hofdünger an. Bei der Jungviehhaltung ist der Anteil der Festmistverfahren noch höher (Kaufmann, 1993).

Mit den herkömmlichen Flüssiggüllefermentern kann das Biogaspotential des Mistes nicht genutzt werden, da die Vergärung von Feststoffen andere Anforderungen an die Verfahrenstechnik eines Biogasfermenters als die Flüssiggülle-Vergärung stellt. Das übergeordnete Ziel eines mehrjährigen Forschungsvorhabens bestand darin, eine Pilotanlage zur kontinuierlichen Vergärung von Festmist zu entwickeln. Der Festmist soll dabei ohne Vorbehandlung vergoren und mit einem konventionellen Miststreuer auf die Felder ausgebracht werden können.

## Feststoffvergärung

### Grundsätzliche Verfahrensmöglichkeiten

Bei der Vergärung von festen Stoffen unterscheidet man zwischen ein- und zweistufigen Verfahren. Beim Einstufenprozess laufen Hydrolyse, Säurebildung und Methanisierung in demselben Behälter ab (vgl. auch Abb. 3), während bei zweistufigen Prozessen die Hydrolyse und die Säurebildung weitgehend getrennt von der Methanbildung stattfinden. Des weiteren kann die Methangärung absatzweise (Batchverfahren) oder kontinuierlich (Durchflussverfahren) betrieben werden.

### Batchverfahren

Beim Batchverfahren wird der Fermenter mit frischem Material gefüllt und luftdicht verschlossen. Während einer Faulzeit von zwei bis vier Wochen (abhängig vom Substrat) baut sich die vergärbare Substanz ab. Anschliessend wird der Fermenter geleert und wieder

mit neuem Frischmaterial befüllt. Da beim Batchbetrieb – im Gegensatz zum Durchflusssystem – die Gasproduktion und die Gaszusammensetzung nicht konstant sind, werden mehrere Batcheinheiten parallel und phasenverschoben betrieben (Membrez, 1994).

### Kontinuierliche Verfahren

Bei den kontinuierlichen Verfahren wird dem Fermenter täglich neues Gärsubstrat zugegeben, während eine identische Menge aus dem Gärbehälter verdrängt oder aktiv ausgetragen wird. In Abbildung 2 sind die wichtigsten Verfahrensmöglichkeiten für die kontinuierliche Vergärung von Feststoffen zusammengefasst:

Bei der einstufigen **trockenen Vergärung** werden die Feststoffe unverdünnt oder unter Zugabe von wenig Flüssigkeit im Durchflussverfahren vergärt (TS-Gehalt: 25–35%). In der Praxis existieren bereits einige Anlagen, die nach diesem Verfahren arbeiten. Sie werden in erster Linie für die Vergärung der organischen Fraktion von häuslichem Abfall eingesetzt.

## Begriffe

### Anacom

Anaerobic composting of manure

### TS

Trockensubstanz

### OS

organische Substanz

### mesophile Vergärung

Gärtemperatur 28 bis 38° C

### thermophile Vergärung

Gärtemperatur 50 bis 65° C

### Hydrolyse

erste Stufe der Methangärung (Verflüssigung)

### Verweilzeit

mittlere Aufenthaltszeit des Mistes/der Gülle im Fermenter

### Raumbelastung

täglich zugeführte organische Substanz pro m<sup>3</sup> Fermentervolumen

### Gasausbeute

auf die zugegebene organische Substanz bezogene Biogasproduktion

### Gasproduktion

tägliche Biogasproduktion des Fermenters

### Spezifische Gasproduktion

tägliche Gasproduktion pro m<sup>3</sup> Fermentervolumen (Fermenterleistung)

### WKK

Wärme-Kraft-Koppelung

### Prozessenergie

Energiebedarf für die Erwärmung des Substrates und die Kompensation der Oberflächen-, Verteilungs- und Speicherverluste

### Nettoenergie-Ertrag

Energieertrag der Biogasanlage nach Abzug der Prozessenergie

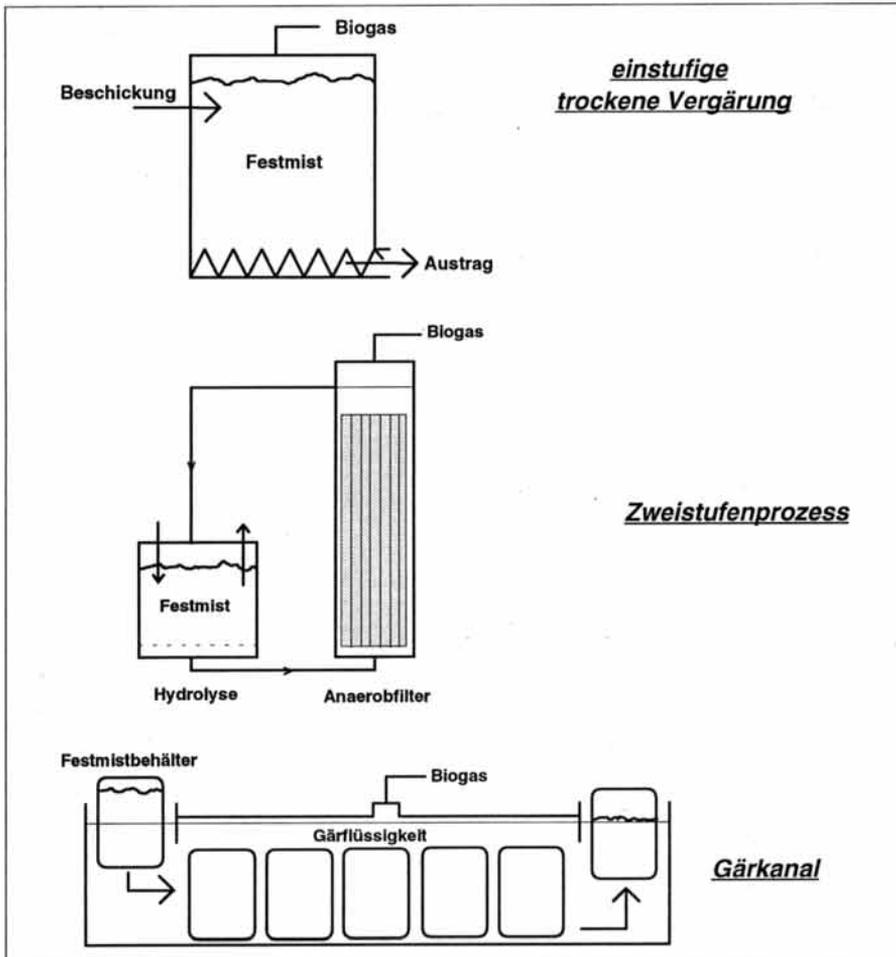


Abb. 2. Mögliche kontinuierliche Verfahren für die Biogasproduktion aus Feststoffen.

Im **Gärkanal-System** wird das feste Material innerhalb eines Gebäudes (perforierter Feststoffbehälter) durch eine flüssige Phase transportiert und dabei vergoren. Der Gärkanal kann auch als Hybridreaktor betrieben werden, in welchem neben dem eingebundenen Feststoff auch die Flüssigkeit im Durchlaufverfahren vergoren wird.

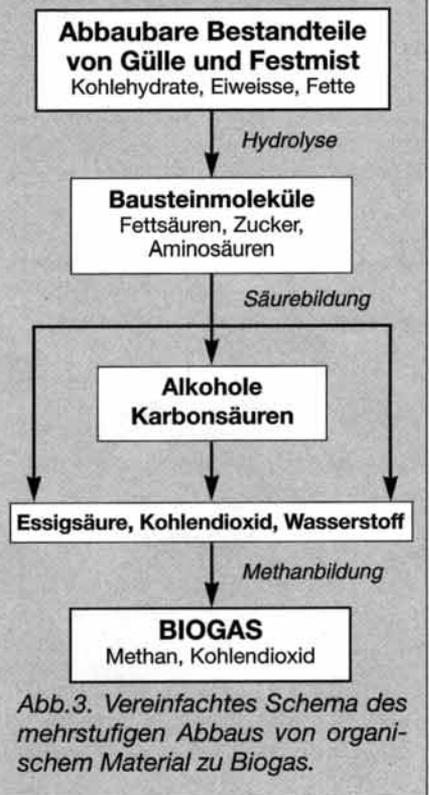
Der **Zweistufenprozess** zeichnet sich durch die räumliche Trennung der Hydrolyse («Verflüssigung» der Feststoffe) und der Methanbildung aus. Die Gärflüssigkeit durchströmt in der ersten Stufe die Feststoffe und wird dabei mit löslichen Verbindungen beladen, die im anschließenden anaeroben Hochleistungsreaktor in Biogas umgewandelt werden. Die Flüssigkeit wird nach der Methanisierung rezirkuliert und kann sich von neuem mit den löslichen Abbauprodukten der ersten Stufe beladen.

### Kontinuierliche Verfahren für die Feststoffvergärung

Mittels biologischer und verfahrenstechnischer Grundlagenversuche im Labormassstab wurde untersucht, welches oder welche der in Abbildung 2 dargestellten Feststoffverfahren sich für die Biogasproduktion aus Feststoffen eignen. Die Laborversuche erbrachten erfolgversprechende Resultate für die **trockene Vergärung** und für den **Gärkanal**, während sich das Konzept der zweistufigen Vergärung aufgrund des zu tiefen Gasertrages als nicht geeignet erwies (Baserga, 1994). In der Folge wurden auf dem Gelände der FAT zwei entsprechende Pilotanlagen zur Vergärung von Festmist gebaut und betrieben. Dieser Bericht enthält die Versuchsergebnisse der 1990 gebauten Anacom-Anlage. Die Resultate und die Betriebserfahrungen mit dem im Jahr 1992 erstellten Gärkanal werden später publiziert.

### Methangärung

Beim anaeroben Abbau von Gülle und Mist werden die organischen Inhaltsstoffe wie Fette, Kohlehydrate und Eiweißverbindungen in ihre niedermolekularen Bausteine zerlegt und letztlich zu Biogas – einem Gemisch von Methan (60 bis 70%) und Kohlendioxid (30 bis 40%) – umgesetzt. Der Abbau erfolgt in mehreren Stufen, wobei für jeden Schritt spezifische Bakteriengruppen beteiligt sind. Die eigentlichen Methanbakterien sind dabei das letzte Glied der mehrstufigen mikrobiellen Abbaukette. Dieser biologische Abbauprozess findet überall statt, wo kein Sauerstoff und genügend Feuchtigkeit vorhanden ist (vgl. Abb. 3).



## Anacom-Pilotanlage

### Anlagenkonzept

Die Anacom-Pilotanlage arbeitet nach dem System der trockenen, kontinuierlichen Vergärung (**Anacom: Anaerobic composting of manure**). Der Fermenter wird mit einer Kolbenpresse (Maulwurf) mit Mist beschickt, welcher im Durchlaufverfahren vergoren wird. Der Austrag des vergorenen Materials erfolgt mit Hilfe eines Kratzbodens und einer Austragsschnecke (vgl. Abb. 4). Der Mist wird mittels einer Schubkarre aus dem Stall geführt und nach dem Wägen in den Maulwurftrichter (1) eingefüllt. Der Maulwurf fördert den Mist in das Beschickungsrohr (2), in welchem er auf die erforderliche Gärtemperatur aufgewärmt wird. Über einen Verteiler (9) gelangt der Frischmist in den Gärbehälter (8). Er bewegt sich von oben nach unten durch den Fermenter (down-flow-Prinzip) und wird schliesslich mit einer Förderschnecke (5), die vom Kratzboden (6) mit dem vergorenen Material gespiesen wird, ausgetragen und auf den Miststock (7) befördert. Zur Kompensation der Wärmeverluste ist der untere Teil des Fermenters mit einer Heizwand versehen.

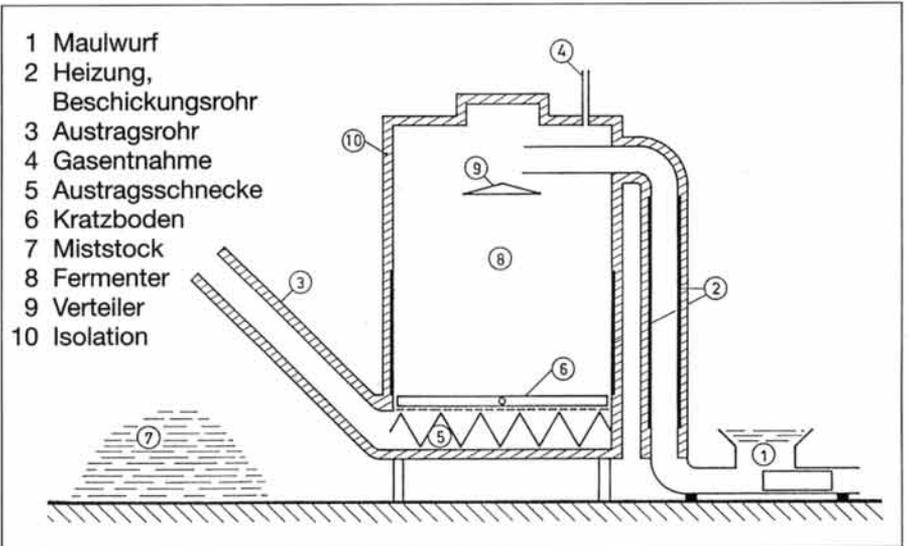
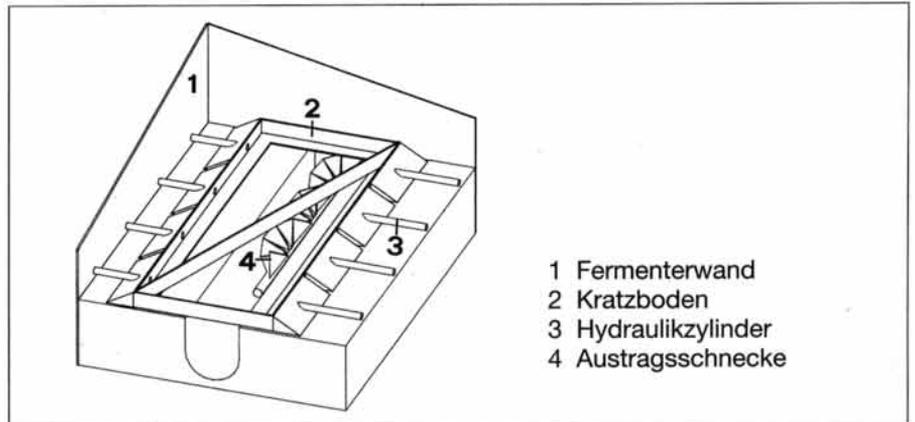


Abb. 4. Schema der Anacom-Pilotanlage.



- 1 Fermenterwand
- 2 Kratzboden
- 3 Hydraulikzylinder
- 4 Austragsschnecke

### Anlagekomponenten

Der stehende **Gärbehälter** mit einem Totalinhalt von 9,6 m<sup>3</sup> besteht aus einem kubischen Stahltank mit einer Grundfläche von 2,0 m x 1,5 m und einer Höhe von 3,2 m. Der Behälter ist mit Steinwolleisolation mit einer Dicke von 12 cm isoliert. Die Isolation ist mit einer hinterlüfteten Metallfassade aus gewelltem Stahlblech abgedeckt. Auf der Oberseite des Gärbehälters befindet sich das Mannloch mit einem Durchmesser von 60 cm. Das Beschickungsrohr führt unmittelbar unter der Fermenterdecke durch die Seitenwand in die Mitte des Fermenters. Sie ist als Doppelmantelrohr ausgelegt und dient zugleich als Wärmetauscher für die Aufheizung des Frischmistes. Am Fermenterboden ist in der verlängerten Achse der Schnecke das isolierte Austragsrohr (3) angebracht.

Die **Beschickung** erfolgt mit einer hydraulisch betriebenen Kolbenpresse



Abb. 5a (oben) und b (unten). Das Austragssystem (Kratzbodenkonstruktion): Der vergorene Mist wird mit einer Förderschnecke, die von einem Kratzboden gespiesen wird, ausgetragen.

(Maulwurf), welche den Mist durch das Beschickungsrohr in den Fermenter fördert. Der Frischmist wird karrettenweise aus dem Stall geführt, gewogen und in den Maulwurfstrichter gekippt. Das beheizte Rohr fasst rund 250 kg Frischmist, welcher während der Zeit eines Beschickungsintervalles (in der Regel 24 Stunden) aufgeheizt wird. Der eigentliche Beschickungsvorgang beträgt 10 bis 15 Minuten.

Die Kratzbodenkonstruktion für den **Austrag des vergorenen Mistes** aus dem Fermenter ist in den Abbildungen 5a und 5b dargestellt. In der Mitte des Fermenterbodens befindet sich die elektrisch betriebene Austragsschnecke, welche in einen versenkten Schneckenkanal eingelassen ist. Die Förderung des vergorenen Mistes zur Austragsschnecke erfolgt durch einen Kratzboden.

## Betrieb der Anlage

### Substrat

Als Substrat stand Festmist von zwei Tretmistbuchten mit je sieben Mastochsen (250-500 kg) des an die Pilotanlage angrenzenden Jungvieh-Versuchsstalles der FAT zur Verfügung (Minonzio, 1992). Als Einstreumaterial wurde Weizen-Langstroh aus Pressballen mit Halmlängen zwischen 40 und 50 cm verwendet. Die Einstreumenge betrug rund 2,5–3 kg Langstroh pro Tier und Tag. Die Anlage wurde täglich mit dem anfallenden Tretmist und dem auf dem Fressplatz liegenden Kot und Harn beschickt. Der tägliche Mistanfall lag, abhängig vom Tieralter und Tierbestand, zwischen 200 und 300 kg.

### Anfahren des Fermenters

Während des Versuchsbetriebes musste die Anlage mehrmals geleert und wieder neu in Betrieb genommen werden. Dabei zeigte sich, dass das Anfahren des Festmistfermenters sowohl beim thermophilen (50 °C) als auch beim mesophilen Betrieb (32 °C) keinerlei Probleme bietet. Abbildung 6 zeigt den Verlauf der Gasproduktion beim Neustart der Anlage nach einem Betriebsunterbruch. Der Fermenter wurde mit 2 m<sup>3</sup> Festmist befüllt und rund 200 Liter Impfgülle aus der im psychrophilen Temperaturbereich

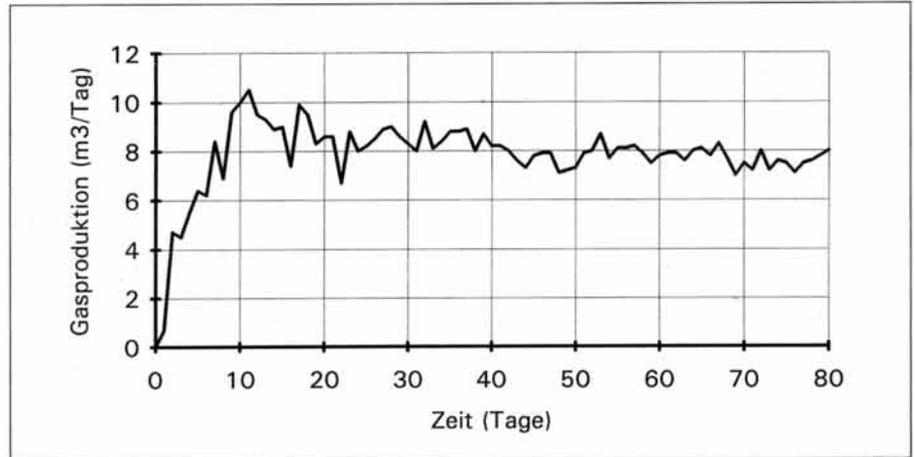


Abb. 6. Entwicklung der Gasproduktion beim Anfahren des Festmistfermenters: Das Anfahren des Fermenters bietet keine Probleme. Die Gasproduktion setzt unmittelbar nach der Zugabe von rund 10% Impfmateriale (Biogasgülle oder Klärschlamm) ein.

(20 °C) betriebenen FAT-Speicherbiogasanlage (Sutter, 1984) zugegeben. Anschliessend erfolgte die tägliche Beschickung mit Frischmist. Gemäss Abbildung 6 setzt die Gasproduktion unmittelbar nach dem Starten der Anlage ein und erreicht nach rund zehn Tagen einen stabilen Wert. In einem weiteren Anfahrversuch wurde im mesophilen Bereich dasselbe Vorgehen mit Faulschlamm aus einer kommunalen Kläranlage durchgeführt. Dabei zeigte sich ein identisches Anfahrverhalten wie bei der Beimpfung mit Biogasgülle.

### Temperatur- und Verweilzeitverteilung im Fermenter

Temperaturmessungen zeigten, dass im ungerührten Fermenter eine ausreichend homogene Temperaturverteilung vorliegt. Die Abweichungen von der Soll-Temperatur betragen 1 bis 2 °C, was für den biologischen Abbauprozess unproblematisch ist.

Die Bestimmung des Verweilzeitverhaltens des Gärsubstrates gibt Auskunft über die Strömungsverhältnisse im Fermenter. Einer Tages-Charge Frischsubstrat wird dabei eine bestimmte Menge Markiersubstanz beigemischt. Die anschliessend gemessene zeitabhängige Konzentration im Ausfluss des Fermenters ermöglicht Aussagen über das tatsächliche Verweilzeitspektrum. Substratkurzschlüsse und inaktive Zonen (Totvolumen) können mit dieser Methode erkannt werden. Einer Ta-

gesportion Mist mischte man bei der Beschickung eine definierte Menge Plastiktrinkhalme (200 bis 300 Stück) bei, welche während der darauf folgenden Wochen wieder aus den täglichen Austrags-Chargen aussortiert und gezählt wurden. Als Beispiel sind in Abbildung 7 die gemessenen Verteilungen bei den berechneten Verweilzeiten von 16 und 22 Tagen dargestellt. Die Graphik zeigt, dass der Anacom-Fermenter ein für Praxisbedingungen recht gutes Pfropfstromverhalten aufweist. Die Wiederauffindungsrate der Trinkhalme lag bei sämtlichen Versuchen zwischen 80 und 90%. Geht man davon aus, dass ein grosser Teil der restlichen Trinkhalme beim Aussortieren des Mistes übersehen wurden und ein weiterer Teil am Kratzbodenrahmen hängengeblieben war (Beobachtung bei der Leerung des Fermenters), kann mit ziemlicher Sicherheit ausgeschlossen werden, dass sich im Fermenter systembedingte Totvolumina ausbildeten.

### Betriebssicherheit

Die weitaus grössten Probleme, die sich auf die Betriebszuverlässigkeit der Anlage auswirkten, traten beim Austragssystem auf. Schon nach einer kurzen Laufzeit waren Änderungen am Kratzboden nötig, da die ursprüngliche Konstruktion zu einer Blockierung des Systems führte. Das modifizierte System (Abb. 5) hat sich während der restlichen Betriebsdauer von rund einein-

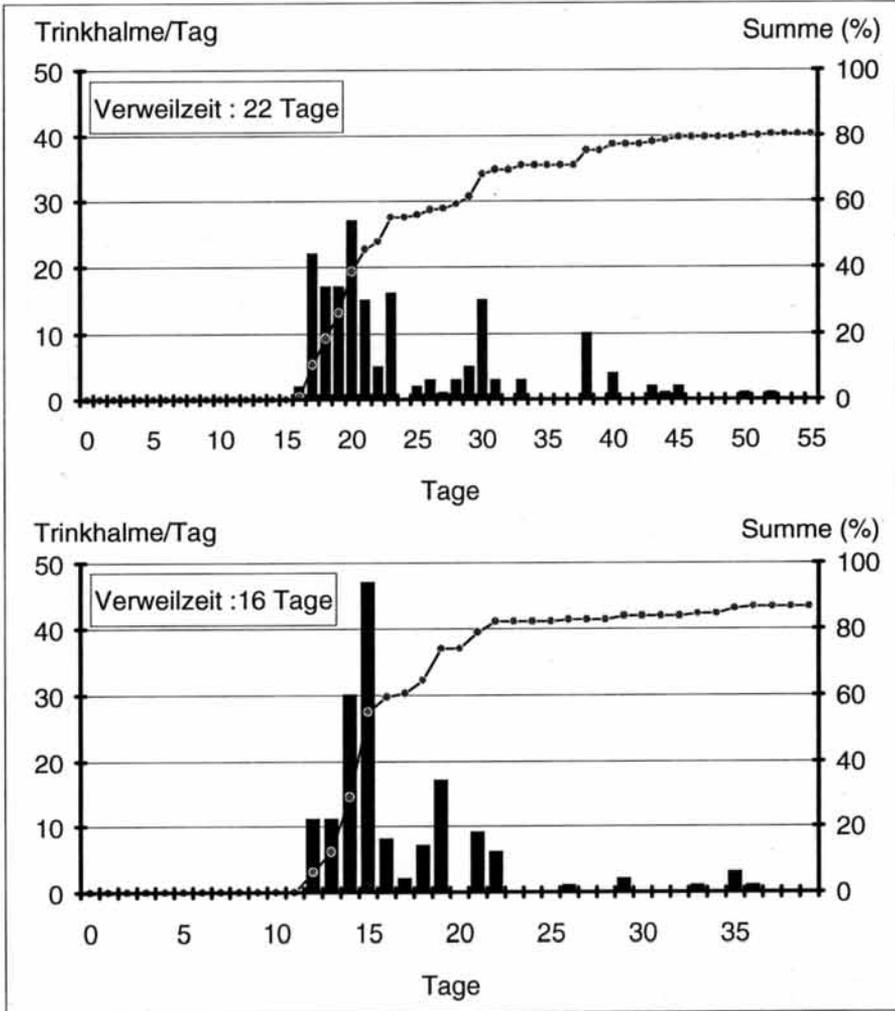


Abb. 7. Verweilzeitverteilung im ungerührten Festmistfermenter: Der Fermenter weist ein für Praxisbedingungen gutes Pfropfstromverhalten aus.



Abb. 8. Beladung eines Miststreuers mit vergorenem Mist: Das vergorene Material kann mit konventionellen Miststreuern problemlos auf die Felder ausgebracht werden.

halb Jahren sehr gut bewährt. Die Beschickung mit einer hydraulisch betriebenen Kolbenpresse (Maulwurf-System) hat sich ebenfalls als funktionstüchtiges und betriebssicheres Verfahren erwiesen. Während des gesamten Versuchsbetriebes traten keine Probleme bei der Beschickung des Frischmistes auf. Ebenso hat sich das Konzept der externen Mistaufheizung bewährt.

#### Ausbringen des vergorenen Mistes

Abbildung 8 zeigt den an seiner dunklen Farbe gut erkennbaren vergorenen Mist auf der Mistplatte neben der Festmistanlage. Obwohl der TS-Gehalt durch den Abbau um rund 20–25% abnimmt, kann der vergorene Mist mit herkömmlichen Miststreuern problemlos ausgebracht und auf die Felder gestreut werden.

### Anlagekennwerte

#### Gasproduktion

Im untersuchten Verweilzeitbereich von 16 bis 30 Tagen wurden bei 50 °C keine höheren Ausbeuten erreicht als bei der mesophilen Betriebsweise bei 32 °C. Die Biogasausbeute liegt – abhängig von der Verweilzeit – zwischen 190 und 320 Litern pro kg organische Substanz beim mesophilen Betrieb bzw. zwischen 230 und 345 Litern beim thermophilen Betrieb (Tabelle 1). Die spezifische Gasproduktion beträgt 1,5 bis 2 m<sup>3</sup> Biogas pro m<sup>3</sup> Fermentervolumen und Tag bei der thermophilen Betriebsweise bzw. 1,7 bis 2,4 m<sup>3</sup> Biogas beim mesophilen Betrieb. Die Gaszusammensetzung zeigte über den untersuchten Verweilzeitbereich sehr konstante Werte. Der Methangehalt liegt zwischen 51 und 54% beim thermophilen Betrieb bzw. zwischen 56 und 58% beim mesophilen Betrieb, was bedeutet, dass der Energiegehalt des Biogases bei mesophiler Gärtemperatur um rund 8 bis 10% höher ist.

#### Prozess-Stabilität

Zur Kontrolle des Faulprozesses wurden der pH-Wert sowie die flüchtigen Fettsäuren bestimmt. Bedingt durch die hohen Raumbelastungen werden

Tabelle 1: Gasproduktionsdaten der Pilotanlage beim thermophilen und mesophilen Betrieb

Gärtemperatur	°C	32 (mesophil)				50 (thermophil)			
Verweilzeit	Tage	12	16	22	28	16	26	30	34
<b>Substrat</b>	Tretmist (Ochsenmist, 250 - 500 kg, 2,5 - 3 kg Weizenlangstroh pro Tier und Tag) frisch TS: 16,5 - 19 % / OS: 80 - 83 % vergoren TS: 13,5 - 15 % / OS: 75 - 78 %								
<b>OS-Abbau</b>	25 - 30 %								
<b>Raumbelastung</b>	kg OS/m <sup>3</sup> ·d	12,3	8,7	6,8	5,4	8,7	5,7	4,4	4,25
<b>Gas</b>									
Gasproduktion	m <sup>3</sup> /d	8,5	11,0	8,6	9,6	9,5	8,7	8,0	8,8
Methangehalt	%	56	58	58	57	51	51	52	54
Spezifische Gasproduktion	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ·d	2,4	2,3	1,8	1,7	2,0	1,5	1,4	1,5
Gasausbeute	l/kg OS	192	266	265	317	230	265	320	345
	l/kg Mist	28,3	39,3	39,0	48,0	33,9	39,5	42,1	51,8
	m <sup>3</sup> /GVE·d	1,8	2,4	2,4	2,9	2,1	2,5	2,6	3,2

bei der Festmistvergärung höhere Säurewerte als bei der Flüssiggülle-Vergärung gemessen. Im untersuchten Verweilzeitbereich lag die Gesamtsäurekonzentration in der Mistflüssigkeit zwischen 1000 und 5300 mg pro Liter. Die Säurewerte liegen somit in einem bezüglich der Prozess-Stabilität nicht kritischen Bereich (Kugelman, 1971). Die pH-Messungen ergaben stabile Werte zwischen 7,5 und 7,7 pH-Einheiten. Verantwortlich für diesen engen pH-Bereich ist die hohe Pufferkapazität der Gülle- und Mistsubstrate. Die Messungen zeigen, dass die Stabilität des Faulprozesses trotz der höheren Belastung gewährleistet ist.

**Gasausbeuten anderer Festmistsubstrate**

Die Gasausbeuten anderer Festmistarten wurden in dieser Untersuchung nicht bestimmt. Der Vergleich der experimentell ermittelten Gasausbeuten mit den theoretisch berechneten (Addition der Gasproduktion der einzelnen Substratkomponenten Gülle

und Stroh) zeigt jedoch, dass eine Grobabschätzung des Gasertrages anderer Mistarten möglich ist. So beträgt die experimentell bestimmte Gasausbeute bei 32° C und der Verweilzeit von 28 Tagen 2,9 m<sup>3</sup> Biogas pro GVE und Tag (Tab.1), während die berechnete Gasausbeute rund 3,3 m<sup>3</sup> pro GVE und Tag ergibt (Stroh: 250 Liter/kg OS bzw. rund 1,4 m<sup>3</sup>/Tag und GVE, Rindergülle: 400 Liter/kg OS bzw. rund 1,9 m<sup>3</sup>/Tag und GVE). Die Differenz lässt sich dadurch erklären, dass bei der theoretischen Berechnung die Hemmeinflüsse, welche bei der Vergärung von Festmist mit hohen TS-Gehalten auftreten können (Baserga, 1994), nicht berücksichtigt sind. Für eine weitergehende Analyse lohnt es sich jedoch – vor allem bei der Vergärung von gelagertem bzw. älterem Mist (Tiefstreuverfahren) – das Gaspotential mit einem biologischen Gärtest bestimmen zu lassen. Genauere Daten über die Gasausbeuten tierischer Exkremente und pflanzlicher Abfallstoffe sind im Biogashandbuch (Wellinger et al.,1991) zusammengestellt.

**Praxisanlagen**

**Dimensionierung**

**Gärtemperatur**

Die Versuche zeigten, dass sich die Gasausbeuten bei der mesophilen und thermophilen Vergärung von Festmist im untersuchten Verweilzeitbereich von 16 bis 34 Tagen nur unwesentlich unterscheiden. Wegen des geringeren Prozessenergiebedarfs wird somit beim mesophilen Betrieb ein wesentlich höherer Nettoenergieertrag erreicht. Zudem wirkt sich der höhere Methangehalt (58% gegenüber 51% bei der thermophilen Vergärung) positiv auf die Energiebilanz aus. Die optimale Gärtemperatur dürfte im Bereich zwischen 30° C und 36° C liegen. Sie hängt auch von den betrieblichen Voraussetzungen ab und ist für jede einzelne Anlage separat zu bestimmen.

**Verweilzeit**

Im Gegensatz zur Vergärung von Rindergülle, bei welcher zwischen 15 und 20 Tagen eine deutliche Abflachung der Gasproduktion stattfindet (Baserga, 1984), ist bei der Mistvergärung dieser Übergang weniger stark ausgeprägt. Auf der Pilotanlage wurde bei der längsten Verweilzeit (28 Tage) eine Ausbeute von rund 320 Liter Biogas pro kg organische Substanz erreicht. Untersuchungen im Batch-Verfahren zeigten, dass längere Faulzeiten nur noch eine unbedeutende Mehrausbeute erbringen. Als Richtwert für die Dimensionierung einer Praxisanlage wird eine Verweilzeit von maximal 28 bis 30 Tagen empfohlen.

**Kosten und Ertrag einer 30-GVE-Festmistanlage**

Zur Beurteilung wirtschaftlicher Aspekte wurden Kosten und Ertrag einer Festmistbiogasanlage für 30 GVE mit einer entsprechenden Flüssiganlage verglichen. Die Investitions- und Betriebskosten für den Festmistfermenter inklusive Entmistungs- und Beschikungssystem (Maulwurf in Kombination mit Schubstangen- oder Fallschieberentmistung) sind etwa gleich hoch wie die einer kontinuierlich betriebenen Überflurflüssiganlage (Baserga, 1994). Unter Berücksichtigung der zusätzlichen Auslagen (Planung, Elektroarbeiten, Gasnutzung mit Wärme-Kraft-Kopplung) liegen die Erstel-

lungskosten einer Festmistanlage in derselben Größenordnung wie bei einer Flüssiganlage, nämlich zwischen Fr. 4500.- und 5800.- pro Grossvieheinheit.

Der Energieertrag einer Festmistanlage im Vergleich zu einer Flüssiganlage ist in Tabelle 2 dargestellt. Die Berechnungen erfolgten für Rindervollgülle und Rindertretmist. Die Verweilzeit von 18 Tagen bei der Gärtemperatur von 30 ° C entspricht dem Praxiswert für eine optimale Bruttogasproduktion bei der Rindergüllevergärung (Egger, 1991), während beim Festmist mit einer Verweilzeit von 28 Tagen gerechnet werden muss.

Der Vergleich zeigt: Die Biogasproduktion und der Energieertrag sind bei der

**Tabelle 2: Biogasproduktion und Ertrag einer 30-GVE-Festmistanlage im Vergleich mit einer Flüssiganlage (Energienutzung 100%)**

Substrat	Rindergülle		Rindermist	
	18 Tage	28 Tage	18 Tage	28 Tage
Verweilzeit (Tage)				
Gärtemperatur (°C)	30 °C	30 °C	32 °C	32 °C
Fermentervolumen	35 m <sup>3</sup>	52 m <sup>3</sup>	37 m <sup>3</sup>	56 m <sup>3</sup>
Gasproduktion (m <sup>3</sup> /Tag)	51	58	70	86
Gasproduktion (m <sup>3</sup> /GVE)	1,7	1,9	2,4	2,9
Biogasausbeute (l/kg OS)	350	400	260	320
Bruttogas (m <sup>3</sup> Gas/Jahr)	18 549	21 200	25 680	31 310
Prozessenergie (m <sup>3</sup> Gas/Jahr)	4 582	5 014	5 560	6 167
in % vom Bruttogas	25	23	22	20
<b>Stromproduktion (kWh/Jahr)</b>	<b>25 600</b>	<b>29 100</b>	<b>33 500</b>	<b>41 000</b>
<b>Nettoproduktion Wärme (MJ/Jahr)</b>	<b>173 400</b>	<b>201 800</b>	<b>24 000</b>	<b>302 000</b>
<b>Ertrag (Fr./Jahr)</b>	<b>6 770.-</b>	<b>7 760.-</b>	<b>9 030.-</b>	<b>11 150.-</b>

**Berechnungsgrundlagen zu Tabelle 2**

Tierart:	Rinder (Mast)
Tiergewicht:	320 - 500 kg
Anzahl Tiere	66
Gülemenge:	25 Liter pro Tier und Tag (Flüssiganlage)
Einstreu Tretmiststall:	2,5 kg Weizenlangstroh pro Tier und Tag
Tretmist:	27,5 kg pro Tier und Tag (Festmistanlage)
Methangehalt:	Flüssiganlage 60 % / Festmistanlage 57 %
Gasnutzung:	Wärme-Kraft-Kopplung (Elektrizität: 23 % / Wärme: 62 %)
Energiepreise:	18 Rp pro kWh Elektrizität / 4,5 Rp pro kWh Wärme
k-Wert Biogasanlage:	Flüssiganlage: 0,5 W/m <sup>2</sup> K / Festmistanlage: 0,6 W/m <sup>2</sup> K
Mistdichte (Maulwurf):	900 - 1000 kg/m <sup>3</sup>

Festmistanlage deutlich höher als bei der Flüssigbiogasanlage. Gegenüber einer Flüssiganlage erhöht sich der Nettoenergieertrag der Festmistanlage um rund 36% bei der Verweilzeit von 18 Tagen bzw. um 46% bei der Verweilzeit von 28 Tagen. Vergleicht man die Nettoausbeuten bei den empfohlenen Verweilzeiten für Gülle und Festmist (18 Tage bzw. 28 Tage), so beträgt die Mehrproduktion sogar rund 70%. Dieser Mehrertrag schlägt sich auch in der Energiekosteneinsparung eines Landwirtschaftsbetriebes nieder. Bei der Gasnutzung in einer Wärme-Kraft-Koppelungsanlage beträgt der jährliche Mehrertrag bei der Festmistvergärung rund Fr. 4400.-.

Massgebend für den höheren Ertrag des Festmistsystems ist die zusätzliche Biogasproduktion durch die Vergärung des Stroh. Der prozentuale Mehrertrag gegenüber der Vollgülle-fergärung hängt dabei von der Einstreumenge und von der Tierart ab. Im vorliegenden Beispiel stammen rund 2,2 kg organische Substanz von den Exkrementen des Tieres und rund 2 kg vom Stroh. Je kleiner die Biogasausbeute der Gülle und je höher die Einstreumenge ist, desto mehr fällt die Mehrproduktion durch die Strohzugabe ins Gewicht. Ein Vergleich mit Mist aus einem Milchviehstall wird demzufolge noch deutlicher zugunsten einer Festmistanlage ausfallen, da die Gasausbeute der Milchviehgülle nur rund 200 bis 250 Liter pro kg organische Substanz gegenüber 350 bis 400 Liter bei der Rindermast beträgt.

## Schlussfolgerungen

Die Pilotanlage zur Biogaserzeugung aus Festmist hat sich gut bewährt. Das verwirklichte Anlagenkonzept kann in bezug auf die Betriebssicherheit (Verfahrenstechnik sowie Stabilität der Methangärung) für die Praxis empfohlen werden. Die Investitions- und Betriebskosten einer entsprechenden Praxisanlage sind etwa gleich hoch wie bei einer Flüssiggülle-Biogasanlage. Durch die zusätzliche Vergärung des Stroh wird der Energieertrag einer Festmistanlage erheblich gesteigert, wodurch ein deutlich besseres Kosten-Nutzen-Verhältnis im Vergleich zu einer Flüssiggülle-Biogasanlage erreicht wird.

## Literatur

Baserga, U., Egger, K., Wellinger, A.: Entwicklung einer Pilotanlage (Anacom) zur Vergärung von Festmist. Bundesamt für Energiewirtschaft, Forschungsprogramm Biomasse, Juli 1994, 42 Seiten.

Baserga, U.: Biogaserzeugung aus Rinderflüssigmist, SWISS BIOTECH, Nr. 2, S. 19-24, 1984.

Egger, K. et al.: Erneuerbare Energien in der Landwirtschaft-Planungsgrundlagen. PACER-Dokumentation, Bundesamt für Konjunkturfragen, Best.-Nr. 724.221.d, Bern 1991.

INFOENERGIE: Biogasanlagen in der Schweiz. Adressliste mit Verzeichnis der Hersteller und Planungsbüros. 8. Auflage, Juli 1992.

Kaufmann, R.: Forschung und Praxis der Festmistwirtschaft in der Schweiz (Teil 1: Verfahrenstechnische und praktische Erfahrungen). KTBL Arbeitspapier 182: Umweltverträgliche Verwertung von Festmist, 1993, KTBL, Darmstadt, 153 Seiten.

Kugelman, I.J. and Chin, K.K.: Toxicity, Synergism and Antagonism in Anaerobic Waste Treatment Processes. Adv. in Chemistry Series, 105, pp 55-90, 1971.

Membrez, Y.: Systeme modulaire de methanisation en discontinu: Rapport final. Office Fédéral de l'Energie (OFEN), 1994.

Minozio, G. et al.: Der Tretmiststall. Schriftenreihe der FAT, 8356 Tänikon, Nr. 35, 1992, 104 Seiten.

Sutter, K., Wellinger, A.: Güllegrube als Biogasanlage. FAT-Bericht Nr. 304, 1987, 8 Seiten.

Wellinger, A., Baserga, U., Edelmann W., Egger K., Seiler, B.: Biogas-Handbuch, 2. Auflage, Verlag Wirz AG Aarau, 1991, 178 Seiten.