

Programm Biomasse

Vergärung von Energiegras zur Biogasgewinnung

Urs Baserga, Kurt Egger, Tänikon

im Auftrag des
Bundesamtes für Energiewirtschaft

Juni 1997

Schlussbericht

Forschungsprojekt BEW: 50379

Urs Baserga
Kurt Egger

Vergärung von Energiegras zur Biogasgewinnung

Schlussbericht

Dank

Über einen Zeitraum von insgesamt dreieinhalb Jahren konnten wichtige biologische und verfahrenstechnische Grundlagen der Vergärung von Energiegras erarbeitet werden. An dieser Stelle sei allen Personen gedankt, die zum Gelingen dieses Projektes beigetragen haben. Ein spezieller Dank gebührt dem **Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW)** für die Finanzierung des Projektes und für das Vertrauen, das den Projektmitarbeitern entgegengebracht wurde. Ein weiterer Dank gilt all jenen Mitarbeitern der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), die das Forschungsprojekt mit ihrem fachlichen und praktischen Wissen unterstützten.

MitarbeiterInnen des Projektes

Folgende MitarbeiterInnen haben an den Forschungsarbeiten mitgewirkt:

Projektleitung

Urs Baserga, Dr.sc.nat.ETH

Kurt Egger, Dipl.Masch.Ing.ETH

Labor, Analytik

Markus Heusser, Chemikant

Sonja Pfister, Laborantin

Hilfskraft

Willi Weidmann, Landwirt

Tänikon, Juni 1997

Der Verfasser: Dr. U. Baserga

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

Abstract / Zusammenfassung	2/3
1. Einleitung und Zielsetzung	4
2. Verfahrenstechnik der Feststoffvergärung	5
2.1 Grundlegende Verfahrensmöglichkeiten	5
2.2 Bestehende Feststoffbiogasanlagen	6
2.2.1 Batch-Verfahren	6
2.2.2 Kontinuierliche Verfahren	6
2.3 Vergärung von Energiegras	8
3. Experimenteller Teil	9
3.1 Zielsetzung	9
3.2 Untersuchte Verfahren der Energiegrasvergärung	9
3.3 Substrat	9
3.4 Analytik	11
3.5 Aufbau und Betrieb der Versuchsanlagen	12
3.5.1 Batch-Anlagen	12
3.5.2 Rührkesselfermenter	13
3.5.3 Trockenvergärung	14
3.5.4 Labor-Gärkanal	15
3.5.5 Zweistufige Vergärung	16
4. Resultate und Diskussion	17
4.1. Batch-Versuche	17
4.2 Rührkesselfermenter (Co-Vergärung)	23
4.2.1 Vergärung von Heupellets mit Leitungswasser	23
4.2.2 Vergärung von Heupellets mit Gülle	24
4.2.3 Vergärung von Silage mit Sauggülle	24
4.2.4 Schwimmdeckenbildung, Fest/Flüssig-Trennung	26
4.2.5 Zusammenfassung	27
4.3. Anacom-Fermenter (Trockene Vergärung)	28
4.3.1 Benetzung durch Wasserrezirkulation	28
4.3.2 Benetzung durch Saugüllerezirkulation	29
4.3.3 Co-Vergärung mit Rinderfestmist	29
4.3.4 Rezirkulation von vergorenem Material	30
4.3.5 Zusammenfassung	30
4.4 Gärkanal	31
4.5. Zweistufenprozess	32
4.5.1 Laborversuche	32
4.5.2 Zweistufenpilotanlage	34
5. Oekologische und ökonomische Aspekte	36
6. Schlussfolgerungen	38
7. Literatur	40

Abstract

The aim of this project was to develop biogas plant concepts for semicontinuous digestion of energy grass, i.e. cut grass, silage and hay from extensively managed meadows. As second priority, native grass monocultures with high yields were used as energy grass as well.

The influence of the substrate composition (different grass species), the pre-treatment of the substrate (chopping, storage) as well as the retention time and the digestion temperature on biogas production were analysed by means of batch digesters on laboratory scale. Considering the results of the batch tests, methods for the semicontinuous digestion of energy grass were developed and tested. Energy grass digestion in the stirred tank reactor (co-digestion with liquid manure) and in the biogas channel (in which solid manure packed in perforated bins is transported through a liquid phase) were analysed on laboratory scale in order to define the operating parameters. Furthermore, appropriate operating procedures for the dry anaerobic digestion (digestion of silage in a plug-flow reactor) were developed. A pilot experiment was made on a two-stage biogas plant with batch feed liquefaction acidogenesis reactor and a continuously operated anaerobic filter as methane reactor.

In the one-step process the biogas yield was between 500 and 600 litres per kilogram organic matter (digestion temperature: 35°C, retention time: 18-25 days). In the two step process, only 320 litres could be produced because of insufficient liquefaction.

The experiments have shown that grass digestion without any additional buffering media, i.e. without wetting or slurrying with a liquid phase, is not possible. Process stability can easily be achieved by digesting the grass (hay, silage) together with liquid manure (co-digestion, biogas channel) or by wetting it (dry anaerobic digestion). The co-digestion of chopped hay with pig slurry in the stirred tank reactor was carried out with a maximum loading rate of 8 g organic matter per litre per day. The loading rate in the plug-flow reactor (wetting by recirculating of 10 vol.-% of pig slurry and co-digestion with solid manure) ranged between 4.5 and 5.3 g organic matter per litre per day. If sufficient slurry is added, higher loading rates are possible.

Considering the current state of digestion technique, co-digestion and dry anaerobic digestion have the best chances to be directly put into practice. The biogas channel is a very safe process as regards process biology. For the practical operation of the system, however, further technical development on pilot scale is required. In practice, the choice of the appropriate process depends on the location and size of the planned biogas plant. If liquid manure can be digested together with grass, co-digestion in the stirred tank reactor can be recommended. The biogas channel is another suitable process for the co-digestion of silage and liquid manure. Dry anaerobic digestion is recommended for places where no liquid co-substrates or only small quantities can be co-digested.

Zusammenfassung

Ziel des vorliegenden Projektes war die Erarbeitung von Verfahrenskonzepten für die semikontinuierliche Vergärung von Energiegras zur Biogaserzeugung. Als Energiegras wurden in erster Linie Grasschnitt, Silage und Heu von extensiv bewirtschafteten Wiesenflächen sowie - in zweiter Priorität - auch Reinsaateneinheimischer ertragsreicher Gräser verwendet.

Mittels Batchversuchen im Labor-Massstab wurde der Einfluss der Substratzusammensetzung (Grasarten), der Substratvorbehandlung (Zerkleinerung, Lagerung) sowie der Faulzeit und der Gärtemperatur auf den Faulprozess untersucht. Aufbauend auf die Resultate der Batchversuche erfolgte die Entwicklung und Prüfung von Verfahren zur semikontinuierlichen Vergärung von Energiegras. Die Energiegrasvergärung im Rührkesselfermenter (Co-Vergärung mit Gülle) und im Gärkanal (Vergärung der festen Gärsubstrate in perforierten Behältern, die durch eine Gärflüssigkeit transportiert werden) konnten eingehend im Labor untersucht und die Dimensionierungsgrundlagen für beide Gärverfahren erarbeitet werden. Ebenso wurden geeignete Betriebsarten für die Trockenvergärung entwickelt (Vergärung von Silage in einem Feststoff-Pfropfstromreaktor) sowie ein einmaliger Pilot-Versuch auf einer zweistufigen Biogasanlage mit batchweiser Hydrolysestufe und kontinuierlich betriebener Anaerobfilter durchgeführt.

Bei den einstufigen Verfahren resultierten Biogasausbeuten von 500 bis 600 Liter Biogas pro Kilogramm zugeführte organische Substanz (Gärtemperatur: 35°C, Verweilzeitbereich: 18-25 Tage), während beim Zweistufensystem infolge einer ungenügenden Hydrolyseleistung nur 320 Liter erreicht wurden.

Die Labor-Versuche zeigten, dass die alleinige Vergärung von Silage oder Heu ohne ein zusätzliches pufferndes Medium bzw. ohne Benetzung oder Aufschlammung mit einer flüssigen Phase nicht möglich ist. Ein stabiler Faulprozess kann problemlos erreicht werden, wenn das Grasmaterial gemeinsam mit Gülle vergoren wird (Co-Vergärung, Gärkanal) bzw. wenn Güllesubstrate als Benetzungsflüssigkeit eingesetzt werden (Trockenvergärung). Im Rührkesselfermenter wurde bei der Co-Vergärung mit Schweinegülle mit Höchstbelastungen von 8 g OS/l/d gefahren, ohne dass dabei Probleme mit der Prozess-Stabilität auftraten. Im Feststoff-Pfropfstromreaktor betrug die Belastung 4.6 g OS/l/d (Benetzung durch Rezirkulation von 10 Vol.-% Schweinegülle) bzw. 5.3 g OS/l/d (Co-Vergärung mit 30% Festmist, Wasser als Benetzungsflüssigkeit).

Geht man vom heutigen Stand der Gärtechnik aus, so bestehen für die Co-Vergärung und die Trockenvergärung die besten Chancen für eine direkte technische Umsetzung. Das Gärkanalsystem ist in Bezug auf die Prozessbiologie als ein äusserst betriebssicheres Verfahren zu bezeichnen, für die Gewährleistung eines praxistauglichen Betriebes sind aber noch technische Entwicklungsarbeiten auf Pilotmassstabebene notwendig.

In der Praxis hängt die Systemwahl in hohem Masse vom Standort und der Grösse der zu installierenden Biogasanlage ab. Falls sich die gemeinsame Vergärung von Güllesubstraten mit Gras anbietet, kann die Co-Vergärung im Rührkesselfermenter als ein praxistaugliches Verfahren empfohlen werden. Das Gärkanalverfahren ist für die Co-Vergärung von Silage und Gülle ebenfalls sehr gut geeignet. An einem Standort, wo keine oder nur geringe Mengen von flüssigen Co-Substraten mitvergoren werden können, wird sich eher die Trockenvergärung als das passende Verfahren erweisen.

1. Einleitung und Zielsetzung

In der schweizerischen Landwirtschaft findet seit einigen Jahren ein Umbruch statt. Ziel der Neuorientierung ist einerseits die Vermeidung von Überschüssen und andererseits eine generelle Ökologisierung und Extensivierung der landwirtschaftlichen Produktion. Drei Viertel der schweizerischen landwirtschaftlichen Nutzfläche ist Grasland. Der restliche Viertel wird für Ackerkulturen genutzt. Gemäss Schätzungen des Bundesamtes für Landwirtschaft im Jahre 1991 sollen, um Überproduktionen zu vermeiden, rund 80'000 ha landwirtschaftliche Nutzfläche der Nahrungs- und Futtermittelproduktion entzogen werden. Aus pflanzenbaulicher Sicht kommen für die Umnutzung oder Extensivierung bei Grasland Grasmischungen und Feldholz in Frage, während auf Ackerflächen Gras-Reinsaaten, Miscanthus oder andere nachwachsende Rohstoffe angebaut werden können. Unabhängig von der Bewirtschaftungsintensität fällt Biomasse an, welche, soll sie nicht als Futter dienen, energetisch genutzt werden kann. Der jährliche Ertrag einer Hektare Grünland beträgt, je nach Bewirtschaftungsgrad 3 -12 Tonnen Trockensubstanz, was einem Heizöläquivalent von 1000-4000 Litern entspricht. Bei einer energetisch genutzten Fläche von rund 50'000 ha ergibt dies bei einem durchschnittlichen Ertrag von 6 TonnenTS pro Hektare eine jährliche Substitution von rund 80'000 Tonnen Heizöl oder 1.6% des schweizerischen Heizölverbrauchs.

Das Forschungsprojekt "Wärme und Strom aus Energiegras und Feldholz" hatte zum Ziel, die technische Machbarkeit der energetischen Nutzung von Gras, Chinaschilf und Feldholz abzuklären und deren ökologische und ökonomische Konsequenzen abzuschätzen. Dabei stand extensiv oder wenig intensiv genutztes Grasland im Vordergrund. Das Forschungsprojekt wurde interdisziplinär bearbeitet und fachspezifisch in zehn Teilprojekte aufgeteilt. In einem separaten Schlussbericht sind die Resultate aller Teilprojekte zusammenfassend publiziert worden [1].

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der energetischen Verwertung der Biomasse durch Vergärung. Der Schlussbericht fasst die Resultate des Teilprojektes E: "Vergärung von Energiegras zur Biogasgewinnung" zusammen. Das Ziel des Projektes ist die Entwicklung und Evaluation von Anlagekonzepten sowie der Betrieb einer Pilotanlage für die Vergärung von Energiegras. Als Energiegras wird in erster Linie Grasschnitt und dessen Konservierungsprodukte (Heu und Silage) aus extensiv und wenig intensiv bewirtschafteten Wiesenflächen bezeichnet. In zweiter Priorität können auch weitere Kulturen wie z.B. Miscanthus und andere schnellwachsende Grasarten (Reinsaaten) in die Versuche miteinbezogen werden. In der ersten Phase des Projektes sollen mittels Gärversuchen im Labormassstab die biologischen Grundlagen der Energiegrasvergärung erarbeitet werden. Diese Versuche dienen der Abklärung, welches oder welche Gärssysteme für die Biogaserzeugung aus Energiegras geeignet sind. In einer zweiten Phase sollen auf bestehenden Gülle- und Feststoffpilotanlagen vergleichende Versuche durchgeführt und - falls erforderlich - substratspezifische Anpassungs- und Entwicklungsarbeiten vorgenommen werden. Für die Teilprojekte "Ökonomie" und "Ökobilanz" sollen zudem die Rohdaten für die Kostenkalkulationen und die ökologische Beurteilung der Energiegrasvergärung ermittelt werden.

2. Verfahrenstechnik der Feststoff-Vergärung

Im Zusammenhang mit den Anstrengungen zur umweltgerechten Entsorgung von Abfällen, d.h. der vermehrten Material- und Energierückgewinnung, hat die Technik der Vergärung von festen Abfallstoffen in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. So sind vor allem im Bereich der Vergärung von kommunalen Abfällen (organische Fraktion von Hausmüll, Grünabfälle) grosse Fortschritte erzielt worden. Im europäischen Raum gibt es mehrere Firmen, welche Grossanlagen anbieten und auch bereits erstellt haben. Auf den folgenden Seiten werden die Verfahrensmöglichkeiten zur Vergärung von Feststoffen kurz zusammengefasst sowie eine Übersicht der bestehenden Anlagentypen gegeben.

2.1 Grundlegende Verfahrensmöglichkeiten

Die Anforderungen, die von der Vergärung fester Stoffe an die Verfahrenstechnik (Misch- und Förder-technik) gestellt werden, unterscheiden sich im Detail wesentlich von denen der Vergärung flüssiger Substrate, wie dies bei kommunalen Schlämmen, landwirtschaftlichen Gülten oder hochbelasteten Industrieabwässern der Fall ist. Grundsätzlich sind jedoch dieselben Gärverfahren wie bei der Flüssigvergärung möglich:

- diskontinuierliche oder kontinuierliche bzw. semikontinuierliche Betriebsweise
- einstufige oder zweistufige bzw. mehrstufige Prozessführung
- mesophile (28-38°C) oder thermophile (50-60°C) Vergärung

Die **diskontinuierliche Betriebsweise** (Batch-Vergärung) hat den Vorteil, dass kostengünstige Reaktoren eingesetzt werden können und verfahrenstechnische Probleme bei der Beschickung und der Entleerung des Feststoffreaktors entfallen. Diskontinuierliche Verfahren erfordern jedoch einen hohen Arbeitsaufwand und machen aufgrund des ungleichmässigen Gasanfalles den Parallelbetrieb von mehreren Reaktoren notwendig. Diese Betriebsform hat auch bei zweistufigen Verfahren für die Hydrolyse der Feststoffe praktische Bedeutung erlangt [2]. Die **kontinuierliche bzw. semikontinuierliche Betriebsweise** (chargenweise Beschickung des Fermenters) hat demgegenüber den Vorteil, dass die Gasproduktion keinen Schwankungen unterworfen und ein automatisierter Betrieb möglich ist. Von Nachteil sind die in der Regel höheren Investitionskosten sowie die mit dem kontinuierlichen Feststofftransport verbundenen betriebstechnischen Risiken. Aufgrund der Mehrstufigkeit des anaeroben Abbaus kann die Biogasерzeugung aus Feststoffen grundsätzlich durch eine **ein- oder mehrstufige Prozessführung** erfolgen. Bei den einstufigen Verfahren laufen die verschiedenen Abbaureaktionen (Hydrolyse, Versäuerung, Methanbildung) in einem einzigen Reaktor ab, während bei den mehrstufigen Verfahren diese Abbauschritte apparativ getrennt von der Methanisierung durchgeführt werden. Der Hauptvorteil der zwei- bzw. mehrstufigen Vergärung liegt darin, dass die Prozessbedingungen (pH, Temperatur, Verweilzeit etc.) den verschiedenen am Abbau beteiligten Bakteriengruppen angepasst werden können, was zu einer Verbesserung der Abbauleistung und der Prozess-Stabilität führen kann. Als Nachteil muss der gegenüber dem einstufigen Verfahren grössere apparative und maschinelle Aufwand bezeichnet werden.

Die **Gärtemperatur** beeinflusst die Abbaurate und damit die Gasausbeute bei einer gegebenen Verweilzeit. Gegenüber der mesophilen Vergärung findet im thermophilen Temperaturbereich ein schnellerer Abbau statt. Zudem wird eine Teilhygienisierung des Substrates erreicht. Nachteilig wirkt sich jedoch der höhere Prozessenergiebedarf und der biologisch instabilere Faulprozess aus. Die Wahl des optimalen Temperaturbereichs hängt in hohem Masse davon ab, was mit der Vergärung erreicht werden will. Steht die Energiegewinnung im Vordergrund, werden in der Regel mesophile Temperaturen eingesetzt. Die thermophile Betriebsweise ist der mesophilen vorzuziehen, wenn hygienische Aspekte zu berücksichtigen sind.

2.2 Bestehende Feststoffbiogasanlagen

2.2.1 Batch-Systeme

Die ersten Fermenter zur Vergärung von Feststoffen sind im Jahre 1939 von Isman und Ducellier in Algerien entwickelt und betrieben worden. Es handelte sich dabei um drei in Serie stehende Batch-Reaktoren mit integriertem Gasdom. Das ursprüngliche System ist in den siebziger Jahren an der INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) in Frankreich sowie von verschiedenen weiteren Konstrukteuren verbessert und weiterentwickelt worden. In Europa sind zurzeit 23 Anlagen in Betrieb, wobei Frankreich mit 15 Anlagen an der Spitze steht. In der Schweiz existieren drei Batch-Anlagen, welche mit Festmist betrieben werden [3,4].

2.2.2 Kontinuierliche Systeme

Flüssigvergärung

Kontinuierliche Verfahren zur Vergärung von Feststoffen, hauptsächlich von häuslichem Abfall, sind erst in den letzten 15 Jahren entwickelt worden. Bei den ersten Anlagen wurde der organische Anteil des Abfalles mit Wasser oder Klärschlamm verdünnt und in konventionellen, vollständig durchmischten Fermentern vergoren. Für die Verfahrensweise der gemeinsamen Vergärung von biogenen festen Abfallstoffen mit flüssigen Substraten hat sich mittlerweile der Begriff "**Co-Vergärung**" etabliert. Die Co-Vergärung hat den Vorteil, dass bestehende Anlagen besser genutzt werden können. So lässt sich die Gasproduktion des Faulturms einer kommunalen Kläranlage dank der höheren organischen Belastung deutlich verbessern, ohne dass dabei die hydraulische Belastung des Fermenters übermässig erhöht wird. Nachteilig kann sich jedoch die Co-Vergärung auswirken, wenn ein umweltneutrales Substrat mit einem umweltbelastenden Schlamm vermischt wird (z.B. Co-Vergärung von landwirtschaftlichen, festen Abfallstoffen mit schwermetallhaltigem Klärschlamm).

Eine von der Firma **ITALBA** gebaute Grossanlage der italienischen Gemeinde Bellaria ist seit 1985 mit gutem Erfolg in Betrieb. Die biogenen Abfälle werden dabei in einer Trennlinie aus dem Gesamtmüll aussortiert und zusammen mit den Abwässern von rund 75'000 Einwohnern mesophil vergoren. Zwei weitere grosstechnische Anlagen, in denen aufbereiteter Hausmüll zusammen mit Klärschlamm vergoren wird, stehen in Verona (**SNAMPROGETTI**-Verfahren) und im finnischen Vasa (**DBA/WABIO**-Verfahren).

Co-Vergärungsanlagen, in denen nicht nur kommunale Abfälle, sondern auch eine Vielzahl von Zuschlagstoffen aus der Industrie und der Landwirtschaft zusammen vergoren werden (z.B. Gülle, Gemüseabfälle, Schlachthofabfälle etc.) wurden vor allem in Dänemark entwickelt [5]. In diesen Gemeinschaftsanlagen wird durch die Zugabe von Fremdadfällen nicht nur die Gasproduktion erhöht, sondern auch eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit durch den Einzug von Entsorgungsgebühren erreicht.

Feststoffvergärung

Bei der sogenannten trockenen Vergärung oder Trockenvergärung werden die Feststoffe ohne Aufschlämmung mit einer flüssigen Phase vergärt. Grundsätzlich lassen sich ein- und zweistufige Verfahren unterscheiden. Beim *einstufigen Prozess* werden die Feststoffe auf einen TS-Gehalt von 30% oder weniger eingestellt und in einem Durchfluss-System vergärt, wie dies Wong-Chong erstmals vorgeschlagen hat [6]. In der Praxis existieren bereits verschiedene Anlagen dieses Typs.

Sie werden in erster Linie für die Vergärung der organischen Fraktion von häuslichem Abfall eingesetzt. Das **DRANCO**-Verfahren (Dry Anaerobic Composting) ist ein System, welches in Belgien entwickelt wurde. Der Fermenter besteht aus einem stehenden Zylinder und wird im mesophilen oder thermophilen Temperaturbereich betrieben. Das Frischmaterial wird oben zugegeben und das vergorene Material auf der Unterseite mit einem Schneckenförderer ausgetragen. Die Durchmischung erfolgt durch Umwälzung über eine externe Pumpe, wobei das rezirkulierte Gärmaterial gleichzeitig mit dem Frischsubstrat vermischt wird. Praxisanlagen dieses Typs wurden in Brecht (Belgien) sowie in Salzburg (Österreich) gebaut. Das in der Schweiz entwickelte **KOMPOGAS**-Verfahren arbeitet ebenfalls im thermophilen Bereich. Der Fermenter besteht aus einem liegenden zylindrischen Behälter, in welchem das Gärmaterial rechtwinklig zur Fliessrichtung mit einem Rührwerk durchmischt wird [7]. Praxisanlagen wurden bisher in Rümlang, Bachenbülach, Samstagen und Kempten (Allgäu, D) gebaut. Beim **VALORGA**-Prozess, einem französischen Verfahren, ist der zylindrische Gärbehälter stehend angeordnet und wird mesophil oder thermophil betrieben. Die Durchmischung des Fermenterinhalt erfolgt durch Einpressen von Biogas. Grössere Anlagen dieses Typs stehen in Amiens (F) und in Tilburg (NL). Das **ATF**-Verfahren ist ein weiteres System, bei dem das Prinzip der trockenen Vergärung angewendet wird. Eine Praxisanlage mit einer Kapazität von 1000 Jahrestonnen wurde 1994 in Hamburg-Bergedorf (D) erstellt. Bei allen aufgeführten Verfahren wird das vergorene Substrat zu Kompost weiterverarbeitet. Als weiteres Trockenverfahren ist die **ANACOM**-Biogasanlage zu erwähnen, ein dem Dranco-Verfahren ähnliches System, das speziell für die Vergärung von Festmist entwickelt wurde [8,9,23].

Der **Gärkanal** ist ein einstufiges Verfahren, bei welchem der Feststoff in perforierten Behältern durch eine flüssige Phase transportiert und dabei vergoren wird. Eine Pilotanlage zur Vergärung von Festmist wurde an der FAT in Tänikon gebaut und betrieben [10]. Im Gegensatz zur Co-Vergärung wird das feste Material nicht mit der flüssigen Phase vermischt, sondern nur von der Gärflüssigkeit umspült und getrennt ein- und ausgetragen. Der Gärkanal kann sowohl als reiner Feststoffreaktor mit einer stationären Gärflüssigkeit als auch als Hybridreaktor mit einer mobilen Flüssigphase betrieben werden. Der Hybridbetrieb ermöglicht die gemeinsame semikontinuierliche Vergärung von Feststoffen und flüssigen Substraten mit unterschiedlichen Verweilzeiten für die flüssige und die feste Phase. Voraussetzung für den Hybridbetrieb ist, dass die Gärflüssigkeit keine starke Sediment- und Schwimmdeckenbildung aufweist, da im Gärkanal nicht gerührt werden kann.

Bei der *zweistufigen Prozessführung* läuft die Hydrolyse und die Säurebildung räumlich getrennt von der nachfolgenden Methanisierung ab. Im Fall der Feststoff-Vergärung findet dabei gleichzeitig eine Trennung in eine feste und eine flüssige Phase statt. Eine mobile flüssige Phase perkoliert dabei durch die stationäre feste Phase und wird mit organischen Säuren beladen, die in der zweiten Stufe in Biogas umgewandelt werden. Für die zweite Stufe können Anaerobfilter oder UASB-Fermenter (Upflow anaerobic sludge blanket) eingesetzt werden. Die Flüssigkeit wird nach der Methanisierung rezirkuliert und kann sich wieder von neuem mit den Abbauprodukten der ersten Stufe beladen. Der Hydrolyse-Reaktor kann sowohl kontinuierlich als auch batchweise betrieben werden, während die Methanisierung in den erwähnten Hochleistungsreaktoren ausschliesslich kontinuierlich betrieben wird. Durch die Rezirkulierung der Flüssigkeit sind relativ einfache Möglichkeiten für die Aufwärmung der Feststoffe gegeben. Das Zweistufensystem ist 1975 von Gosh und Klass zur Vergärung von häuslichem Abfall entwickelt worden [11]. In einem ersten Versuch wurde die Hydrolysestufe als völdurchmischter anaerober Durchflussfermenter ausgelegt, während in einer späteren Phase das Perkulationswasser über einen definierten Bereich einer Deponie unter aeroben Verhältnissen rezykliert wurde. Die Idee dieser batchweise betriebenen Hydrolysestufe ist später von Hofenk et al. [12] wieder aufgenommen und zur Praxisreife entwickelt worden. Eine zweistufige Praxisanlage mit diskontinuierlich betriebener Hydrolysestufe wurde 1994 in Ganderkesee (D) erstellt. Die von der deutschen Firma **AN**-Maschinenbau entwickelte Anlage hat eine Kapazität von 6000 Jahrestonnen. Eine weitere Zweistufenanlage der Firma **BTA** mit kontinuierlich beschicktem Hydrolysereaktor ist in München/Garching entwickelt worden. Eine erste Grossanlage zur Vergärung biogener Haushaltabfälle mit einer Nennkapazität von 20'000 Tonnen pro Jahr ist in Helsingör (Dänemark) in Betrieb.

Ein mehrstufiges, modular aufgebautes Nassgärverfahren wird von den Schweizerfirmen R.O.M. AG und CT Umwelttechnik unter dem Namen **rom-OPUR** angeboten. Eine Pilotanlage mit einer Maximalkapazität von rund 2500 Tonnen pro Jahr wurde im April 1996 in Kefikon (TG) in Betrieb genommen.

Eine Zusammenstellung mit vertieften Informationen über die verschiedenen Feststoff-Verfahren finden sich in [13,14,15].

2.3 Vergärung von Energiegras

Da in den früheren und noch laufenden Forschungsprojekten schon Vorarbeiten in Bezug auf die technische Machbarkeit der Biogasgewinnung aus Feststoffen und die Auswahl von Feststoffbiogasfermentern geleistet wurden [8,10], konnte im vorliegenden Projekt auf eine Vorevaluation von Gärssystemen verzichtet werden. Für die Biogaserzeugung aus Energiegras sind theoretisch sämtliche in Kapitel 2.2 vorgestellten Verfahren zur Vergärung von Feststoffen denkbar. Die Wahl des optimalen Gärsystems hängt u.a. von der Konservierungsart und der Vorbehandlung des Energiegrases ab: Tabelle 1 zeigt mögliche Verfahrens-Varianten der Energiegrasvergärung. Dabei ist anzumerken, dass die vorgenommene Zuteilung nur für technisch einfache landwirtschaftliche Biogasanlagen ohne Einsatz komplexer Substrataufbereitungsverfahren Gültigkeit hat. Die Grasaufbereitung soll mit betriebs-eigenen landwirtschaftlichen Maschinen und Geräten (Feldhäcksler, Standhäcksler, Strohmühle etc.) durchgeführt werden können.

<u>ENERGIEGRAS</u>	VORBEHANDLUNG	VERFAHREN
<u>Frisch</u>	unzerkleinert	Gärkanal Trockene einstufige Vergärung Zwei-/Mehrstufenprozess
	gehäckselt	Co-Vergärung Zwei-/Mehrstufenprozess
<u>Heu</u>	unzerkleinert	Gärkanal Trockene einstufige Vergärung Zwei-/Mehrstufenprozess
	gehäckselt/gemahlen	Co-Vergärung Zwei-/Mehrstufenprozess
<u>Heupellets</u>		Co-Vergärung Zwei-/Mehrstufenprozess
<u>Silage</u>	unzerkleinert	Gärkanal Trockene einstufige Vergärung Zwei-/Mehrstufenprozess
	gehäckselt	Co-Vergärung Zwei-/Mehrstufenprozess

Abb. 1: Verfahrensmöglichkeiten der Energiegrasvergärung in Abhängigkeit der Grasvorbehandlung

3. Experimenteller Teil

3.1 Zielsetzung

Die Anforderungen, welche an einen Biogasfermenter gestellt werden, sind in hohem Masse substratabhängig. Die Methangärung von pflanzlicher Biomasse unterscheidet sich von der Methanisierung tierischer Exkreme. Aus mikrobiologischer Sicht sind zwei wesentliche Unterschiede zu erwähnen: Gegenüber der Gülle- oder Mistvergärung findet durch den höheren Gehalt an Kohlehydraten ein wesentlich schnellerer Abbau mit einer ausgeprägten Säurebildung statt. Andererseits verfügen die pflanzlichen Substrate über sehr niedrige Pufferkapazitäten. Der schnellere Abbau und die geringe Pufferung führen zu einer höheren Belastung des Faulprozesses. Bezüglich der Prozess-Stabilität werden dadurch höhere Anforderungen an die Gärtechnik gestellt als bei der Biogaserzeugung aus tierischen Abfallstoffen. Als wichtigste Unterschiede in Bezug auf die Verfahrenstechnik sind der höhere TS-Gehalt und die Struktur des Materials hervorzuheben (Gülle: homogene Flüssig-Suspension mit TS-Gehalten von 3-10 % / Energiegras: Feststoff mit hohen TS-Gehalten von bis zu 40% bei der Silage bzw. bis zu 90-95% beim Heu).

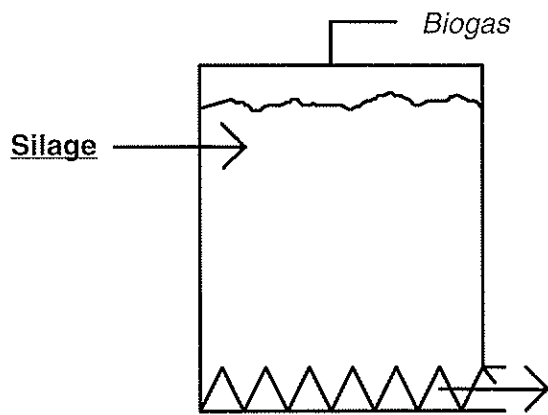
In einer ersten Phase des Projektes sollen mittels Batchversuchen im Labor-Massstab der Einfluss der Substratzusammensetzung (Grasarten), der Substratvorbehandlung (Zerkleinerung, Konservierungsart, Lagerung) sowie der Faulzeit und der Gärtemperatur auf den Faulprozess und den Gasertrag untersucht werden. Aufbauend auf die Resultate der Batchuntersuchungen sollen in Labor- oder Pilotfermentern mögliche Betriebsweisen der semikontinuierlichen Vergärung von Energiegras untersucht und geeignete Verfahren optimiert werden.

3.2 Untersuchte semikontinuierliche Verfahren

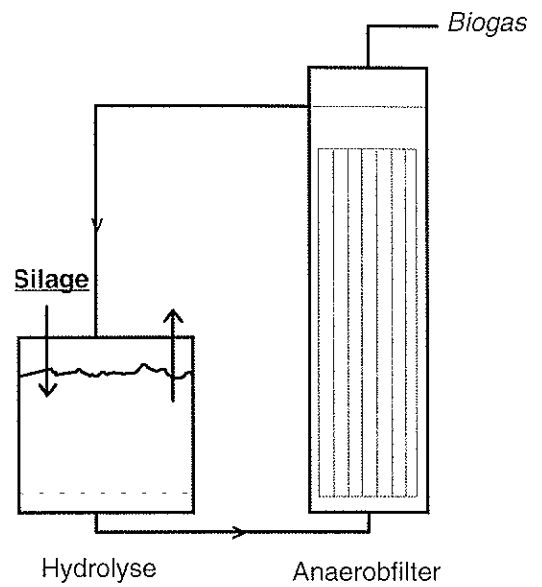
In Abbildung 2 sind die in dieser Arbeit untersuchten Verfahren schematisch dargestellt. Die Energiegras-Vergärung im Rührkesselfermenter und im Gärkanal wurde eingehend im Labormassstab untersucht und die Dimensionierungsgrundlagen beider Gärverfahren bestimmt. Für die trockene einstufige Vergärung konnten ebenfalls im Labor Versuche mit verschiedenen Betriebsweisen durchgeführt werden. Zum Zweistufenprozess wurden Batchversuche im Labor durchgeführt und auf einer Pilotanlage mit kontinuierlich betriebener zweiter Stufe (Anaerobfilter) ein einmaliger Versuch gefahren.

3.3 Substrat

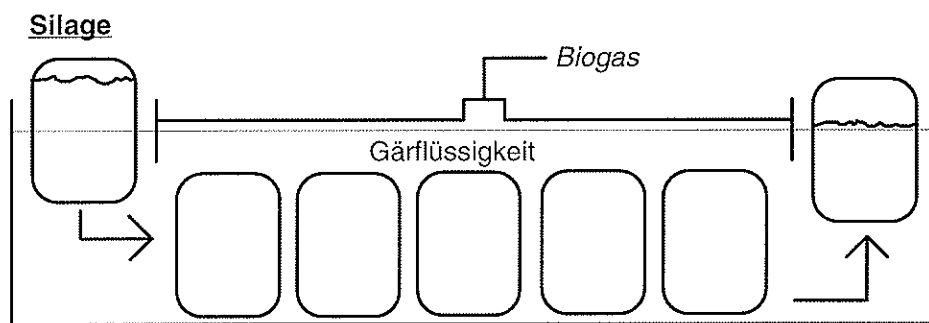
Als Gärsubstrat wurde siliertes Gras (Rundballensilage) und Heu von wenig intensiv bis extensiv bewirtschafteten Wiesen verwendet. Die Zerkleinerung der Silage erfolgte mit zwei verschiedenen Geräten. Eine Grobzerkleinerung mit Schnittlängen zwischen 1-2 cm wurde mit einem in der Landwirtschaft handelsüblichen Gerät erreicht (SEKO PONY, umgebauter Futtermischwagen der Fa. Grunderco AG). Mit einem Spezialzerkleinerer für Rasenschnitt konnten die Silagehalme unter Zugabe von Wasser zu einer breiartigen Masse (Halmlängen 1-2mm) zerrieben werden (AUTOFERTIL-Verfahren der Fa. Habegger AG in Aarberg). Für die Vergärung von Heu wurden für Verbrennungsversuche hergestellte Heupellets einer extensiven Wiese eingesetzt (Korngrösse rund 1-2 mm). Die Pellets lösen sich beim Aufschlännen in Wasser oder Gülle sofort auf. In Bezug auf die verfahrenstechnischen und biologischen Kennwerte des Faulprozesses kann die Pellet-Beschickung der Beschickung mit Heumehl gleichgesetzt werden. Die Inhaltsstoffe der Gärsubstrate sind in Tabelle 2 zusammengefasst.



Trockene einstufige Vergärung

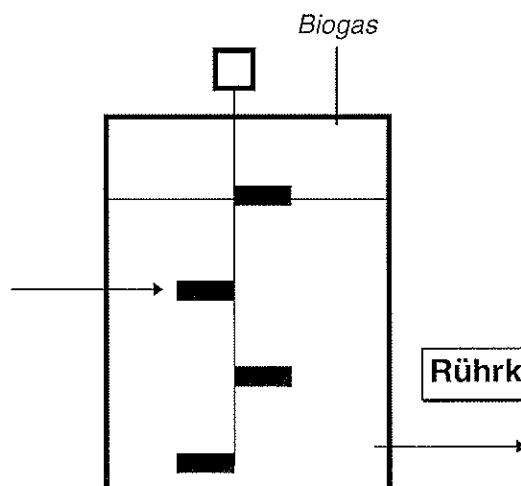


Zweistufenprozess



Gärkanal

Heumehl/Silage
in Gülle



Rührkessel, Co-Vergärung

Abb.2: Untersuchte Verfahren zur semikontinuierlichen Vergärung von Energiegras

	TS	OS	P	K	N	Ca	Mg	Rohprotein	Rohfaser
	(%)	(%)	(g/kgTS)						
Silage	25-38	90	2.8	22	13	6	3	95	280
Heupellets	90	94	2.5	21.5	15	6.7	4		
Silage			Acetat	Propionat	Butyrat	Milchsäure	NH ₃ -N		
Fettsäuren	(g/kg TS)		7-24	2-5	26-40	20			
NH ₃								2-6	

Tabelle 1: Zusammensetzung der Energiegras-Substrate

3.4 Analytik

Trockensubstanz (TS): Das Probenmaterial wird in eine tarierte Aluminiumschale eingewogen und im Trockenschrank während 24 Stunden bzw. bis zur Gewichtskonstanz bei 105°C getrocknet.

Organische Substanz (OS): Rund 2-3 Gramm der getrockneten Probe wird in einem tarierten Porzellantiegel während 2 Stunden bei 550°C verglüht. Der Glühverlust wird als Mass für den organischen Anteil der getrockneten Probe verwendet.

Gaszusammensetzung: Die Gasanalysen (Methan, Kohlendioxid, Luft) erfolgten auf einem Gaschromatographen (Shimadzu GC-7A), Detektor: WLD, Säulenfüllung: Porapak Q80/100, Trägergas: Helium. Der Schwefelwasserstoffgehalt wurde mit Dräger-Röhrchen bestimmt.

Gasproduktion: Die Gasproduktion wurde volumetrisch mit Trommel-Laborgaszählern (Wohlgroth PVC L-1) gemessen.

Flüchtige Fettsäuren: Die Proben werden mit konz. HCl angesäuert (pH 2) und abzentrifugiert. Das Dekantat wird gaschromatographisch analysiert. Hewlett-Packard Gaschromatograph 5840 A mit FID-Detektor. Säulenfüllung: Carbopack B-DA/4%, Carbowax 20M/1%, Trimesic acid 80/120.

Ammoniak-Stickstoff: Photometrische Bestimmung (Hach-Küvettest nach Nessler-Methode)

pH-Wert: Der pH-Wert wurde direkt nach der Entnahme des Gärsubstrates bestimmt. Die Messung erfolgte mittels einer hochohmigen Glaselektrode.

Bikarbonat-Alkalinität: Nach Zentrifugation der Probe (5min/5000rpm) werden 1-2 ml (V ml) mit 100 ml dest. Wasser verdünnt und mit 0.1n HCL auf pH 3 titriert (Resultat: A ml). Die angesäuerte Probe wird in einen Rundkolben transferiert und 3 Minuten am Rückfluss gekocht (Austreiben von CO₂). Abkühlung während 2 min. bei entfernter Heizquelle und laufendem Kühler. Das abgekühlte Muster wird mit 0.1n NaOH auf pH 6.5 zurücktitriert (Resultat B ml). Die Bikarbonat-Alkalinität wird nach folgender Formel berechnet:

Bikarbonat-Alkalinität (in meq/l):
$$\frac{(A-B) \times 100}{V}$$

Flotationseigenschaften: Zur Bestimmung der Flotationseigenschaften wurden 3L-Bechergläser mit einem Durchmesser von 14.5 cm verwendet. Das Einfüllvolumen betrug 1-2 Liter (A ml). Die Probe wird erschütterungsfrei stehen gelassen und der abgetrennte Flüssigkeits- und flotierte Feststoffanteil nach 24h abgelesen (B ml bzw. Cml). Der rezirkulierbare Flüssigkeitsanteil berechnet sich nach folgender Formel:

Flüssigkeitsabtrennung (Vol.-%):
$$\frac{B \times 100}{A}$$

3.5 Aufbau und Betrieb der Versuchsanlagen

3.5.1 Batch-Anlagen

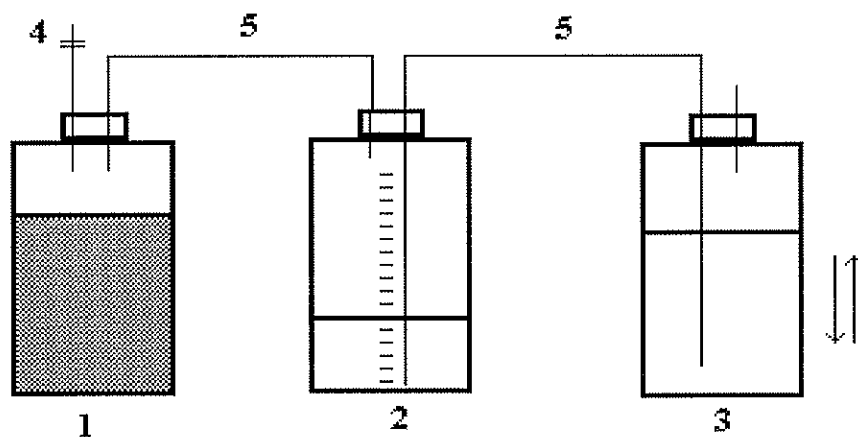


Abb.3: Schema der Labor-Batchanlage (1 Einheit)
(Erklärung im Text)

Als Batch-Behälter verwendete man 2-Liter Steilwandflaschen aus Polypropylen (1), die mit einem Gummizapfen luftdicht abgeschlossen sind. Durch den Gummizapfen führen zwei Glasrohre, eines mit Septum für die Entnahme von Gasproben (4), das zweite dient als Stutzen für die Gasleitung zum Gasometer (5). Die Gasmengenmessung erfolgt durch ein System mit Flüssigkeitsverdrängung. Das gebildete Biogas wird in einen mit Salzwasser gefüllten tarierten Gasometer (2L-Steilwandflasche aus Glas) geleitet und verdrängt die Flüssigkeit ins Ausgleichsgefäß (3). Durch die Öffnung des Hahns (4) läuft die verdrängte Flüssigkeit wieder in den Gasometer zurück. Die Batchanlage mit rund 30 Einheiten steht in einem geheizten Brutraum, dessen Temperatur im Bereich zwischen 20 und 38° C geregelt werden kann. Für die Experimente bei thermophilen Temperaturen wurden die Batch-Behälter in ein thermostatisiertes Wasserbad gestellt. Für die Versuche wurde als Impfmateriel grösstenteils gut adaptierte Flüssigkeit des mit Silage beschickten Laborgärkanals verwendet. Ausser bei speziellen Belastungsversuchen, bei welchen das Verhältnis zwischen Impfmenge und Substratanteil variiert werden musste, wurde zu jeweils 1-1.2 Liter Impfflüssigkeit rund 30-40g organische Substanz des verwendeten Substrates zugegeben. Abhängig vom TS-Gehalt betrug die Substratmenge rund 35g beim Heumehl, 100-130g bei der Silage bzw. bis zu 300g beim frischen Futtergras.

3.5.2 Rührkesselfermenter

Für die Untersuchungen zur semikontinuierlichen Co-Vergärung von Energiegras standen vier identische Fermenter aus Stahl mit einem Nutzvolumen von je 18 Litern zur Verfügung. Die Beschickung des Frischsubstrates erfolgt durch einen am Fermenterdeckel angebrachten Stutzen (1). Das vergorene Material wird während der Beschickung über ein syphoniertes Auslaufrohr aus dem Fermenter verdrängt (2). Das produzierte Biogas wird entweder direkt über eine Laborgasuhr geleitet und gemessen oder vorgängig in einem Nassgasometer gespeichert. Die Gasentnahmen erfolgen über einen Stutzen (Septum) mit einer Spritze (5). Das Rührwerk wird mittels eines Zeitschalters intervallmässig betrieben. Das Beschickungsintervall betrug unter der Woche 24 Stunden. Über die Wochenenden wurde bei hohen Fermenterbelastungen ebenfalls täglich Frischmaterial zugegeben, während bei unproblematischen Betriebsweisen die Beschickungsintervalle auf 24h (Fr-Sa) und 48h (Sa-Mo) aufgeteilt wurden.

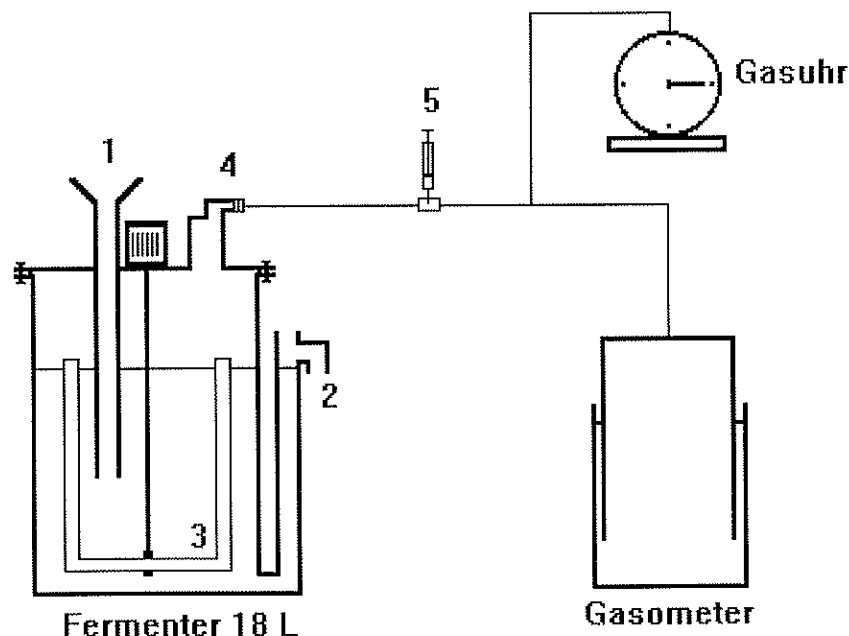


Abb. 4 : Aufbau der semikontinuierlich betriebenen Labor-Rührkesselfermenter
(Erklärung im Text)

3.5.3 Trockenvergärung (Anacom-Fermenter)

Für die Abklärung der biologischen Fragestellungen wurde ein Laborfermenter nach dem Konzept des ANACOM-Fermenters [8] konstruiert und davon drei Einheiten gebaut (Abb.5). Der Feststoff-Fermenter besteht aus einem stehenden PVC-Rohr mit einem Durchmesser von 30 cm und einer Höhe von 1.2 m (Nutzvolumen 70 Liter). Der geflanschte Deckel ist mit einem verschliessbaren Beschickungsstutzen mit einem Durchmesser von 10 cm versehen. Auf der Unterseite ist ein seitliches Austragsrohr angebracht, das wie der Beschickungsstutzen mit einem gasdichten Schraubdeckel versehen ist. Für die Beschickung des Fermenters wird der Deckel kurzfristig geöffnet und das Silagematerial von Hand eingebracht. Die Entnahme des vergorenen Materials erfolgt ebenfalls von Hand durch das seitliche Austragsrohr.

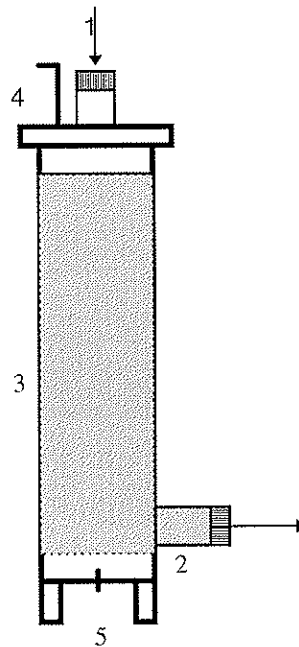
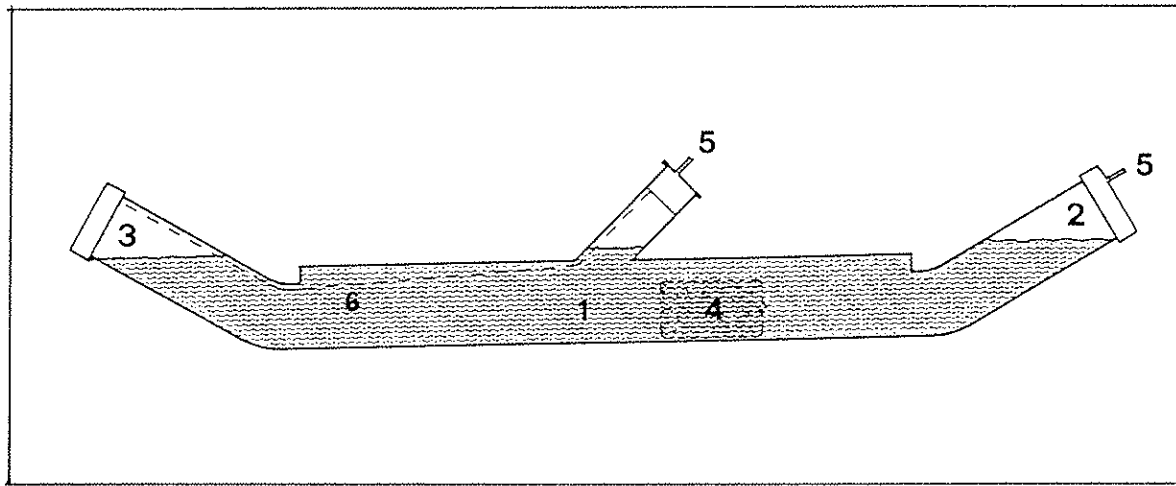


Abb. 5: Schema des 80 Liter Feststoff-Fermenters zur Trockenvergärung von Silage
1 Eintragsstutzen / 2 seitlicher Austragsstutzen / 3 Pfropfstromfermenter
4 Gasleitung zur Gasuhr / 5 Auslassstutzen Gärflüssigkeit

3.5.4. Labor - Gärkanal

Der Laborfermenter mit einem Volumen von 500 Litern ist aus zusammengesetzten Kunststoffrohren mit Durchmessern von 40 cm bzw. 30 cm gefertigt (Abb.6). Das Silagematerial wird in 12 perforierten, mittels Karabinerhaken verbundenen Stahlzylindern mit einem Nutzinhalt von je 21 Litern durch die Gärflüssigkeit (Wasser/Gülmischung, TS: 1.5%) gezogen und dabei vergärt. Im aktiven Teil des Kanals (Hauptkammer & Beschickungsrohr) sind 10 Körbe plziert; 2 Körbe befinden sich im Entnahmerohr. Durch die Perforation der aus Lochblechen gefertigten Feststoffbehälter ist eine intensive Durchmischung des Festmistes mit der biologisch aktiven Gärflüssigkeit garantiert. Die Behälter wurden mit je 4-5 kg Silage (lockere Schüttung) bzw. mit 8kg Silage (gepresst) beladen. Insgesamt konnten fünf Versuchsserien mit Verweilzeiten zwischen 8 und 30 Tagen bei einer Gärtemperatur von 35°C durchgeführt werden.



1 Fermenter / 2 Beschickungssutzen / 3 Entnahmesutzen / 4 Perforierter Feststoffbehälter / 5 Gasentnahme / 6 Stahlband zur Verhinderung des Aufschwimmens der Behälter

Abb.6: Schema des Laborgärkanals (Länge: 5.8m, Volumen 500 Liter)

3.5.5 Zweistufige Vergärung

Versuche zur zweistufigen Vergärung von Silage wurden im Labormassstab sowie auf einer Pilotanlage durchgeführt. Der Versuchsaufbau der Laborversuche ist im experimentellen Teil beschrieben (Kapitel 4.5.1). Abbildung 7 zeigt das Verfahrensfliessbild der Zweistufenpilotanlage der arbi AG, auf welcher ein Versuch mit Silagematerial einer Extensio-Wiese gefahren werden konnte. Die Anlage ist sowohl zweistufig als auch zweiphasig. Die vergorenen, nicht hydrolysierten Feststoffe bleiben in der Hydrolysetrommel zurück. Die gelösten Bestandteile werden im Kreislauf der Methanisierungs-Stufe zugeführt. Im einzelnen kann der zweistufige Abbau in der Pilotanlage wie folgt beschrieben werden:

Das Silagematerial wird dem Hydrolysebehälter (Hy) zugeführt, wo die abbaubaren Stoffe durch hydrolytische und säurebildende Bakterien in niedere organische Säuren umgewandelt werden. Mit der Re-zirkulierflüssigkeit gelangen die gelösten Stoffe über den Pumpensumpf (PS) in den Anaerobfilter (Fi), wo der weitergehende Abbau der Säuren zu Biogas durch die methanbildenden Bakterien stattfindet. Die von der organischen Fracht befreite flüssige Phase wird mittels einer Re-zirkulationspumpe (RP) über ein Heizgefäss (HG) wieder in den Hydrolysebehälter rückgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der Zweistufenanlage findet sich im BEW-Forschungsbericht der arbi AG [16].

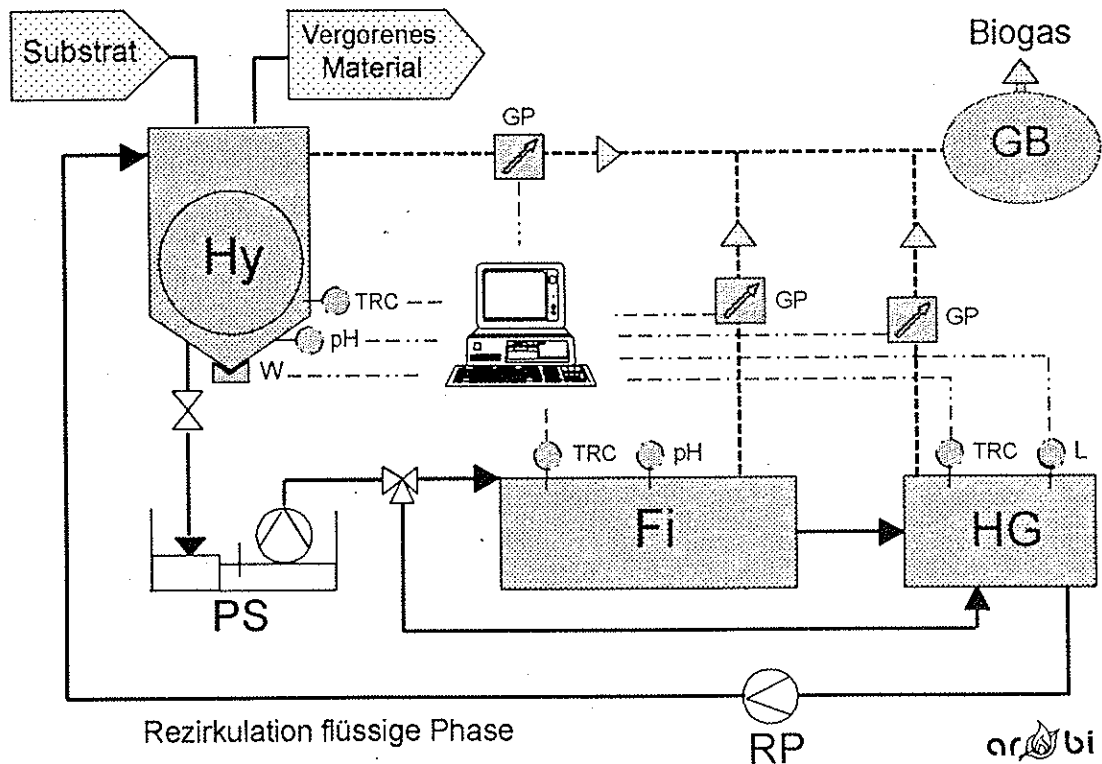


Abb. 7: Verfahrensfliessbild der Zweistufen-Pilotanlage (Gesamt-Vol: 3.4m³)

Hy	Hydrolysebehälter (Vol: 1.1m ³)
Fi	Anaerobfilter (Vol:1m ³)
RP	Re-zirkulationspumpe
TRC	Temperaturregelung
L	Niveauekontrolle
GP	Gasmessung

PS	Pumpensumpf
HG	Heizgefäss (Vol: 1m ³)
GB	Gasballon
ph	pH-Messung
W	Gewichtserfassung

4. Resultate und Diskussion

4.1 Batch-Versuche

In einer ersten Projektphase wurden mikrobiologische, substratspezifische und verfahrenstechnische Einflussfaktoren der Energiegrasvergärung auf den Gärprozess untersucht. Mittels Batch-Versuchen im Labormassstab wurde der Einfluss verschiedener Substrateigenschaften und Prozessparameter (Gras- und Konservierungsart, Zerkleinerungsgrad, Lagerverluste / Gärtemperatur, Faulzeit, Belastung, Impfmateriale) auf die Abbaugeschwindigkeit und die Gasausbeute bestimmt. Im folgenden sind die Resultate dieser Batchversuche zusammengefasst.

4.1.1 Grasarten

Die Gasausbeuten und die Abbaugeschwindigkeit von Extensograss und der Reinsaat Thimothée, Knaulgras und Rohrglanzgras unterscheiden sich nur unwesentlich (Abbildung 8 und 9). Mit Ausnahme des Wiesenfuchsschwanzes, der sowohl eine langsamere Abbaugeschwindigkeit als auch eine geringere Ausbeute aufweist (420 l/kg org. Substanz), kann mit **Biogaserträgen zwischen 500 und 600 Litern Biogas pro kg organische Substanz** gerechnet werden. Das Gras einer Futterwiese liefert Erträge von gegen 700 Litern Biogas pro kg organische Substanz.

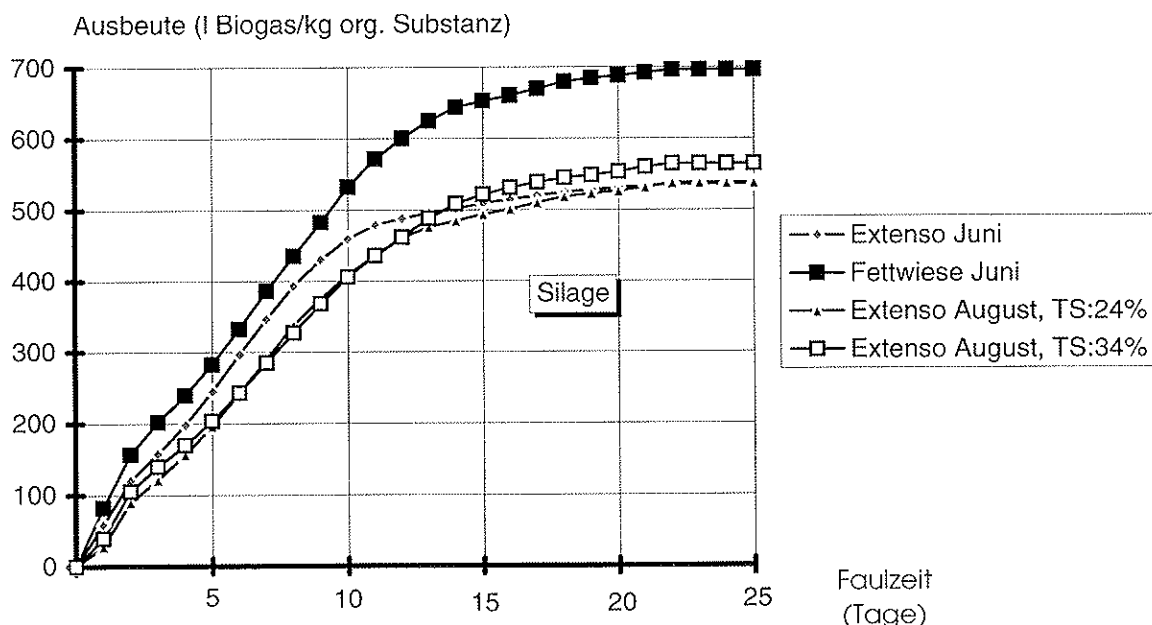


Abb. 8 : Gasausbeuten und Gärverlauf von Extensograss-Silage und Futtergrassilage (Fettwiese)

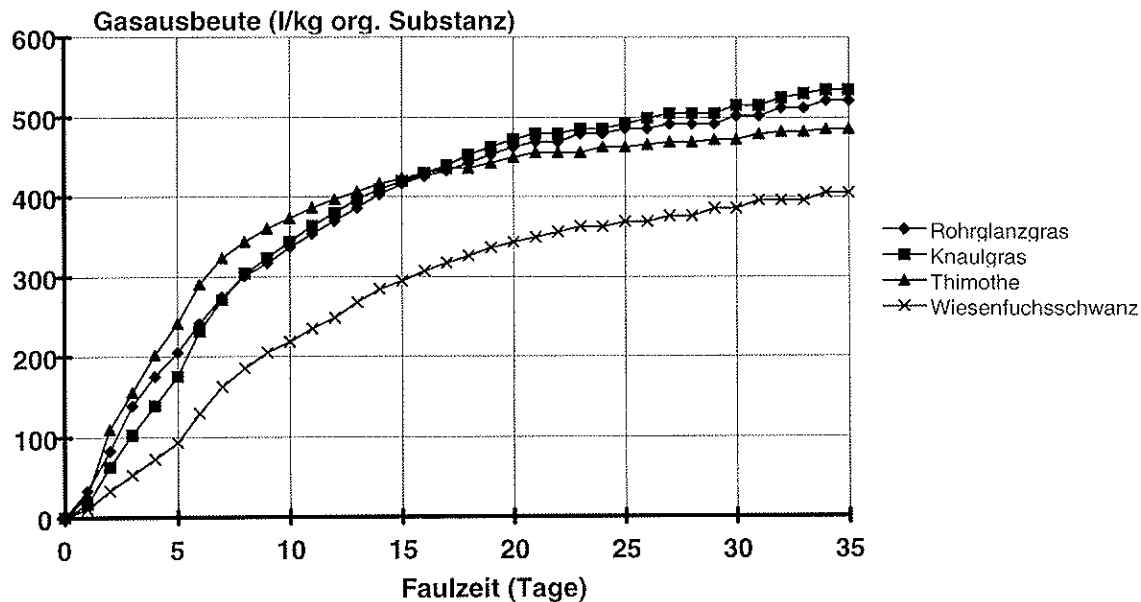


Abb. 9.: Gasausbeuten und Gärverlauf von Reinsaaten

4.1.2 Gärtemperatur und Verweilzeit

Die Gärtemperatur hat praktisch keinen Einfluss auf die maximal erreichbare Gasausbeute (Endgasausbeute). So betrug der Gasertrag bei der batchweisen Vergärung von Extensogras bei 34°C 570 Liter Biogas, während bei 55°C rund 600 Liter pro kg OS produziert wurden (Faulzeit: 45 Tage). Hingegen führen höhere Gärtemperaturen zu einem schnelleren Abbau, was sich - vor allem bei kurzen Faulzeiten (<10-15 Tage) - positiv auf die Gasausbeuten auswirkt (Abb.10). Bei der für Praxisanlagen empfohlenen Verweilzeit von **20 bis 25 Tagen** fällt der Temperatureinfluss nicht mehr ins Gewicht. Als Richtwert kann eine untere Grenze der **Gärtemperatur von 35 °C** empfohlen werden.

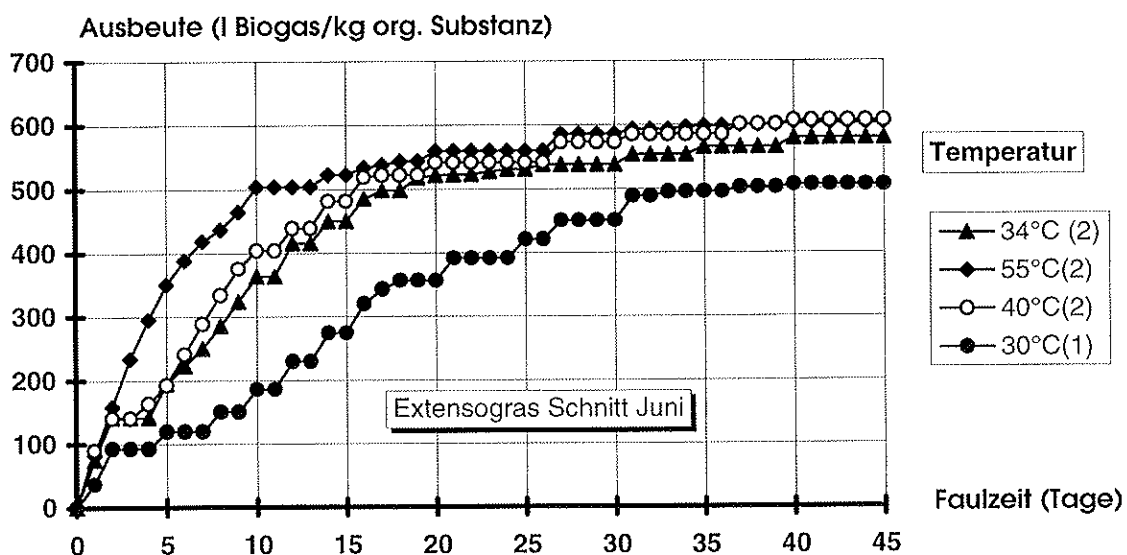


Abb. 10.: Einfluss der Gärtemperatur auf die Gasproduktion

4.1.3 Lagerung

Obwohl für die Vergärung nicht dieselbe Silagequalität wie bei der Futtersilage erreicht werden muss, ist strikte darauf zu achten, dass das Silieren fachgerecht durchgeführt wird. Für die Konservierung von Energiegras sind die üblichen Silierverfahren (**Fahrsilo, Ballensilage, Hochsilo**) anzuwenden. Die Verrottung des Materials infolge Lufteintrag kann schon nach wenigen Tagen Lagerungszeit zu massiven Gasertragseinbußen bei der nachfolgenden Vergärung führen. Eine einfachere und eventuell kostengünstigere Technik (z.B. durch Abdecken mit Plane etc.) darf nur dann angewendet werden, wenn die Konservierung ohne Abbauverluste garantiert werden kann. Abbildung 11 B zeigt den Einfluss der Lagerung eines geöffneten Silageballens auf die Gasproduktion der Grassilage. Für den Versuch wurden rund 100 kg Silage eines frisch geöffneten Rundballens im Freien unter einer Plastikfolie gelagert (Monat Juli). Schon nach fünf Tagen war eine starke Verpilzung sichtbar. Die Gasproduktion des 5-tägigen Materials reduzierte sich von rund 500 Litern Biogas pro kg organische Substanz auf rund 370 Liter, während bei der Lagerung von 30 Tagen eine Gaseinbuße von über 50% festgestellt wurde (225 Liter gegenüber 500 Liter). Für eine maximale Gasausbeute muss demnach das gesamte Silagematerial (400-600kg) unmittelbar nach dem Öffnen des Ballens der Biogasanlage zugeführt werden.

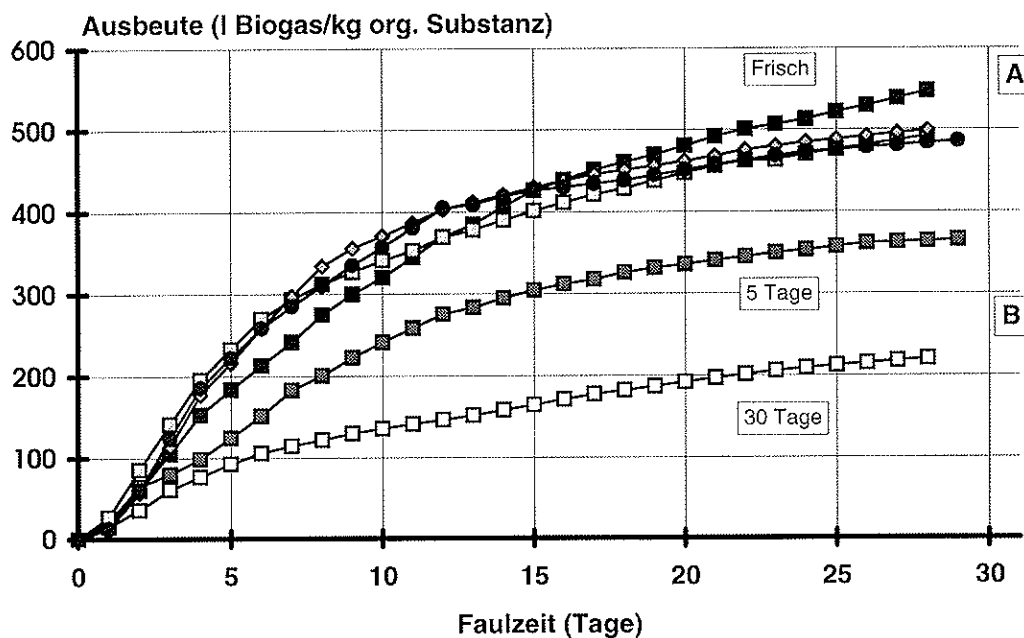


Abb. 11:A) Vergärung von Extensogras-Silage mit 4 verschiedenen Impfsubstraten (vergorene Gülle Biogasanlage, Faulschlamm, Gärkanallflüssigkeit der FAT-Pilotanlage, adaptiertes Impfmateriel eines früheren Batch-Versuches, vgl. Kap. 4.1.5).

B) Einfluss des Silagealters auf die Gasausbeute (Frisch: Vergärung von frischer Silage; 5 Tage bzw. 30 Tage: Vergärung nach einer Lagerzeit von 5 bzw. 30 Tagen nach Öffnung des Rundballens)

4.1.4 Graskonservierung/ Zerkleinerung

Der Einfluss der Graskonservierung und der Konservierungsart (Silieren, Trocknen) auf die Gasausbeute ist praktisch vernachlässigbar (Abb.12,13). **Siliertes Extensogras, Heu und frisch geschnittenes Gras liefern praktisch identische Endgasausbeuten.** Ebenfalls hat die Grobzerkleinerung des Materials (untersuchte Schnittlängen: 3 cm, 15 cm) nur einen unbedeutenden Einfluss auf die maximal erreichbare Gasausbeute und die Abbaugeschwindigkeit. Ein leicht schneller Abbau erfolgt bei der Vergärung von zerklebertem Material (Heumehl, Pellets). In Tabelle 2 sind die Gasausbeuten unterschiedlicher Grassubstrate in Abhängigkeit der Faulzeit dargestellt (Batchvergärung bei 35°C). Als Vergleich sind die Resultate früherer Versuche mit Festmist ebenfalls aufgeführt. Die Prozentzahlen sind Durchschnittswerte verschiedener Batchserien.

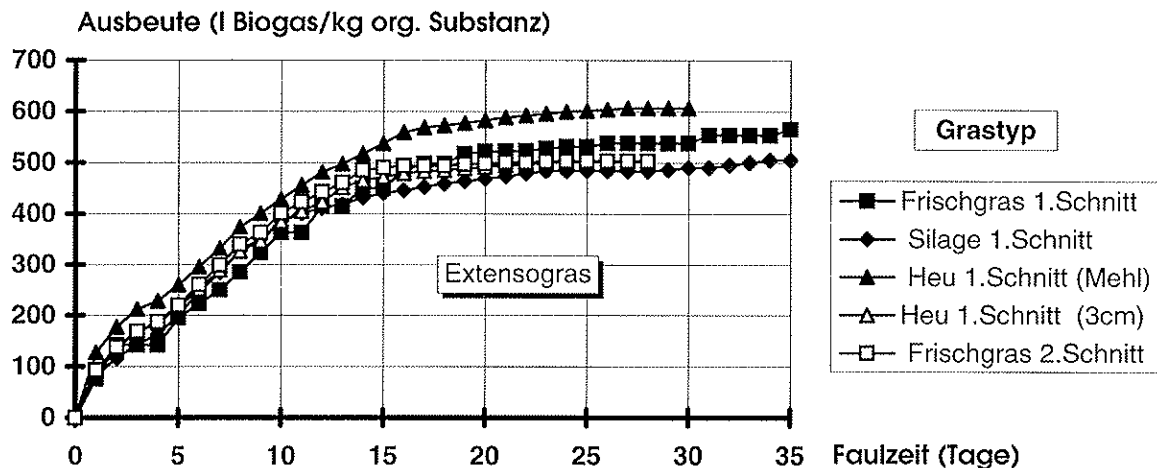


Abb. 12: Gasausbeuten und Gärverlauf verschiedener Extensogras-Substrate

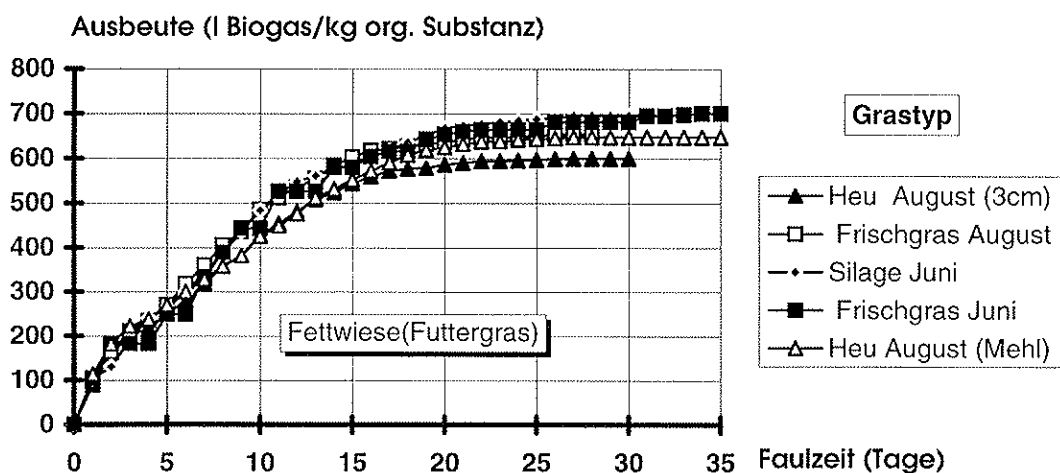


Abb. 13: Gasausbeuten und Gärverlauf verschiedener Futtergras-Substrate

Faulzeit (Tage)		10	15	20	25	Endgasausbeute (=100%)
Fettwiese	Frisch 3 cm	70%	83%	92%	97%	700-720 l/kg OS
	Silage 3 cm	77%	92%	97%	99%	
Extensowiese	Frisch 3 cm	67%	82%	90%	91%	540-580 l/kg OS
	Silage 3 cm	65%	78%	86%	90%	
	Heu 3 cm	67%	81%	84%	87%	
	Heumehl	72%	91%	98%	100%	
(Festmist)		38%	64%	78%	85%	400-420 l/kg OS

Tab.2: Batchvergärung von Energiegras: Gasausbeuten in Prozent der Endgasausbeute in Abhängigkeit der Faulzeit und des Zerkleinerungsgrades (Gärtemperatur 35°C).

4.1.5 Anfahren / Belastungsversuche

Bei Batchversuchen mit vergorener Gülle, Faulschlamm und adaptiertem Impfsubstrat (vergorenes Substrat aus Silagevergärung) wurden - bei genügend hohem Impfmaterialeanteil - nur geringfügige Unterschiede im Gärverhalten festgestellt (s. auch Abb.11A). Für das Anfahren des Fermenters können somit dieselben Impfsubstrate wie bei der Gülle- und Festmistvergärung verwendet werden. In der Praxis wird dies in der Regel **Faulschlamm einer ARA** oder **vergorene Gülle** einer Biogasanlage sein. In einem weitergehenden Versuch wurde die Impfsubstratmenge variiert, wodurch unterschiedliche Belastungswerte B resultierten ($B = \text{Quotient: OS Substrat/OS Impfmateriale}$). In Abbildung 14 sind die Resultate dieser Belastungsversuche dargestellt. Aus den Kurvenverläufen wird einerseits ersichtlich, dass die Länge der Anfahrphase (lag-Phase) je nach Impfmateriale sehr unterschiedlich ist. Eine sehr lange lag-Phase wurde beim Faulschlamm beobachtet, wo sich die Gasproduktion bei den höheren Belastungen erst nach rund einem Monat einstellte. Auf der anderen Seite ist auch festzustellen, dass sich das Anfahrverhalten bei hohen Impfschlammanteilen (=kleine Belastungswerte) nicht mehr stark unterscheidet. Für den start-up eines Fermenters mit unbekanntem Anfahrverhalten ist es demnach immer sinnvoll, soviel Impfmateriale wie möglich zu einzusetzen.

Neben dem pH-Wert und den Fettsäuren, die sporadisch gemessen wurden, wurde am Tag 18 zusätzlich die Alkalinität bestimmt. Die gemessenen Werte zeigen, dass zwischen der Alkalinität und der Belastung ein Zusammenhang besteht. Es ist jedoch nicht möglich, mittels Batchversuchen eine quantitative Aussage über den Zusammenhang zwischen Belastung und Stabilität des Faulprozesses bei kontinuierlicher Betriebsweise zu machen. Entsprechende Messungen wurden bei den Rührkeselversuchen (Kapitel 4.2) durchgeführt.

4.1.6 Prozess-Stabilität

Die Resultate der Belastungsversuche deuten darauf hin, dass - im Gegensatz zur Biogaserzeugung aus Gülle- oder Mistsubstraten - die alleinige Vergärung von Energiegras nicht oder nur bedingt möglich ist. Für die Gewährleistung eines stabilen Faulprozesses ist bei den einstufigen Gärverfahren, insbesondere bei hohen Raumbelastungen, eine Pufferung notwendig. Bei den industriellen Biogasanlagen werden hierzu in der Regel Alkali-Chemikalien eingesetzt. Für die Energiegrasvergärung - d.h für landwirtschaftliche Anlagen - bietet sich jedoch durch die Mitvergärung der gut abpuffernden Gülle-

und Mistsubstrate eine günstigere und sinnvollere Lösung an. Eine zusätzliche Möglichkeit zur Aufrechterhaltung der Prozess-Stabilität des Fermenters ist die Rückführung (Rezirkulation) von vergorenem Material. Je nach Gärverfahren sind auch Kombinationen (Rezirkulation, Zugabe eines Co-Substrates) möglich.

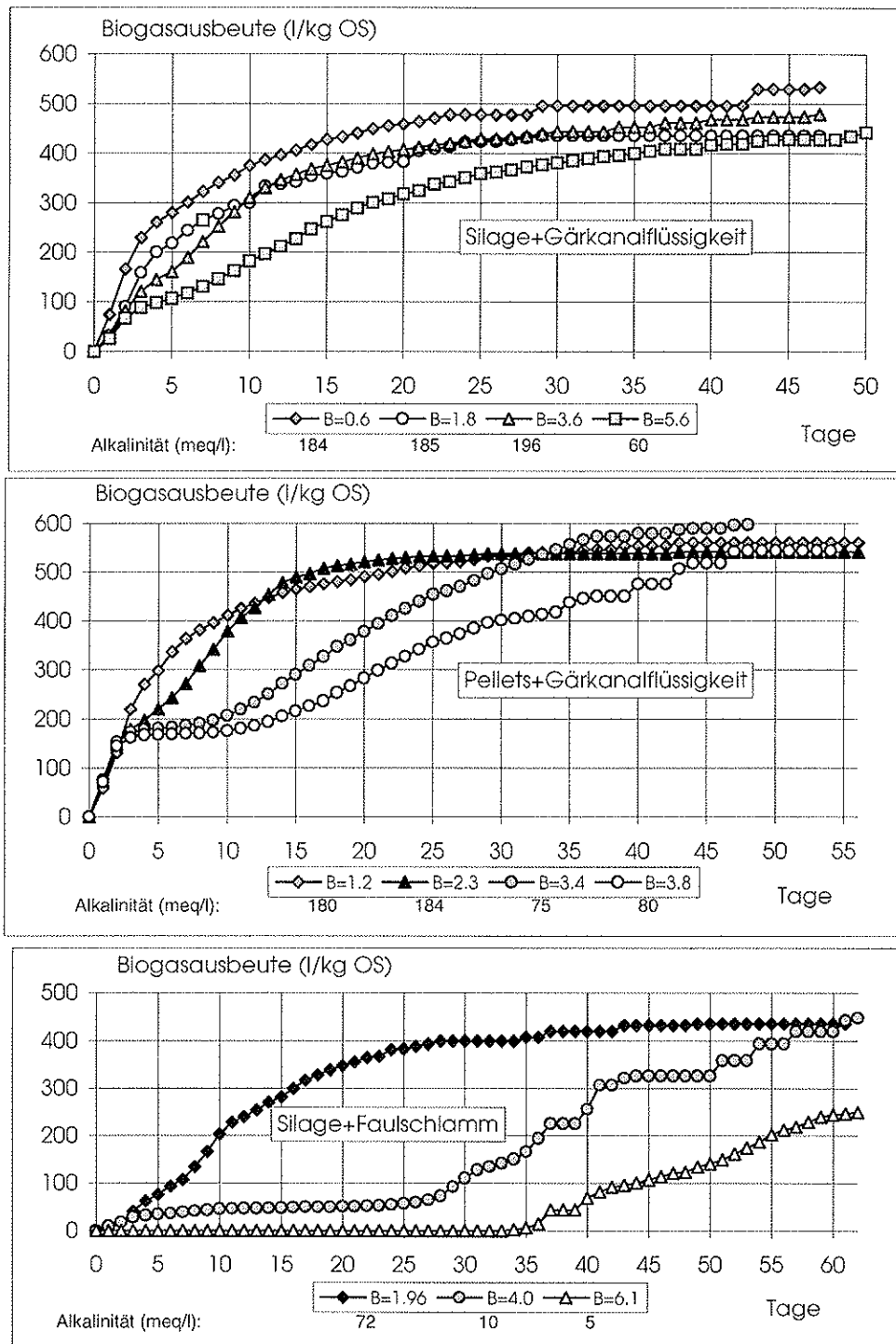


Abb. 14: Einfluss des Impfmateriáls und des Belastungsverhältnisses B auf den Gärverlauf. (B=gOS Substrat/gOS Impfmateriál). Am 18 Tag wurde aus den Batchbehältern eine Probe entnommen und die Alkalinität bestimmt (Faulschlamm: TS: 3.06%; Alkalinität: 195 meq/l; $\text{NH}_4\text{-N}$: 1030 mg/l) / Gärkanalflüssigkeit (TS: 2.45%, Alkalinität 175 meq/l, $\text{NH}_4\text{-N}$: 800 mg/l).

4.2. Rührkesselfermenter (Co-Vergärung)

Neben der Vergärung von Energiegras in eigentlichen Feststoff-Fermentern bietet sich die Möglichkeit der Flüssigvergärung an (Vergärung von aufgeschlammter kurzgeschnittener Silage oder gemahlenem Heu im Rührkesselreaktor). Für landwirtschaftliche Anlagen kann dieses Verfahren besonders interessant sein, da als Suspensionsflüssigkeit Gülle zur Verfügung steht, welche zusätzlich mit dem Energiegras vergoren und für die Biogasproduktion genutzt werden kann. Während zur Co-Vergärung mit relativ geringen Zusätzen von pflanzlicher Biomasse schon Untersuchungen durchgeführt wurden und auch Erfahrungen mit Praxisanlagen vorliegen [17,18], gibt es noch wenige Daten zur kontinuierlichen Vergärung von Feststoffsuspensionen mit hohen TS-Gehalten (TS:12-20%).

In kontinuierlich betriebenen Laborfermentern wurde der Einfluss der Verweilzeit, der Substratkonzentration und des Co-Substrates auf den Faulprozess untersucht. Zusätzlich bestimmte man die Absetz- und Flotationseigenschaften des vergorenen Materials. Insgesamt wurden 20 Versuchsserien im Verweilzeitbereich zwischen 18 und 36 Tagen bei einer Gärtemperatur von 35°C durchgeführt. Als Substrate verwendete man Heupellets und gehäckselte Silage. Als Co-Substrate bzw. als Aufschlammflüssigkeiten setzte man Schweinegülle, Rindergülle, vergorene Kuhgülle einer Biogaspraxisanlage und Leitungswasser ein. Die Raumbelastung (Substrat + Co-Substrat) variierte zwischen 2.3 und 8.2 kg OS/m³ und Tag. Der TS-Gehalt der Suspensionen lag zwischen 10 und 20%. Für das erste Anfahren wurden die Fermenter mit vergorener Rindergülle und Gärflüssigkeit eines mit Silage betriebenen Laborfermenters (Gärkanal-System) befüllt und anschließend semikontinuierlich beschickt. Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 3 auf Seite 25 zusammengefasst.

4.2.1 Vergärung von Heupellets mit Leitungswasser als Suspensionsmedium

Untersuchungen zur Vergärung pflanzlicher Biomasse in Rührkesselreaktoren mit Leitungswasser als Verdünnungs- bzw. Suspensionsmedium wurden schon anderweitig durchgeführt [19,20]. Die Versuche zeigten, dass eine stabile Vergärung von Grasmaterial ohne korrigierende Massnahmen durch Pufferzugaben oder Rezirkulation von vergorenem Material nicht oder nur bei sehr niederen Belastungen und hohen Verweilzeiten erreicht werden kann.

Die Frage, ob eine ungepufferte Vergärung von Energiegras möglich ist, war für das vorliegende landwirtschaftliche Projekt von zweitrangiger Bedeutung, da als Suspensions- und Pufferflüssigkeit Gülle eingesetzt werden kann. Als Kontrolle bzw. zur Bestätigung der Fremduntersuchungen wurde trotzdem eine Versuchsserie mit Wasser als Aufschlammmittel durchgeführt. Diese Versuche bestätigten, dass mit Extensogras kein stabiler Faulprozess ohne zusätzliche Pufferung erreicht werden kann. Bei einer Raumbelastung von 4.3 kg OS/l/d und einer Verweilzeit von 20 Tagen versauerte der Prozess nach kurzer Zeit. (Versuch P11). Auch mit einer täglichen Zugabe von 3g NaHCO₃ konnte kein stabiler Faulprozess erreicht werden (Versuch P12). Eine stabile Gärung stellte sich erst bei der Belastung von 2.3 g OS/kg'd (Verweilzeit 36d) unter Zugabe von NaHCO₃ ein (P13). Die Vergärung mit Rezirkulation von vergorener Gärflüssigkeit (P14) führte, zumindest beim verwendeten Rückmischungsverhältnis, ebenfalls zu einem instabilen Prozess. Untersuchungen von Zauner [19] bestätigen, dass bei der Vergärung von Silagematerial hohe Mengen an puffernder Rezirkulationsflüssigkeit erforderlich sind. Bei der Vergärung von Feldgras-, Weidelgrassilage wurde zur Aufrechterhaltung eines stabilen Prozesses (abhängig von der Substratzusammensetzung und der Säurekapazität der Gärflüssigkeit) eine Rücklaufmenge von 10-20 ml Gärflüssigkeit pro Gramm zugegebener Trockenmasse benötigt.

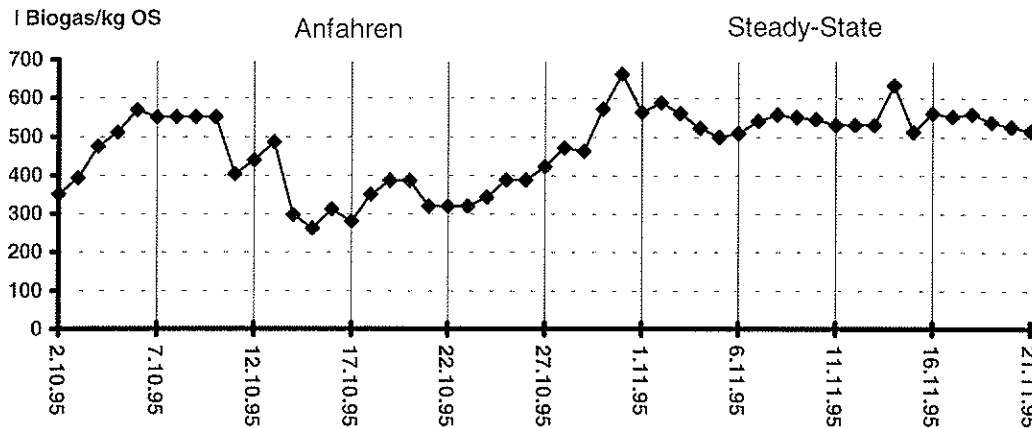


Abb.15: Vergärung einer Heumehl/Saugülesuspension im Rührkesselreaktor (Versuch P4: 140g Pellets (Korngrösse 1-2mm)/ 580 ml Saugülle, Verweilzeit: 25d, Temp: 35°C). Eine praktisch identische Nettogasausbeute wurde auch bei der Vergärung von gehäckselter Silage erreicht.

4.2.2 Vergärung von Heupellets mit Gülle als Suspensionsmedium

Bei den Versuchen mit Güllesubstraten als Suspensionsmedium wurden sehr gute Resultate erzielt. Untersucht wurden die Co-Substrate Saugülle, Rindermastgülle, sowie vergorene Kuhgülle einer im psychophilen Temperaturbereich betriebenen Biogaspraxisanlage (Versuche P1-P10). Bei der Co-Vergärung mit Saugülle wurden Versuche mit Raumbelastungen (RB) zwischen 2.6 und 8.2kg OS/m³d und Verweilzeiten (tR) von 18, 25 und 36 Tagen gefahren. Als Saugülle verwendete man dünnflüssigen Überstand einer nicht gerührten Güllegrube (TS: 1.5%) sowie gut aufgerührtes Güllematerial derselben Grube (TS: 3.5%). Die Energiegras-Gasausbeuten variierten zwischen 500 Litern (Raumbelastung: 8.2kg OS/m³d; tR:18d) und 600 Litern Biogas pro kg organische Substanz (Raumbelastung: 2.6kg OS/m³d; tR: 36d). Aus den biologischen Kennwerten kann abgeleitet werden, dass bei Raumbelastungen ab 7 kg OS/m³d die Stabilitätsgrenze erreicht ist. Der hohe Propionsäuregehalt weist, ebenso wie der sinkende pH- und Alkalinitätswert, auf eine beginnende Überlastung des Faulprozesses hin. Bei den Versuchen mit Rindergülle stellte sich auch bei der hohen Belastung von 7kg OS/m³d ein stabiler Faulprozess mit einer Biogasausbeute von 560 Litern ein.

Nach der Beschickung wurde bei sämtlichen Versuchen mit höheren Belastungswerten eine ausgeprägte Schaumentwicklung beobachtet. Verantwortlich hierfür sind die oberflächenaktiven Fettsäuren, die nach einem Beschickungsschuss hohe Konzentrationen erreichen können. Bei der Konstruktion einer Praxisanlage muss die mögliche Schaumentwicklung unbedingt in die Planung miteinbezogen werden.

4.2.3 Vergärung von Silage mit Saugülle als Suspensionsmedium

Zusätzlich zur Heumehlvergärung wurden Parallelversuche mit Silagematerial durchgeführt. Als Co-Substrat wurde dünne Saugülle (TS: 1.5 %) verwendet. Die Versuche zeigten, dass in Bezug auf die Prozessbiologie gegenüber der Heumehlvergärung keine wesentlichen Unterschiede bestehen. Sowohl mit der kurzgeschnittenen Silage mit Halmlängen zwischen 1-2 mm (Versuch S1) als auch mit gröber gehäckseltem Material (Halmlänge 1 -1.5cm, Versuch S2 und S3) wurden ähnliche Resultate wie bei der Heumehlvergärung erzielt (Tab. 3: Vergleich P3 mit S1,S3 / Vergleich P2 mit S2).

Extensograss:		Heumehl (Pellets)														Silage		
Menge	(g)	50	100	108	140	145	140	108	100	50	90	90	810	810	450	510	528	300
Co-Substrat		Saugülle							Rindergülle	verg. Gülle	Wasser				Saugülle			
Menge	(ml)	450	900	612	580	855	460	612	620	450	810	810	810	450	510	192	650	420
TS	(%)	1.5	1.5	1.5	3.5	3.5	3.4	2.2	8.0	3.0	3.0	-	P	P	3.9	1.7	1.5	1.5
Prozessparameter		10.3	12.2	14.7	20.3	16.0	17.0	17.8	19.4	11.7	11.7	10.0	10.0	10.0	15.4	13.2	11.1	12.7
TS Suspension	(%)	-	-	-	-	-	400	-	-	-	-	-	-	-	350	-	-	-
Rezirkulation	(ml)	2.6	5.3	5.0	7.5	8.2	7.3	5.8	7.0	2.3	4.3	4.3	4.3	2.3	6.7	4.5	5.4	4.5
RB	(gOS/t'd)	36	18	25	25	18	18	25	25	36	20	20	20	36	18	25	18	25
Biogas**		600	570	580	550	500	510	500	560	560	520	320	380	560	400	600	550	570
Ausbeute	(l/kg OS)	1.6	3.0	2.9	4.1	4.1	3.7	2.9	3.9	1.3	2.2	1.4	1.6	1.3	2.7	2.7	3.0	2.6
Gärsubstrat		3.8	5.5	6.0	10.3	8.5	9.2	8.5	11.0	5.0	5.4	5.6	5.6	4.5	9.0	6.2	6.4	6.3
TS	(%)	80	82	83	84	84	83	84	84	81	83	85	81	81	84	74	80	81
OS	(%)	7.2	7.2	7.1	7.0	6.95	7.0	7.1	7.2	7.2	7.2	6.2	6.5	7.2	6.8	7.2	7.3	7.4
pH	(-)	88	73	84	60	48	42	94	81	73	75	20	34	81	35	-	75	65
Alkalinität	(meq/l)	840	720	706	400	440	-	270	400	319	-	35	31	31	-	1000	1200	1300
NH4-N	(mg/l)	150	1000	700	600	700	500	280	-	120	140	500	260	270	350	800	-	-
Acetat	(mg/l)	17	80	200	350	220	3000	10	-	25	550	2000	7000	120	320	1500	-	-
Propionat	(mg/l)	6	-	50	170	150	200	-	-	-	26	20	200	15	100	10	-	-
Butyrat	(mg/l)	68	57	64	54	51	47	50	47	61	58	44	44	57	37	59	-	-
OS-Abbau	Suspension (%)	70	58	65	54	51	47	53	55	74	69	44	44	57	37	60	ca. 55-60%	-
OS Abbau	Substrat (%)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	S1	S2	S3
Versuch		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	S1	S2	S3

** Methangehalt: 56-58%

Tabelle 3: Gasausbeuten und biologische Kenndaten der Energiegrasvergärung im Rührkessel (Co-Vergärung)

4.2.4 Schwimmdeckenbildung, Fest/Flüssig-Trennung

Bezüglich der Verfahrenstechnik (Rühren, Pumpen) konnten im Labormassstab keine vergleichenden Untersuchungen durchgeführt werden. Beim Betrieb der Fermenter zeigte sich jedoch, dass der Zerkleinerungsgrad einen bedeutenden Einfluss auf die Beherrschbarkeit der **Schwimmdeckenbildung** und die Verstopfungsanfälligkeit von Zu- und Ablaufleitungen hat. Während bei der Heupelletvergärung praktisch keine Probleme beim Betrieb der Laborfermenter auftraten (Rührbetrieb: Laufzeit 2 Min. / Intervall 30 Min.), musste bei der Silagevergärung die Rührintensität beträchtlich erhöht werden (Laufzeit 1 Min./ Intervall 2 Min.). Die Erfahrungen mit landwirtschaftlichen Co-Vergärungsanlagen bestätigen, dass eine stetige Zerstörung der sich aufbauenden Schwimmdecke nötig ist, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Ein Ausfall des Rührwerkes von wenigen Stunden kann dazu führen, dass sich im Fermenter eine nicht mehr aufbrechbare Schwimmdecke ausbildet [18,21]. Abbildung 16 zeigt ein Beispiel des Schwimmdeckenaufbaus nach deren Zerstörung. Rund 1,7 Liter vergorenes Material (Co-Vergärung von Silage in Saugülle, Versuch S3) wurde in ein 3-Liter-Becherglas gegeben und aufgerührt. Während 8 Stunden wurde anschliessend die Schwimmdeckenbildung aufgezeichnet. Nach der Zerstörung der Schwimmdecke baut sich innert weniger Stunden eine neue kompakte Schwimmschicht auf, wobei schon nach einer Stunde eine klare Phasentrennung sichtbar wird. Nach rund 8 Stunden ist die Schwimmdeckenbildung praktisch abgeschlossen. Ein wichtiger Punkt, der bei der Dimensionierung des Fermenters beachtet werden muss, ist die Tatsache, dass nach einem Ausfall des Rührwerkes das Schwimmdeckenniveau erheblich ansteigen kann. Vom ursprünglichen Suspensionsniveau von rund 10,5 cm stieg die Schwimmdecke innert 8 Stunden auf eine Höhe von rund 13,5 cm an. Dies entspricht einer Volumenzunahme von 28%.

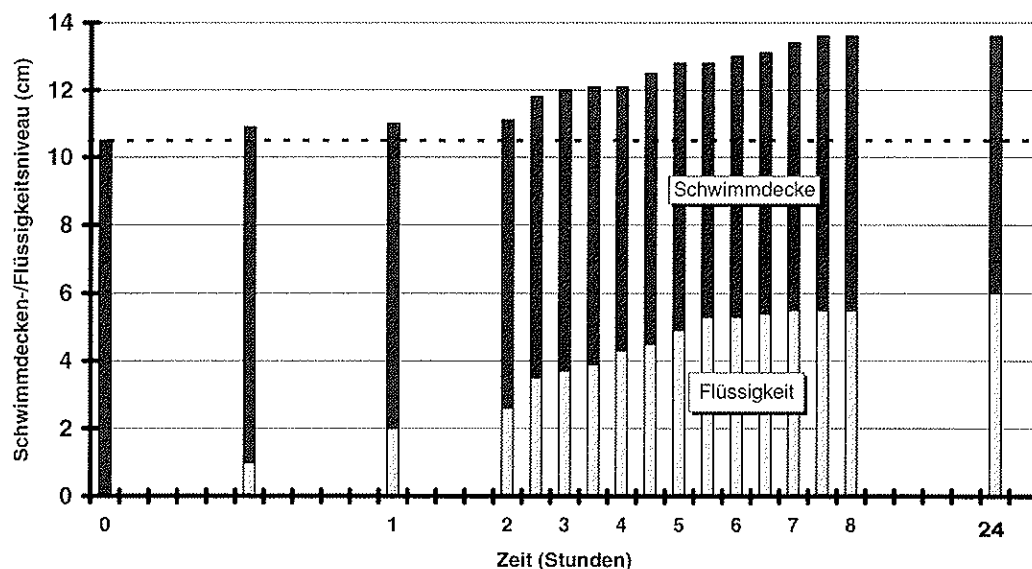


Abb. 16: Schwimmdeckenwiederaufbau nach der Zerstörung der Schwimmdecke.

In der Gesamtverfahrenskette der Energiegrasvergärung kann die nachträgliche Flüssig/Fest-Phasentrennung des vergorenen Materials eine wichtige Rolle spielen. Durch die **Abtrennung und Wiederverwendung der Gärflüssigkeit als Suspensionsmedium** wird der Güllebedarf der Co-Vergärung -falls dies aus logistischen Gründen notwendig und sinnvoll ist - reduziert. Für die Abklärung der Absetz- bzw. Flotationseigenschaften der vergorenen Energiegras/Gülle-Suspension wurden entsprechende Versuche in 3 Liter-Bechergläsern durchgeführt. Das vergorene Heumehl- und Silagematerial zeigte dabei ein ausgeprägtes Flotationsverhalten. Sowohl bei der Heumehl- als auch bei der Silagevergärung konnten nach einer Flotationszeit von 24 Stunden rund 40-60 Vol.-% Gärflüssigkeit abgetrennt werden. Als Beispiel ist in Abbildung 17 das Flotationsverhalten der vergorenen Gülle/Heumehlsuspension des Versuchs P6, bei welchem die abgetrennte Flüssigkeit rezirkuliert wurde, graphisch dargestellt.

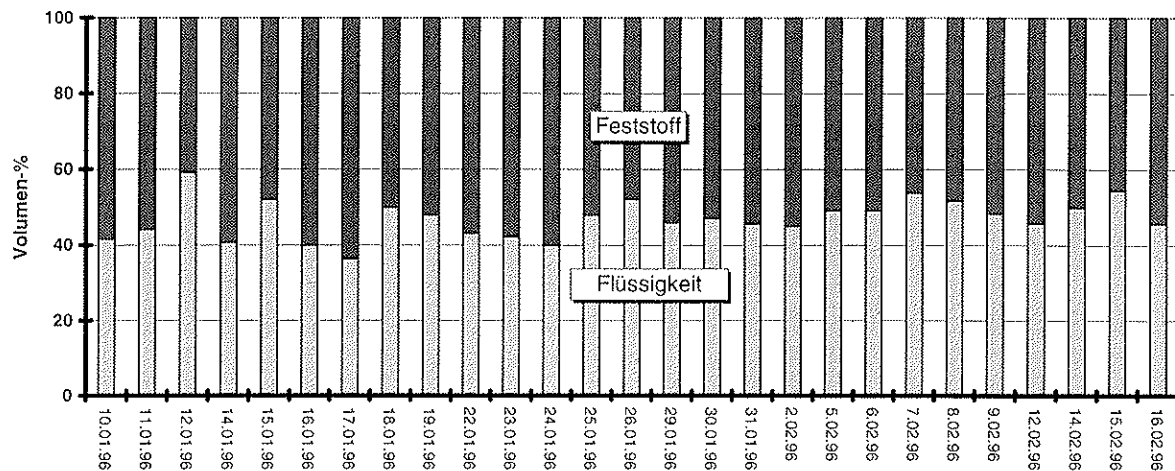


Abb. 17: Flotationsverhalten einer vergorenen Heumehl/Gülle-Suspension. Während rund einem Monat wurden in Intervallen von 1-3 Tagen Absetzversuche mit dem vergorenen Material durchgeführt (TS vergorene Suspension: 9.2%, Verweilzeit 18 Tage, Flotationszeit 48h, Temperatur 35°C)

4.2.5 Zusammenfassung

- Die Vergärung von Gras-Silage oder gehäckseltem Heu in Form einer Suspension mit Wasser ist ohne Zusatz eines Puffers nicht möglich. Ein stabiler Gärprozess kann zwar unter Zugabe von Natriumhydrogencarbonat erreicht werden, für landwirtschaftliche Anlagen fällt diese Betriebsweise jedoch aus Kostengründen ausser Betracht. In der Landwirtschaft steht mit Gülle ein ausgezeichnetes Puffermedium zur Verfügung.
- Die gemeinsame Vergärung von Energiegras mit Schweine- oder Rindergülle erwies sich als ein gut funktionierendes Gärverfahren. Durch die hohe Pufferkapazität der Güllesubstrate kann auch bei hohen Belastungen ein stabiler Gärprozess mit Ausbeuten zwischen 500 und 600 Litern pro kg zugeführte organische Substanz garantiert werden (Nettoaussbeuten Silage ohne den zusätzlichen Gasertrag der Gülle).
- Der Trockensubstanz-Abbau im Rührkesselreaktor liegt zwischen 50 und 60%. Bei einem TS-Input von 20% liegt der Trockensubstanzgehalt des Fermenterinhalt bei rund 10%. Das vergorene Material ist - insbesondere bei der Verwendung von Heumehl - homogen und noch gut pumpbar.
- Bei hohen Belastungen kann nach der Beschickung eine starke Schaumbildung auftreten. Damit ein problemloser Betrieb gewährleistet werden kann, muss der Fermenter entsprechend ausgerüstet bzw. betrieben werden (mechanische Schaumzerstörung, genügend grosser Gasraum, Aufteilung der täglichen Beschickungsmenge in zwei oder mehrere Chargen).
- Das vergorene Material zeigt ein ausgeprägtes Flotationsverhalten. Der Abscheidegrad liegt zwischen 40 und 50%, d.h. dass rund 40-50 Volumenprozent der Gärflüssigkeit wieder als Suspensionsmedium verwendet oder rezirkuliert werden kann. Bei der Auslegung des Fermenters muss ein besonderes Augenmerk auf die Schwimmdeckenbeherrschung gelegt werden (effizientes Rührsystem, gross dimensionierter Fermenterauslauf, vorzugsweiser Einsatz eines liegenden Fermenters mit durchgehendem Haspelrührwerk [17]).

4.3 Anacom-Fermenter (Trockene Vergärung)

Für die Beurteilung des Systems der trockenen Vergärung stand - wie auch beim Rührkessel - die Frage im Vordergrund, ob die Silagevergärung ohne korrigierende Massnahmen betrieben werden kann oder ob für einen stabilen Faulprozess zusätzliche Substrate zur Pufferung, Impfung bzw. zur Benetzung erforderlich sind. Für eine landwirtschaftliche Feststoffanlage bieten sich die untenstehenden Betriebsweisen an. Mit den semikontinuierlich betriebenen 80-Liter Labor-Säulenfermentern (Kap. 3.5.3, Seite 14) wurden entsprechende Versuche durchgeführt.

- a) Vergärung von Silage ohne Zusatzmedium
- b) Benetzung der Silage mit Flüssigkeitsrückführung (Wasser)
- c) Benetzung der Silage mit Flüssigkeitsrückführung (Gülle)
- d) Co-Vergärung mit Festmist
- e) Rezirkulation von vergorener Silage (Feststoffrückführung)

Für das erste **Anfahren** wurden die Säulenfermenter mit vergorenen Silage aus dem Laborgärkanal befüllt. Das Nutzvolumen betrug bei sämtlichen Versuchen rund 55-60 Liter. Anschliessend wurde ein Kilogramm Silage (TS:30%/OS 90%) und 4 Liter dünne Sauggülle (TS:1.5%/OS 70%) in den Fermenter eingebracht und der Deckel verschlossen. Durch das optimal adaptierte Impfmateriel gab es beim Anfahren keinerlei Probleme. Nach dem Verschliessen der Fermenters setzte die Gasproduktion sofort ein und es konnte mit der kontinuierlichen Beschickung begonnen werden.

Die Versuchsserie wurde mit den Betriebsarten b) Benetzung mit Wasser und c) Benetzung mit Sauggülle gestartet. Da sich bei diesen Versuchen zeigte, dass für die Erhaltung eines stabilen Faulprozesses eine ausreichende **Benetzung des Silagematerials** unerlässlich ist, musste die Betriebsart a) nicht mehr untersucht werden. Vorversuche, bei welchen der Flüssigkeitsverlust während des Betriebes nicht durch Zugabe von neuer Gülle bzw. Wasser ersetzt wurde, zeigten, dass die Gasproduktion bei zunehmender „Austrocknung“ kontinuierlich abnimmt und der Faulprozess schliesslich zum Erliegen kommt. Nach Zugabe von neuer Benetzungsflüssigkeit erholt sich der Fermenter jedoch innert 2-3 Tagen wieder. In den durchgeführten Versuchen wurde deshalb- unabhängig von der Betriebsart - durchgehend mit rund 10-15% Benetzungsflüssigkeit gefahren, welche täglich 1-2 x rezirkuliert wurde.

Die Fermenter wurden täglich mit einem Kilogramm Extensograssilage beschickt. Das rezirkulierte Flüssigkeitsvolumen betrug rund 6-7 Liter bei einem Feststoffnutzvolumen von rund 55 Litern. Vor der Entnahme des vergorenen Materials am seitlichen Stutzen wurde die Flüssigkeit mit einem Hahn abgelassen und nach der Beschickung mit frischer Silage wieder dem Fermenter durch den Beschickungsstutzen zugegeben. Der Flüssigkeitsverlust (Gas und Outputmaterial) musste durch die tägliche Zugabe von rund 0.2 Liter Gülle oder Wasser wettgemacht werden. In Tabelle 4 sind die Kenndaten der Fahrweisen b) - e) zusammengestellt.

4.3.1 Benetzung durch Wasserrezirkulation (Versuch A1)

In Analogie zu den Rührkesselversuchen zeigte sich, dass ohne ein pufferndes oder als Impfsubstrat dienendes Zusatzmedium kein stabiler Faulprozess erreicht werden kann. Nach dem Betrieb mit Gülle (Versuch A2) wurde die Sauggülle durch die Zugabe und Rezirkulation von Wasser ersetzt. Nach dem Auswaschen der Gülleflüssigkeit versauerte der Prozess allmählich (sinkender pH-Wert, ansteigende Säurewerte) und kam schliesslich zum Erliegen.

4.3.2 Benetzung mit Saugüllerezirkulation (Versuch A2)

Die biologischen Kennwerte in Tabelle 4 zeigen, dass bei dieser Betriebsweise (Benetzung des Fermenterinhalt mit Saugülle durch Rezirkulation (1x täglich), Ersetzen des Flüssigkeitsverlustes mit frischer Saugülle) eine stabile Gärung mit einer Biogasausbeute von rund 610 Litern pro kg OS erreicht werden konnte. Die Fettsäurekonzentrationen von weniger als 100 mg/l (gemessen in der Gärflüssigkeit), der pH-Wert von 7.7 und die hohen Alkalinitätswerte (150-160 meq/l) machen deutlich, dass die Belastung noch gesteigert werden kann, ohne dass dabei Probleme hinsichtlich der Prozess-Stabilität zu erwarten sind.

Betriebsweise	Benetzung mit Wasser	Benetzung mit Saugülle	Co-Vergärung mit 30 % Festmist	Feststoff-Rezirkulation 25%	Feststoff-Rezirkulation 25%
Benetzungs-Flüssigkeit (5-10% des Nutzvolumens)	Wasser	Saugülle	Wasser	Saugülle	Wasser
tägliche Beschickung	1kg Silage	1kg Silage	1kg Silage 300 g Festmist	1kg Silage	1kg Silage
Prozessparameter					
Gärtemperatur	35°C	35°C	35°C	35°C	35°C
Raumbelastung (gOS/l·d)	4.5	4.6	5.25	4.6	4.5
Verweilzeit (d)	24	22	20	20	20
Biogas					
Biogasausbeute (Liter/kg OS)		610	580	550	570
Methangehalt (%)		56	54	56	55
Fermenterleistung (l/l·d)		2.75	2.6 / 3.15	2.5	2.6
Vergorenes Material					
pH-Wert		7.7	7.3	7.7	7.6
Alkalinität (meq/l)		150	70	160	90
NH ₄ -N (mg/l)		1600	1400	1700	1400
Fettsäuren (mg/l)					
Acetat		70	1400	300	1500
Propionat		<10	1000	20	800
Butyrat		<10	500	10	100
Versuch	A1	A2	A3	A4	A5

Tabelle 4: Biogasausbeuten und biologische Kenndaten der Silagevergärung im Anacom-Fermenter

4.3.3 Co-Vergärung mit Rinderfestmist (Versuch A3)

Die Co-Vergärung von Silage mit einem Anteil von 30% Festmist und Wasser als Benetzungsmedium (Rezirkulation 1x täglich) ergab eine stabile Gärung mit einer Silage-Gasausbeute von 580 Litern pro kg OS. Die biologischen Kennwerte (Fettsäuren: 2900 mg/l, pH-Wert: 7.3, Alkalinität: 70 meq/l) deuten jedoch darauf hin, dass der Faulprozess bei dieser Fahrweise stärker belastet ist als bei der Silagevergärung mit Saugüllerezirkulation (Versuch A2). Eine Vergärung mit einem geringeren Anteil von Festmist scheint demnach bei reiner Wasserzugabe eher problematisch zu sein. Aufgrund der positiven Resultate mit der Saugüllerezirkulation kann jedoch davon ausgegangen werden, dass mit sporadischen Zugaben von gut puffernder Saugülle auch ein stabiler Betrieb mit kleinerem Mistanteil möglich ist.

4.3.4 Rezirkulation von vergorenem Silagematerial (Versuch A4 und A5)

Mit der alleinigen Benetzung der Silage mit Wasser war kein stabiler Betrieb möglich (Versuch A1). Zwei weitere Versuche dienten der Abklärung, ob mit der zusätzlichen Rezirkulation von festem vergorenem Material (Rückimpfung) ein stabiler Faulprozess erreicht werden kann. Bei den Versuchen A4 und A5 wurde täglich 25 Gew.-% des vergorenen Feststoffmaterials rückgeimpft. Nach dem Entleeren der Benetzungsflüssigkeit wurden 250-300g des vergorenen Output-Materials mit der frischen Silage vermengt und das Gemisch in den Fermenter eingefüllt. Nach der Feststoff-Beschickung erfolgte die Benetzung des Materials durch die Zugabe der Gärflüssigkeit.

Wie zu erwarten war, gab es beim Betrieb mit Saugülle als Benetzungsflüssigkeit (Versuch A4) keine Probleme. Die Säurewerte von weniger als 400 mg/l und die Alkalinität von 160 meq/l belegen, dass mit dieser Fahrweise ein stabiler Prozess garantiert ist. Die Ausbeute von 550 Litern Biogas pro kg OS ist vergleichbar mit den Erträgen der anderen Betriebsweisen.

Bei der Fahrweise mit Rezirkulation von festem vergorenem Material und Wasser als Benetzungsflüssigkeit konnte der Betrieb ebenfalls aufrecht erhalten werden (Versuch A5). Die höheren Säurekonzentrationen und der tiefere Alkalinitätswert (90 meq/l gegenüber 160 meq/l) verdeutlichen jedoch, dass der Faulprozess stärker belastet ist als beim Betrieb mit Saugülle.

4.3.5 Zusammenfassung

- Bei der Trockenvergärung werden Gasausbeuten von 550 bis 610 Liter Biogas pro kg organische Substanz (bez. auf das Silagematerial) erreicht. Der Gasertrag ist damit etwa gleich hoch wie bei der Co-Vergärung im Rührkessel.
- Wie bei den Rührkesselversuchen zeigte sich, dass das Silagematerial ohne ein Zusatzmedium bzw. ohne Rezirkulation von Flüssigkeit oder festem Material nicht vergoren werden kann. Durch den Pfropfstrombetrieb ist keine Durchmischung des Frischmaterials mit dem biologisch aktiven Gärmaterial gewährleistet. Dies kann - speziell bei der mit hohen Fettsäuregehalten belasteten Silage - zur Versäuerung der oberen Schichten führen. Des weiteren ist das Silagematerial sehr trocken (TS: 30-40%), was den biologischen Abbauprozess verunmöglicht oder zumindest stark hemmt.
- Ein stabiler und effizienter Faulprozess mit hohen Ausbeuten stellt sich nur ein, wenn das Silagematerial mit einer gut puffernden Flüssigkeit benetzt wird. Als Benetzungsflüssigkeit sind Flüssiggüllen sehr gut geeignet. Aus zeitlichen Gründen konnte bei den Versuchen nur Saugülle eingesetzt werden. Aufgrund der positiven Resultate, die beim Einsatz von vergorener Kuhgülle und von Rindergülle bei der Co-Vergärung im Rührkessel erreicht wurden, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich diese Güllen auch für die Feststoffvergärung eignen.
- Beim Laborbetrieb konnte im Säulenfermenter mit einem Durchmesser von 30 cm eine optimale Benetzung der oberen Schicht und des gesamten Fermenterinhaltens erreicht sowie eine intensive Durchmischung der frischen Silage mit rezirkuliertem vergorenem Material garantiert werden. Um einen effizienten Betrieb auch in Praxisanlagen zu gewährleisten, ist es unbedingt erforderlich, dass entsprechende technische und konstruktive Lösungen für die ausreichende Benetzung und Vermischung gefunden werden.
- Eine Benetzung mit Wasser führt nur dann zu einem stabilen Gärprozess, wenn gleichzeitig vergorenes Feststoffmaterial rezirkuliert wird. Ohne Rezirkulation (Rückimpfung) tritt eine Versäuerung ein, die letztlich zum Zusammenbruch der Methangärung führt. Durch die sporadische Zugabe von Flüssiggülle kann die Pufferkapazität und somit die Stabilität dieser Betriebsweise verbessert werden.

4.4 Gärkanal

Im Laborgärkanal wurden vier Versuchsserien mit Verweilzeiten zwischen 8 und 30 Tagen bei einer Gärtemperatur von 35°C durchgeführt. In Abbildung 18 (Seite 32) sind die erreichten Gasausbeuten in Abhängigkeit der Verweilzeit dargestellt. Die Ausbeute bei der 22-tägigen Verweilzeit beträgt rund 500 Liter Biogas pro Kilogramm organische Substanz. Bei der Reduzierung auf 16 Tage werden noch 450 Liter pro kg OS produziert, während bei kürzeren Verweilzeiten ein deutlicher Ertragseinbruch stattfindet. Die Resultate korrespondieren recht gut mit den Versuchsergebnissen der batchweisen Vergärung von Silage. Als Vergleich zur Silagevergärung sind auch die Ausbeuten der Biogaserzeugung aus Festmist dargestellt. Aus der Graphik wird ersichtlich, dass die Grassilage gegenüber dem Festmist deutlich höhere Gasausbeuten liefert und dass ein schnellerer Abbau stattfindet. Die Kenndaten der Silagevergärung im Gärkanal sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Aufgrund des konzeptionell bedingten ungünstigen Verhältnisses zwischen dem Feststoffnutz volumen und dem Totalvolumen des Laborgärkanals musste mit relativ niederen Raumbelastungen gefahren werden. In einem Zusatzversuch wurden die Körbe mit je 8 kg Silagematerial befüllt (gepresstes Material) und bei einer Verweilzeit von 16 Tagen vergoren, was eine Raumbelastung von rund 4 kg OS/m³ und Tag ergibt. Die Gasausbeute betrug in diesem Versuch 440 Liter/kg OS. Die biologischen Kenndaten (pH-Wert 7.6 , Alkalinität 85 meq/l, Säuren <500 mg/l) bestätigen, dass auch noch mit höheren Belastungen gefahren werden kann, ohne die Stabilität des Faulprozesses zu beeinträchtigen.

VERWEILZEIT (Tage)	8	11	16	22	30
Belastung (gOS/l/d)	3.6	2.4	1.7	1.1	0.9
NH₄-N (mg/l)	1100 - 1300				
Alkalinität (meq/l)	140 - 160				
Konduktivität (mS)	18 - 19				
Gasausbeute (l /kg OS)	305	385	450	500	510
Leistung (l/l/d)	1.1	0.92	0.76	0.53	0.46
CH₄-Gehalt (%)	50	57	57	58	57
pH-Wert	6.9	7.5	7.6	7.6	7.5
Fettsäuren (mg/l)					
Acetat	6500	1300	290	240	225
Propionat	2300	400	240	65	40
Butyrat	620	30	20	18	50

Tabelle 5: Gasausbeuten und biologische Kenndaten der Silagevergärung im Gärkanal

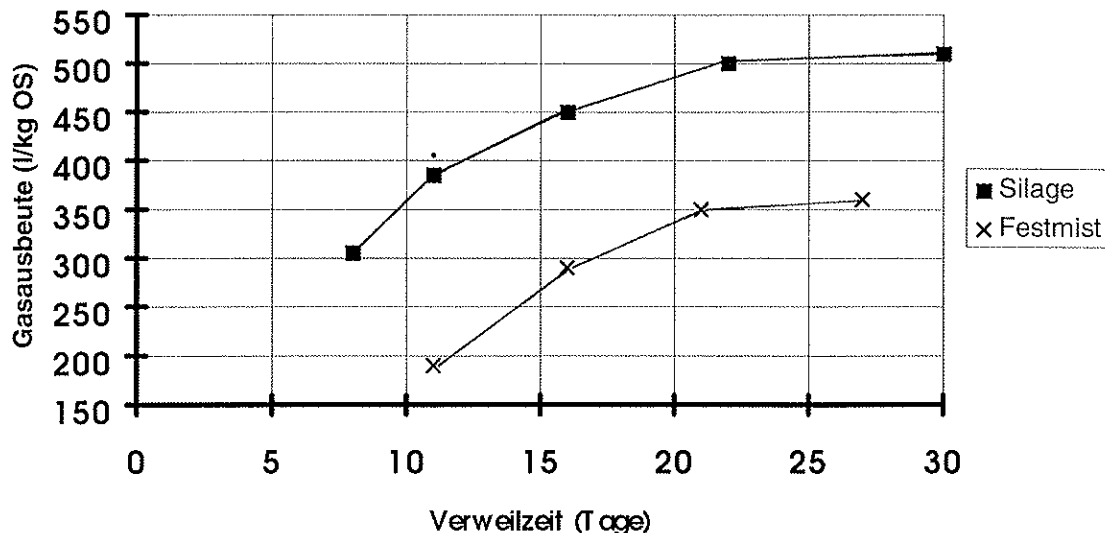


Abb. 18: Gasausbeuten von Grassilage einer Extensowiese bei der Vergärung im Gärkanal (Augustschnitt, TS:28%/OS:87%, Halmlänge: 30-40 cm), Gärflüssigkeit: Wasser/Gülle-Gemisch (TS:1.5%), Gärtemperatur 35°C. Als Vergleich sind die Gasausbeuten der Rindermistvergärung in der Graphik dargestellt.

4.5 Zweistufenprozess

4.5.1 Laborversuche

Für eine Beurteilung des Zweistufenprozesses standen folgende Fragestellungen im Vordergrund:

1. Wie gross ist die Menge an löslichen Stoffen, die in der ersten Stufe aus dem Feststoff extrahiert bzw. hydrolysiert werden kann?
2. Wieviel Biogas kann in der zweiten Stufe aus dem Extrakt erzeugt werden?

Zur Abklärung dieser Fragen wurden im Labor entsprechende Untersuchungen durchgeführt. Zur Ermittlung des total extrahierbaren Materials wurden in einem 30-Liter Kunststoff-Fass vier Kilogramm Grassilage (Halmlänge 30-40 cm) mit 20 Liter Wasser bedeckt und bei einer Temperatur von 34°C inkubiert. Nach 2,5,8 und 13 Tagen ersetzte man 18 Liter der flüssigen Phase, wobei jeweils 2 Liter der Hydrolyseflüssigkeit als Impfmateriale im Extraktionsgefäß zurückbehalten wurde. Zur Bestimmung des im Anaerobfilter zu erwartenden Biogasertrages wurden die Extrakte im Batchversuch vergärt und deren Gasausbeuten ermittelt. In den Abbildungen 19 und 20 sind die Resultate dieser Versuche graphisch dargestellt.

Mit dem beschriebenen Extraktionsverfahren konnten aus einem Kilogramm Grassilage (TS:25.5%/OS:86%) bzw. aus 220g organischer Substanz rund 115 Gramm CSB extrahiert werden. Der Chemische Sauerstoff-Bedarf ist ein Mass für die organische Belastung des Extraktes und gibt Auskunft über die Effizienz des Extraktionsverfahrens. Bei der Vergärung der Extrakte im Batchversuch wurden rund 350 Liter Biogas pro kg extrahiertem CSB erzeugt, was einer Ausbeute von rund 40 Litern Biogas pro Kilogramm Silage bzw. 183 Litern pro kg OS entspricht. Dies sind 37% des Ertrages, welcher bei der direkten einstufigen Vergärung im Batchverfahren erzielt wurde (rund 500 Liter Biogas

pro kg OS). In weiteren Extraktionsversuchen wurden teilweise 220 Liter oder 45 % der Ausbeuten des einstufigen Verfahrens erreicht. Im Vergleich zur zweistufigen Vergärung von Festmist [8], bei der lediglich eine Umsetzung von weniger als 20% erreicht wurde, liegt die Ausbeute beim Energiegras um einen Faktor 2-2.5 x höher.

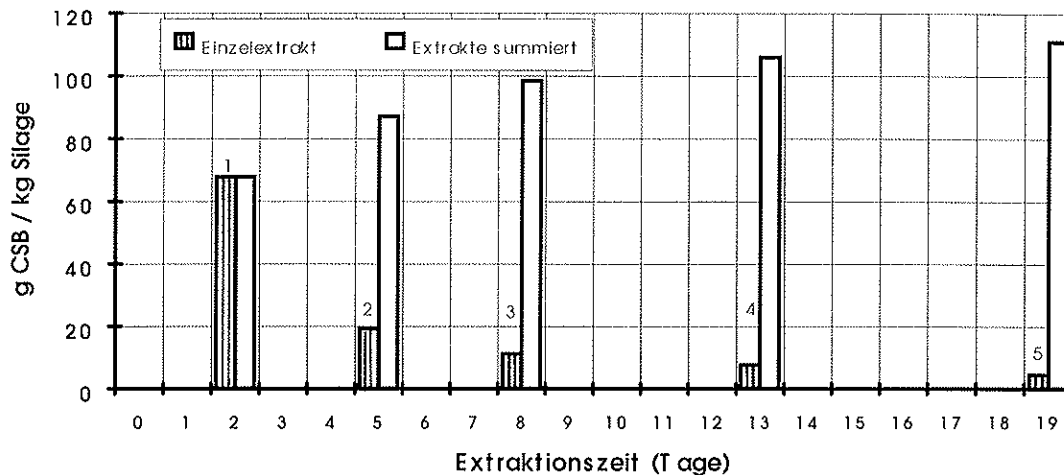


Abb. 19: CSB-Extraktion von Extensograssilage (fünfmalige Extraktion: Ersetzen der Flüssigkeit mit frischem Wasser nach 2, 5, 8, 13 und 19 Tagen).

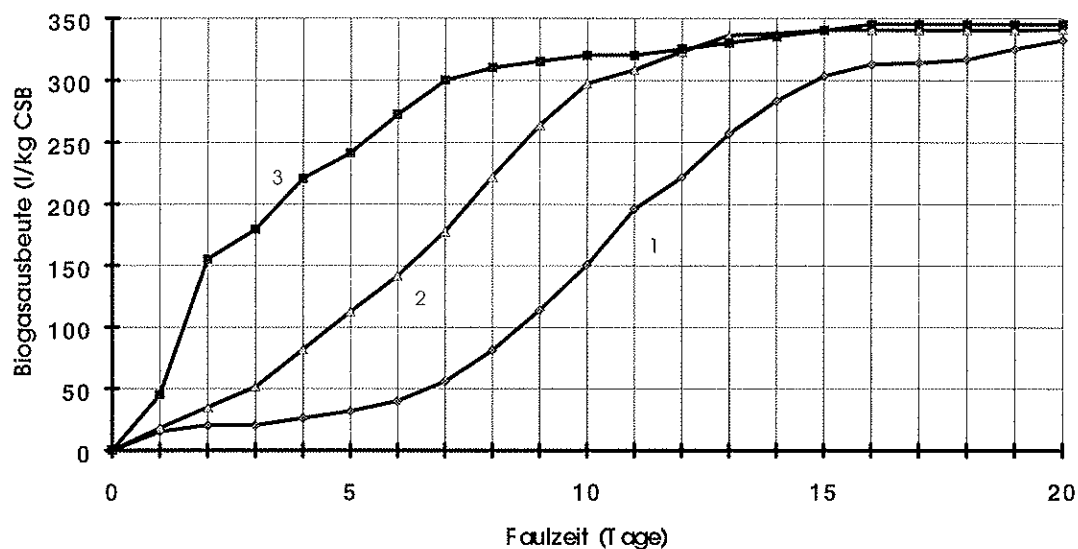


Abb. 20: Vergärung der Einzelextrakte 1-3 im Batchversuch

Bei den Laborresultaten muss in Betracht gezogen werden, dass die erreichten Gasausbeuten mit einem äusserst einfachen Extraktionsverfahren erzielt wurden. Es ist anzunehmen, dass mit einer Optimierung der Hydrolysestufe (Zerkleinerung der Silage, Intensität der Durchmischung, adaptiertes Milieu) bessere Resultate erzielt werden können.

4.5.2 Zweistufen-Pilotanlage

Im vorliegenden Kapitel ist eine kurze Resultatzusammenfassung des Pilotversuches wiedergegeben. Der Text ist mit wenigen Abänderungen vom Kurzbericht der arbi übernommen worden [16]. Der ausführliche Versuchsbericht [22] ist bei INFOENERGIE Tänikon oder bei der arbi AG einsehbar.

Für die weitergehende Beurteilung des Zweistufenverfahrens wurde die arbi AG beauftragt, auf der Pilotanlage in Maschwanden einen Versuch mit Silagematerial durchzuführen. Hierzu wurde auf dem Gelände der FAT ein Silageballen geöffnet und die Halme mit einem Feldhäcksler auf eine Schnittlänge von 2-3 cm zerkleinert. Anschliessend transportierte man das Material zur Pilotanlage.

In die Hydrolysetrommel wurden total 352 Kilogramm Silage eingefüllt (Extensograss, Schnittlänge 3-4cm, TS: 33%). Aus dem Silagematerial wurden in drei Wochen rund 35 m³ Gas mit einem durchschnittlichen Methangehalt von 55% produziert. Die **Gasausbeute** betrug 320 Liter pro kg zugeführte organische Substanz. Gegenüber dem in den Laborversuchen erreichten Wert von 183 Litern ist dies eine deutliche Steigerung, welche belegt, dass ein optimiertes Hydrolyseverfahren beträchtliche Ertragsverbesserungen bringen kann.

Aus Abbildung 21 wird das stark saure Milieu des Ausgangsmaterials ersichtlich. In der Silage lagen sehr hohe Konzentrationen von Propion- und Milchsäure vor. Der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) war zu Beginn im Auslauf der Hydrolysestufe mit Spitzenwerten um 35 g/l entsprechend hoch, wie dies Abbildung 21 zeigt. Nach rund drei Tagen sank der CSB auf Werte von unter 10 g/l. Nach dem Auswaschen der löslich vorliegenden Komponenten lag der pH im Bereich von 6.5, was für eine gut eingestellte Hydrolysestufe optimal ist. Trotzdem war die Hydrolyse nach drei Wochen Laufzeit noch nicht abgeschlossen.

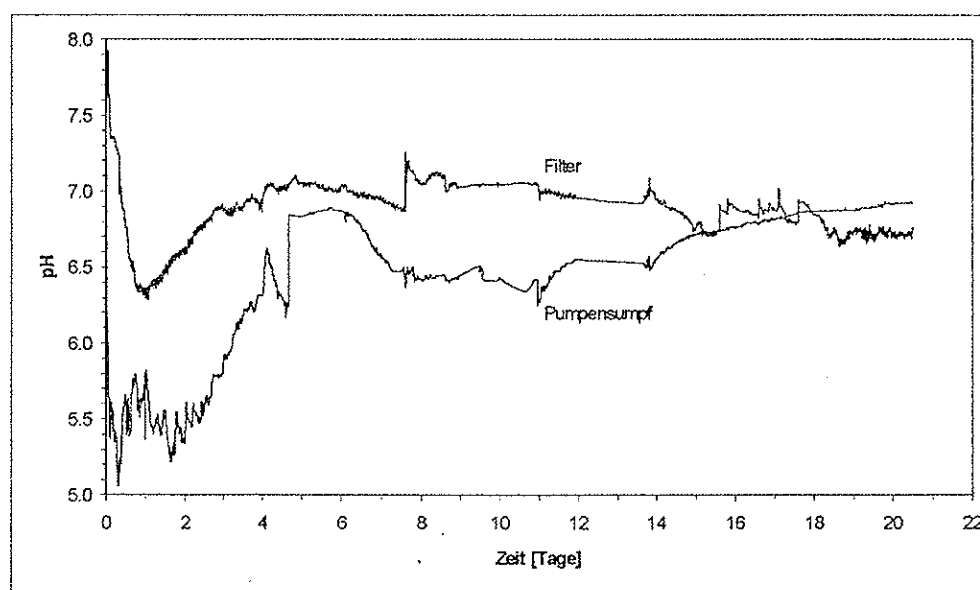


Abb. 21: Entwicklung des pH im Pumpensumpf (=Ausfluss Hydrolyse) und im Anaerobfilter bei der zweistufigen Vergärung von Extensograss-Silage

Der Anaerobfilter verkraftete die Schockbelastung mit den hohen CSB- und Säurekonzentrationen ohne nennenswerte Probleme: Der pH sank zwar kurzzeitig auf 6,3, erholte sich dann aber schnell wieder (Abb. 21). Die CSB-Fracht wurde zu einem grossen Teil in Biogas umgesetzt. Sie wurde zur Zeit der höchsten Belastung zu rund 80% abgebaut (Abb. 22).

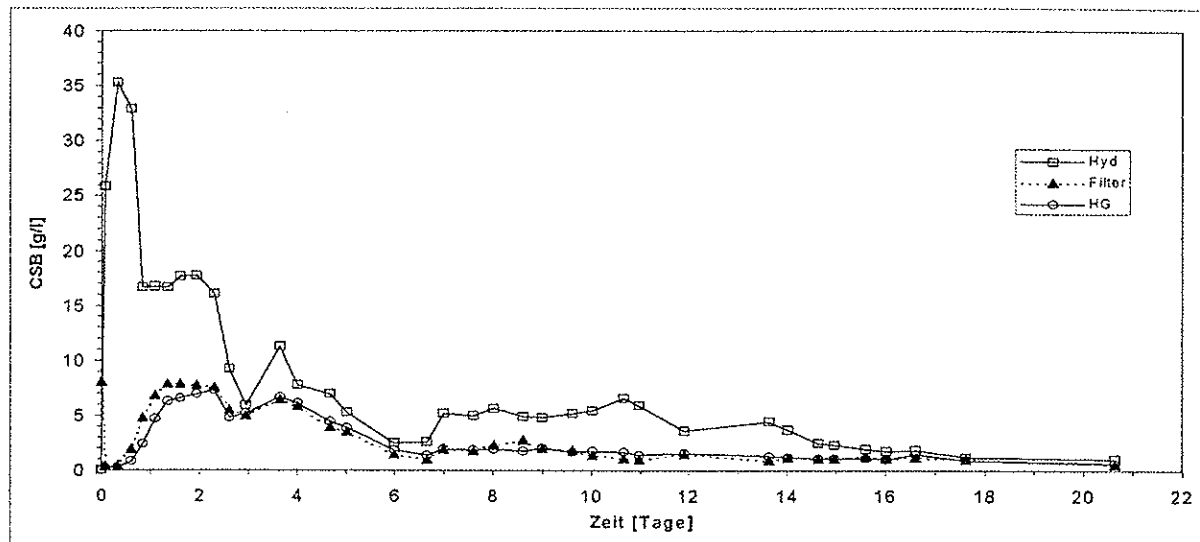


Abb. 22: Entwicklung des gelösten CSB (chemischer Sauerstoffbedarf) in den Stufen Hydrolyse, Filter und Heizgefäss bei der zweistufigen Vergärung von Extensograssilage

Die Entwicklung der Gaszusammensetzung in der Hydrolyse (Abb. 23) zeigt, dass der Methangehalt im Verlauf des Versuchs stetig anstieg. Dies verdeutlicht, dass der Hydrolyseschritt beim eingesetzten Silagematerial geschwindigkeitsbestimmend ist und die Trennung der mikrobiologischen Stufen mit zunehmender Versuchsdauer immer weniger gewährleistet war. Der Stickstoff stammt von der ursprünglich in der Trommel vorhandenen Luft.

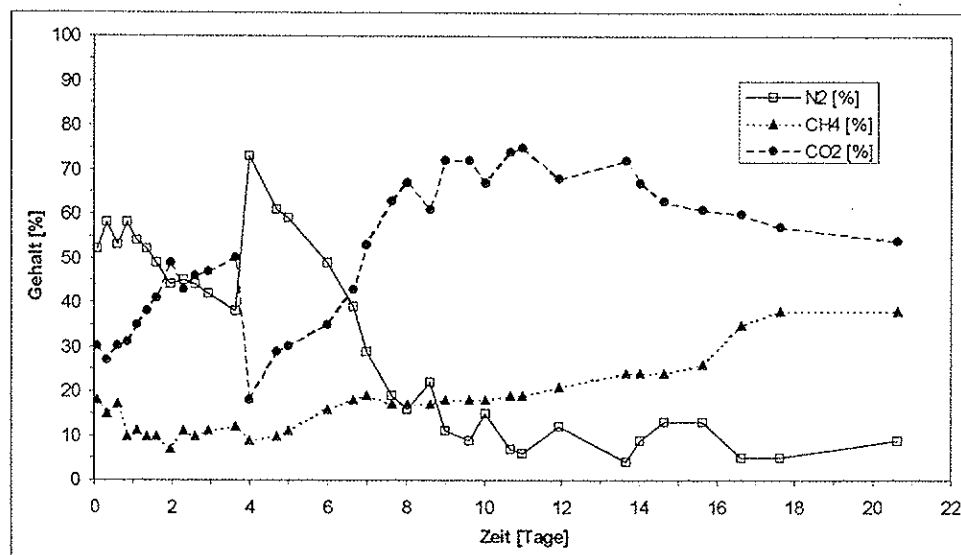


Abb. 23: Entwicklung der Gaszusammensetzung in der Hydrolysestufe. (Am Tag 4 trat infolge einer Behälter-Revision Luft in die Hydrolysestufe, was den Stickstoffgehalt wieder ansteigen liess).

Der Versuch wurde nach drei Wochen abgebrochen, ohne dass das Gärpotential der Silage vollständig freigesetzt werden konnte. Diese Gärzeit ist für einen Zweistufenprozess ausserordentlich lang. Für die relativ schlechte Hydrolyseleistung können folgende Gründe in Frage kommen:

- Während der Vergärung ballte sich etwa die Hälfte des Substrates zu pelletartigen Agglomeraten zusammen und war deshalb für das Zirkulationsmedium schlechter zugänglich als nicht koaguliertes Material.
- Die Hydrolysetrommel wurde vollständig mit Silage befüllt. Durch das Aufquellen des Materials stellte sich am Versuchsanfang keine Durchmischung ein, wodurch das Aufheizen des Substrates verlangsamt wurde.
- Während des Silageprozesses wurden die leicht abbaubaren Substanzen in Zwischenprodukte wie Milchsäure und andere Substanzen umgewandelt, so dass vermehrt Material zurückblieb (Lignocellulose etc.), für welche die Hydrolyse der geschwindigkeitsbestimmende Schritt ist.

Für die letzte Hypothese spricht, dass der einstufige Prozess - zumindest bei Verdünnung mit Wasser/Gülle - in der gleichen Zeit eine eher höhere Ausbeute ergibt. Weil im Zweistufenprozess die Abbaugeschwindigkeit nicht spürbar schneller war als im einstufigen Verfahren, muss die Hydrolyse geschwindigkeitsbestimmend sein. (Die Methanisierung ist im Zweistufenprozess dank hoher Biomassekonzentrationen immer leistungsfähiger als im Einstufenprozess). Die Hydrolyse konnte jedoch im vorliegenden Fall durch die Trennung der Stufen gegenüber dem einstufigen Verfahren nicht beschleunigt werden. Wahrscheinlich ist dies eine Folge der beiden erstgenannten Gründe (Knollenbildung, Aufquellen).

Die Frage, wie weit bei geeigneter Betriebsführung und verfahrenstechnischer Anpassungen die Hydrolyse gegenüber dem Einstufenprozess beschleunigt werden könnte, bleibt offen. Zusammenfassend muss jedoch festgestellt werden, dass sich für die Silagevergärung auch bei einer Verbesserung der Hydrolyseleistung der verfahrenstechnische Mehraufwand für einen Zweistufenprozess im Vergleich zum Einstufenprozess kaum lohnen wird.

5. Oekonomische und ökologische Aspekte der Energiegrasvergärung

Für die ökologische und ökonomische Beurteilung der Energiegrasvergärung sind die relevanten Daten durch eigene- und Fremdanalysen ermittelt und den ProjektleiterInnen der Teilprojekte G (Oekobilanz) und H (Oekonomie) zugestellt worden. Im Teilprojekt H (Oekonomie) des Gesamtprojektes wurde eine volks- und betriebswirtschaftliche Beurteilung des Anbaus und der energetischen Nutzung von Energiegras vorgenommen. Um einen Vergleich mit der Verbrennung zu ermöglichen, wurde für die ökonomische Beurteilung von einer Anlagengrösse für die jährliche Verwertung von rund 1400 Tonnen Silagematerial ausgegangen (System: Trockene Vergärung). Im zusammenfassenden Schlussbericht sind die entsprechenden Berichte publiziert worden [1].

In Tabelle 6 sind die wichtigsten Daten für die ökologische Bewertung der Luft- und Bodenbelastung zusammengefasst. Mit Ausnahme der BHKW-Emissionswerte (Klär gas) beruhen die Werte auf Messungen, die bei der Vergärung von Extensogras (Silage, Heu) durchgeführt wurden. Sie haben auch für die Reinsaat (Ausnahme: Wiesenfuchsschwanz mit geringerer Gasausbeute) Gültigkeit.

Die unterschiedliche chemische Zusammensetzung verschiedener Grasarten wirkt sich in erster Linie auf die Nähr - und Schadstoffbilanz (Boden) aus. Für die entsprechenden Bilanzierungen können die Transferkoeffizienten verwendet werden. Der Koeffizient gibt an, welcher Anteil eines Stoffes vom Frischsubstrat in das vergorene Substat transferiert wird.

Bei der Biogaszusammensetzung sind vor allem beim H₂S-Gehalt substratabhängige Unterschiede möglich. Da für den Betrieb des BHKW's jedoch eine Entschwefelung des Biogases vorgesehen ist, kann für die BHKW-Emissionen (Luftbelastung) ein konstanter Wert eingesetzt werden. Für die Berechnung der SO₂-Emissionen wurde von einem H₂S-Gehalt des entschwefelten Biogases von 50 ppm ausgegangen.

Gasausbeute	500-600 Liter Biogas pro kg organische Substanz					
Gaszusammensetzung	CH ₄ : 56-58% CO ₂ : 38-40% H ₂ S: 200-300 ppm N ₂ : 1-2%					
Emissionen BHKW	NO _x : 70-120 mg/Nm ³ CO: 500-600 mg/Nm ³ SO ₂ : 140 mg/Nm ³					
Transferkoeffizient Frischsubstrat--Gärssubstrat	N 95%	P 100%	K 100%	Ca 100%	Mg 100%	Schwermetalle 100%
Abbau organische Substanz	50-60 %					

Tabelle 6: Kennwerte für die ökologische Beurteilung der Energiegrasvergärung : Gasausbeute und Gaszusammensetzung / Emissionen Luft und Boden

6. Schlussfolgerungen

- **Grasvergärung**

Die Methangärung von pflanzlichem Material gestaltet sich schwieriger als die Vergärung von tierischen Abfallprodukten wie Gülle oder Mist. Aufgrund des schnelleren Abbaus und der geringeren Pufferkapazitäten des Grasmaterials sind für die Gewährleistung eines stabilen Gärprozesses korrigierende Massnahmen notwendig. Bei der Biogaserzeugung aus Extensograssilage (Frischmaterial, Silage, Heu) ist zur Aufrechterhaltung eines stabilen Prozessverlaufes die Rückführung von vergorenem Material bzw. die Zugabe von puffernden Flüssigmedien erforderlich.

In der Landwirtschaft steht mit Gülle ein ausgezeichnetes Puffermedium zur Verfügung. Bei den geprüften einstufigen Gärverfahren kann durch die gemeinsame Vergärung von Energiegras mit Flüssiggüllen (Gärkanalsystem, Co-Vergärung) bzw. durch deren Zugabe als Benetzungsflüssigkeit (Trockenvergärung) ein stabiler Gärprozess erreicht werden. Die hohe Pufferkapazität der Güllesubstrate ermöglicht Belastungswerte von bis zu 8kg OS/m³d mit Biogasausbeuten zwischen 500 und 600 Litern pro kg zugeführte organische Substanz .

Eine Benetzung (Trockenvergärung im Pfropfstromreaktor) oder eine Aufschlammung mit Wasser (Co-Vergärung) führt nur dann zu einem stabilen Gärprozess, wenn gleichzeitig vergorenes Material rezirkuliert wird. Ohne Rezirkulation (Rückimpfung) tritt eine Versäuerung ein, die letztlich zum Zusammenbruch der Methangärung führt. Diese Fahrweisen sind jedoch bezüglich der Prozess-Stabilität weniger sicher und für die landwirtschaftliche Anwendung nicht empfehlenswert, zumal in der Regel Gülle als Flüssigmedium verwendet werden kann.

- **Verfahrenswahl**

Geht man vom heutigen Stand der Technik aus, so sind die **Trockenvergärung** und die **Co-Vergärung** im Rührkesselreaktor als die zukunftssträchigsten Verfahren einzustufen. In der Praxis hängt die Systemwahl in hohem Masse vom Standort und der Grösse der zu installierenden Biogasanlage ab. Falls sich die gemeinsame Vergärung von Güllesubstraten mit Gras anbietet, kann die Co-Vergärung im Rührkesselfermenter als ein praxistaugliches Verfahren empfohlen werden. An einem Standort, wo keine oder nur geringe Mengen von flüssigen Co-Substraten mitvergoren werden können, wird sich eher die Trockenvergärung als das passende Verfahren erweisen. Der **Gärkanal** ist in Bezug auf die Prozessbiologie als ein sehr betriebssicheres Verfahren zu bezeichnen, für die Gewährleistung eines praxistauglichen Betriebes sind aber noch technische Entwicklungsarbeiten auf Pilotmassstabebene notwendig. Infolge der ungenügenden Hydrolyseleistung beim **Zweistufenprozess** ist die zweistufige Vergärung von Silage nicht zu empfehlen.

- **Co-Vergärung**

Die Co-Vergärung von Heumehl oder fein gehäckselter Silage mit Gülle als Flüssigsubstrat hat sich als ein gut funktionierendes Gärverfahren erwiesen. Durch die hohe Pufferkapazität der Güllesubstrate kann auch bei hohen Belastungen ein stabiler Gärprozess mit Ausbeuten zwischen 500 und 600 Litern pro kg zugeführte organische Substanz garantiert werden (Nettoausbeute der Silage ohne den zusätzlichen Gasertrag der Gülle). Ein grosser Vorteil dieses Verfahrens ist, dass schon Praxiserfahrungen mit einer Vielzahl von Co-Vergärungsanlagen bestehen. Zudem ermöglicht die Co-Vergärung die zusätzliche energetische Nutzung der in der Landwirtschaft anfallenden Gülle, die im Vergleich zu den kommunalen und industriellen Abfällen noch immer das weitaus höchste Energiepotential ausweist.

Aus verfahrenstechnischer Sicht können sich bei der Co-Vergärung Probleme mit der Ausbildung von Schwimmdecken ergeben. Um der Schwimmdeckenbildung entgegenzuwirken, muss der Fermenter mit einem effizienten Rührsystem ausgestattet sein. In der Praxis haben sich für die Co-Vergärung von stark schwimmdeckenbildenden Feststoffen langsam drehende Haspelrührwerke, die in kurzen Intervallen betrieben werden, bewährt. Das Abzugsrohr (bzw. die entsprechende Abzugskomponente) für den Ablauf des vergorenen Materials muss, um der Verstopfungsgefahr vorzubeugen, grösser dimensioniert werden als bei einer reinen Flüssigbiogasanlage. Die Erfahrungen mit den Laborfermentern haben gezeigt, dass die Schwimmdeckenbeherrschung bei Verwendung von gemahlenem Heu weniger Probleme aufgibt als bei der Vergärung von fein gehäckselter Silage. Inwieweit sich diese Beobachtung auf eine Praxisanlage übertragen lässt, ist noch eine offene Frage.

Bei den hohen Belastungen kann nach der Beschickung eine starke Schaumbildung auftreten. Damit ein problemloser Betrieb gewährleistet werden kann, muss der Fermenter entsprechend ausgerüstet bzw. betrieben werden (mechanische Schaumzerstörung, genügend grosser Gasraum, Aufteilung der täglichen Beschickungsmenge in zwei oder mehrere Chargen).

- **Trockenvergärung**

Bei der Trockenvergärung von Extensogras-Silage im Pfropfstromreaktor wurden Gasausbeuten zwischen 550 und 610 Liter Biogas pro kg zugeführte organische Substanz erreicht. Für die Gewährleistung eines stabilen Faulprozesses ist die Zugabe eines puffernden Mediums sowie eine ausreichende Benetzung des Silagematerials erforderlich. Als ideale Puffermedien bieten sich Gülle und Mist an. Als Benetzungsflüssigkeit sollte aufgrund ihrer zusätzlichen Pufferwirkung vorzugsweise Gülle eingesetzt werden. Die Verwendung von Wasser als Benetzungsmedium führte zwar im Labor bei gleichzeitiger Rückführung von vergorenem Material zu einer stabilen Gärung. Diese Betriebsweise ist jedoch für die Praxis nicht zu empfehlen, da die Gefahr der Versäuerung infolge einer ungenügenden Pufferung besteht.

Für den landwirtschaftlichen Einsatz sind die Silagevergärung mit Benetzung und Rezirkulation von Gülle sowie die Co-Vergärung von Silage mit Festmist und Wasser oder Gülle als Benetzungsflüssigkeit als die bevorzugten Verfahren einzustufen. Sie bieten die beste Gewähr für hohe Gasausbeuten und die Beibehaltung eines stabilen Faulprozesses. Ein weiterer Vorteil dieser Verfahren ist, dass auf die Rezirkulation von vergorenem Material verzichtet werden kann.

Um eine hohe Ausbeute in Praxisanlagen zu gewährleisten, muss im Fermenter eine intensive Benetzung des gesamten Fermenterinhaltens garantiert werden. Eine inhomogene Benetzung mit der Ausbildung von trockenen Zonen führt zu einem unvollständigen Abbau mit entsprechenden Ertragseinbussen. Die Benetzung des Frischmaterials kann dabei extern in einem separaten Vorbehälter mit gemeinsamer Beschickung oder intern durch Umpumpen und Besprühen des Fermenterinhaltens mit der Flüssigkeit erfolgen. Für die Praxis wird eine Kombination dieser Benetzungstechniken empfohlen.

- **Handlungsbedarf**

Sowohl bei der Trockenvergärung als auch bei der Co-Vergärung sind noch verfahrens- und arbeitstechnische Fragen offen (Beschickung, Benetzung, Schwimmdeckenzerstörung, Substratvorbehandlung). Zur Abklärung der technischen Machbarkeit der vorgeschlagenen Verfahren und Betriebsweisen sind Versuche im halbertechnischen bzw. technischen Massstab notwendig. Durch den Betrieb der Anacom-Pilotanlage (Trockenvergärung) sowie einer bestehenden Co-Vergärungs-Biogasanlage können die im Labormassstab erarbeiteten Verfahrenslösungen auf ihre Praxistauglichkeit hin überprüft werden.

7. Literatur

- [1] Hersener J.-L. et al: Projekt Energiegras/Feldholz. Schlussbericht. Bundesamt für Energiewirtschaft, Januar 1996, 164 Seiten
- [2] Thomé-Kozmiensky, K., Scherer, P. (Hrsg.): Getrennte Wertstofffassung und Biokompostierung 2. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, Berlin 1992, 535 Seiten
- [3] Membrez, Y.: Systeme modulaire de methanisation en discontinu. Volume 1: Rapport intermediaire. Etude OFEN, Juillet, 1990, 90 pages
- [4] Membrez, Y., Glauser, M., Strehler, C.: Digestion en discontinu d'herbes energetiques. Rapport final (OFEN), Décembre 1996, 15 pages
- [5] Biomasse-Sektion der Dänischen Energiebehörde (Hrsg.): Statusbericht Biogas-Grossanlagen, Oktober 1992, 31 Seiten
- [6] Wong-Chong, G.M.: Dry anaerobic digestion. In: Energy, Agriculture and Waste Management (B.Jewell, ed.). Ann. Arbor Science, pp.361-371, 1975
- [7] Edelmann, W., Engeli, H.: Biogas aus festen Abfällen und Industrieabwässern, Eckdaten für PlanerInnen, Bundesamt für Konjunkturfragen, PACER, ISBN 3-905232-59-6, 1996, 147 Seiten
- [8] Baserga, U., Egger, K., Wellinger, A.: Entwicklung einer Pilotanlage (Anacom) zur Vergärung von Festmist. Bundesamt für Energiewirtschaft, Forschungsprogramm Biomasse, Juli 1994, 42 Seiten
- [9] Baserga, U.: Biogas aus Festmist. Entwicklung einer kontinuierlich betriebenen Biogasanlage zur Vergärung von strohareichem Mist. FAT-Bericht Nr. 451, 1994, 9 Seiten
- [10] Baserga, U., Egger, K.: Entwicklung der Gärkanalpilotanlage zum Vergären von strohhaltigem Mist. Bundesamt für Energiewirtschaft, Forschungsprogramm Biomasse, September 1995, 30 Seiten
- [11] Gosh, S., Klass, D.L.: Two phase anaerobic digestion. Proc. Biochem.,p.15, 1978
- [12] Hofenk, G., Lips, S.,Rijkens, B.A., Voetberg, J.W.: Two-phase digestion of solid organic wastes yielding biogas and compost. IBVL Wageningen, Report 510. 1984, 57 pages
- [13] Wiemer, K., Kern, M. (Hrsg.): Herstellerforum Bioabfall - Verfahren der Kompostierung und anaeroben Abfallbehandlung im Vergleich. M.I.C. Baeza-Verlag, D-Witzenhausen, 1995, 450 Seiten, ISBN 3-928673-14-9

- [14] Edelmann, W. et al.: Vergärung von häuslichen Abfällen und Industrieabwässern. PACER-Dokumentation, (EDMZ-Nr. 724.230d), Bundesamt für Konjunkturfüragen, Bern 1993
- [15] Thomé Kozmiesky, K. (Hrsg): Biogas- Anaerobentechnik in der Abfallwirtschaft. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, Berlin 1989
- [16] Edelmann, W. et al.:Zweistufige Vergärung von festen biogenen Abfallstoffen. Bundesamt für Energiewirtschaft, Forschungsprogramm Biomasse, 1996, 44 Seiten
- [17] Baserga, U. , Neukomm, H.P.: Co-Vergärung von Festmist und verschiedenen landwirtschaftlichen Abfallprodukten in einer Flüssigbiogasanlage. Bundesamt für Energiewirtschaft, P&D Projekt Nr. 12376, Dezember 1996, 14 Seiten
- [18] Baserga U., Wittwer, K. und U.: Co-Vergärung von Hühnermist und festen Abfallstoffen in einer landwirtschaftlichen Biogasanlage. Bundesamt für Energiewirtschaft, P&D-Projekt Nr. (94)001, Dezember 1996, 12 Seiten
- [19] Zauner, E.: Biogasgewinnung aus Pflanzenstoffen. Landbauforschung Völkenrohde, 35. Jahrgang, Heft 2, 1985, Seiten 67-74
- [20] Nordberg, A.: One-and two-phase anaerobic digestion of ley crop silage with and without liquid recirculation. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala genetic Center. Rapport 64 (Dissertation), 1996
- [21] Baserga, U. et al.: Schwimmdeckenbildung in Biogasfermentern. Gas-Wasser-Abwasser, 65. Jahrgang, Nr.2, 1985, Seiten 66-75
- [22] Joss, A.: Zweistufige Vergärung von Silage. Interner Bericht Infoenergie, 1995, 16 Seiten
- [23] Meier, U., Egger, K., Wellinger A.: Vergärung von häuslichen Abfällen. Bundesamt für Energiewirtschaft. Forschungsprogramm Biomasse, Projekt 51 351, Juni 1997