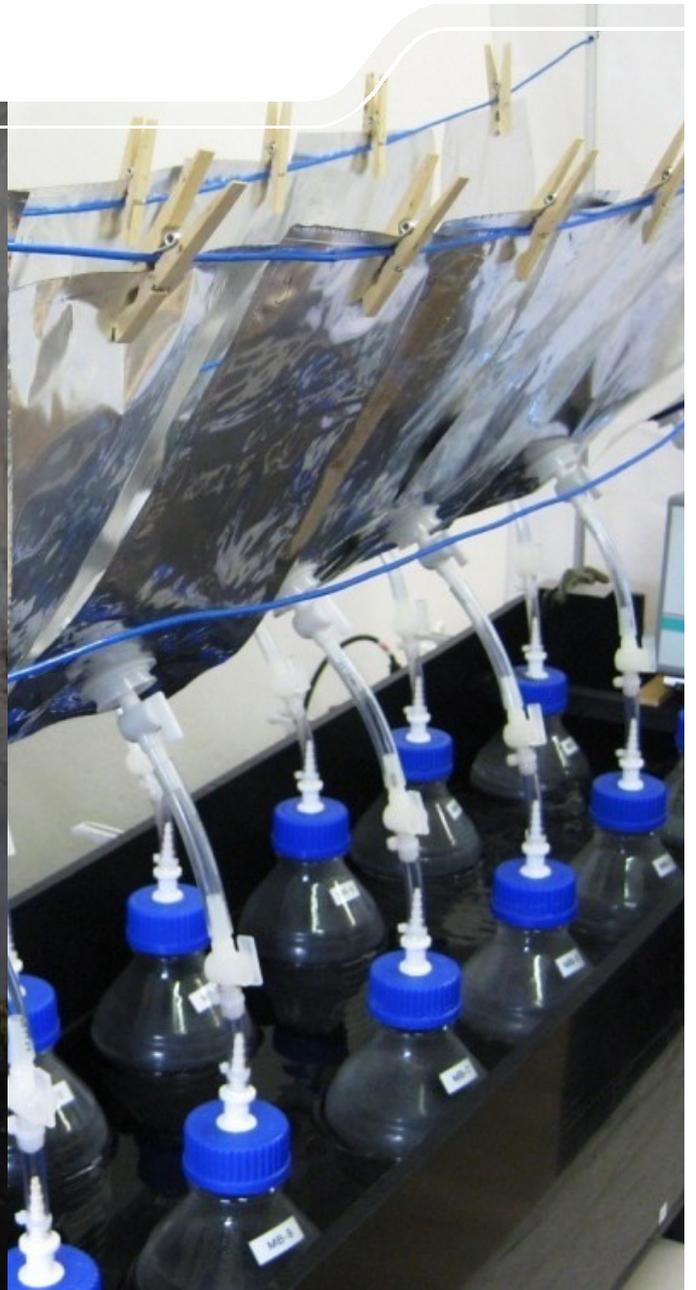


# Effizienzsteigerung in Biogasanlagen

Schriftenreihe, Heft 35/2011



# Effizienzsteigerung (in Biogasanlagen) durch Verbesserung des Substratabbaus

Dr. Claudia Brückner, Thomas Sawatzki

<b>1</b>	<b>Zielstellung des Forschungsprojektes .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Rahmenbedingungen .....</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Generelles Versuchsablaufschaema.....</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Substratauswahl, Probenbereitstellung und Substrataufbereitungsverfahren.....</b>	<b>8</b>
4.1	Substrate .....	8
4.2	Aufbereitungstechnik .....	9
<b>5</b>	<b>Beschreibung der Labor- und Versuchstechnik .....</b>	<b>9</b>
5.1	Batch-Fermenter .....	9
5.2	Kontinuierlich betriebener Laborfermenter.....	12
5.3	Mess- und Steuerungstechnik.....	14
5.3.1	Gasvolumenmessgerät Milligascounter und Bemerkungen zur Belastbarkeit der Gasvolumenmesswerte .....	14
5.3.2	Mehrkanal-Gasanalysator (Methan, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S).....	16
5.3.3	Temperaturregelung .....	18
5.3.4	pH-Messung.....	18
5.3.5	Rühreinrichtung.....	18
5.3.6	Trockensubstanzgehalt/organischer Trockensubstanzgehalt .....	18
5.3.7	FOS/TAC .....	18
<b>6</b>	<b>Berechnungsgrundlage für die Auswertung der Gärversuche.....</b>	<b>19</b>
<b>7</b>	<b>Genereller Versuchsablauf .....</b>	<b>20</b>
7.1	Durchführung der Batch-Gärversuche .....	20
7.2	Prozessüberwachung bei den Batch-Gärversuchen .....	21
7.3	Durchführung der kontinuierlichen Gärversuche.....	22
7.4	Prozessüberwachung bei den kontinuierlichen Gärversuchen .....	22
<b>8</b>	<b>Praxisversuche und Ergebnisse.....</b>	<b>23</b>
8.1	Versuchsumfang .....	23
8.1.1	Kontinuierliche Versuche .....	23
8.1.2	Batchversuche .....	24
8.2	Beschreibung der Animpfsubstrate .....	24
8.2.1	Faulschlamm.....	24
8.2.2	Rindergülle.....	25
8.2.3	Biogassgülle aus dem Nachgärbehälter (Rindergülle + Mais) .....	25
8.3	Eingesetzte Substrate .....	27
8.3.1	Kontinuierliche Versuche (Probenmenge ca. 3 kg).....	27
8.3.2	Batchversuche (Probenmenge < 1 kg).....	28
8.4	Ausgewählte Verfahren der Substrataufbereitung und Ergebnisse .....	28
8.4.1	Mechanische Aufbereitung während der Ernte .....	28
8.4.2	Mechanische Substrataufbereitung in einer separaten Stufe vor der Dosierung in die Biogasanlage .....	32
8.4.2.1	Hammermühle: Maissilage und Rindermist .....	32
8.4.2.2	Querstromzersetzer: Grassilage und Grünroggensilage.....	35
<b>9</b>	<b>Modellkalkulation.....</b>	<b>38</b>
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen .....</b>	<b>42</b>
10.1	Zusammenfassung .....	42
10.2	Schlussfolgerungen .....	42
10.3	Handlungsempfehlungen .....	43
<b>11</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>43</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Generelles Versuchsablaufschema /1/ .....	8	
Abbildung 2: Schematischer Aufbau der Batch-Vergärungsanlage .....	9	
Abbildung 3: Batch-Vergärungsanlage .....	10	
Abbildung 4: 1-Liter-Batch-Fermenter mit Gasbeutel.....	11	
Abbildung 5: Gasbeutelklappe offen	Abbildung 6: Gasbeutelklappe geschlossen.....	11
Abbildung 7: Gasvolumenmessung mit Kippzähler (Auspressen der Biogasauffangbeutel mittels Gasbeutelklappe).....	12	
Abbildung 8: Schematischer Aufbau des kontinuierlich betriebenen Laborfermenters .....	13	
Abbildung 9: Kontinuierlich betriebener 30-Liter-Laborfermenter.....	13	
Abbildung 10: Mehrere kontinuierlich betriebene 30-Liter-Laborfermenter .....	14	
Abbildung 11: Milligascounter – Ablauf des Messvorganges /1/ .....	15	
Abbildung 12: Mehrkanal-Gasanalysator .....	17	
Abbildung 13: Labormesstechnik .....	19	
Abbildung 14: Häcksler .....	29	
Abbildung 15: Häckslervorsatz .....	29	
Abbildung 16: Hybridsorte Sudangras/Sorghumhirse vor und nach der Zerkleinerung mit Häcksler .....	30	
Abbildung 17 + 18: Hammermühle und Arbeitsraum .....	33	
Abbildung 19: Rindermist vor und nach Zerkleinerung mit Hammermühle .....	33	
Abbildung 20: Maissilage vor und nach Zerkleinerung mit Hammermühle .....	33	
Abbildungen 21 + 22: Querstromzerspaner und Kettenschlagwerk .....	36	
Abbildung 23: Grassilage vor und nach Zerkleinerung mit Querstromzerspaner (0 sec Zerkleinerungszeit).....	37	
Abbildung 24: Grünroggensilage vor und nach Zerkleinerung mit Querstromzerspaner (3 sec Zerkleinerungszeit) .....	37	

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Sensoren des Mehrkanal-Gasanalyzers .....	17
Tabelle 2: Versuchsablauf der durchgeführten kontinuierlichen Versuche .....	23
Tabelle 3: Substratübersicht für die kontinuierlichen Versuche .....	27
Tabelle 4: Versuchsablauf mit verschiedenen Substraten im Batchversuch.....	28
Tabelle 5: Häcksellänge und Dieserverbrauch.....	32
Tabelle 6: Technische und verfahrenstechnische Annahmen.....	39
Tabelle 7: Charakteristik der Substrate.....	39
Tabelle 8: Annahmen für die Investition und Kostenpositionen .....	40
Tabelle 9: Wirtschaftlichkeit der Substrataufbereitung .....	41

## Abkürzungsverzeichnis

Akh	Arbeitskraftstunde
BfUL	Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft
BHKW	Blockheizkraftwerk
CCM	Corn-Cob-Mix (Mais-Spindel-Gemisch)
CH <sub>4</sub>	Methan
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
FM	Frischmasse
FNR	Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V.
FOS	flüchtige organische Säuren
GPS	Ganzpflanzensilage
H <sub>2</sub> S	Schwefelwasserstoff
Kosubstrate	organische Stoffe, die neben Gülle oder Mist in die Biogasanlage eingebracht werden
K	Kelvin (Einheit Temperaturdifferenz)
mA	Milliampere
mbar	Millibar
min	Minute
ml/h	Milliliter pro Stunde
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe
NfE	Stickstoff freie Extraktstoffe
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NH <sub>4</sub>	Ammonium
oTS	organische Trockensubstanz
pH	pondus Hydrogenii (Maß für die Reaktion in saurer oder alkalischer Lösung)
ppm	parts per million
RA	Rohasche
RF	Rohfaser
RP	Rohprotein
TAC	total alkalische Carbonate ( Carbonatpuffer)
TS	Trockensubstanz
VDI	Verein deutscher Ingenieure
U/min	Umdrehungen pro Minute

# 1 Zielstellung des Forschungsprojektes

Der ökonomische Erfolg von Biogasanlagen hängt im Wesentlichen vom Methanertrag des eingesetzten Inputmaterials ab. Die Substrate belegen einen Anteil von bis zu 50 Prozent gemessen an den Gesamtkosten der Biogaserzeugung. Aus diesem Grund ist es erforderlich, aus den für die Biogaserzeugung relevanten Einsatzstoffen den maximal möglichen Methanertrag zu gewinnen.

Aus Laboruntersuchungen ist bekannt, dass der gezielte Substrataufschluss (Desintegration) zur Erhöhung des Methanertrages und somit zur Effizienzsteigerung beitragen kann.

Insbesondere bei stark ligninhaltigen Substraten ist die Desintegration Voraussetzung für einen störungsfreien Anlagenbetrieb (u. a. Verbesserung des Mischverhaltens und Vermeidung von Schwimmschichten).

Vor diesem Hintergrund ergaben sich für das aktuelle Forschungsvorhaben die nachfolgend aufgeführten Ziele:

- Untersuchung der Gaserträge und deren Verlauf im Labormaßstab in Abhängigkeit von ausgewählten Desintegrationsverfahren aus der landwirtschaftlichen Praxis
- ökonomische Betrachtung der Desintegration mittels Modellkalkulation
- Ableitung von Handlungsempfehlungen

## 2 Rahmenbedingungen

Das Forschungsvorhaben baute auf dem Projekt „Aufarbeitung landwirtschaftlicher Biomasse für den Vergärungsprozess“ 2006-07/2008 auf /1/. In diesem ersten Projekt wurden die Laborfermenter (1 l und 30 l) mit der dazugehörigen Messtechnik (Volumenstrom, CO<sub>2</sub>, Methan- und H<sub>2</sub>S, pH, Trockensubstanz) beschafft.

Es wurden Gas- und Methanerträge von unzerkleinerten und aufbereiteten traditionellen Einsatzstoffen wie Maissilage, Grassilage (Klee- und Luzernesilage), Futterreste, Gerste und Weizen sowie darüber hinaus Moorgras aus der Presseler Heide bei unterschiedlichen Raumbelastungen ermittelt. Als Zerkleinerungsaggregate dienten ein Extruder, ein Häcksler und ein Multischroter (Getreide) unter Praxisbedingungen.

Das aktuelle Forschungsvorhaben (Laufzeit von 03/2009 bis 02/2011) wurde als Anschlussprojekt konzipiert, um die Ergebnisse zum Substrataufschluss unter Praxisbedingungen weiter zu untersetzen und in Richtung Alternativkulturen voranzutreiben.

Die vorhandene Labor- und Versuchstechnik wurde weiterhin eingesetzt, teilweise erneuert und durch Messtechnik erweitert. Die Auswertungsprogramme wurden im Wesentlichen weiter genutzt. Die Erläuterungen dazu wurden aus /1/ übernommen.

Für die Versuche standen 14 diskontinuierlich betriebene 1-Liter-Batch-Fermenter und drei kontinuierlich betriebene 30-Liter-Fermenter zur Verfügung.

Ein durch Standortwechsel bedingter zeitintensiver Wiederaufbau der Versuchsanlage, prozessbiologische Schwierigkeiten bei der erneuten Inbetriebnahme des Labors sowie eine Reihe nicht geplanter technischer Störungen und damit verbundene Reparaturen führten zu einem deutlich späteren Beginn der eigentlichen Tests. Im verbleibenden Zeitfenster wurden stichprobenartig Orientierungsversuche zu ausgewählten Desintegrationsverfahren (Häcksler, Hammermühle, Querstromzersetzer) in Landwirtschaftsbetrieben mit Biogasanlage durchgeführt. Proben einer Erntesaison standen dazu zur Verfügung.

# 3 Generelles Versuchsablaufschema

In Abbildung 1 sind der schematische Aufbau des Versuchsablaufes und die verwendeten Geräte dargestellt.

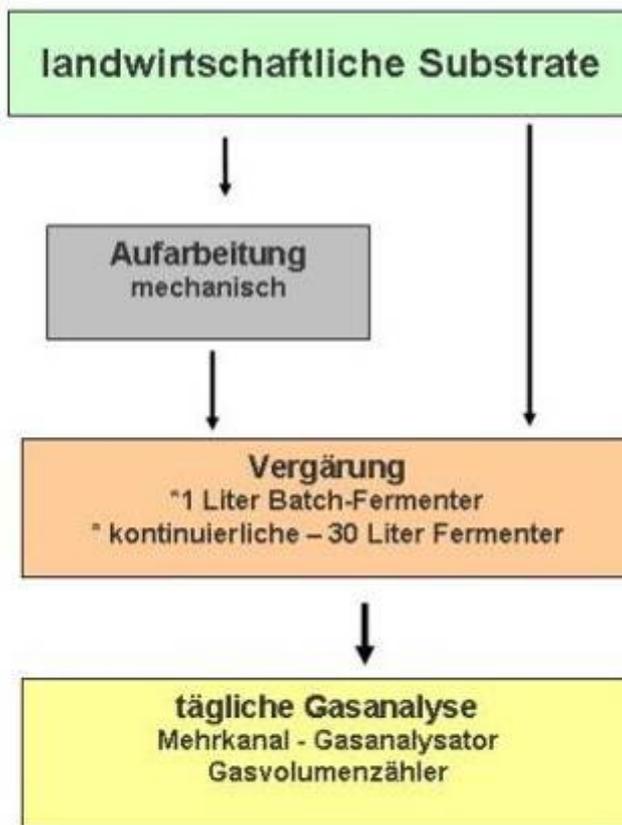


Abbildung 1: Generelles Versuchsablaufschema /1/

# 4 Substratauswahl, Probenbereitstellung und Substrataufbereitungsverfahren

## 4.1 Substrate

Substratauswahl und Probenbereitstellung erfolgten gezielt in Praxisanlagen (Landwirtschaftsbetrieben), die über eine Biogasanlage mit spezieller Aufbereitungstechnik verfügen. Im Ergebnis standen Proben zahlreicher **Substrate** frisch oder als Konservat für die Untersuchungen zur Verfügung, von denen nur die mit ausreichend Probenmaterial in unterschiedlichen Aufbereitungsstufen getestet wurden.

- Rindermist (inhomogen, mit hohem Strohanteil)
- Maissilage (frisch)
- Grassilage
- Grünroggensilage (GPS)
- Hybrid Sudangras/Sorghumhirse (Sorte Lussi) als Konservat

Die Substrate standen in größerer Menge und in zwei Aufbereitungsstufen als Kofermente sowohl für kontinuierliche als auch für Batch-Versuche zur Verfügung.

## 4.2 Aufbereitungstechnik

Die Aufbereitung dient der optimalen Ausnutzung der in den Substraten enthaltenen Energie. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden nachfolgend einige Desintegrationsverfahren genannt:

- Futtererntetechnik (verschiedene Häcksler)
- Hammermühle
- Querstromzerspaner Uni Cut QZ
- Bioextrusion
- Gorator
- Rotacut
- Desintegration (Ultraschall bzw. elektrokinetisch)
- Steam-Explosions-Prozess

Zum praktischen Einsatz kommen überwiegend Hammermühlen oder Extruder. Durch diese Aufschlussverfahren kann eine Oberflächenvergrößerung erreicht werden, die die Nährstoffverfügbarkeit für die Bakterien verbessert. Die Folgen sind u. a. der bessere biologische Aufschluss, höhere spezifische Biogaserträge, kürzere hydraulische Verweilzeiten und eine bessere Pumpfähigkeit. Auf Anfrage können die Firmen vom Autor benannt werden.

# 5 Beschreibung der Labor- und Versuchstechnik

## 5.1 Batch-Fermenter

Für die Batch-Gärversuche standen 14 Batch-Fermenter aus Glas mit einem maximalen Nutzvolumen von 1 Liter zur Verfügung. In Abbildung 2 /1/ ist ein vereinfachter Versuchsaufbau mit bereits integriertem Gaszähler dargestellt.

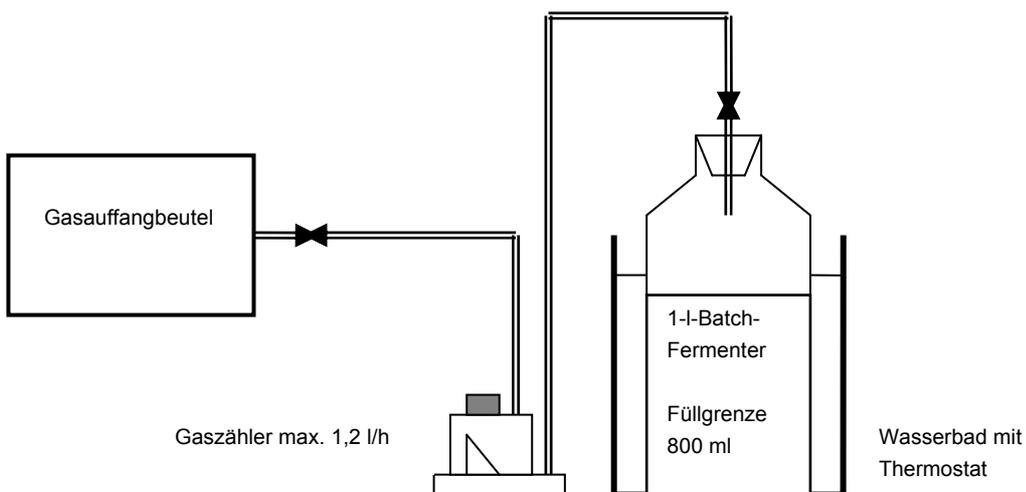


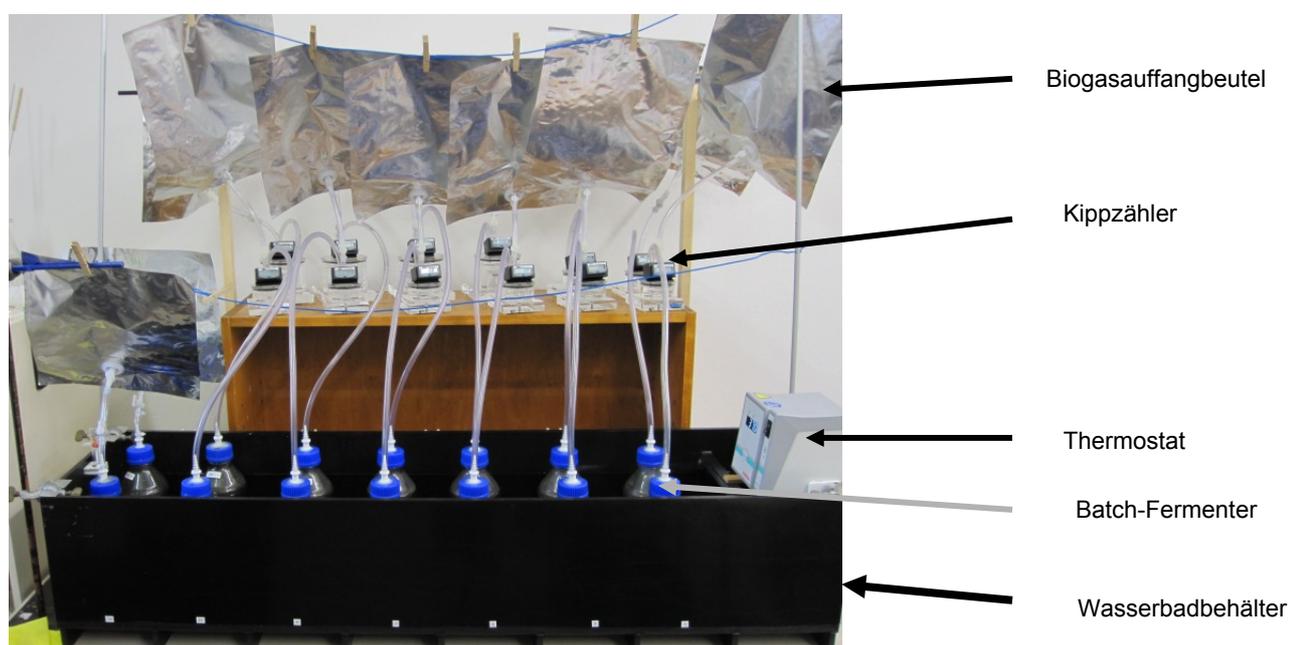
Abbildung 2: Schematischer Aufbau der Batch-Vergärungsanlage

Die Batch-Fermenter bestanden aus Laborglas. Dadurch konnten spezifische Vorgänge wie Schwimmschichten, Schaumbildung und Blasenwanderung beobachtet werden.

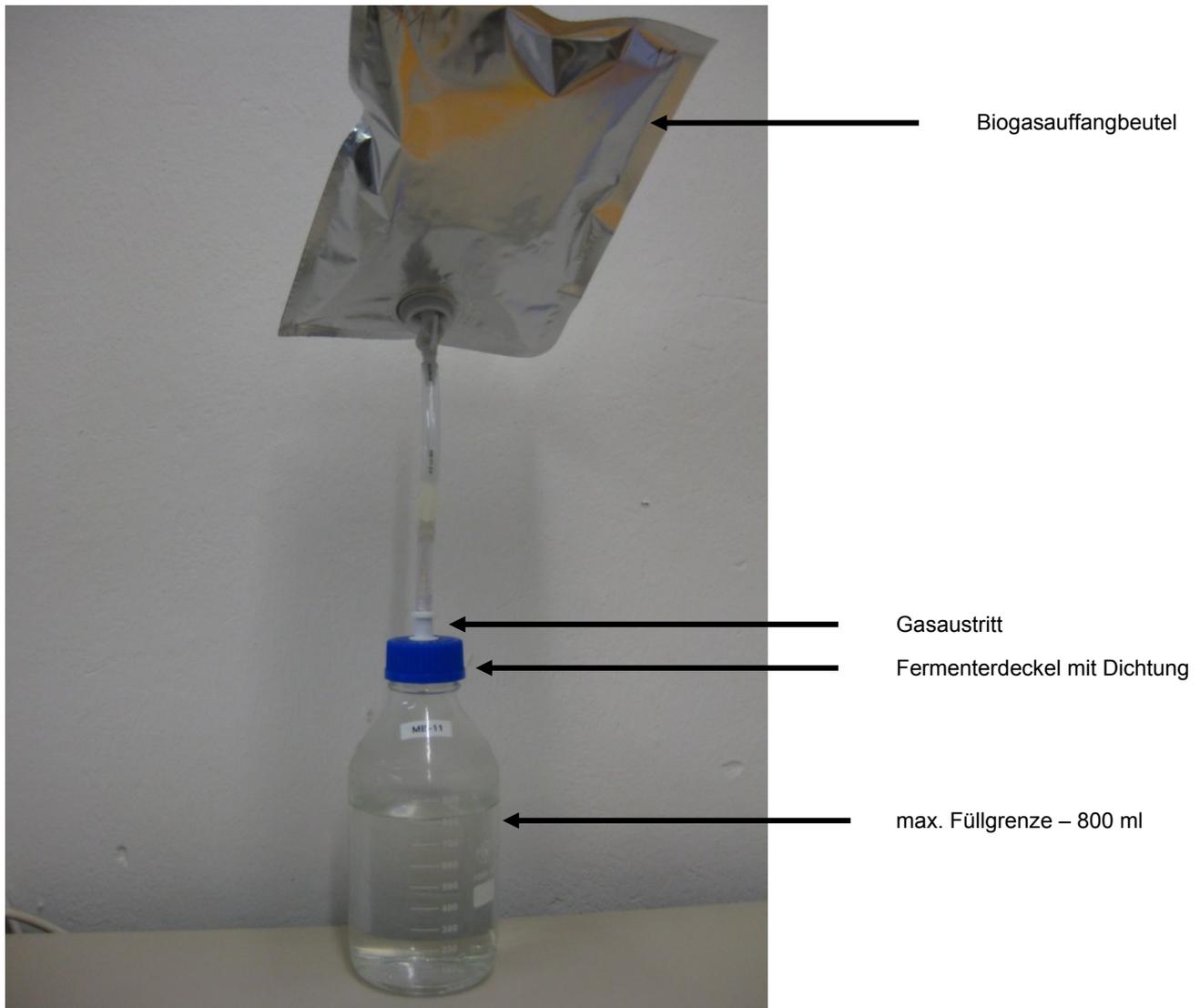
Die Fermenter wurden nach entsprechender Substratbefüllung mit einem Plastikdeckel und dazugehörigem Dichtungsring gasdicht verschraubt. Das entstehende Biogas wurde durch einen Gasauslass am Schraubdeckel über eine Schlauchverbindung aus dem Reaktor geführt und in einem Gasbeutel gesammelt (Abb. 4). Mit dem Ziel einen zeitlich charakteristischen Verlauf der Biogasbildung eines Substrates aufzeichnen zu können, wurden die "Tecobag"-Gasauffangsysteme in bestimmten Zeitabständen gewechselt und ausgewertet. Die Bestimmung der gebildeten Biogasmenge erfolgte beim Auspressen in der Gasbeutelklappe (Abb. 5-7) mittels Gasvolumenmessgerät „Kippzähler Fa. Ritter“. Die Zusammensetzung des aufgefangenen Biogases wurde mittels Mehrkanal-Gasanalysator (Abb.12) ausgewertet.

Ein gemeinsames Wasserbad diente der einheitlichen Temperierung der 14 Fermenter. Durch einen Thermostat mit Rührer wurde die Temperatur auf 37 °C konstant gehalten (Abb.3).

Das Wasserbad wurde mit weichem Leitungswasser gefüllt. Die Verdunstungsverluste (pro Tag trotz Abdeckung mindestens 3 Liter) wurden durch destilliertes Wasser ersetzt.



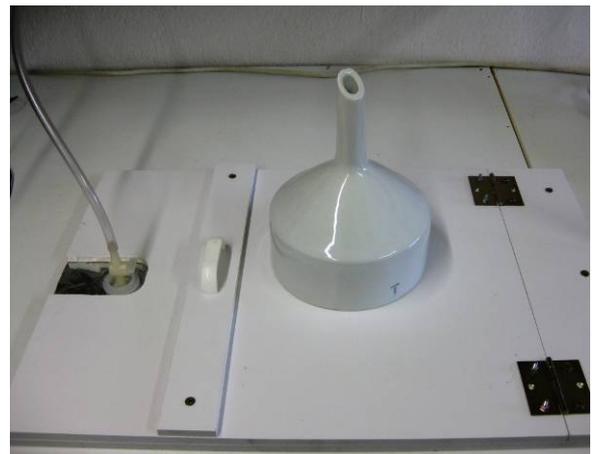
**Abbildung 3: Batch-Vergärungsanlage**



**Abbildung 4: 1-Liter-Batch-Fermenter mit Gasbeutel**



**Abbildung 5: Gasbeutelklappe offen**



**Abbildung 6: Gasbeutelklappe geschlossen**



**Abbildung 7: Gasvolumenmessung mit Kippzähler (Auspressen der Biogasauffangbeutel mittels Gasbeutelklappe)**

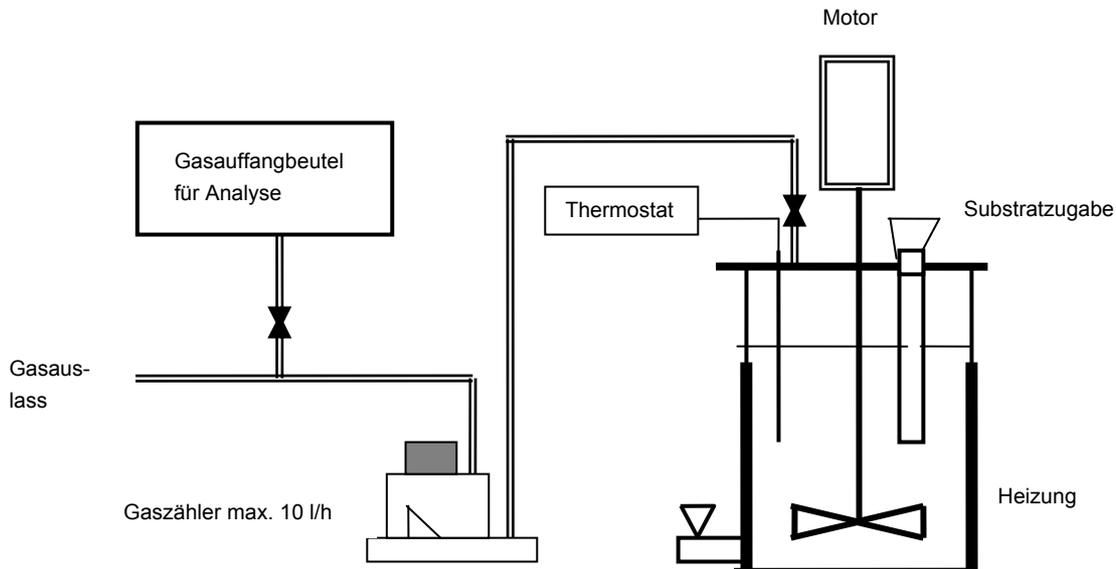
Die Gasvolumenbestimmung für die Batch-Fermenter war sehr zeitaufwändig. In den Gasbeuteln musste mindestens 1 l Gas gesammelt werden, um danach die Gaszusammensetzung messen zu können. (Das verlangte der Mehrkanal-Gasanalysator, weil die Sensoren für Methan, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>S eine bestimmte Reaktionszeit benötigten.) Weil die Gasvolumenmessgeräte (Kippzähler) bei 0,6 bzw. 1 l/h Volumenstrom geeicht sind, hätte die Messung eines Gasbeutels mit 1 l Gasinhalt im Idealfall eine Stunde in Anspruch nehmen müssen (bei 14 Fermentern 14 Stunden) oder es mussten Messfehler in Kauf genommen werden. Das Auspressen der Beutel mit höherem Druck zur Beschleunigung des Messvorganges war jedoch begrenzt, weil ab einem bestimmten Punkt Gas an der Kippzelle vorbeiströmt, nicht erfasst wird und sich der Messfehler weiter vergrößert.

Das Auffangen des Gases je Fermenter im „Tecobag“-Gasbeutel und die Gasvolumenbestimmung durch manuelles Auspressen dieser Beutel wurde in den ersten drei Versuchsserien beibehalten. Für die 4. Serie wurden Kippzähler vom Labor des Fraunhofer IKTS Dresden geliehen. Damit waren eine tägliche Gasvolumenmessung mit dem Ergebnis genauerer Verlaufskurven und eine erhebliche Zeiteinsparung möglich (s. Abb. 3).

## 5.2 Kontinuierlich betriebener Laborfermenter

Für die kontinuierlichen Gärversuche standen drei Fermenter aus schwarzem PE-Kunststoff mit einem maximalen Fassungsvermögen von 30 Liter zur Verfügung. Die wesentlichen Komponenten sind in Abbildung 8 vereinfacht dargestellt.

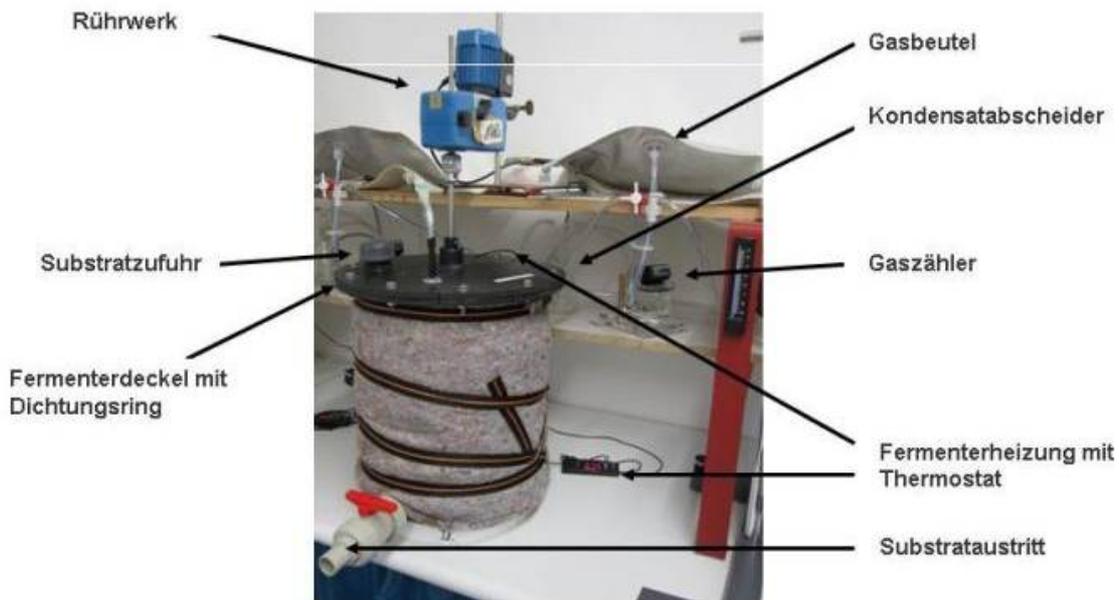
Das effektiv nutzbare Volumen der Behälter betrug 20 Liter. Die Fermenter bestanden aus jeweils einem zylindrischen Behälter, der nach entsprechender Substratbefüllung mit einer Deckelplatte und dazugehörigem Dichtungsring gasdicht verschraubt werden konnte. Die Fermenter waren mit einem Rührwerk ausgestattet, das sich nach festgelegter Zeit automatisch zu- bzw. abschaltete (Zeitschaltuhr). Eines der Rührwerke war mit einer Drehmomentmessung versehen.



**Abbildung 8: Schematischer Aufbau des kontinuierlich betriebenen Laborfermenters**

Das entstehende Biogas wurde durch einen Gasauslass am Deckel über eine Schlauchverbindung mit Kondensatabscheider aus dem Reaktor herausgeführt, ausgewertet und über einen Schlauch aus dem Raum geleitet. Das Gasvolumen wurde dabei kontinuierlich mit Gaszählern (Milligascounter) gemessen. Die Messung der Gaszusammensetzung erfolgte mit dem Mehrkanal-Gasanalysator. Dafür wurde täglich ein Teil des Gases mit Gasbeuteln aufgefangen.

Zwischen der äußeren Fermenterwand und der Isolierung befand sich eine Heizung. Sie war mit einem Thermostat gekoppelt, mit dessen Hilfe die gewünschte Reaktortemperatur von 37 °C gehalten wurde. Der pH-Wert des Fermenterinhalt wurde manuell mit einem pH-Meter gemessen. Die tägliche Substratzufuhr und Entnahme der gleichen Menge erfolgte manuell. Eine Dosierung am Wochenende war personell nicht möglich. Diese Tage wurden aus der Versuchszeit herausgerechnet. Ein Abschätzen des Fehlers durch dieses Aussetzen der Fütterung war auf Grund fehlender Vergleichswerte nicht möglich.



**Abbildung 9: Kontinuierlich betriebener 30-Liter-Laborfermenter**

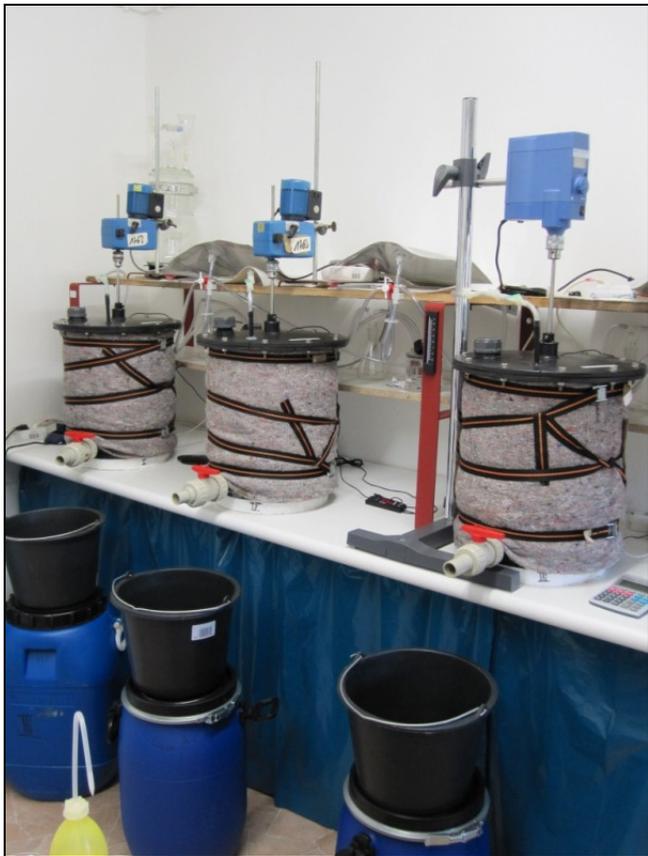


Abbildung 10: Mehrere kontinuierlich betriebene 30-Liter-Laborfermenter

## 5.3 Mess- und Steuerungstechnik

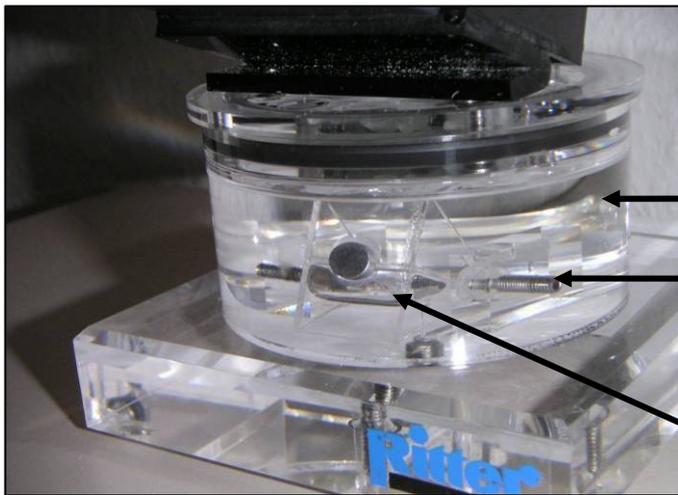
### 5.3.1 Gasvolumenmessgerät Milligascounter und Bemerkungen zur Belastbarkeit der Gasvolumenmesswerte

Der verwendete Milligascounter war ein Kippzähler. Mit diesem Messprinzip war es möglich, sehr kleine Volumenströme zu messen und trotzdem einen vergleichsweise großen Messbereich abzudecken.

Die Messkammer, in der sich der kippbare Gas auffangbehälter mit zwei getrennten, geeichten Gaskammern befand, war mit einer Sperrflüssigkeit (spezielles Silikonöl) gefüllt. Das zu messende Biogas strömte solange über einen Einlassstutzen in die erste Kammer des Gas auffangbehälters, bis der Auftrieb des Gases so hoch war, dass der Kippvorgang ausgelöst wurde und es zum Umklappen des Gas auffangbehälters kam. Die Kammer entleerte sich und das Gas entwich über einen Gasauslass. Sofort begann die Befüllung der zweiten Kammer des Gas auffangbehälters, bis auch diese Kammer gefüllt war und der Gas auffangbehälter zurückkippte. Der Vorgang begann erneut. Die Kippvorgänge wurden gezählt.

Es kamen Milligascounter mit zwei unterschiedlichen Messbereichen zum Einsatz. Untere Messbereichsgrenze war jeweils das Volumen einer Kammer des Gas auffangbehälters. Durch Kombination beider Messgeräte war es theoretisch möglich, Volumenströme von 1 ml/h bis 6 l/h zu messen.

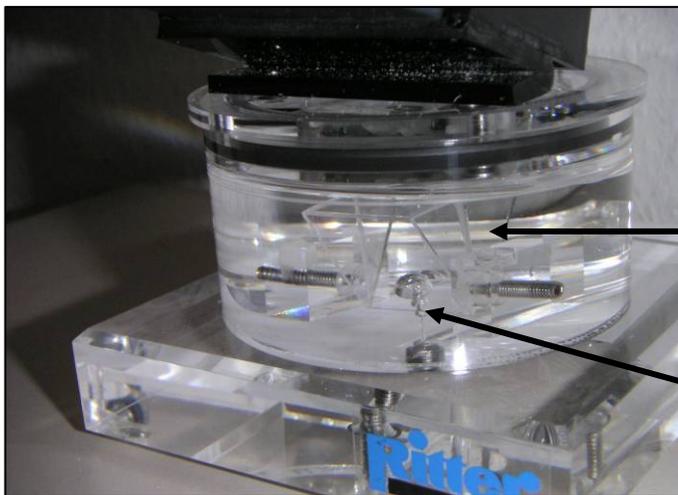
Der Kipp-Messvorgang ist in Abbildung 11 dargestellt.



Sperrflüssigkeit

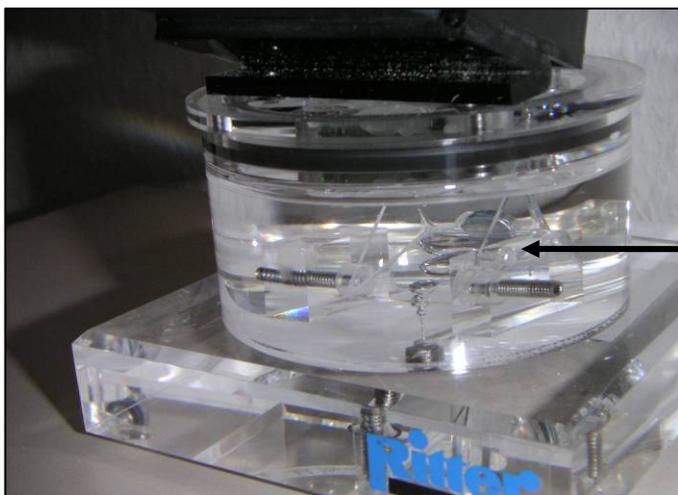
Kipplager

Biogas in der  
Auffangkammer



aufrecht stehende  
Auffangkammer,  
Entweichen des  
Biogases

aufsteigendes  
Biogas



Beendigung des  
Kippvorganges,  
erneutes Befüllen

Abbildung 11: Milligascounter – Ablauf des Messvorganges /1/

Der im Biogas enthaltene **Wasserdampf** darf nicht im Gaszähler kondensieren. Deshalb ist bei den kontinuierlichen Fermentern zusätzlich zu den Gasschläuchen von ca. 1 m ein Kondensatabscheider dem Milligascounter vorgeschaltet. Bei den Batch-Fermentern übernehmen die Schläuche allein die Funktion des Gaskühlers. Eine Messung der Restfeuchte des erzeugten Biogases und ggf. die Korrektur der Versuchswerte war nicht möglich.

Die **Gasmengenmessung** mittels Gasbeutel und mittels Kippzähler war nur bedingt vergleichbar. Nach eigenen Beobachtungen bei den Batchversuchen ergaben die Messungen mit Gasbeutel (und nachträglichem Auspressen und Bestimmen des Volumens mit Kippzähler) tendenziell niedrigere Werte als die sofortige Volumenmessung mittels Kippzähler, wenn diese direkt an die Fermenter angeschlossen werden. Die Abweichungen der eingesetzten Kippzähler von den realen Werten können bei einzelnen Geräten bis zu 21 % betragen, wobei diese bei den vorliegenden Volumenströmen erfahrungsgemäß systematisch zu hoch im Vergleich zu den realen Werten lagen /5/.

Eine wesentliche Ursache für die systematischen Abweichungen ist die Tatsache, dass die Kippzähler (Baureihe 1 ml) bei einem Gasvolumenstrom von 1.000 ml/h bzw. 600 ml/h geeicht werden. Die realen Gasvolumenströme bei den vorliegenden Batch-Fermentern von 1 l Inhalt lagen jedoch maximal bei 1.000 ml pro Tag und das auch nur an den ersten Versuchstagen. D. h., die Gasmessungen erfolgten bei 5 % des Messbereichs und darunter.

Zu den Kippzählern Baureihe 10 ml (für die kontinuierlichen Versuche) gibt es keine Erkenntnisse.

Allgemein war zu beobachten, dass beide Baureihen gegen Überdruck sehr empfindlich sind, z. B. beim Ausdrücken der Gasbeutel. Bei Baureihe 1 ml wird der Eichvolumenstrom mit 600 bzw. 1.000 ml/h angegeben. Der max. Durchfluss wird mit 1.200 ml/h beziffert, also zumindest bei den 1.000 ml-Geräten nur knapp über dem Eichvolumenstrom. Das bedeutete viel Sorgfalt beim Auspressen der Gasbeutel per Hand – und unter Zeitdruck. Die Gefahr, dass das Gas unbeabsichtigt am Kippelement vorbeiströmt, war groß und damit in diesem Fall, dass die gemessene Biogasmenge niedriger war als die wirklich produzierte.

Der Einfluss des **Luftdrucks** der Umgebung auf das System ist vernachlässigt worden. Es wurde bei der Auswertung mit Normdruck = 1.013 mbar gerechnet. Eine Luftdruckmessung und eine laufende Anpassung an die Messwerte waren nicht möglich.

Der Einfluss der **Gastemperatur** (nach der Kühlstrecke in erster Näherung die Raumtemperatur) auf die ermittelte Gasmenge ist ebenfalls von Bedeutung: Gemessen wurde die Biogasmenge bei Raumtemperatur, z. B. bei 20 °C (25 °C ist für Laborräume etwas hoch). Die Auswertung rechnete wegen der Vergleichbarkeit alles auf Normtemperatur 273,15 °K (=0 °C) um. Würde man auf die Umrechnung verzichten, ergäbe sich allein durch den Temperatureinfluss und damit durch die Gasausdehnung ein Fehler von etwa 7 %.

Das Erwähnen dieser Einflussfaktoren auf die Gasmessung erscheint an dieser Stelle besonders wichtig, weil die gemessene Gasmenge neben dem Wert für die organische Trockensubstanz (oTS) des beim Versuch jeweils eingesetzten Substrates einer der Hauptparameter für die Versuchsergebnisse war.

Die Milligascounter sind eingeführte und bewährte Messgeräte, die ständig weiterentwickelt werden. Es ist wichtig, dass deren jeweilige Randbedingungen bekannt sind und bei der Interpretation der Messwerte berücksichtigt werden.

### 5.3.2 Mehrkanal-Gasanalysator (Methan, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S)

Die Gaszusammensetzung des entstehenden Biogases wurde mittels Biogasanalysator SR2-DO gemessen (Abb. 12).



**Abbildung 12: Mehrkanal-Gasanalysator**

Dieses Messgerät enthält einzelne Kanalkarten, an denen jeweils ein Sensor angeschlossen ist. In dem verwendeten Analysator sind drei Sensoren für folgende Gase im angeführten Messbereich installiert (Tabelle 1):

**Tabelle 1: Sensoren des Mehrkanal-Gasanalysators**

Messgas	Messbereich	Sensor
Methan	0 – 100 Vol. %	Infrarot
Kohlendioxid	0 – 100 Vol. %	Infrarot
Schwefelwasserstoff	0 – 2.000 ppm	elektrochemische Messzelle

Das zu analysierende Messgas wurde durch eine Pumpe im Messgerät aus dem angeschlossenen Gasbeutel gesaugt und an den Sensoren vorbeigeführt. Die Kanalkarte nahm den vom jeweiligen Sensor gemessenen Wert als Sensorstrom über eine 4-20 mA Schnittstelle auf und rechnete diesen in einen Konzentrationswert um.

Weil sich zu Beginn der Messung noch eine geringe Menge an Fremdgas in den Verbindungsschläuchen befand, sind repräsentative Werte über die Zusammensetzung des Biogases erst nach einer Wartezeit messbar beziehungsweise nach Spülung mit Frischluft vor erneutem Gebrauch. Zur Messung wird mindestens eine Gasmenge von 1 l benötigt. Deshalb waren bei den Batchversuchen Messungen der Gaszusammensetzung nur in größeren Zeitabständen innerhalb des Versuchszeitraumes möglich.

Das zur Gasanalyse verwendete Gerät besitzt gemäß Herstellerangaben einen Messfehler < 3 % bezogen auf den Messbereichsendwert. Das bedeutet jedoch, dass bei einem Methangehalt von 55 % in der Messgeräteanzeige der wahre Methangehalt auch etwas über 52 % oder knapp 58 % sein könnte. Das ist für die vorliegenden Untersuchungen schon etwas problematisch, weil sich bei landwirtschaftlichen Substraten die Methangehalte gerade in diesem Bereich bewegen. Aus diesen Gründen und wegen der geringen Anzahl von Werten bei den Batchversuchen wurde auf eine ausführliche Auswertung der Methangehalte der jeweiligen Substrate verzichtet.

### 5.3.3 Temperaturregelung

Die Batch-Fermenter standen in einem gemeinsamen Wasserbad, dessen Temperatur mittels Thermostat auf annähernd 37 °C konstant gehalten wurde. Eine Umwälzpumpe sorgte für eine annähernd gleichmäßige Temperaturverteilung im Wasserbad.

Die kontinuierlich betriebenen Fermenter wurden durch eine Außenwandheizung elektrisch beheizt. Ein Temperaturfühler maß die Temperatur des Fermenterinhalt. Mittels Thermostat wurde die Temperatur auf 37 °C gehalten.

### 5.3.4 pH-Messung

Der pH-Wert des Fermenterinhalt der kontinuierlich betriebenen Fermenter wurde manuell mittels pH-Meter in der täglich entnommenen Menge bestimmt. Bei den Batchversuchen wurde der pH-Wert zu Beginn und bei Versuchsabbruch manuell mittels pH-Meter gemessen. (s. Abb.13)

### 5.3.5 Rühreinrichtung

Für die drei kontinuierlich betriebenen Fermenter kamen Rührgeräte der IKA-Werke GmbH zum Einsatz. Das Rührgerät schaltete sich automatisch über eine Zeitschaltuhr nach vorher festgelegten Intervallen zu bzw. ab. Bewährt hatte sich eine Rührzeit von 15 min, gefolgt von 45 min Pause. Die Rührerdrehzahl wurde voreingestellt und lag bei ca. 80 U/min.

Bei den Batchversuchen erfolgte die tägliche Durchmischung des Fermenterinhalt durch mehrmaliges Schütteln per Hand.

### 5.3.6 Trockensubstanzgehalt/organischer Trockensubstanzgehalt

Zur Bestimmung des Trockensubstanzgehalt (TS) der Substrate standen Laborwaage, Trockenschrank und ein Feuchtebestimmer der Fa. Sartorius zur Verfügung (s. Abb. 13).

Der Parameter organischer Trockensubstanzgehalt (oTS) ist ein Schlüsselparameter als Bezugsgröße für den Gärerfolg. Außerdem ist er notwendig für den Start der Gärversuche, um das Mengenverhältnis von Substrat und Impfschlamm festzulegen (gemäß VDI-Richtlinie Nr. 4630).

Der oTS-Gehalt konnte nicht im Labor Dresden-Pillnitz bestimmt werden, weil kein Muffelofen vorhanden war. Eine Kooperation mit einem benachbarten Labor bzw. die Vergabe der Bestimmung an ein im Ort ansässiges Labor waren nicht möglich. Die Analyse erfolgte sehr zuverlässig im Labor der BfUL in Leipzig. Sehr nachteilig war jedoch, dass die Messwerte erst zwei bis drei Wochen später zur Verfügung standen, sodass zu Beginn der Versuche für die Dosierung die oTS-Werte geschätzt werden und später die Versuchsdaten nachträglich nochmals überarbeitet werden mussten (vgl. Kap. 7.1). In einigen Fällen wichen dadurch die Dosierungen von dem von der VDI-Richtlinie vorgeschriebenen Mengenverhältnis des Impfschlammes zum Substrat ab, ohne dass nachträglich Korrekturen möglich waren.

### 5.3.7 FOS/TAC

FOS/TAC ist der Quotient aus dem Gehalt an flüchtiger organischer Säure (FOS) und dem Carbonatpuffer (TAC) und gilt als geeignet, den biochemischen Zustand eines anaeroben Abbauprozesses zu beschreiben. Zur Bestimmung dieses Verhältnisses stand eine einfache Titrierbürette, ein Magnetrührer und das pH-Messgerät zur Verfügung (s. Abb. 13).

Die Bestimmung dieses Quotienten erfolgte bei Bedarf bei den kontinuierlichen Versuchen zur Prozesskontrolle.



**Abbildung 13: Labormesstechnik**  
 (von links nach rechts: pH-Messgerät/Laborwaage/Titrierbürette mit Magnetrührer/Feuchtebestimmer)

## 6 Berechnungsgrundlage für die Auswertung der Gärversuche

Für die Auswertung der durchgeführten Gärversuche waren folgende Zusammenhänge wichtig:

- zeitlicher Verlauf der Gasentstehung
- Gesamtmenge des entstehenden Biogases
- Zusammensetzung des entstandenen Biogases

Für die Auswertung des entstehenden Gases wurde die tägliche Biogasausbeute über die Versuchsdauer grafisch dargestellt. Aus den daraus entstehenden Summenkurven konnte die Gesamtausbeute des entstandenen Biogases über der Versuchsdauer entnommen werden. Zudem können aus solchen Kurven Schlussfolgerungen bezüglich des Gärverlaufs bzw. der Hemmung des Gärprozesses gezogen werden.

Die Biogasmenge ist das Volumen an Gas, welches pro Versuchsansatz täglich bzw. während der gesamten Versuchsdauer gebildet wird. Das entstandene Gasvolumen kann in Liter oder Normliter angegeben werden. Die Einheit Normliter wird für das Volumen bei atmosphärischem Druck (1,013 bar) und 0 °C verwendet. Hierfür wird die ermittelte Gasmenge auf 0 °C umgerechnet. Dies geschieht mit der vereinfachten Form des Gay-Lussacschen Gesetzes (Gleichung 1):

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{T_2}{T_1} = V_1 \cdot \frac{273K}{298K}$$

Gleichung 1:

[1]

$V_1$  = gemessenes Volumen normiert bei 25 °C

$V_2$  = Volumen bei 0 °C

Die Anteile der täglich entstandenen Volumina an Methan werden bestimmt nach Gleichung 2:

Gleichung 2: 
$$V_{3,Methan} = V_{2,Biogas} \cdot C_{CH_4}$$

Als Biogausausbeute wird das Gasvolumen pro kg organische Trockensubstanz bzw. Frischmasse des zugeführten vergorenen Materials bezeichnet. Die Biogausausbeute ist definiert nach

Gleichung 3: 
$$Y_{oTS} = \frac{V_{Biogas}}{m_{oTS,zu}}$$
 [l/kg oTS]

Bei der Methanausbeute wird analog der Biogausausbeute vorgegangen (Gleichung 4):

Gleichung 4: 
$$Y_{oTS,CH_4} = \frac{V_{CH_4}}{m_{oTS,zu}}$$
 [l/kg oTS]

Von der Gesamtbiogasmenge, welche bei den verschiedenen Versuchsansätzen ermittelt wird, ist jeweils die Restgasmenge, die durch den Impfschlamm produziert wird, zu subtrahieren. Diese Gasmengen wurden durch die Nullversuche im Batchversuch ermittelt. Weil zum Teil nur sehr geringe Mengen entstanden, konnte kein zeitlicher Verlauf der Gasproduktion des Impfmateri als aufgenommen werden. Das durch den Impfschlamm gebildete Biogas blieb daher beim zeitlichen Verlauf der Biogasbildung unberücksichtigt. Bei der Zusammensetzung des Gases konnte es ebenfalls zu einer gewissen Beeinflussung kommen, insbesondere dann, wenn der Methangehalt des Impfschlammes stark vom Methangehalt des untersuchten Substrates abwich und die Restgasmenge des Impfschlammes vergleichsweise hoch war. Das für die Auswertung der Gärversuche wichtige Ergebnis der Gesamtgasmenge, welches ausschließlich durch das verwendete Gärsubstrat freigesetzt wurde, wurde nach Gleichung 5 um die aus dem Impfmateri resultierende Methanmenge korrigiert:

Gleichung 5: 
$$V_{CH_4} = \sum (\phi_{CH_4,Subs+IS} \cdot V_{Biogas,Subs+IS}) - \sum (\phi_{CH_4,IS} \cdot V_{Biogas,IS})$$
 [l]

## 7 Genereller Versuchsablauf

### 7.1 Durchführung der Batch-Gärversuche

In diesen Versuchsreihen wurden die verwendeten Substrate mit Faulschlamm einer kommunalen Kläranlage angeimpft und unter mesophilen anaeroben Bedingungen bei 37 °C in einem Doppelversuch vergoren. Die Dauer der Batchversuche betrug ca. 30 Tage. Längere Versuche (45 Tage) konnten aus Zeitgründen nur einmal durchgeführt werden. Nach VDI ist das Abbruchkriterium das Unterschreiten einer bestimmten Gasproduktion pro Tag.

Die Versuche wurden in Anlehnung an die in der VDI Richtlinie Nr. 4630 „Vergärung organischer Stoffe“ [2] enthaltenen Vorgaben durchgeführt. Bei der Festlegung des Input-Mischungsverhältnisses von Impfschlamm und Substrat wurden folgende Rahmenbedingungen nach Gleichung 6 eingehalten.

Gleichung 6: 
$$\frac{oTS(IS)}{oTS(Substrat)} \geq 2$$
 Quelle: VDI 4630 [2]

Diese Vorgaben dienen in erster Linie dazu, Hemmeinflüsse auf den anaeroben Abbau durch eine zu geringe Bakterienpopulation im Fermenter auszuschließen.

Die 1l großen Reaktoren wurden mit 0,8 l Impfschlamm-Substrat-Gemisch befüllt. Nach dem Befüllen der Batch-Fermenter mit der errechneten Menge an Inputmaterial wurde der Fermenterinhalt vermischt, bis eine Homogenität zu erkennen war. Gleichzeitig zu den Gärversuchen wurde ein Nullversuch mit ebenfalls 0,8 l Volumen durchgeführt. Im Nullversuch wird die Restgärung des Impfschlammes bestimmt.

Anschließend wurden die Batch-Fermenter gasdicht verschlossen, in ein Wasserbad gestellt und mit den Gasbeuteln zum Auffangen des entstehenden Biogases verbunden. Die Messung des pH-Wertes erfolgte immer zu Beginn des Versuchsansatzes sowie am Ende. Das Aufmischen der Inputstoffe während der Versuchsdauer erfolgte durch mehrmaliges tägliches Schütteln der Batch-Fermenter. Dies wurde solange durchgeführt, bis eine Homogenität zu erkennen war und Schwimmschichten zerstört waren.

Vor dem Beginn der eigentlichen Gärversuche wurde von jeder Substratprobe und dem bei der Vergärung verwendeten Impfschlamm der TS- bzw. oTS-Wert ermittelt. Diese Werte dienten als Grundlage für die Berechnung des Inputmaterials nach Gleichung 6. Die oTS-Werte mussten zu Versuchsbeginn geschätzt werden, weil die Laborwerte erst zwei bis drei Wochen nach Versuchsbeginn vorlagen. Das hatte teilweise Abweichungen zur Folge, sodass das genannte Verhältnis nach Gleichung 6 nur annähernd eingehalten werden konnte. Wie groß dieser Fehler auf die Endergebnisse war, ist bei den vergleichsweise geringen Versuchserfahrungen schwer zu quantifizieren.

## 7.2 Prozessüberwachung bei den Batch-Gärversuchen

Bei den Batchversuchen wurde der Fermenter während der gesamten Versuchszeit nicht geöffnet, um einen Sauerstoffeintrag in den Fermenter zu vermeiden. Sicherheit für dieses Vorgehen gibt die Berücksichtigung der VDI-Richtlinie 4630 und die darin festgelegten Mengenverhältnisse von Substrat und Impfschlamm.

Folgende Aufgaben waren innerhalb der Versuchsreihe durchzuführen:

- Laufzeit des Batchversuches festlegen
- Sichtprüfung der Batch-Fermenter und Kontrolle des Wasserbades
- Nachfüllen des Wassers (Wasserverluste trotz Abdeckung ca. 3 l pro Tag)
- Wechseln der Gas auffangbeutel nach einem vorher festgelegten Zeitpunkt
- tägliches Homogenisieren der Inputmenge (Schütteln jedes einzelnen Fermenters)
- Ermittlung der produzierten Gasmenge über Gasmengenzähler
- Analyse der Gaszusammensetzung
- Gasmenge auf Normzustand umrechnen
- genormte Methangasmenge ermitteln
- Summe der Normvolumina aus Nullprobe ermitteln
- Netto-Gasnormvolumen des Substrates bestimmen
- Netto-Gasausbeute des Substrates bezogen auf die Masse an oTS des eingesetzten Substrates ermitteln
- Summe der Normvolumina an CH<sub>4</sub> aus Nullprobe ermitteln
- Netto-Methangasnormvolumen des Substrates bestimmen
- Netto-Methangasausbeute des Substrates bezogen auf die Masse an oTS des eingesetzten Substrates ermitteln
- durchschnittlichen Methangehalt berechnen

## 7.3 Durchführung der kontinuierlichen Gärversuche

Vor der täglichen Beschickung der Fermenter mit frischem Input (Biogasgülle + Substrat) wurde die gleiche Menge ausgefaultes Material über den am Boden befindlichen Ablasshahn entnommen. Damit durch den entstehenden Unterdruck im Fermenter beim Ablassen keine Sperrflüssigkeit aus dem Milligasähler angesaugt wird, musste vorher die Gasleitung vom Fermenter mittels Sperrhahn verschlossen und die Verbindung zum Kippzähler unterbrochen werden. Nach Trennung der Gasleitung wurde am Sperrhahn ein mit Biogas gefüllter Gasbeutel befestigt. Somit konnte beim Ablassen des Fermenterinhaltendes Biogas in gleicher Zusammensetzung in den Fermenter eingesaugt und beim „Füttern“ des Fermenters wieder in den Gasbeutel gepresst werden, ohne dass die druckempfindlichen Kippzähler in Mitleidenschaft gezogen wurden. Um eine negative Veränderung der Gaszusammensetzung des jeweiligen Fermenters zu vermeiden, wurden die den Fermentern zugeordneten Gasbeutel regelmäßig mit frischem Gas des entsprechenden Fermenters befüllt.

Die Zugabe von Substrat-Biogasgülle-Gemisch erfolgte einmal am Tag manuell über einen Trichter am Fermenterdeckel. Die in den Fermentern befindlichen Rührer dienten der Homogenisierung und Zerstörung von Schwimm- bzw. Sinkschichten. Die Rührer wurden über einen Motor mit stufenlosem Getriebe angetrieben (ca. 80 U/min). Der Rührbetrieb erfolgte einheitlich nach vorher festgelegtem Intervall (15 min Rühren, 15 min Pause).

## 7.4 Prozessüberwachung bei den kontinuierlichen Gärversuchen

Bei einer Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen und Gülle ist ausreichend Pufferkapazität vorhanden und somit keine Produkthemmung während der Vergärung zu erwarten. Eine Prozessüberwachung ist bei den kontinuierlichen Versuchen unabdingbar:

TS-Wert, pH-Wert und FOS/TAC wurden während des Gärversuches im abgelassenen Substrat ermittelt. Auf die Bestimmung des oTS musste verzichtet werden. Gasmenge und Gaszusammensetzung wurden täglich gemessen, Reaktortemperatur, Rührerdrehzahl und Rührrhythmus wurden täglich kontrolliert. Die tägliche Zufuhr von frischem Input erfolgte in dem zu Versuchsbeginn festgelegten Mischungsverhältnis von Impfschlamm und Substrat.

Impfschlamm wurde etwa alle drei Wochen erneuert und in einem geschlossenen Fass bei Raumtemperatur gelagert. Von dem jeweiligen Substrat wurden zu Beginn des Versuches für den gesamten geplanten Versuchszeitraum entsprechend des ermittelten Mischungsverhältnisses (auch hier geschätzte oTS-Werte) einzelne Tagesportionen abgewogen und eingefroren.

Zu Beginn des Versuches wurde entschieden über

- die Versuchslaufzeit pro Gärsubstrat,
- die Verweilzeit (mittlere Aufenthaltsdauer) des Substrates im Fermenter,
- die Raumbelastung im Fermenter.

Für die Auswertung der Versuchswerte sind die gleichen Bestimmungen analog der Batchversuche vorgenommen worden (s. Kap. 7.2). Einen Nullversuch nur mit Impfschlamm gab es nicht, weil die Versuchsausrichtung eine andere war (s. Kap. 8.1.1).

# 8 Praxisversuche und Ergebnisse

## 8.1 Versuchsumfang

### 8.1.1 Kontinuierliche Versuche

Die kontinuierlichen Versuche dienen dazu, den Betrieb von Praxisanlagen zu modellieren und mit einem vergleichsweise geringen Risiko verschiedene Betriebszustände durchzuspielen. Von Vorteil sind dabei lange Versuchszeiträume, je nach Aufgabenstellung bis zu einem Jahr. Die VDI-Richtlinie Nr. 4630 /2/ kann hierzu nur bedingt herangezogen werden, weil sie die Batchversuche beschreibt.

#### A - Substratbehandlung während der Ernte

Vergleich der Gaserträge unterschiedlicher Schnittlängen des Erntegutes (Häcksler) und Gegenüberstellung des zusätzlichen Kraftstoffverbrauches

#### B - Substrataufbereitung vor der Dosierung in den Fermenter

Vergleich der Gaserträge ohne und mit Substrataufbereitung vor der Dosierung in den Fermenter (Hammermühle, Querstromzspaner).

**Tabelle 2: Versuchsablauf der durchgeführten kontinuierlichen Versuche**

Zeitraum	Impfmateriale	Fermenter 1	Fermenter 2	Fermenter 3
21.04.10 - 26.04.10	Rindergülle, verdünnt (zur Reduzierung des Eigengaspotenziales)			
26.04.10 – 10.05.10	Rindergülle, verdünnt	Sorghum, Lussi 2,5 mm; Standard	Sorghum, Lussi 0,8 mm Häcksler	Sorghum, Lussi 0,6 mm Häcksler
11.05.10 – 12.07.10	Biogasgülle 1	Sorghum, Lussi 2,5 mm; Standard	Sorghum, Lussi 0,8 mm Häcksler	Sorghum, Lussi 0,6 mm Häcksler
15.07.10 – 19.07.10	Biogasgülle 2 (zur Reduzierung des Eigengaspotenzials)			
20.07.10 – 13.08.10	Biogasgülle 2	Maissilage Standard	Maissilage Hammermühle	Rindermist Hammermühle

Alle in Tabelle 2 genannten Versuchseinstellungen der kontinuierlichen Versuche sind parallel auch in den Batch-Reaktoren untersucht worden. Diese Ergebnisse werden in Kap. 8.4 erörtert. Darüber hinaus konnten keine zusätzlichen Erkenntnisse gewonnen werden, die nur durch die besonderen Möglichkeiten von kontinuierlichen Versuchen zu erreichen sind.

Folgende Gründe:

Pro Versuch sollten wenigstens zwei Verweilzeiten eingehalten werden. Bei 20 l Fermenterinhalt und 0,5 l „Fütterung“ pro Werktag (Wochenende keine Fütterung) ergibt das 40 Werktage, um einmal den Fermenterinhalt statistisch komplett auszutauschen. Also wären pro Versuch 80 Werktage (mehr als drei Monate) nötig gewesen. Das war mit keinem der Versuche erreicht worden.

Die zunächst empfohlene Rindergülle hatte, auch nach Verdünnung, ein derartig hohes Gaspotenzial, dass das eingesetzte Substrat bei der zunächst gewählten Raumbelastung von ca. 1,7 keine deutliche Wirkung über das Impfmateriale hinaus zeigte. Der fließende Wechsel des Impfmateriale zu Biogasgülle 1 (Nachgärer der gleichen Biogasanlage) benötigte fast die gesamte für diesen Versuch noch zur Verfügung stehende Versuchszeit, um einen definierten Zustand im Fermenter zu erreichen.

Später konnte auf einer anderen Biogasanlage ein anderes Impfmateriale „Biogasgülle 2“ (Nachgärer einer Anlage mit 70 Tagen Verweilzeit) gefunden werden. Dieses Impfmateriale war für die Versuche sehr gut geeignet: Keine Verdünnung nötig, geringes Restgärpotenzial (s. Abb. 14 und 15, rote Kurve). Leider stand für diesen Versuch nur einen Monat Versuchszeit zur Verfügung.

Die Untersuchung mit zwei Aufbereitungszuständen des sehr interessanten Substrates Rindermist scheiterte daran, dass die unzerkleinerte Variante Rindermist, begründet durch die Strohbestandteile, nicht in den Fermenter einzubringen war (Verstopfung, Verzopfung und Stillstand des Rührers). Der mit der Hammermühle zerkleinerte Rindermist konnte in den Fermenter eingebracht werden. Ein Vergleich der beiden Aufbereitungszustände war nicht mehr möglich.

Die besonderen Möglichkeiten kontinuierlicher Versuche (gegenüber Batchversuchen) konnten nicht genutzt werden:

- Modifizierung der Raumbelastung
- Einfluss von Zusatzstoffen auf den Fermentationsprozess (z. B. Enzyme)
- Darstellung der Veränderungen in den Verlaufskurven für die Gasproduktion

Aus diesen Gründen wurde auf eine separate Auswertung der kontinuierlichen Versuche verzichtet.

Erkenntnis aus der Arbeit mit Rindermist im kontinuierlich betriebenen Fermenter:

**Aus verfahrenstechnischen Gründen ist eine (mechanische) Substratvorbehandlung und Homogenisierung unbedingt erforderlich.**

### 8.1.2 Batchversuche

#### A - oben genannte Substrate

zwei Aufbereitungszustände (als Konservat)

#### Zerkleinerungsaggregate

Hammermühle

Querstromzerspaner

## 8.2 Beschreibung der Animpfsubstrate

Das Anfahren einer Vergärungsanlage (Anaerobanlage) kann einige Wochen dauern, weil anaerob lebende Mikroorganismen in der Regel langsam wachsen. Mit dem Ziel, zeitintensive Vorbereitungen bei den Laborversuchen zu vermeiden, wurde die Anfahrzeit der Fermenter durch Zugabe von Impfschlämmen erheblich verkürzt.

Der ideale, aber sehr aufwändige Weg ist, sich über Jahre ein konstantes Inokulum zu züchten. Damit hat man jederzeit ein konstantes, vergleichbares Impfmateriale zur Verfügung.

Einfacher ist es, sich Impfmateriale bei benachbarten, technologisch möglichst ähnlichen Anlagen zu besorgen. Derartige Anlagen können jedoch auch technologischen Schwankungen unterliegen. Damit können Entnahmen in zeitlichen Abständen auch unterschiedliche Qualitäten der Impfschlämme zur Folge haben, was die Vergleichbarkeit der eigenen Versuche einschränkt.

Für die eigenen Versuche sind fünf verschiedene Schlämme getestet worden – mit erheblichen Unterschieden:

### 8.2.1 Faulschlamm

Es sind zwei Kläranlagen getestet worden, wobei eine infolge zu großer Entfernung nicht weiter angefahren werden konnte. Faulschlamm z. B. aus dem Faulturm einer kommunalen Kläranlage bot sich an, weil dieser Schlamm eine sehr vielfältige Biozönose hat und keinen zu hohen TS-Gehalt. Zu diesem Zweck wird meist entsprechendes Impfmateriale aus der Umwälzleitung des Faulturmes entnommen, um eine gute Durchmischung zu erreichen.

Die Besonderheit der beprobten Anlage ist, dass hier neben kommunalem Klärschlamm auch Bioabfälle vergoren werden. Der Vorteil lag darin, dass dadurch eine vielfältigere Biozönose zu erwarten war als bei reinen kommunalen Kläranlagen. Nachteilig war, dass die Zusammensetzung des Impfmaterials stärker schwanken kann, insbesondere wenn viel Fette angenommen wurden. Die Vergleichbarkeit innerhalb einer Versuchsreihe war durch die Nutzung des gleichen Impfschlammes in allen Batch-Fermentern und durch Ansetzen einer Nullprobe gegeben. Zweiter Nachteil: Die Anlage fährt bei einer Betriebstemperatur von 40–42 °C, während die eigenen Versuche bei ca. 37 °C durchgeführt wurden.

Eine Kläranlage, die rein kommunalen Klärschlamm im Faulturm behandelt und bei 37 °C arbeitet, existiert in naher Umgebung des Labors nicht. Deshalb sind alle **Batchversuche** mit dem Faulschlamm derjenigen kommunalen Kläranlage durchgeführt worden, die auch Bioabfälle einsetzt.

TS-Gehalt: 3,0 ... 3,3 %; oTS-Gehalt (= Glühverlust): 45 ... 51 %; pH-Wert: 7,3 ... 7,5; Betriebstemperatur: 40–42 °C; Aufenthaltszeit: 20 ... 24 Tage; Besonderheiten: teilweiser Einsatz von Entschäumer; Beschickung Reaktor: 2 h Klärschlamm, 2 h Maische Bioabfall; Methangehalt: 64 ... 68 % (bei kontinuierlicher Beschickung von Fettanteilen)

### 8.2.2 Rindergülle

Der Einsatz reiner Rindergülle als Impfmateriale hatte sich bei den kontinuierlichen Versuchen nicht bewährt.

Die anfängliche Empfehlung, analog der verbreiteten Praxis in landwirtschaftlichen Biogasanlagen Rindergülle für die kontinuierlichen Versuche als Substrat einzusetzen und z. B. Sorghum als Co-Substrat dazuzugeben, erwies sich im vorliegenden Fall nicht als hilfreich. Die Rindergülle hatte einen TS-Gehalt von fast 10 % und war damit im Fermenter fast nicht zu rühren. Außerdem war sie sehr sauer (pH = 6,9). Das eigene Gärpotenzial war auch bei einer Verdünnung auf knapp 5 % so stark (oTS-Gehalt 82 %, pH 6,8 bei der verdünnten Rindergülle), dass der Einfluss des Co-Substrates nur noch gering war. Außerdem startete die Rindergülle sehr langsam, es fehlten offensichtlich noch die Methanbakterien. Der Gärprozess begann beim Batchversuch erst nach etwa 15 Tagen (s. Diagramme 1 und 2). Im kontinuierlichen Versuch musste nach wenigen Tagen der pH-Wert und das Puffervermögen verbessert werden.

### 8.2.3 Biogasgülle aus dem Nachgärbehälter (Rindergülle + Mais)

Alternativ zur Rindergülle kamen bei den kontinuierlichen Versuchen aus zwei nahegelegenen landwirtschaftlichen Biogasanlagen Biogasgülle aus dem Nachgärbehälter zum Einsatz. Beide Biogasanlagen verarbeiten Rindergülle und Mais. Wie stark das Material innerhalb dieser Anlagen in seiner Zusammensetzung über einen längeren Zeitraum schwankt, konnte über die Versuchszeit nicht ergründet werden. Bekannt ist, dass der einen Biogasanlage (Biogasgülle 1) Zusatzstoffe zugesetzt wurden, deren Einfluss auf die eigenen Versuche unklar blieb. Außerdem lag der TS-Gehalt dieser Biogasgülle auch im Nachgärbehälter noch zwischen 8 und 9 %, sodass auch hier eine Verdünnung für die Versuche nötig war.

Beide Biogasanlagen unterschieden sich erheblich bei der Verweilzeit und beim TS-Gehalt im Nachgärbehälter.

**Biogasgülle 1** (Nachgärbehälter, verdünnt):

TS-Gehalt: 5,4 %; oTS-Gehalt: 81 %; pH = 7,9

**Biogasgülle 2** (Nachgärbehälter, unverdünnt):

TS-Gehalt: 5,3 %; oTS-Gehalt: 71 %; pH = 7,7

Verweilzeit der gesamten Anlage: 60–70 Tage

Mit der Biogasgülle 2 wurde für die kontinuierlichen Versuche ein geeigneter Impfschlamm gefunden.

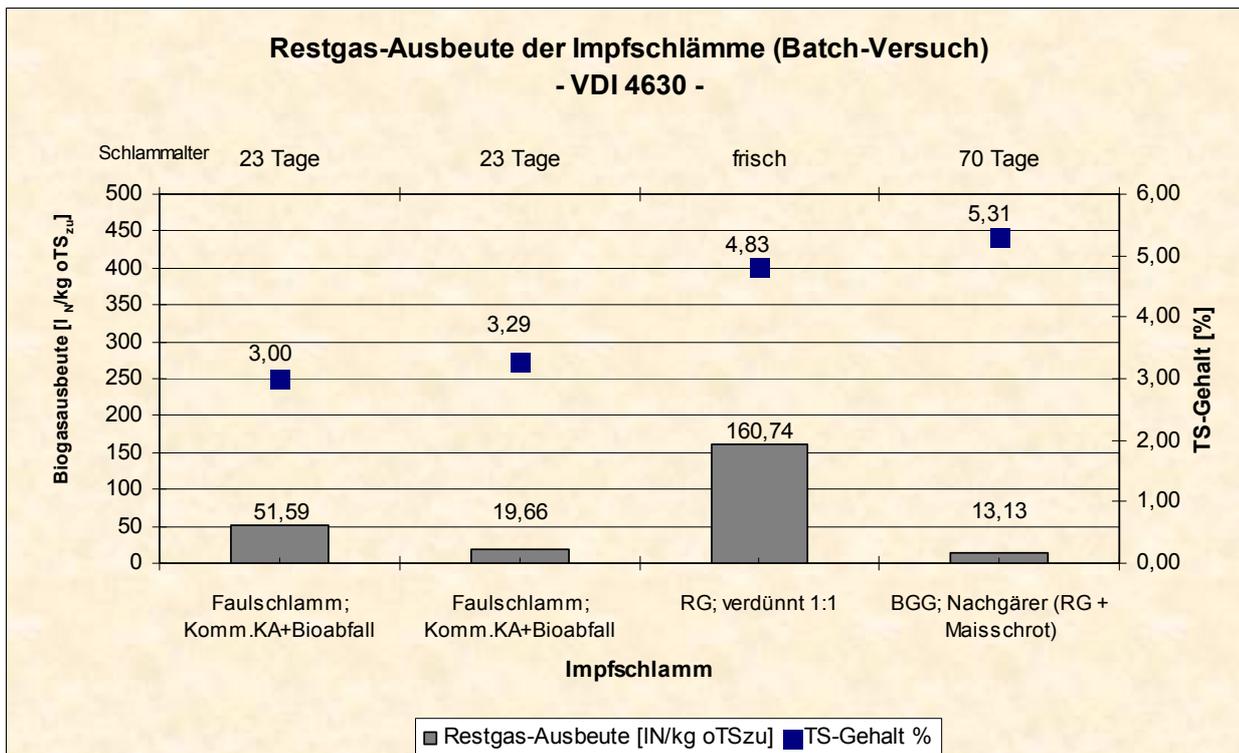


Diagramm 1: Restgasausbeuten verschiedener Impfschlämme

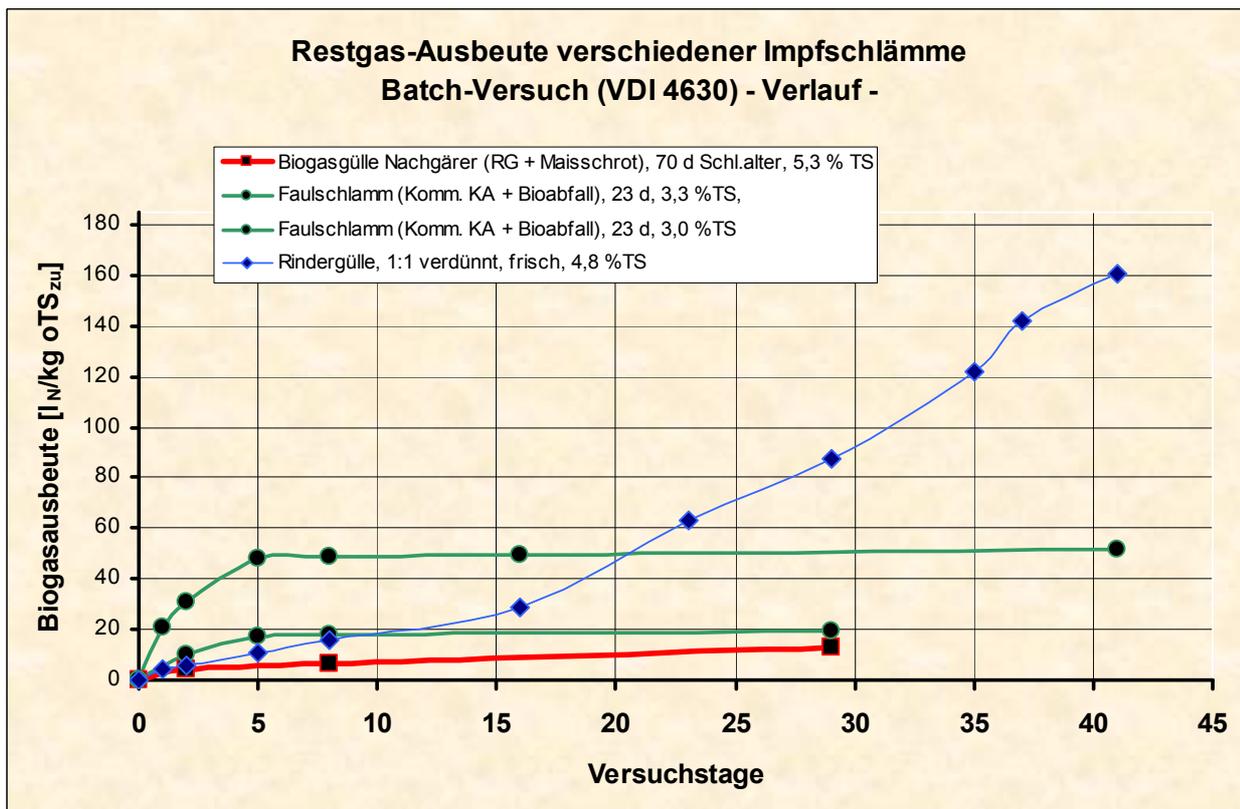


Diagramm 2: Verlauf der Restgasausbeuten der verschiedenen Impfschlämme

Am Ende der Tests wurden zwei Varianten favorisiert:

- für Batchversuche: Klärschlamm der kommunalen Kläranlage, auch mit Bioabfall-Anteil, trotz messbarer Unterschiede
- für kontinuierliche Versuche: Biogasgülle 2 aus dem Nachgärer derjenigen Biogasanlage mit einem TS-Gehalt von 5,31 % (unverdünnt einsetzbar) und einer sehr hohen Verweilzeit (mindestens 70 Tage). Diese Biogasgülle hat das niedrigste Restgas-Potenzial der untersuchten Materialien.

Das Impfmateriale wurde nach der Entnahme aus der jeweiligen Anlage keiner weiteren Aufbereitung (außer notwendiger Verdünnung bei zu hohem TS-Gehalt) unterzogen. Die Lagerung bis zu Beginn der Versuchsreihen (Batch) bzw. während der Zeit des Einsatzes (kontinuierlicher Versuch) erfolgte bei Raumtemperatur.

## 8.3 Eingesetzte Substrate

### 8.3.1 Kontinuierliche Versuche (Probenmenge ca. 3 kg)

Die in den Praxisbetrieben mit und ohne Substrataufbereitung geplanten Untersuchungen sind an zum Teil nicht vorhersehbareren Dingen/Ereignissen gescheitert. Normaler Erntebetrieb und der Betrieb der Biogasanlage durften grundsätzlich durch die Versuche nicht beeinträchtigt werden. Einige Versuche waren nicht durchführbar, weil der geplante Häcksler defekt war und das Ersatzgerät über keine verstellbaren Messer verfügte. Auch war das Variieren von Einstellparametern an Aufbereitungsaggregaten in Biogasanlagen nicht möglich. Das hätte für jedes einzelne Aggregat mit den Herstellern weit ausführlichere Vorbereitungen und Absprachen bedurft. So konnten nur Proben der Zustände „ohne zusätzliche Aufbereitung“ und „mit zusätzlicher Aufbereitung – wie momentan eingestellt“ gewonnen werden. Verwendet wurden folgende Substrate:

**Tabelle 3: Substratübersicht für die kontinuierlichen Versuche**

Substrat	Sorte	Teilchengröße/ Einstellung	Erntetechnik/ Substrataufbereitung	Lagerung
Sudangras (25 % TS-Gehalt; 96 % oTS)	Lussi	2,5 - 3,0 cm	Häcksler	Labor, Schlauchsilo
Sudangras	Lussi	0.8 - 1,0 cm	Häcksler	Labor ,Schlauchsilo
Sudangras	Lussi	0,6 - 0,8 cm	Häcksler	Labor, Schlauchsilo
Maissilage (Standard) (34 % TS-Gehalt; 97,06 % oTS)		Standard		Silo
Maissilage		zerkleinert	Hammermühle	
Rindermist		Standard		frisch
Rindermist		zerkleinert	Hammermühle	

### 8.3.2 Batchversuche (Probenmenge < 1 kg)

In den Batchversuchen (s. Tab.4) wurden alle Substrate, die für die kontinuierlichen Versuche zum Einsatz kamen, untersucht (s. Tab. 3).

**Tabelle 4: Versuchsablauf mit verschiedenen Substraten im Batchversuch**

Fermenter (Doppelbestimmung)	Serie 1 (Test Impfschlämme) Impfschlamm	Substrat	Serie 2 Substrat	Serie 3 Substrat	Serie 4 Substrat
1+2	Faulschlamm 1	Weidelgrassilage	Faulschlamm 1	Biogasgülle 2	Maissilage, (34 % TS-Gehalt; 97,06 % oTS) grob
3+4	Faulschlamm 2	Weidelgrassilage	Rindergülle, verdünnt	Maissilage, grob	Maissilage, fein
5+6	Biogasgülle 1	Weidelgrassilage	Sorghumsilage, Lussi, Häcksler 2,5 mm	Maissilage, Standard	Grassilage (22,0 % TS-Gehalt; 87,9 % oTS)
7+8	-	-	Sorghumsilage, Lussi, Häcksler 0,8 mm	Maissilage, Hammermühle	Grassilage, Querstromzerspaner
9+10	-	-	Sorghumsilage, Lussi, Häcksler 0,6 mm	Rindermist (32,8 % TS-Gehalt; 82,1 % oTS)	Grünroggensilage (20,0 % TS-Gehalt; 91,3 % oTS)
11+12	-	-	Luzernegrassilage	Rindermist, Hammermühle	Grünroggensilage, Querstromzerspaner
13+14	-	-	Miscanthussilage	Faulschlamm 1	Faulschlamm
Impfmaterial	-	-	Faulschlamm 1	Faulschlamm 1	Faulschlamm 1

Darüber hinaus wurde die im Querstromzerspaner aufgeschlossene Gras- und Grünroggensilage im Batch-Ansatz getestet.

## 8.4 Ausgewählte Verfahren der Substrataufbereitung und Ergebnisse

Der Schwerpunkt der Substrataufbereitung wurde in diesem Projekt auf die mechanische Desintegration gelegt. Ziel war es, eine schnellere oder höhere Bioverfügbarkeit der eingesetzten Substrate zu erreichen. Der Hauptweg ist dafür bisher, die spezifische Oberfläche der Substrate zu erhöhen bzw. Zellstrukturen zu zerstören. Erhöht sich die Bioverfügbarkeit von eingesetzten Substraten durch eine entsprechende Vorbehandlung, so müsste sich dieser Sachverhalt mit einer Steigerung der Biogas- und Methanausbeute oder durch eine Beschleunigung der Vorgänge, d.h. durch ein früheres Erreichen der maximalen Ausbeuten belegen lassen.

Die Aufbereitung der ausgewählten Substrate erfolgte im Vorfeld der Gärversuche im jeweiligen landwirtschaftlichen Betrieb. Die Einhaltung der Versuchsparameter und die Sicherung repräsentativer Probenahmen waren durch die Anwesenheit des Projektbearbeiters gesichert.

### 8.4.1 Mechanische Aufbereitung während der Ernte

Hier wurde geprüft, ob eine Substratzerkleinerung während des Erntevorganges (z. B. Feineinstellung des Häckslers) eine lohnende Alternative hinsichtlich einer möglichen Steigerung des Gasertrages sein kann. Belastbares, unabhängiges, substratbezogenes Datenmaterial ist bisher nicht bekannt.

Derartige Untersuchungen scheitern häufig an den noch fehlenden Einstell- und Messmöglichkeiten an den Erntemaschinen. Darüber hinaus setzt die systematische praxisnahe Erhebung von Daten unter sonst vergleichbaren Bedingungen während der Ernte (gleicher Tag, gleicher Schlag, gleiche Maschine) eine erhebliche Kooperationsbereitschaft des potenziellen Praxispartners voraus.

### Häcksler – Hybrid Sudangras/Sorghumhirse

Bei der Ernte kamen verschiedene Häcksler zum Einsatz. Die Abbildungen 14 und 15 zeigen das Beispiel eines Häckslers mit unmittelbar vor Ort einstellbarer Häcksellänge von 15 mm bis max. 40 mm (siehe Abb. 16).



Abbildung 14: Häcksler



Abbildung 15: Häckslervorsatz

Für die Probenahme ist es wichtig, dass das Schneidwerk des Häckslers während der Ernte kurzfristig auf unterschiedliche Schnittlängen eingestellt werden kann. Auf diese Weise ist es möglich, die zwei Häcksellängen vom gleichen Substrat vom gleichen Feld zu ernten (Beispielbetrieb, Angaben des Fahrers).

- maximale Länge (30-40 mm): Abbildung 16 und 17 **vor** der Zerkleinerung
- minimale Länge (ca. 15 mm): Abbildung 16 und 17 **nach** der Zerkleinerung

Dabei ist zu beachten, dass es sich bei den Einstellwerten um Nenngrößen handelt. Die wahre Länge der Einzelpartikel folgt in jedem Falle einer Verteilungskurve. Wie stark die Teilchengrößen streuen, hängt vom jeweiligen Häckslertyp ab.



**Abbildung 16: Hybridsorte Sudangras/Sorghumhirse vor und nach der Zerkleinerung mit Häcksler**

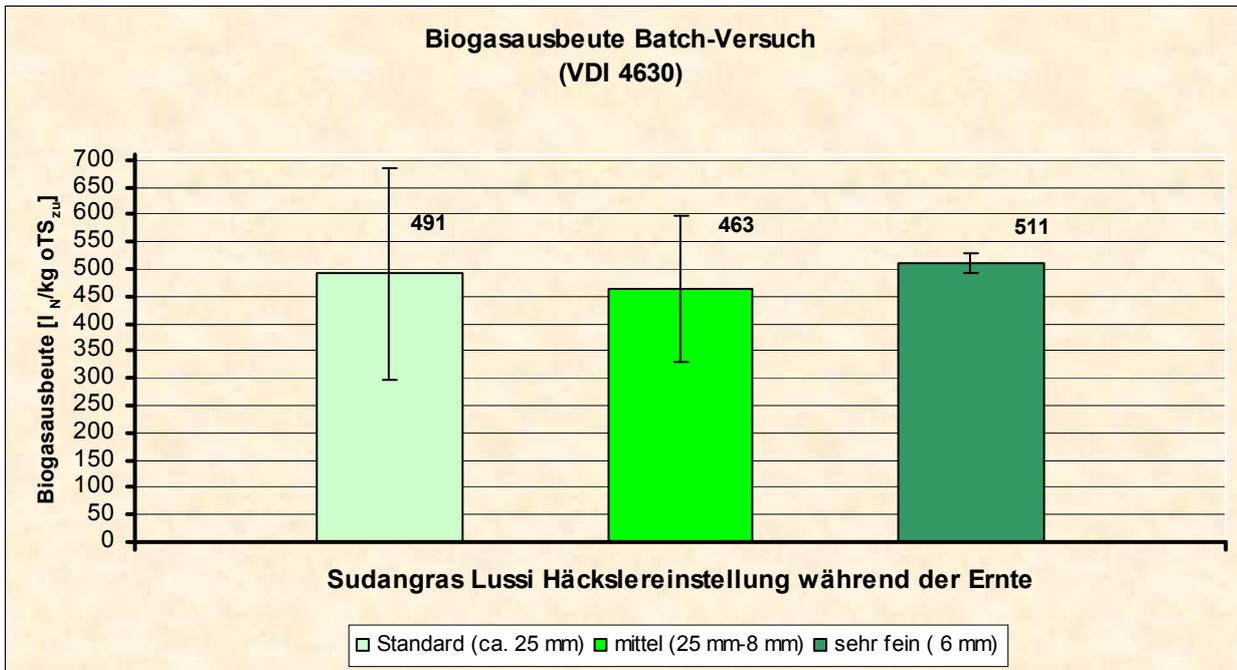
Für die Biogasversuche wurde die Hybridsorte Sudangras/Sorghumhirse Lussi von einem anderen Betriebsstandort und folgenden Schnittlängenabstufungen eingesetzt:

Standard:	ca. 25 mm
Mittel:	25 bis 8 mm
Sehr fein:	6 mm

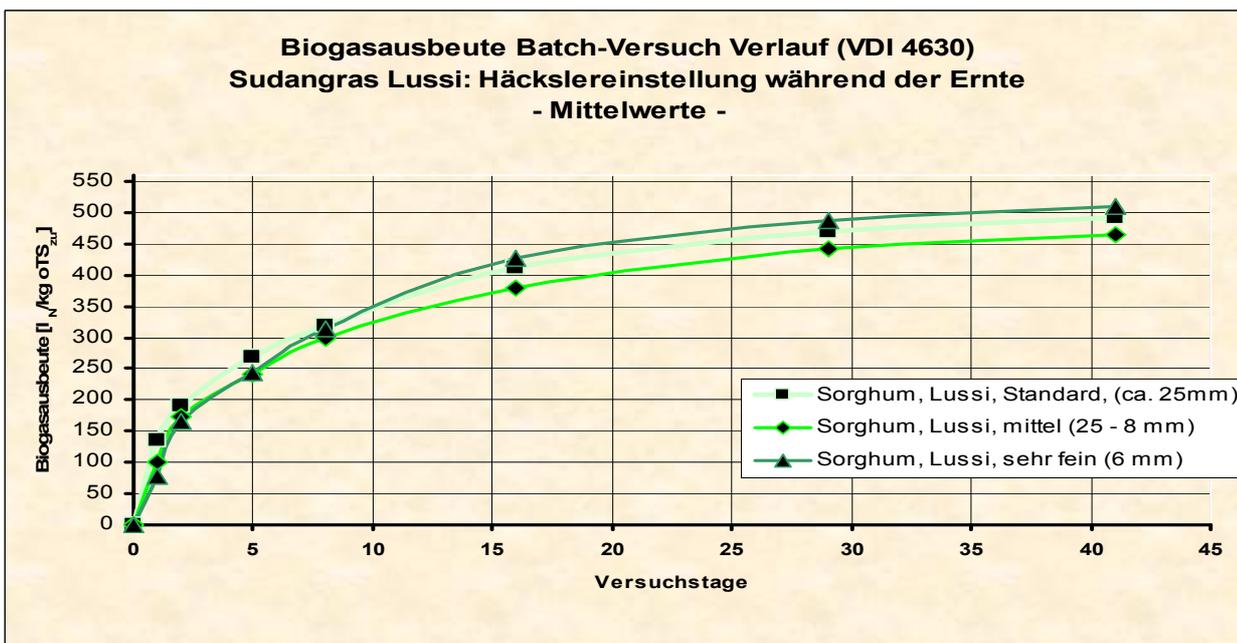
#### Ergebnisse der Versuche (s. Diagramme 3 und 4)

1. Es waren nur **geringe Unterschiede im Gasertrag** festzustellen. Die Einstellung „Sehr fein“ wies einen nur unbedeutend höheren Gasertrag im Vergleich zu den beiden gröbereren Einstellungen auf. Die Abstände zwischen den drei Einstellungen waren zu klein, um deutlichere Unterschiede feststellen zu können.
2. Die Häcksellänge schien keinen Einfluss auf die Gasbildungsgeschwindigkeit in den ersten 4-5 Tagen zu haben (s. Diagramm 4).
3. Je größer die Häcksellänge, desto größer die Streuung der Einzelwerte (s. Abb. 16 in Verbindung mit Diagramm 3). Als Ursachen waren die mit zunehmender Häcksellänge wachsende Ungenauigkeit bei der Probennahme und Dosierung zu sehen. Sowohl im Batch- als auch bei den kontinuierlichen Versuchen waren die Probenmengen vergleichsweise klein (29 g bzw. 16 g), sodass die Qualität einzelner Partikel bei zunehmender Partikelgröße einen wachsenden Einfluss hat. Folglich sollte in der Praxis möglichst homogenes Material zum Einsatz kommen.
4. Die drei Schnittlängenabstufungen wurden unter gleichen Bedingungen in Labor-Schlauchsilos siliert.

Die Silierverluste wurden nicht untersucht. Diese Fragen konnten in diesem Projekt nicht geklärt werden.



**Diagramm 3: Biogasausbeute und Streuung der Ergebnisse in Abhängigkeit von der Häcksellänge**



**Diagramm 4: Verlauf der Biogasausbeute von Sudangras in Abhängigkeit von der Häcksellänge**

Die **Ernte von dem Hybrid Sudangras/Sorghumhirse** der Sorte Lussi erfolgte im genannten Biogasversuch mittels eines reihenunabhängigen Maishäckslers (6 m Arbeitsbreite) mit während der Fahrt stufenlos einregulierbarer Schnittlängenverstellung. Während des Erntevorganges wurden nacheinander die Proben genommen, zuerst mit „Grob-“, danach mit „Feineinstellung“. Zeitgleich wurde der Kraftstoffverbrauch am Terminal abgelesen.

Bei der Feineinstellung von 6 mm Schnittlänge erhöhten sich die Schnittfrequenz und als Folge der Kraftstoffverbrauch des Häckslers. Die Werte sind in Tabelle 5 dargestellt.

**Tabelle 5: Häcksellänge und Dieserverbrauch**

	Maßeinheit	Hybrid Sudangras-Sorghumhirse-Lussi-StandardEinstellung	Hybrid Sudangras – Sorghumhirse-Lussi-Feineinstellung	Anmerkung
Häcksellänge	mm	22	6	
Gasertrag	m³/t oTS	491	511	lt. Versuch
Erntegut	t FM/ha	19,52	17,46	Terminalanzeige
TS-Gehalt	%	31	32	
Dieserverbrauch	l/h	56,88	61,39	Terminalanzeige
Dieserverbrauch	l/dt FM	0,1001	0,1569	Kalkulation
Durchsatz	ha/h	2,91	2,24	Terminalanzeige
Dieserverbrauch	l/ha	19,54	22,24	Kalkulation

Datenquelle: Landwirtschaftsbetrieb

Aufgrund der unterschiedlichen Probenahmepunkte ergaben sich verschiedene Erträge und TS-Gehalte. Aus diesem Grund ist eine unmittelbare Vergleichbarkeit der Aufbereitungszustände hinsichtlich des Kraftstoffverbrauches nicht gegeben.

#### 8.4.2 Mechanische Substrataufbereitung in einer separaten Stufe vor der Dosierung in die Biogasanlage

Die technischen Möglichkeiten der Aufbereitung der Substrate nach der Ernte und ggf. nach dem Silieren sind vielfältig und sicher noch nicht ausgeschöpft. Allerdings zeigen die Erfahrungen der letzten Jahre, dass eine Aufbereitung in einem zusätzlichen Arbeitsschritt vor der Dosierung in die Biogasanlage bzw. im Stoffumlauf einer Biogasanlage gut überlegt sein sollte wegen der zusätzlich anfallenden Aufwendungen an Investitions- und Betriebskosten (siehe Modellkalkulation Kap. 10).

Mitunter sind aber auch weitere prozesstechnische Vorteile die Folge einer zusätzlichen Aufbereitung. So kann eine stärkere Zerkleinerung eine bessere Fließfähigkeit des Substrates oder die Zerstörung einer Schwimmdecke zur Folge haben und damit geringere Rührerleistungen bzw. kürzere Rührzeiten nach sich ziehen. Der dadurch eingesparte Energieaufwand kann der Aufbereitungsstufe wiederum gut geschrieben werden.

Um den Aufwand einer zusätzlichen Aufbereitung zu quantifizieren und dem Mehrertrag an Biogas gegenüberstellen zu können, werden stets zwei Aufbereitungszustände für die Versuche benötigt. Die Techniken **Hammermühle** und **Querstromzersetzer** wurden in Kooperation mit Praxisbetrieben und in Abstimmung mit dem Vorläuferprojekt ausgewählt.

Auf die Untersuchung von Aggregaten, die in den Stoffumlauf einer Biogasanlage eingebaut werden (z. B. Rotacut) wurde in diesem Projekt verzichtet, weil der versuchstechnische Aufwand deutlich höher ist und in der Regel Online-Messtechnik und längere Versuchszeiten erforderlich sind.

##### 8.4.2.1 Hammermühle: Maissilage und Rindermist

Die untersuchte Hammermühle (s. Abb. 18) war einem Feststoffdosierer nachgeordnet. Per Schnecke wurde das Substrat vom Feststoffdosierer in den Arbeitsraum und nach der Zerkleinerung mit einer zweiten Schnecke in den Fermenter transportiert.

Die unzerkleinerten Proben wurden vor Zugabe in den Feststoffdosierer der Radladerschaufel entnommen. Die zerkleinerten Proben konnten durch eine Kontrollöffnung im Schneckenrohr unmittelbar nach der Hammermühle entnommen werden.



**Abbildung 17 + 18: Hammermühle und Arbeitsraum**

Quelle: Arbeitsraum der Hammermühle der Fa. Huning Maschinenbau GmbH Melle (Internet)

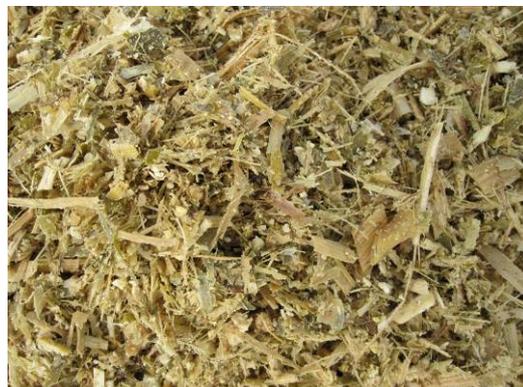
Im täglichen Betrieb wurden (neben Rindergülle) zwei extrem unterschiedliche Kosubstrate dem Feststoffdosierer zugegeben, mehr oder weniger gemischt und gemeinsam zerkleinert:

- Rindermist (s. Abb. 19)
- Maissilage (s. Abb. 20)

Für die Versuche wurde der Feststoffdosierer komplett leergefahren und die beiden Substrate getrennt in der Hammermühle verarbeitet.



**Abbildung 19: Rindermist vor und nach Zerkleinerung mit Hammermühle**



**Abbildung 20: Maissilage vor und nach Zerkleinerung mit Hammermühle**

## Ergebnisse

1. Der Rindermist, wie er in der Anlage anfiel, war extrem inhomogen – von reinem trockenem Stroh bis hin zu nassen, schwarzen, teilverrotteten, teilweise verschimmelten Klumpen. Eine Möglichkeit, dieses Substrat vorab zu homogenisieren, bestand nicht bzw. ist sehr aufwändig z. B. per Radlader. Der Feststoffdosierer erreichte nur bedingt eine Vergleichmäßigung. Für die Laborversuche bedeutete das eine aufwändige Probenahme (mehrere kleine Teilmengen). Dennoch blieb die Streuung groß bei einer Probenahmemenge von 22 g für die Batchversuche und 16 g für die Tagesration der kontinuierlichen Versuche. (16 g von Mist mit Strohalmen von bis zu 30 cm Länge). Der kontinuierliche Versuch mit unzerkleinertem Stroh war mit der vorhandenen Labortechnik nicht durchführbar.
2. **Schlussfolgerung** aus 1.: Bestimmte Substrate, vor allem ungleichmäßig anfallende Reststoffe, für die eine andere Verwertung nicht praktikabel erscheint, wie z. B. Rindermist, verlangen zwingend eine mechanische Aufbereitung vor dem Eintrag in die Biogasanlage.
3. Die Zerkleinerung des Rindermistes mittels Hammermühle brachte im vorliegenden Versuch eine deutliche Erhöhung der Biogausausbeute um fast 70 % (s. Diagramm 5) und eine Beschleunigung der Abbauprozesse (Diagramm 6).
4. Die Maissilage lässt sich sehr komfortabel verarbeiten: Sowohl die zerkleinerte als auch die Standard-Variante sind gut dosier- und rieselfähig. Die Steigerung der Biogausausbeute von Maissilage durch Einsatz der Hammermühle bleibt jedoch unter 10 %. Die Verlaufskurven der Biogasbildung sind ähnlich (s. Diagramme 5 + 6). Der Einsatz der Hammermühle für die Verarbeitung von ausschließlich Maissilage ist aus verfahrenstechnischer Sicht nach den vorliegenden Versuchsergebnissen nicht erforderlich.
5. Möglicherweise unterstützt das Untermischen der Maissilage unter den Rindermist einen störungsarmen Eintrag des Mistes in die Biogasanlage. Dies zu beantworten ist nicht Gegenstand des vorliegenden Projektes und bedarf gesonderter Untersuchungen.
6. Der Einsatz der Hammermühle zur Effizienzsteigerung der Biogasanlage ist nur möglich, wenn Zerkleinerungsaggregat und Kosubstrat aufeinander abgestimmt sind. Ein gewähltes Aggregat bringt nicht bei jedem Substrat eine Ertragssteigerung.

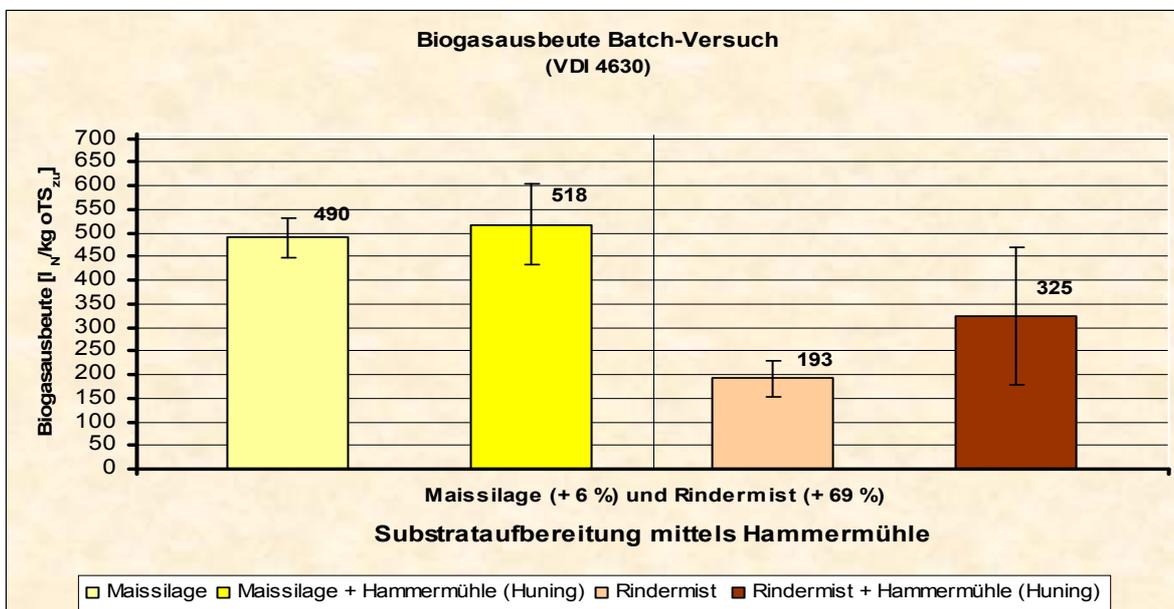
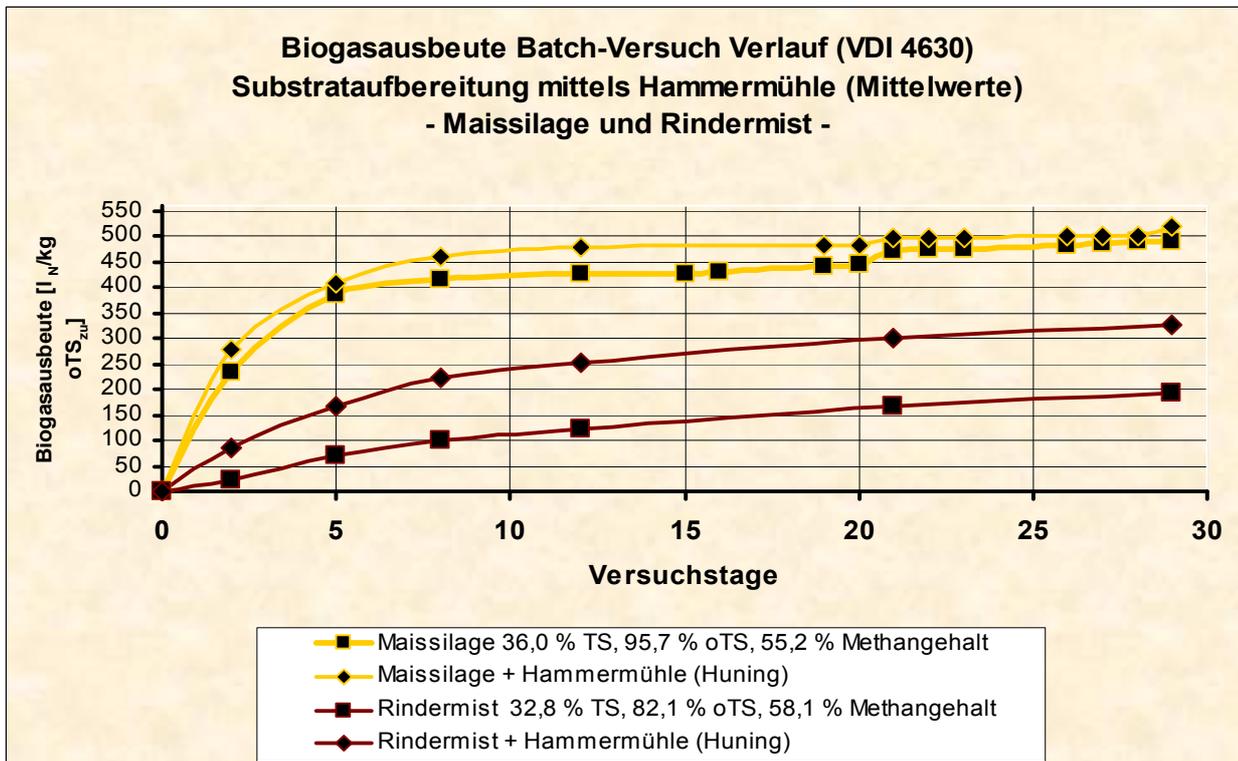


Diagramm 5: Biogausausbeute von Maissilage und Rindermist beim Einsatz einer Hammermühle



**Diagramm 6: Verlauf der Biogasausbeuten aus Maissilage und Rindermist mit Hammermühle-Batchversuch (Mittelwert)**

Nach Aussagen des Betriebes lief die Hammermühle (55 kW Anschlussleistung) aller drei Stunden für 10-20 Minuten während des Dosiervorganges. Die Hammermühle selbst hat eine Anlaufzeit von 30 Sekunden und eine Nachlaufzeit von 60 Sekunden. Das Substrataufbereitungs- und -einbringssystem der betreffenden Biogasanlage besteht aus Hammermühle und dem Substrat-transportssystem (Zubringsschnecken).

Grundlage für die Beurteilung der Rentabilität der einzelnen Bauteile wie z. B. der Hammermühle ist die Gegenüberstellung von zusätzlichem spezifischem Gasertrag und Energieverbrauch. Mangels separaten Stromzählers war der Energieverbrauch der Hammermühle im vorliegenden Fall nicht bestimmbar. In der Regel wird in der landwirtschaftlichen Praxis aus Kostengründen auf zusätzliche Stromzähler verzichtet, maximal wird in ein Gerät für die komplette Beschickungsanlage investiert.

**Zur Klärung der Frage, ob sich der Einsatz von Aufschlusstechnik bei inhomogenem Inputmaterial finanziell für den Betrieb lohnt, wird auf die in Kap. 9 dargestellte Modellkalkulation verwiesen.**

#### 8.4.2.2 Querstromzerspaner: Grassilage und Grünroggensilage

Der Querstromzerspaner (s. Abb. 21 und 22) wird erfolgreich in der Recycling-Industrie zur Zerkleinerung von Elektronikschrott eingesetzt. Dabei zerschlägt eine rotierende Kette harte und spröde Teile und macht damit eine spätere Stofftrennung möglich. Der Querstromzerspaner hat Einzug in die Biogastechnik gehalten. Die Wirkung ist eine quetschende Zerkleinerung, wenn die Kette auf das Substrat prallt.



**Abbildungen 21 + 22: Querstromzerspaner und Kettenschlagwerk**

Für die Versuche wurde eine Biogasanlage gefunden, die Grassilage und Grünroggensilage (GPS) im Gemisch einsetzte. Das Substrat wurde mit einem Baggergreifer aus einer Vorlage in eine Dosierschnecke gegeben, die das Substrat von oben in den Querstromzerspaner (QZ) förderte. Der QZ arbeitete in Zeitabständen während der „Fütterung“ der Biogasanlage und dabei quasikontinuierlich, d. h. in drei Phasen:

1. Einfüllzeit: 8 Sekunden
2. Zerkleinerungszeit: 0 bis 8 Sekunden max.
3. Nachlaufzeit: 4 Sekunden

Die Stromaufnahme bei der Zerkleinerung konnte nur manuell abgelesen werden und schwankte zwischen 50 und 100 A bei Substratzufuhr je nach Dichte des Substrates. Für die Laufzeit pro Tag bzw. für andere Leistungsparameter gab es keine Aufzeichnungen.

Für die Probenahme wurde vom Betreiber ermöglicht, die sonst in der Regel gemischt dosierten Substrate getrennt zu beproben und getrennt in den QZ zu fahren. Dabei wurde vom Betreiber für die Grassilage eine Zerkleinerungszeit von 0 Sekunden gewählt, d. h. der Aufschluss erfolgte nur während der Zeit des Einfüllens und während des Nachlaufes. Eine Verlängerung der Aufenthaltszeit durch zusätzliche Wahl einer Zerkleinerungszeit von 0 bis max. 8 Sekunden war wegen Verstopfungsgefahr nicht möglich.

Im vorliegenden Fall (bei 3 bzw. 8 Sekunden Zerkleinerungszeit) konnten unplanmäßige Störungen bzw. Ausfälle des QZ nur durch Beimischen von Rindergülle als „flüssige Phase“ verhindert werden. Bisher sind keine unabhängigen Untersuchungen zum Aufprallverhalten der Kette in Abhängigkeit vom Substratgemisch (z. B. Grassilage und Gülle) bekannt.

Für die Grünroggenganzpflanzensilage wurde eine Zerkleinerungszeit von 3 Sekunden eingestellt.

Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 23 bis 24 zu sehen.



**Abbildung 23: Grassilage vor und nach Zerkleinerung mit Querstromzerspaner (0 sec Zerkleinerungszeit)**



**Abbildung 24: Grünroggsilage vor und nach Zerkleinerung mit Querstromzerspaner (3 sec Zerkleinerungszeit)**

### Ergebnisse

1. Die Fotos zeigen, dass die Grünroggsilage deutlich stärker zerkleinert wurde als die Grassilage. Die Grassilage erscheint zerfasert und kompakt.
2. Die Grassilage brachte eine höhere Biogasausbeute als Grünroggen. Die absoluten Werte dieser Versuchsreihen sind nicht unmittelbar vergleichbar mit den absoluten Werten voran gegangener Versuchsreihen (Rindermist, Mais, Sudangras), weil in dieser Serie alle Gasvolumina nicht mehr mit Gasbeutel, sondern mit Kippzählern gemessen wurden (vgl. Kapitel 5.3.1).
3. Nach den vorliegenden Versuchsergebnissen hatte der Einsatz des Querstromzerspaners bei beiden untersuchten Substraten keine positive Wirkung. Weder die Biogasausbeute noch die Geschwindigkeit der Biogasbildung wurden verbessert. Bei der Grassilage haben sich die Ergebnisse sogar verschlechtert. Beim von der Faserstruktur härteren Grünroggen liegen die beiden Kurven sehr nahe, eine leichte Beschleunigung des Gasprozesses könnte herauszulesen sein, weil der Grünroggen dem ursprünglichen Einsatzgebiet des QZ etwas näherkommt.
4. Als wesentliches Ergebnis der Untersuchungen mit dem QZ kann festgehalten werden, dass weitere Untersuchungen zur Optimierung des Zusammenspiels von Aufbereitungsaggregat und Substrat erforderlich sind. Dabei sind Bedingungen zu berücksichtigen wie z. B. Substratwahl (TS-Gehalt beachten!), Qualität der Mischung beider Substrate durch den Bagger, Vorschubgeschwindigkeit der Förderschnecke, Zerkleinerungszeit, Dosiermenge pro Füllung, Dosierhäufigkeit usw.
5. Die Untersuchung der Veränderung einzelner Stellgrößen direkt am QZ im Zusammenspiel von QZ und Substrat könnten weitere fundierte Ergebnisse zum effektiven Einsatz des Aufbereitungsaggregates liefern.

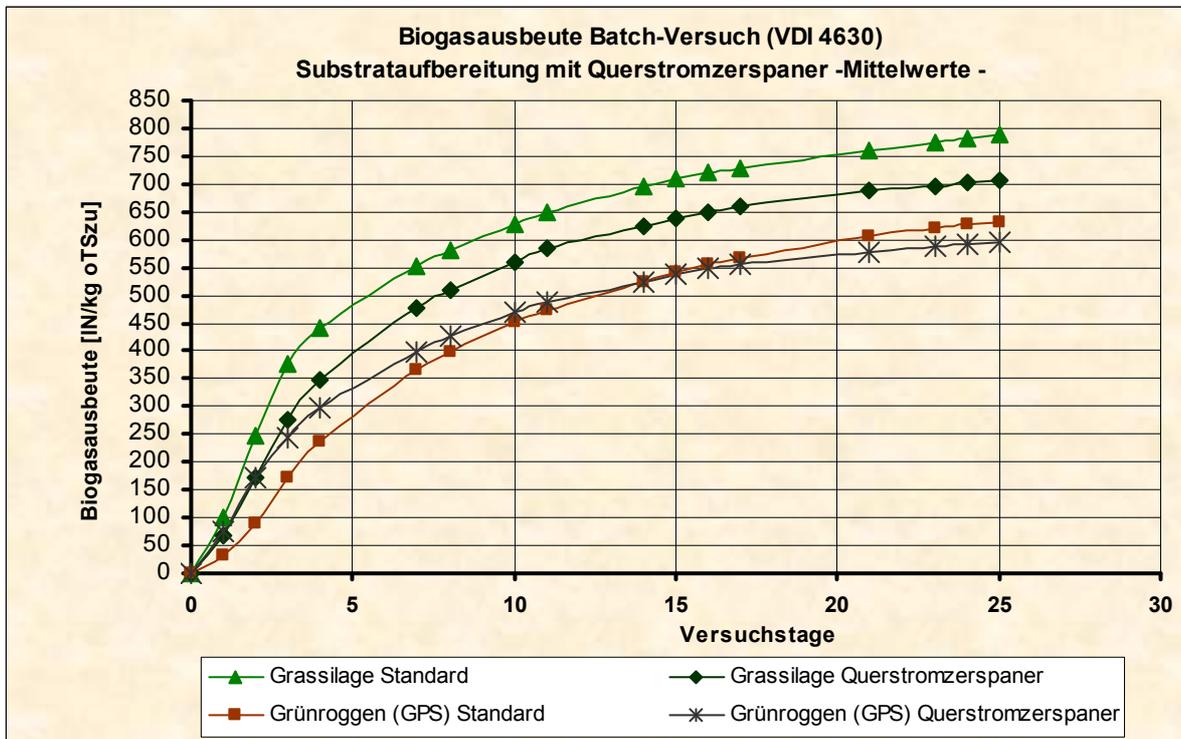


Diagramm 7: Verlauf der Biogasbildung aus Gras- und Grünroggensilage mit Querstromzerspaner

## 9 Modellkalkulation

Regional unterschiedliche Bedingungen bzw. Voraussetzungen führen zu verschiedenen Biogasanlagengrößen und -konzepten. Daraus resultieren wiederum deutliche Unterschiede in der Ökonomie, d. h. in den Leistungs- und Kostenpositionen sowie im Ergebnis. Aus diesem Grund können keine pauschalen Aussagen für alle sächsischen Biogasanlagen (BGA) gemacht werden.

Die nachfolgenden Modellbetrachtungen (Tabellen 6 bis 9) gehen von einer **410 kW<sub>el</sub>-Nassfermentationsanlage** aus (mittlere Leistung für die ca. 160 BGA in Landwirtschaftsbetrieben in Sachsen per 31.12.2010). Die Einzelwerte sind Durchschnittsangaben bzw. Richtwerte zur Orientierung.

Die Ergebnisse entsprechen theoretischen Werten, die in der Praxis einzelfallabhängig abweichen können. Mit dem Ziel, den Biogasertrag und die Energieausbeute zu steigern, ist im Rahmen der Feststoffeinbringung (Mist, Kosubstrate) eine Substrataufbereitungsanlage beispielhaft nachgerüstet worden. Die Kalkulation soll zeigen, zu welchen Änderungen beim Gasertrag sowie bei den einzelnen Kostenpositionen die Nachrüstung führen kann.

**Tabelle 6: Technische und verfahrenstechnische Annahmen**

Parameter	Maßeinheit	ohne Substrataufbereitung	mit Substrataufbereitung
Faulraumbelastung	kg oTS/m <sup>3</sup> FV*Tag <sup>1)</sup>	2,55	2,55
Hydraulische Verweilzeit	Tage	40	38
Prozessexterner Wärmenutzungsgrad	%	33	33
Elektrischer Wirkungsgrad des BHKW	%	37	37
Auslastung BHKW	Volllaststunden	8.000	8.000

<sup>1)</sup> Fermentervolumen

Bei den Feststoffen wurde eine Steigerung des spezifischen Gasertrages um 15 % zugrunde gelegt (Tabelle 9). Infolgedessen verringert sich die für die energetische Umwandlung benötigte Kosubstratmenge. Gleichzeitig sinkt der Energiebedarf für den Rührprozess.

**Tabelle 7: Charakteristik der Substrate**

Substrat	Gasertrag (Nm <sup>3</sup> /t oTS) ohne Aufbereitung	Gasertrag (Nm <sup>3</sup> /t oTS) mit Aufbereitung	Vollkosten (€/t FM)
Rindergülle mit Futterresten	320	320	-
Rindermist	450	517	-
Kosubstratgemisch	550	632	57

Der überwiegende Teil der sächsischen von Landwirten betriebenen Biogasanlagen wurde als Nebenanlage zur Tierproduktion errichtet. Aus diesem Grund wurden bei der Modellrechnung für den Wirtschaftsdünger keine Kosten angesetzt. Für das Kosubstratgemisch (Maissilage, Roggensilage – Ganzpflanze, Grassilage, Getreide) gilt das fertige Konservat in den Siloanlagen als Schnittstelle, für den Rindermist das Dunglager.

**Tabelle 8: Annahmen für die Investition und Kostenpositionen**

Einzelpositionen	Maßeinheit	ohne Substrataufbereitung	mit Substrataufbereitung
Spezifische Investition	€/kWel	4.600	4.860
Abschreibung	Jahre		
- Langlebige Güter		20	20
- Technik		7	7
- Feststoffeintrag		5	5
- Substrataufbereitung		0	7
- BHKW (*GOM)		7	7
Verzinsung	% von Anschaffungswert (A)	4	4
Versicherung	% von A	0,5	0,5
Reparaturen/Wartung ohne BHKW	% von A	3,5	3,5
Reparaturen/Wartung BHKW	Cent/ kWhel	1,5	1,5
Reparaturkostenzuschlag Feststoffe**	€/t	1	1
Reparaturen/Wartung Feststoffaufbereitung	% von A	0	0,1
Transporte	€/t	3,5	3,5
Prozessstrom	% der elektr. Arbeit	8	7
Energiebedarf Aufbereitung Kosubstrate	kWhel/t Kosubstrat	0	15
Energiebedarf Aufbereitung Rindermist	kWhel/t Rindermist	0	50
Prozesswärme	% der anfallenden Wärme	40	40
Externer Wärmenutzungsgrad	%	33	33
Arbeitszeitbedarf (gesamt), für Kosubstratgemisch	Akh/Tag	4	3,8
*GOM Gas-Otto-Motor **Zubringeinrichtungen			

**Tabelle 9: Wirtschaftlichkeit der Substrataufbereitung**

	Maßeinheit	ohne Substrat- aufbereitung	mit Substrat- aufbereitung	Differenz
<b>Gasertrag</b>	<b>m³/t oTS</b>			
- Rindergülle		320	320	0
- Rindermist		450	517	67
- Kosubstratgemisch		550	632	82
<b>Inputstoffe</b>	<b>t/Jahr</b>			
- Rindergülle		28.627	28.627	0
- Rindermist		2.891	2.891	0
- Kosubstratgemisch		5.000	4.050	-950
<b>Stromeinspeisung</b>	<b>kWh/Jahr</b>	<b>3.286.374</b>	<b>3.286.374</b>	<b>0</b>
Abschreibung	€/Jahr	184.103	198.329	14.286
Zinsansatz	€/Jahr	37.952	39.952	2.000
Versicherung	€/Jahr	9.488	9.988	500
Reparaturen/Wartung ohne BHKW	€/Jahr	66.415	66.415	0
Reparaturen/Wartung BHKW	€/Jahr	49.265	49.265	0
Reparaturkostenzuschlag Feststoffe (Mist,Kosubstrat)	€/Jahr	7.891	6.941	-950
Reparatur/Wartung Aufbereitung	€/Jahr	0	1.998	1.998
<b>Vollkosten Kosubstrate</b>	<b>€/Jahr</b>	<b>285.000</b>	<b>230.850</b>	<b>-54.150</b>
Transporte	€/Jahr	12.198	9.880	-2.318
Prozessenergie elektrisch (Rührenergie)	€/Jahr	42.040	36.807	-5.233
+ Energiebedarf Kosubstrataufbereitung	€/Jahr	0	9.720	9.720
+ Energiebedarf Aufbereitung Rindermist	€/Jahr	0	23.130	23.130
Prozessenergie thermisch	€/Jahr	93.737	93.737	0
Laboranalysen	€/Jahr	1.200	1.200	0
Arbeit (Akh/d; Akh/a; €/Akh)	€/Jahr	20.440	19.320	-1.120
Sonstige Kosten	€/Jahr	18.976	19.976	1.000
Kosteneinsparung	€/Jahr			-12.137

Die Modellkalkulation zeigt einen Kostenvorteil der Variante mit Substrataufbereitung in Höhe von rund 12.000 Euro.

Das Ergebnis kann in Abhängigkeit von den jeweils zutreffenden konkreten Praxisbedingungen im Einzelfall (Substratmix, Anlagenkonzept) sehr stark variieren.

# 10 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

## 10.1 Zusammenfassung

In Fortsetzung des Projektes „Aufarbeitung landwirtschaftlicher Biomasse für den Vergärungsprozess“ (2006-07/2008) wurde der Einfluss weiterer ausgewählter Substrataufbereitungsanlagen (Häcksler, Hammermühle, Querstromzerspaner) auf den Methanertrag im Labor untersucht.

Bei den analysierten Substraten lag der Fokus u. a. auf **verfahrenstechnisch problematischen Einsatzstoffen und auf Alternativkulturen**. Die Prozessmodellierung im kontinuierlichen Versuch war aus den unter Kap. 8.1.1 ausführlich dargelegten Gründen nicht zielführend. Es konnten lediglich die im Rahmen der Batchversuche erzielten Ergebnisse berücksichtigt werden.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Messfehler von 10 bis 20 Prozent u. a. in den Bereichen Probenahme, Analytik und Versuchstechnik auftreten können. Dies sollte bei der Wertung der Versuchsergebnisse Beachtung finden.

Im Einzelnen haben die Untersuchungen im Batch-Verfahren gezeigt, dass

- die Zerkleinerung vom Hybrid Sudangras/Sorghum bereits während des Erntevorganges nicht den gewünschten Erfolg brachte, d.h. nicht zu einer wesentlichen Effizienzsteigerung geführt hat,
- die mechanische Aufbereitung von sehr inhomogenem Material wie Rindermist in einer separaten Stufe vor der Dosierung in die Biogasanlage deutlich höhere Gasausbeuten bewirkte,
- bei Mais-, Grünroggen- (20 % TS) und Grassilagen (22 % TS) durch die mechanische Aufbereitung (Maissilage in Hammermühle, Grünroggen- und Grassilage im Querstromzerspaner) vor dem Eintrag in die Biogasanlage zwar eine bessere Dosier- und Rieselfähigkeit des Substrates erreicht wurde, die im Versuch bei Mais zu einer geringfügigen Erhöhung (unter 10 %) und bei Grünroggen- und Grassilage jedoch zu keiner Erhöhung der Gasausbeute geführt hat.

Aufgrund der Unterschiede in der Praxis der sächsischen Biogasproduktion konnten keine pauschalen Aussagen zur Ökonomie getroffen werden. Demzufolge handelt es sich um eine Modellkalkulation mit Richtwerten zur Orientierung.

Insgesamt kann eingeschätzt werden, dass das Ziel des Vorhabens „Effizienzsteigerung durch Verbesserung des Substratabbaus“ nicht bei allen untersuchten Substraten im Labormaßstab nachgewiesen werden konnte. Deutliche Effekte waren nur bei sehr inhomogenem Material, konkret Rindermist, festzustellen.

## 10.2 Schlussfolgerungen

Beim Einsatz von inhomogenen Substraten wie Rindermist ist aus prozesstechnischer Sicht und zur Erzielung optimaler Gaserträge die Substrataufbereitung vor dem Eintrag in die Biogasanlage zwingend erforderlich.

Durch den Substrataufschluss von homogenen sowie inhomogenen Substraten können sich folgende Vorteile ergeben:

- prozesstechnischer Art: bessere Fließfähigkeit, Zerstörung der Schwimmdecke, geringere Rührleistung und -zeiten
- bei den laufenden Kosten aufgrund eines geringeren Energieaufwandes beim Rühren
- durch die mögliche Reduzierung der Flächen für den erforderlichen Substratanbau aufgrund einer höheren Gasausbeute

Inwieweit diese Vorteile ausreichen, um die Mehrkosten (Investition, zusätzliche Betriebskosten) für die Aufbereitung abzudecken, ist betriebsindividuell sorgfältig zu ermitteln. Unter den in der Modellkalkulation unterstellten Rahmenbedingungen können bei einer Anlage mit 410 kW<sub>el</sub> durch die zusätzliche Aufbereitung jährliche Kosten in Höhe von ca. 12.000 EUR eingespart werden.

Aus versuchstechnischer Sicht hat sich gezeigt, dass die Untersuchungen zum Substrataufschluss nur dann zielführend sind, wenn Aufbereitungsaggregat und Inputmaterial sorgfältig aufeinander abgestimmt sind. Zukünftig sollten unabhängige Untersuchungen von Desintegrationsverfahren im großtechnischen Maßstab in Abhängigkeit vom Substrat (bspw. Landschaftspflegematerial, Alternativkulturen) und vom Biogasanlagenkonzept in Betrieben mit Biogasanlage geplant und durchgeführt werden.

Dabei bedarf es dringend einer Vereinheitlichung der Probenahme, Analytik sowie Versuchstechnik mit dem Ziel, im Ergebnis zukünftiger Untersuchungen eine gewisse Vergleichbarkeit der Messwerte herzustellen.

Eine Verringerung des Messfehlers kann dabei durch Maßnahmen wie

- Erhöhung der Anzahl von unabhängigen Praxisversuchen
- Verbesserung der Mess- und Versuchstechnik
- Vereinheitlichung der Analytik in der Biogasbranche

erreicht werden.

## 10.3 Handlungsempfehlungen

Die Problematik der Effizienzsteigerung von Biogasanlagen wird in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen, insbesondere im Zusammenhang mit der Erschließung von Potenzialen und Minimierung des Flächenbedarfs für die Energieerzeugung.

Der Substrataufschluss kann dazu einen Beitrag leisten.

Zwingende Voraussetzung ist jedoch, dass bei der Planung einer Neuanlage bzw. bei der Nachrüstung einer bestehenden Biogasanlage sorgfältig eine Abstimmung von Aufbereitungsaggregat und Substrat erfolgt. Die auf dem Markt vorhandenen verschiedenen Substrataufschlussverfahren können mit mehr oder weniger Aufwand nachgerüstet werden bzw. zum Einsatz kommen.

Ökonomisch sinnvoll ist der Einsatz der Desintegration nur dann, wenn die aus der Gasertragsteigerung erzielbare zusätzliche Vergütung die aus der Nachrüstung resultierenden Zusatzkosten übersteigt.

# 11 Literatur

- /1/ BRÜCKNER, C. & WEIß, D. (2008): Biomasseaufbereitung zur Vergärung. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft Heft 19/2008
- /2/ VDI-RICHTLINIE NR. 4630 (2006): Vergärung organischer Stoffe
- /3/ RICHTLINIEN FÜR DIE DURCHFÜHRUNG VON LANDWIRTSCHAFTLICHEN WERTPRÜFUNGEN UND SORTENVERSUCHEN, Bundessortenamt, Juni 2000; Überarbeitete Richtlinie Mais, März 2008
- /4/ RICHTLINIE FÜR DIE PROBENAHME, PROBENAUFBEREITUNG UND PROBENTROCKNUNG VON SILOMAIS-GANZPFLANZEN FÜR QUALITÄTUNTERSUCHUNGEN MIT DER NAH-INFRAROT-REFLEXIONS-SPEKTROSKOPIE (NIRS), Deutsches Maiskomitee e.V., Bonn, 12.05.1998
- /5/ SCHWARZ, B.: Fraunhofer IKTS Dresden, Messungen und persönliche Mitteilungen

**Herausgeber:**

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie  
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden  
Telefon: + 49 351 2612-0  
Telefax: + 49 351 2612-1099  
E-Mail: [lfulg@smul.sachsen.de](mailto:lfulg@smul.sachsen.de)  
[www.smul.sachsen.de/lfulg](http://www.smul.sachsen.de/lfulg)

**Autoren:**

Dr. Claudia Brückner, Thomas Sawatzki  
Abteilung Grundsatzangelegenheiten Umwelt, Landwirtschaft, Ländliche Entwicklung/Referat Betriebs-, Umweltökonomie, Markt

**Redaktion:**

Abteilung Grundsatzangelegenheiten Umwelt, Landwirtschaft, Ländliche Entwicklung/Referat Betriebs-, Umweltökonomie, Markt  
Dr. Claudia Brückner  
Telefon: + 49 351 2612-2522  
Telefax: + 49 351 2612-2499  
E-Mail: [Claudia.Brueckner@smul.sachsen.de](mailto:Claudia.Brueckner@smul.sachsen.de)

**Redaktionsschluss:**

15.09.2011

**ISSN:**

1867-2868

**Hinweis:**

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <http://www.smul.sachsen.de/lfulg/6447.htm> heruntergeladen werden.

**Verteilerhinweis**

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.