



Das Lebensministerium



Biogas aus Co- und Monofermentation

Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Heft 18/2009

Freistaat  Sachsen

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

**Untersuchung und Bewertung organischer Stoffe aus landwirtschaftlichen Betrieben zur
Erzeugung von Biogas in Co- und Monofermentationsprozessen**

Dr.-Ing. Saskia Wesolowski, Dipl.-Ing. (FH) Erik Ferchau, Prof. Dr.-Ing. Dimosthenis Trimis

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	1
2	Motivation und Zielstellung	1
3	Überblick über die eingesetzten Substrate	2
4	Aufbau der Laborbiogasanlage	3
4.1	Batch-Gärtests.....	3
4.2	Semi-kontinuierlich betriebene Fermenter	5
4.3	Verwendete Messtechnik und Analysemöglichkeiten	7
5	Versuchsdurchführung	9
5.1	Batch-Gärtests.....	9
5.2	Kontinuierliche Versuche	9
6	Ergebnisse	12
6.1	Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse	12
6.2	Vergleich der Ergebnisse der untersuchten Substrate	29
7	Zusammenfassung	41
	Literaturverzeichnis	45

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes

Batch:		Batchversuch
C/N:		Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnis
FAL:		Bundes-Forschungsanstalt für Landwirtschaft
FID:		Flammen-Ionisations-Detektor
FM:	[kg], [t]	Frischmasse
FOS:	[mg/l]	flüchtige organische Säuren
FV:		Fermentervolumen
GA:	[m ³ i.N./kg oTS]	Gasausbeute
GP:	[m ³ i.N./ (m ³ FV* d)]	Gasproduktion
GPS:		Ganzpflanzensilage
HPLC:		High pressure liquid chromatography
MGA:	[m ³ i.N./kg oTS]	Methangasausbeute
NfE:		Stickstoff (N)-freie Extrakte
oTS:	[%]	organische Trockensubstanz
RB:	[kg oTS/(m ³ FV* d)]	Raumbelastung
TAC:	[mg/l]	(Totaler) gesamter anorganischer Kohlenstoff (Carbon)
TS:	[%]	Trockensubstanz
VQ:	[%]	Verdaulichkeitsquotient
Θ:	[d]	hydraulische Verweilzeit

1 Vorwort

Aufbauend auf mehreren Forschungsprojekten, die auf die Gewinnung von Erkenntnissen zur fermentativen Umsetzung von landwirtschaftlichen Substraten zu Biogas abzielen, widmen sich die vorgestellten Untersuchungen der Weiterführung dieser Thematik. Dabei konzentriert sich der Schwerpunkt der Untersuchungen auf Substrate und Substratkombinationen, die insbesondere für Sachsen relevant sind. Die in diesem Bericht vorgestellten aktuellen Forschungsergebnisse wurden in dem Projekt „Untersuchung und Bewertung organischer Stoffe aus landwirtschaftlichen Betrieben zur Erzeugung von Biogas in Co- und Monofermentationsprozessen“ erzielt. Dieses Projekt wurde in den Jahren 2006 und 2007 an der TU Bergakademie Freiberg durchgeführt und mit Mitteln des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft gefördert. Die vorliegende Darstellung ist eine Kurzfassung des Abschlussberichtes [WALTER et al. 2007] und stellt die wesentlichen Ergebnisse vor. Weiterhin enthält der vorliegende Bericht die Ergebnisse fortgeführter Versuche und Analysen, die zum Ende des Projektes noch nicht vorlagen und daher nicht im Abschlussbericht [WALTER 2007] enthalten sind.

2 Motivation und Zielstellung

Die Datenbasis bezüglich der Fermentation und insbesondere der Cofermentation organischer Abfall- und Reststoffe aus der Landwirtschaft weist beträchtliche Lücken auf. Gleiches gilt für die Mono- und Cofermentation vieler nachwachsender Rohstoffe (Nawaro). Bei der Vielzahl potenzieller Einsatzstoffe für die Fermentation ist hier naturgemäß der Forschungsbedarf immens, insbesondere im Hinblick auf die Vergärung von Mischsubstraten. Deshalb bestand das vordringliche Anliegen darin, aufbauend auf den vorangegangenen Projekten [EICHERT 2003] und [EICHERT 2005] im Projekt „Untersuchung und Bewertung organischer Stoffe aus landwirtschaftlichen Betrieben zur Erzeugung von Biogas in Cofermentationsprozessen“ die gewonnenen Ergebnisse zu verifizieren und das Spektrum der untersuchten Substrate zu erweitern. Dazu wurden organische Stoffe, die in Sachsen zur Verfügung stehen, auf ihre grundsätzliche Vergärbarkeit, Gasproduktion und die Gaszusammensetzung des entstehenden Biogases sowie der Grenzen der Fermentation hinsichtlich der Zugabemengen untersucht.

Die Ergebnisse sollen zur Optimierung des Vergärungsprozesses in Praxisanlagen beitragen, um abhängig vom eingesetzten Substrat die bestmögliche Anlagenauslastung und damit Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage zu erreichen. Für alle möglichen Verwertungspfade des erzeugten Biogases wie z.B. die Verstromung im BHKW, eine Aufbereitung auf Erdgasqualität und anschließende Einspeisung ins Erdgasnetz oder die Nutzung als Treibstoff in Fahrzeugen ist die substratabhängig erzielbare Rohgasqualität von größtem Interesse.

Biogas besteht im Wesentlichen aus Methan (CH_4) und Kohlenstoffdioxid (CO_2). Bei der Beurteilung der Biogaserzeugung stellen der Methananteil als brennbarer Bestandteil und die erzeugte Gasmenge die wichtigsten zu betrachtenden Größen dar. Die Maximierung beider Größen steht im

Vordergrund der Bemühungen. Für den Fall, dass sich beide gegenläufig verhalten, muss ein Optimum gefunden werden.

3 Überblick über die eingesetzten Substrate

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die im Berichtszeitraum untersuchten Substrate. Die Auswahl und die Festlegung der Rangfolge erfolgten in Abstimmung mit dem Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.

Im Rahmen des Projektes wurden in Monofermentation die Substrate Hühnerkot, Ganzpflanzensilage Triticale, Kleegrassilage, Maissilage und Zuckerrübe untersucht. Beim Einsatz von Ganzpflanzensilage Triticale und Zuckerrübe in Monofermentation konnte keine stabile Vergärung erreicht werden, sodass hier keine auswertbaren Ergebnisse vorliegen. Auch für diese Substrate können jedoch Ergebnisse aus den Batch- und Cofermentationsversuchen angegeben werden. Dazu muss der Biogasanteil, der dem Basissubstrat Rindergülle zuzurechnen ist, vom Gesamtmethanertrag abgezogen werden. Dieses Verfahren ist in Kapitel 6.2 ausführlich erläutert.

Bei Versuchen zur Cofermentation diente Rindergülle oder Hühnerkot als Basissubstrat; als Co-substrate wurden Ganzpflanzensilage Triticale, Kleegrassilage, Maissilage (zwei verschiedene Sorten), Luzernegrassilage, Zuckerrübe, Gehaltsrübe, kaltgepresster Rapspresskuchen und fusarienbelasteter Triticaleschrot eingesetzt.

Die verwendete Maissilage stammte aus Gründen der Verfügbarkeit von zwei verschiedenen Standorten. Die im folgenden mit Sorte 1 bezeichnete Maissilage wurde von der Colmnitzer Agrargenossenschaft e.G. besorgt, die mit Sorte 2 bezeichnete Maissilage stammt von der Agrargenossenschaft Memmendorf e.G. Obwohl die Futterwertanalysen (als Anlage in [WALTER 2007]) beider Sorten nur geringe Abweichungen bei der Qualität der Silagen erkennen lassen, wird bei der Auswertung der Ergebnisse, insbesondere der Batchversuche, deutlich, dass selbst diese geringfügigen Unterschiede in der Zusammensetzung merklich die Gasausbeute beeinflussen. (vgl. Abbildung 16)

Tabelle 1: Überblick über die in Mono- und Cofermentation untersuchten Substrate

Monosubstrate	Mischsubstrate	
Hühnerkot	Basissubstrate	Cosubstrate
Silagen • Kleeegrassilage • Maissilage • Ganzpflanzensilage Triticale	• Rindergülle • Hühnerkot	• Maissilage • Ganzpflanzensilage Triticale • Kleeegrassilage • Luzernegrassilage • fusarienbelastete Triticale (Schrot) • Zuckerrüben • Gehaltsrüben • Rapspresskuchen (kalt gepresst)
Zuckerrüben		

Das Ziel der Untersuchung mit fusarienbelastetem Triticaleschrot war die Gewinnung von Erkenntnissen über die Möglichkeit der Nutzung belasteter organischer Partien zur Biogasgewinnung. Dazu wurde untersucht, ob Mykotoxine im Getreide die Biogasbildung hemmen. Weiterhin sollte die Frage beantwortet werden, ob die im Gärrest enthaltenen Nährstoffe anschließend in den landwirtschaftlichen Stoffkreislauf zurückgeführt werden können. Deshalb wurde auch geprüft, ob die Mykotoxinbelastung während der Vergärung reduziert wird. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in [HANTSCHMANN 2008] veröffentlicht.

Darüber hinaus wurde in zwei Versuchen die Wirksamkeit von Enzymen zum Voraufschluss der Biomasse am Beispiel von Luzernegrassilage und Ganzpflanzensilage Triticale untersucht. Dazu wurden unter sonst gleichen Versuchsbedingungen jeweils ein Versuch mit sowie ein Versuch ohne Enzymzugabe durchgeführt.

4 Aufbau der Laborbiogasanlage

4.1 Batch-Gärtests

Der einfachste Versuchsaufbau zur praktischen Ermittlung der Gas- und Methangasausbeuten von Biomasse ist der Batch-Gärtest – ein diskontinuierlicher Test, bei dem organische Substrate oder Co-Substrate unter definierten anaeroben Bedingungen einer Vergärung unterzogen werden und bei dem Aussagen zur grundsätzlichen Umsetzbarkeit der Biomasse zu Biogas, zu eventuell auftretenden Hemmungen des Prozesses und zur Gasausbeute gewonnen werden können.

Der Versuchsaufbau der am Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik durchgeführten Batch-Versuche entspricht dem eines Bergedorfer Gärtests. Die Gärversuche wurden in Übereinstimmung mit der VDI-Richtlinie 4630 „Vergärung organischer Stoffe“ durchgeführt.

Die Testmedien befanden sich in Glasbehältern mit je 2 l Fassungsvermögen. Die Behälter wurden in einem Wasserbad gelagert, dessen Temperatur mittels Thermostatregelung bei konstant 36 °C (mesophil) eingestellt war. Zur Erfassung der gebildeten Biogasmenge wurden Milligasähler der Firma Ritter eingesetzt. Das Gasvolumen wurde täglich direkt am elektronischen Zähler der Gasuhr abgelesen und in ein Excel-Datenblatt zur grafischen Darstellung und Auswertung eingegeben. Nach dem Passieren des Gaszählers wurde das Gas in einem Folienbeutel gesammelt und unregelmäßig, je nach produzierter Gasmenge, in einem Flammen-Ionisations-Detektor (FID) auf seinen Methangehalt hin analysiert.

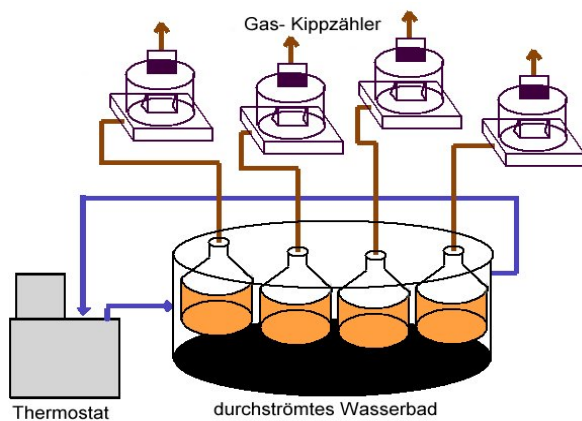


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Batch-Versuchsaufbaus (links), im Wasserbad temperierte Glasbehälter für die Batch-Versuche (rechts)



Abbildung 2: 2 l-Glasbehälter für Batch-Versuche mit Stopfenverschluss und Gas-schlauch (links), Milligasähler der Firma Ritter und Folienbeutel für die Gassammlung und -speicherung (rechts)

4.2 Semi-kontinuierlich betriebene Fermenter

Für die kontinuierlichen Untersuchungen zur Vergärung standen am Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik der TU Bergakademie Freiberg vier Fermenter zur Verfügung. Die wesentlichen Komponenten sind in Abbildung 3, 4 und 6 dargestellt. Die Behälter waren als doppelwandige Glaszylinder ausgeführt, in deren Zwischenraum Wasser zur Temperierung des Fermenterinhalt zirkulierte. Mit einem Thermostat wurde die gewünschte Temperatur des Fermenters eingestellt. Zwei der Fermenter waren baugleich und hatten die Nummerierung 1 und 2 (Foto in Abb. 4; rechter Behälter). Deren innere Glaszylinder hatten ein Fassungsvermögen von jeweils ca. 30 Liter. Davon wurden effektiv 23 Liter mit Substrat befüllt. Die Fermenter waren als Rührfermenter konzipiert und mit einem kombinierten Anker- und Schrägblattrührer ausgestattet. Weiterhin standen zwei kleinere Fermenter mit einem effektiv nutzbaren Volumen von 1,8 und 2,5 Litern zur Verfügung. Diese beiden Fermenter hatten die Nummerierung 3 und 4 (Foto in Abbildung 4, Behälter links und Mitte). Um die wesentlichen Prozessparameter (pH-Wert, Substrattemperatur, Gasdruck) zu überwachen, waren im Fermenterdeckel der Fermenter 1 und 2 entsprechende Sensoren angebracht. Die Messwerte wurden viertelstündlich von einem Datenlogger aufgenommen. Der pH-Wert der Fermenter 3 und 4 wurde einmal täglich manuell über eine pH-Wert-Sonde gemessen. Die Substrattemperatur im Fermenter 3 wurde automatisch mit dem Datenlogger aufgezeichnet. Da die Beheizung der Fermenter 3 und 4 über eine parallel geschaltete Warmwasserversorgung erfolgt, kann vorausgesetzt werden, dass die Substrattemperatur in beiden Fermentern gleich ist.

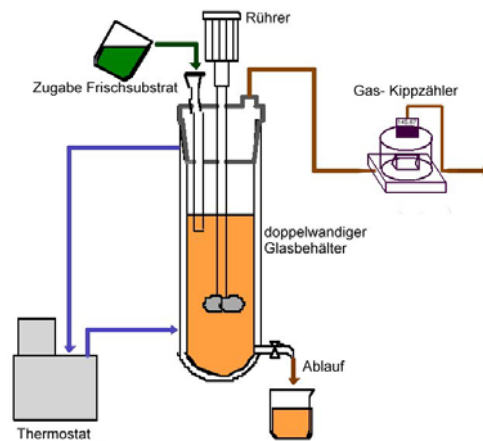


Abbildung 3: Versuchsaufbau semi-kontinuierliche Versuche

Die Zugabe von Frischsubstrat erfolgte manuell über einen Trichter. Die Gasmengenmessung erfolgte wie in den Batchversuchen mit Mikrogaszählern. Außerdem war an den Gasleitungen ein Flammenionisationsdetektor (FID) zur Bestimmung des Methangehaltes angeschlossen. Mit diesem Gerät wurde der Methangehalt des entstehenden Biogases einmal täglich gemessen.

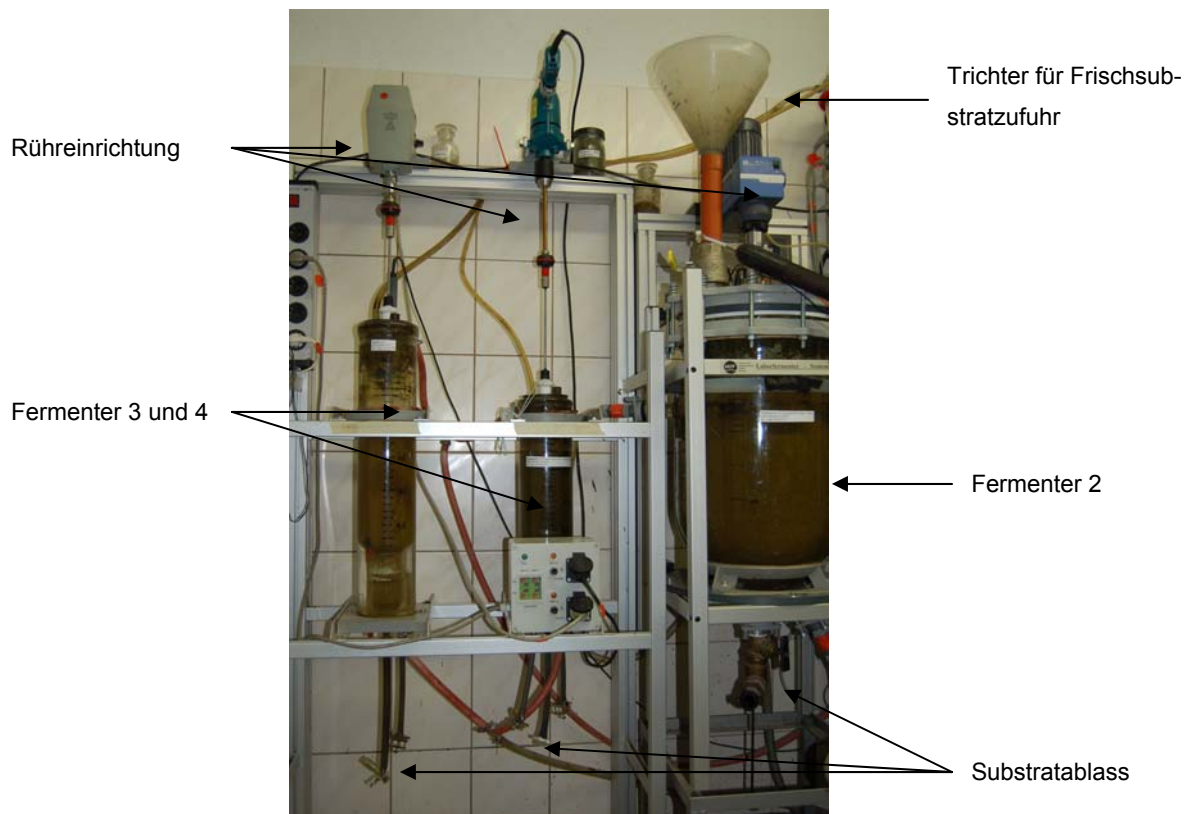


Abbildung 4: Fermenter 2, 3 und 4 der Laborbiogasanlage für semi-kontinuierliche Versuche

4.3 Verwendete Messtechnik und Analysemöglichkeiten

Nachfolgend werden die wesentlichsten Komponenten der Versuchsanlage und Analysemöglichkeiten kurz beschrieben.

Bestimmung des Gasvolumens

Die Arbeitsweise des Milligaszählers der Firma Ritter entsprach der eines Kippzählers (siehe Abbildung 5). Die Messkammer aus Acrylglas war mit einer Spezial-Auftriebsflüssigkeit (ölhaltiges Polymer) gefüllt. Das zu messende Biogas strömte über Einlassstutzen in den Gasauffangbehälter bis der Auftrieb des Gases so hoch war, dass es zu einem ruckartigen Umklappen über die Kippachse kam und das aufgefangene Gas entweichen konnte. Die Kippanzahl lieferte über einen Kontaktgeber eine Aussage über das gemessene Gasvolumen.



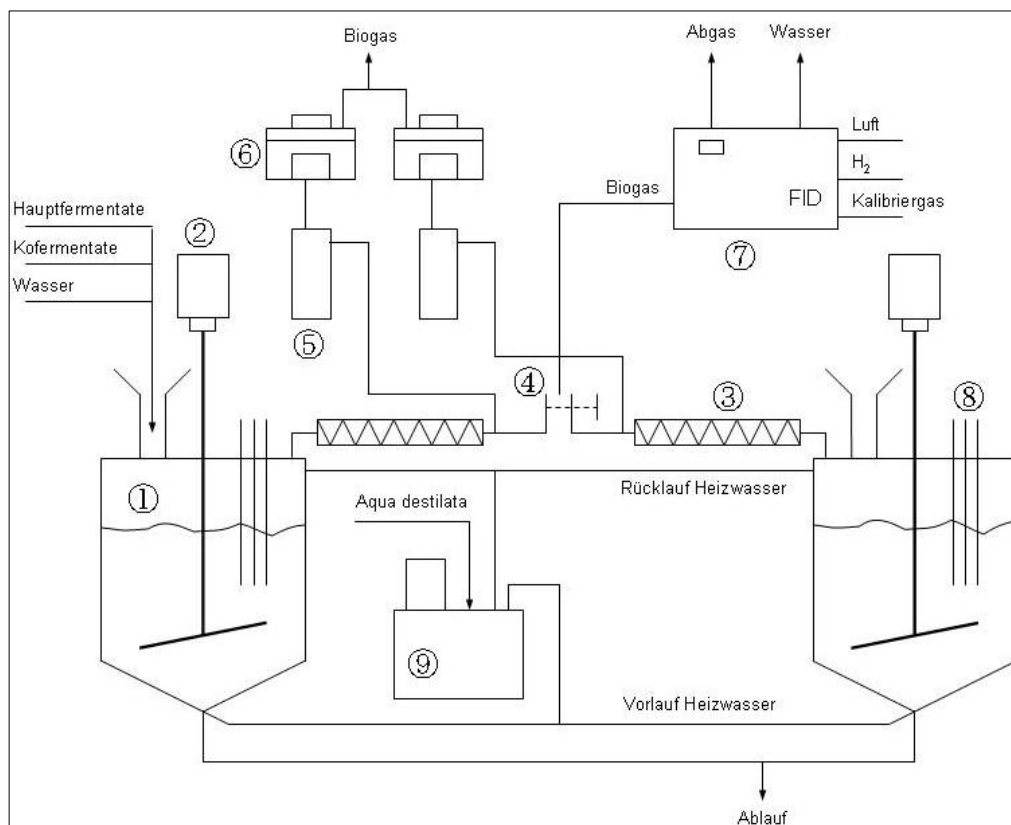
Abbildung 5: Milligaszähler

Bestimmung des Methangehaltes

Zur Bestimmung des Methangehaltes des produzierten Biogases wurde ein Flammenionisationsdetektor der Firma TESTA Typ FID 123 verwendet. Zum Betrieb des FID wurden Brenn- und Kalibriergas benötigt.

Bestimmung des H_2S -Gehaltes im Biogas

Der Schwefelwasserstoffgehalt im Biogas wurde im Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (IEC) der TU Bergakademie Freiberg nasschemisch mittels Titration analysiert.



- | | | | |
|---|------------------------|---|---------------------------------------|
| 1 | Fermenter | 6 | Gaszähler (Milligascounter) |
| 2 | Rührwerk | 7 | Messgerät für Methangehalt (FID) |
| 3 | beheizte Probenleitung | 8 | Temperatur-, Druck-, pH- Wert- Sonden |
| 4 | Probenwegschalter | 9 | Thermostat mit Wasserbad |
| 5 | Kondensatabscheider | | |

Abbildung 6: Komponenten und Medienströme der Versuchsanlage

Bestimmung des C/N-Verhältnisses

Das Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnis des Substrates wurde am Institut für Technische Chemie und Biotechnologie der TU Bergakademie Freiberg bestimmt.

Bestimmung flüchtiger Fettsäuren (speziell Essig- und Propionsäure)

Flüchtige Fettsäuren wurden am Institut für Umweltverfahrenstechnik der TU Bergakademie Freiberg mittels HPLC (High Pressure Liquid Chromatography) ermittelt.

Bestimmung des FOS/TAC-Verhältnisses

Zur Beurteilung der Stabilität des Fermentationsprozesses wurde der Parameter FOS/TAC nasschemisch mittels Titration bestimmt. Dabei wurden die Konzentrationen am gesamten anorganischen Kohlenstoff (total anorganic carbon TAC), angegeben als Calciumkarbonat, und die Konzentration an flüchtigen organischen Fettsäuren (FOS) mittels Titration analysiert. Einzelheiten zur Bestimmung des FOS/TAC sind in [OHLY 2006] beschrieben.

Für die weitere ausführlichere Darstellung des Versuchsaufbaus und der verwendeten Messtechnik wird auf die Berichterstattung in [WALTER et al. 2007] und [OHLY 2006] verwiesen.

5 Versuchsdurchführung

5.1 Batch-Gärtests

Die Gärversuche wurden in Übereinstimmung mit der VDI-Richtlinie 4630 „Vergärung organischer Stoffe“ durchgeführt.

Für die durchgeführten Batch-Tests galten folgende Randbedingungen:

- mesophiler Temperaturbereich (34 bis 37 °C)
- optimaler pH-Wert- Bereich (6,5 bis 8,0)
- Batch-Betrieb (einmalige Substratzugabe mit Impfmateriel im Ansatz)
- Batch-Versuche wurden nach VDI-Norm 4630 durchgeführt. Der Anteil an organischer Trockensubstanz aus Impfschlamm betrug im Batch-Ansatz 1,5 – 2 %, der Anteil an organischer Trockensubstanz aus dem Substrat im Verhältnis zum Impfschlamm betrug $\leq 0,5$
- Versuchsdauer variabel nach Abbruchkriterium entsprechend VDI 4630, max. 35 d
- Aufmischen erfolgte durch tägliches Schütteln der Ansätze
- unregelmäßige Messung des Methangehalts je nach erzeugter Gasmenge

Für den Ansatz wurden die Zugabemengen für das Impfsubstrat, das zu vergärende Substrat und falls notwendig Wasser zur Verdünnung errechnet, um die geforderten Parameter für die oTS-Gehalte laut VDI 4630 einzuhalten und einer Versäuerung des Batchansatzes durch zu große Mengen an frischem Substrat vorzubeugen. Als Impfsubstrat - auch Impfschlamm genannt – wurde ausgehungertes Gärrest aus vorangegangenen Versuchen eingesetzt. Im Abstand von ca. zwei Wochen wird dem Impfschlamm regelmäßig ein wenig frische Rindergülle hinzugefügt, damit die Bakterien im Schlamm aktiv bleiben.

Am Ende des Versuchs wurde als Ergebnis die Gasausbeute $GA_{\max}$ und die Methangasausbeute $MAG_{\max}$ ermittelt. Außerdem wurde der pH-Wert zum Ende des Versuchs vermerkt.

5.2 Kontinuierliche Versuche

Vor der täglichen Beschickung des Fermenters mit Frischsubstrat wurde die entsprechende Menge an ausgefaultem Substrat über die am Boden befindliche Ablaufeinrichtung (Ventil und Schlauch) abgelassen. Damit durch den entstehenden Unterdruck im Fermenter beim Ablassen keine Sperrflüssigkeit aus dem Gasmengenzähler angesaugt wurde, musste vorher die Gasleitung vom Fermenter getrennt werden. Die Gasleitung war über eine Steckverbindung mit dem Fermenter verbunden. Nach dem Trennen war diese automatisch gasdicht.

Die Gasmengenmessung erfolgte wie in den Batchversuchen mit Mikrogaszählern. Außerdem war an den Gasleitungen ein Flammenionisationsdetektor (FID) zur Bestimmung des Methangehaltes

angeschlossen. Mit diesem Gerät wurde der Methangehalt des entstehenden Biogases einmal täglich gemessen.

Die Zugabe von Frischsubstrat erfolgte einmal am Tag manuell über einen Trichter, der am Fermenterdeckel befestigt war. Das Frischsubstrat wurde in den Trichter gefüllt und durch Öffnen eines gasdichten Kugelhahnes in den Fermenter gegeben.

Hydraulische Verweilzeit

Die hydraulische Verweilzeit wurde bei allen Versuchen mit Ausnahme der Versuche mit Rindergülle und fusarienbelastetem Triticaleschrot auf 30 Tage eingestellt. Die Einstellung erfolgte durch Verdünnung mit Wasser. Bei den Versuchen Rindergülle mit fusarienbelastetem Triticaleschrot sollte die Verdünnung möglichst niedrig liegen, um die Konzentrationen an Mykotoxinen im Gärrest noch messen zu können. Deshalb wurde für diese Versuche eine Verweilzeit von 80 Tagen gewählt.

Raumbelastung (vgl. Abbildung 7 und 8)

Die Versuche wurden als Belastungsversuche mit steigender Raumbelastung durchgeführt. Je nach Substrat wurde bei einer niedrigen Raumbelastung begonnen. Anschließend wurde die Raumbelastung schrittweise gesteigert, um die Stabilitätsgrenze des Prozesses zu ermitteln. Die Steigerung der Raumbelastung erfolgte in der Regel in Schritten von 2 über 3 zu 4 bis maximal 4,5 kg oTS/(m³ FV*d) mit Ausnahme der Versuche mit fusarienbelastetem Triticaleschrot.

Die Wahl der Anfangsraumbelastung und der Steigerungsintervalle erfordert von Anlagenfahrern in der Praxis bzw. vom Mitarbeiter im Labor ein gutes „Fingerspitzengefühl“. Grundsätzlich ist die Raumbelastung bei energiereichen und leicht abbaubaren Substraten niedriger zu wählen. Sofern die Substratzusammensetzung konstant bleibt und die Steigerung der Raumbelastung moderat erfolgt, können jedoch auch energiereiche Substrate bei vergleichsweise hohen Raumbelastungen vergoren werden. Die Bakterien zeigten hier mitunter eine erstaunliche Adaptionsfähigkeit.

oTS-Mischungsverhältnis (vgl. Abbildung 7 und 8)

Das oTS-Mischungsverhältnis gibt Auskunft über die Anteile an Grundsubstrat und Coferment in der Mischung bezogen auf die organische Trockensubstanz. Überwiegend wurde bei konstant gehaltener hoher Raumbelastungsstufe mit einer Mischung von 50 % Grundsubstrat (Gülle oder Hühnerkot) und 50 % Cosubstrat begonnen und über 20/80, 10/90 auf 100 % Cosubstratanteil bzw. Monofermentation gesteigert.

Für die durchgeführten Vergärungsversuche galten zusammengefasst folgende Randbedingungen:

- mesophiler Temperaturbereich bei 34 bis 37 °C
- optimaler pH-Wert-Bereich bei 6,5 bis 8,0
- einstufige Prozessführung im volldurchmischten Reaktor

- semi-kontinuierlicher Betrieb (täglich ein- bis mehrmalige manuelle Substratzugabe und Gärrest-Entnahme, Gewährleistung von kontinuierlichem Wochenendbetrieb)
- Raumbelastung entsprechend der Prozessstabilität (beurteilt nach: pH-Wert, Gasmenge, Methangehalt, freie Fettsäuren, FOS/TAC); Ziel: Raumbelastung $RB = 4 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \text{ FV} \cdot \text{d})$ und höher, bis zur Prozessstabilitätsgrenze, bei kritischen Substraten Raumbelastung $RB = 1 - 2 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \text{ FV} \cdot \text{d})$
- oTS-Mischungsverhältnis bei Cofermentation (Grundsubstrat/Coferment) 50/50, 80/20 bis 10/90
- Hydraulische Verweilzeit $\Phi = 30 \text{ d}$ und $\Phi = 80 \text{ d}$ bei den Versuchen mit fusarien-belastetem Triticaleschrot
- Rührbetrieb in individuell an das Substrat angepassten Intervallen
- Rührintensität nach Bedarf
- Zerkleinerung von langfasrigem Material auf Schnittlängen von 1 bis 4 cm
- regelmäßige Probennahme für Analyse von TS, oTS, freien Fettsäuren, FOS/TAC, pH-Wert, und Ammoniumgehalt

Bei den Versuchen mit Silagen ergaben sich aufgrund erforderlicher Korrekturen der im Labor (Trockenschrank bzw. Glühofen) nach DIN [DIN 38414] ermittelten Werte für Trockensubstanz (TS) und organische Trockensubstanz (oTS) Raumbelastungsstufen, die von den geplanten Werten geringfügig abweichen. Die TS-Korrektur ist notwendig, da in den Silagen flüchtige Gärsäuren enthalten sind, die von den Mikroorganismen im Fermentationsprozess umgesetzt werden, bei der TS-Bestimmung im Labor jedoch entweichen und somit das Ergebnis verfälschen. In den Versuchen wurde zunächst die Raumbelastung mit den im Labor ermittelten Werten für TS und oTS auf ganze Werte wie 2, 3 und 4 $\text{kg oTS}/(\text{m}^3 \text{ FV} \cdot \text{d})$ eingestellt. Da die tatsächliche Raumbelastung jedoch geringfügig höher lag, war eine Korrektur notwendig. Diese Korrektur erfolgte mit Hilfe von Daten aus den Futterwertanalysen. Da diese Daten erst im Nachhinein, d.h. nach Beginn der Versuche zur Verfügung standen, sind durch die nachträglichen Korrekturen der Raumbelastung in der Auswertung zum Teil Werte wie 2,1, 3,1, 3,3, 4,1 und 4,2 $\text{kg oTS}/(\text{m}^3 \text{ FV} \cdot \text{d})$ angegeben. Für die Korrektur der TS und daraus der oTS-Anteile wurden folgende Beziehungen nach Weißbach und Kuhla [WEIßBACH; KUHLA 1995] verwendet:

- korrigierte TS (%) = $0,975 \times \text{ermittelte TS (\%)} + 2,08$ (für alle Silagen außer Maissilage)
- korrigierte TS (%) = $0,96 \times \text{ermittelte TS (\%)} + 2,22$ (für Maissilage)

6 Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes wurden Versuche mit den Monosubstraten Hühnerkot, Ganzpflanzensilage Triticale, Kleegrassilage, Maissilage und Zuckerrübe durchgeführt. Beim Einsatz von Ganzpflanzensilage Triticale und Zuckerrübe in Monofermentation konnte keine stabile Vergärung erreicht werden, sodass für diese Substrate in Monofermentation keine auswertbaren Ergebnisse vorliegen. In Kapitel 6.2 sind jedoch auch für diese Substrate Ergebnisse aus den Cofermentationsversuchen angegeben. Dazu wurde der dem Basissubstrat Rindergülle zuzurechnende Biogasanteil vom Gesamtmethanertrag abgezogen.

Bei Versuchen zur Cofermentation diente Rindergülle oder Hühnerkot als Basissubstrat; als Co-substrate wurden Ganzpflanzensilage Triticale, Kleegrassilage, Maissilage, Luzernegrassilage, Zuckerrübe, Gehaltsrübe, kaltgepresster Rapspresskuchen und fusarienbelasteter Triticaleschrot eingesetzt. Darüber hinaus sollte die Wirksamkeit von Enzymen zum Voraufschluss der Biomasse am Beispiel von Luzernegrassilage und GPS Triticale untersucht werden. Dieser Versuch wurde in Cofermentation mit Rindergülle durchgeführt.

6.1 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse

Auswahl der Versuchstage für die Auswertung

Der Zeitraum für die Auswertung der Daten der Gaserzeugung wurde so gewählt, dass innerhalb des Versuches bei einer konstanten Raumbelastung nur noch vergleichsweise geringfügige Schwankungen auftraten. Anfahr- und Abklingvorgänge zu Beginn und gegen Ende der Versuche wurden dabei nicht berücksichtigt. Gleiches gilt für „Ausreißerwerte“, die auf Messfehler oder andere Unregelmäßigkeiten hindeuten.

Die für die untersuchten Größen Methangasproduktion und Methangasausbeute erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 7 bis 10 in Abhängigkeit vom oTS-Mischungsverhältnis und der Raumbelastung nach Versuchen und Substraten geordnet dargestellt. Die Reihenfolge der Darstellung der Ergebnisse eines Substrates bzw. Substratgemisches erfolgt dabei in der Versuchsreihenfolge von links nach rechts.

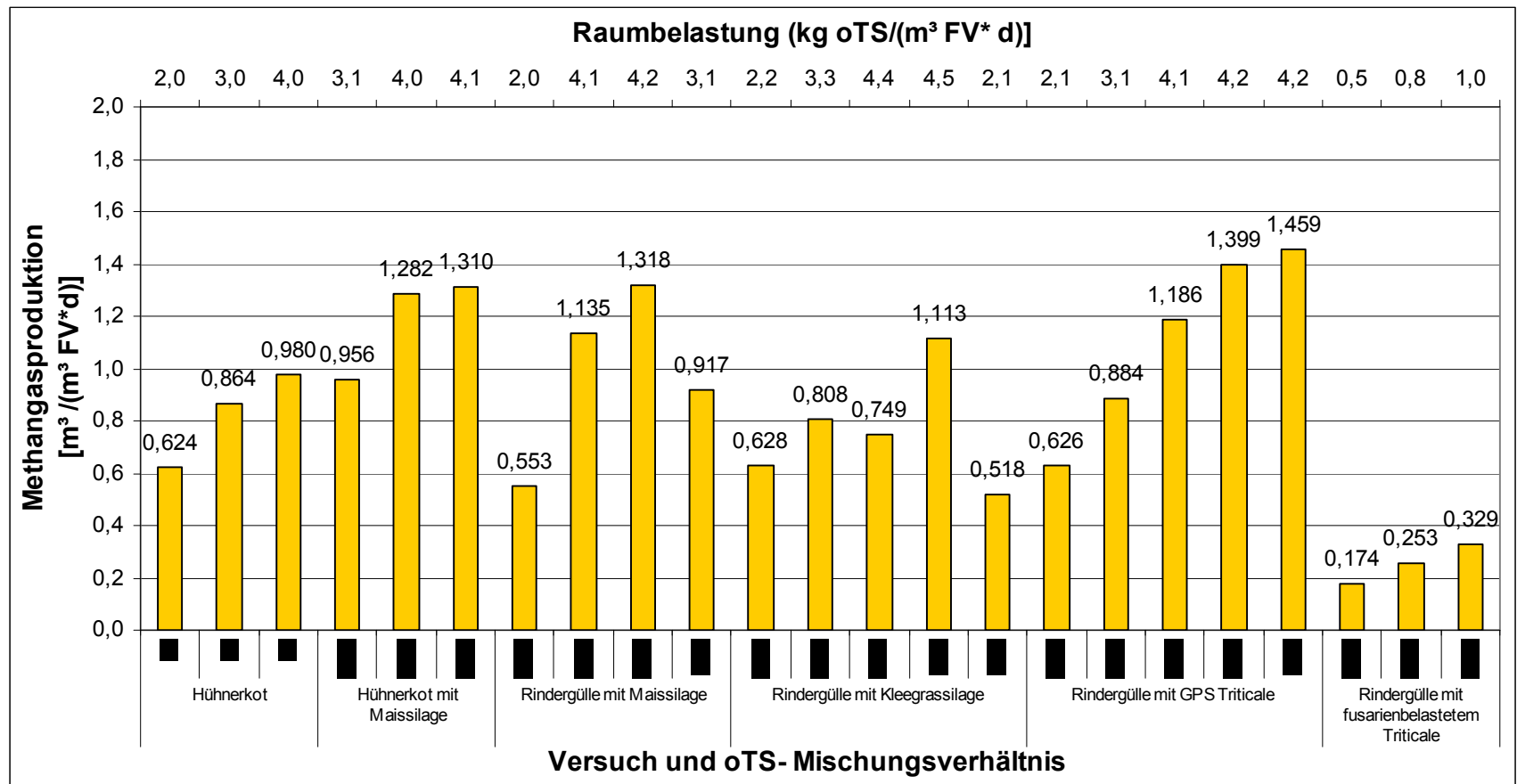


Abbildung 7: Methangasproduktion, oTS-Mischungsverhältnis und Raumbelastung der untersuchten Substrate

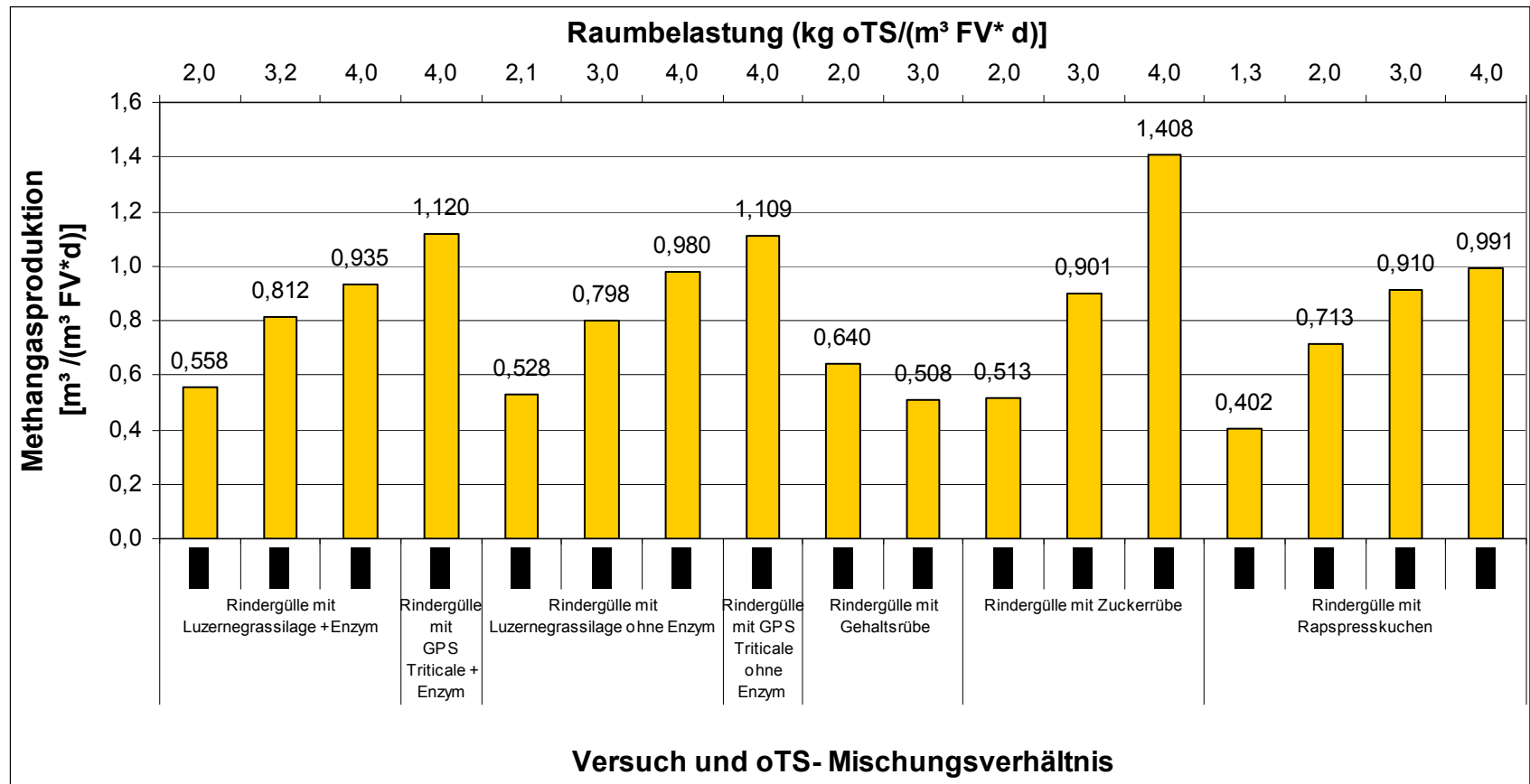


Abbildung 8: Methangasproduktion, oTS-Mischungsverhältnis und Raumbelastung der untersuchten Substrate

Gasproduktion

Eine Faustregel besagt, dass ein Biogasreaktor mit Substraten aus der Landwirtschaft täglich soviel Gas produziert, wie es seinem Volumen entspricht. Das würde bedeuten, dass ein Fermenter mit einem Volumen von 1 m³ ungefähr 1 m³ Biogas pro Tag erzeugt. Diese durchaus zutreffende Aussage stammt aus einer Zeit, in der fast ausschließlich tierische Exkremente (Mist, Gülle) in Biogasanlagen eingesetzt wurden. Bei der Vergärung von Hühnerkot als Monosubstrat wurde dieser Wert bei einer Raumbelastung von 2 kg oTS /(m³ FV *d) mit 1,108 m³/(m³ FV*d) knapp und bei einer Raumbelastung von 3 kg oTS /(m³ FV *d) mit 1,524 m³/(m³ FV*d) deutlich übertroffen. Für den Einsatz nachwachsender Rohstoffe mit höheren Energiegehalten ist eine solche Abschätzung nicht mehr auch nur näherungsweise zutreffend. Bekanntermaßen ist die Gasproduktion stark vom eingesetzten Substrat und der Raumbelastung abhängig. Diese Aussage wurde in den Versuchen bestätigt. Bei der Vergärung von Rindergülle und Hühnerkot mit Ganzpflanzen-, Klee gras-, Maissilagen und Zuckerrüben lag die Gasproduktion besonders bei Raumbelastungen von über 2 kg oTS /(m³ FV *d) deutlich höher.

Methangasproduktion (vgl. Abbildung 7 und 8)

In die Methangasproduktion fließen die erzeugte Biogasmenge, das Fermentervolumen sowie der Methangehalt ein. Die Methangasproduktion gibt damit direkt an, wie viel Methangas aus dem Substratgemisch im spezifischen Fermenter erzeugt werden kann. Insofern ist dieser Wert gut geeignet, Aussagen über die Raum-Zeit-Ausbeute an Methan beim Einsatz eines bestimmten Substrates abzuleiten. Diese Aussagen werden für die Abschätzung der Energieproduktion aus Biogasanlagen und für Wirtschaftlichkeitsrechnungen benötigt.

Die höchste Methangasproduktion mit 1,459 m³/(m³FV*d) wurde mit Rindergülle im Mix mit Ganzpflanzensilage Triticale (GPS) bei 90% Cofermentanteil und einer Raumbelastung von 4,2 kg oTS /(m³FV*d) erreicht. Weiterhin lieferten Rindergülle wie auch Hühnerkot mit Maissilage bei Raumbelastungen von 4,2 bis 4,1 kg oTS /(m³FV*d) und einem Cofermentanteil von 80 % hohe Methangasproduktionen mit 1,318 bzw. 1,310 m³/(m³FV*d). Rindergülle im Mix mit Zuckerrübe im Verhältnis von jeweils 50% (bezogen auf oTS) liefert ebenfalls hohe Methanerträge um 1,408 m³/(m³FV*d) bei einer Raumbelastung von 4 kg oTS /(m³FV*d).

Die Untersuchungen zum Einsatz von Enzymen zum Voraufschluss von Biomasse lieferten keine eindeutigen Ergebnisse zugunsten des Enzymeinsatzes. Die Werte bei den Versuchen mit Enzymzusatz liegen zwar überwiegend geringfügig höher, jedoch nicht oberhalb üblicher Schwankungsbreiten. Es sollten deshalb weitere Untersuchungen zu dieser Thematik folgen.

Als Grundsubstrate wurden in allen Versuchen entweder Hühnerkot oder Rindergülle eingesetzt. Um aus Versuchen mit Mischsubstraten Gaserträge für einzelne nachwachsende Rohstoffe (hier als Cofermente bezeichnet) angeben zu können, wird der Anteil des Gasertrages, der dem Grundsubstrat zuzurechnen ist, vom Gesamtergebnis abgezogen. In Kapitel 6.2 ist dieses Verfahren

ausführlich beschrieben. Dafür wird jedoch ausreichend Datenmaterial für das Grundsubstrat benötigt und zwar aus Versuchen, die bei vergleichbaren Bedingungen durchgeführt wurden. Diese Daten liegen für Hühnerkot aus Versuchen innerhalb des Projektes vor (vgl. Abbildung 7). Für die Monofermentation von Rindergülle wurden Ergebnisse aus vorangegangenen Versuchen verwendet. [vgl. EICHERT et. al 2003, EICHERT et. al 2005, OHLY 2006] Hühnerkot in Monofermentation erbringt einen deutlich höheren Ertrag als Rindergülle. Dieser Effekt wirkt sich bei der Vergärung von Mischsubstraten dahingehend aus, dass bei der Cofermentation z.B. mit Maissilage die Erträge bei den Versuchen mit Hühnerkot höher liegen als mit Rindergülle, sofern annähernd gleiche Mischungsverhältnisse und Raumbelastungen vorliegen. In der oTS-Substratmischung mit 50 % Hühnerkot und 50 % Maissilage erreicht im Vergleich zu Rindergülle mit Maissilage der Versuch Hühnerkot mit Maissilage eine höhere Methangasproduktion. Mit Rindergülle als Grundsubstrat wurde je nach Raumbelastung nur 70 bis 81 % der Methangasproduktion im Vergleich zum Hühnerkot (als Grundsubstrat) erreicht. Dieser Einfluss wird umso geringer, je höher der Anteil Coferment im Mischsubstrat ist.

Die höchsten Methangasproduktionen wurden wie erwartet bei hohen Raumbelastungen und hohen Coferment-Anteilen erreicht, sofern der Prozess stabil war.

Dem Versuch Rindergülle mit fusarienbelastetem Triticaleschrot lag eine andere Zielstellung zugrunde. Es sollte ermittelt werden, ob sich die Belastung mit Fusarien bzw. deren giftigen Stoffwechselprodukten, den Mykotoxinen, während der Fermentation verringert und ob diese Belastung eventuell zu einer Hemmung des Biogasbildungsprozesses führt. Dieser Zielstellung entsprechend wurde die Raumbelastung mit 1 kg oTS/(m³FV*d) vergleichsweise niedrig gewählt. Die Methangasproduktion lag dadurch ebenfalls mit 0,329 m³/(m³FV*d) auf einem entsprechend geringen Niveau. Höhere Raumbelastungen wurden aufgrund der speziellen Zielstellung nicht untersucht. Weitere Ergebnisse für Getreide und speziell auch Triticaleschrot liegen aus früheren eigenen Untersuchungen vor. [vgl. hierzu u.a. EICHERT et. al 2005] Ein Vergleich mit diesen Ergebnissen zeigt, dass die Mykotoxinbelastung den Fermentationsprozess nicht merklich beeinflusst.

Gasausbeute

Die Gasausbeute wird durch die Zugabe von Cosubstraten zum Hühnerkot und zur Rindergülle beträchtlich erhöht und zwar umso mehr, je höher der Anteil (bezogen auf oTS) des Coferments ist. Wird jedoch die Grenze der Prozessstabilität erreicht bzw. überschritten, sinken sowohl Gasausbeute als auch Gasproduktion rapide ab. Im Gegensatz zur Gasproduktion nimmt die Gasausbeute mit steigender Raumbelastung ab, weil durch den höheren Substratdurchsatz weniger Zeit für den Abbau der Biomasse (organische Trockensubstanz) zur Verfügung steht. Diese bekannte Tatsache des Rückgangs der Gasausbeute mit steigender Raumbelastung wurde durch die Versuche überwiegend bestätigt.

Methangehalt

Der mittlere Methangehalt lag bei allen Versuchen zwischen 53 und 58 Vol.-%. Der höchste Methangehalt wurde mit 58 Vol.-% bei der Vergärung von Rindergülle mit Ganzpflanzensilage Triticale bei einer Raumbelastung von 4,2 kg oTS/(m³FV*d) gemessen. Niedrigere durchschnittliche Methangehalte im Biogas mit 51 bis 52 Vol.-% wurden bei den Vergärungsversuchen mit fusarienbelastetem Triticaleschrot ermittelt. Nach Angaben von BASERGA [1998] ist jeder Stoffgruppe in der Biomasse ein bestimmter Methangehalt bei der Umsetzung zu Biogas zuzuordnen. Danach kann das aus Kohlenhydraten gebildete Biogas nur einen maximalen Methangehalt von 50 bis 52 Vol.-% erreichen. Da Triticale sehr viel Kohlehydrate in Form von Stärke enthält, sind die erzielten Methangehalte niedriger als z.B. bei Zusatz proteinhaltiger Substrate wie Kleegrassilage oder Rapspresskuchen zur Rindergülle mit Methangehalten von über 55 Vol.-%. Die Berechnung nach Futterwerten ergab einen theoretisch möglichen Methangehalt von über 61 Vol.-% bei der Monofermentation von Rapspresskuchen. Im Versuch mit Rindergülle in einer Mischung von 50 % Rindergülle zu 50 % Rapspresskuchen wurden aufgrund des Rindergülleanteils niedrigere Werte zwischen 54,6 und 56,8 Vol.-% gemessen.

Methangasausbeute (vgl. Abbildung 9 und 10)

In die Methangasausbeute fließen sowohl die erzeugte Biogasmenge, die Raumbelastung und damit die Menge an täglicher Zugabe an Biomasse sowie der Methangehalt ein. Die Methangasausbeute gibt damit direkt an, wie viel Methan aus dem Substrat erzeugt wird. Insofern ist dieser Wert gut geeignet, verschiedene Substrate bei einheitlichen Versuchsbedingungen miteinander zu vergleichen.

Da sich die Methangasausbeute genauso wie die Gasausbeute mit Zunahme der Raumbelastung verringert, ist die Angabe der Raumbelastung für die Aussage unbedingt notwendig. Die Zugabe von Cosubstraten führt über die beträchtliche Erhöhung der Gasausbeute entsprechend auch zu einer erhöhten Methangasausbeute. Auch diese bekannte Tatsache konnte in der Regel durch die Versuche bestätigt werden.

Die Verringerung der Methangasausbeute mit steigender Raumbelastung ist besonders deutlich bei den Versuchen mit Hühnerkot, Rindergülle mit Kleegrassilage beim oTS-Mischungsverhältnis von 20/80, Rindergülle mit Luzernegrassilage mit Enzym, Rindergülle mit Rapspresskuchen und Rindergülle mit fusarienbelastetem Triticaleschrot zu erkennen. (vgl. Abbildung 9 und 10) In dem Versuch Rindergülle mit Zuckerrüben ist ein Ansteigen der Methangasausbeute mit steigender Raumbelastung zu beobachten. Dabei sind die oTS-Anteile in der Mischung aus Rindergülle und Zuckerrübe nicht verändert worden. Eine Ursache dafür könnte eine noch zu geringe Raumbelastung für die Fermenterbiozönose sein.

Die höchsten Werte für die Methangasausbeute wurden mit Rindergülle und Rapspresskuchen (je 50 % oTS-Anteil in der Mischung) mit 0,357 m³/kg oTS bei einer Raumbelastung von 2 kg

oTS/(m³FV*d) und mit Rindergülle und Zuckerrübe (je 50 % oTS-Anteil in der Mischung) mit 0,352 m³/kg oTS bei einer vergleichsweise hohen Raumbelastung von 4 kg oTS/(m³FV*d) erreicht. Hohe Methangasausbeuten wurden weiterhin beim Versuch Rindergülle mit fusarienbelastetem Triticaleschrot aufgrund der sehr niedrigen Raumbelastung von 0,5 kg oTS/(m³FV*d) mit 0,348 m³/kg oTS und beim Versuch Rindergülle mit Ganzpflanzensilage Triticale mit 0,344 m³/kg oTS bei einer Raumbelastung von 4,2 kg oTS/(m³FV*d) und einem erhöhten Cofermentanteil (90 % bezogen auf oTS) ermittelt.

Luzernegrassilage wie auch Ganzpflanzensilage Triticale wurde im Mix mit Rindergülle sowohl mit als auch ohne Zusatz von Enzymen untersucht. Mit Enzymzusatz ergaben sich je nach Raumbelastung um 10 % (RB = 2 bzw. 2,1) bzw. 3,1 % (RB = 4) höhere Methangasausbeuten, jedoch auch ein um 3,8 % (RB = 3 bzw. 3,2) niedrigerer Wert im Vergleich zur Variante ohne Enzymzusatz. Dieser eine niedrigere Wert könnte der Abweichung der Raumbelastung geschuldet sein. Aufgrund der in Kapitel 6 beschriebenen nachträglichen Korrekturen der oTS-Werte bei der Silage wurde z.B. im Ansatz mit Enzym eine Raumbelastung von 3,2 kg oTS/(m³FV*d), im Ansatz ohne Enzym jedoch eine Raumbelastung von 3,0 kg oTS/(m³FV*d) eingestellt. Da die Gasausbeute und damit auch die Methangasausbeute erfahrungsgemäß mit steigender Raumbelastung zurückgehen, ist möglicherweise ein eventueller Vorteil des Enzymeinsatzes durch die geringfügig höhere Raumbelastung im Versuch nicht feststellbar.

Bei der Fermentation von Rindergülle mit Ganzpflanzensilage Triticale mit 80 % Cofermentanteil wurde bei einer Raumbelastung von 4 kg oTS/(m³FV*d) eine um 1,1 % höhere Methangasausbeute bei der Zugabe von Enzym gegenüber dem Parallelansatz ohne Enzym festgestellt.

Da jedoch insgesamt der Zuwachs bei der Methangasausbeute durch den Enzymeinsatz sehr gering ausfällt und innerhalb üblicher Schwankungsbreiten liegt, sollten hier unbedingt noch weiterführende Untersuchungen folgen, um belastbare Aussagen treffen zu können.

Der Schwankungsbereich der Methangasausbeute (vgl. Abb. 9 und 10) war im Versuch Rindergülle mit Maissilage, Gehaltsrübe und Kleeegrassilage in den Belastungsstufen mit beginnender Prozessstörung sehr groß. Hier deuten die Schwankungen bereits auf die Prozesshemmung hin. Der Versuch Rindergülle mit Rapspresskuchen zeigte zu Untersuchungsbeginn bei niedriger Raumbelastung starke Schwankungen der Methangasausbeute. Beim Versuch mit fusarienbelastetem Triticaleschrot gab es ebenfalls sehr starke Schwankungen, die jedoch bei diesem Versuch der einzige Hinweis auf eine mögliche Prozessinstabilität waren. Alle anderen Indikatoren (pH-Wert, freie Fettsäuren, FOS/TAC) ergaben unauffällige Befunde. Insofern ist eine Hemmung nicht nachweisbar und bei der niedrigen Raumbelastung von maximal 1 kg oTS/(m³FV*d) auch nicht zu erwarten.

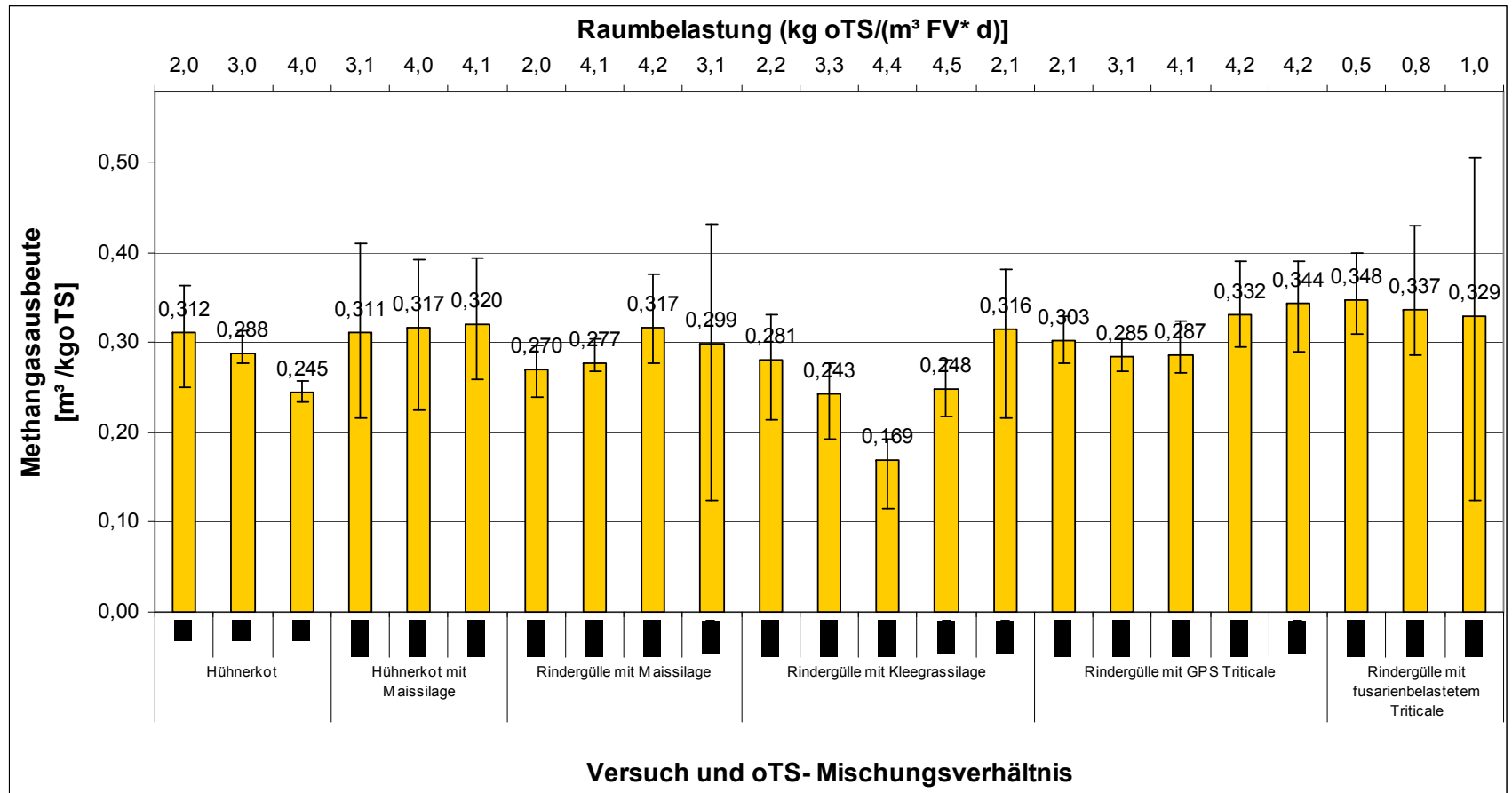


Abbildung 9: Methangasausbeute mit Schwankungsbereich und Raumbelastung der untersuchten Substrate

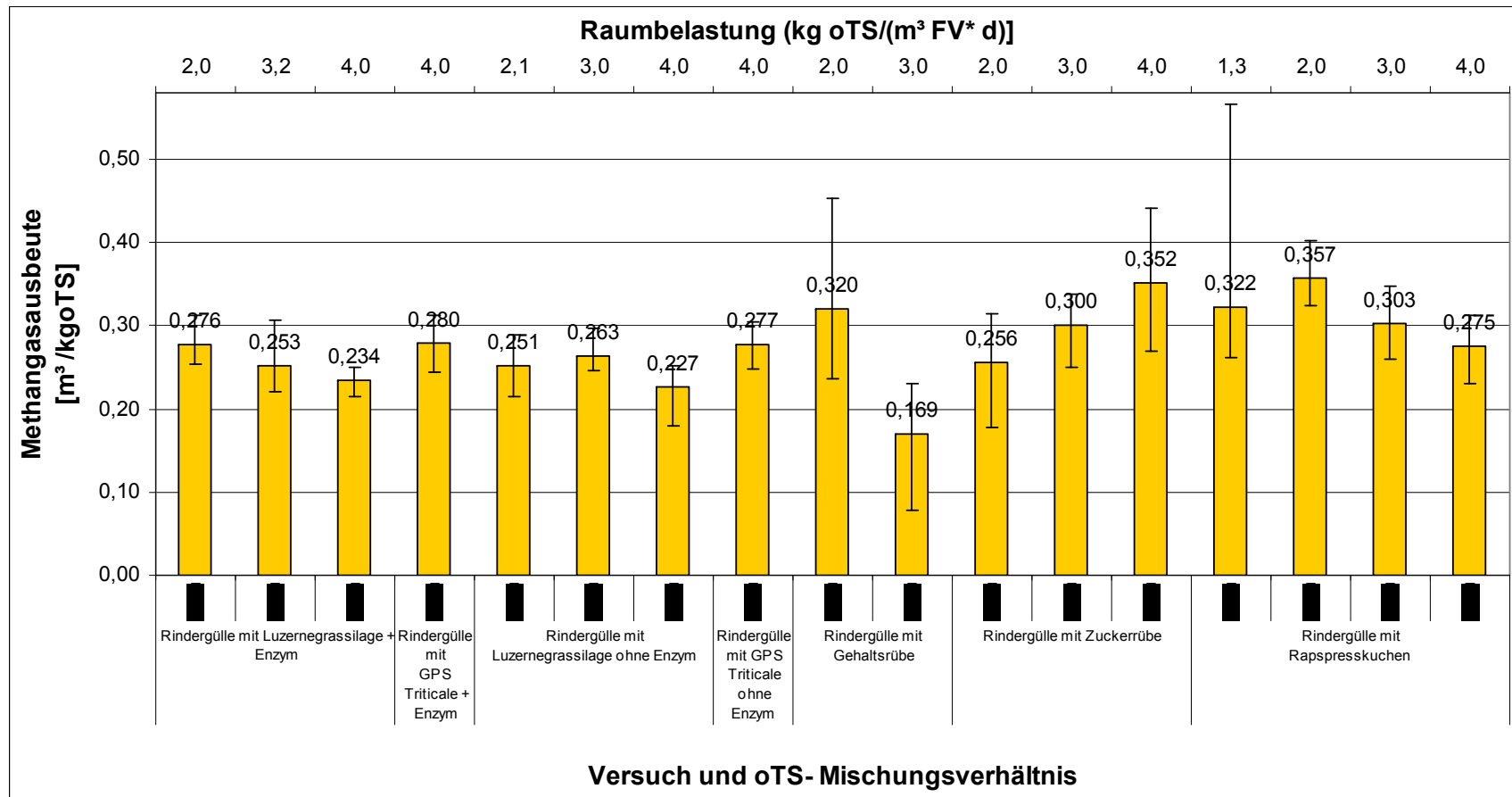


Abbildung 10: Methangasausbeute mit Schwankungsbereich und Raumbelastung der untersuchten Substrate

Charakterisierung der Prozessstabilität (vgl. Tabelle 2)

Tabelle 2 zeigt die für die Prozessstabilität relevanten Größen nach Versuchen und Substraten geordnet.

Tabelle 2: Ergebnisvergleich der durchgeführten Versuche mit Schwerpunkt Prozessstabilität

Substrat	Raumbelastung	pH-Wert	FOS/ TAC	Essigsäurekonzentration	Propionsäurekonzentration	Schwefelwasserstoffgehalt
	kg oTS/ (m³FV*d)	-	-	mg/l	mg/l	ppm
Hühnerkot	2,0	7,38 – 8,30	0,112 – 0,229	134	233	59 - 117
	3,0	7,85 - 8,25	0,247 – 0,299	2180	1210	83
	4,0 ¹	7,92 - 8,20	0,267 – 0,310	5970	835	12 – 110
Hühnerkot mit Mais-silage (50/50)	3,1	7,15 - 7,81	0,124 – 0,252	925 - 1680	780 - 1195	73 – 359
	4,0	7,79 - 8,19	0,155 – 0,286	410 - 1565	0 - 305	178 - 436
Hühnerkot mit Mais-silage (20/80) ¹	4,1	7,66 - 8,15	0,186 – 0,440	1235 - 1660	145 - 2245	22 - 373
Rindergülle mit Ganzpflanzensilage Triticale (50/50)	2,1	7,29 - 7,52	0,124 - 0,218	10	10	94 - 164
	3,1	7,35 - 7,75	0,130 - 0,169	175,5	410,5	134 - 134
	4,1	7,28 - 7,71	0,156 - 0,258	10	10	3 - 465
Rindergülle mit Ganzpflanzensilage Triticale (20/80)	4,2	7,54 – 7,65	0,159 – 0,223	785 – 3700	1130	68 - 366
Rindergülle mit Ganzpflanzensilage Triticale (10/90)	4,2	7,51 - 7,57	0,127 – 0,249	1935	585	376

¹ Versuch eingeschränkt aussagefähig, da keine Langzeitstabilität nachgewiesen werden konnte (Prozess ist abgestürzt).

**Fortsetzung Tabelle 2: Ergebnisvergleich der durchgeführten Versuche mit Schwerpunkt
Prozessstabilität**

Substrat	Raumbe- lastung	pH-Wert	FOS/ TAC	Essig- säure- kon- zentration	Propion- säurekon- zentration	Schwefel- wasser- stoffgehalt
	kg oTS/ (m³FV*d)	-	-	mg/l	mg/l	ppm
Rindergülle mit Ganzpflanzensilage Triticale (0/100) ¹	4,2	5,67 – 7,51	0,201 – 4,470	0 - 5300	175 - 2860	0 – 59
Rindergülle mit Kleegrassilage (20/80)	2,2	7,71 – 7,75	0,243 - 0,281	10	10	354
	3,3	7,72 – 7,76	0,183 – 0,259	1075-1620	640-725	278 - 735
	4,4	7,72 – 7,83	0,197 - 0,768	7	2000	615
Rindergülle mit Kleegrassilage (10/90) ¹	4,5	7,72 - 7,91	0,188 – 0,877	-	-	262
Rindergülle mit Kleegrassilage (0/100) ¹	4,5	7,41 – 7,84	0,188 – 0,927	494 – 5260	1220 - 5175	0 – 961
Rindergülle mit Kleegrassilage (0/100) ¹	2,1	6,59 - 7,94	0,115 – 0,451	0-1105	0 - 446	169 – 228
Rindergülle mit fusa- rienbelastetem Triti- cale (20/80)	0,5	7,35 – 7,54	0,113 – 0,257	0	0	458 - 459
	0,75	7,43 – 7,50	0,150 – 0,211	0	0	257
	1	7,34 – 7,55	0,098 - 0,245	0 - 800	0 - 475	51 – 705
Rindergülle mit Maissilage (50/50)	2	7,17 – 7,66	0,166 - 0,280	279	487	459
	4,1	7,31 – 7,42	0,170 - 0,279	10	10	179 - 113
Rindergülle mit Maissilage (20/80)	4,1	7,42 – 7,18	0,155 - 0,222	2108	205	19 – 32
Rindergülle mit Maissilage (10/90) ¹	4,1	7,23 – 6,81	0,125 – 0,284	1295 –1465	490 -675	13

¹ Versuch eingeschränkt aussagefähig, da keine Langzeitstabilität nachgewiesen werden konnte (Prozess ist abgestürzt).

Fortsetzung Tabelle 2: Ergebnisvergleich der durchgeführten Versuche mit Schwerpunkt Prozessstabilität

Substrat	Raumbelastung	pH-Wert	FOS/ TAC	Essig- säure- kon- zentration	Propion- säurekon- zentration	Schwefel- wasser- stoffgehalt
	kg oTS/ (m³FV*d)	-	-	mg/l	mg/l	ppm
Rindergülle mit Maissilage (0/100) ¹	3,1	7,23 - 5,70	0,144 – 0,321	0 - 775	0 - 4075	7 – 97
Rindergülle mit Gehaltsrübe (50/50)	2	7,32 – 7,64	0,140 – 0,442	540 - 1035	175 - 345	7 - 92
	3	7,33 - 7,57	0,133 – 0,204	215 - 985	0 - 375	5 - 23
Rindergülle mit Zuckerrübe (50/50)	2	7,56 – 6,88	0,133 – 0,265	140 – 1595	330 – 550	3 – 6
	3	6,71 - 7,17	0,238 – 0,312	3745	105	0 -35
	4	7,08 - 7,48	0,122 – 0,235	3915	120 - 1635	2 - 13
Rindergülle mit Zuckerrübe (20/80) ¹	4	7,58 – 7,02	0,124 – 0,430	1330 – 1435	90 – 125	4 – 269
Rindergülle mit Zuckerrübe (0/100) ¹	3	7,02 – 6,82	0,344 – 0,784	1240 – 2450	900 – 2120	4
Rindergülle mit Zuckerrübe (0/100) ¹	2	7,30 – 6,40	0,227 – 1,123	505 - 1240	5 - 900	4 - 21
Rindergülle mit Zuckerrübe (0/100) ¹	1	6,84 – 5,69	0,110 – 2,901	0 - 384	0 - 489	3 – 37
Rindergülle mit Luzernegrassilage mit Enzym (50/50)	2	7,85 – 7,94	0,139	605	135	370
	3,2	7,83 – 7,92	0,142 – 0,165	665	80	719
	4	7,91 – 7,97	0,130 – 0,150	429	2547	998
Rindergülle mit Ganzpflanzensilage Triticale mit Enzym (20/80)	4	7,68 – 7,88	0,157 – 0,170	466	699	171
Rindergülle mit Luzernegrassilage mit Enzym (0/100) ¹	2	7,85 – 7,11	0,066 – 0,743	126 - 3030	234 - 1767	509 - 1216

¹ Versuch eingeschränkt aussagefähig, da keine Langzeitstabilität nachgewiesen werden konnte (Prozess ist abgestürzt).

Fortsetzung Tabelle 2: Ergebnisvergleich der durchgeführten Versuche mit Schwerpunkt Prozessstabilität

Substrat	Raumbelastung	pH-Wert	FOS/ TAC	Essigsäurekonzentration	Propionsäurekonzentration	Schwefelwasserstoffgehalt
	kg oTS/ (m³FV*d)	-	-	mg/l	mg/l	ppm
Rindergülle mit Luzernegrassilage (50/50)	2,1	7,46 – 7,67	0,149 – 0,167	0	0	316
	3	7,65 – 7,88	0,188 – 0,194	700 - 1015	90 - 965	819
	4	7,77 – 7,86	0,160 – 0,168	1395	430	766
Rindergülle mit Luzernegrassilage (0/100) ¹	2	7,43 – 7,75	0,075 – 0,591	0 - 2590	300 - 760	475 – 831
Rindergülle mit Ganzpflanzensilage Triticale (20/80)	4	7,50 – 7,75	0,170 – 0,196	1017 - 1382	175 - 2630	967
Rindergülle mit Rapspresskuchen (50/50)	1,3	7,39 – 7,61	0,129 – 0,251	470 - 485	680 – 780	19 – 31
	2	7,40 – 7,74	0,149 – 0,259	435	810	140 – 261
	3	7,67 – 7,80	0,140 – 0,190	1088 - 2225	982 - 3560	642 – 896
	4	7,24 – 8,08	0,137 – 0,289	2475	5205	313 – 761
Rindergülle mit Rapspresskuchen (20/80) ¹	4	7,16 – 7,70	0,118 – 0,694	3606 – 9960	1384 – 3575	4 – 213

Die Analyse der Propion- und Essigsäurekonzentrationen ist für die Beurteilung der Stabilität des Fermentationsprozesses von großem Interesse. Liegen die Konzentrationen der flüchtigen Fettsäuren unter einem Gehalt von 1 000 mg/l (Summe Propion- und Essigsäuregehalt), kann von einer stabilen Vergärung ausgegangen werden. Dies trifft beispielhaft zu bei den Versuchen

- Rindergülle mit Ganzpflanzensilage Triticale auch bei hohen Raumbelastungen (bis RB = 4,1), aber nur bis zu einem mittleren Anteil an GPS Triticale (oTS-Verhältnis 50/50)
- Rindergülle mit Luzernegrassilage bei niedriger bis mittlerer Raumbelastung (bis RB = 3,2) und bis zu einem mittleren Anteil an Luzernegrassilage (oTS-Verhältnis 50/50)
- Rindergülle mit Maissilage auch bei hoher Raumbelastung (bis RB = 4,1) und bis zu einem mittleren Anteil Maissilage (oTS-Verhältnis 50/50)

¹ Versuch eingeschränkt aussagefähig, da keine Langzeitstabilität nachgewiesen werden konnte (Prozess ist abgestürzt).

- Hühnerkot bei niedriger Raumbelastung (bis $RB = 2$) und Hühnerkot mit Maissilage bei niedrigen Raumbelastungen und geringem Anteil an Maissilage

Lag der Gesamtgehalt von Propion- und Essigsäure in Summe im Bereich von 1 000 bis 2 000 mg/l, verlief der Vergärungsprozess kritisch, wie z.B. bei den Versuchen

- Rindergülle mit Ganzpflanzensilage Triticale bei hohen Raumbelastungen ($RB = 4,2$) und mittlerem bis hohem Anteil GPS Triticale (oTS-Verhältnis 10/90),
- Rindergülle mit Gehaltsrüben ab mittlerer Raumbelastung ($RB = 3$) und ab einem mittleren Anteil Gehaltsrübe (oTS-Verhältnis 50/50),
- Kleegrassilage in Monofermentation (aus der Cofermentation mit Rindergülle heraus ab einem oTS-Verhältnis 0/100) bereits bei Raumbelastung $RB = 3$

Über diesem Bereich verlief die Fermentation deutlich instabil, z.B. bei den Versuchen

- Hühnerkot ab Raumbelastung $RB = 3$,
- Hühnerkot mit Maissilage ab Raumbelastung $RB = 3$ und zugleich mittlerem Anteil an Maissilage (oTS-Verhältnis 50/50)
- Rindergülle mit Rapspresskuchen bei hoher Raumbelastung (ab $RB = 4$) bei mittlerem Anteil Rapspresskuchen (oTS-Verhältnis 50/50),
- Rindergülle mit Zuckerrüben bei hoher Raumbelastung ($RB = 4$) und einem mittleren Anteil Zuckerrübe (oTS-Verhältnis 50/50),
- Maissilage, Ganzpflanzensilage Triticale, Kleegrassilage in Monofermentation (aus der Cofermentation mit Rindergülle heraus ab einem oTS-Verhältnis 0/100) bei hohen Raumbelastungen je nach Versuch um $RB \approx 4$,
- Rindergülle mit Luzernegrassilage bei hoher Raumbelastung (ab $RB = 4$) schon ab einem mittleren Anteil Luzernegrassilage (oTS-Verhältnis 50/50)

Allerdings können sich die Bakterien auch an hohe Fettsäuregehalte adaptieren und es ist möglich, dass die Vergärung dadurch auch bei sehr viel höheren Säurekonzentrationen noch stabil ablaufen kann, falls die Steigerung der Konzentrationen sehr langsam vonstatten geht. Aus diesem Grund ist der Gehalt an organischen Fettsäuren als alleiniger Indikator für die Stabilität des Prozesses nicht ausreichend. Deshalb ist es zusätzlich wichtig, auch das Verhältnis der beiden Säuren zueinander zu beobachten. Liegt der Gehalt an Essigsäure bei ca. dem Zweifachen des Propionsäuregehaltes, kann von einem stabilen Prozessverlauf ausgegangen werden, da auf dem Abbauweg von der Biomasse zu Biogas das Zwischenprodukt Propionsäure in ausreichender Menge zu Essigsäure abgebaut wird.

Bei einem sogenannten Propionsäurestau steigt der Gehalt an Propionsäure im Verhältnis zum Gehalt an Essigsäure immer deutlicher an und das Verhältnis der beiden Säuren zueinander kehrt sich um. Das bedeutet, dieser Zwischenschritt des Abbaus der Biomasse zu Essigsäure als Vorstufe der Methanbildung ist gehemmt. Der Prozess kann dann nur durch einen längeren Zugabestopp eventuell wieder stabilisiert werden. Ein solcher Propionsäurestau war bei der Monofermentation

von Kleegrassilage zu beobachten. Am 77. Versuchstag lag der Gehalt an Propionsäure mit 5 175 mg/l mehr als 10-fach über dem Gehalt an Essigsäure, der bei nur 500 mg/l lag. Die Stabilisierung erfolgte durch alleinige Zugabe von Rindergülle (ohne Kleegrassilage). Nach etwa 20 Tagen verlief der Prozess wieder stabil. Ob durch einen totalen Zugabestopp die hohen Fettsäuregehalte noch schneller abgebaut werden können oder die Zugabe von Rindergülle, die bekanntlich eine gute Pufferwirkung aufweist, die bessere Lösung ist, sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Die Prozesshemmung im Versuch Kleegrassilage ist zudem sehr gut am Verlauf der FOS/TAC-Werte zu erkennen. (Abbildung 11) Am 99. Tag wurde der Grenzwert für die Prozessstabilität von 0,30 nach [WEILAND 1999] mit 0,93 um ein Vielfaches überschritten. Durch alleinige Zugabe von Rindergülle mit einer Raumbelastung von 2 kg oTS/(m³FV*d) sank der FOS/ TAC- Wert innerhalb von drei Tagen auf 0,76 ab. Am 120. Tag lag der FOS/TAC-Wert mit 0,28 wieder unter dem Stabilitätsgrenzwert von 0,30.

Der Versuch mit Hühnerkot zeigte bereits in der Belastungsstufe 3 kg oTS/(m³FV*d) FOS/TAC-Verhältnisse bis an die Grenze von 0,30. Mit Übergang auf die Raumbelastung von 4 kg oTS/(m³FV*d) folgte eine Hemmung der Biogasbildung während gleichzeitig das FOS/TAC-Verhältnis weiter bis deutlich über den Grenzwert von 0,30 anstieg.

In den Versuchen Hühnerkot mit Maissilage und Rindergülle mit Maissilage nähert sich das FOS/TAC-Verhältnis bei höherer Raumbelastung bzw. höherem Cosubstratanteil stärker an den Grenzwert von 0,30 an. Die Reserven der Prozessstabilität werden mit zunehmender Auslastung des Prozesses kleiner.

Bei der Untersuchung von Rindergülle mit Rapspresskuchen kam es zu höheren Konzentrationen an Propionsäure im Verhältnis zur Essigsäure, was auf einen Propionsäurestau hinweist. Dabei wies der Prozess jedoch keine weiteren Anzeichen einer Hemmung auf. Die FOS/TAC-Werte lagen im normalen Bereich bis nahe der Grenze von 0,3. Bei einer Raumbelastung von 4 kg oTS/(m³FV*d) war die Konzentration an Propionsäure mit 5 205 mg/l doppelt so hoch wie die der Essigsäure. Erst bei einem Anteil von 80 % Rapspresskuchen (auf oTS bezogen) kann von einer deutlichen Prozesshemmung gesprochen werden. Die Konzentrationen an Essig- und Propionsäure stiegen bis auf 9 960 mg/l bzw. 3 575 mg/l an. Dabei zeigte auch der FOS/TAC-Wert die Hemmung mit ansteigenden Werten bis auf 0,694 an.

Im Versuch Rindergülle mit Zuckerrübe stiegen die Essigsäurekonzentrationen stark bis auf 3 915 mg/l an. Die Werte für die Propionsäure lagen mit maximal 1 635 mg/l vergleichsweise niedrig. Eine Hemmung des Prozesses wurde bei Monofermentation, d.h. einem Zuckerrübenanteil von 100 % und der Raumbelastung von 3 kg oTS/(m³FV*d) beobachtet. Dabei lagen die Gehalte der organischen Fettsäuren Essig- und Propionsäure in Summe über 2 000 mg/l bei einem FOS/TAC-Wert von 0,784. Nach einer Stabilisierungsphase ohne Frischsubstratzugabe wurde erneut Zuckerrübe zugeführt. Dabei trat abermals eine Hemmung auf, die charakterisiert war durch niedrige Essigsäu-

rekonzentrationen von maximal 216 mg/l und hohe Propionsäurewerte von bis zu 1 226 mg/l. Die FOS/TAC-Werte stiegen dabei bis auf ein sehr hohes Niveau von bis zu 2,9 an. Der pH-Wert verringerte sich bis auf 5,69, ebenfalls ein typisches Zeichen für eine Prozessstörung bei der Monofermentation energiereicher Substrate.

In den Versuchen Rindergülle mit Mais- und Kleeagrassilage zeigten die geringen Konzentrationen an flüchtigen Fettsäuren die Prozessstörung am Ende des Versuchs nur teilweise oder gar nicht an. Dagegen zeigten die Messwerte für den pH-Wert, die Biogasproduktion und den FOS/TAC-Wert deutlich eine Hemmung des Fermentationsprozesses. Die Werte für FOS/TAC stiegen sehr schnell und lagen mit bis zu 3,7 sehr hoch. Zu beachten ist dabei auch, dass die Hemmwirkung der flüchtigen Fettsäuren mit sinkendem pH-Wert ansteigt, sodass in diesem Fall eine Prozessstörung schon bei niedrigeren Säurekonzentrationen auftreten kann.

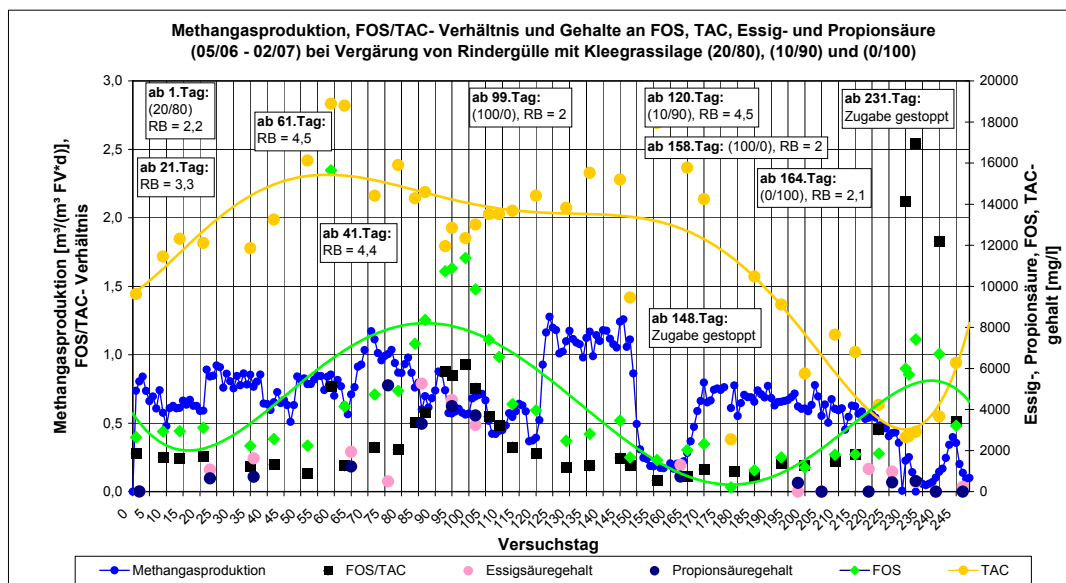


Abbildung 11: Methangasproduktion, FOS/TAC-Verhältnis und Gehalte an FOS, TAC, Essig- und Propionsäure im Versuch Rindergülle und Kleeagrassilage

In der Abbildung 11 sind beispielhaft die ermittelten Werte für FOS und TAC dargestellt. Kritische Zustände lassen sich daran erkennen, dass sich die Kurvenverläufe für FOS und TAC annähern oder sogar überschneiden wie in der zweiten, stärkeren Prozesshemmung ab dem 220. Versuchstag. Während der ersten Prozessstörung um den 100. Versuchstag stiegen die Säuregehalte, also die Gehalte an FOS wie auch die der einzelnen Fettsäuren stark an, während gleichzeitig die Pufferkapazität TAC abfiel. Mit Zugabe von Kleeagrassilage ohne Gülle ab dem 164. Tag ist deutlich das kontinuierliche Absinken der TAC-Gehalte erkennbar. Die Säuregehalte, ausgedrückt durch die FOS-Gehalte, stiegen bis zum 220. Tag nur gering, während die Pufferkapazität allmählich aufgebraucht wird und die TAC-Gehalte unter die für FOS sinken. Ab dem 220. Tag war auch ein sehr

rasches Abfallen des pH-Wertes bis deutlich unter 6,5 zu beobachten. Nach Einstellung der Substratzugabe stiegen die TAC-Werte bei gleichzeitig absinkenden FOS-Werten.

Der absolute Wert des FOS/TAC ist ebenso wie die Höhe der flüchtigen Fettsäuren unter Umständen zu wenig aussagekräftig. Vielmehr sollte der Verlauf dieser Parameter regelmäßig beobachtet werden. Zum Beispiel geben GRONAUER et al. [2007] abweichend von WEILAND [1999] als Grenzwert einen FOS/TAC von 0,8 im Gegensatz zu 0,3 an. Dagegen legt MOERSCHNER [2007] einen Grenzwert für das FOS/TAC-Verhältnis von 0,5 fest. In eigenen Vergleichsmessungen mit der Methode nach MOERSCHNER an der Praxisanlage in Lichtenberg, Landkreis Freiberg, konnte eine gute Übereinstimmung der Resultate festgestellt werden. Der Unterschied zu der an der TU Bergakademie verwendeten Methode besteht in der verwendeten Säure (Schwefel- statt Salzsäure) und in der Konzentration (0,5 statt 0,1 mol/l) dieser zum Titrieren verwendeten Säure.

Der pH-Wert ist bei der Covergärung von Substraten mit Rindergülle und Hühnerkot auf Grund der hohen Pufferwirkung dieser Grundsubstrate nicht geeignet, ausreichende Aussagen zur Prozessstabilität zu treffen. Besonders deutlich war diese Tatsache beim Versuch mit Hühnerkot zu beobachten. Der pH-Wert zeigte die Prozesshemmung mit einem nur geringfügigen Absinken von 8,1 auf 7,9 an. Der Prozess stürzte jedoch ab und war auch durch eine um die Hälfte reduzierte Zugabe nicht mehr zu stabilisieren.

Bei der Monovergärung von Zuckerrübe, Mais-, Ganzpflanzen- und Kleegrassilage ohne die Pufferwirkung der Gülle war die Prozesshemmung an einer starken Änderung des pH-Wertes gut ablesbar.

Eine Hemmung der Vergärungsprozesse durch Ammoniumstickstoff im Gärsubstrat trat nicht auf. Wie bei den anderen Versuchen lagen die NH_4 -Gehalte selbst beim stark stickstoffhaltigen Hühnerkot mit maximal 160 mg/l sehr niedrig.

Schwefelwasserstoffgehalt (vgl. Tabelle 2)

Bei der Beurteilung der Messwerte für den Schwefelwasserstoffgehalt des produzierten Biogases ist zu berücksichtigen, dass aufgrund eines geringen mit der Substratzufuhr eingetragenen Sauerstoffanteils im Gasraum über der Schwimmschicht bereits eine biologische Teilentschwefelung des Gases erfolgt. Dieser Vorgang ist deutlich anhand gelblicher Ablagerungen an den Fermenterinnenwänden oberhalb und auf der Schwimmschicht zu erkennen. Es ist jedoch nicht möglich, den dadurch gebundenen H_2S -Anteil quantitativ zu bestimmen. Deshalb sind die nachfolgend aufgeführten Angaben für den Schwefelwasserstoffgehalt lediglich als Richtwerte für die Größenordnungen bei verschiedenen Substraten zu verstehen, die der Orientierung dienen, jedoch keine belastbaren Aussagen liefern können.

Generell sind die Schwefelwasserstoffgehalte bei Vergärung von Rindergülle und Cosubstraten mit bis zu 998 ppm am höchsten. Dabei ist der überwiegende Anteil des Schwefelwasserstoffs dem Gülleeinsatz anzulasten. Mit zunehmendem Anteil Cosubstrat in der Substratmischung sinken die Schwefelwasserstoffgehalte, z.B. bei Rindergülle mit Maissilage (50/50) von 459 ppm bis auf geringe Werte von unter 100 ppm bei der Monofermentation der Maissilage ohne Güllezusatz. Dieser Zusammenhang war auch bei den Versuchen mit Kleeegrassilage zu beobachten. Bei den Versuchen mit Rindergülle und Luzernegrassilage sowie Rindergülle mit Rapspresskuchen wurde ein gegenläufiges Verhalten, d.h. ansteigende Schwefelwasserstoffgehalte mit zunehmendem Cosubstratanteil registriert. Zudem lagen hier die H₂S-Gehalte mit bis zu 900 ppm bei Rindergülle mit Rapspresskuchen bzw. bis zu 1 000 ppm bei Rindergülle mit Luzernegrassilage auf einem vergleichsweise hohen Niveau. Diese Versuchsergebnisse bestätigen die bekannte Tatsache, dass Substrate mit hohem Proteingehalt ein Biogas mit hohem Schwefelwasserstoffanteil liefern.

Die Versuche mit Hühnerkot wiesen mit maximal 116 ppm sehr niedrige Gehalte an H₂S auf. Ebenso der Versuch Rindergülle mit Gehaltsrüben, bei dem der H₂S-Gehalt des produzierten Biogases im fortgeschrittenen Versuchsverlauf deutlich unter 100 ppm lag. Bei den Versuchen mit Rindergülle und Ganzpflanzensilage wurden Schwefelwasserstoffgehalte mit bis zu 367 ppm gemessen. Im Versuch Rindergülle mit Luzernegrassilage ergab sich ein geringfügig niedrigerer H₂S-Gehalt beim Ansatz mit Enzym. Im Mittel lagen die Werte bei den Versuchen mit Enzymzugabe bei 486 ppm gegenüber 588 ppm H₂S bei den Versuchen ohne Enzymzugabe.

Extrem niedrige Werte für Schwefelwasserstoff im erzeugten Biogas wurden im Versuch Rindergülle mit Zuckerrübe ermittelt. Die Konzentrationen lagen unterhalb von 40 ppm H₂S. Maximal wurden 270 ppm ermittelt. Lediglich in der Phase der Prozessstörung wurden 1 300 ppm registriert.

6.2 Vergleich der Ergebnisse der untersuchten Substrate

Ein Vergleich der Gas- und Methangasausbeuten für verschiedene Substrate kann theoretisch nur mit Ergebnissen aus einer Monovergärung erfolgen. Aus Gründen der Prozessstabilität ist aber eine Monovergärung nicht für jedes Substrat möglich. Das zeigten z.B. die Versuche Rindergülle mit Mais-, Klee gras- und Ganzpflanzensilage Triticale, in denen ein oTS-Mischungsverhältnis von 10/90 bzw. 0/100 zu einer Prozesshemmung führte.

Sofern man über ausreichend Versuchsergebnisse bei vergleichbaren Versuchsbedingungen verfügt, kann man für die verwendeten Grundsubstrate (z.B. Rindergülle oder Hühnerkot) dieses Datenmaterial dazu benutzen, anhand des oTS-Gehaltes des Grundsubstrates in der Mischung die Gas- und Methangasausbeute für das Grundsubstrat aus dem Ergebnis des Versuchs herauszurechnen. Auf diese Weise erhält man für die untersuchten Stoffe eine Gas- bzw. Methangasausbeute, die zur Unterscheidung von Daten aus tatsächlich alleiniger Vergärung (Monofermentation) mit der Bezeichnung „berechnet als Monosubstrat“ gekennzeichnet wurden.

Die Berechnung erfolgte mit den nachfolgenden Gleichungen:

$$GA_{Cosubstrat} = \frac{GA_{Versuch} - oTS - Anteil_{Grunds substrat} \cdot GA_{Grunds substrat}}{oTS - Anteil_{Cosubstrat}}$$

$GA_{Cosubstrat}$	in [m³/kg oTS]	Gasausbeute des Cosubstrates
$GA_{Versuch}$	in [m³/kg oTS]	Gasausbeute des Versuchs
$GA_{Grunds substrat}$	in [m³/kg oTS]	Gasausbeute des Grunds substrates
$oTS - Anteil_i$	in [%]	oTS-Anteil des Substrates i

$$MGA_{Cosubstrat} = \frac{MGA_{Versuch} - oTS - Anteil_{Grunds substrat} \cdot MGA_{Grunds substrat}}{oTS - Anteil_{Cosubstrat}}$$

$MGA_{Cosubstrat}$	in [m³/kg oTS]	Methangasausbeute des Cosubstrates
$MGA_{Versuch}$	in [m³/kg oTS]	Methangasausbeute des Versuchs
$MGA_{Grunds substrat}$	in [m³/kg oTS]	Methangasausbeute des Grunds substrates
$oTS - Anteil_i$	in [%]	oTS-Anteil des Substrates i

Diese Vorgehensweise unterstellt, dass sich die Substrate (Grunds substrat und Cosubstrat) als Mischung in der Fermentation nicht gegenseitig beeinflussen und unabhängig voneinander genauso zu Biogas abgebaut werden, wie das jeweils einzelne Substrat allein in Monofermentation. Insofern ist diese Methode notwendigerweise fehlerbehaftet, da diese Annahme in der Praxis nicht zutrifft. Dieser Sachverhalt zeigt sich z.B. deutlich bei der Vergärung von Rindergülle mit Ganzpflanzensilage Triticale. Bei vergleichbarer Raumbelastung wurden zwei unterschiedliche Mischungsverhältnisse untersucht. Dabei lag die Methangasausbeute „berechnet als Monosubstrat“ bei der Mischung 20 % Rindergülle und 80 % Ganzpflanzensilage Triticale mit 0,373 m³/kg oTS unter dem Ergebnis der Mischungsvariante 50/50 mit 0,404 m³/kg oTS. Die Abweichung kann also unter Umständen beträchtlich sein.

Daraus folgt, dass hinsichtlich der Beurteilung und des Vergleichs von nachwachsenden Rohstoffen in Cofermentation noch Forschungsbedarf vorhanden ist, um genauere Verfahren für die Beurteilung der Einzelsubstrate in Cofermentationsprozessen unter Berücksichtigung der auftretenden Synergieeffekte zu entwickeln.

In Abbildung 12 und Abbildung 13 sind die Werte für die Methangasausbeute der Cosubstrate „berechnet als Monosubstrat“, also bereinigt um den Anteil, der dem Grunds substrat zugeordnet

werden muss, dargestellt. Als Mittelwerte für die Gas- und Methangasausbeute des Grundsubstrats Rindergülle wurden Daten aus Monofermentationsversuchen mit Rindergülle derselben Herkunft und gleicher Raumbelastung und Verweilzeit angesetzt. Eine Ausnahme bildet der Versuch mit fusarienbelastetem Triticaleschrot, der mit Raumbelastungen von 0,5, 0,75 und 1 kg oTS/(m³FV*d) sowie einer Verweilzeit von 80 Tagen durchgeführt wurde. Für Rindergülle in Monofermentation lagen für diese Raumbelastungen und Verweilzeit keine Daten vor, deshalb wurden als Näherung Werte aus Versuchen mit Rindergülle bei einer Raumbelastung von 2 kg oTS/(m³FV*d) und einer Verweilzeit von 30 Tagen verwendet. Aufgrund des hohen Anteils an fusarienbelastetem Triticaleschrot von 80 % an der oTS-Zugabemenge wird der dadurch verursachte Fehler als vernachlässigbar klein angenommen.

Der oTS-Gehalt des Substrates wurde vor den Vergärungsversuchen bestimmt. Damit wurden die Gas- und Methangasausbeuten der Substrate pro t Frischmasse berechnet. Aus den durchschnittlichen Gas- bzw. Methanerträgen der Feldfrüchte wurden die Methangasausbeuten pro Hektar ermittelt. (vgl. Abbildung 14 und Abbildung 15) Verwendet wurden die durchschnittlichen Erträge pro Hektar in Sachsen in den Jahren 2000 bis 2006 [STATISTISCHES LANDESAMT DES FREISTAATES SACHSEN 2007]. Dabei wurden die Erträge des Jahres 2003 aufgrund der in diesem Jahr extrem trockenen Witterung außer Betracht gelassen. Bei allen Silagen wurde der Siliverlust mit 10 % angesetzt und der Ertrag entsprechend reduziert.

Vergleich der Methangasausbeuten (vgl. Abbildung 12 und 13)

Wie bei den Gasausbeuten ergaben sich für die Methangasausbeuten bezogen auf organische Trockensubstanz für die Substrate Maissilage, Ganzpflanzensilage Triticale, Gehaltsrübe und fusarienbelasteter Triticaleschrot hohe Werte mit bis zu 0,404 m³/kg oTS. Die Methangasausbeuten aus der Ganzpflanzensilage Triticale sind mit denen der Maissilage vergleichbar. In einem Fall (Raumbelastung RB = 4 kg oTS/(m³FV*d), oTS- Mischungsverhältnis: 50/50) war die Ganzpflanzensilage Triticale der Maissilage sogar überlegen.

Trotz des deutlich höheren Proteingehaltes der Kleegrassilage erreichte dieses Substrat nur teilweise die Methangasausbeuten von Maissilage. Ursache dafür sind vermutlich die höheren Verdaulichkeitswerte für Maissilage. Dieses Ergebnis erhärtet wiederum die These, dass die Umsetzung der Biomasse in einer Biogasanlage mit der Umsetzung der Substrate im Rindermagen annähernd vergleichbar ist.

Die höchsten Werte für die Methangasausbeute wurden mit Zuckerrübe mit 0,534 und Rapspresskuchen mit 0,461 m³/kg oTS erreicht.

Auf die Ackerfläche bezogen brachten Zuckerrübe und Gehaltsrübe bei Raumbelastungen von 4 bzw. 2 kg oTS/(m³FV*d) mit 5 677 bzw. 5 626 m³/(ha*a) den höchsten Methangasertrag. Eine Steigerung der Raumbelastung 2 auf 3 kg oTS/(m³FV*d) reduziert bei Gehaltsrübe die flächenbezoge-

ne Methangasausbeute signifikant auf 3 251 m³/(ha*a). Dabei spielten auch beginnende Prozessinstabilitäten eine Rolle.

Bei Maissilage wurde das Maximum der flächenbezogenen Methangaserträge in Vergärung mit Hühnerkot bei einem Anteil in der Cofermentation von 50 % und der Raumbelastung von 4 kg oTS/(m³FV*d) mit 4 581 m³/(ha*a) erreicht. Das Maximum bei der Ganzpflanzensilage Triticale wurde ebenfalls beim Mischungsverhältnis von 50/50 und der Raumbelastung von

4 kg oTS/(m³FV*d) mit 2 859 m³/(ha*a) erreicht. Die großen Unterschiede im Frischmasseertrag pro Hektar spielen hierbei eine große Rolle (vgl. [STATISTISCHES LANDESAMT DES FREISTAATES SACHSEN 2007]). Kleegrassilage kommt trotz einem höheren Frischmasseertrag nur teilweise auf höhere Methangashektarerträge als fusarienbelastetes Triticaleschrot. Rapspresskuchen weist die geringsten Methangashektarerträge auf, da es ein Verarbeitungsprodukt der geernteten Ölsaaten ist. In Abbildung 14 und Abbildung 15 sind die Methangashektarerträge für alle untersuchten Substrate dargestellt.

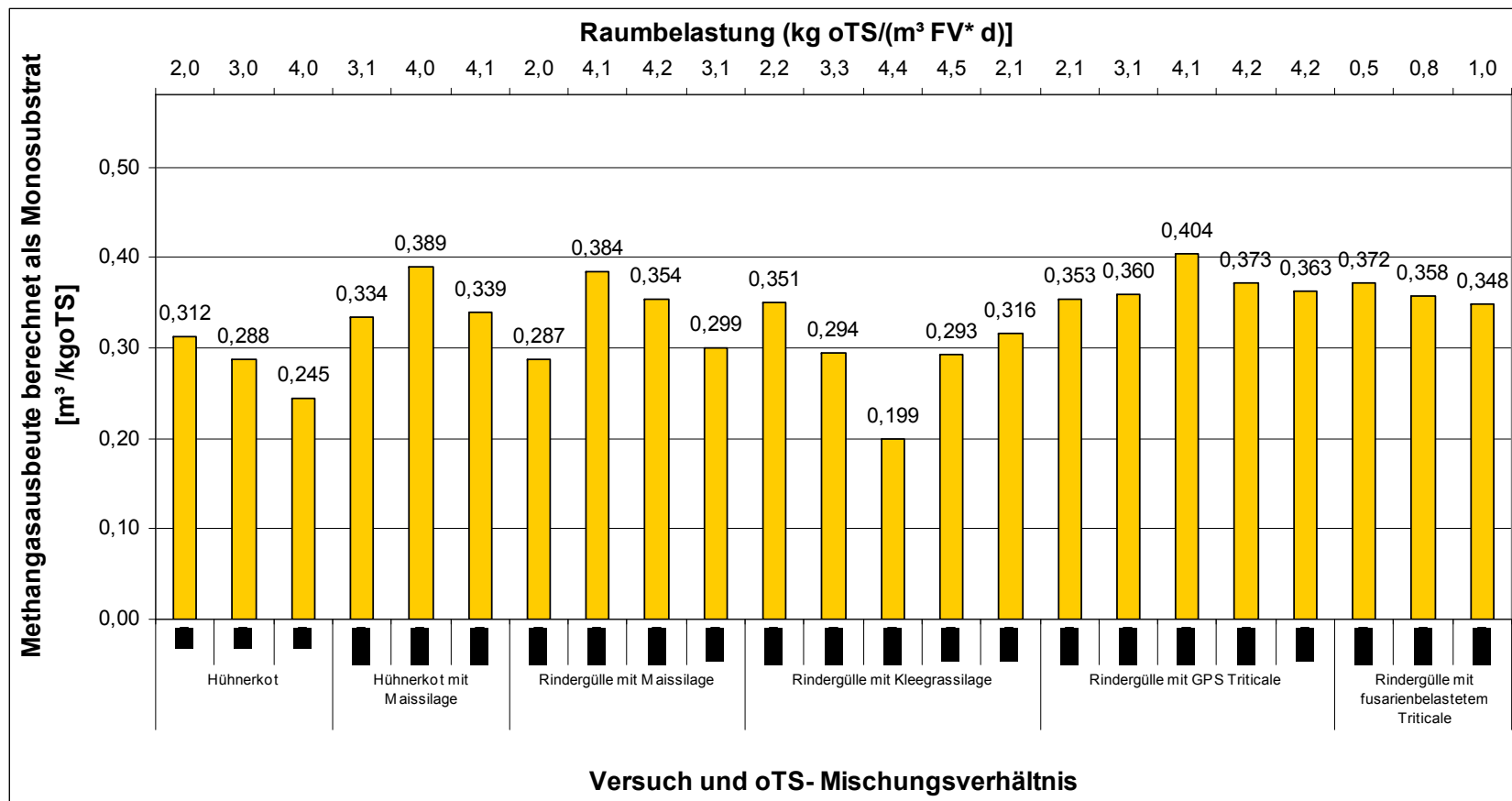


Abbildung 12: Methangasausbeute für Hühnerkot im Monofermentationsversuch und berechnet als Monosubstrat für Maissilage, Kleegrassilage, Ganzpflanzensilage Triticale und fusarienbelastetem Triticaleschrot

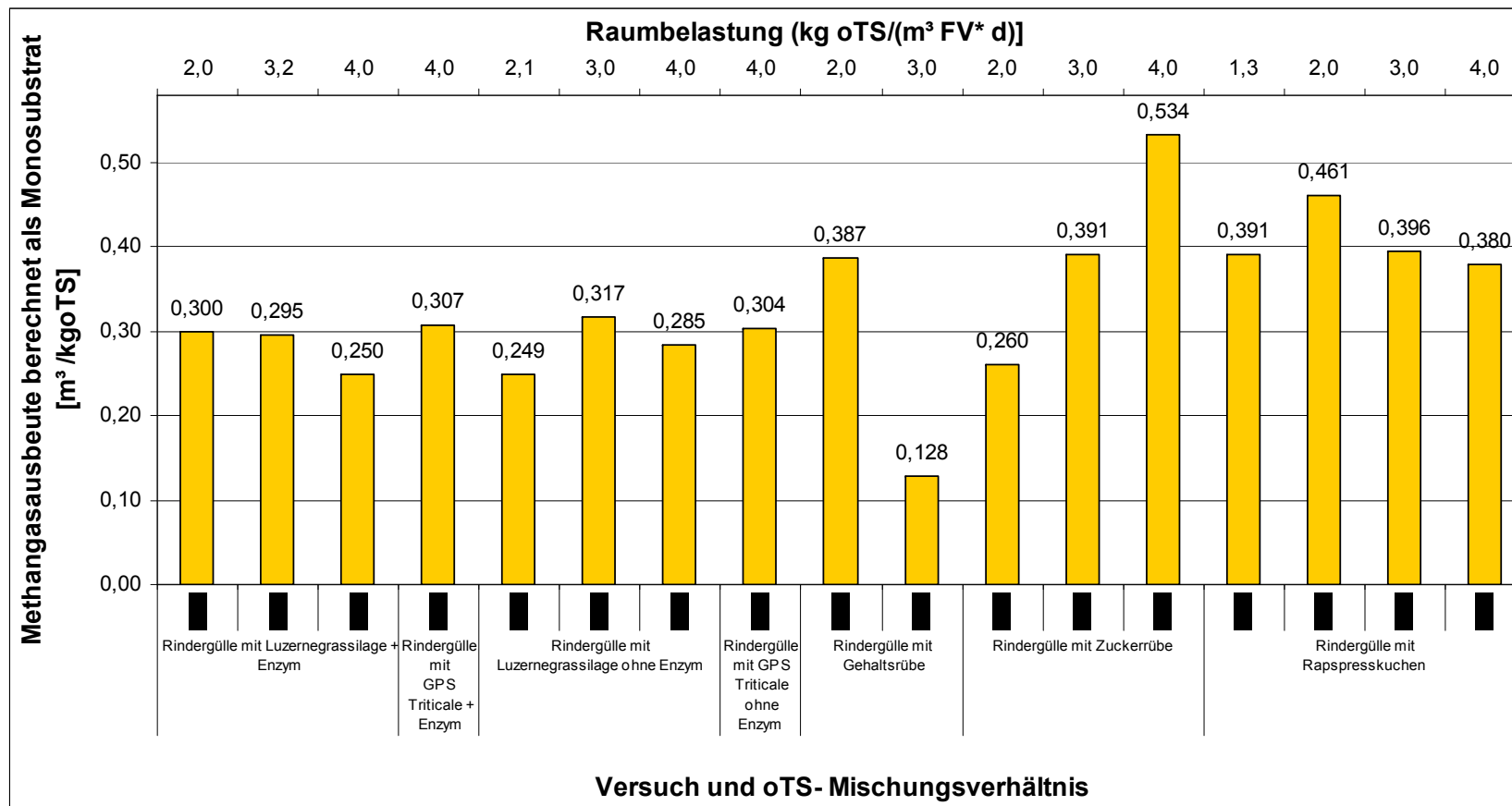


Abbildung 13: Methangasausbeute berechnet als Monosubstrat für Luzernegrassilage mit und ohne Enzymzusatz, Ganzpflanzensilage Triticale mit und ohne Enzymzusatz, Gehaltsrübe, Zuckerrübe und Rapspresskuchen

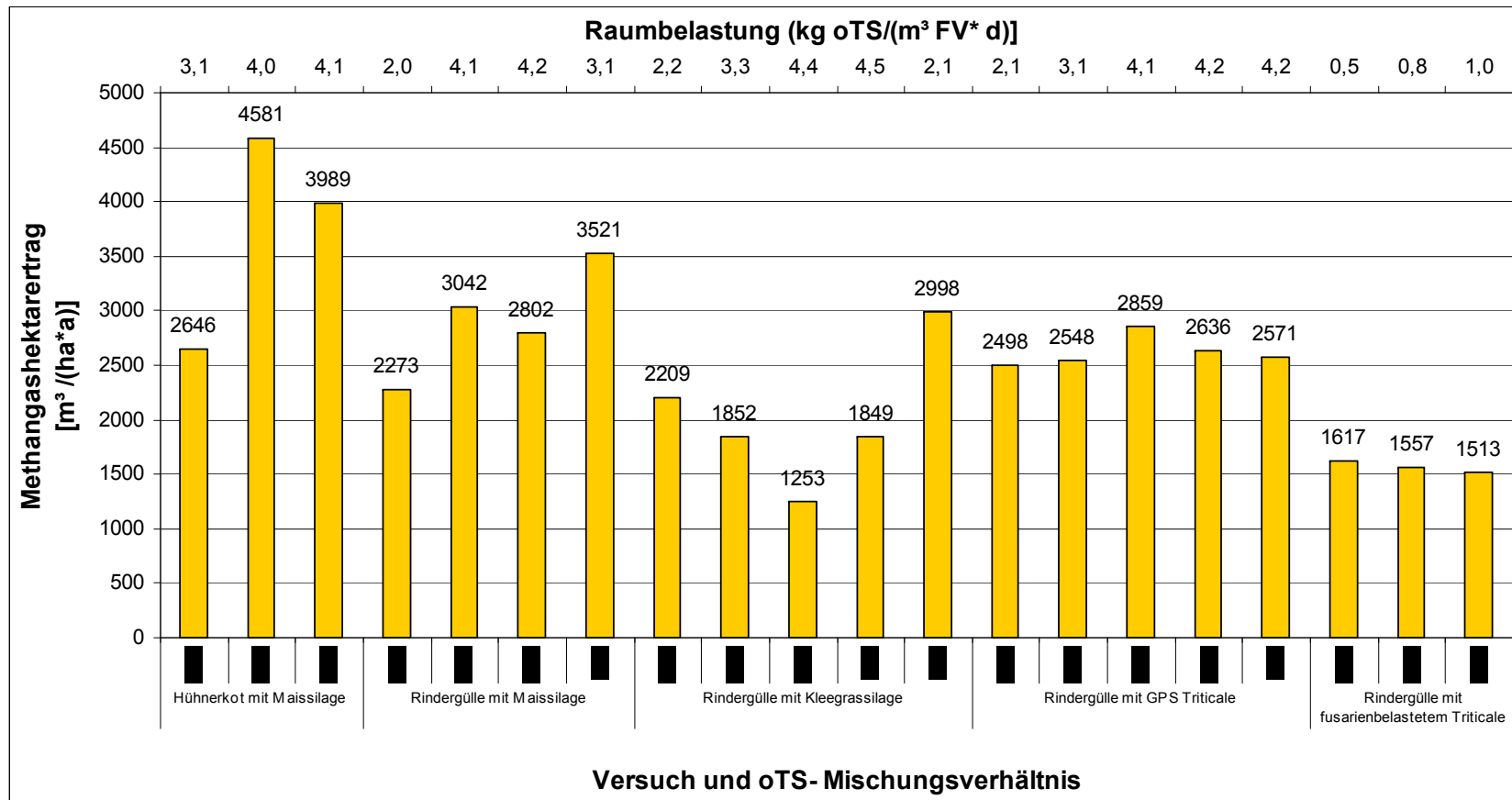


Abbildung 14: Methan gas yield berechnet als Monosubstrat für Maissilage, Kleegrassilage, Ganzpflanzensilage Triticale und fusarienbelastetem Triticaleschrot

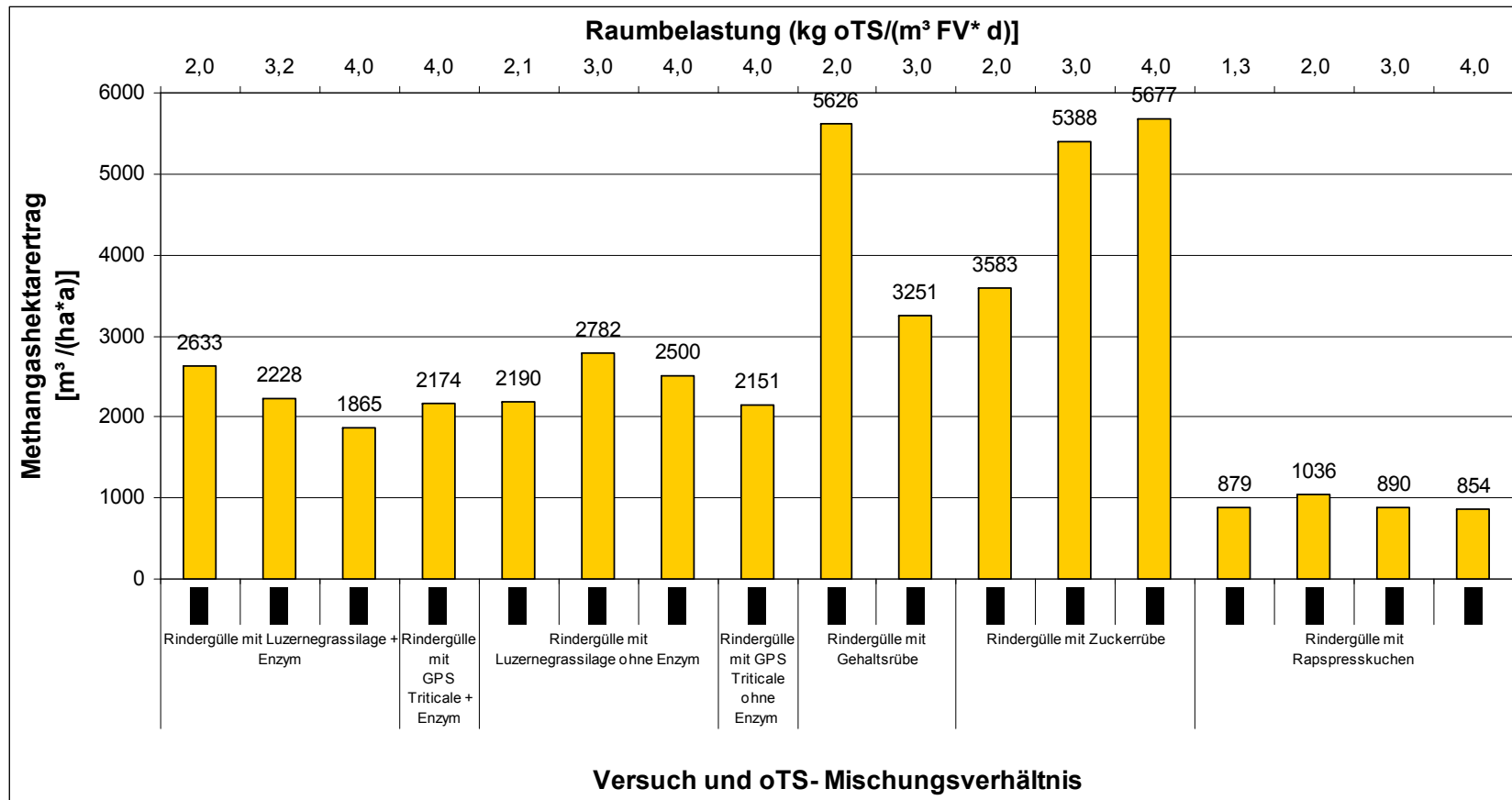


Abbildung 15: Methangashektarertrag berechnet als Monosubstrat für Luzernegrassilage mit und ohne Enzymzusatz, Ganzpflanzensilage Triticale mit und ohne Enzymzusatz, Gehaltsrübe, Zuckerrübe und Rapspresskuchen

Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen die Ergebnisse für die Methangasausbeute der untersuchten Substrate im Batch- und im kontinuierlichen Versuch im Vergleich mit theoretisch erzielbaren Werten. Für die theoretische Bestimmung der erzielbaren Methangasausbeuten wurden zwei Methoden herangezogen

1. die Ermittlung der maximal möglichen theoretischen Umsetzung der Inhaltsstoffe zu Biogas ($VQ = 100\%$) nach den Richtwerten von BASERGA [1998] für Kohlehydrate, Fette und Proteine
2. die Methode von KEYMER und SCHILCHER [KEYMER 1999] mit den Futterwerten der Substrate unter Berücksichtigung von Verdauungsquotienten (VQ) Diese Berechnungsmethode ist u.a. in [OHLY 2006] ausführlich beschrieben.

Wenn man das Niveau der Methangasausbeuten „berechnet als Monosubstrat“ mit denen des Batchversuches vergleicht, sind in den meisten Versuchen annähernd die Ergebnisse der Batchvergärung erreicht worden. Bei den Substraten Zucker- und Gehaltsrübe, Ganzpflanzensilage Triticale, Rapspresskuchen und Maissilage übersteigen die Methangasausbeuten aus dem kontinuierlichen Versuch teilweise sogar die Werte aus dem Batchversuch. Bei höheren Raumbelastungen und bei sich anbahnenden Prozessstörungen differieren die Werte deutlicher, die Werte für die Methangasausbeute im kontinuierlichen Versuch bleiben hinter denen des Batchversuches zurück.

Für Ganzpflanzensilage Triticale und Luzernegrassilage wurden im Batchversuch für die Varianten ohne Enzymzusatz um 4,5 bis 12,7 % höhere Werte für die Methangasausbeute ermittelt. Insgesamt ist damit trotz leichter Vorteile der Variante mit Enzymzusatz bei den kontinuierlichen Versuchen keine eindeutig positive Wirkung des Enzyms auf die Methangasausbeute zu erkennen. Die Abweichungen liegen innerhalb der üblichen Schwankungsbreiten.

Beim Vergleich der theoretischen Werte nach der Futterwertmethode nach KEYMER und SCHILCHER [KEYMER 1999] (blaue Säulen in Abb. 16 und 17) mit den Ergebnissen aus den kontinuierlichen Versuchen mit fusarienbelastetem Triticaleschrot und teilweise mit Rapspresskuchen, Gehaltsrübe, Klee gras-, Luzernegras- und Maissilage konnte eine gute Übereinstimmung festgestellt werden. Bei Ganzpflanzensilage Triticale und Zuckerrübe übersteigt die Methangasausbeute dagegen deutlich die nach Futterwert berechneten Werte.

Um Aussagen zur Effizienz der Umsetzung treffen zu können, wurde eine Art „Wirkungsgrad“ definiert (schwarze Punkte in Abbildung 16 und Abbildung 17). Dazu wird die Methangasausbeute „berechnet als Monosubstrat“ bezogen auf die maximal mögliche theoretische Umsetzung der Inhaltsstoffe Kohlehydrate, Fette und Proteine zu Biogas ($VQ = 100\%$). Dafür werden die Richtwerte nach BASERGA [1998] verwendet. Zu beachten ist, dass es sich hierbei nicht um einen echten Wirkungsgrad im thermodynamischen Sinne handelt, sondern lediglich um ein Hilfskonstrukt zur Beurteilung des Grades der Umwandlung. Dabei kann es vorkommen, dass aufgrund quantitativ

nicht erfassbarer Synergieeffekte mit dem Cosubstrat der „Wirkungsgrad“ Werte von 100 % und darüber erreicht.

Dabei kam Ganzpflanzensilage Triticale auf sehr hohe Werte zwischen 80 bis nahezu 100 % der maximal möglichen Methangasausbeute. Fusarienbelastete Triticale und Rapspresskuchen erreichten ebenfalls hohe Wirkungsgrade zwischen 75 und 91 %. Die niedrigsten Wirkungsgrade wurden bei Kleegrassilage mit 65 bis 80 % erzielt. Im Fall der Prozessstörung bei einer Raumbelastung von 4,4 kg oTS/(m³FV*d) wird dies auch am Wirkungsgrad deutlich: es wurden nur 45 % erreicht. Ebenfalls niedrige Wirkungsgrade zwischen 56 und 71 % wurden mit Luzernegrassilage erzielt. Dabei war kein Vorteil beim Einsatz von Enzym feststellbar. Gehaltsrübe erreichte einen hohen Wirkungsgrad von 95 %. Die beginnende Prozesshemmung machte sich mit einem Abfall auf 32 % bemerkbar.

Mit Maissilage wurde ein hoher Wirkungsgrad zwischen 71 und 93 % realisiert. Für Hühnerkot konnte kein Wirkungsgrad berechnet werden, da hierfür keine Futterwerte vorlagen.

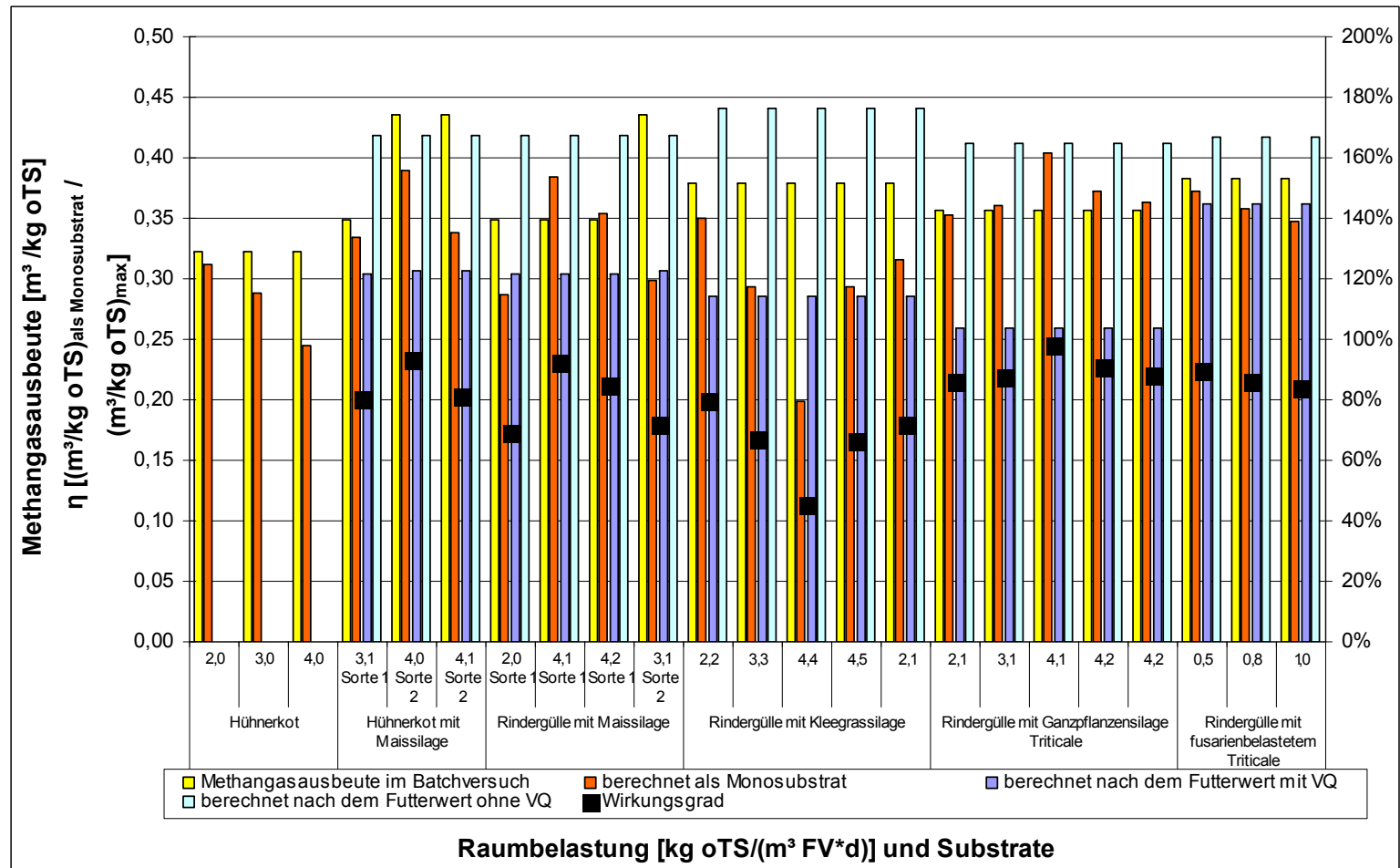


Abbildung 16: Methangausbeute im Batchversuch, im kontinuierlichen Versuch in Cofermentation „berechnet als Monosubstrat“, nach dem Futterwert mit und ohne Verdauungsquotient und Wirkungsgrad der Vergärung verschiedener Substrate

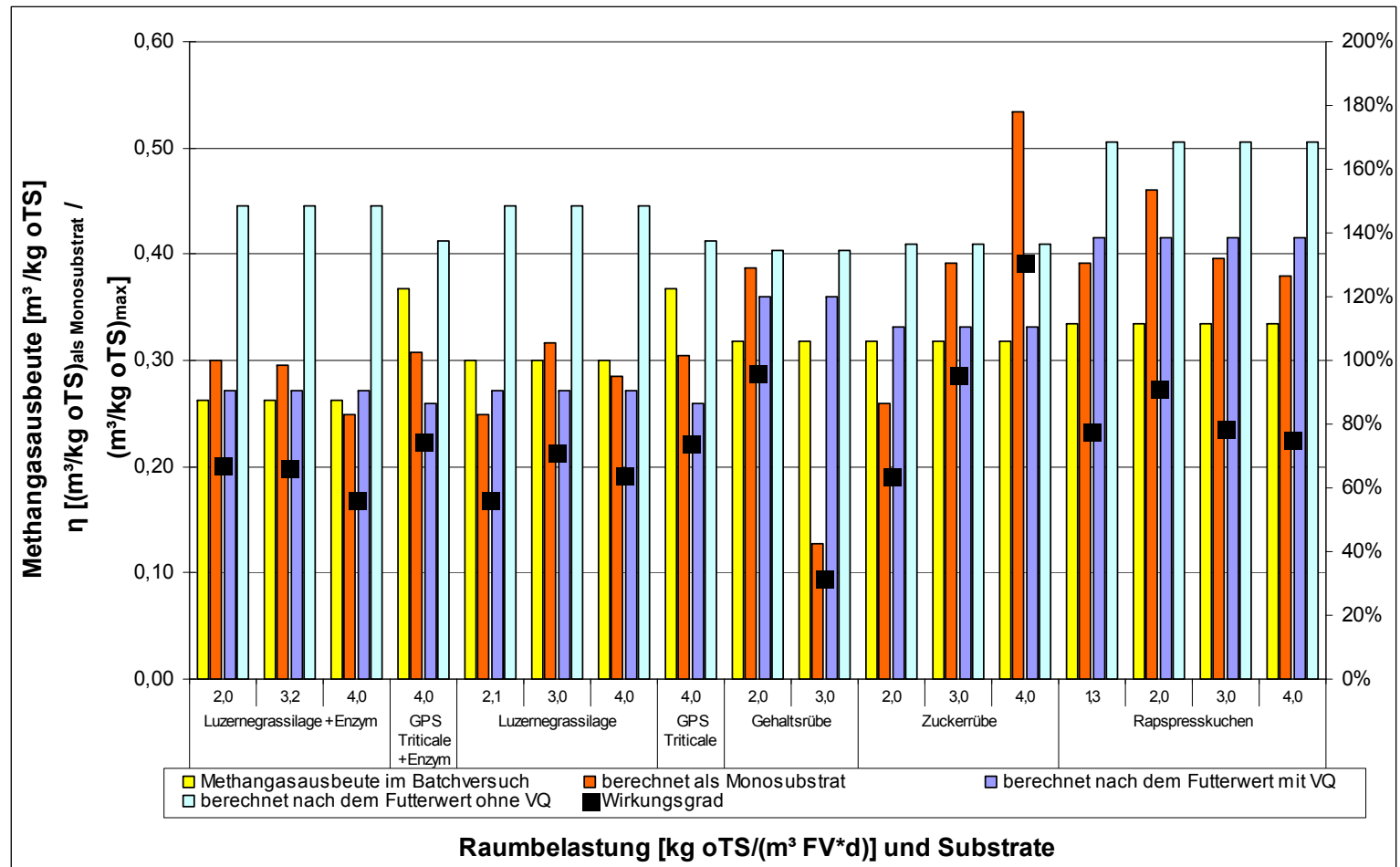


Abbildung 17: Methangausausbeute im Batchversuch, berechnet als Monosubstrat, nach dem Futterwert mit VQ und Wirkungsgrad der Vergärung verschiedener Substrate

7 Zusammenfassung

Erfahrungen mit Cofermentationsprozessen in landwirtschaftlichen Biogasanlagen haben gezeigt, dass einerseits die Cofermentation hervorragende Möglichkeiten bietet, die Gas- und Methangasproduktion zu steigern und damit die Biogaserzeugung wirtschaftlicher zu gestalten, andererseits aber die Kenntnisse über das Zusammenspiel verschiedener Substrate in einer Biogasanlage trotz intensiver Forschungsarbeit in den letzten zehn Jahren lückenhaft sind. Eine mit wechselnden Cofermenten betriebene Biogasanlage bedarf stärkerer Beobachtung und Betreuung als gut eingefahrene Anlagen mit Monosubstraten, da die Bakterien auf jeden Substratwechsel äußerst sensibel reagieren, wie auch die vorliegenden Untersuchungsergebnisse zeigen. Die Anlagenbetreiber bewegen sich damit zwischen zwei Extremen: Entweder wird die Biogasanlage nicht ihren Möglichkeiten entsprechend ausgelastet, was letztlich zu empfindlichen wirtschaftlichen Einbußen führt, oder die Anlagen werden überlastet, stürzen ab und müssen neu angefahren werden. Ein solcher Anfahrprozess kann mehrere Monate in Anspruch nehmen, sodass der wirtschaftliche Schaden durch den Stillstand der gesamten Anlage (einschließlich BHKW) den durch Nichtauslastung noch um ein Vielfaches übersteigt.

Die Auswertung der verfügbaren Fachliteratur hat gezeigt, dass die Datenbasis über die Vergärung von Mischsubstraten (z.B. Gülle und beliebiges Coferment) im Hinblick auf die erzielbare Gasproduktion und Gaszusammensetzung unzureichend ist. Dies gilt insbesondere auch für den zeitlichen Verlauf in Abhängigkeit vom eingesetzten Substrat. Dazu kommt, dass bei entsprechenden wissenschaftlichen Untersuchungen die Gaserzeugung in der Regel auf die eingesetzte organische Trockensubstanz bezogen wird, der Landwirt aus Kostengründen aber vorrangig an einer maximalen Gasproduktion (bezogen auf das Fermentervolumen) und einer maximalen Gasausbeute des Substrats bezogen auf die Tonne Frischmasse und an flächenbezogenen Angaben interessiert ist. Aus diesen Gegebenheiten wurde die Aufgabenstellung für das in diesem Bericht dokumentierte Forschungsprojekt abgeleitet:

1. Erweiterung der Datenbasis durch Untersuchungen in einer Laborbiogasanlage
2. Erweiterte Ergebnisdarstellung, die
 - nicht nur die Gasausbeute (bezogen auf eingesetzte organische Trockensubstanz), sondern auch die Gasproduktion (bezogen auf das Fermentervolumen) und die Versuchsparameter Raumbelastung und Verweilzeit umfasst,
 - die Größen Gasausbeute/Gasproduktion und den zeitgleich ermittelten Methangehalt zur Größe Methangasausbeute/Methangasproduktion zusammenfasst. Der Vorteil ist eine wesentlich vereinfachte Darstellung, die eindeutig interpretiert werden kann. Dadurch sind die Forschungsergebnisse leicht verständlich und für den Praktiker einfach umzusetzen.
 - die Methangasausbeute auf die Tonne Frischmasse bezieht (vgl. Darstellungen in [WALTER 2007])
 - den Methangasertrag flächenbezogen darstellt.

Dadurch ergeben sich je nach Betrachtungsweise ganz unterschiedliche Ergebnisse, die nachfolgend aber einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse z.B. von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen oder die ökologische Beurteilung haben. So ist in der Regel das Substrat mit dem höchsten Methanertrag pro oTS nicht notwendigerweise das mit dem besten Ergebnis bezogen auf die eingesetzte Frischmasse oder dem höchsten Flächenertrag. Weiterhin sind bei ganzjährig eingesetzten nachwachsenden Rohstoffen Einflüsse durch Transport und Lagerung zu berücksichtigen (Qualitätsveränderungen, z.B. Silierverluste bei Silagen, Kosten).

Die Versuche haben bestätigt, dass die Cofermentation je nach Substrat den Gasertrag erheblich steigern kann, dass aber andererseits die Gefahr den Prozess zu überlasten, zunimmt. Die Maximierung der Methangasproduktion steht im direkten Zusammenhang mit der Raumbelastung. Sie ist jedoch begrenzt durch die Prozessstabilität. Aus diesem Grund kommt der Beobachtung und Interpretation der entsprechenden Messwerte große Bedeutung zu.

In der Laboranlage wurde bei Belastungsversuchen die Raumbelastung bis zur Stabilitätsgrenze gesteigert. Je nach Substrat wurden dabei Raumbelastungen von bis zu 4,5 kg oTS/(m³ FV*d) erreicht. Dieser Bereich der Raumbelastung ist vergleichsweise hoch und wird in Praxisanlagen kaum realisiert. Entsprechend lag die Methangasproduktion in der Regel höher (größerer Substratdurchsatz) als in Praxisanlagen, die Methangasausbeute dagegen niedriger, da bei hoher Raumbelastung die effektive Verweilzeit zurückgeht und die Bakterien für den Abbau der organischen Trockensubstanz weniger Zeit zur Verfügung haben.

Bei diesen Versuchen lief der Prozess zwar nicht mehr stabil, es kann jedoch aus den Versuchen abgeleitet werden, dass ein stabiler Prozess bei geringfügig niedrigerer Raumbelastung zwar nicht die Grenzwerte, aber trotzdem noch eine Methangasproduktion auf hohem Niveau erreicht. Die konsequente Beobachtung des Methangehaltes und der gebildeten Gasmenge ist für die Überwachung des Prozesses unerlässlich, jedoch wird im Falle sinkender Werte eine Störung zwar registriert, aber nicht deren Ursache erkannt. Hemmungen werden zwar häufig, aber nicht ausschließlich durch Versäuerung verursacht.

Die untersuchten Silagen Ganzpflanzensilage Triticale, Klee gras-, Luzernegras- und Maissilage sind energiereiche Substrate (nicht nur für die Säurebildner, sondern auch für die Methanbildner), deshalb folgt der pH-Wert unmittelbar den Säurewerten und kann damit als guter Indikator für die Beurteilung der Prozessstabilität eingesetzt werden. Dies gilt jedoch nur, wenn Ganzpflanzensilage Triticale, Klee gras-, Luzernegras- und Maissilage als Monosubstrate eingesetzt werden.

Bei den Covergärungsversuchen wurde die bekannte Tatsache bestätigt, dass der pH-Wert kein ausreichendes Kriterium zur Beurteilung der Prozessstabilität ist. In Vergärungsversuchen von Substraten in Monovergärung oder mit geringen Anteilen an Rindergülle zeigte sich dagegen, wie z.B. im Versuch Rindergülle mit Maissilage, dass der pH-Wert unter Umständen ein aussagekräfti-

ges Kriterium zur Beurteilung der Prozessstabilität sein kann. Prozessbegleitend sollten regelmäßig die freien Fettsäuren und deren Verhältnis zueinander analysiert werden, um Prozessstörungen rechtzeitig zu erkennen. Der Parameter FOS/TAC zur Beurteilung der Prozessstabilität hat sich als ein gutes und aussagekräftiges Instrument bestätigt. Er kann schnell und relativ kostengünstig auch von Anlagenbetreibern ermittelt werden und erlaubt eine Aussage über den Grad der Anlagenauslastung. Es gibt jedoch Ausnahmen, wo der FOS/TAC-Wert nachweislich Prozessstörungen nicht anzeigt, wie z.B. im Versuch Rindergülle mit Maissilage. Ab dem 112. Versuchstag zeigen alle Parameter deutlich eine Prozessüberlastung an, lediglich der FOS/TAC-Wert bleibt weiterhin im als unkritisch angesehenen Bereich von weit unter 0,3. Deshalb ist es wichtig, die Stabilität des Prozesses immer anhand mehrerer Parameter zu beurteilen.

Im Versuch mit Ganzpflanzensilage Triticale, Rapspresskuchen, Luzernegrassilage und Hühnerkot konnte die aufgetretene Prozesshemmung durch eine Anreicherung von freien Fettsäuren gut mit den FOS/TAC-Werten abgebildet werden. Der Zusammenhang zwischen den Konzentrationen der freien Fettsäuren und den FOS/TAC-Werten wird bei weiteren Versuchen und bei den noch ausstehenden Analyseergebnissen von besonderem Interesse sein.

Die Prozessstabilität allgemein und zusätzlich die Prozessstabilität bei der gleichzeitigen Vergärung von mehreren Cosubstraten muss weiter Gegenstand zukünftiger Forschung sein, da sich hier noch viele Wissenslücken auftun, die geschlossen werden müssen, um größtmögliche Effizienz und damit Wirtschaftlichkeit beim Einsatz nachwachsender Rohstoffe in Biogasanlagen zu realisieren und die Stabilität des Prozesses bei gleichzeitig hoher Anlagenauslastung zu garantieren.

Von den untersuchten Substraten erreichte Rindergülle mit Ganzpflanzensilage Triticale die höchste Methangasproduktion mit bis zu $1,459 \text{ m}^3/(\text{m}^3\text{FV}\cdot\text{d})$ bei hoher Raumbelastung von $4,2 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3\text{FV}\cdot\text{d})$. Die Versuche mit Maissilage unter Zugabe von Hühnerkot sowie Rindergülle als Grundsubstrat lieferten ebenfalls herausragende Ergebnisse hinsichtlich der Methangasproduktion. Beim Methangas-Hektarertrag liegen die Rüben noch vor den Silagen. Von den Silagen erbringen Mais und Ganzpflanzensilage Triticale gute Ergebnisse.

Die Vergleiche, sowohl mit Daten aus Praxisanlagen als auch mit Literaturwerten bzw. Ergebnissen anderer wissenschaftlicher Untersuchungen sind notwendigerweise lückenhaft, da eine umfassende Datenbasis nicht existent ist. Aus diesem Grund wurde versucht, zumindest die theoretische Gasausbeute und den Methangehalt sowie daraus die zu erwartende Methangasausbeute zu berechnen und mit den Versuchsdaten zu vergleichen. Dieser Vergleich (vgl. Kapitel 6.2) zeigt nur bei energiereichen und in Wasser gut löslichen Substraten wie Triticaleschrot eine sehr gute Übereinstimmung. Deshalb besteht nach wie vor auch Forschungsbedarf hinsichtlich der Modellierung des Fermentationsprozesses und der theoretischen Abschätzung von Gas- bzw. Methangaserträgen. Weiterhin existiert derzeit kein Berechnungsmodell für die theoretische Berechnung der die Wirt-

schaftlichkeit bestimmenden Größen Gasproduktion bzw. Methangasproduktion. Deshalb sind Gärtests im kontinuierlichen Versuch mit Variation der Raumbelastung zwingend erforderlich.

Bei der Vergärung von fusarienbelastetem Triticaleschrot wurden Versuche zur grundsätzlichen Vergärbarkeit und zur Abbaubarkeit der Stoffwechselprodukte von Fusarienpilzen im Triticaleschrot bei einer Raumbelastung von maximal $1 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \text{FV} \cdot \text{d})$ durchgeführt. Ein Einfluss der Fusarienbelastung auf den Fermentationsprozess konnte nicht nachgewiesen werden. Die Vergärung erfolgte bei niedriger Raumbelastung und war in allen Versuchen stabil. Die Methangasausbeute lag in der Größenordnung wie die von unbelastetem Triticaleschrot. Die Analyse des Gärrestes auf die Stoffwechselprodukte der Fusarien, der Konzentrationen an Deoxynivalenol (DON) und Zearalenon (ZEA), ergab einen fast vollständigen Abbau der Fusarienbelastung durch die anaerobe Fermentation. Die Ergebnisse werden durch eine vorangegangene eigene Untersuchung [HANTSCHMANN 2008] sowie durch eine Untersuchung einer anderen Forschungseinrichtung [FRAUZE et al. 2006] bestätigt.

Die Wirksamkeit eines Enzyms zur Steigerung der Methangasausbeute wurde in Parallelversuchen mit Rindergülle mit Luzernegrassilage und Ganzpflanzensilage Triticale getestet. Teilweise konnte eine Steigerung der Methangasausbeute von bis zu 10 % ermittelt werden, andererseits aber auch geringere Erträge von bis zu 3,8 %. Im Batchversuch zeigte der Ansatz mit Enzym eine um bis zu 12,7 % niedrigere Gasausbeute im Vergleich zu Ansätzen ohne Enzym.

Um auch die Adaptionfähigkeit der Bakterien in den Untersuchungen besser zu berücksichtigen und dieses Potenzial zur Verbesserung des Prozesses in die Untersuchungen einfließen zu lassen, könnte bei künftigen Forschungsarbeiten die Vorgehensweise dahingehend abgeändert werden, dass im Gegensatz zur jetzigen Verfahrensweise bei Belastungsversuchen zuerst eine Steigerung des Mischungsverhältnisses bis hin zum 100%igen Einsatz als Monosubstrat erfolgt, bevor die Raumbelastung erhöht wird. Gegebenfalls wäre es dann möglich, Ergebnisse für die Monofermentation einzelner Substrate zu erhalten, die wegen einer zu hoch gewählten Raumbelastung in diesem Projekt in Monofermentation nicht stabil vergoren werden konnten.

Die Autoren bedanken sich bei dem Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie für die Förderung und Unterstützung des Projektes.

Weiterhin geht ein herzliches Dankeschön an die Mitarbeiter des Institutes für Wärmetechnik und Thermodynamik der TU Bergakademie Freiberg, insbesondere an die Mitarbeiter der Werkstatt für ihren unermüdlichen Einsatz bei den immer wieder erforderlichen Umbauten an der Laboranlage. Zahlreichen Studenten gilt unser Dank für ihre Hilfe besonders auch bei der Wochenendbetreuung unserer Anlage. Vielen Dank auch an alle anderen, die uns Interesse, Hilfe und Unterstützung zuteil werden ließen, sei es in fachlicher Hinsicht oder durch tatkräftige praktische Hilfe.

Literaturverzeichnis

- BASERGA U. (1998): Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen, FAT Berichte Nr. 512, 1998
- BRAUN, R. (1982): Biogas – Methangärung organischer Abfallstoffe; Springer Verlag Wien, New York, 1982
- DIN 38414: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, Schlamm und Sedimente (Gruppe S), Teil 2 und 3, Berlin 1985
- EICHERT, H.; WESOŁOWSKI, S.; FERCHAU, E.; OHLY, N. (2005): Untersuchung und Bewertung organischer Stoffe aus landwirtschaftlichen Betrieben zur Erzeugung von Biogas in Cofermentationsprozessen, Forschungsprojekt an der TU Bergakademie Freiberg, gefördert von der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Abschlussbericht November 2005
- EICHERT, H.; JÄKEL, K.; WESOŁOWSKI, S.; FERCHAU, E.; WIEDEMANN, W.; ET AL. (2003): „Einsatz von Cofermentaten, Energiebilanz und Wirtschaftlichkeit in landwirtschaftlichen Biogasanlagen“ Forschungsprojekt an der TU Bergakademie Freiberg in Kooperation mit der Westsächsischen Hochschule Zwickau und der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft; gefördert von der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Abschlussbericht September 2003
- FNR (2005): Ergebnisse des Biogas- Messprogramms, Hrsg. Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe, Gülzow 2005
- FNR (2006): Handreichung – Biogasgewinnung und -nutzung, Hrsg. Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe, Gülzow 2006
- FRAUZ, B.; WEINMANN, U.; OECHSNER, H. (2006): Abtötung von Fusariensporen während des Gärprozesses in Biogasanlagen, Universität Hohenheim, in Landtechnik April 2006
- GRONAUER, A.; EFFENBERGER, M.; KAISER, F.; METZNER, T. (2007): Sicherung der Prozessstabilität in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft, LfL-Information, Freising-Weißenstephan 2007
- HANTSCHMANN, G. (2008): Versuch zum Verhalten von Deoxynivalenol (DON) in einer Biogasanlage, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, FB 8
- KEYMER, U.; SCHILCHER, A. (1999): Überlegungen zur Errechnung theoretischer Gasausbeuten vergärbare Substrate in Biogasanlagen. Landtechnik-Bericht Nr. 32., Freising 1999
- MORSCHNER, J. (2007): Anleitung zur Ermittlung des FOS/ TAC mittels Titration, Fermenter- Doktor, Stuttgart 2007
- OHLY, N. (2006): Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Optimierung der Biogasgewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen, Dissertation TU Bergakademie Freiberg 2006
- STATISTISCHES LANDESAMT DES FREISTAATES SACHSEN (2007) Bodennutzung und Ernte im Freistaat Sachsen, Kamenz 2007
- SCHMACK, D. (2001): Biotechnologie von Vergärungsprozessen, in Tagungsband Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial, Gülzower Fachgespräche, Band 15, FNR, Gülzow 2001 (auch s. http://www.fnr.de/veroff/gfg_bd15.pdf)
- STIER, E.; FISCHER, M. (1993): Klärwärter- Taschenbuch, 11. Auflage, Hrsg. von der Abwassertechnischen Vereinigung e.V., St. Augustin, f. Hirthammer Verlag, München 1993

- VDI-RICHTLINIE 4630 Vergärung organischer Stoffe, Substratcharakteristik, Probennahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche, Düsseldorf 2006
- WALTER, G.; WESOLOWSKI, S.; FERCHAU,.; MARDAS, G. (2007): Untersuchung und Bewertung organischer Stoffe aus landwirtschaftlichen Betrieben zur Erzeugung von Biogas in Co- und Monofermentationsprozessen, Forschungsprojekt an der TU Bergakademie Freiberg, gefördert von der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Abschlussbericht Oktober 2007
- WEILAND, P. (2001): Grundlagen der Methangärung – Biologie und Substrate; VDI-Berichte, Nr. 1620 „Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven“; S. 19-32; VDI-Verlag
- WEILAND, P. (1999): Kofermentation von Bioabfällen nach dem Rotenburger Konzept, in Jahresbericht 1998, 6. Forschungsreport der Institute: Institut für Technologie, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig 1999
- WEIßBACH; KUHLA (1995): Stoffverluste bei der Bestimmung des Trockenmassegehaltes von Silagen und Grünfutter, Übersicht Tierernährung, 1995

Impressum

Herausgeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Internet: www.smul.sachsen.de/fulg

Autoren: Dr.-Ing. Saskia Wesolowski
Dipl.-Ing. (FH) Erik Ferchau
Prof. Dr.-Ing. Dimosthenis Trimis
TU Bergakademie Freiberg
Lehrstuhl Gas- und Wärmetechnische Anlagen
09596 Freiberg
Telefon: 03731 39-3635
Telefax: 03731 39-3942
E-Mail: wesolow@iwtt.tu-freiberg.de

Redaktion: Dr. Claudia Brückner
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Referat Betriebs-, Umweltökonomie
August-Böckstiegel-Straße 3
01326 Dresden
Telefon: 0351 2612-2522
Telefax: 0351 2612-2099
E-Mail: claudia.brueckner@smul.sachsen.de

Endredaktion: Öffentlichkeitsarbeit
Präsidialabteilung

ISSN: 1867-2868

Redaktionsschluss: Mai 2009

Für alle angegebenen E-Mail-Adressen gilt:

Kein Zugang für elektronisch signierte sowie für verschlüsselte elektronische Dokumente

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlhelfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.