

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB)

Ingenieurbüro Ratzka, Ostrau

Agrargenossenschaft „Bergland“ Clausnitz e.G.

Schlussbericht

zum Vorhaben

Wissenschaftliche Begleitung – Pilotanlage mit Wannenreaktoren zur Biogasgewinnung aus organischen Feststoffen

Förderkennzeichen 22004803

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Projektzeitraum:	01.03.2004 – 28.02.2007
Projektleiter:	Prof. Dr. agr. habil. Dipl.-Ing. B. Linke
Projektbearbeitung:	Dipl.-Ing. agr. J. Mumme
Projektpartner:	Dipl.-Ing. agr. L. Eckardt
	Agrargenossenschaft Bergland Clausnitz e.G.
	Hauptstraße 13
	09623 Clausnitz

Dipl.-Ing. P. Ratzka
Ing.-Büro Ratzka
Eichenweg 3
04749 Ostrau

Potsdam, Mai 2007

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	3
1 Kurzdarstellung	4
1.1 Aufgabenstellung.....	4
1.2 Voraussetzungen	4
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	4
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	5
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
2 Eingehende Ergebnisdarstellung	6
2.1 Einleitung und Stand des Wissens.....	6
2.2 Beschreibung der Pilotanlage Clausnitz.....	7
2.3 Erprobung des ursprünglichen Verfahrenskonzepts mit Verwendung von Einstauflüssigkeit aus einem Nassfermenter	9
2.4 Erprobung des geänderten Verfahrenskonzepts mit Bioleaching	20
2.5 Anhang zu den Ergebnissen	52
3 Voraussichtlicher Nutzen	70
4 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens	70
5 Veröffentlichung der Ergebnisse	71
Literaturverzeichnis	71
Anlage	73
I Erfolgskontrollbericht	73
I.1 Beitrag des Ergebnisses zu förderpolitischen Zielen	73
I.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis.....	73
I.3 Fortschreibung des Verwertungsplans	74
I.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	74
I.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer	75
I.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung.....	75
II Kurzfassung (Berichtsblatt)	Fehler! Textmarke nicht definiert.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung Bedeutung

ATB	Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.
BHKW	Blockheizkraftwerk
BS	Buttersäure
C	Kohlenstoff
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
CS	Capronsäure
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ES	Essigsäure
FFS	flüchtige Fettsäuren
FM	Frischmasse
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
GPS	Ganzpflanzensilage
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
LF	elektrische Leitfähigkeit
MS	Milchsäure
NawaRo	Nachwachsender Rohstoff
N _{Kjel.}	Gesamt-Stickstoff nach Kjeldahl
NH ₄ -N	Ammonium-Stickstoff
oTS	organische Trockensubstanz
p _i	oTS bezogenes Impfmateriale-Substrat-Verhältnis
PS	Propionsäure
TS	Trockensubstanz
v	Volumen
vppm	volume parts per million
Vol.-%	Volumenprozent
VS	Valeriansäure
XF	Rohfaser

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Die Novellierung des EEG im Jahr 2004 hat für den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen und anderen organischen Feststoffen aus landwirtschaftlicher Produktion zur Biogasgewinnung deutlich bessere Rahmenbedingungen geschaffen. Biogasanlagen werden heute fast ausschließlich als so genannte Nassfermentationsanlagen betrieben, bei denen die Fermenter organische Feststoffe direkt oder angemischt mit flüssigem Gärrest als Substrat erhalten. Durch den verstärkten Einsatz von fester Biomasse werden besonders hohe Anforderungen an die Durchmischung des Fermenterinhalt gestellt, da die zugeführten Stoffe stärker als bei Gülle zur Bildung von Schwimm- und Sedimentschichten neigen. Damit verbunden sind höhere Kosten, die sich negativ auf das Betriebsergebnis auswirken. Eine Alternative ist die Kombination einer Nass- mit einer Trockenfermentationsanlage, indem die Fermentationsräume zur Biogasgewinnung aus festen und flüssigen organischen Substraten entkoppelt werden. Bei diesem Verfahren dient eine mikroorganismenhaltige Prozessflüssigkeit als Einstauflüssigkeit (Impf Schlamm) für die Trockenfermentationsanlage, die im Batch-Betrieb mit organischen Feststoffen beschickt wird.

Im vorliegenden Projekt sollen Kenntnisse über die praktische Anwendung der kombinierten Nass- und Trockenfermentation gewonnen werden. Dieses wird erreicht durch die wissenschaftliche Begleitung einer entsprechenden landwirtschaftlichen Pilotanlage. Durch die wissenschaftliche Begleitung der Pilotanlage sowie parallel durchgeführte kleintechnische Versuche, wird das Zusammenspiel von Trocken- und Nassfermentation analysiert und optimiert. Weitere Aufgaben sind die Ermittlung des Einflusses der Zugabe von festem Impfmateriale auf den Gärprozess sowie die Analyse der Leistungsfähigkeit. Abschließend sollen Empfehlungen zur Anwendung und Weiterentwicklung des Verfahrens erarbeitet werden.

1.2 Voraussetzungen

Die Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde, haben sich auch während des Vorhabens gegenüber der Darstellung im Projektantrag nicht wesentlich geändert. Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten der Fermentation von nachwachsenden Rohstoffen nehmen eher noch an Bedeutung zu, da das Erneuerbare-Energien-Gesetz während des Vorhabens im Juli 2004 novelliert wurde. Dadurch erfolgt derzeit eine zusätzliche Vergütung des Biogases, das ausschließlich aus Gülle und/oder Energiepflanzen gewonnen wird. Zudem wird auf das untersuchte Verfahren zur Trockenfermentation weiterhin ein Innovationsbonus von 2 Ct. je erzeugte kWh gewährt.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die ursprüngliche Arbeits- und Zeitplanung musste aufgrund technischer Schwierigkeiten an der Pilotanlage Clausnitz verändert werden. Im Wesentlichen betrafen die Schwierigkeiten die Zuführung von bakterienhaltiger Flüssigkeit in die Trockenfermenter. So konnte mit der ursprünglich vorgesehenen Verwendung von flüssigem Gärrest aus einer güllevergärenden Nassfermentationsanlage aufgrund einer zu hohen Viskosität keine Durchströmung des Feststoffstapels erzielt werden. Daraufhin wurde, nach Genehmigung durch die FNR, anstelle des alten Konzeptes das Verfahren des Bioleachings unter Verwendung einer eigenen feststoffarmen Prozessflüssigkeit verfolgt und anlagentechnisch umgesetzt. Aus diesen Gründen konnte erst im Januar 2006 mit der Erprobung der prinzipiell funktionsfähigen Pilotanlage begonnen werden. Durch einen Defekt der Trockenfermenter-Tore in Verbindung mit entsprechenden

Reparaturarbeiten musste die wissenschaftliche Erprobung der Pilotanlage zwischen Mai und September 2006 unterbrochen werden. Anschließend wurden die Erprobungsarbeiten ab Oktober 2006 wieder aufgenommen.

Aufgrund der durch die Veränderung des Verfahrenskonzeptes sowie den technischen Störungen stark verkürzten Erprobungszeit wurde der Arbeitsplan reduziert. So wurde die zu untersuchende Palette an NawaRos im Wesentlichen auf Triticale-GPS beschränkt. Daneben wurde auf die ursprünglich vorgesehenen Parallelversuche zur Feststofffermentation ohne Einstauflüssigkeit verzichtet. Alle Veränderungen im Arbeitsplan wurden durch die FNR genehmigt. Ebenfalls von der FNR genehmigt wurde die kostneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um 3 Monate bis einschließlich Februar 2007. Hierdurch konnte nach der Wiederinbetriebnahme der Pilotanlage ein zweiter Betriebszeitraum von Oktober 2006 bis Februar 2007 wissenschaftlich ausgewertet werden.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die unter Feststoff- oder Trockenfermentation bekannten Verfahren, die auf eine Reaktordurchmischung verzichten, arbeiten satzweise, d.h. der Fermenter wird mit schüttfähigem Substrat und einem Teil bereits vergorenem, aber noch schüttfähigem Gärrest vermischt und gasdicht verschlossen. Diese aus der Bioabfallfermentation bekannten Verfahren (Thomé-Kozmiensky 1995; Bidlingmaier und Müsken 1997) sind auch für landwirtschaftliche Gärsubstrate von Interesse, da nicht die gesamte Reaktionsmasse mit hohem Energieaufwand durchmischt werden muss und der noch schüttfähige Gärrest in einer konventionellen Stroh-Stallmist-Kette verwertet werden kann. Zur Beschleunigung des anaeroben Abbaus wird das schüttfähige Gemisch perkoliert (berieselt) und damit der anaerobe Abbau beschleunigt. Für landwirtschaftliche Substrate wie Mist und grünem Pflanzenmaterial wird in der Literatur ein satzweise arbeitendes System mit Perkolation und anschließender Biogasgewinnung in einem Anaerobfilter beschrieben (Wellinger et al. 1984). Eine praktische Anwendung ist jedoch nicht bekannt geworden.

Im Hinblick auf die Verwendung von flüssigem Gärrest aus einer bestehenden Nassfermentationsanlage zur Beimpfung der zu vergärenden Feststoffe wurde in der Agrargenossenschaft „Bergland“ Clausnitz (Sachsen) eine satzweise arbeitende Trockenfermentationsanlage errichtet. Von bekannten Verfahren, welche das Impfmateriale über eine Berieselung von oben applizieren (Perkolations-Verfahren), unterscheidet sich das angewendete Funktionsprinzip durch eine aufwärtsgerichtete Flüssigkeitsströmung, die durch den Einstau der Feststoffe erreicht wird. Dieses Verfahren wird als Einstau- oder Aufstauverfahren bezeichnet.

Durch Kusch et al. (2006) ist bekannt, dass zur Fermentation von energiereichen Feststoffen wie NawaRos eine einfache Kreislaufführung der Prozessflüssigkeit in Trockenfermentern nicht zielführend ist, da aufgrund der starken Versäuerungsneigung erhebliche Mengen an festem Impfmateriale zugegeben werden müssen. Dieses führt zu einer Verringerung der Anlagenproduktivität und erhöht zusätzlich den Aufwand der Mischungsbereitung. Eine alternative Prozessgestaltung ist das als Bioleaching- oder Leach Bed-Verfahren bezeichnete System bei dem die Prozessflüssigkeit nicht nur durch die Trockenfermenter sondern auch durch einen weiteren Methan-Nassreaktor zirkuliert wird (Ghosh und Klass 1978). Hierdurch lässt sich die Konzentration bakterieller Biomasse im Gesamtsystem erhöhen, ohne dass teurer Reaktionsraum in den Trockenfermentern verloren geht.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Es erfolgte eine intensive Kooperation mit den am Netzwerk „Biogas-Crops“ beteiligten Instituten. Dieses vom BMBF geförderte Verbundprojekt leistet wissenschaftliche Grundlagenforschung zur Biogasgewinnung aus pflanzlicher Biomasse. Hierzu gehören auch Fragestellungen zur optimalen Gestaltung der Trockenfermentation. Diese Fragen werden innerhalb des Unterthemas „Untersuchungen zur Entwicklung eines optimalen Verfahrens zur Fermentation von Biogas-Crops durch zweistufige Prozessführung mit Bioleaching“ auch unter Beteiligung des ATB bearbeitet. Damit konnte ein Dialog zu beiderseitigem Nutzen, im Hinblick auf die Projektbearbeitung, geführt werden.

Aufgrund der thematischen Nähe wurde außerdem ein intensiver wissenschaftlicher Austausch mit dem von der FNR geförderten und am ATB bearbeiteten Projekt „Regenerative Energieerzeugung auf Landwirtschaftsbetrieben durch die effiziente Nutzung nachwachsender Rohstoffe und biogener Reststoffe in einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft für Biomasse“ (FKZ 22002504) betrieben, zu beiderseitigem Vorteil. Aufgabe dieses Vorhabens war die wissenschaftliche Begleitung einer Pilotanlage zur Trockenfermentation in Pirow (Brandenburg), die ein ähnliches Funktionsprinzip wie die Pilotanlage Clausnitz besitzt.

Des Weiteren erfolgte eine Zusammenarbeit mit zwei weiteren am ATB bearbeiteten Projekten, die die Analyse der mikrobiellen Diversität in Biogasanlagen zum Thema haben. Hierzu gehört das von der FNR geförderte Vorhaben „Monitoring der methanbildenden Mikroflora in Praxis-Biogasanlagen im ländlichen Raum: Analyse des Ist-Zustandes und Entwicklung eines quantitativen Nachweissystems“ (FKZ – 22011804). Das zweite Projekt, mit dem Titel „Erfassung der mikrobiellen Biozönosen in Monofermentationen von Getreide-Ganzpflanzensilage in mehrstufigen Fermentationen (Bioleaching-Verfahren)“ war ein weiteres Unterthema im genannten Netzwerk „Biogas-Crops“. Beiden Projekten wurden mikroorganismenhaltige Proben aus der Pilotanlage Clausnitz sowie der kleintechnischen Versuchsanlage am ATB zur Verfügung gestellt. Erste Ergebnisse aus der mikrobiologischen Analyse bestätigten prinzipiell das Funktionsprinzip des Bioleaching-Verfahrens.

2 Eingehende Ergebnisdarstellung

2.1 Einleitung und Stand des Wissens

Die Novellierung des EEG im Jahr 2004 hat für den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen und anderen organischen Feststoffen aus landwirtschaftlicher Produktion zur Biogasgewinnung deutlich bessere Rahmenbedingungen geschaffen. Biogasanlagen werden heute fast ausschließlich als so genannte Nassfermentationsanlagen betrieben, bei denen die Fermenter organische Feststoffe direkt oder angemischt mit flüssigem Gärrest als Substrat erhalten. Als Folge der anaeroben mikrobiellen Zersetzung der organischen Feststoffe wird Biogas freigesetzt, während im Gärrest schwer abbaubare organische Verbindungen, Nährsalze und Wasser verbleiben. Durch den verstärkten Einsatz von fester Biomasse werden besonders hohe Anforderungen an die Durchmischung des Fermenterinhaltendes gestellt, da die zugeführten Stoffe stärker als bei Gülle zur Bildung von Schwimm- und Sedimentschichten neigen. Damit verbunden sind höhere Kosten, die sich negativ auf das Betriebsergebnis auswirken.

Eine Alternative ist die Kombination einer Nass- mit einer Trockenfermentationsanlage, indem die Fermentationsräume zur Biogasgewinnung aus festen und flüssigen organischen Substraten entkoppelt werden. Bei diesem Verfahren dient eine mikroorganismenhaltige Prozessflüssigkeit als Einstauflüssigkeit (Impfschlamm) für die Trockenfermentationsanlage, die im Batch-Betrieb mit organischen Feststoffen beschickt wird. Da die Fermentation in den „Tro-

ckenfermentern“ für den mikrobiellen Stofftransport ebenfalls Flüssigkeit benötigt, sollte eher von einer halbfleuchten Fermentation im schüttfähigen Zustand gesprochen werden.

Die unter Feststoff- oder Trockenfermentation bekannten Verfahren arbeiten satzweise, d.h. der Fermenter wird mit schüttfähigem Substrat und einem Teil bereits vergorenem, aber noch schüttfähigem Gärrest vermischt und gasdicht verschlossen. Diese aus der Bioabfallfermentation bekannten Verfahren (Thomé-Kozmiensky 1995; Bidlingmaier und Müsken 1997) sind auch für landwirtschaftliche Gärsubstrate von Interesse, da nicht die gesamte Reaktionsmasse mit hohem Energieaufwand durchmischt werden muss und der noch schüttfähige Gärrest in einer konventionellen Stroh-Stallmist-Kette verwertet werden kann. Zur Beschleunigung des anaeroben Abbaus wird das schüttfähige Gemisch perkoliert (berieselt) und damit der anaerobe Abbau beschleunigt. Für landwirtschaftliche Substrate wie Mist und grünem Pflanzenmaterial wird in (Wellinger et al. 1984) ein satzweise arbeitendes System mit Perkolation und anschließender Biogasgewinnung in einem Anaerobfilter beschrieben. Eine praktische Anwendung ist jedoch nicht bekannt geworden.

Im Hinblick auf die Verwendung von flüssigem Gärrest aus einer bestehenden Nassfermentationsanlage zur Beimpfung der zu vergärenden Feststoffe wurde an der Agrargenossenschaft „Bergland“ e.G. Clausnitz (Sachsen) eine satzweise arbeitende Trockenfermentationsanlage errichtet. Von bekannten Verfahren, welche das Impfmateriale über eine Berieselung von oben applizieren (Perkulations-Verfahren), unterscheidet sich das angewendete Funktionsprinzip durch eine aufwärtsgerichtete Flüssigkeitsströmung, die durch den Einstau der Feststoffe erreicht wird. Dieses Verfahren wird als Einstau- oder Aufstauverfahren bezeichnet. Als Substrate kamen dabei insbesondere Energiepflanzen wie Mais- und Getreide-Ganzpflanzensilage zum Einsatz. Die wissenschaftliche Begleitung dieses Vorhabens erfolgte unter Leitung des Leibniz-Instituts für Agrartechnik Bornim e.V. gemeinsam mit der Agrargenossenschaft Bergland und dem Ingenieurbüro Ratzka aus Ostrau. Im vorliegenden Schlussbericht werden die Ergebnisse aus der dreijährigen wissenschaftlichen Begleitung eingehend vorgestellt. Als Substrate kam dabei insbesondere Getreide-Ganzpflanzensilage zum Einsatz.

2.2 Beschreibung der Pilotanlage Clausnitz

Die vom Ingenieurbüro Ratzka an der Agrargenossenschaft Clausnitz geplante Trockenfermentationsanlage besteht im Wesentlichen aus 4 befahrbaren Boxenfermentern mit einem Nutzvolumen von je 120 m³. Die Fermenter können von oben über eine abnehmbare Plane befüllt und der Gärrest über ein verschließbares Tor von vorn entnommen werden. Ursprünglich war vorgesehen, den flüssigen Gärrest aus der bereits vorhandenen Nassfermentationsanlage von unten in den zu vergärenden Substrathaufen einzustauen und die mit organischen Säuren angereicherten Einstauflüssigkeit über einen 150 m³ fassenden Zwischenlagerbehälter in die Nassfermentationsanlage zurückzuführen (**Abb. 1**).

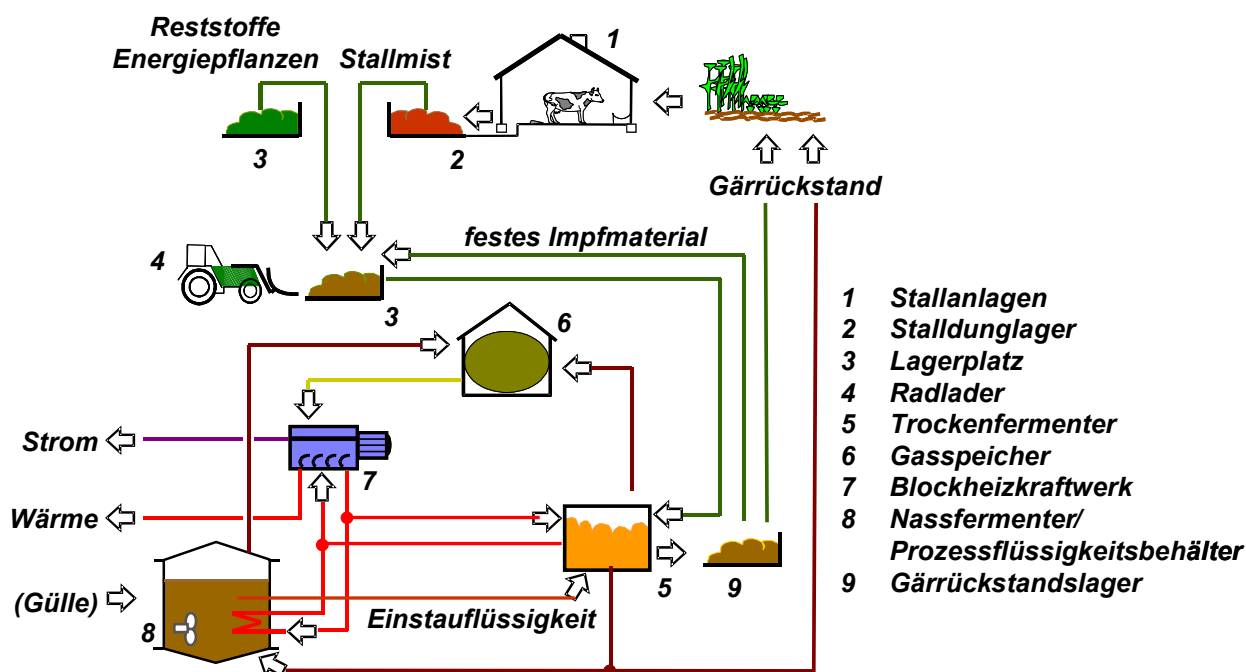


Abb. 1: ursprüngliches Prozessschema des Trockenfermentationsverfahrens an der Agrargenossenschaft Clausnitz

Die Nassfermentationsanlage der Agrargenossenschaft Bergland umfasst 2 Rührkesselreaktoren mit einem Fassungsvermögen von jeweils 1200 m³. Die Verschaltung der Reaktoren in Bezug auf den Flüssigkeitsstrom erfolgt in Reihe. Die Prozesstemperatur liegt einheitlich im mesophilen Bereich zwischen 37 und 40°C. Das Grundsubstrat für die Nassfermentation ist Rindergülle, die in einer durchschnittlichen Menge von 20 t pro Tag anfällt. Neben der Rindergülle werden Futterreste, Siloabfälle sowie NawaRos, insb. Triticale-GPS, zugeführt. Zum Einmischen fester Substrate wird eine Vorgrube von 100 m³ Fassungsvermögen genutzt. Der flüssige Gärrest wird in einem 14.500 m³ großen, offenen Endlager gesammelt. Das entstehende Biogas wird zusammen mit dem Biogas aus der Trockenfermentationsanlage über zwei BHKWs mit einer Nennleistung von jeweils etwa 225 kW_{el} verstromt. Die anfallende Wärme dient zur Beheizung der Nass- und Trockenfermentationsanlagen sowie zur Trocknung von Grünfütter.

Mit der Erprobung der Trockenfermentationsanlage wurde im Februar 2005 begonnen. Nachdem innerhalb eines dreimonatigen Erprobungszeitraums das ursprüngliche Verfahrenskonzept aufgrund einer zu hohen Viskosität des Nassfermenter-Gärrests nicht realisiert werden konnte, wurde das Konzept geändert und ein eingeständiger Flüssigkeitskreislauf geschaffen. Im Einzelnen ergibt sich folgende zeitliche Abfolge:

- Februar 2005** Beginn der Erprobung des Einstauverfahrens mit Verwendung von flüssigem Gärrest
- April 2005** Abschluss der Versuche zur Verwendung von flüssigem Gärrest als Einstauflüssigkeit
- Mai 2005** Schaffung eines provisorischen Anaerobfilters in einem mit Flachsmatten gefüllten Trockenfermenter und Beginn der Erprobung des Einstaus mit einer zirkulierenden wässrigen Einstauflüssigkeit (Bioleaching)

- Juni 2005** die generelle Funktionsfähigkeit des Bioleaching-Konzepts mit wässriger Einstauflüssigkeit kann dargestellt werden
Antragstellung bei der FNR auf Änderung des Verfahrenskonzepts und Anwendung des Bioleaching-Verfahrens
- Juli 2005** Beginn der Umbauarbeiten an der Praxisanlage Clausnitz und Errichtung eines permanenten Anaerobfilters
- Dezember 2005** Abschluss der Umbauarbeiten und Durchführung der Funktionsprüfung
- Januar 2006** Beginn der wissenschaftlich begleiteten Erprobung des Bioleaching-Konzepts an der Pilotanlage Clausnitz
- Februar 2007** Ende der Projektlaufzeit und Abschluss der wissenschaftlichen Begleitung

2.3 Erprobung des ursprünglichen Verfahrenskonzepts mit Verwendung von Einstauflüssigkeit aus einem Nassfermenter

2.3.1 Versuche im labortechnischen Maßstab

Material und Methoden

Für begleitende Laborversuche wurde am Leibniz-Institut für Agrartechnik Bornim eine kleintechnische Versuchsanlage mit jeweils einem Trocken- und Nassfermenter aus Plexiglas aufgebaut, mit nutzbaren Fassungsvermögen von 12 l bzw. 70 l (**Abb. 2**).



Abb. 2: kleintechnische Versuchsanlage zum Einstau-Verfahren mit flüssigem Gärrest

Entsprechend den Vorgaben aus der Praxisanlage wurde auch für die kleintechnische Anlage das Funktionsprinzip der von unten mit flüssigem Impfmateriel zu durchströmenden Feststoffe beibehalten. Umgesetzt wurde dies durch eine nahe dem Behälterboden eingerichtete Verbindung zwischen Trocken- und Nassfermenter, in Form eines Silikonschlauches, der mittels Schieber geöffnet und geschlossen werden konnte. Der Flüssigkeitsaustausch erfolgte dabei durch Erhöhung und Minderung des Gasdruckes im Gasraum des Trockenfermenters, hierzu wurde eine Pumpe eingesetzt. Zur Beschickung des Nassfermenters mit Rindergülle und zur Entnahme des Gärrückstandes waren in diesem Fermenter weitere Stutzen angebracht. Der Nassfermenter wurde ausschließlich mit Rindergülle betrieben, mit einer konstanten σ_{TS} -bezogenen Raumbelastung von $2 \text{ g l}^{-1} \text{ d}^{-1}$.

Die periodische Beschickung und Entnahme von festen Substraten in den Trockenfermenter erfolgte von oben, durch Öffnen des Fermenterdeckels. Für ein besseres Handling wurden die Feststoffe dabei in einem Korb aus Lochblech gelagert. In Übereinstimmung mit der Biogasanlage Clausnitz wurden auch alle Reaktoren des kleintechnischen Versuchsstandes bei mesophilen Temperaturen von 37-40°C betrieben.

Um den Biogasertrag aus den festen Substraten getrennt von der Gasbildung der Rindergülle ermitteln zu können, wurde ein weiterer Nassfermenter mit 3 l Volumen als Referenz mit der selben Rindergülledosierung betrieben. Zusätzlich wurden Batch-Gärtests zur Ermittlung des Biogaspotentials der Rindergülle durchgeführt. Für die Batch-Gärtests wurden 2 l-Faulflaschen verwendet.

Mit entsprechenden Messgeräten wurden alle Reaktoren der Einstau-Versuchsanlage hinsichtlich der Biogasrate, Biogaszusammensetzung sowie Temperatur und pH-Wert analysiert. Weitere chemische und physikalische Analysen wurden im institutseigenen Labor durchgeführt (Methoden s. Anhang Tab. 11).

Mit dem Ziel, eine möglichst gute Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse aus den Labor- und Praxisanlagen zu erhalten, wurden in den Laborversuchen ausschließlich Substrate aus der Agrargenossenschaft „Bergland“ Clausnitz verwendet. Hierzu gehörte als Impfmateriale der Ablauf aus der Nassfermentationsanlage, Rindergülle, Rinderfestmist sowie Triticale-GPS. Alle Substrate wurden hinsichtlich ihrer chemischen Eigenschaften analysiert (**Tab. 1**).

Tab. 1: Stoffkennzahlen der eingesetzten Substrate

	pH [--]	TS [% _{FM}]	oTS [%TS]	NH ₄ -N [g/kg _{FM}]	N _{Ges} [g/kg _{FM}]	org. Säuren [g/kg _{FM}]	Rohfaser [%TS]
Rindergülle	7,1-7,6	7,1-7,7	74-80	1,6-1,9	3,7-4,1	6,98 (Einzel- messung)	-
Rinderfest- mist	9,26	26,60	68,24	1,79	8,17	-	19,66
Triticale-GPS	4,13	41,60	95,45	0,35	4,45	4,94	14,87

Der eingesetzte Rinderfestmist ist, wie auch anhand des nur geringen oTS-Gehalts zu erkennen ist, als Rottemist einzustufen. Durch den geringen Anfall von Festmist in den überwiegend mit Spaltenböden ausgerüsteten Stallanlagen der Agrargenossenschaft Clausnitz besaß der für den Stallmist eine hohe durchschnittliche Lagerungsdauer von 5 bis 10 Wochen.

Ergebnisse und Diskussion

Zu Beginn der kleintechnischen Versuche wurde ein Gärversuch mit 5 kg Rinderfestmist durchgeführt. Zur Erprobung der gewählten Methodik wurde während der ersten 22 Versuchstage ein annähernd täglicher Flüssigkeitsaustausch vorgenommen. Insgesamt lag die Füllmenge des Trockenfermenters bei 10 l. Während des Versuchs wurde die Entwicklung der Biogasrate und des Methangehalts verfolgt (**Abb. 3**). Aufgrund von Undichtigkeiten in der für den Flüssigkeitsaustausch verwendeten Pumpe wurden größere Mengen Luft in das System eingebracht, die im Mittel zu einem Sauerstoffgehalt im Biogas von 5 Vol.-% führten. Der Anteil an Luft wurde nachfolgend aus der Gasbildung herausgerechnet.

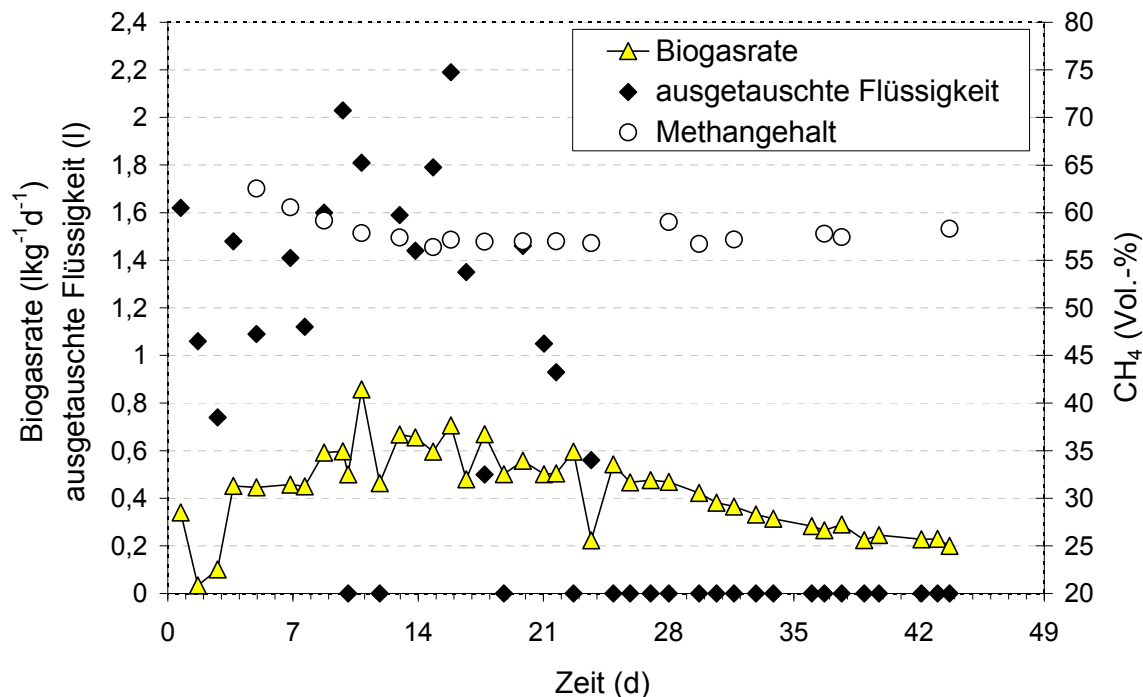


Abb. 3: Prozessverlauf im kleintechnischen Trockenfermenter mit 5 kg Rinderfestmist und Einstauflüssigkeit aus einer Nassfermentationsanlage

Während des Versuchs konnten aus dem Trockenfermenter je Flüssigkeitsaustausch in der Regel zwischen 1 und 2 l Flüssigkeit entnommen und mit dem Nassfermenter ausgetauscht werden. Wie aus dem Verlauf der Biogasrate zu entnehmen ist, wurden nur sehr geringe Stoffumsatzraten realisiert, in der 2. und 3. Versuchswoche wurden maximale Raten zwischen $0,6$ und $0,8 \text{ lkg}^{-1}\text{d}^{-1}$ erreicht. Aufgrund der geringen Prozessaktivität wird davon ausgegangen, dass der Nassfermenter nur mit einem sehr geringen und damit vernachlässigbaren Anteil am Umsatz des eingesetzten Rinderfestmistes beteiligt war. Die Biogasausbeute aus dem Festmist wurde daher nur für den Trockenfermenter, unter Abzug der Gasentwicklung aus der zugegebenen Nassfermenterflüssigkeit, berechnet (**Abb. 4**).

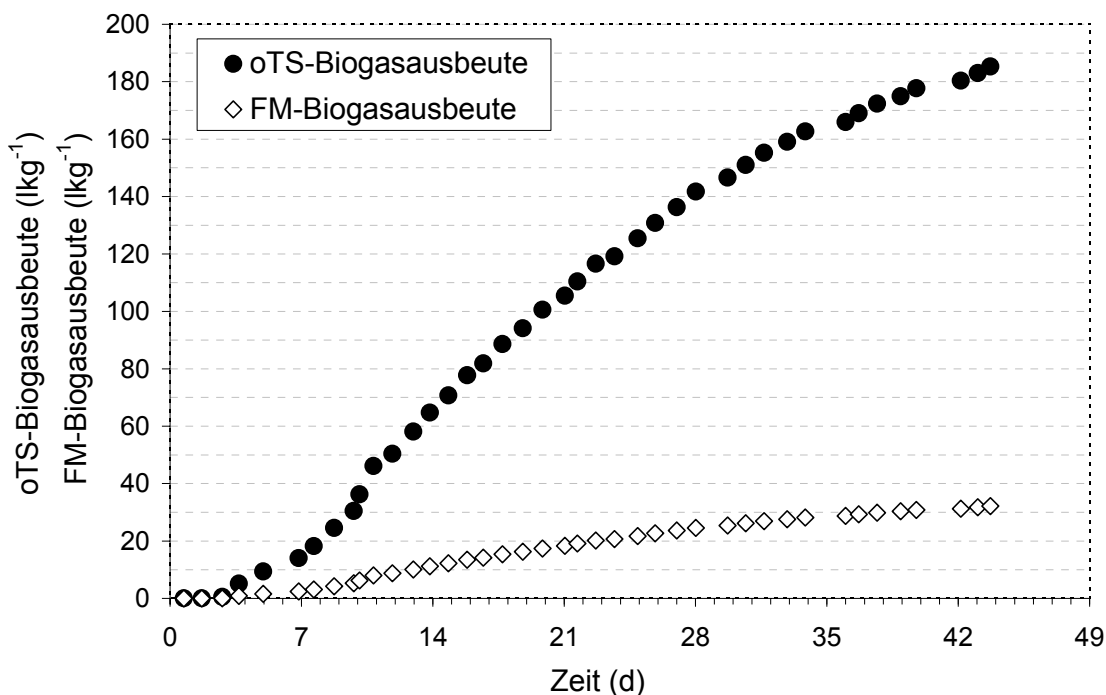


Abb. 4: Entwicklung der Biogasausbeute aus Rinderfestmist im Laborversuch

Die nach einer Verweildauer von 44 Tagen realisierte oTS- und FM-Biogasausbeute von 185 lkg^{-1} bzw. 32 lkg^{-1} ist für Rinderfestmist sehr gering. Dies ist vermutlich durch die lange Liegezeit des Mistes und den dadurch verbundenen Verlusten an organischer Substanz zu begründen. Diese Vermutung wird durch die chemische Analyse des festen Gärrests bestätigt. So verblieb das oTS/TS-Verhältnis während der Vergärung nahezu unverändert (**Tab. 2**).

Tab. 2: Analysenergebnisse des Gärückstandes aus Stallmist

	pH [--]	TS [%FM]	oTS [%TS]	NH ₄ -N [g/kg _{FM}]	N _{Ges} [g/kg _{FM}]	org. Säuren [g/kg _{FM}]	Rohfaser [%TS]
Stallmist- Gärückstand	9,04	17,98	70,26	2,25	5,97	0,00	14,87

In einem weiteren Versuch wurden in der kleintechnischen Versuchsanlage 1,75 kg Triticale-GPS in eingesetzt und die resultierende Gasbildung aufgezeichnet (**Abb. 5**).

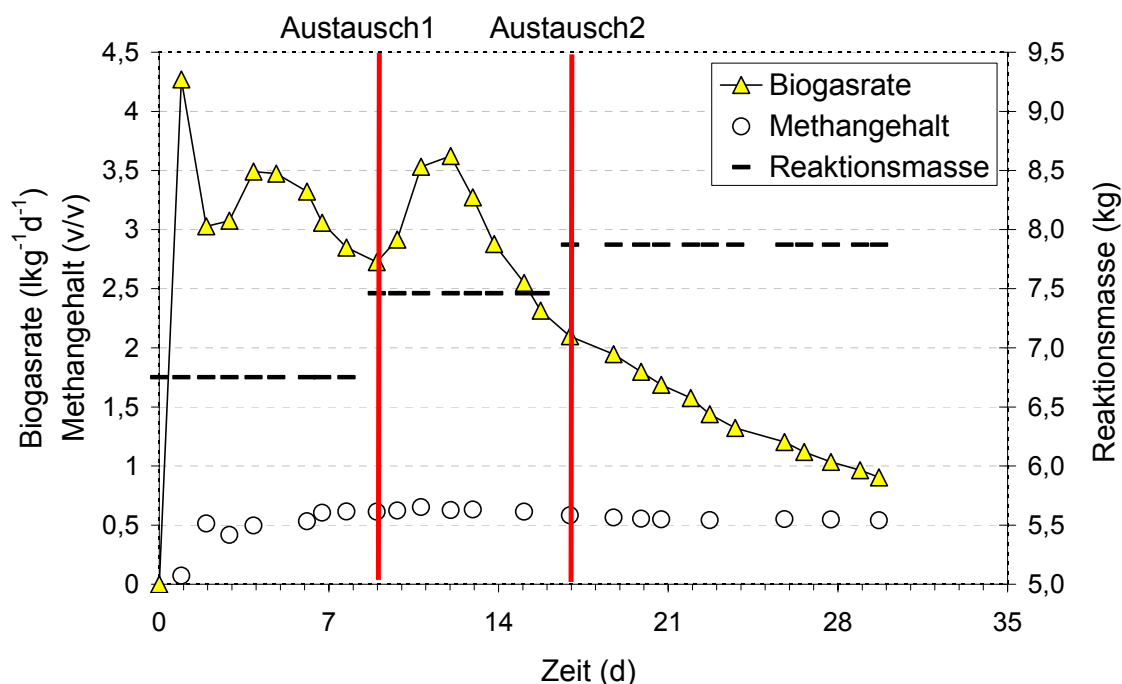


Abb. 5: Prozessverlauf im kleintechnischen Trockenfermenter mit 1,75 kg Triticale-GPS und Einstauflüssigkeit aus einer Nassfermentationsanlage mit zweimaligem Austausch der Flüssigphase

Nach der Befüllung des Trockenfermenters mit der Triticale-GPS wurde dieser mit 5 l Nassfermenterflüssigkeit eingestaut. Daraufhin wurde eine starke Gasentwicklung beobachtet, die für den 1. Versuchstag, bezogen auf die gesamte Reaktionsmasse inkl. Flüssigkeit von 6,75 kg, eine Durchschnittsrate von ca. $4,3 \text{ l kg}^{-1}\text{d}^{-1}$ ergab. Aufgrund des geringen Methan- und hohen CO_2 -Gehalts im anfänglich produzierten Biogas von 7 bzw. 58 Vol.-% lässt sich ein Teil der Gasbildung auf die physikalische CO_2 -Engasung der Einstauflüssigkeit zurückführen. Ab dem 2. Versuchstag kann bei Methangehalten um 50 Vol.-% und Biogasraten zwischen 3 und $3,5 \text{ l kg}^{-1}\text{d}^{-1}$ auf eine stabile Methangärung geschlossen werden.

Nach dem deutlichen Rückgang der Biogasrate auf $2,7 \text{ l kg}^{-1}\text{d}^{-1}$ wurde am 9. Versuchstag ein Flüssigkeitsaustausch vorgenommen. Bei diesem wurde eine Menge von 1,4 l aus dem Trockenfermenter in den Nassfermenter überführt. Anschließend wurden 2,1 l aus dem Nassfermenter zurück in den Trockenfermenter gegeben. Während der darauf folgenden Tage konnte ein Wiederanstiegen der Biogasrate auf bis zu $3,6 \text{ l kg}^{-1}\text{d}^{-1}$ festgestellt werden, wobei der Methangehalt ebenfalls auf bis 65 Vol.-% anstieg. Dies deutet auf den vermehrten Abbau zuvor gebildeter flüchtiger Fettsäuren hin. Ein weiterer Flüssigkeitsaustausch am 17. Versuchstag führte dagegen nicht mehr zu einer signifikanten Reaktion. Die Auswirkungen des Flüssigkeitsaustausches wurden auch hinsichtlich der Wirkung auf den Nassfermenter analysiert (**Abb. 6**).

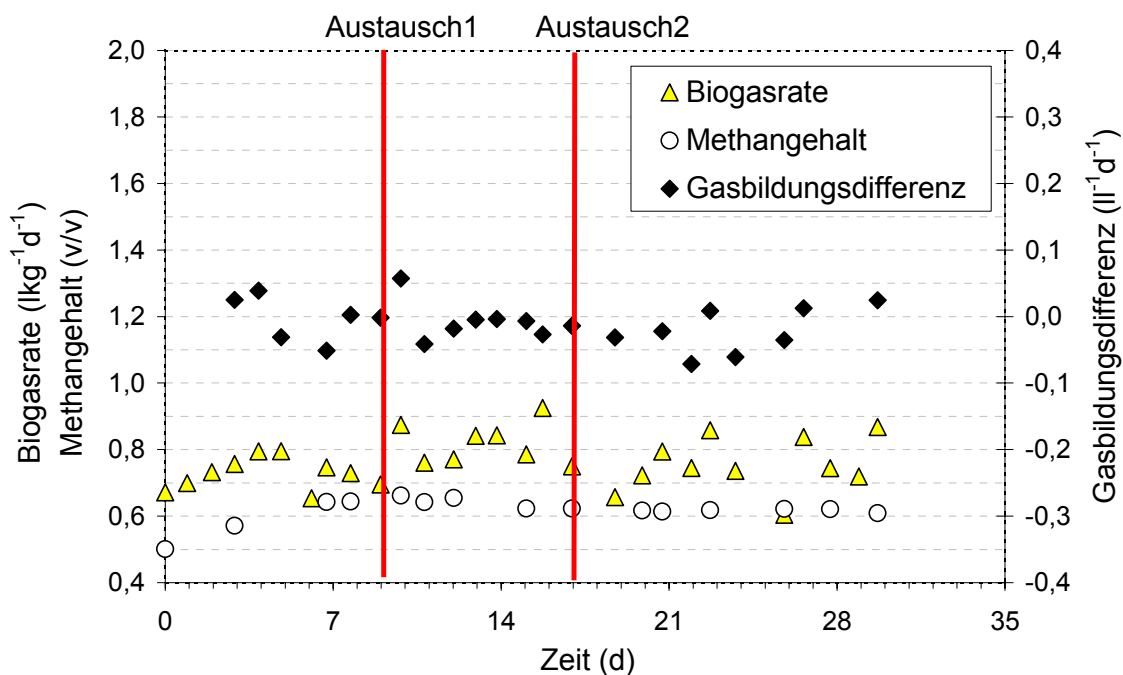


Abb. 6: Prozessverlauf im kleintechnischen Nassfermenter bei Vergärung von 1,75 Triticale-GPS im angeschlossenen Trockenfermenter

Die mittlere Biogasrate des Nassfermenters lag im Bereich von $0,75 \text{ l l}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Zieht man den durch den Referenzreaktor ermittelten Beitrag der Rindergülle am Gesamtaufkommen des Biogases ab, so lässt sich unmittelbar nach dem Flüssigkeitsaustausch am 9. Tag eine leichte kurzzeitige Steigerung der Biogasproduktion erkennen. In der Summe ergibt sich dadurch ein Mehraufkommen an Biogas von ca. 3 l. Parallel zur Zunahme der Produktivität konnte ein leichter Anstieg des Methangehaltes von 64 auf 66 Vol.-% festgestellt werden. Dieses lässt auf den Abbau von flüchtigen Fettsäuren aus dem Trockenfermenter schließen und bestätigt damit das Funktionsprinzip der kombinierten Trocken- und Nassfermentation. Die Entwicklung der Biogausbeute ist in **Abb. 7** dargestellt.

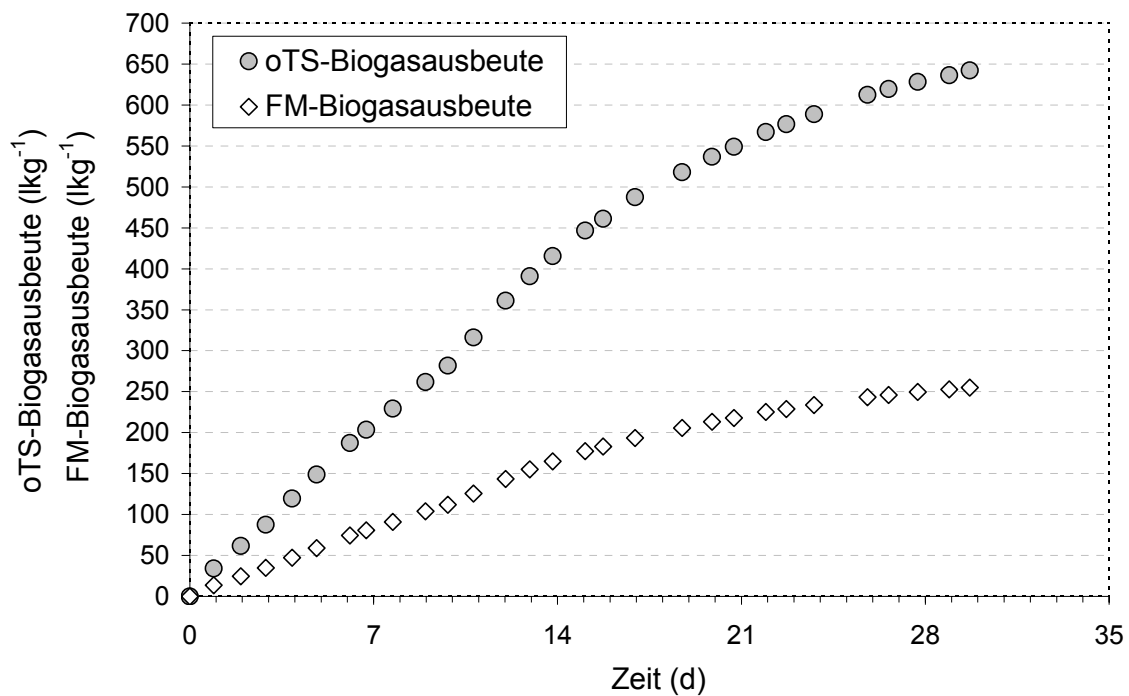


Abb. 7: Entwicklung der Biogasausbeute aus Triticale-GPS im Laborversuch

Bezüglich der aus der Triticale-GPS realisierten oTS- und FM-Biogasausbeute konnte nach einer Verweildauer von 30 Tagen ein Wert von 642 lkg⁻¹ bzw. 255 lkg⁻¹ festgestellt werden. Dies liegt im Bereich der Werte, die auch bei der Nassfermentation von Getreide-GPS erreicht werden (Linke und Mähner 2005). Aus dem Verhalten der Gasbildung beider Fermentern kann geschlussfolgert werden, dass das an der Pilotanlage Clausnitz anzuwendende Kombinationsverfahren aus Nass- und Trockenfermentation aus biologischer Sicht prinzipiell funktionsfähig ist.

2.3.2 Vorversuche an der Pilotanlage Clausnitz

Bezüglich der Praxis-Erprobung der Fermentation von organischen Feststoffen mit Beimischung durch den flüssigen Gärrest aus einer Nassfermentationsanlage wurden an der Agrargesellschaft Clausnitz unterschiedliche Verfahrensvarianten erprobt. Wie sich dabei bereits frühzeitig herausstellte, besteht durch die noch hohe Viskosität des flüssigen Gärrestes ein großes Hindernis für die physikalisch-technische Funktionsfähigkeit im Großmaßstab. Die Schwierigkeiten, die aufgrund der hohen Viskosität auftraten führten zu folgenden Effekten:

- Aufschwimmen der zu vergärenden organischen Feststoffe im Trockenfermenter,
- Geringe, nur wenige Zentimeter starke Eindringtiefe des flüssigen Gärrestes in den Feststoffstapel
- starke Übersäuerung im angeimpften Bereich des Feststoffstapels durch eine zu geringere Austauschrate der Flüssigkeit
- Anstieg der Gasbildungsrate in der ersten Woche nach Prozessbeginn auf bis zu 7 m³ pro Tag und Tonne eingelagerter Feststoffmasse, danach rascher Rückgang auf unter 1 m³t⁻¹d⁻¹
- sehr geringe Biogasausbeuten

Exemplarisch ist in **Abb. 8** der Prozessverlauf der Feststofffermentation von 30 t Triticale-GPS in einer der 120 m³ fassenden Trockenfermenterboxen dargestellt. Bei diesem Versuch wurde eine Einlagerungsdichte von 0,5 t m⁻³ erzeugt.

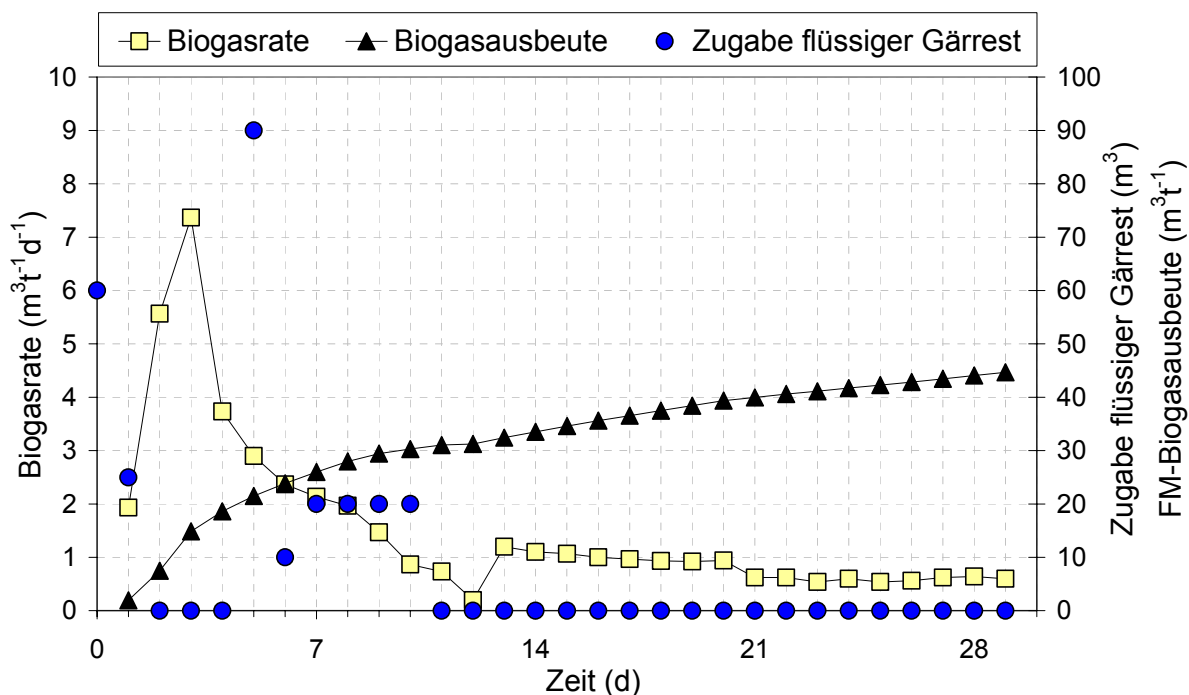


Abb. 8: Prozessverlauf der Feststofffermentation von 30 t Triticale-GPS mit mehrmaliger Beimpfung durch flüssigen Gärrest

Die Biogasrate und die Biogasausbeute in **Abb. 8** beziehen sich auf die Frischmasse der eingelagerten Triticale-GPS. Der Einfluss der zusätzlichen Gasbildung aus dem flüssigen Gärrest wurde vernachlässigt. Die Höhe der täglichen Ablaufmenge an Flüssigkeit aus dem Fermenter entsprach in etwa der Zugabemenge. An den ersten beiden Versuchstagen erfolgte keine Flüssigkeitsentnahme. Wie aus dem Prozessverlauf zu entnehmen ist, wurde nach den Zugaben von 60 m³ flüssigem Gärrest am Tag der Feststoffbefüllung und 25 m³ am Folgetag eine hohe Prozessaktivität initiiert, die am 3. Versuchstag zu einer maximalen Biogasrate von etwa 7,4 m³t⁻¹d⁻¹, bezogen auf die gesamte eingelagerte Feststoffmasse, führte. Wie jedoch aus dem weiteren Verlauf der Biogasbildungsrate hervorgeht, wurde diese hohe Abbauaktivität in der Folgezeit nicht aufrechterhalten. So konnte trotz des täglichen Austausches der Einstauflüssigkeit der Rückgang auf sehr geringe Biogasraten im Bereich von 1 m³t⁻¹d⁻¹ nicht aufgehalten werden.

Wie aus der Prozessanalyse nach dem Öffnen der Fermenterbox hervorging, kam es während des Fermentationsprozesses zu einem Aufschwimmen der gesamten Feststoffmasse. Die Eindringtiefe des flüssigen Gärrestes in den Feststoffstapel betrug nur wenige Zentimeter. Des Weiteren wurde festgestellt, dass aufgrund des mangelhaften Flüssigkeitsaustauschs eine starke Übersäuerung im unteren Bereich des Feststoffstapels vorlag, während in der Flüssigkeit am Boden der Fermenterbox keine Säureakkumulation auftrat. Bedingt durch die ungünstigen Prozessbedingungen konnten nur sehr geringe Biogasausbeuten erreicht werden. So wurde nach der Verweildauer von 29 Tagen eine FM-Ausbeute von nur ca. 45 m³t⁻¹ erzielt. Das im Laborversuch ermittelte Biogasbildungspotenzial der Triticale-GPS von durchschnittlich 200 m³t⁻¹ wurde somit nur zu einem Bruchteil ausgenutzt.

Aufgrund dieser Problemlage zielten die im Erprobungszeitraum durchgeführten Versuche primär auf die Optimierung der Feststoffbeimpfung. Hierzu wurden zahlreiche Variationen in der verfahrens- und anlagentechnischen Prozessgestaltung vorgenommen und analysiert, im Einzelnen wurden folgende Strategien erprobt:

- geänderte Durchströmungsrichtung des flüssigen Gärrestes
- Aufbau höherer Druckgradienten im Feststoffstapel
- Vorvermischen des flüssigen Gärrestes und der organischen Feststoffe
- Verbesserung der Fließeigenschaften des flüssigen Gärrests durch Schwerkraftsedi-
mentation

geänderte Durchströmungsrichtung

Als mögliche Alternative zur ursprünglich vorgesehenen aufwärtsgerichteten Durchströmungsrichtung im Trockenfermenter wurde auch die umgekehrte Richtung erprobt. Wie jedoch zu beobachten war, beschränkte sich die Durchströmung dabei auf einige größere Kanäle des Feststoffstapels. In der Folge wurde nur ein geringes Feststoffvolumen mit flüssigem Gärückstand versetzt. Nach dem Durchfließen des Feststoffstapels sammelte sich die Flüssigkeit am Boden des Trockenfermenters, wodurch es erneut zum Aufschwimmen der Feststoffmasse kam. Im Ergebnis zeigte der Prozessverlauf keine wesentlichen Unterschiede zur aufwärtsgerichteten Strömung.

Aufbau höherer Druckgradienten

Mit dem Ziel, die Eindringtiefe und die Austauschgeschwindigkeit des flüssigen Gärrestes im Feststoffstapel zu erhöhen, wurde die Wirkung höherer Druckgradienten im Trockenfermenter analysiert. Hierzu wurden zwei Methoden angewendet:

- a) Zugabe des flüssigen Gärrestes von unten bei Niederhaltung der organischen Feststoffe mit Gittern und
- b) Zugabe des flüssigen Gärrestes von oben auf den zuvor mit Wasser eingestauten Feststoffstapel, mit dem Ziel, durch ein langsames Ablassen des Wassers den flüssigen Gärrest mit Unterdruck in die freiwerdenden Poren zu leiten.

Als Ergebnis des Versuchs (a) der Feststoff-Niederhaltung wurde eine Eindringtiefe von ca. 0,3 m in den etwa 2,2 m hohen Feststoffstapel erreicht. Die Kräfte, die während der Zugabe des flüssigen Gärrestes auf das niederhaltenden Gitter wirkten, wurden auf 10 bis 20 kN m⁻² geschätzt. Daraus kann gefolgert werden, dass mit praxisrelevanten Methoden auf diese Weise keine Durchströmung des gesamten Feststoffstapels erreicht werden kann. Als ursächlich für die trotz erhöhten Drucks nur geringe Eindringtiefe in den Feststoffstapel wird die sich gegenseitig verstärkende Wechselwirkung von Materialverdichtung und Filterwirkung angenommen.

Der Versuch (b), den flüssigen Gärrest von oben durch den Sog ablaufenden Wassers in den Feststoffstapel zu leiten, ergab keine wesentlichen Unterschiede zu den Ergebnissen der Methode ohne Sogwirkung. Dieses wird damit begründet, dass durch den geringen pH-Wert der Triticale-GPS hohe Mengen an Kohlendioxid aus dem flüssigen Gärrest freigesetzt wurden und somit die Sogwirkung stark nachlies.

Vorvermischen des flüssigen Gärrestes und der organischen Feststoffe

Mit dem Ziel, die Bildung einer reaktionsfähigen Mischung aus Triticale-GPS und flüssigem Gärrest zu beschleunigen, wurde eine Vorbeimpfung durch mechanisches Vermischen der beiden Komponenten herbeigeführt. Hierzu wurden folgende Methoden angewendet:

- Vermischen auf einer Betonplatte
- Vermischen im Futtermischwagen

- Vermischen im Trockenfermenter durch
 - o Einkippen der Feststoffe in den eingestauten flüssigen Gärrest
 - o Zwangsdurchmischung mittels Baggerschaufel
 - o Zwangsdurchmischung mittels Traktorrührwerk

Wie sich aus der Analyse des Gärprozesses von vorbeimpfter Triticale-GPS ergab, konnte hierdurch die Prozessaktivität in der Startphase deutlich erhöht werden. Im weiteren Prozessverlauf wurde jedoch erneut ein starker Rückgang der Biogasrate gemessen. Bei der Auslagerung des Feststoffes aus dem Trockenfermenter wurde anhand des Geruchs sowie der Färbung des Substrates eine erhebliche Anreicherung von Gärsäuren festgestellt. Hieraus wurde gefolgert, dass durch die Vorvermischung von flüssigem Gärrest und organischem Feststoff die Durchströmungsfähigkeit des Feststoffstapels nicht verbessert wird und somit auch kein nachhaltiger Effekt in Bezug auf die Abbauleistung zu erzielen ist.

Verbesserung der Fließeigenschaften des flüssigen Gärrestes durch Schwerkraftsedimentation

Nachdem mit den bereits beschriebenen Methoden keine ausreichende Intensität und Nachhaltigkeit der Feststoffbeimpfung erreicht werden konnte, wurde analysiert, ob durch eine Vorbehandlung des flüssigen Gärrestes eine verbesserte Fließfähigkeit im Feststoffstapel erreicht werden kann. Aufgrund der kolloidalen Struktur des aus der Fermentation von Rindergülle entstehenden flüssigen Gärrestes, die für die hohe Viskosität ursächlich ist, wurde als geeignetes Mittel zur Verbesserung der Fließfähigkeit die Schwerkraftsedimentation favorisiert. Diesbezügliche Versuchsdurchführungen erfolgten sowohl am Standort Clausnitz als auch am ATB (s. Kap. 2.3.3). An der Pilotanlage Clausnitz wurde flüssiger Gärrest für 7 Tage undurchmischt in einem beheizten Trockenfermenter gelagert. Anschließend wurde Triticale-GPS von oben mittels Anhänger eingekippt. Der daraufhin einsetzende Gärprozess wies jedoch keine erkennbaren Unterschiede zu den bisherigen Versuchen mit unbehandeltem flüssigen Gärrest auf. Daraus wurde abgeleitet, dass im erwärmten flüssigen Gärrest der Sedimentationsprozess durch Konvektion und das Aufsteigen von Biogasblasen stark beeinträchtigt wird.

2.3.3 Laborversuche zur Analyse der Interaktion zwischen Feststoff und Einstauflüssigkeit

Nachdem sich die rheologischen Eigenschaften des flüssigen Gärrestes als Haupthindernis bei der großmaßstäblichen Anwendung der kombinierten Nass- und Trockenfermentation erwiesen, wurde die Interaktion zwischen Feststoff und Eistauflüssigkeit am ATB in reinen Durchströmungsversuchen analysiert. Hierzu wurden unterschiedliche Feststoffe und Flüssigkeiten eingesetzt.

Material und Methoden

Für die Durchströmungsversuche wurden neben dem unbehandelten flüssigen Gärrest aus der Nassfermentationsanlage Clausnitz, Wasser sowie separierter flüssiger Gärrest (Klarphase) eingesetzt. Die Separation erfolgte durch Schwerkraftsedimentation in einem unbeheizten 1000 l-Fass der Agrargenossenschaft Clausnitz. Durch den Separationsvorgang konnte der Trockensubstanzgehalt von 5,1 % im unbehandelten Gärrest auf 1,7 % reduziert werden. Im Einzelnen wurden folgende 6 Varianten mit unterschiedlichen Feststoff-Flüssigkeits-Kombinationen betrachtet:

- 1 Feststoff: Triticale-GPS mit der Lagerungsdichte von $0,5 \text{ kg l}^{-1}$
Flüssigkeit: 1,5 l flüssiger unbehandelter Gärrest
- 2 Feststoff: Getreidestroh mit der Lagerungsdichte von $0,066 \text{ kg l}^{-1}$
Flüssigkeit: 1,5 l flüssiger unbehandelter Gärrest

- 3 Feststoff: Triticale-GPS mit der Lagerungsdichte von $0,5 \text{ kg l}^{-1}$
Flüssigkeit: $1,5 \text{ l}$ Wasser
- 4 Feststoff: Triticale-GPS mit der Lagerungsdichte von $0,5 \text{ kg l}^{-1}$
Flüssigkeit: $1,5 \text{ l}$ Klarphase des flüssigen Gärrestes
- 5 Feststoff: Triticale-GPS, vermischt mit unbehandeltem flüssigen Gärrest im Masseverhältnis von 1:1 und einer Lagerungsdichte bezogen auf Triticale-GPS von $0,45 \text{ kg l}^{-1}$
Flüssigkeit: $1,5 \text{ l}$ Klarphase des flüssigen Gärrestes
- 6 Feststoff: Triticale-GPS vermischt mit schüttfähigem Gärrest aus der Fermentation von Rindermist mit Maissilage im Masseverhältnis von 1:1 und einer Lagerungsdichte bezogen auf die Gesamtmischung von $0,73 \text{ kg l}^{-1}$
Flüssigkeit: $1,5 \text{ l}$ Klarphase des flüssigen Gärrestes

Für die Versuchsdurchführung wurden Plexiglaszylinder mit einem Innendurchmesser von $19,5 \text{ cm}$ und einer Höhe von 24 cm verwendet, bei denen am unteren Ende ein Boden aus Plexiglas mit einer zentralen kreisförmigen Auslassöffnung mit einem Durchmesser von 25 mm angebracht wurde. In die Zylinder wurde der Feststoff in einer einheitlichen Füllhöhe von 15 cm eingefüllt. Nach dem Zuführen der Flüssigkeit von oben auf die Feststoffzylinder wurde die zeitliche Entwicklung der durch die Bodenöffnung ausgetretenen Flüssigkeitsmenge erfasst.

Ergebnisse und Diskussion

Der zeitliche Verlauf der in den 6 Versuchsvarianten analysierten Feststoff-Flüssigkeitskombinationen wurde ermittelt und auf die applizierte Flüssigkeitsmenge bezogen (**Abb. 9**).

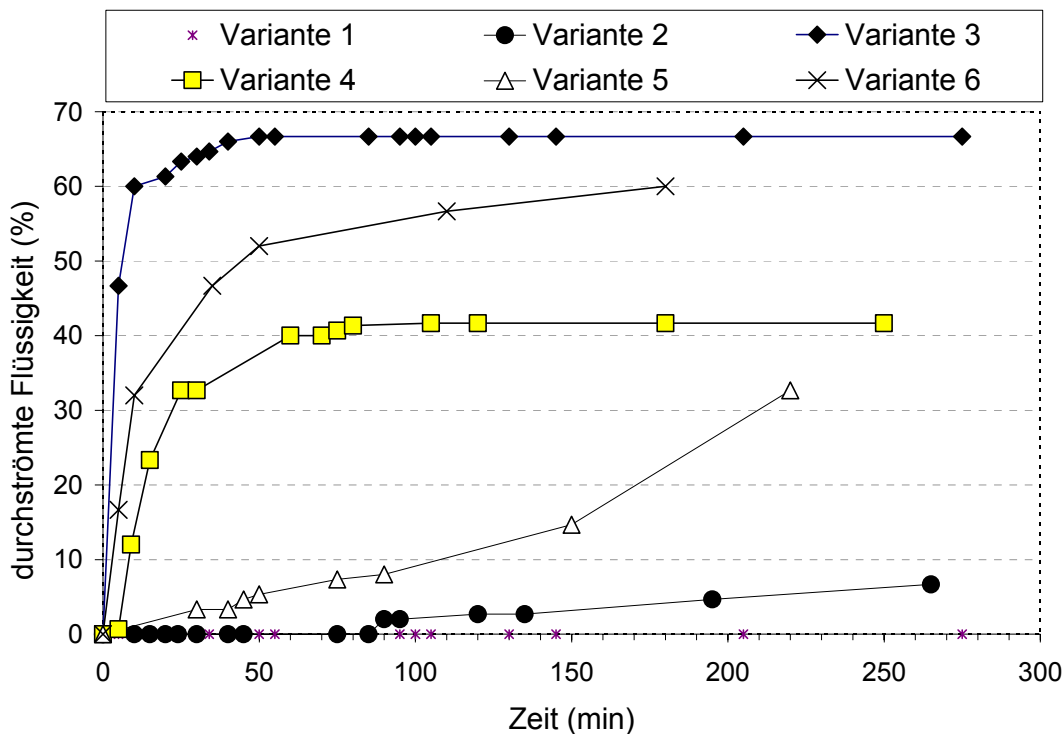


Abb. 9: Durchströmungseigenschaften unterschiedlicher Feststoff-Flüssigkeits-Kombinationen; Anteil durchströmte Flüssigkeit bezogen auf die applizierte Flüssigkeitsmenge

Wie aus den zeitlichen Verläufen der Feststoffdurchströmung zu entnehmen ist, konnten in den Varianten 1 und 2 mit der Kombination aus Triticale-GPS bzw. Stroh mit unbehandeltem flüssigen Gärrest keine bzw. nur eine sehr geringe Durchströmungsfähigkeit festgestellt werden. Der überwiegende Teil der zugegebenen Flüssigkeit verblieb auf dem Feststoff. Dass die Triticale-GPS auch in der praxisrelevanten Lagerungsdichte von $0,5 \text{ kg l}^{-1}$ prinzipiell eine ausreichende Flüssigkeitsdurchströmung zulässt, zeigen die Ergebnisse aus Versuchsvariante 3, bei der Wasser verwendet wurde. Hierbei traten nach einer Dauer von nur 20 min bereits 90 % der Ursprungsmenge wieder aus dem Feststoffstapel aus. Variante 4, die Kombination aus Triticale-GPS und Gärrest-Klarphase, zeigte bei einem etwas höheren Anteil absorbierter Flüssigkeit ebenfalls eine hohe Durchströmungsgeschwindigkeit. Die Vermischung der Triticale-GPS mit unbehandeltem flüssigen Gärrest in Variante 5 führte zu deutlichen Verlangsamung der Durchströmung. Dagegen ergab die Vermischung der Triticale-GPS mit festem Gärrest sogar eine bessere Durchströmungsfähigkeit als bei reiner Triticale-GPS.

2.3.4 Schlussfolgerungen aus der Erprobung des ursprünglichen Verfahrenskonzepts

Die Ergebnisse aus den Praxisversuchen zur Feststofffermentation am Standort Clausnitz und den ergänzenden Laborversuchen haben gezeigt, dass die Nutzung des flüssigen Gärrestes aus der Nassfermentation von Rindergülle nicht zielführend ist. Die Ursache hierfür ist die hohe Viskosität und damit eingeschränkte Fließfähigkeit des flüssigen Gärrestes. Das bisherige Konzept der Feststoffbeimpfung mit flüssigem Gärrest lässt sich deshalb nur durch eine erhebliche Reduzierung der Feststoffkonzentration in den Trockenfermentern oder durch eine Separation der Flüssigkeit mit hohem Abscheidegrad der Kolloide verwirklichen. Mit der Reduzierung der Substratdichte in den Trockenfermentern würden die Vorteile der Trockenfermentation jedoch nicht mehr zum Tragen kommen. Auf Grundlage der vorgestellten Versuchsergebnisse wurde deshalb bei der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe beantragt, das ursprüngliche Verfahrenskonzept der Kombination aus Nassfermentation und Feststofffermentation zu verlassen und statt dessen ein eigenständiges zweistufiges Verfahren zur Feststofffermentation mit einer niedrigviskosen und in einer separaten Methanisierungsstufe zu regenerierenden Einstauflüssigkeit einzurichten. Dieses Konzept wird als Bioleaching bezeichnet.

2.4 Erprobung des geänderten Verfahrenskonzepts mit Bioleaching

2.4.1 Beschreibung des Bioleaching-Konzepts und Umrüstung der Pilotanlage Clausnitz

Das veränderte Verfahrenskonzept sieht anstelle des Einsatzes von flüssigem Gärrest die Zirkulierung der beim Feststoffabbau entstehenden Prozessflüssigkeit vor (**Abb. 10**). Wie aus den Durchströmungsversuchen hervorging, kann die benötigte methanogene Biomasse dabei durch die Rückführung von festen Gärrest erfolgen (s. Kap. 2.3.4). Eine alternative Lösung ist durch Ghosh und Klass (1978) bekannt. Hier erfolgt die Methanbildung außerhalb des Trockenfermenters in einem eigens für die Regeneration der Prozessflüssigkeit eingerichteten Nassfermenter. Im Trockenfermenter werden die Feststoffe überwiegend nur bis zu organischen Säuren abgebaut, die dann im Nassfermenter weiter zu Biogas abgebaut werden. Im Ergebnis entsteht ein zweistufiges und zweiphasiges Verfahren, welches auch unter dem Begriff Bioleaching oder Leach Bed bekannt ist. In den nachfolgend beschriebenen Versuchen wird die Eignung des Bioleaching-Verfahrens für die Anwendung an der Pilotanlage Clausnitz analysiert.

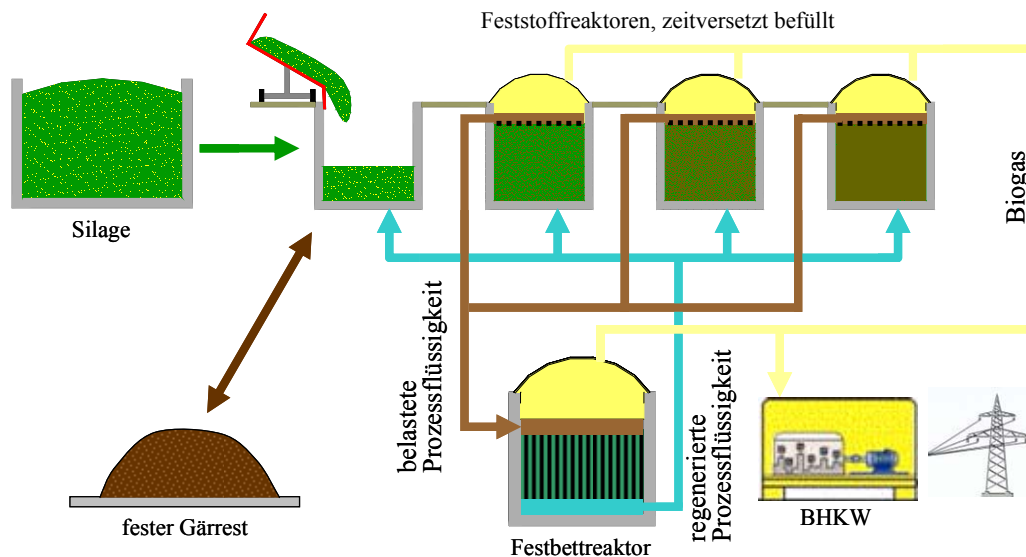


Abb. 10: Schema des Bioleaching-Konzepts an der Pilotanlage Clausnitz

Ein wesentlicher Vorteil des Bioleaching-Verfahrens gegenüber anderen Verfahren zur Feststofffermentation ist die Möglichkeit zur Einbindung von Hochleistungsreaktoren. Diese wurden ursprünglich für die Behandlung hoch belasteter Abwässer entwickelt (Bischofsberger 1993) und basieren auf der Immobilisierung mikrobieller Biomasse. Am verbreitetsten sind dabei die beiden Methoden Sedimentation (Schlammablagerung) und Biofilmbildung. Der bekannteste Schlammablagerungs-Reaktor-Typ ist der Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB-) Reaktor. Auf der Biofilmbildung basiert der als Festbettreaktor oder Anaerobfilter bekannte Reaktortyp.

Nach der Zustimmung der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe zur Änderung des Verfahrenskonzeptes wurde mit dem Umbau der Biogasanlage Clausnitz begonnen. Im Januar 2006 wurde die Trockenfermentationsanlage wieder in Betrieb genommen. Zur Realisierung des Bioleaching-Verfahrens konnten alle bereits vorhandenen Behälter genutzt werden. Die Trockenfermenter wurden dabei mit einem Überlaufrohr ausgestattet, damit sie von unten aufwärts mit Einstauflüssigkeit durchströmt werden konnten. Mit dem Ziel, das Aufschwimmen der Feststoffe zu vermeiden, wurden zudem Niederhaltervorrichtungen in Form von abnehmbaren Gittern installiert. Als Nassfermenter zur Regeneration der Einstauflüssigkeit wurde der bereits vorhandene Sammelbehälter mit einem Fassungsvermögen von etwa 150 m³ genutzt. Zur Erhöhung der Konzentration mikrobieller Biomasse und damit der Leistungsfähigkeit wurde der Nassfermenter durch das Einbringen von festen Aufwuchsträgern als Anaerobfilter gestaltet. Die Aufwuchsträger vom Typ BIOPAC 10 wurden von der Firma ENVI-CON bezogen und besaßen eine spezifische Oberfläche von 100 m²/m³. Insgesamt wurde der Nassreaktor mit 55 m³ der Aufwuchsträger befüllt. Um die Prozessflüssigkeit linear und gleichmäßig durch den Fermenter zu führen, wurden die Flüssigkeitszuführung (unten) und die Flüssigkeitsabführung (oben) jeweils mit mehreren Zugabe- bzw. Entnahmestellen ausgestattet. Durch den damit festgelegten Abstrombetrieb sollte die Anreicherung von Sinkschlamm im Anaerobfilter verhindert werden. Des Weiteren wurde eine Pumpe mit geringerer Förderleistung (ca. 10 m³h⁻¹) installiert. Hierdurch sollte ein verlangsamer Flüssigkeitsaustausch zwischen den Trockenfermentern und dem Anaerobfilter realisiert werden. Darüber hinaus wurde am Anaerobfilter eine Gasmengenmessung eingerichtet.

2.4.2 Vorversuch zum Bioleaching-Verfahren an der Pilotanlage Clausnitz

Um das neue Verfahrenskonzept des Bioleachings hinsichtlich der Funktionsfähigkeit im Großmaßstab zu überprüfen, wurde bereits vor dem Abschluss der Umbaumaßnahmen ein entsprechender Vorversuch durchgeführt.

Für diesen Vorversuch wurde eine Trockenfermenterbox als Behälter für den zu vergärenden organischen Feststoff und eine weitere Box als Speicher für die Einstauflüssigkeit verwendet. Eine Niederhaltevorrichtung wurde dabei nicht verwendet. Die Einstauflüssigkeit bestand aus einer Mischung von Silosickersaft und Niederschlagswasser. Als Feststoff wurde eine Mischung aus 10 % Triticale-GPS und 90 % festem Impfmateriale hergestellt. In Ermangelung einer ausreichenden Menge an festem Gärrest wurde als Impfmateriale Rottemist aus der Rinderhaltung der Agrargenossenschaft Clausnitz eingesetzt. Von der Feststoffmischung wurde eine Menge von 64 t in den Trockenfermenter eingebracht, mit einer Stapelhöhe von 2,2 m und einer Lagerungsdichte von $0,65 \text{ t m}^{-3}$. Anschließend wurde durch den gasdichten Abschluss des Trockenfermenters der Fermentationsprozess gestartet. Die Einstauflüssigkeit wurde nach ihrer Erwärmung auf etwa 35°C am 5. Tag in den Trockenfermenter geführt, in einer Menge von 50 m^3 . Die Entwicklung der Biogasbildung aus der Trockenfermenterbox wurde über 12 Tage kontinuierlich erfasst und anschließend die substratspezifische Biogasrate sowie die FM bezogene Biogasausbeute ermittelt (**Abb. 11**).

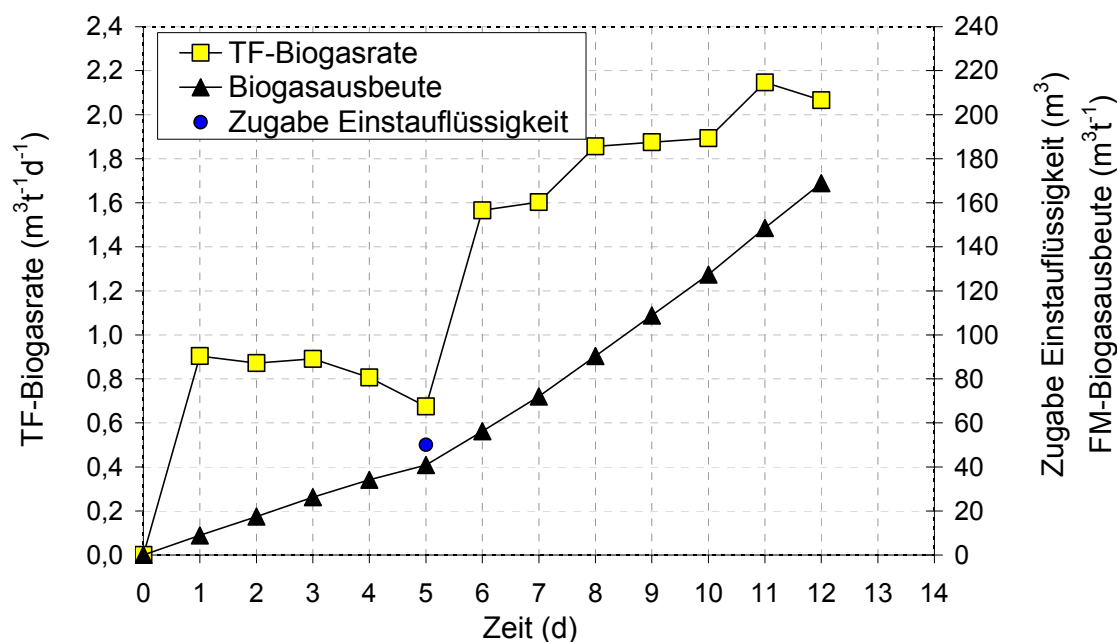


Abb. 11: Prozessverlauf der Vergärung von 50 t Triticale-GPS im Trockenfermenter (TF) bei einmaliger Zugabe von Einstauflüssigkeit am 5. Tag

Der Verlauf der Biogasrate zeigt, dass sich die Biogasbildung in zwei Phasen aufteilte. Während in den ersten fünf Versuchstagen ohne Einstauflüssigkeit Biogasraten zwischen $0,9$ und $0,7 \text{ m}^3 \text{t}^{-1} \text{d}^{-1}$ gemessen wurden, erreichte die Rate nach der Zugabe von 50 t Einstauflüssigkeit am Tag 5 Werte von $1,6$ bis $2,2 \text{ m}^3 \text{t}^{-1} \text{d}^{-1}$. Bezogen auf die Triticale-GPS wurde damit, unter Vernachlässigung der als gering angenommenen zusätzlichen Gasbildung aus dem Rottemist und der Einstauflüssigkeit, nach 12 Tagen eine Biogasausbeute von $170 \text{ m}^3 \text{t}^{-1}$ erreicht.

Auf Basis der Ergebnisse dieses Vorversuches wurde für das Bioleaching-Verfahren auf die volle großmaßstäbliche Funktionsfähigkeit geschlossen und die nachfolgenden wissenschaftlichen Arbeiten auf dieses Verfahren hin orientiert.

2.4.3 Versuche im kleintechnischen Maßstab

Vorbereitend für die Erprobung im Großmaßstab wurden am ATB zwei Versuchsreihen anhand eines kleintechnischen Versuchsstandes zum Bioleaching-Verfahren durchgeführt. In der ersten Versuchsreihe wurde der Einfluss von festem Impfmateriale auf den Gärprozess analysiert. Die zweite Versuchsreihe diente zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit des Verfahrens unter praxisvergleichbaren Betriebsbedingungen.

2.4.3.1 Aufbau und Betrieb eines kleintechnischen Versuchstandes

Im Hinblick auf die Optimierung des in der Praxisanlage Clausnitz zur Anwendung kommenden neuen Verfahrenskonzeptes des Bioleachings wurden im Biotechnikum des ATB begleitende Laborversuche mit 65 Liter-Fermentern aus Plexiglas durchgeführt. Der zur Regeneration der Einstauflüssigkeit vorgesehene Anaerobfilter (AF) enthielt feste Aufwuchsträger (Typ Bioflow 40 PE, spez. Oberfläche = $305 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$). Für die erste Versuchsreihe zur Ermittlung des Impfmaterialeinflusses auf den Gärprozess wurde der Anaerobfilter mit nur einem Trockenfermenter (TF) verbunden. In der anschließenden Versuchsreihe zur Analyse der Leistungsfähigkeit wurden drei Trockenfermenter verwendet (**Abb. 12**).



Abb. 12: Aufbau der kleintechnischen Versuchsanlage zum Bioleaching Verfahren mit drei Trockenfermentern (vordere Reihe) und einem Anaerobfilter (erhöht)

Alle Fermenter wurden über einen Wassermantel auf mesophile Temperaturen erwärmt. Für den Transport der Einstauflüssigkeit zwischen Anaerobfilter (abströmend) in die Trockenfermenter (aufströmend) wurden Schlauchpumpen eingesetzt. Die Rückführung der regenerierten Einstauflüssigkeit aus dem Anaerobfilter erfolgte bei der Kombination mit einem Trockenfermenter frei fließend über einen Überlauf. Für die Kombination mit drei Trockenfermentern wurde durch die Ausrüstung der Pumpen mit einem 2.Pumpenkopf die Flüssigkeit in beide Richtungen zwangsbewegt. Durch zyklische Flüssigkeitszirkulation in Intervallen von 90 min wurde während einer 2minütigen Pumpenlaufzeit jeweils 0,8 Liter Flüssigkeit bewegt, woraus sich näherungsweise ein täglicher Flüssigkeitsaustausch sowohl der Trockenfermenter als auch des Nassfermenters ergab.

Zur Erfassung des Biogasbildungsstroms wurde für jeden Fermenter ein eigener Trommelgaszähler der Firma Ritter Apparatebau eingesetzt. Die Gasanalyse erfolgte durch einen Biogasanalysator SSM6000 der Firma Pronova. Während der Regelbetriebsphase mit drei Trockenfermentern wurde der pH-Wert der Einstauflüssigkeit im Vor- und Ablauf des Anaerobfilters über eine Online-Messung automatisch erfasst. Hierzu wurden zwei pH-Messgeräte der Firma

WTW, in Kombination mit WTW SENTIX-Messketten eingesetzt. Die Analyse der Einstauflüssigkeit, sowie der festen Ein- und Ausgangsstoffe erfolgte nach üblichen Methoden hinsichtlich der Parameter Stickstoff, Ammonium, TS, oTS, Rohfaser, flüchtige Fettsäuren (C_2 - C_6), Milchsäure und elektrische Leitfähigkeit (Methoden s. Anhang **Tab. 11**).

2.4.3.2 Ermittlung des Impfmaterialeinflusses auf die Gasbildung

Für den ersten Fermentationsversuch im kleintechnischen Maßstab wurde eine Feststoffmischung mit Frischmasse-Anteilen von 10 % Triticale-GPS ($\text{oTS} = 32,8 \text{ \% FM}$) und 90 % schüttfähigem Gärrest ($\text{oTS} = 9,3 \text{ \% FM}$) hergestellt. Als Einstauflüssigkeit wurde Sickerwasser aus einer weiteren Trockenfermentationsanlage verwendet. Die aus dem eingestauten Trockenfermenter und dem Anaerobfilter produzierten Biogas- und Methanmengen wurden getrennt erfasst und auf die eingesetzte oTS aus der Triticale-GPS bezogen. In weiteren systematischen Versuchen wurde der Anteil an festem Impfmateriale, das aus vorangegangenen Ansätzen zur Verfügung stand, systematisch reduziert. Als Kenngröße für den oTS-Anteil von festem Impfmateriale diente das auf oTS-Basis ermittelte Impfmateriale-Substrat-Verhältnis (p_i). Die Verweilzeit für den jeweiligen Einzelversuch betrug 3 bis 4 Wochen. **Abb. 13** zeigt den Verlauf der Biogasrate des Gesamtsystems bei unterschiedlichen Impfmateriale-Substrat-Verhältnissen (p_i).

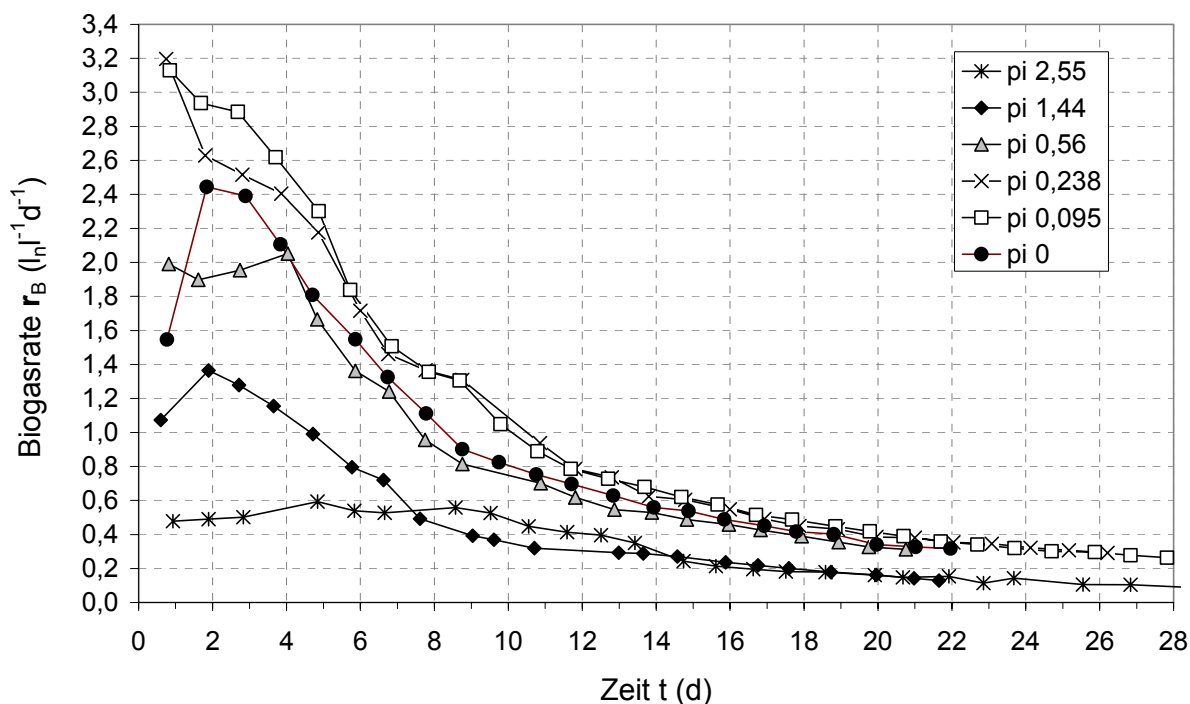


Abb. 13: Verlauf der volumenspezifischen Biogasrate des Gesamtsystems der kleintechnischen Versuchsanlage bei unterschiedlichen Impfmateriale-Substrat-Verhältnissen (p_i), ergänzende Angaben s. Anhang (**Abb. 36** und **Abb. 37**)

Deutlich zu erkennen ist das in allen Varianten einheitliche Grundmuster einer Abklingkurve. Eine gewisse Ausnahmestellung besaß die Variante p_i 2,55, dem ersten Versuch. Hier verlief die Gaskurve über eine längere Zeit relativ flach, was auf eine zunächst notwendige Etablierung des biologischen Prozesses hindeutet. Die maximalen Biogasraten staffeln sich in Abhängigkeit vom p_i -Wert von $0,6 \text{ l}^{-1}\text{d}^{-1}$ bei p_i 2,55 bis über $3,0 \text{ l}^{-1}\text{d}^{-1}$ bei p_i 0,238 und p_i 0,095. Die Substratvariante p_i 0, ohne festes Impfmateriale, zeigte mit einer maximalen Gasrate von $2,4 \text{ l}^{-1}\text{d}^{-1}$ eine etwas geringere Produktivität als p_i 0,238 und p_i 0,095. Dieses Verhalten war

sowohl im Trockenfermenter als auch im Anaerobfilter zu beobachten (s. Anhang **Abb. 36** und **Abb. 37**).

Wie aus **Abb. 14** zu entnehmen ist, zeigte die Variante p_i0 den mit Abstand höchsten Anfangs-Methangehalt. Während die übrigen Mischungsvarianten die Schwelle von 40 Vol.-% erst nach 4 bis 6 Tagen erreichten, lag p_i0 bereits am ersten Tag bei 41 Vol.-%. Daraus lässt sich ableiten, dass durch die fehlende Zugabe von festem Impfmateriale das Gleichgewicht von Hydrolyse und Methanbildung eher erreicht wurde, was in erster Linie auf eine verzögerte Feststoffhydrolyse zurückgeführt werden kann.

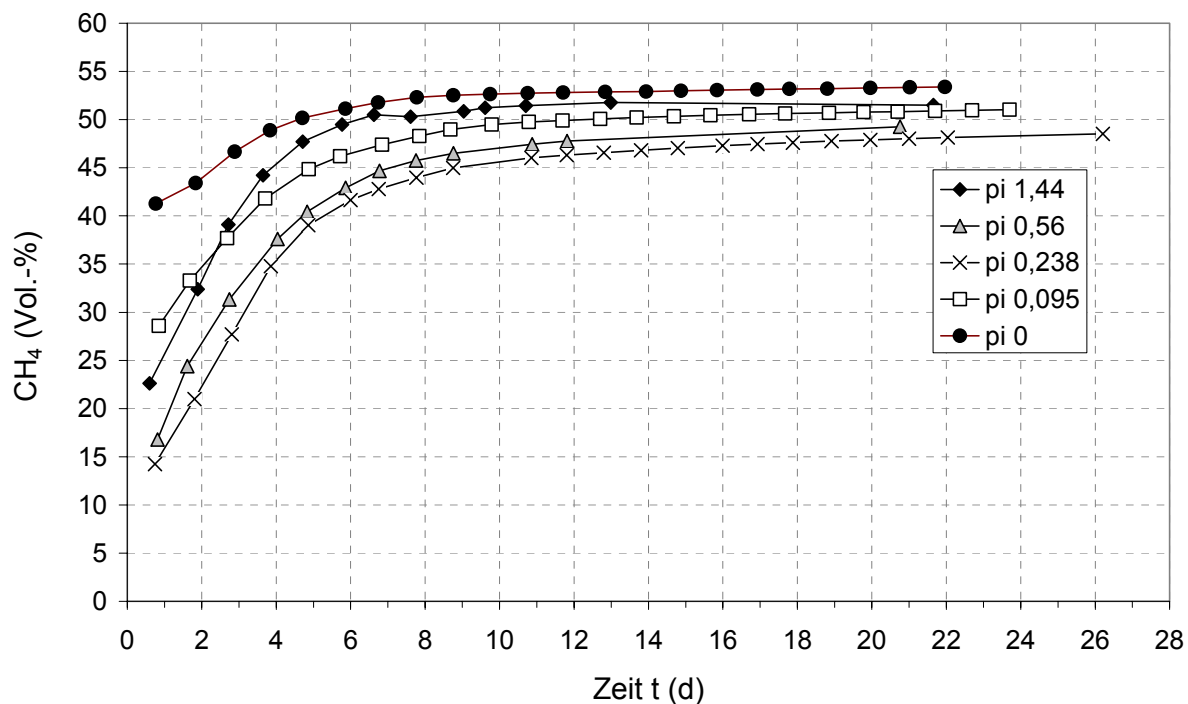


Abb. 14: Verlauf des Methangehaltes im insgesamt gebildeten Biogas bei unterschiedlichen Impfmateriale-Substrat-Verhältnissen (p_i), ergänzende Angaben s. Anhang (**Abb. 38** und **Abb. 39**)

Für die Mischungsverhältnisse p_i0 bis $p_i1,44$ wurde die jeweils nach drei Wochen aus dem oTS-Gehalt der Triticale-GPS erzielte Biogas- und Methanausbeute ermittelt. Der Beitrag des Impfmateriale am gebildeten Gas wurde durch Extrapolation der im Vorgängerversuch ermittelten Ertragskurve bestimmt und abgezogen. Dieses Vorgehen wird dadurch ermöglicht, dass als Impfmateriale jeweils ein aliquoter Teil des Vorgängeransatzes verwendet wurde. Als Startvariante konnte für $p_i2,55$ keine substratspezifische Ausbeute ermittelt werden. Die Biogasausbeute aus dem Gesamtsystem sowie den Beitrag aus dem Anaerobfilter (AF) zeigt **Abb. 15**.

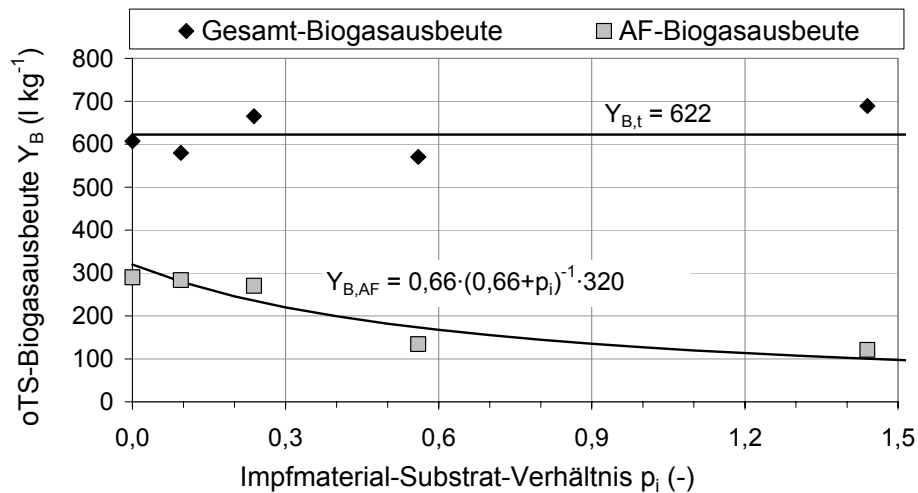


Abb. 15: Einfluss des Impfmaterial-Substrat-Verhältnisses auf die oTS-Biogasausbeute im kleintechnischen Bioleaching-Versuch mit Anaerobfilter (AF)

Im Bezug auf die Gesamtausbeute lässt sich nach **Abb. 15** kein signifikanter Einfluss auf die Gasbildung feststellen. Im Mittel wurde eine oTS-bezogene Methanausbeute von 622 l kg^{-1} ermittelt. Eine andere Bewertung muss aus dem Verhalten der Biogasbildung des Anaerobfilters gefolgert werden. So wies der Ertragsanteil durch den Anaerobfilter bei abnehmenden Impfmaterialkonzentrationen einen deutlichen Anstieg auf, von 110 l kg^{-1} bei $p_i 1,44$ auf 300 l kg^{-1} bei $p_i 0$. Diese Aussagen treffen prinzipiell auch auf die Methanausbeute zu (**Abb. 16**), bei dem der Ertragsanteil aus dem Anaerobfilter jedoch noch deutlich höher ausfällt.

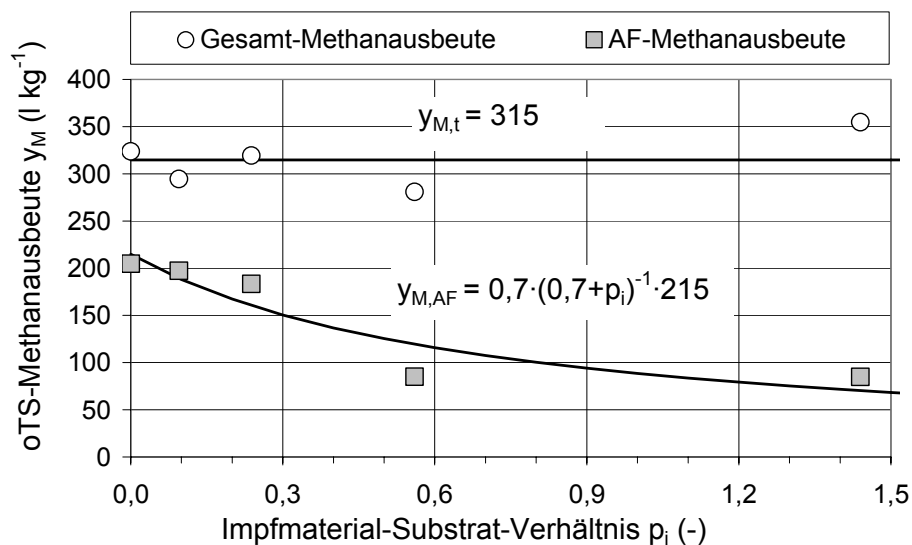


Abb. 16: Einfluss des Impfmaterial-Substrat-Verhältnisses auf die oTS-Methanausbeute im kleintechnischen Bioleaching-Versuch mit Anaerobfilter (AF)

Bezogen auf die Methanausbeute wurde im Mittel ein Wert von 315 l kg^{-1} ermittelt. Die Methanausbeute, die aus dem Anaerobfilter stammt, beläuft sich bei $p_i 1,44$ auf 80 l kg^{-1} und $p_i 0$ auf 200 l kg^{-1} . Bezogen auf den Gesamtertrag stellt dieses eine Zunahme von 25 auf 65 % dar.

Auf Basis der ausgewerteten Versuchsergebnisse lässt sich als Vorzugsvariante des Bioleaching-Verfahrens der Betrieb ohne festes Impfmateriale benennen. Während die Biogas- und Methanabgabe durch den Verzicht auf festes Impfmateriale nicht nachweislich beeinflusst wurden, bestand durch die Zugabe von Impfmateriale der Nachteil einer starken CO_2 -Bildung zu Prozessbeginn, hervorgerufen durch eine dominante Hydrolyse. Ein weiterer Vorteil des Verzichts auf festes Impfmateriale ist der verminderte Aufwand der Substratbereitung. Der nach Abschluss der ersten Versuchsreihe aufgenommene Regelbetrieb der kleintechnischen Versuchsanlage zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit (Versuchsreihe2) erfolgte daher ohne den Einsatz von festem Impfmateriale.

2.4.3.3 Ermittlung der Funktions- und Leistungsfähigkeit im Regelbetrieb

Nach dem Abschluss der Versuchsreihe1 zur Ermittlung des Impfmaterialeinflusses wurde der Versuchsstand auf drei Trockenfermenter erweitert und eine praxisrelevante Betriebsweise mit wöchentlicher, zeitversetzter Befüllung aufgenommen (s. **Abb. 12**). Dieser Versuch erstreckte sich über zwei Monate. Zur Ermittlung der Gasproduktivität wurde ein sechswöchiger Zeitraum mit jeweils zwei Befüllungen je Trockenfermenter ausgewählt. Entsprechend den Ergebnissen aus Versuchsreihe1 wurde für die Analyse der Leistungsfähigkeit im Regelbetrieb nur reine Triticale-GPS ohne festen Gärrest verwendet. Hinsichtlich der Stoffkennzahlen der Triticale-GPS wurden folgende Durchschnittswerte gemessen (Einzelwerte s. Anhang **Tab. 12**): pH 3,3, oTS $300 \text{ g kg}_{\text{FM}}^{-1}$, Rohfaser $293 \text{ g kg}_{\text{TS}}^{-1}$, N_{Kjel} $3,71 \text{ g kg}_{\text{FM}}^{-1}$, Milchsäure $9,5 \text{ g kg}_{\text{FM}}^{-1}$, FFS $6,3 \text{ g kg}_{\text{FM}}^{-1}$.

Gasbildung

Der Verlauf der auf das Fermentervolumen bezogenen Methanproduktion zeigte für die Trockenfermenter 1-3 eine deutlich geringere Höhe als für den Anaerobfilter (**Abb. 17**).

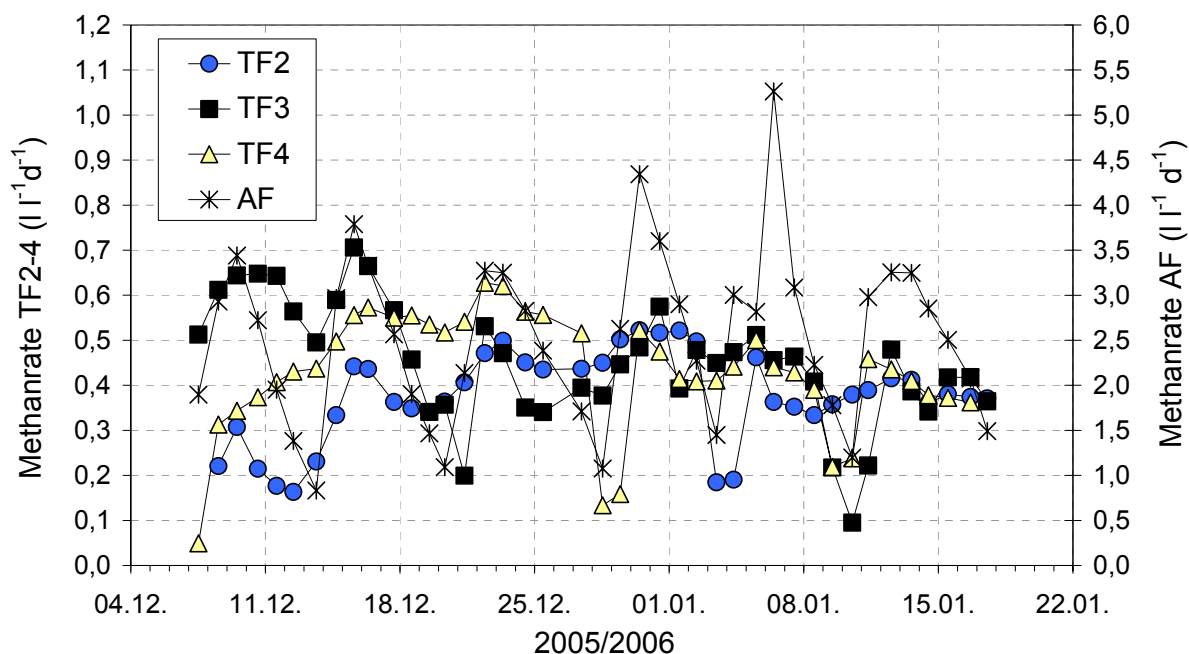


Abb. 17: Verlauf der Methanrate in den Trockenfermentern TF2-4 und dem Anaerobfilter AF mit den Neubefüllungen: TF2 13.12.&3.1., TF3 20.12.&10.1., TF4 6.12.&28.12.

Interessant ist, dass unmittelbar nach einer Befüllung und der Inbetriebnahme des Prozessflüssigkeitskreislaufs die Methanproduktion des Anaerobfilters stark anstieg. Dieser Anstieg ist darauf zurückzuführen, dass die in der Triticale-GPS vorhandenen gelösten organischen Verbindungen (hauptsächlich organische Säuren) ausgetragen werden und damit im Anaerobfilter schnell zu Methan umgesetzt werden können. Darüber hinaus wiesen auch die übrigen Trockenfermenter im Zuge einer Neubefüllung einen Anstieg der Methanrate auf. Dies zeigt, dass der Anaerobfilter die Fracht an gelösten organischen Verbindungen nicht gänzlich abbauen konnte und es so zu einer Verteilung im gesamten System kam. Dieses Verhalten zeigt weiter, dass im Bioleaching-Verfahren durch eine gezielte Flüssigkeitsverteilung auch die Trockenfermenter in die Flüssigkeitsregeneration einbezogen werden können, wodurch sich die erforderliche Nassfermenter-Kapazität reduzieren lässt.

Der wöchentliche Befüllrhythmus spiegelt sich in der Gesamtmethanbildung des Systems wieder (**Abb. 18**).

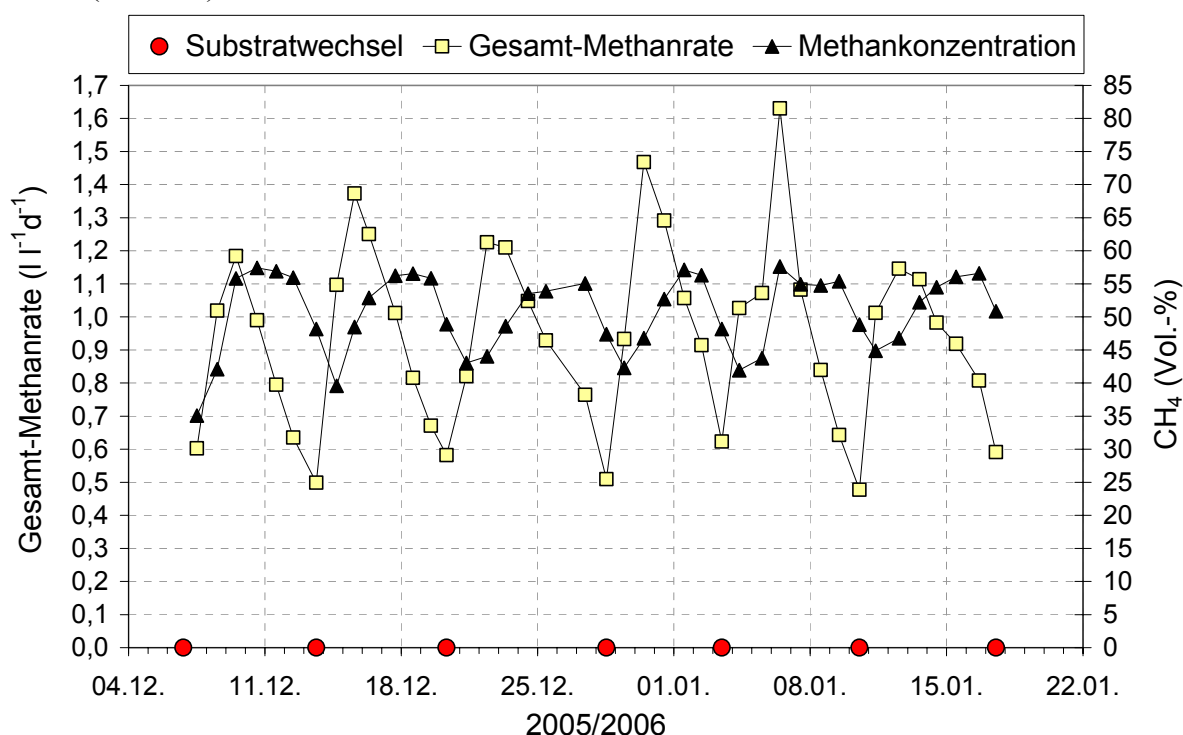


Abb. 18: Verlauf der Methanrate und der Methankonzentration aus dem kleintechnischen Gesamtsystem

Die Schwankung der Methanproduktion war insgesamt sehr beträchtlich. Ausgehend vom Durchschnittswert von $1,01 \text{ l l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ wurden bis zu 73 % höhere und bis zu 50 % geringere Werte gemessen. Ebenfalls erheblich war die Schwankung der Methankonzentration im Biogas. Überwiegend wurden Konzentrationen zwischen 40 und 58 Vol.-% beobachtet. Im Mittel ergab sich ein Methangehalt von 50,2 Vol.-%. Eine Darstellung der Verläufe der Methangehalte der einzelnen Reaktoren befindet sich im Anhang (**Abb. 40**). Die Durchschnittskonzentration des Methans im Biogas der Trockenfermenter lag zwischen 34 und 42 Vol.-%. Das Gas des Anaerobfilters enthielt im Mittel 70 Vol.-% Methan.

Eigenschaften der Einstauflüssigkeit

Als wichtigster Parameter zur Beschreibung der Milieubedingungen wurde der pH-Wert über den betrachteten Zeitraum vom 6.12.05 bis 17.1.06 kontinuierlich aufgezeichnet (**Abb. 19**).

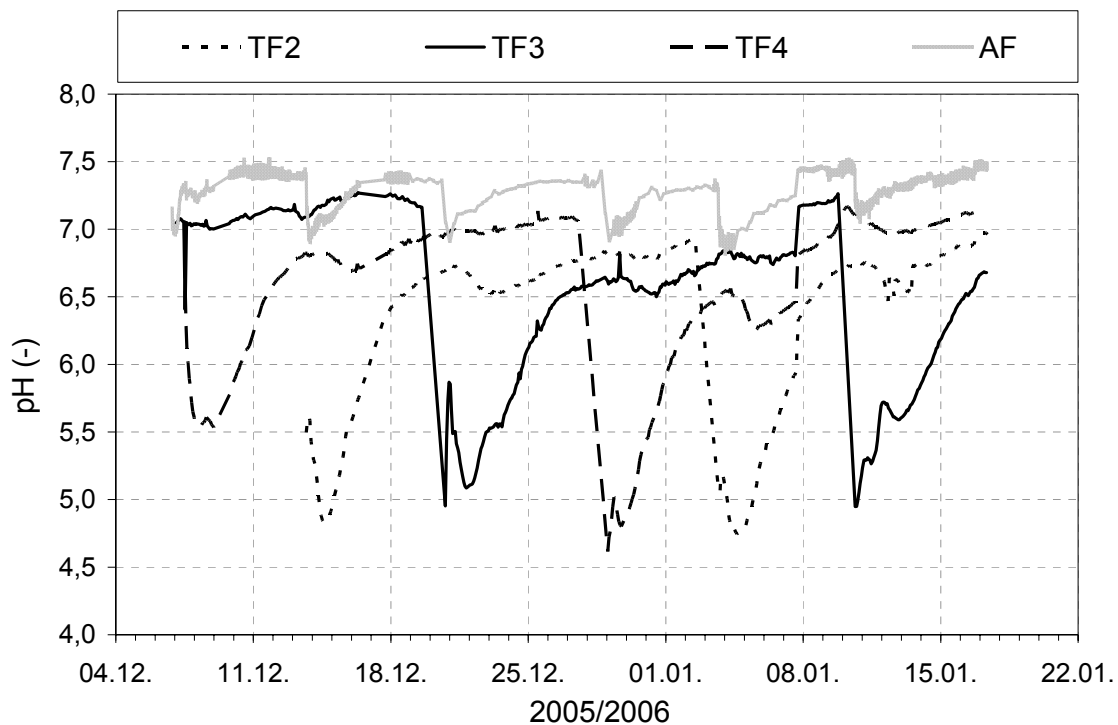


Abb. 19: Verlauf der pH-Werte in den Abläufen der Trockenfermenter TF2-4 und des Anaerobfilters AF

Der Verlauf des pH-Werts im Ablauf der Trockenfermenter wird im Wesentlichen durch dessen dreiwöchigen Befüllrhythmus bestimmt. So wurden am ersten Tag nach der Neubefüllung die geringsten pH-Werte im Bereich zwischen 4,5 und 5 gemessen. Nachfolgend ist ein zunächst starker Anstieg zu verzeichnen, der im weiteren Verlauf abflacht. Zum Abschluss der dreiwöchigen Verweilzeit wurden pH-Werte zwischen 6,8 und 7,3 erreicht. Die Neubefüllung eines Trockenfermenter wirkte sich nur im schwachen Maße auf den pH-Wert der übrigen beiden Trockenfermenter aus. Der pH-Wert im Ablauf des Anaerobfilters kann mit Werten zwischen 6,8 und 7,5 als vergleichsweise stabil bezeichnet werden.

Exemplarisch ist in den folgenden Abbildungen der Verlauf der mengenmäßig bedeutsamsten flüchtigen Fettsäuren (FFS) im Ablauf des Trockenfermenters TF4 sowie des Anaerobfilters (AF) dargestellt. Eine vollständige Darstellung alle erfassten FFS-Konzentrationen ist dem Anhang beigelegt (**Abb. 41 bis Abb. 48**). **Abb. 20** gibt die Summe aller erfassten flüchtigen Fettsäuren wieder.

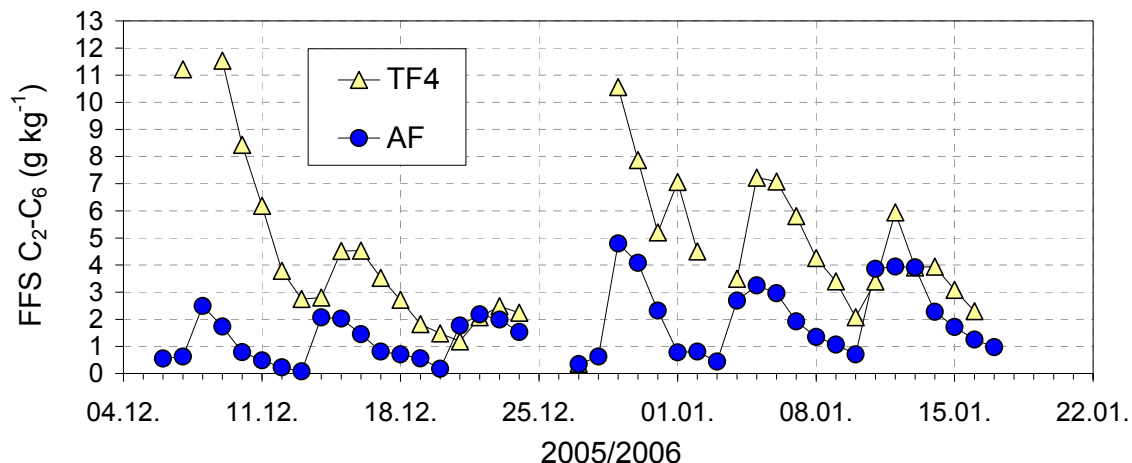


Abb. 20: Verlauf der Gesamtkonzentration an flüchtigen Fettsäuren (FFS) im Ablauf des Trockenfermenters TF4 und des Anaerobfilters AF, Angaben für TF2 und TF3 s. Anhang (**Abb. 43** und **Abb. 45**)

Wie bereits beschrieben, leitet sich auch aus dem Verhalten der Methanbildung ab, dass die FFS-Fracht im AF nicht vollständig abgebaut wurde und über den Ablauf im gesamten System verteilt wurde. So lange die in den Trockenfermentern vorhandenen Kapazitäten für die Acetogenese und Methanogenese nicht ausgeschöpft sind, sollte sich daraus auch kein Problem für die Prozessstabilität ergeben. Auffälliges Merkmal aus **Abb. 20** ist die im Versuchsverlauf ansteigende, jeweils vor einer Neubefüllung gemessene Niedrigstkonzentration an FFS. Wie aus **Abb. 21** hervorgeht, ist dies auf die Anreicherung von Essigsäure zurückzuführen. Diese nahm unter den FFS den bei weitem größten Anteil ein.

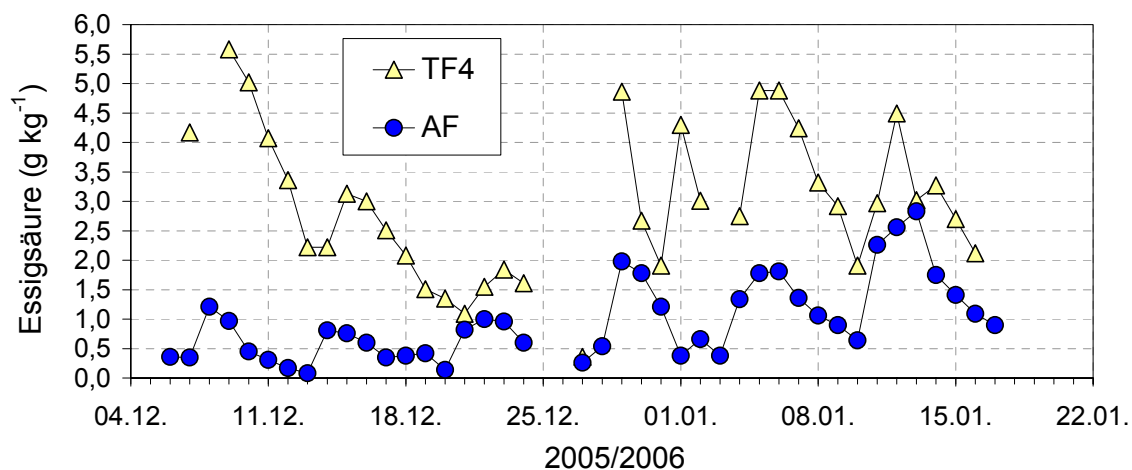


Abb. 21: Verlauf der Konzentrationen an Essigsäure im Ablauf des Trockenfermenters TF4 und des Anaerobfilters AF, Angaben für TF2 und TF3 s. Anhang (**Abb. 43** und **Abb. 45**)

Da die Methanbildung aus dem Substrat Essigsäure aufgrund der relativ geringen Diversität hierzu fähiger Methanbakterien als besonders störanfällig gilt, kann diesbezüglich das Auftreten von Hemmstoffen nicht ausgeschlossen werden. Auf Basis der hier durchgeführten chemischen Stoffanalysen lässt sich diese Möglichkeit jedoch nicht abschließend klären. Auszuschließen ist jedoch eine Hemmung durch Ammonium, da sich dessen Konzentrationen in der Einstauflüssigkeit mit 500 bis 600 mg_{NH₄-N} kg_{FM}⁻¹ in keinem kritischen Bereich befanden (Dauber 1993). Auch aus der Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit, als Summenparame-

ter des Salzgehaltes, ist durch eine abnehmende Tendenz keine Hemmwirkung abzuleiten. Eine graphische Darstellung der Verläufe der Ammoniumkonzentration und der elektrischen Leitfähigkeit ist dem Anhang beigelegt (**Abb. 49**). Das Auftreten einer Hemmung im Bioleaching-Prozess durch Hemmstoffanreicherung ist von Nordberg et al. (2007) beschrieben worden. Zur Abhilfe wird in der selben Arbeit ein regelmäßiger Austausch von Teilen der Einsaufflüssigkeit gegen Wasser vorgeschlagen.

Für die Propionsäure, die als FFS mit der größten Hemmwirkung auf den Biogasprozess gilt (Weiland 2001), lässt sich im Gegensatz zur Essigsäure keine Anreicherung feststellen (**Abb. 22**). Wie aus dem Kurvenverlauf weiter hervorgeht, vollzog sich der Abbau nach dem befüllbedingten Anstieg wesentlich zügiger und vollständiger als für die Essigsäure.

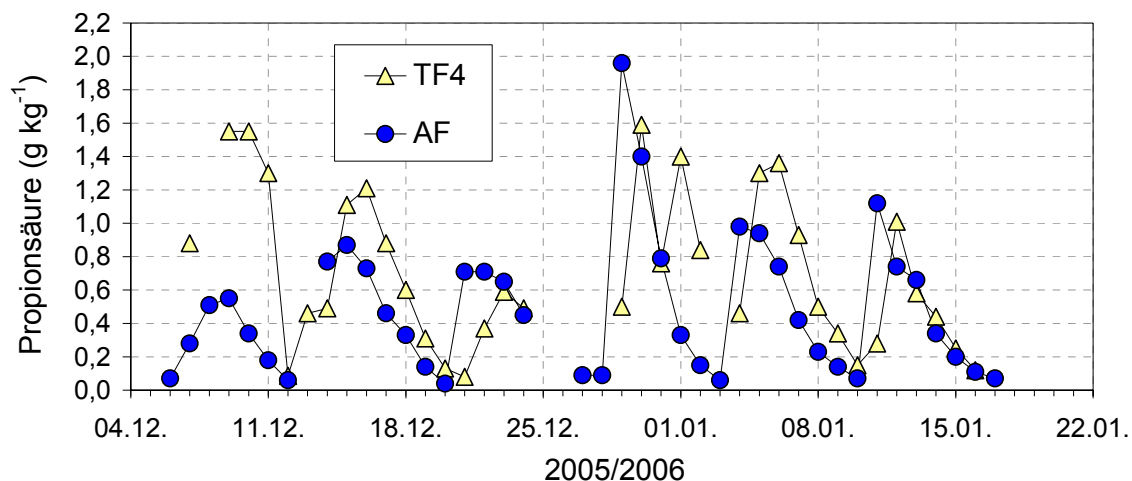


Abb. 22: Verlauf der Konzentrationen an Propionsäure im Ablauf des Trockenfermenters TF4 und des Anaerobfilters AF, Angaben für TF2 und TF3 s. Anhang (**Abb. 43** und **Abb. 45**)

Für die n-Buttersäure ist bekannt, dass diese im Vergleich zu Essig- und Propionsäure erheblich besser umgesetzt werden kann (Kroiss und Svardal 2005). Dieses wird anhand der Versuchsergebnisse bestätigt (**Abb. 23**). So war auch bei höheren Zulaufkonzentrationen von 5 g l^{-1} ein nahezu vollständiger Abbau im Anaerobfilter möglich.

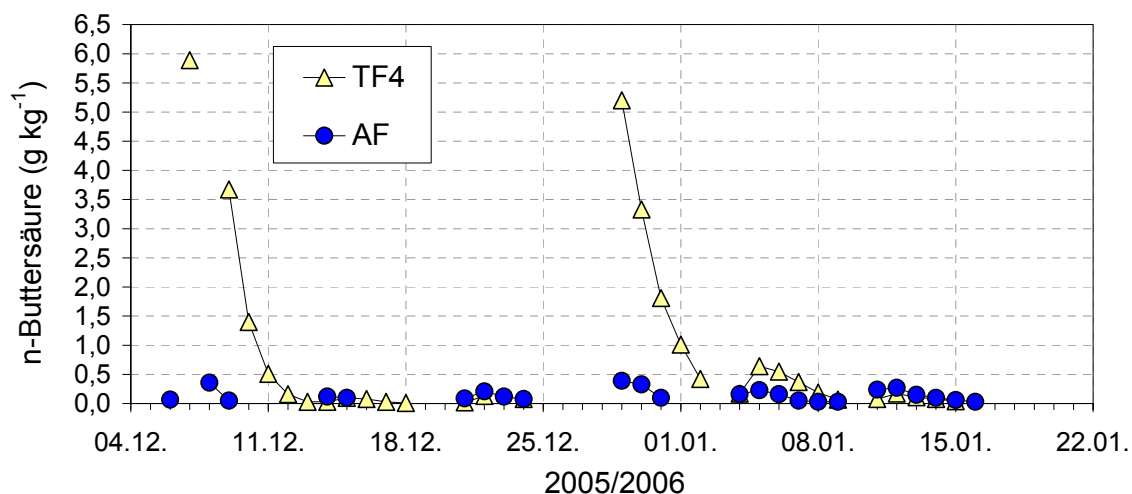


Abb. 23: Verlauf der Konzentrationen an n-Buttersäure im Ablauf des Trockenfermenters TF4 und des Anaerobfilters AF, Angaben für TF2 und TF3 s. Anhang (**Abb. 43** und **Abb. 45**)

Eigenschaften des festen Gärrestes

Nach der Auslagerung des festen Gärrests wurde dieser hinsichtlich seiner chemischen Eigenschaften analysiert (**Tab. 3**).

Tab. 3: Stoffkennzahlen von festem Gärrest aus dem kleintechnischen Versuch

Fermenter/ Entnahmedatum	pH (-)	TS (g/kg _{FM})	oTS (%TS)	NH ₄ -N (mg/kg _{FM})	N _{Kjel.} (g/kg _{FM})	XF (%TS)
TF3 20.12.05	9,08	129	91,2	603,1	1,97	38,2
TF4 28.12.05	9,06	154	90,0	576,6		31,2
TF2 03.01.06	9,02	145	90,8	559,6		31,4
TF3 10.01.06	9,02	145	90,4	546,3	2,96	30,4
TF4 17.01.06	8,42	145	90,9	559,2	2,75	31,1

Im Mittel wurde ein pH-Wert von 9,0 gemessen. Dieser alkalische Wert lässt sich auf die Aktivität des Ammonium-Ammoniak-Puffers zurückführen. Die durchschnittliche Konzentration an Ammoniumstickstoff wurde mit 570 mg kg_{FM} ermittelt. Der TS-Gehalt in der Frischmasse sank im Prozessverlauf von Ausgangswerten von zumeist über 300 g kg⁻¹ auf 144 g kg⁻¹ im Mittel. Der oTS-Anteil an der TS verringerte sich im selben Zeitraum von 95,4 % auf durchschnittlich 90,7 %. Im Bezug auf den Rohfasergehalt der Trockensubstanz (XF) war kein deutlicher Unterschied zur Triticale-GPS zu erkennen. Bezieht man den Rohfaseranteil auf die oTS, so ist eine leichte relative Anreicherung festzustellen.

Leistungsparameter

Auf Basis der im Betrachtungszeitraum von 6.12.05 bis 17.1.06 produzierten Biogas- und Methanmengen lässt sich die durchschnittliche Produktivität und Ausbeute des Systems bestimmen (**Tab. 4**).

Tab. 4: Biogas- und Methanproduktion (Normliter) aus der kleintechnischen Versuchsanlage des ATB mit jeweils 2 Befüllungen vom 6.12.2005 bis 17.1.2006

Fermenter	Triticale-GPS (kg FM)	Triticale-GPS (kg oTS)	Biogasmenge (l)	CH ₄ -Menge (l)	CH ₄ (Vol.-%)
TF2	40,8	12,82	3693	1077	29,2
TF3	44,1	12,43	3786	1319	34,8
TF4	41,0	12,41	3921	1247	31,8
AF	-		10491	7345	70,0
Gesamt	125,9	37,66	21893	10988	50,2

Im genannten Zeitraum wurde, bezogen auf die oTS der Triticale-GPS eine Biogas- und Methan ausbeute von 581 bzw. 292 l kg⁻¹ erreicht. Mit einem Beitrag von 195 l kg⁻¹ stammten etwa 2/3 der Methan ausbeute aus dem Anaerobfilter. Damit wurden die Versuchsergebnisse der ersten Versuchreihe bestätigt (s. Kap. 2.4.3.2). Im Vergleich zu den für die Nassfermentation angegebenen Ausbeuten von Getreide-GPS liegen die hier gemessenen Werte in vergleichbarer Höhe (KTBL 2005). Etwas oberhalb des Durchschnitts der Nassfermentationsanlagen lag die oTS-Raubelastung von 3,5 kg m⁻³d⁻¹ sowie die volumenspezifische Biogas- und Methanbildungsrate von 2,0 bzw. 1,0 l l⁻¹ d⁻¹ (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2005).

2.4.4 Funktion- und Leistungsanalyse der Anwendung des Bioleaching-Verfahrens an der Pilotanlage Clausnitz

2.4.4.1 Erprobungsbetrieb der Pilotanlage Clausnitz

Nach dem Abschluss der Umrüstung der Trockenfermentationsanlage Clausnitz zur Anwendung des Bioleaching-Verfahrens wurde im Januar 2006 wieder mit dem Erprobungsbetrieb begonnen. Als Einstauflüssigkeit wurde dabei Leitungswasser verwendet, ergänzt um die noch aus dem Vorversuch stammende Prozessflüssigkeit (s. Kap. 2.4.2). Aufgrund eines technischen Defekts der Trockenfermenter-Tore musste der Erprobungsbetrieb von Mai bis September 2006 unterbrochen werden (s. a. Kap. 2.4.4.2). In diesem Zeitraum wurden die erforderlichen Nachrüstarbeiten durchgeführt. Ab Oktober 2006 wurde der reguläre Erprobungsbetrieb wieder aufgenommen. Für die wissenschaftliche Analyse ergaben sich somit zwei auswertbare Zeiträume: Zeitraum1 vom 10.1.06 bis 3.5.06 und Zeitraum2 vom 1.10.06 bis 5.3.07.

Die Zugabe von frischer Prozessflüssigkeit aus dem Anaerobfilter erfolgte stoßweise, in Einzelgaben von 5 bis 110 m³ und einer Pumpgeschwindigkeit von 10 m³h⁻¹. Im Mittel kann eine Flüssigkeitsmenge in den Trockenfermenter von 60 m³ angenommen werden. Diese Menge wurde in den ersten Tagen nach den Neubefüllungen zumeist täglich ausgetauscht. Später wurde, in Abhängigkeit von der Stabilität der Methanbildung der Trockenfermenter, die Intensität des Flüssigkeitsaustauschs verringert. Um eine Funktionsstörung des Anaerobfilters durch eine mögliche Überlastung zu vermeiden, wurde als Untergrenze des pH-Werts im Ablauf des Anaerobfilters ein Wert von 7,0 vorgegeben. Neben den pH-Werten der Abflüssigkeit des Anaerobfilters und der Trockenfermenter wurden die Gasbildung aller Reaktoren, die Gaszusammensetzung sowie die Reaktionstemperaturen erfasst. Zusätzlich zur Datenerfassung vor Ort wurden während Zeitraum1 Proben der Prozessflüssigkeit, wie auch der festen Ein- und Ausgangsstoffe zur chemischen Analyse ans ATB gegeben (Analysemethoden s. Anhang Tab. 11). In Bezug auf die Gasmengenerfassung am Anaerobfilter traten während des gesamten Zeitraums der Anlagenerprobung erhebliche technische Störungen auf, so dass die Biogasmenge des Anaerobfilters nicht durchgängig und nur mit eingeschränkter Verwertbarkeit ermittelt werden konnte (s. a. Kap. 2.4.4.2). Einzelne fehlende Daten wurden dabei durch Interpolation ermittelt. Die Normierung der gemessenen Gasmengen erfolgte anhand des Umgebungsdruck sowie der Gastemperatur. Da die Gastemperatur für den Anaerobfilter nicht erfasst wurde, wurde eine mittlere Gastemperatur von 15°C angenommen. Die volumenspezifische Biogas- und Methanproduktivität der Trockenfermenter wurde auf ein Fassungsvermögen von 120 m³ je Reaktor bezogen. Für den Anaerobfilter wurde der mittlere Flüssigkeitsfüllstand von 120 m³ zugrunde gelegt.

Befüllungen im Zeitraum1 von 10.1.06 bis 3.5.06

Im Zeitraum1 wurde 9 Befüllungen durchgeführt, bei denen als nachwachsender Rohstoff ausschließlich Triticale-GPS verwendet wurde (**Tab. 5**).

Tab. 5: Befüllungen im Zeitraum1 von 10.1.06 bis 3.5.06

Befülldatum	Fermenter	Triticale-GPS (t FM)	fester Gärrest (t FM)
10.01.06	TF2	35	35
17.01.06	TF3	28	28
01.02.06	TF4	32	32
14.02.06	TF1	40	-
01.03.06	TF2	40	-
21.03.06	TF3	55	-
31.03.06	TF4	50	-
10.04.06	TF1	55	-
27.04.06	TF2	39	25

Während der ersten 3 Befüllungen wurde, bezogen auf die Frischmasse eine Mischung mit 50 % festem Gärrest eingesetzt. In den nachfolgenden 5 Befüllungen wurde 100 % Triticale-GPS verwendet, welches der im kleintechnischen Maßstab ermittelten Vorzugsvariante entsprach (Kap. 2.4.3.2). Wie nachfolgend beschrieben, konnte der Prozess ohne festes Impfmateriale jedoch nicht stabilisiert werden, so dass nachfolgend wieder mit einer Gärrestzugabe gearbeitet wurde. Die Triticale-GPS wurde in Zeitraum1 zweimal hinsichtlich ihrer Stoffeigenschaften analysiert, am 9.1.06 und 13.2.06 (Daten s. Anhang **Tab. 13**). Hinsichtlich des oTS-Gehaltes der Frischmasse unterschieden sich die Proben mit Werten von 253 bzw. 355 g kg⁻¹ deutlich.

Die Feststoffverweilzeit lag mit 7 - 8 Wochen um mehr als das zweifache höher als im kleintechnischen Versuch. Zurückzuführen ist die längere Verweilzeit auf den, gegenüber dem kleintechnischen Versuch verzögerten Abbau. Die Abstände zwischen den Befüllungen der jeweiligen Trockenfermenter erhöhten sich zusätzlich durch erforderliche Umrüst-, Reparatur- und Wartungsarbeiten. Eine Übersicht der zeitlichen Aufteilung des Betriebs der Trockenfermenter in Phasen mit und ohne effektive Biogasproduktion gibt **Abb. 24**.

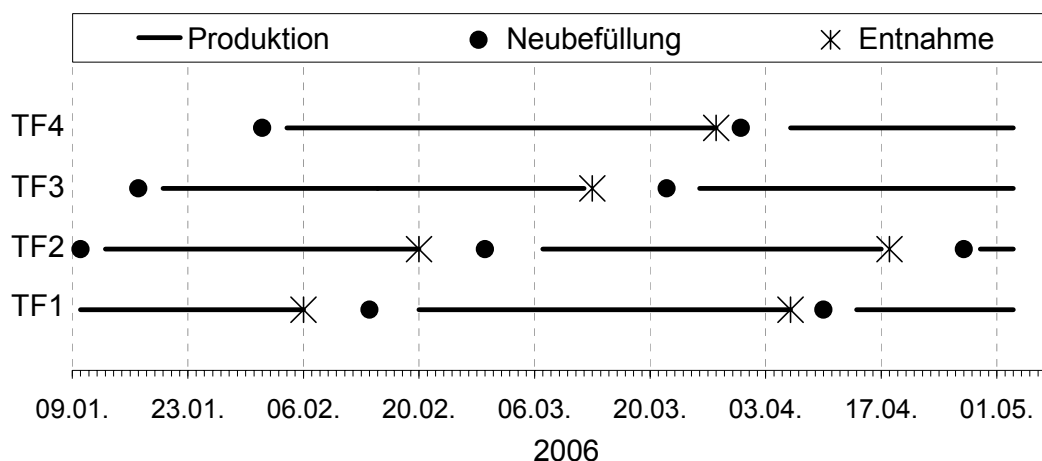


Abb. 24: Aufteilung des Betriebs der Trockenfermenter in Phasen mit und ohne effektive Biogasproduktion (Gaseinspeisung ins BHKW)

Nach der Neubefüllung eines Trockenfermenters wurde der Reaktor im Mittel erst nach 4 Tagen an die Gasverwertung angeschlossen. Dieses erfolgte aufgrund einer erheblichen CO₂-Bildung aus der anfänglich zugegebenen Einstauflüssigkeit, die die Gasverwertung im BHKW behinderte. Dieser Effekt lässt sich vor allem auf die Ansäuerung durch die organischen Säuren des Triticale-GPS zurückführen. Verstärkt wurde der Effekt durch den stoßweise durchgeführten Flüssigkeitsaustausch, der auch im Anaerobfilter aufgrund des FFS-Zulaufs aus den Trockenfermentern eine erhöhte CO₂-Freisetzung bewirkte (weitere Angaben zum Flüssigkeitsaustausch s. Anhang **Abb. 50 bis Abb. 53**). Insgesamt wurde so zwischen den jeweils effektiven Gasproduktionsphasen eine passive Zeit von 8 bis 15 Tagen verzeichnet. Die Gesamtdauer zwischen den einzelnen Befüllungen eines Trockenfermenters lag im Mittel bei 57 Tagen und damit nahezu dreimal höher als im kleintechnischen Versuch.

Zeitraum2 von 1.10.06 bis 5.3.07

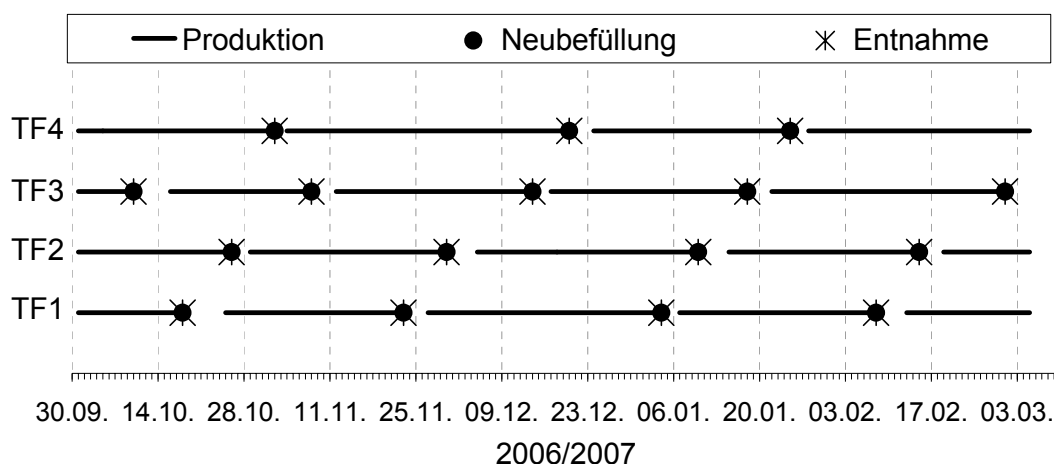
Im Zeitraum2 wurden 15 Befüllungen durchgeführt, bei denen als nachwachsende Rohstoffe neben Triticale-GPS auch vereinzelt Maissilage und Frischmais zum Einsatz kamen (**Tab. 6**).

Tab. 6: Befüllungen im Zeitraum2 von 10.1.06 bis 5.3.06

Befüll- datum	Fermenter	Triticale-GPS (t FM)	Mais (t FM)	Rindermist (t FM)	Gärrest (t FM)
10.10.06	FR3	4	19 (unsiliert)		42
18.10.06	FR1	4	20 (unsiliert)		10
26.10.06	FR2	24			20
02.11.06	FR4	35			15
08.11.06	FR3	20		15	10
23.11.06	FR1	25			20
30.11.06	FR2	24		12	
14.12.06	FR3	24		10	
20.12.06	FR4	24		8	
04.01.07	FR1	25	4 (GPS)	10	
11.01.07	FR2	30		12	
18.01.07	FR3	30		10	
25.01.07	FR4	30		8	
08.02.07	FR1	34		2	
15.02.07	FR2	34		8	

Da die Ergebnisse der Anlagenerprobung aus Zeitraum1 eine Prozessüberlastung bei Verzicht auf festes Impfmateriale anzeigten, wurde im Zeitraum2 wieder festes Impfmateriale zugeführt. Anstelle von festem Gärrest aus einer Vorgängerbefüllung wurde dabei auch fester Rindermist verwendet. Bezogen auf die gesamte Frischmasse der Substratmischung variierte die zugegebene Impfmaterialemenge zwischen 5 und 65 %. Mit einem Häufigkeitsanteil von 67 % lag der Impfmaterialeanteil jedoch zumeist zwischen 19 und 34 %.

Wie aus der Übersicht der Betriebszeiten der Trockenfermenter in Zeitraum2 hervorgeht, konnte der Abstand zwischen den einzelnen Feststoffbefüllungen eines Trockenfermenters im Vergleich zu Zeitraum1 von 57 auf 37 Tage erheblich verringert werden (**Abb. 25**).

**Abb. 25:** Aufteilung des Betriebs der Trockenfermenter in Phasen mit und ohne effektive Biogasproduktion (Gaseinspeisung ins BHKW)

Die Gärrestentnahme und die Neubefüllung wurden durchweg am selben Tag durchgeführt. Um der unmittelbar nach der Befüllung und dem Flüssigkeitseinstau auftretenden starken CO₂-Freisetzung zu begegnen, wurde, wie in Zeitraum1, das primäre Biogas über die Überdrucksicherung des Trockenfermenters abgelassen. Hierfür wurde im Mittel ein Zeitraum von 3 Tagen veranschlagt. Der Austausch der Einstauflüssigkeit erfolgte nach der gleichen Me-

thodik, wie in Zeitraum1, gekennzeichnet durch eine stoßweise Zuführung. Weitere Angaben bezüglich der ausgetauschten Mengen sind dem Anhang beigelegt (**Abb. 70 bis Abb. 73**).

2.4.4.2 Technische Funktionsfähigkeit der Pilotanlage Clausnitz

Nachfolgend wird die technische Funktionsfähigkeit der Pilotanlage Clausnitz anhand der Erfahrungen im Erprobungsbetrieb des Bioleaching-Verfahrens ab Januar 2006 beschrieben. Den Schwerpunkt nehmen dabei technische Defizite und Störungen ein. Aufgeführt werden auch Störungen der Messeinrichtungen, die primär der wissenschaftlichen Prozessanalyse dienen. Folgende Bereiche werden getrennt betrachtet:

- Trockenfermenter
- Anaerobfilter und Flüssigkeitsaustausch
- Gasverwertung

Trockenfermenter

Durch die Notwendigkeit zur regelmäßigen Öffnung der Trockenfermenter im Zugabe des Substratwechsels, die aufwärtsgerichtete Flüssigkeitsströmung sowie die Feststoffbefüllung von oben werden besondere Anforderungen an die technische Gestaltung der dadurch beanspruchten Anlagenkomponenten gestellt. Hierzu gehören die Tore, die Niederhaltevorrichtung, die Folienabdichtung sowie der Flüssigkeitsüberlauf.

Die Torkonstruktion der Trockenfermentation stellte während der Erprobung die größte Schwachstelle im System dar. Durch den auf den Toren lastenden hydrostatischen Druck und dem Druck durch die Förderpumpe, kam es zu einer schleichenden Verformung der Tore, die in der Folge zu Undichtigkeiten und dem Austreten von Flüssigkeit führte. Um diese Problematik zu beheben, wurde die Torkonstruktion mehrmals bautechnisch verändert. Hierzu gehörten die Verstärkung der Tore, eine zusätzliche Verankerung sowie das Anbringen eines zweiten Dichtungsschlauchs. Als Folge der Umbaumaßnahmen musste die Erprobung des Bioleaching-Konzepts zwischen Mai und September 2006 unterbrochen werden. Auch nach dem Abschluss der bautechnischen Arbeiten wurde jedoch noch keine zufrieden stellende Zuverlässigkeit erreicht. So kam es weiterhin vereinzelt zum Austritt von Prozessflüssigkeit. Auch die Gasdichtigkeit war nicht sichergestellt. Die Gefahr von Undichtigkeiten im Torbereich beeinflusste auch den Flüssigkeitsaustausch. So wurde aus diesen Gründen die Durchführung eines automatischen, unbeobachteten Flüssigkeitsaustausches nicht umgesetzt. Durch die manuelle Ausführung des Flüssigkeitsaustausches schränkte sich der für den Flüssigkeitsaustausch nutzbare Tageszeitraum zum Nachteil der Prozessleistung erheblich ein. Um das Auftreten von Undichtigkeiten an den Toren dauerhaft zu beseitigen ist vom Betreiber beabsichtigt, die Tore durch Verschweißen unlösbar mit den Wandungen der Trockenfermenter zu verbinden. In der Folge müssten die Trockenfermenter ausschließlich von oben befüllt und entleert werden. Als eine vorteilhaftere Lösung erscheint für zukünftige Anlagen der Einbau von Toren mit Innenanschlag.

Zum Niederhalten der aufsteigenden Feststoffe wurde, nach anfänglichen Schwierigkeiten durch die Verwendung einer ungenügend stabilen Vorrichtung, mit Beginn der Bioleaching-Erprobung eine dauerhaft funktionsfähige Lösung installiert. Diese Niederhalter bestanden aus einer soliden Stahlkonstruktion, die durch eine Vorrichtung zum Einhängen beweglich blieb und so für die Substratneubefüllung maschinell aus den Trockenfermentern entfernt werden konnten.

Die Folienabdichtung muss durch die Befüllweise von oben regelmäßig abgenommen und neu aufgezogen werden. Insbesondere das Wiederaufziehen der Folie erforderte eine hohe Sorgfalt, da der exakt an die Abmessungen der Folienhalterung angepasste Folienzuschnitt bei nicht korrekter Lage zu Faltenbildung neigte. Durch Faltenbildung besteht die Gefahr der Gaudichtigkeit. Zur Durchführung der entsprechenden Arbeiten wurden daher generell zwei Personen benötigt. Gehalten wurde die Folie von einem Seeger-Verschluss, bei dem die Folie mittels eines Druckluftschlauchs an die Wände einer U-Profilschneide gepresst wird. Um die Gefahr einer durch Faltenbildung bedingten Undichtigkeit zu minimieren, wäre zu prüfen, ob bei zukünftigen Anlagen neben dem Seeger-Verschluss eine Wassertauchung integriert werden kann. Zu prüfen wäre auch, ob die ausschließliche Befüllung und Entnahme über das Tor für potentielle Anwender in Abhängigkeit der vorhandenen Gegebenheiten eine ökonomisch vorteilhaftere Lösung darstellt. Dadurch könnte die Folie dauerhaft auf den Trockenfermentern verbleiben.

Nach anfänglich beobachteten Problemen durch das Verstopfen der Flüssigkeitsabführung aus den Trockenfermentern durch aufschwimmende Feststoffpartikel, wurde der Flüssigkeitsablauf umgestaltet. Durch Eintauchen des Überlaufrohres von oben in die Prozessflüssigkeit und der damit unterhalb des Flüssigkeitsspiegels verlegten Flüssigkeitsentnahme wurde dieses Problem nachhaltig beseitigt.

Des Weiteren stellte sich bei der Anlagenerprobung heraus, dass eine eigene Beheizung der Trockenfermenter nicht erforderlich ist, da über die im Anaerobfilter erwärmte Prozessflüssigkeit ausreichend Wärme eingetragen wird. Somit können bei der Errichtung zukünftiger Anlagen entsprechende Einsparungen vorgenommen werden.

Der Vorgang der Feststoffbefüllung und -entnahme konnte mittels Radler, Kippanhänger und Schlepper mit einem angemessenen Arbeitsaufwand bewältigt werden. Für die komplette Gärrestentnahme und Neubefüllung eines Trockenfermenters kann ein Arbeitstag mit zwei Personen veranschlagt werden.

Anaerobfilter und Flüssigkeitsaustausch

Der aus einem vorhandenen Sammelbehälter gestaltete Anaerobfilter wies aus technischer Sicht keine Probleme auf. Wie sich jedoch bei der Erprobung herausstellte, besaß der Anaerobfilter nicht die gewünschte biologische Leistungsfähigkeit. Dieses lässt sich zurückführen auf eine ungenügende Besiedlungsfläche sowie den stoßweisen Flüssigkeitsaustausch, durch den die Milieubedingungen im Anaerobfilter starken Schwankungen unterlagen. Zu empfehlen ist daher, entweder die Leistungsfähigkeit des Anaerobfilters zu erhöhen oder einen weiteren ausreichend dimensionierten Anaerobfilter zu errichten. Alternativ zu einer Neuerrichtung ließe sich auch eine vorhandene Trockenfermenterbox als zusätzlicher Methanreaktor nutzen. Die Leistung des Anaerobfilters könnte durch die Verwendung von Füllkörpern mit einer höheren spezifischen Oberfläche gesteigert werden. So konnte im kleintechnischen Versuch, bei dem für den Anaerobfilter Füllkörper mit einer Oberfläche von $305 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ benutzt wurden, eine mehrfach höhere Produktivität erreicht werden als im großtechnischen Anaerobfilter mit einer Füllkörperoberfläche von nur $100 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$. Da sich mit zunehmender Oberfläche die Lückengröße der Füllkörper verringert, sollte diese Maßnahme durch eine Methode zur Verhinderung einer Verstopfung begleitet werden. Denkbar sind eine Siebung der zulaufenden Flüssigkeit sowie eine Rückspülung der Füllkörper.

Eine grundsätzliche Alternative zum Anaerobfilter stellen Schlammbettreaktoren dar. So zeigte ein in einer vergleichbaren Pilotanlage mit Bioleaching-Konzept eingesetzter provisorischer

Schlammbedtreaktor eine erstaunliche Leistungsfähigkeit, die um ein Mehrfaches über der des großtechnischen Anaerobfilters lag (Linke et al. 2006; Linke und Heiermann 2006). Schlammbedtreaktoren besitzen außerdem den Vorteil, dass sie keine kostenintensiven Trägermaterialien benötigen. Ohne weitere Umbauten könnte einer der Trockenfermenter als Schlammbedtreaktor betrieben werden. Bei Weiterverfolgung des Anaerobfilter-Prinzips könnte einer der Trockenfermenterboxen auch zu diesem umgestaltet werden. Zu überlegen wäre dabei, durch den Einsatz schwerabbaubarer biogener Trägermaterialien die Kosten zu senken. Als geeignetes Trägermaterial würde, wie Vorversuche zeigten, das in der Agrargesellschaft Clausnitz produzierte Flachsstroh in Frage kommen. Um eine Verstopfen der Poren zu vermeiden, ist dabei in regelmäßigen Abständen eine Teilerneuerung des Strohs vorzunehmen. Die Verwendung von Stroh als bakteriellen Aufwuchsträger im Bioleaching-System wurde bereits von Svensson et al. (2006) beschrieben. Generell besteht hinsichtlich der Gestaltung der Methanstufe jedoch noch großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Als erhebliches Problem für die wissenschaftliche Auswertung des Erprobungsbetriebs stellte sich die unzuverlässige Gasmengenerfassung am Anaerobfilter heraus. Zur Gaserfassung wurde ein Messgerät der Firma Esters verwendet, das in einer größeren Dimensionierung ohne Störungen vor den BHKWs der Biogasanlage Clausnitz zum Einsatz kommt. Als Ursache für die unzuverlässige Funktion des Messgeräts am Anaerobfilter wird vermutet, dass das auf Schwingungsmessungen basierende Funktionsprinzip für den Einsatz bei relativ geringen Gasströmen und Differenzdrücken ungeeignet ist. Als weiteren Störfaktor kommen Druckschwankungen in der Gasableitung in Frage, die durch das Ansaugen des Biogases hervorgerufen werden. Zur Abhilfe wurde die Einrichtung eines speziellen Gaserfassungssystems beschlossen, welches durch eine Druckerhöhung im Gasraum des Anaerobfilters sowie ein periodisches Ablassen des Gases bessere Voraussetzungen für das Funktionieren des genannten Messprinzips schafft.

In Bezug auf den Flüssigkeitsaustausch wäre eine Umstellung von einer Einmalgabe pro Tag auf eine möglichst kontinuierliche, langsame Zudosierung günstig. Hierdurch ließe sich zum einen die Druckbelastung der Trockenfermenter-Tore reduzieren und zum anderen die biologische Leistungsfähigkeit des Systems erhöhen. Zusätzlich würde durch eine sehr langsame Austauschrate die auf eine Neubefüllung folgende CO₂-Freisetzung auf einen längeren Zeitraum verteilt, so dass Probleme in Bezug auf die BHKWs vermieden werden und weniger Methan verloren geht.

Gasverwertung

Für die Verwertung des produzierten Biogases sind in der Biogasanlage Clausnitz zwei BHKWs installiert, in denen das Biogas aus der Trockenfermentationsanlage und der Nassfermentationsanlage zusammen verbrannt wird. Von den BHKWs basiert jeweils eines auf den Gas-Otto-Motor und eines auf der Zündstrahl-Technologie. Das Zündstrahl-BHKW erwies sich als relativ störanfällig, so dass vereinzelt auch Biogas über die Überdrucksicherung der Reaktoren abgelassen werden musste. Mit Beginn der Bioleaching-Erprobung war diese Problematik jedoch weitestgehend behoben.

Wie bereits beschrieben, führte die verstärkte physikalische CO₂-Freisetzung nach dem Einstau eines Neubefüllten Trockenfermenters zu Störungen bei der Gasverwertung, aufgrund eines zu niedrigen Methangehaltes. Aus diesem Grund wurde das Biogas aus den Trockenfermentern während der ersten Tage nach einer Neubefüllung über die Überdrucksicherung der Trockenfermenter abgelassen. Mit der Einspeisung ins Leitungsnetz wurde in Regel erst bei einem Methangehalt von über 40 Vol.-% begonnen. In diesem Zeitraum erfolgte auch

keine Erfassung des produzierten Biogases, so dass die tatsächlich produzierten Mengen an Methan und Biogas in unbekannter Höhe über den gemessenen lagen. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und des Klimaschutzes sollten daher Maßnahmen erfolgen, die eine frühzeitige Verwertung des Biogases auch bei geringen Methangehalten ermöglichen. Hierzu gehört die bessere Vermischung des Biogases des betreffenden Trockenfermenters mit dem Biogas der übrigen Reaktoren aus der Nass- und Trockenfermentationsanlage. Hierzu wäre die Einrichtung eines Gasspeichers vor den BHKWs geeignet. Des Weiteren kann, wie ebenfalls bereits beschrieben, die CO_2 -Entgasung durch einen verlangsamten Flüssigkeitsaustausch auf einen längeren Zeitraum gestreckt werden.

2.4.4.3 Ergebnisse und Diskussion

Gasbildung im Zeitraum I

Die Methanbildungsrate aus den großtechnischen Trockenfermentern TF1-TF4 zeigte den für diskontinuierliche Verfahren typischen Verlauf einer Optimumskurve, die auch bereits in den kleintechnischen Versuchen ermittelt wurde (Abb. 26).

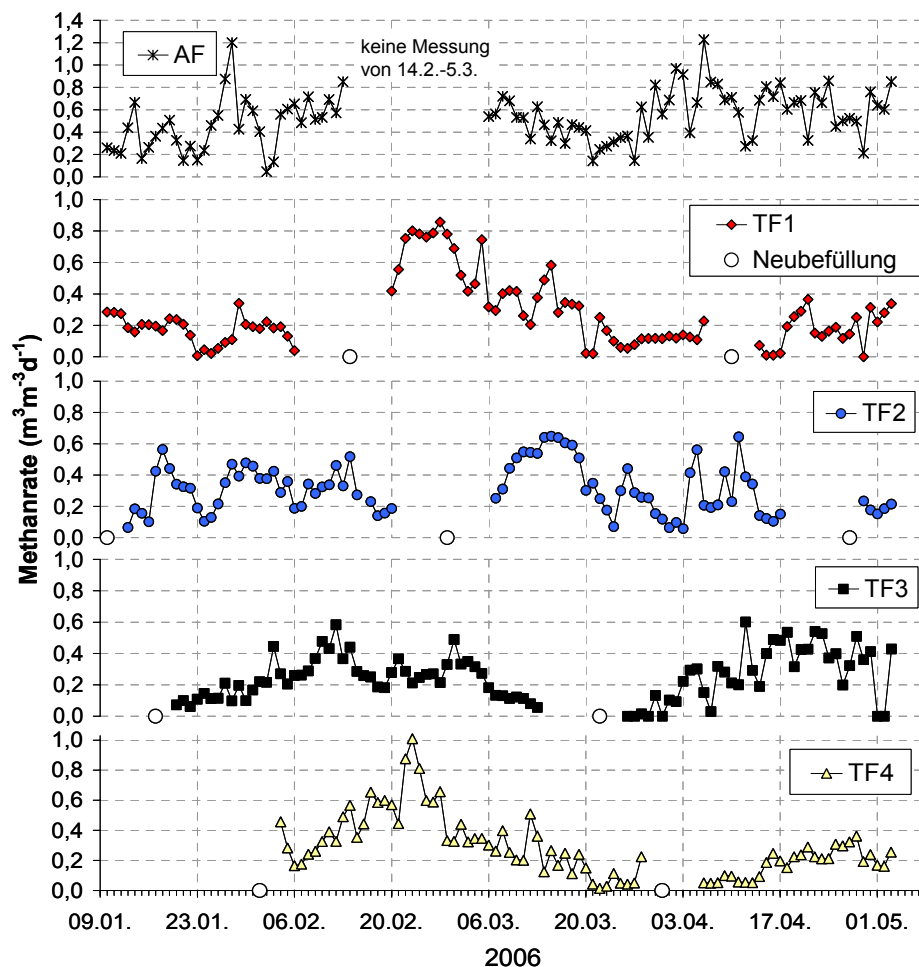


Abb. 26: Verlauf der volumenspezifischen Methanbildungsrate aus dem Anaerobfilter (AF) und den Trockenfermentern (TF) der großtechnischen Versuchsanlage während Zeitraum I

Vergleicht man die Methanbildung aus den ersten beiden Feststoff-Befüllungen ohne festen Gärrest („TF1 14.2.06“ und „TF2 1.3.06“) mit den Daten aus dem kleintechnischen Versuch (s. Abb. 17), so ist in Höhe und Verlauf eine deutliche Übereinstimmung festzustellen. Die

maximale Methanrate erreichte in TF1 $0,8 \text{ m}^3\text{m}^{-3}\text{d}^{-1}$ und in TF2 $0,6 \text{ m}^3\text{m}^{-3}\text{d}^{-1}$ und verblieb etwa 10 Tage auf diesem Niveau. Danach setzte die Abklingphase ein. Die Beobachtung aus dem kleintechnischen Versuch, dass sich unmittelbar nach der Neubefüllung eines Trockenfermenters die Methanproduktivität der übrigen Trockenfermenter erhöht, war auch im großtechnischen Versuch zu erkennen. In Bezug auf die Anlaufphase bis zum Erreichen des Produktionsmaximums ist jedoch bereits im Übergang von „TF1 14.2.06“ auf „TF2 1.3.06“ eine Verzögerung zu verzeichnen. Bei den nachfolgenden Befüllungen verstärkte sich diese Prozessverzögerung weiter, zudem nahm auch die Höhe der maximalen Methanrate erheblich ab.

Aufgrund eines Defektes an der Gasfassung des Anaerobfilters konnte die Gasbildung zwischen dem 14.2.06 und 5.3.06 nicht ermittelt werden. Anhand der vorhandenen Daten lässt sich jedoch eine Methanproduktivität zwischen $0,2$ und $1,2 \text{ m}^3\text{m}^{-3}\text{d}^{-1}$ ermittelt. Diese ist damit deutlich geringer im kleintechnischen Versuch, bei der die Methanrate des Anaerobfilters in der Regel zwischen 1 und $3,5 \text{ m}^3\text{m}^{-3}\text{d}^{-1}$ oszillierte. Die typische Schwankung der Produktivität im Rhythmus der Befüllungen lässt sich im großtechnischen Versuch nicht erkennen. Als wahrscheinliche Ursache ist der nicht gleichmäßige Flüssigkeitsaustausch (s. a. Anhang **Abb. 50 bis Abb. 53**) sowie eine Überlastung des Anaerobfilters anzunehmen.

Neben der geringen Produktivität wies der großtechnische Anaerobfilter zumeist auch einen vergleichsweise geringen Methangehalt auf (**Abb. 27**). Während im kleintechnischen Versuch sich die Methankonzentration um 70 Vol.-% bewegte, wurden hier nur um 60°Vol.-% gemessen.

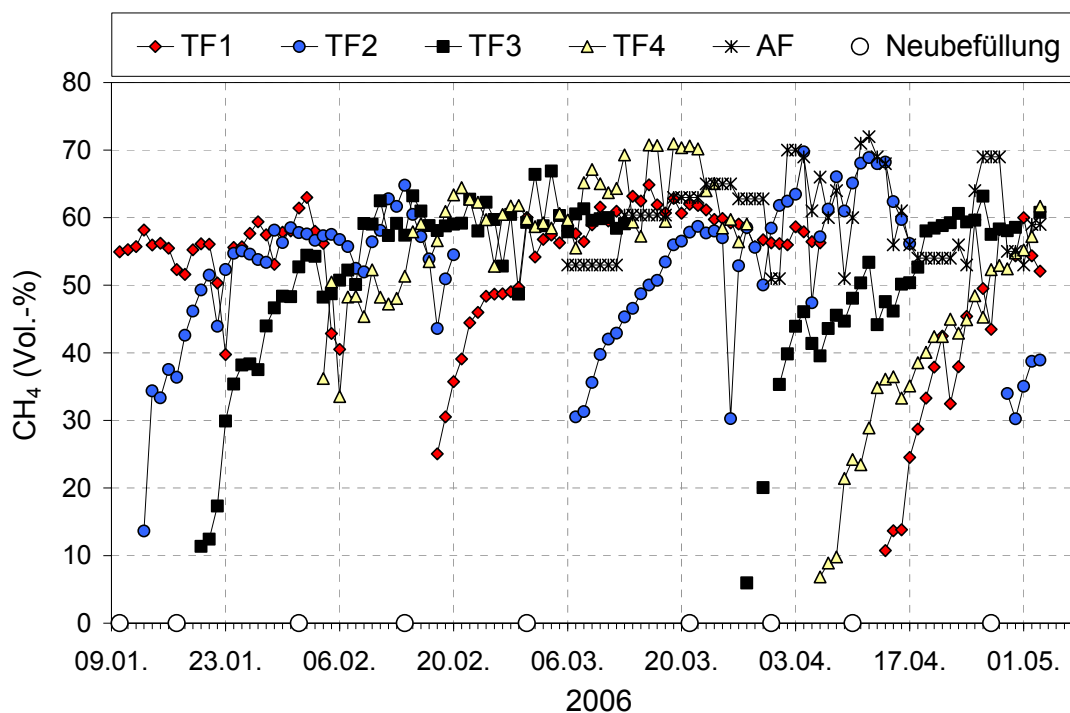


Abb. 27: Methankonzentrationen im Prozessverlauf aus der großtechnischen Pilotanlage während Zeitraum I

Während bei den ersten Befüllungen bis einschließlich „TF1 14.2.06“ für die Trockenfermenter die Schwelle von 40 Vol.-% Methan innerhalb von einer Woche nach der Befüllung erreicht bzw. überschritten wurde, wurde nachfolgend eine deutliche Verzögerung auf zwei Wochen oder länger beobachtet. Die Konzentration an Schwefelwasserstoff, die im Biogas der Trockenfermenter ebenfalls gemessen wurde, erreichte vergleichsweise geringe Werte.

Nur vereinzelt wurden Konzentrationen über 300 vppm beobachtet. Eine detaillierte Darstellung des Verlaufs der analysierten Gaskonzentrationen für alle Trockenfermenter ist dem Anhang beigelegt (**Abb. 54 bis Abb. 57**).

Zur Ermittlung der Methanbildungsrate und der Methankonzentration aus dem Gesamtsystem wurden die fehlenden Daten des Anaerobfilters aus einer Inter- bzw. Extrapolation der vorhandenen Werte errechnet (**Abb. 28**).

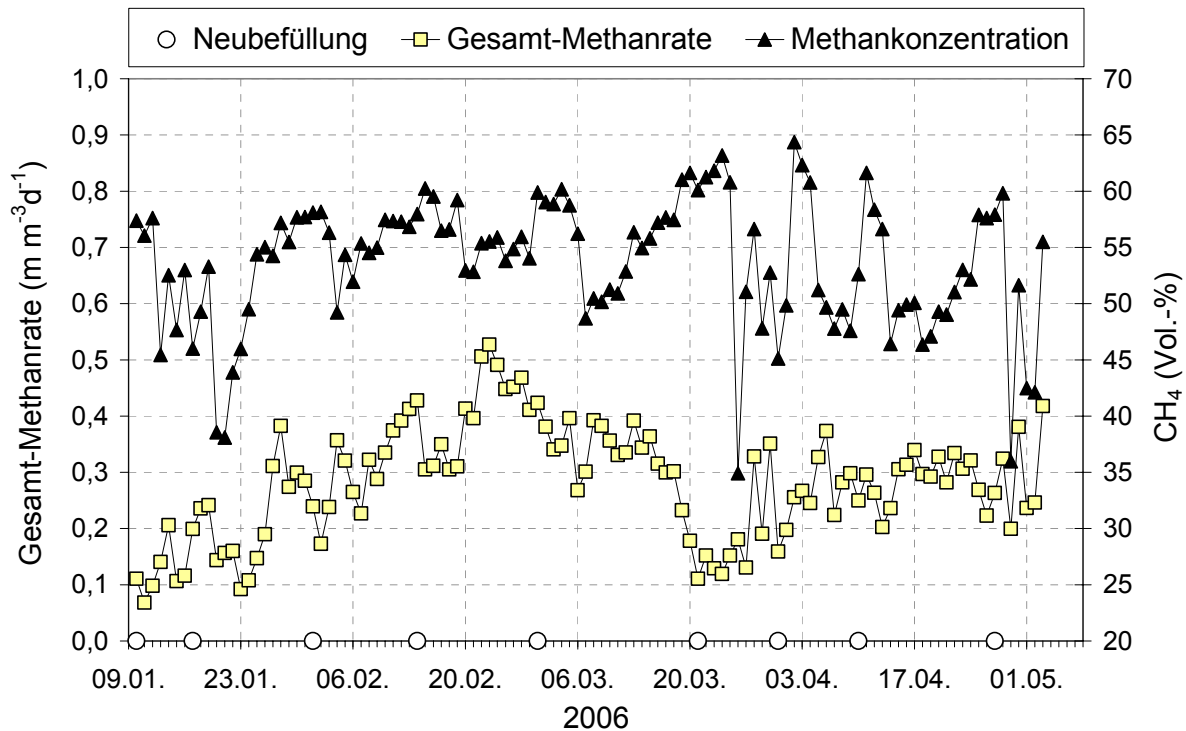


Abb. 28: Verlauf der Methanrate und der Methankonzentration aus dem großtechnischen Gesamtsystem während Zeitraum1

Mit einer volumenspezifischen Methanrate des Gesamtsystems zwischen $0,1$ und $0,7 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ lässt sich für den Zeitraum1 eine erhebliche Schwankungsbreite feststellen. Als Mittelwert für die Methanrate ergibt sich ein Wert von $0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$. Als Phase der höchsten Produktivität, mit Werten von über $0,4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, kann der Beginn der Anlagenbefüllung mit reiner Triticale-GPS („TF1 14.2.06“) benannt werden. Im weiteren Verlauf konnten diese Raten nicht stabilisiert werden, so dass aus dem Einsatz von Triticale-GPS ohne Gärrestzugabe eine Überlastung des Gesamtprozesses geschlussfolgert wurden. Diese Vermutung konnte anhand der nachfolgend beschriebenen Zunahme der FFS-Konzentration im System eindeutig bestätigt werden. Der Methangehalt im produzierten Biogas wies ebenfalls eine große Schwankungsbreite auf. Auffällig ist dabei, dass trotz des Ablassens des primären Biogases über die Überdrucksicherung, nach der Neubefüllung eines Trockenfermenters jeweils ein deutlicher Rückgang des Methangehaltes zu erkennen ist.

Prozesstemperaturen und Flüssigkeitseigenschaften im Zeitraum1

Die ermittelten Prozesstemperaturen lagen bei allen Reaktoren durchweg im mesophilen Bereich zwischen 35 und $45 \text{ }^\circ\text{C}$. Nur im Zusammenhang mit der Neubefüllung eines Trockenfermenters wurden in diesem kurzzeitig geringere Temperaturen beobachtet (Darstellung der Temperaturverläufe s. Anhang **Abb. 58**).

Als wichtigster Prozessparameter zur Beschreibung der Milieubedingungen wurde der pH-Wert im Ablauf der Reaktoren regelmäßig vor Ort anhand eines mobilen pH-Meters ermittelt (**Abb. 29**). Der Prozessflüssigkeitsablauf vom Anaerobfilter wurde täglich analysiert. Für die Trockenfermenter wurde jeweils nach einer Neubefüllung eine tägliche Analyse durchgeführt. Nach dem Erreichen neutraler pH-Werte wurde der Messabstand vergrößert.

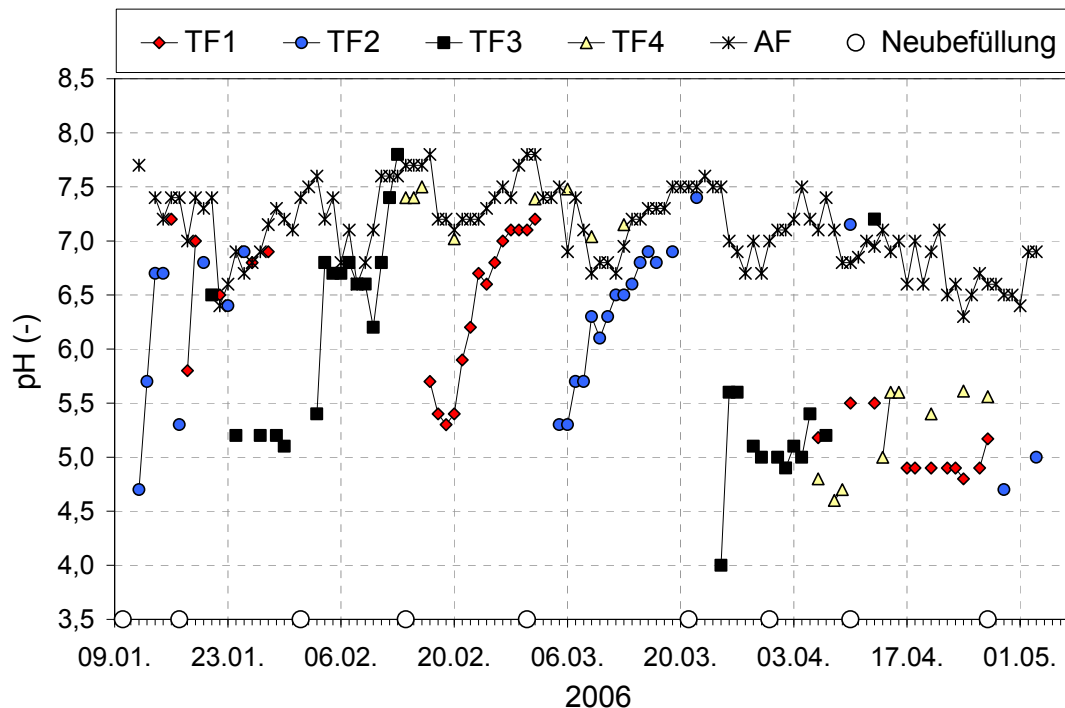


Abb. 29: Verlauf der pH-Werte in den Abläufen der Trockenfermenter (TF) und des Anaerobfilters (AF) im Großmaßstab während Zeitraum I

Der Verlauf der pH-Werte in der Prozessflüssigkeit wies eine deutliche Zweiteilung auf. So lässt sich bis zum 20.3.06 ein rascher Wiederanstieg nach einer Neubefüllung erkennen. Dieses Verhalten stimmt mit den Ergebnissen aus dem kleintechnischen Versuchen überein (s. **Abb. 19**). Mit der Neubefüllung „TF3 21.03.06“ änderte sich das Bild jedoch dahingehend, dass die Abflüssigkeit dauerhaft in einem sauren pH-Bereich zwischen 4,5 und 5,7 verblieb. Zudem sank auch der pH-Wert im Ablauf des Anaerobfilters deutlich ab. Um den Anaerobfilterinhalt entsprechend den Vorgaben im neutralen pH-Bereich zu halten, musste der Prozessflüssigkeitsaustausch mit den Trockenfermentern reduziert werden. Wie bereits anhand der rückläufigen Gasbildung abgeleitet, war dies die Folge einer Prozessüberlastung bzw. Säureanreicherung. Der Verlauf des Gehaltes an flüchtigen Fettsäuren (FFS) gibt diesen Vorgang direkt wieder (**Abb. 30 und Abb. 31**).

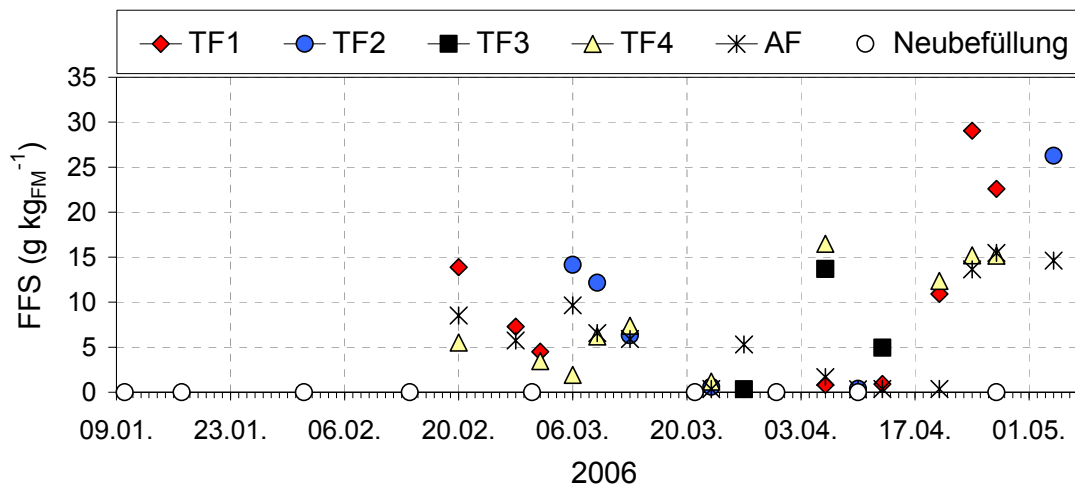


Abb. 30: Verlauf der Gesamtkonzentrationen an flüchtigen Fettsäuren (FFS) in den Abläufen der Trockenfermenter (TF) und des Anaerobfilters (AF) im Großmaßstab während Zeitraum I

Wie aus **Abb. 30** hervorgeht, wies der Ablauf des Anaerobfilters (AF) bereits vor dem 20.3.06 vereinzelt sehr hohe FFS-Konzentrationen von bis zu 10 g l^{-1} auf. Nach dem Rückgang der FFS-Gehalte bis an die Grenze der Nachweisbarkeit zwischen dem 20.3. und 3.4., stieg die FFS-Konzentration im Ablauf des Anaerobfilters jedoch auf extrem hohe Werte von 15 g l^{-1} . Parallel dazu war auch ein Anstieg der FFS-Konzentrationen in den Abläufen der Trockenfermenter auf bis zu 29 g l^{-1} zu beobachten. Beim Vergleich der Säurespektren vor und nach dem 20.03.06 fällt die erhebliche Zunahme der Konzentration der längerkettigen FFS Valeriansäure und Capronsäure auf (Säurespektren s. Anhang **Abb. 59 bis Abb. 68**). Die Konzentrationen der kürzerkettigen FFS Essigsäure, Buttersäure und Propionsäure stieg dagegen nur leicht an.

Als FFS mit der größten Hemmwirkung gilt, wie bereits zuvor beschrieben, die Propionsäure. Deren Konzentration lag in den Abflüssigkeiten mit Werten von zum Teil über 4 g l^{-1} in einem sehr hohen Bereich (**Abb. 31**). Da nur der undissoziierte Anteil der Propionsäure hemmend wirkt (Weiland 2001), ist auch der pH-Wert von hoher Bedeutung. Aufgrund der ab dem 20.3.06 deutlich geringeren pH-Werte kann ab diesem Zeitpunkt eine propionsäurebedingten Hemmung des Abbauprozesses nicht ausgeschlossen werden.

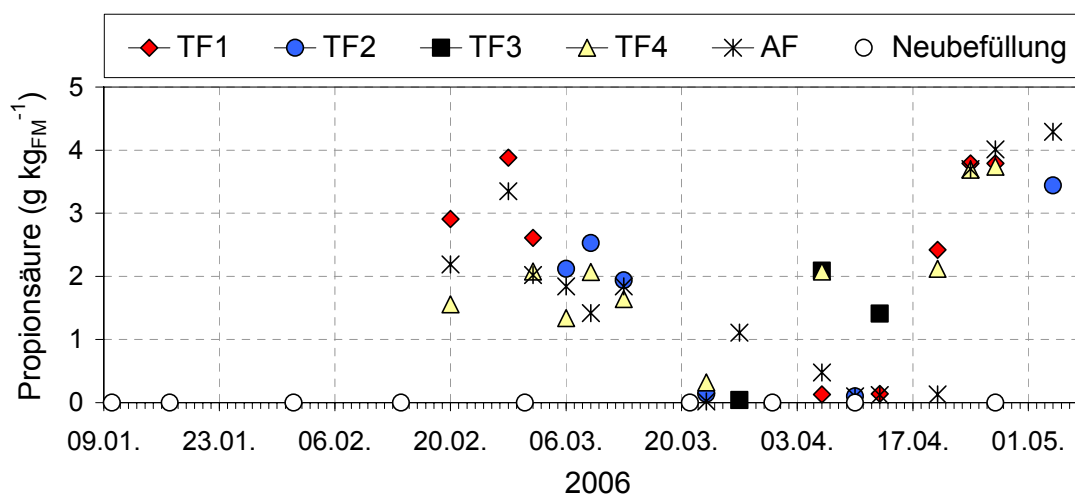


Abb. 31: Verlauf der Konzentrationen an Propionsäure in den Abläufen der Trockenfermenter (TF) und des Anaerobfilters (AF) im Großmaßstab während Zeitraum I

Hinsichtlich der ebenfalls ermittelten Parameter elektrische Leitfähigkeit und Ammoniumgehalt wurden mit Maximalwerten von $15,5 \text{ mS cm}^{-1}$ bzw. $1200 \text{ mg}_{\text{NH}_4\text{-N}} \text{ kg}_{\text{FM}}^{-1}$ keine kritischen Werte erreicht (Daten siehe Anhang **Abb. 69**). Da jedoch eine für beide Parameter zunehmende Tendenz zu erkennen ist, sollten diese Stoffeigenschaften auch im Regelbetrieb erfasst werden. Da aus den Kurvenverläufen der elektrischen Leitfähigkeit und des Ammoniumgehalts eine Korrelation beider Parameter abgeleitet werden kann, besteht die Aussicht, dass die alleinige Erfassung der aufwandsarm und automatisiert zu messenden Leitfähigkeit für die Prozessüberwachung ausreichend ist.

Eigenschaften des festen Gärrests im Zeitraum1

Im Vergleich zum kleintechnischen Versuch ist die Beprobung des Gärrests aus dem großtechnischen Trockenfermentern hinsichtlich der Repräsentativität mit einer größeren Unsicherheit belegt. Dies muss bei der Interpretation der 3 analysierten Gärrestproben berücksichtigt werden (**Tab. 7**).

Tab. 7: Stoffeigenschaften des festen Gärrests aus der großtechnischen Pilotanlage während Zeitraum1

Fermenter / Entnahmedatum	pH (-)	TS (%FM)	oTS (%TS)	NH ₄ -N (mg/kg _{FM})	N _{Kjel.} (g/kg _{FM})	XF (%TS)	FFS (g/kg _{FM})
TF2 20.02.06	8,64	15,68	75,77	682,7	5,28	20,10	1,13
TF3 13.03.06	9,15	17,25	68,16	1744,6	5,35	14,54	0,26
TF3 08.05.06	8,89	17,28	93,51	947,2	3,9	37,88	1,19

Trotz der Unsicherheit im Bezug auf die Repräsentativität lässt sich für den oTS-Gehalt der Probe vom 8.5.06 im Vergleich zu den Proben vom 20.2.06 und 13.3.06 eine signifikante Zunahme erkennen. Mit einem oTS-Anteil an der TS von 93,5 % wies die Gärrestprobe aus TF3 vom 8.5.06 fast noch den gleichen Wert auf wie in der frischen Triticale-GPS. Diese Beobachtung stimmt mit der bereits beschriebenen Prozessstörung in diesem Zeitraum überein.

Die Konzentrationen an Ammonium lagen in einem für den Biogasprozess üblichen Bereich (Wellinger et al. 1984). Da in erster Line nicht von Ammonium sonder von Ammoniak eine Hemmwirkung ausgeht und sich das Gleichgewicht mit zunehmenden pH-Wert in Richtung Ammoniak verschiebt, lässt sich aufgrund der sehr hohen pH-Werte der Gärreste eine lokale Hemmwirkung auf den Gärprozess jedoch nicht gänzlich ausschließen.

Gasbildung im Zeitraum2

Wie in Zeitraum1 wurde auch während Zeitraum2 die Gasbildung der Reaktoren getrennt erfasst. Aufgrund anhaltender Störungen im Bezug auf die Gaserfassung aus dem Anaerobfilter (s. a. Kap. 2.4.4.2) mussten die Daten für den Anaerobfilter jedoch gänzlich verworfen werden. Für die Kalkulation der Produktivität der Gesamtanlage wurde die durchschnittliche Produktivität des Anaerobfilters aus Zeitraum1 verwendet. Den zeitlichen Verlauf der Methanbildung aus den Trockenfermentern TF1-4 gibt **Abb. 32** wieder.

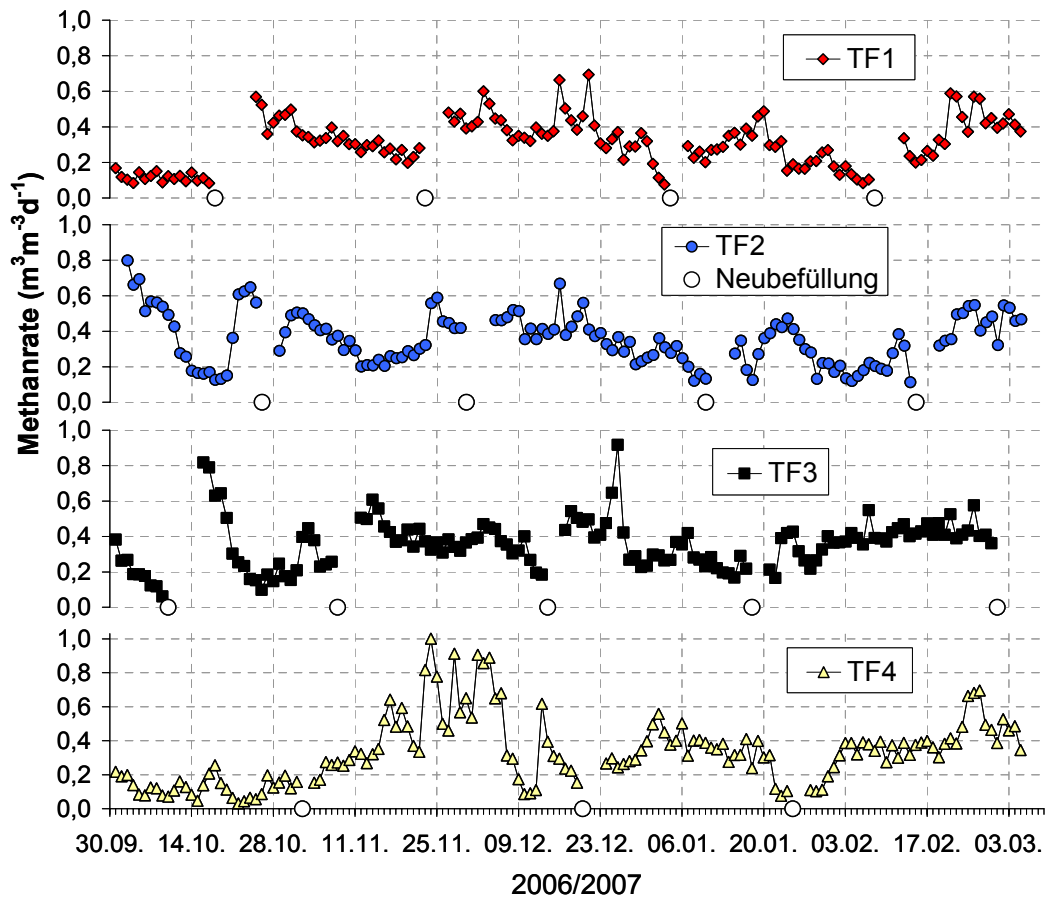


Abb. 32: Verlauf der volumenspezifischen Methanbildungsrate aus dem Anaerobfilter (AF) und den Trockenfermentern (TF) der großtechnischen Versuchsanlage während Zeitraum2

Im Vergleich zu Zeitraum1 gestaltete sich die Methanbildung der Trockenfermenter wesentlich einheitlicher. Dieses lässt sich auf den Einsatz von festem Impfmateriale zurückführen, wodurch Prozessstörungen vermieden wurden. Die durchschnittliche Methanrate der einzelnen Trockenfermenter lag bei $0,31 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ für TF2-4 und bei $0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ für TF1. Die stabile methanogenen Aktivität lässt sich auch anhand des zügigen Anstiegs der Methankonzentration erkennen (**Abb. 33**). Auch der Methangehalt aus dem im Anaerobfilter produzierten Biogas lag mit durchschnittlich 63 Vol.-% etwas höher als im Zeitraum1. Im Vergleich zum kleintechnischen Versuch, bei dem durchschnittlich 70°Vol.-% gemessen wurden, ist dies jedoch immer noch sehr gering. Der Verlauf der Konzentration an H_2S im Biogas der Trockenfermenter kann aus dem Anhang entnommen werden (**Abb. 74 bis Abb. 77**).

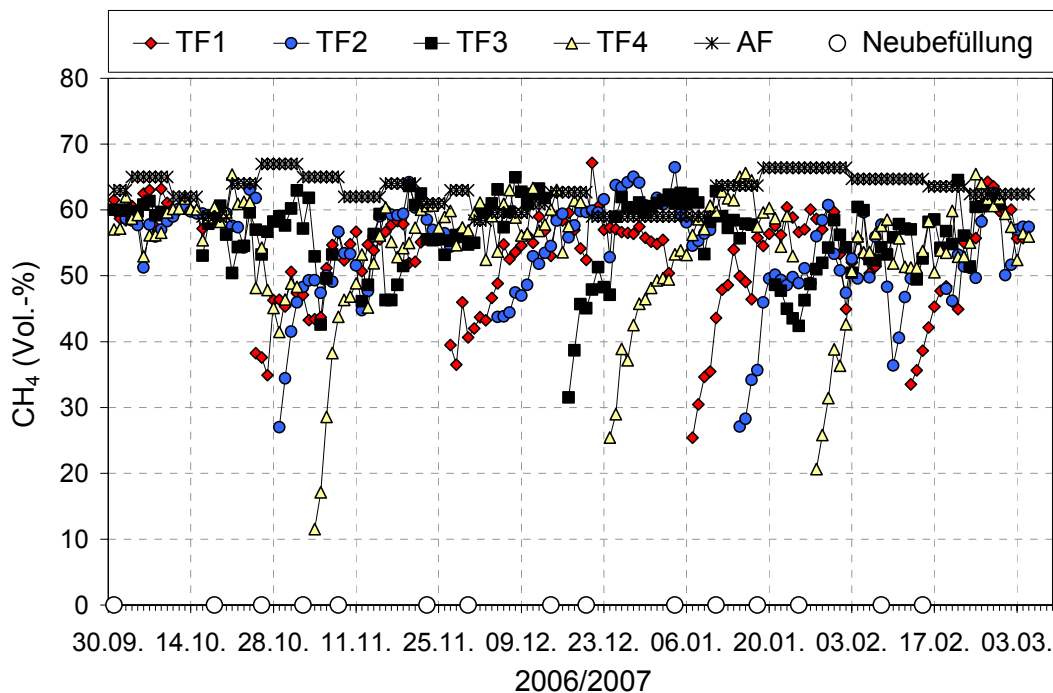


Abb. 33: Verlauf der pH-Werte in den Abläufen der Trockenfermenter (TF) und des Anaerobfilters (AF) im Großmaßstab während Zeitraum2

Aufgrund der nicht erfassten Gasbildung des Anaerobfilters lässt sich die Methanrate aus dem gesamten Bioleaching-System nicht exakt ermittelt. Eine Abschätzung durch die Veranschlagung der durchschnittlichen Produktivität des Anaerobfilters aus Zeitraum1 wird jedoch für möglich erachtet (**Abb. 41**).

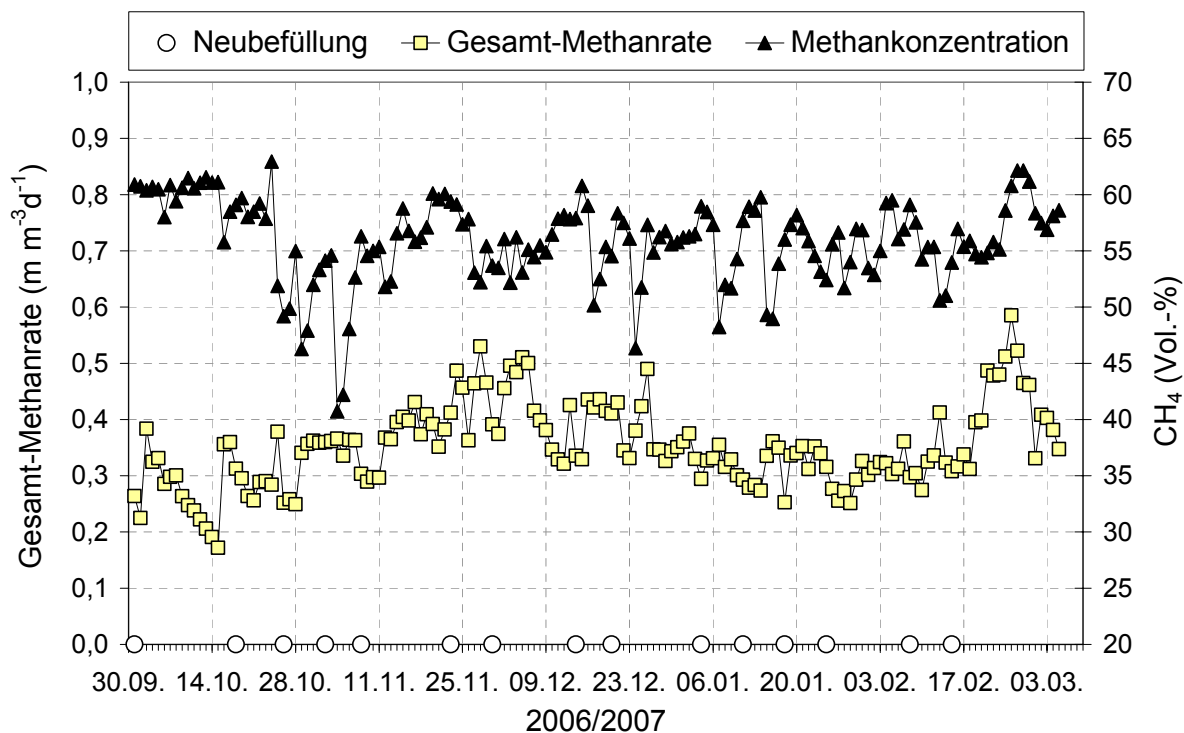


Abb. 34: Verlauf der Methanrate und der Methankonzentration aus dem großtechnischen Gesamtsystem während Zeitraum2; der Methanbildung des Anaerobfilters wurde aus Zeitraum1 gemittelt

Die durchschnittliche Methanproduktivität des Anaerobfilters aus Zeitraum1 beläuft sich auf $0,55 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$. Durch die stark idealisierte Annahme einer gleichmäßigen Methanrate des Anaerobfilters, ist der berechnete Verlauf der Gesamtrate flacher als in der Realität. Dennoch lässt sich, auch im Hinblick auf die weniger starken Schwankungen der Trockenfermenter-Produktivität, aus Abb. 41 eine gleichmäßigere Gasbildung ableiten als in Zeitraum1. Auf Basis dieser Berechnung ergibt sich als mittlere Methanbildungsrate des Gesamtsystems ein Wert von $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$. Gegenüber dem Zeitraum1 mit einer durchschnittlichen Methanrate von 0,29 stellt dies eine Erhöhung um 17 % dar. Im Bezug auf das im kleintechnischen Versuch ermittelte Potenzial von $1,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ist die damit erreichte Produktivität jedoch weiterhin sehr gering. Als Hauptursache hierfür wird der noch nicht optimal gestaltete Flüssigkeitsaustausch angenommen. Möglichkeiten zur Optimierung werden im Kap. 2.4.5 aufgeführt.

Prozesstemperaturen und Flüssigkeitseigenschaften im Zeitraum2

Die Prozesstemperaturen wurden während Zeitraum2 nur im Anaerobfilter gemessen. Diese bewegten sich durchweg im mesophilen Bereich (s. Anhang **Abb. 78**).

Im Gegensatz zu Zeitraum1 wurde im Zeitraum2 kein längeres Verweilen der pH-Werte im sauren Bereich festgestellt (**Abb. 35**). Dies gilt sowohl für die Ablaufflüssigkeit der Trockenfermenter als auch des Anaerobfilters. In Bezug auf die Ablaufflüssigkeit des Anaerobfilters ist über den gesamten Zeitraum eine ansteigende Tendenz des pH-Werts zu erkennen. Dies könnte auf eine zunehmende Akkumulation puffernder Substanzen, wie z.B. Ammonium hindeuten. Wie bereits für Zeitraum1 beschrieben, sollte die Akkumulation gelöster Stoffe aufgrund ihrer möglichen Hemmwirkung überwacht werden. Hierzu bietet sich die Messung der elektrischen Leitfähigkeit an.

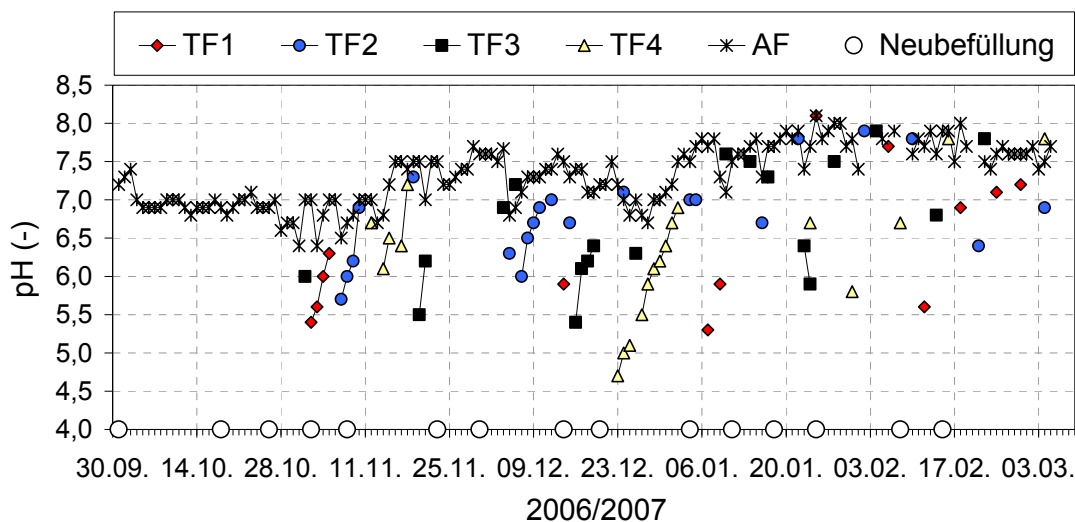


Abb. 35: Verlauf der pH-Werte im Ablauf der Trockenfermenter (TF) und des Anaerobfilters (AF) im Großmaßstab während Zeitraum2

Leistungsvergleich der Pilot- und kleintechnischen Anlage hinsichtlich Produktivität und Methanausbeute

Aufgrund des nicht vollständigen Datensatzes des Anaerobfilters mussten für die Ermittlung von Produktivität und Ausbeute einzelne Daten rechnerisch ermittelt werden sowie einige Annahmen getroffen werden.

Während die Methanbildung aus den Trockenfermentern annähernd lückenlos erfasst werden konnte, mit Ausnahme der ersten Tage nach einer Neubefüllung, in denen das Gas über die Überdrucksicherung abgelassen wurde, konnte, wie bereits beschrieben, die Gaserfassung des Anaerobfilters nicht durchgängig erfasst werden. Für den Zeitraum1 wurden die fehlenden Werte über Inter- bzw. Extrapolation ermittelt. Da während Zeitraum2 keine verwertbaren Messdaten zu erhalten waren, wurde die Methanbildung aus Zeitraum1 übernommen. Dabei wurde für jeden Tag im Zeitraum2 die Durchschnittsproduktivität aus Zeitraum1 von $0,55 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ veranschlagt.

Der oTS-Gehalt der im Zeitraum1 eingesetzten Triticale-GPS wurde zu zwei verschiedenen Zeitpunkten beprobt. Für alle Befüllungen in Zeitraum1 wurde der Mittelwert von 304 g kg^{-1} verwendet. Im Zeitraum2 wurde keine Substratanalyse durchgeführt. Für die Berechnung der oTS-Ausbeute aus den eingesetzten NawaRos, zu denen neben der Triticale-GPS auch geringe Mengen an Silo- und Frischmais gehörten, wurde eine durchschnittliche oTS-Konzentration der Frischmasse von 300 g kg^{-1} angenommen.

Die während Zeitraum1 und Zeitraum2 gemessenen Biogas- und Methanerträge sind in **Tab. 8** und **Tab. 9** dargestellt.

Tab. 8: Biogas- und Methanproduktion aus der Pilotanlage Clausnitz während Zeitraum1 vom 10.1.06 bis 3.5.06 mit 9 Befüllungen

Fermenter	Triticale-GPS (t FM)	Triticale-GPS (t oTS)	Biogasmenge (m ³)	CH ₄ -Menge (m ³)	CH ₄ (Vol.-%)
TF1	95	28,88	5875	3020	51,4
TF2	114	34,66	6453	3213	49,8
TF3	83	25,23	5680	2879	50,7
TF4	82	24,93	5457	2812	51,5
AF	-	-	12628	7543	59,7
Gesamt	374	113,7	36094	19467	53,9

Tab. 9: Biogas- und Methanproduktion aus der Pilotanlage Clausnitz während Zeitraum2 vom 1.10.06 bis 5.3.07 mit 15 Befüllungen

Fermenter	NawaRo (t FM)	Biogasmenge (m ³)	CH ₄ -Menge (m ³)	CH ₄ (Vol.-%)
TF1	112	10078	5108	50,7
TF2	112	11138	5884	52,8
TF3	97	10558	5803	55,0
TF4	89	11097	5864	52,8
AF	-	16418*	10296*	62,7
Gesamt	410	59288	32955	55,6

* CH₄-Bildung aus Zeitraum1 abgeleitet; Berechnung der Biogasausbeute unter Berücksichtigung der in Zeitraum2 gemessenen Methangehalte

Aus dem Substrateingang und den ermittelten Methanmengen lassen sich die Leistungsparameter des Bioleaching-Verfahrens im klein- und großtechnischen Maßstab bestimmen und gegenüber stellen (**Tab. 10**).

Tab. 10: Vergleich der Leistungsparameter des Bioleaching-Verfahrens im klein- und großtechnischen Maßstab, alle Angaben als Mittelwerte

Parameter	Einheit	kleintechn. Anlage			Pilotanlage, Zeitraum1 / Zeitraum2		
		TF	AF	ges.	TF	AF	ges.
FM-Anteil d. Impfmaterials	%	0	-	0	24 / 34	-	24 / 34
Feststoff-Verweilzeit	d	21	-	21	49 / 37	-	49 / 37
oTS-Raubelastung	kg m ⁻³ d ⁻¹	4,60	-	3,45	2,10 / 1,65*	-	1,68 / 1,32*
Methan-Produktivität	m ³ m ⁻³ d ⁻¹	0,45	2,69	1,01	0,22 / 0,30	0,55 / 0,55 ⁺	0,29 / 0,35 ⁺
Methan-Konzentration	Vol.-%	32,0	70,0	50,2	50,8 / 52,9	59,7 / 62,7	53,9 / 55,6
oTS-Methanausbeute	l kg ⁻¹	97	195	292	105 /	66 / 84*	171 / 268
Aufteilung d. Methanausbeute	%	33	67	100	61 / 69	39 / 31	100 / 100

⁺ CH₄-Bildung aus Zeitraum1 abgeleitet

* Annahme oTS/FM = 300 g kg⁻¹

Im Vergleich zu Zeitraum1 wurde in Zeitraum2 durch die Wiederaufnahme der regulären Zugabe an festem Impfmateriale eine höhere Methanproduktivität und -ausbeute erreicht. Gleichzeitig konnte die durchschnittliche Verweilzeit der Feststoffe von 49 auf 37 Tage reduziert werden. Im Vergleich zur kleintechnischen Versuchsanlage betrug die Verweildauer jedoch noch fast das Doppelte, während die Methanproduktivität mit 0,35 m³m⁻³d⁻¹ nur 1/3 der Leistung der Versuchsanlage erreichte. Näherungsweise in gleicher Größenordnung wie im kleintechnischen Versuch lag im Zeitraum2 die Methanausbeute von 268 m³kg⁻¹. Der Anteil des großtechnischen Anaerobfilters an der Methanausbeute nahm in Zeitraum2 aufgrund des höheren durchschnittlichen Impfmaterialeanteils in den Trockenfermentern von 39 auf 31 % ab. Dies stellt in etwa das umgekehrte Verhältnis dar wie im kleintechnischen Versuch, bei dem kein festes Impfmateriale verwendet wurde.

Bei der Betrachtung der Produktivität der einzelnen Prozessstufen, fällt vor allem der große Unterschied der Leistung des klein- und großtechnischen Anaerobfilters auf. Auch wenn die Gaserfassung am großtechnischen Anaerobfilter nur durchgängig funktionierte und daher eine Unsicherheit in Bezug auf die Durchschnittswerte besteht, so ist der Unterschied von 0,55 zu 2,69 m³m⁻³d⁻¹ doch deutlich genug, um hier eine Schwäche der großtechnischen Pilotanlage benennen zu können. Als Ursachen für die vergleichsweise geringe Leistungsfähigkeit des großtechnischen Anaerobfilters kommen insbesondere zwei Merkmale in Frage, zum einen die vergleichsweise geringe bakterielle Aufwuchsfläche und zum anderen der stoßweise Austausch der Prozessflüssigkeit. Da die spezifische Oberfläche der Füllkörper des großtechnischen Anaerobfilters mit 100 m² m⁻³ nur 1/3 des kleintechnischen Reaktors betrug, lässt sich für ersteren tatsächlich eine erheblich geringere Konzentration an Mikroorganismen vermuten. Der im Großmaßstab stoßweise durchgeführte Flüssigkeitsaustausch ergab insbesondere beim Austausch neubefüllter Trockenfermenter starke Schwankungen des pH-Werts, welches die Fermenterbiologie ungünstig beeinflusste.

2.4.5 Schlussfolgerungen aus der Erprobung des Bioleaching-Verfahrens

Nachdem sich die Nutzung von flüssigem Gärrest aus einer Nassfermentationsanlage zur Animpfung der Feststoffe in den Trockenfermentern der Pilotanlage Clausnitz als ungeeignet

herausstellte, wurde das alternative Verfahrenskonzept „Bioleaching“ erprobt. Bei diesem Verfahren wird eine niedrigviskose, wässrige Einstauflüssigkeit verwendet, die sich durch den Feststoffabbau weitgehend im Prozess selbst bildet. Wie die Ergebnisse der wissenschaftlichen Anlagenbegleitung zeigen, konnte die prinzipielle Eignung des Bioleaching-Verfahrens zur Vergärung von NawaRos nachgewiesen werden.

Wie jedoch aus dem Vergleich mit den Ergebnissen des kleintechnischen Versuchsstandes zum Bioleaching-Verfahren hervorgeht, ist die Pilotanlage noch weit von der potentiellen Leistungsfähigkeit entfernt. So lagen die oTS-Raubelastung und die Methanbildungsrate nur zwischen 30 und 50 % der im kleintechnischen Versuch erreichten Leistung. Die im Zeitraum² der großtechnischen Anlagenerprobung ermittelten Durchschnittswerte für die oTS-Raubelastung des Gesamtsystems von $1,32 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ und die Methanrate des Gesamtsystems von $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ erreichten auch nicht die für die Fermentation von NawaRos in Nassfermentationsanlagen üblichen Bereiche (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2005). Die prinzipielle Funktionsfähigkeit des Bioleaching-Verfahrens an der Pilotanlage Clausnitz zeigt die Methanausbeute im Zeitraum², die mit 268 l kg^{-1} in ähnlicher Höhe lag wie im kleintechnischen Versuch.

Beim Vergleich der für die Pilotanlage Clausnitz ermittelten Leistungsparameter mit veröffentlichten Leistungsdaten einer weiteren großtechnischen Biogasanlage mit Bioleaching-Charakteristik (Linke et al. 2006) liegt die Pilotanlage Clausnitz ebenfalls deutlich zurück. Bei diesem von der Firma LOOCK-Biogassysteme entwickelten sog. Trocken-Nass-Simultan (TNS-) Verfahren wird die Prozessflüssigkeit ebenfalls über einen methanbildenden Nassreaktor zirkuliert, wobei die Trockenfermenter nicht aufwärtsgerichtet durchströmt sondern die Feststoffe von oben berieselt werden (Perkolation). Bei diesem Verfahren wurde eine durchschnittliche oTS-Raubelastung der Gesamtanlage von 4,0 gemessen, während die Methanproduktivität des Systems im Mittel $1,2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ erreichte. Die oTS-Ausbeute der in dieser Anlage eingesetzten Maissilage wurde mit 340 l kg^{-1} bestimmt. Diese Leistungsdaten bestätigen die Ergebnisse aus den kleintechnischen Versuchen zum Einstauverfahren und zeigen dadurch, dass diese Werte durch Optimierungsmaßnahmen auch bei der großtechnischen Anwendung des Einstauverfahrens zu erreichen sind.

Hinsichtlich der anlagentechnischen Gestaltung sowie der Betriebsweise der Pilotanlage Clausnitz sind eine Reihe von Optimierungsmaßnahmen zu empfehlen, mit dem Ziel die Leistungsfähigkeit sowie die Betriebssicherheit zu erhöhen. Wie sich bei der Anlagenerprobung herausstellte, sind die Tore der Trockenfermenter eine erhebliche Schwachstelle des Systems. Durch die Belastung durch den hydrostatischen Druck und den Pumpendruck besteht die Gefahr der Verformung und des Auftreten von Undichtigkeiten. Günstiger wäre eine technische Lösung mit Innenanschlag, bei der der anliegende Druck das Tor nicht weg von der Dichtung sondern an diese herandrückt. Da, wie sich herausstellte, für die Beheizung der Trockenfermenter auf mesophile Temperaturen die Wärmeübertragung durch die Prozessflüssigkeit ausreicht, kann bei zukünftigen Anlagen auf eine separate Beheizung der Trockenfermenter verzichtet werden. Durch die Befüllweise der Trockenfermenter von oben muss die abdichtende Folie für jede Neubefüllung abgenommen werden. Vereinzelt war zu erkennen, dass beim Wiederaufziehen der Folie durch Faltenbildung Undichtigkeiten auftraten. Um neben dem verwendeten Seeger-Verschluss eine zusätzliche Abdichtung zu erzielen, wäre für zukünftige Anlage die Möglichkeit der Integration einer Wassertasse zu prüfen.

Als wesentliche Ursache für die geringe Leistungsfähigkeit der Pilotanlage Clausnitz konnte auf Basis der Untersuchungsergebnisse die nicht optimale Gestaltung der Flüssigkeitsregeneration ermittelt werden. Zum einen ist die im Anaerobfilter zurückgehaltene bakterielle Bio-

masse vermutlich nicht annähernd so hoch wie im kleintechnischen Anaerobfilter zum anderen wird durch den stoßweisen Flüssigkeitsaustausch die Fermenterbiologie beeinträchtigt. Um die methanogene Biomasse im System kurzfristig zu erhöhen, wird empfohlen eine der vier Trockenfermenterboxen als zusätzlichen Methanreaktor zu gestalten. Dieser könnte ohne weitere Installation als Schlammbedtreaktor eingesetzt werden oder durch die Verwendung von Füllkörpern als zweiter Anaerobfilter gestaltet werden. Um die Besiedlungsfläche im Vergleich zum bestehenden Anaerobfilter zu erhöhen, würde sich das Einbringen eines kostengünstigen biogenen Aufwuchsträger anbieten. Hierzu würde z.B. das in der Agrarregion Bergland produzierte Flachsstroh in Frage kommen. Um eine Verstopfen der Poren zu vermeiden, ist dabei in regelmäßigen Abständen eine Teilerneuerung des Strohs vorzunehmen. Die Verwendung von Stroh als bakteriellen Aufwuchsträger im Bioleaching-System wurde bereits von Svensson et al. (2006) beschrieben. In Bezug auf den Flüssigkeitsaustausch wäre eine Umstellung von einer Einmalgabe pro Tag auf eine möglichst kontinuierliche Zudosierung zu überlegen. Hierdurch ließe sich die volle Leistungsfähigkeit der Methanstufe ausnutzen. Darüber hinaus kann auch eine Leistungssteigerung des Feststoffabbaus erwartet werden, da auch die mittlere Säurekonzentration des Trockenfermenters abgesenkt wird und so eine Produkthemmung vermieden wird. Zusätzlich würde durch eine sehr langsame Austauschrate die auf eine Neubefüllung folgende physikalische CO₂-Freisetzung auf einen längeren Zeitraum verteilt werden, so dass Probleme in Bezug auf das BHKW vermieden werden und weniger Methan verloren geht.

Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit besteht in der automatisierten Prozesssteuerung. Bislang wird der Austausch der Prozessflüssigkeit im Wesentlichen durch die manuelle Messung des pH-Wertes der Ablaufflüssigkeiten gesteuert. Durch eine automatisierte pH-Messung der Ablaufflüssigkeiten kann der Prozess wesentlich exakter gesteuert werden, so dass die Leistungskapazitäten stets im vollen Umfang ausgenutzt werden können. Neben dem pH-Wert als wichtigste Steuergröße des Prozesses bietet sich auch die regelmäßige Messung der elektrischen Leitfähigkeit an. Dieses hat zum Ziel eine Akkumulation anorganischer Salze rechtzeitig zu erkennen und vor dem Erreichen einer Hemmkonzentration einen teilweisen Austausch der Prozessflüssigkeit gegen Wasser durchzuführen.

Aufgrund des noch nicht erreichten Regelbetriebs der Pilotanlage Clausnitz konnte im Rahmen der wissenschaftlichen Begeleitung durch das ATB keine Wirtschaftlichkeitsbewertung durchgeführt werden. Da diese Bewertung essentiell für die mögliche Weiterverbreitung des Verfahrens ist, wird empfohlen dieses zu einem geeigneten Zeitpunkt nachzuholen. Hierzu bietet das ATB im Rahmen seiner Möglichkeiten eine Mitarbeit an.

2.5 Anhang zu den Ergebnissen

Tab. 11: Analysemethoden

Parameter	Kürzel	Methode
Ammoniumstickstoff (total)	TAN	titrimetrisch nach Überführung als NH ₃
Buttersäure (iso-, n-)	iBS, nBS	gaschromatographisch mit GC/FID
Capronsäure	CS	gaschromatographisch mit GC/FID
elektrische Leitfähigkeit	LF	mit LF-Sensor
Essigsäure	ES	gaschromatographisch mit GC/FID
flüchtige Fettsäuren	FFS	gaschromatographisch, Summe C ₂ - bis C ₆ -Säure
Kjeldahl-Stickstoff	N _{Kjel.}	titrimetrisch nach Kjeldahl-Aufschluss
Kohlenstoff	C	elementaranalytisch
Milchsäure	MS	mit HPLC
pH-Wert	pH	mit pH-Sensor
Propionsäure	PS	gaschromatographisch mit GC/FID
Rohfaser	XF	gravimetrisch nach Säure- u. Laugenbehandlung
Schwefel	S	elementaranalytisch
Stickstoff	N	elementaranalytisch
Trockensubstanz	TS	gravimetrisch nach Trocknung bei 105 C
organische Trockensubstanz	oTS	gravimetrisch nach Veraschung bei 550°C
Valeriansäure (iso-, n-)	iVS, nVS	gaschromatographisch mit GC/FID

Tab. 12: Stoffkennzahlen der im kleintechnischen Versuch eingesetzten Triticale-GPS

Reaktor/ Befülldatum	pH (-)	LF (mS/cm)	TS (%FM)	oTS (%TS)	NH ₄ -N (mg/kg _{FM})	N _{Kjel.} (g/kg _{FM})	XF (%TS)	MS (g/kg _{FM})	FFS (g/kg _{FM})
TF4 06.12.05	3,46	1,80	30,8	94,6			30,98	9,54	10,45
TF2 13.12.05	3,16	1,96	32,4	95,3	404,4				4,91
TF3 20.12.05	3,66		33,1	95,8	398,2	3,65	27,82		1,92
TF4 28.12.05	3,14	1,85	33,0	95,3	353,5		29,13		
TF2 03.01.06	3,24		33,1	95,3					
TF3 10.01.06	3,34	1,33	26,4	95,9	391,5	3,77			7,94

Tab. 13: Stoffkennzahlen der in der Pilotanlage im Zeitraum1 eingesetzten Triticale-GPS

Probenahme- datum	pH (-)	LF (mS/cm)	TS (%FM)	oTS (%TS)	NH ₄ -N (mg/kg _{FM})	N _{Kjel.} (g/kg _{FM})	XF (%TS)	FFS (g/kg _{FM})
09.01.06	3,34	1,33	26,4	95,9	391,5	3,77		7,94
13.02.06	3,98	1,68	37,4	94,8	624,0	5,97	24,3	

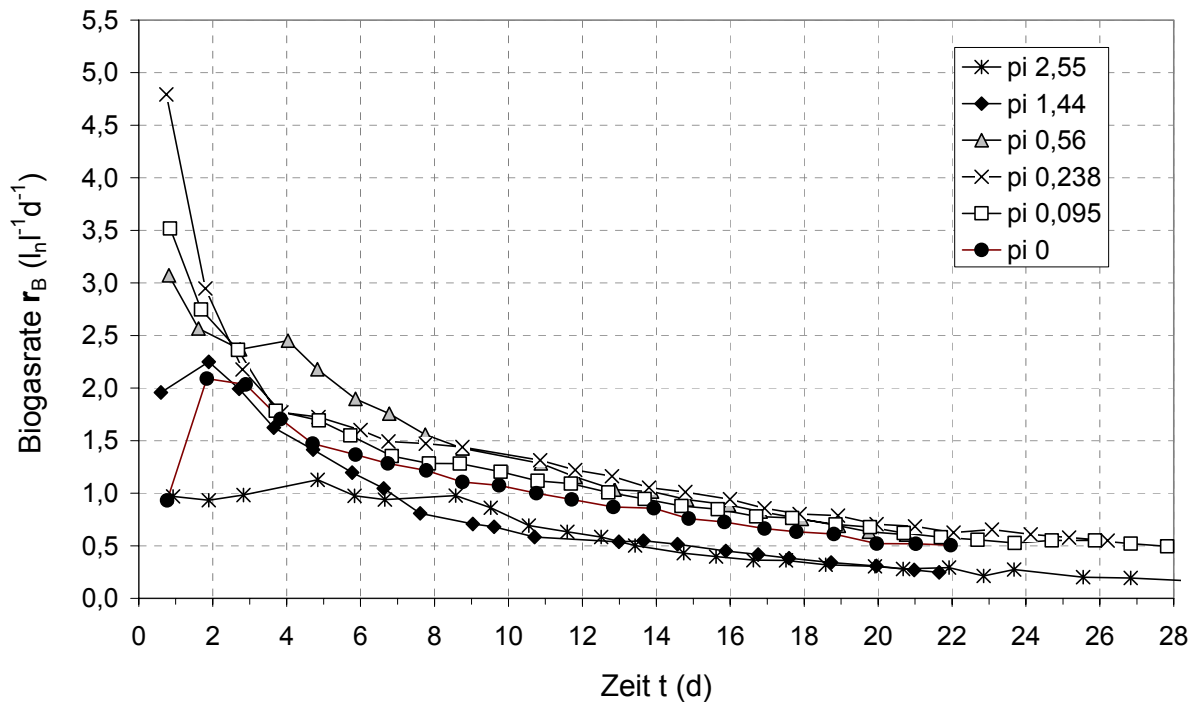


Abb. 36: Verlauf der volumenspezifischen Biogasrate aus dem Trockenfermenter bei unterschiedlichen Impfmateral-Substrat-Verhältnissen (p_i)

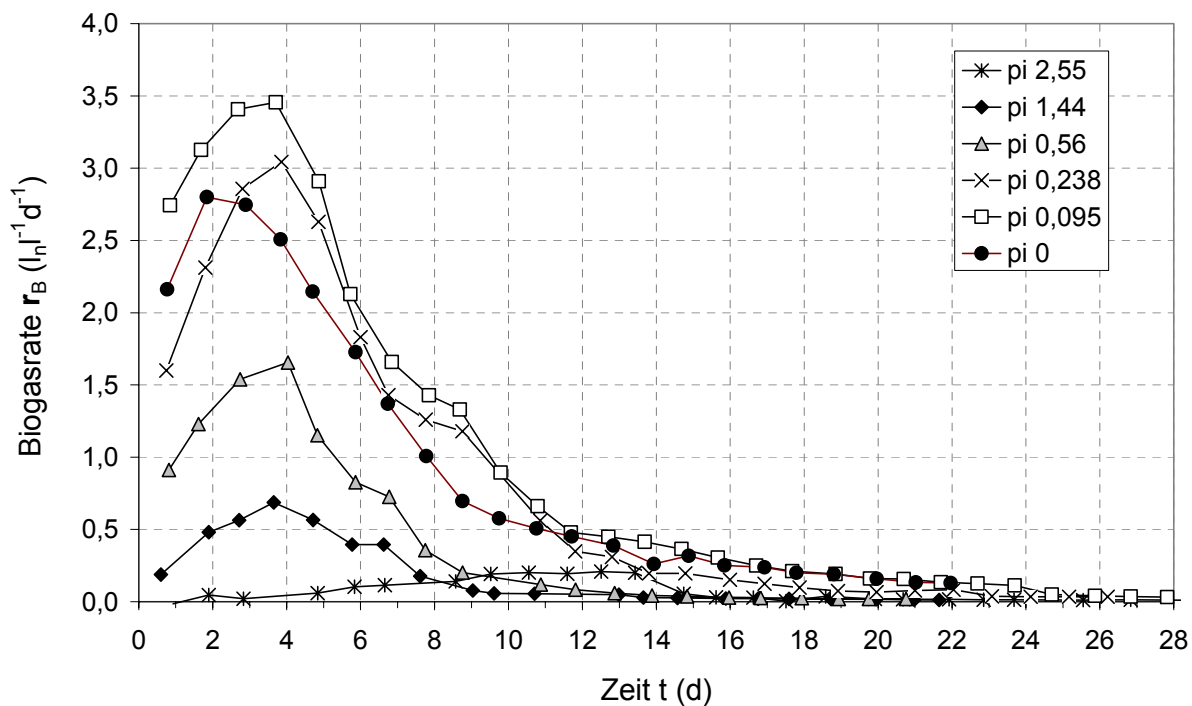


Abb. 37: Verlauf der volumenspezifischen Biogasrate aus dem Anaerobfilter bei unterschiedlichen Impfmateral-Substrat-Verhältnissen (p_i)

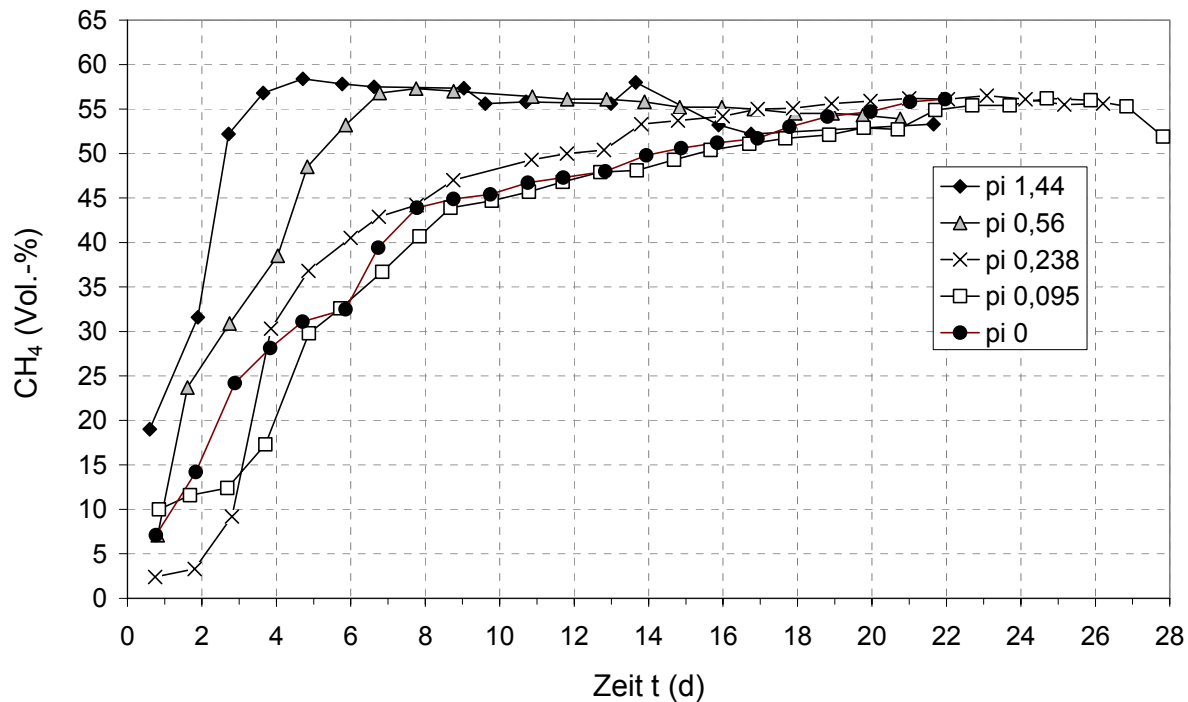


Abb. 38: Verlauf des Methangehaltes des im Trockenfermenter gebildeten Biogases bei unterschiedlichen Impfmateral-Substrat-Verhältnissen (p_i)

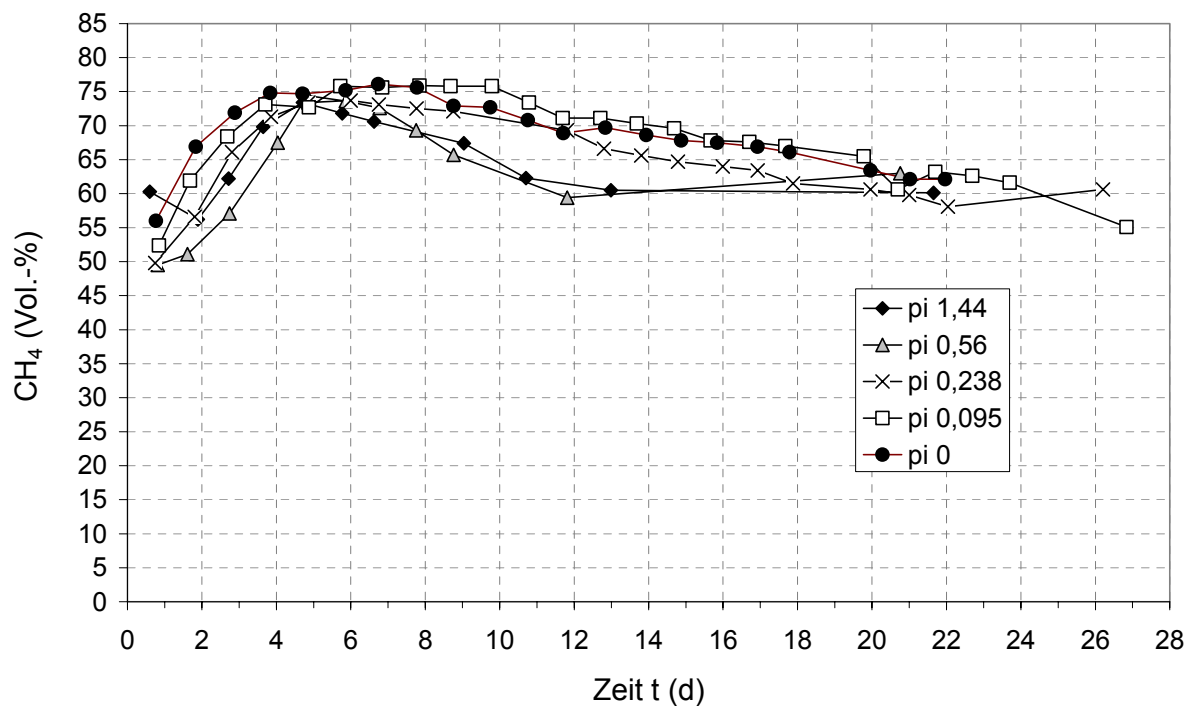


Abb. 39: Verlauf des Methangehaltes des im Trockenfermenter gebildeten Biogases bei unterschiedlichen Impfmateral-Substrat-Verhältnissen (p_i)

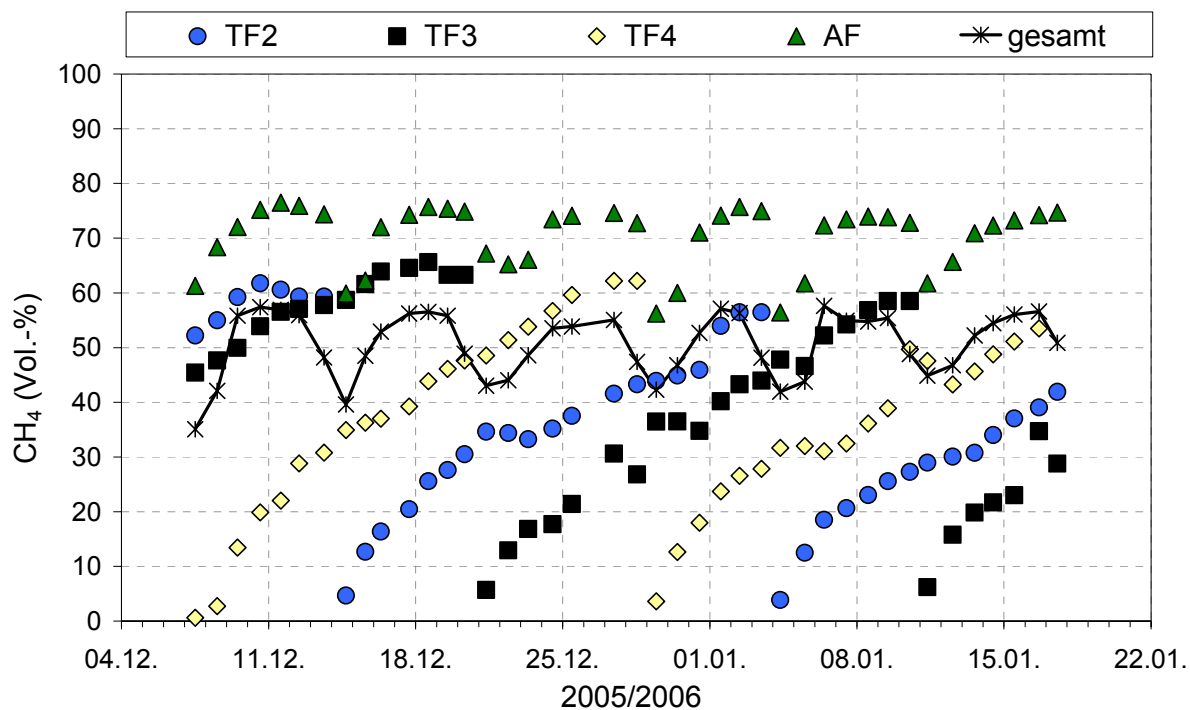


Abb. 40: Methankonzentrationen aus dem Regelbetrieb der kleintechnischen Versuchsanlage

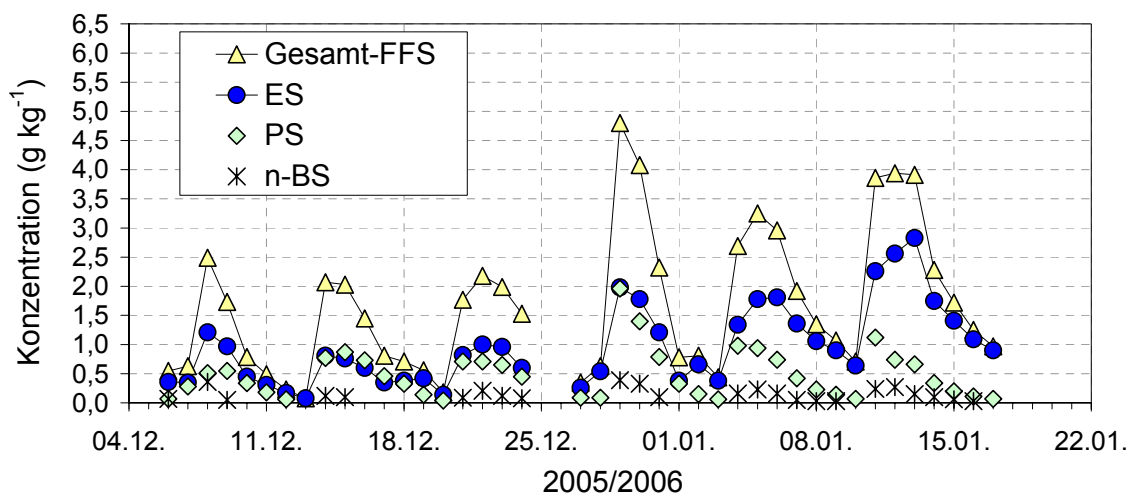


Abb. 41: Verlauf der Konzentrationen an flüchtigen Fettsäuren (Gesamt-FFS), Essigsäure (ES), Propionsäure (PS) und n-Buttersäure (n-BS) im Ablauf vom kleintechnischen Anaerobfilter

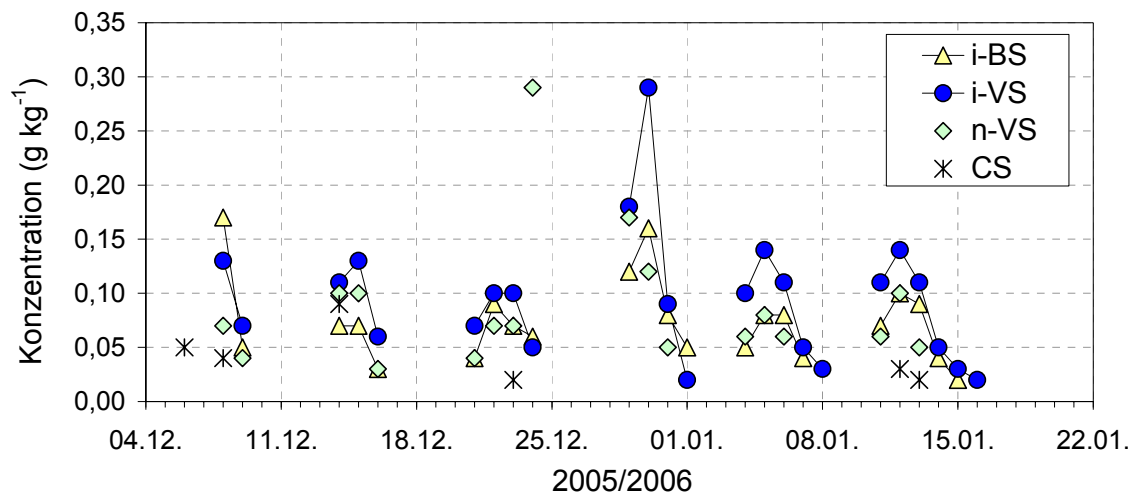


Abb. 42: Verlauf der Konzentrationen an iso-Buttersäure (i-BS), iso-Valeriansäure (i-VS), n-Valeriansäure (n-VS) und Capronsäure (CS) im Ablauf vom kleintechnischen Anaerobfilter

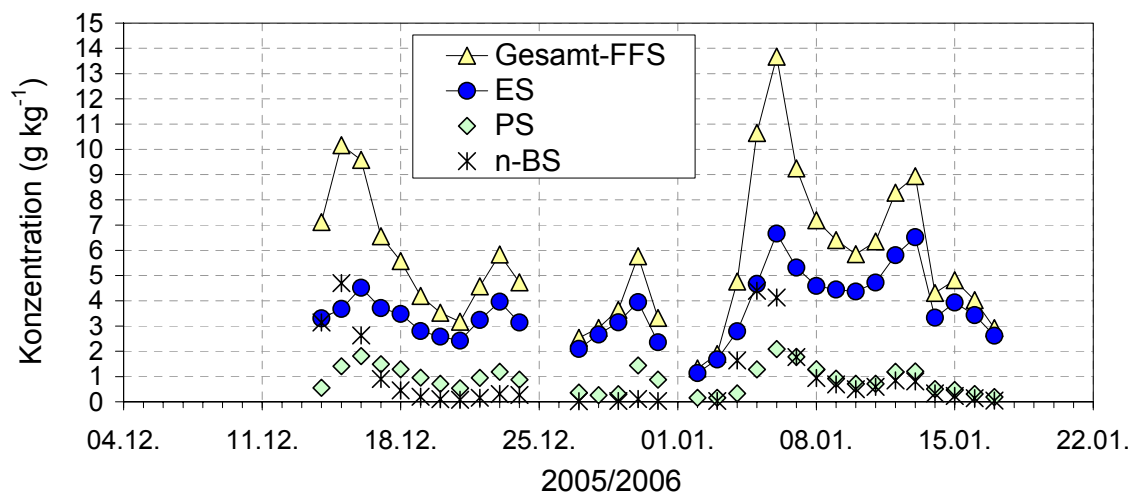


Abb. 43: Verlauf der Konzentrationen an flüchtigen Fettsäuren (Gesamt-FFS), Essigsäure (ES), Propionsäure (PS) und n-Buttersäure (n-BS) im Ablauf vom kleintechnischen Trockenfermenter TF2

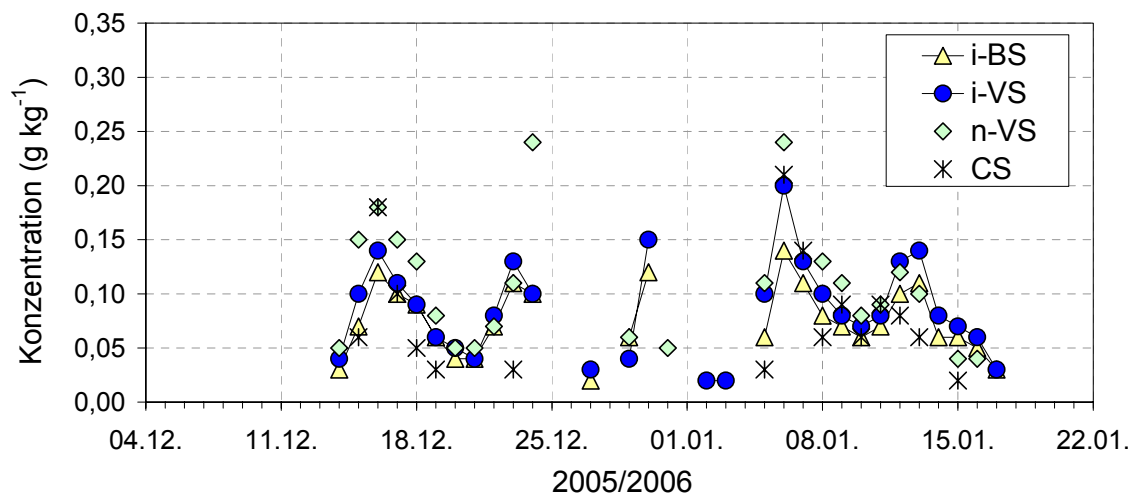


Abb. 44: Verlauf der Konzentrationen an iso-Buttersäure (i-BS), iso-Valeriansäure (i-VS), n-Valeriansäure (n-VS) und Capronsäure (CS) im Ablauf vom kleintechnischen Trockenfermenter TF2

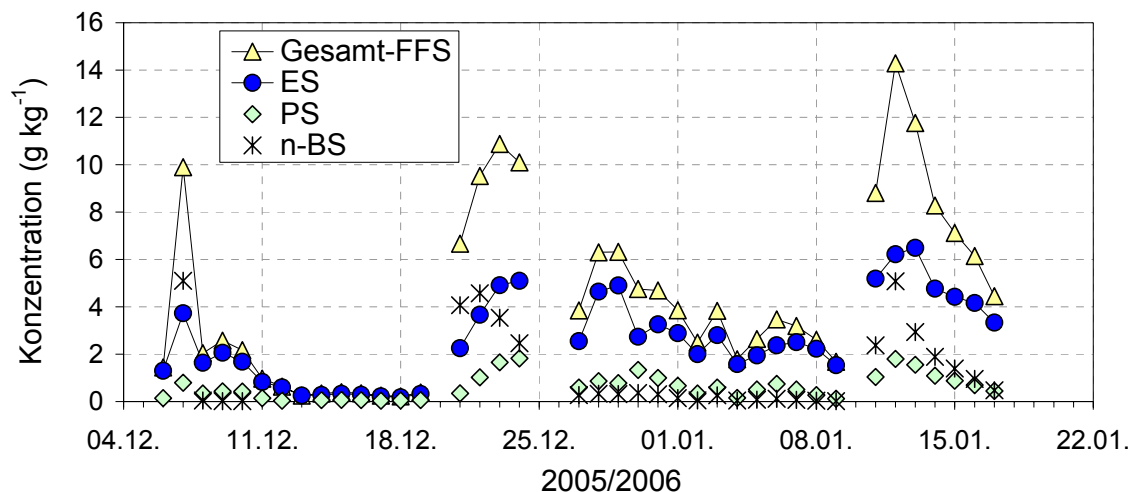


Abb. 45: Verlauf der Konzentrationen an flüchtigen Fettsäuren (Gesamt-FFS), Essigsäure (ES), Propionsäure (PS) und n-Buttersäure (n-BS) im Ablauf vom kleintechnischen Trockenfermenter TF3

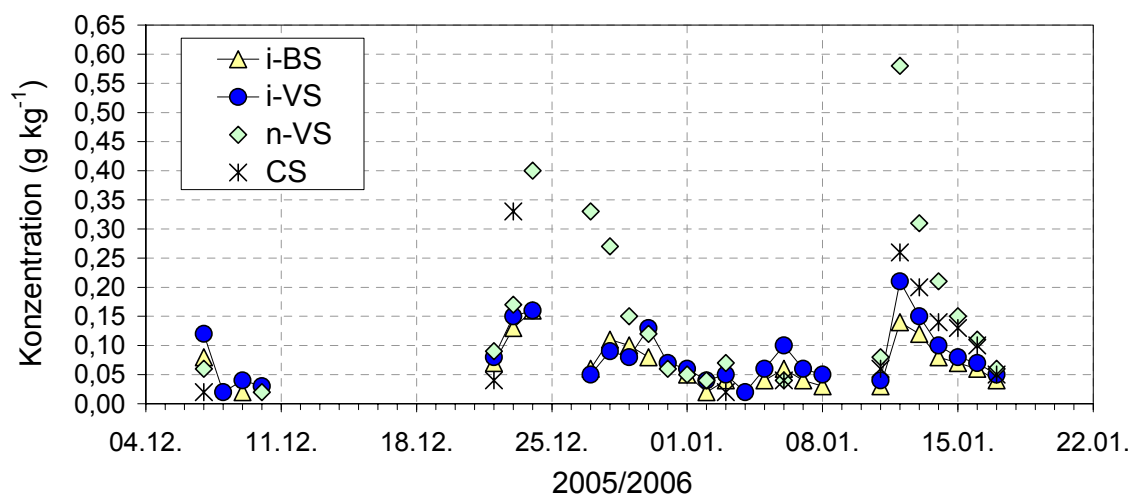


Abb. 46: Verlauf der Konzentrationen an iso-Buttersäure (i-BS), iso-Valeriansäure (i-VS), n-Valeriansäure (n-VS) und Capronsäure (CS) im Ablauf vom kleintechnischen Trockenfermenter TF3

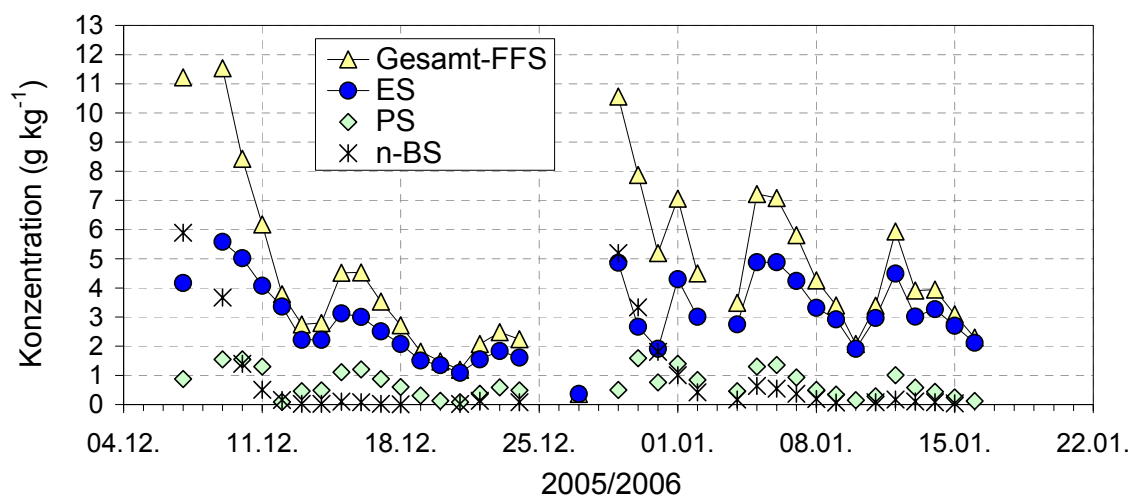


Abb. 47: Verlauf der Konzentrationen an flüchtigen Fettsäuren (Gesamt-FFS), Essigsäure (ES), Propionsäure (PS) und n-Buttersäure (n-BS) im Ablauf vom kleintechnischen Trockenfermenter TF4

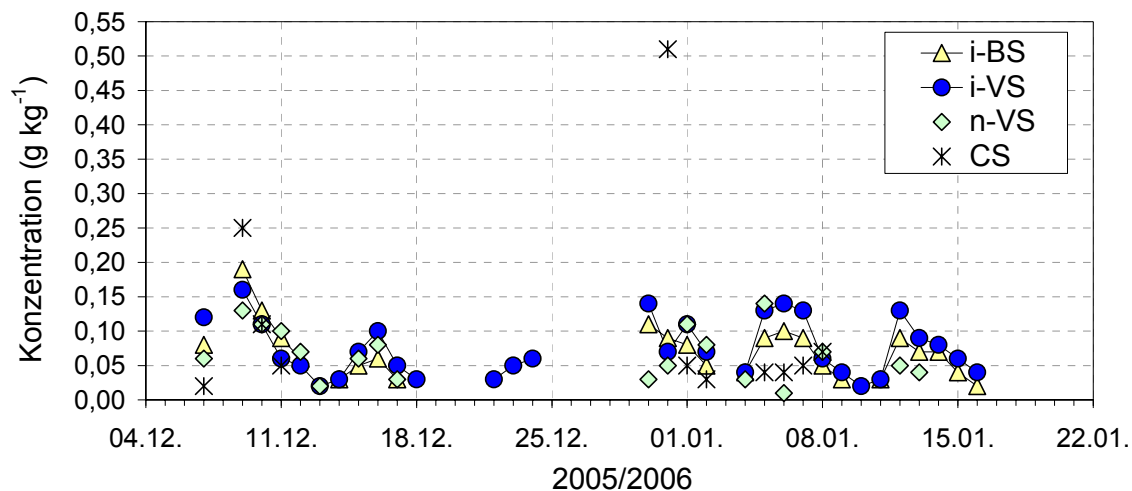


Abb. 48: Verlauf der Konzentrationen an iso-Buttersäure (i-BS), iso-Valeriansäure (i-VS), n-Valeriansäure (n-VS) und Capronsäure (CS) im Ablauf vom kleintechnischen Trockenfermenter TF4

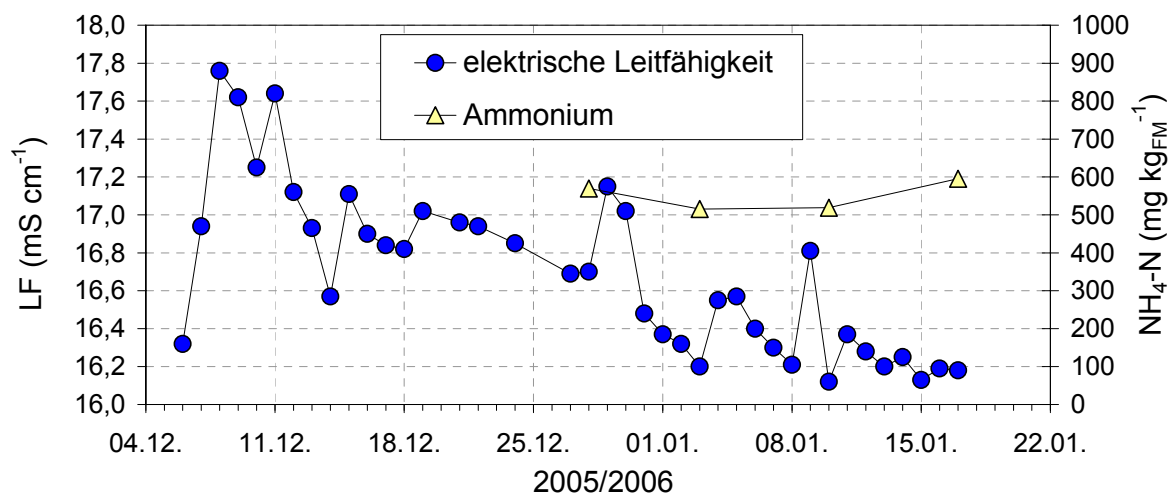


Abb. 49: Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit (LF) sowie der Ammoniumkonzentration in der Einstauflüssigkeit der kleintechnischen Versuchsanlage

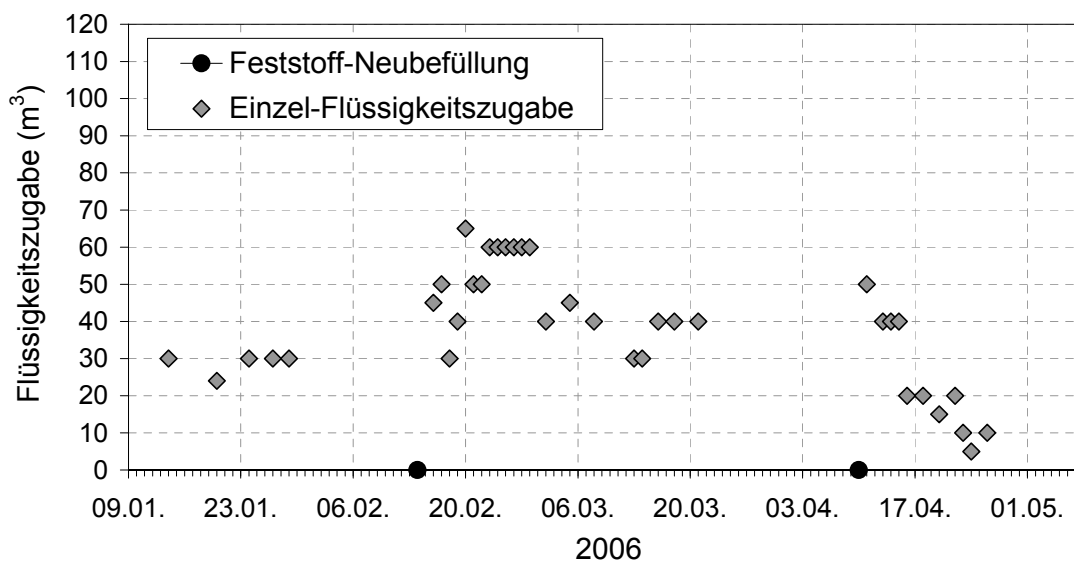


Abb. 50: Einzel-Zugaben an Prozessflüssigkeit in den großtechnischen Trockenfermenter TF1 während Zeitraum I

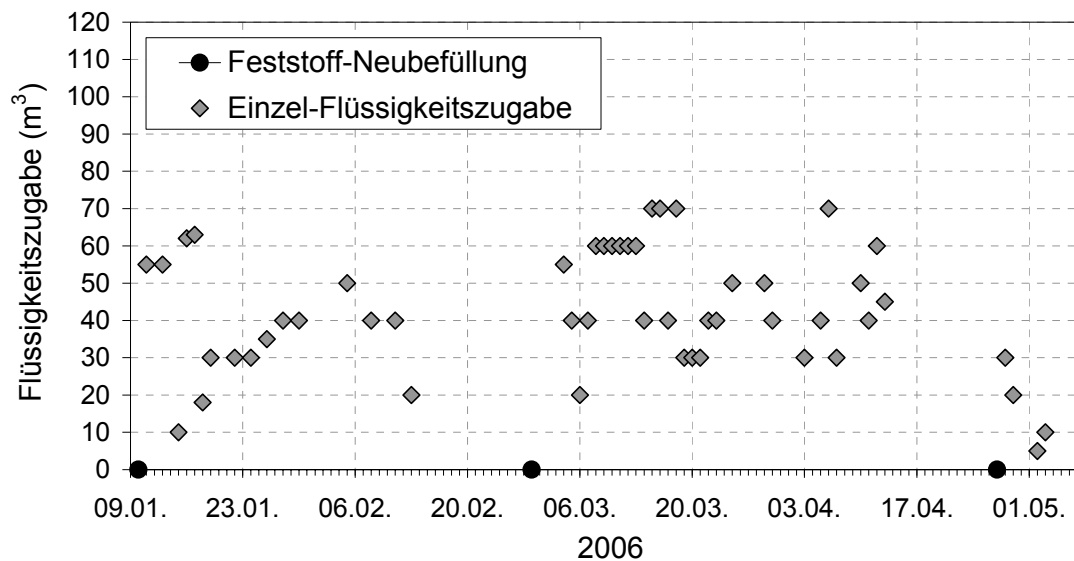


Abb. 51: Einzel-Zugaben an Prozessflüssigkeit in den großtechnischen Trockenfermenter TF2 während Zeitraum I

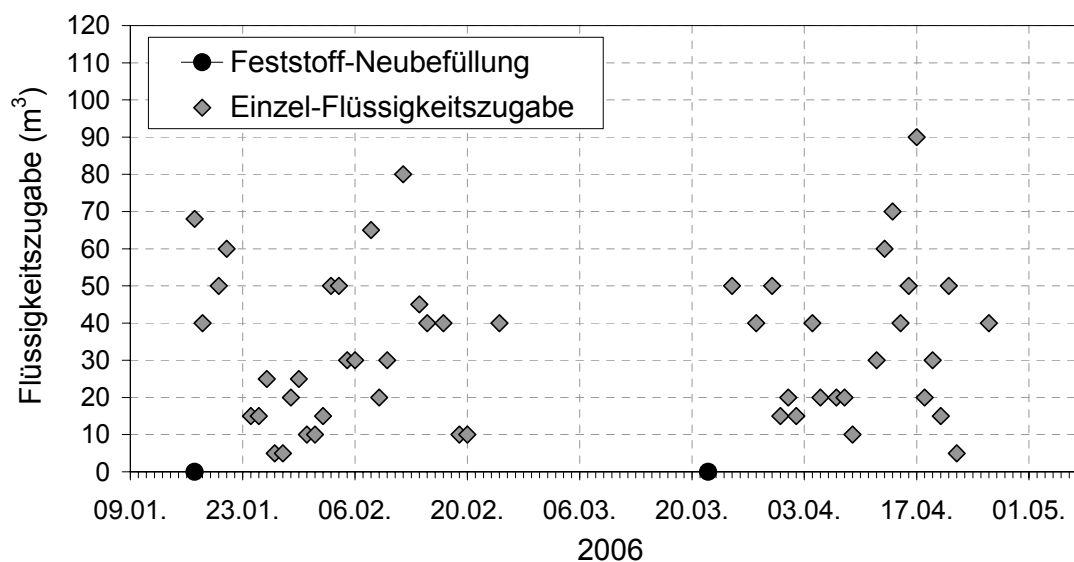


Abb. 52: Einzel-Zugaben an Prozessflüssigkeit in den großtechnischen Trockenfermenter TF3 während Zeitraum I

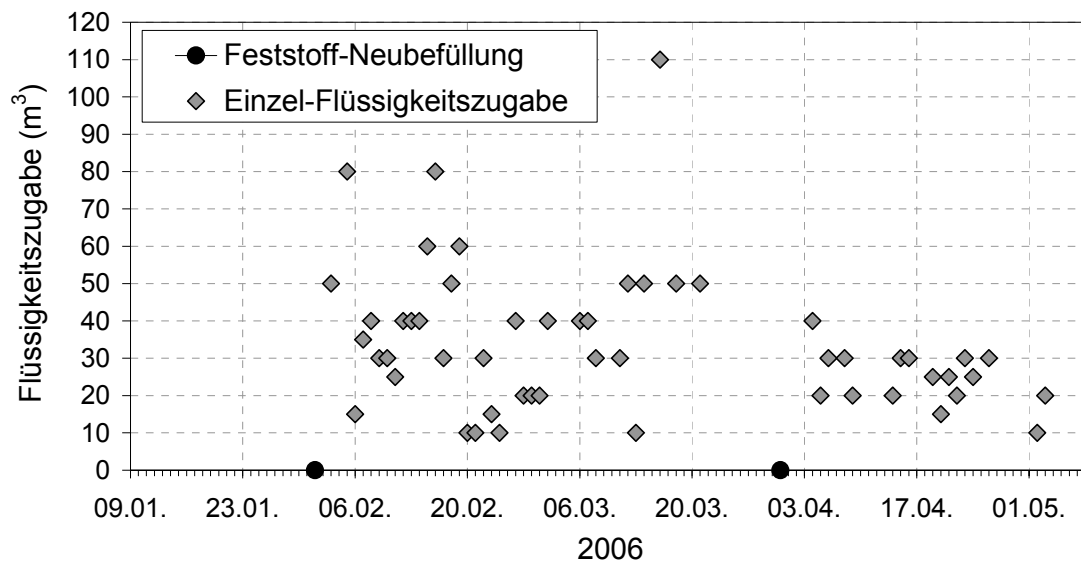


Abb. 53: Einzel-Zugaben an Prozessflüssigkeit in den großtechnischen Trockenfermenter TF4 während Zeitraum I

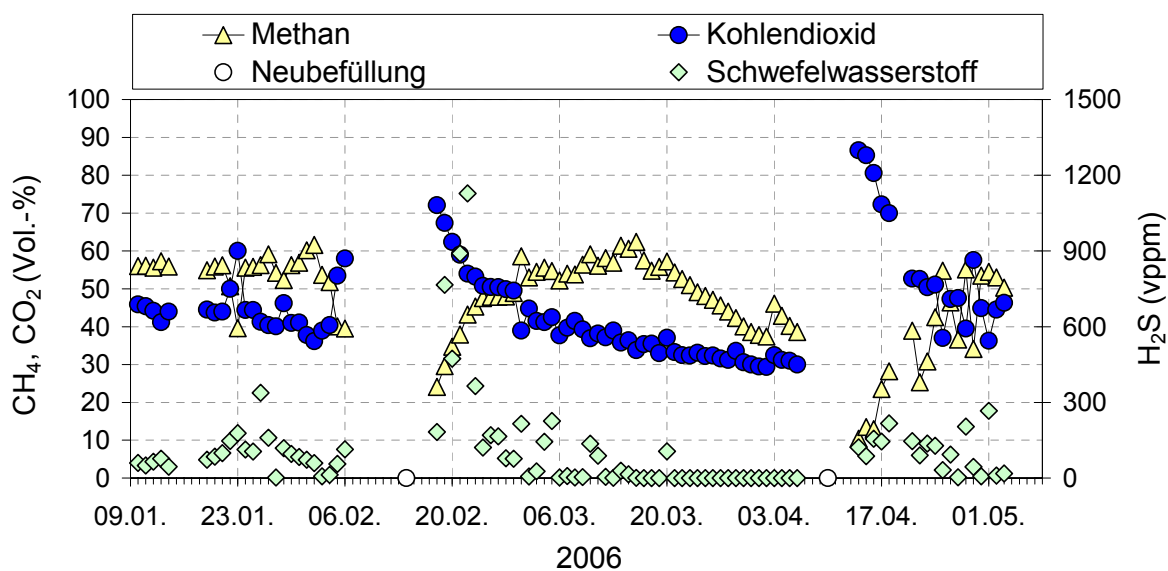


Abb. 54: Verlauf der Gaszusammensetzung aus dem großtechnischen Trockenfermenter TF1 während Zeitraum I

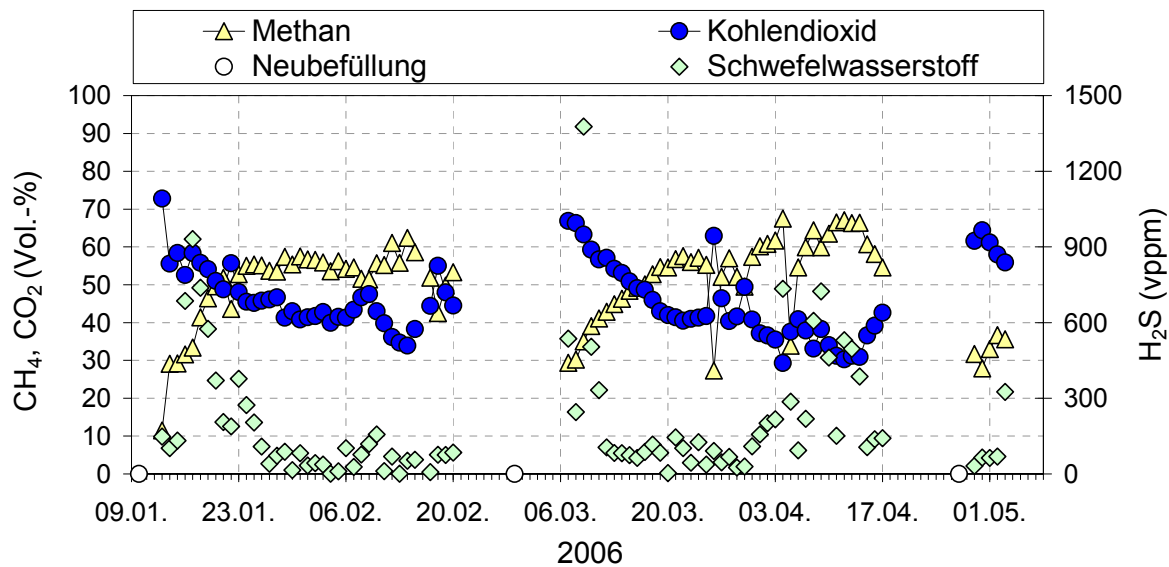


Abb. 55: Verlauf der Gaszusammensetzung aus dem großtechnischen Trockenfermenter TF2 während Zeitraum I

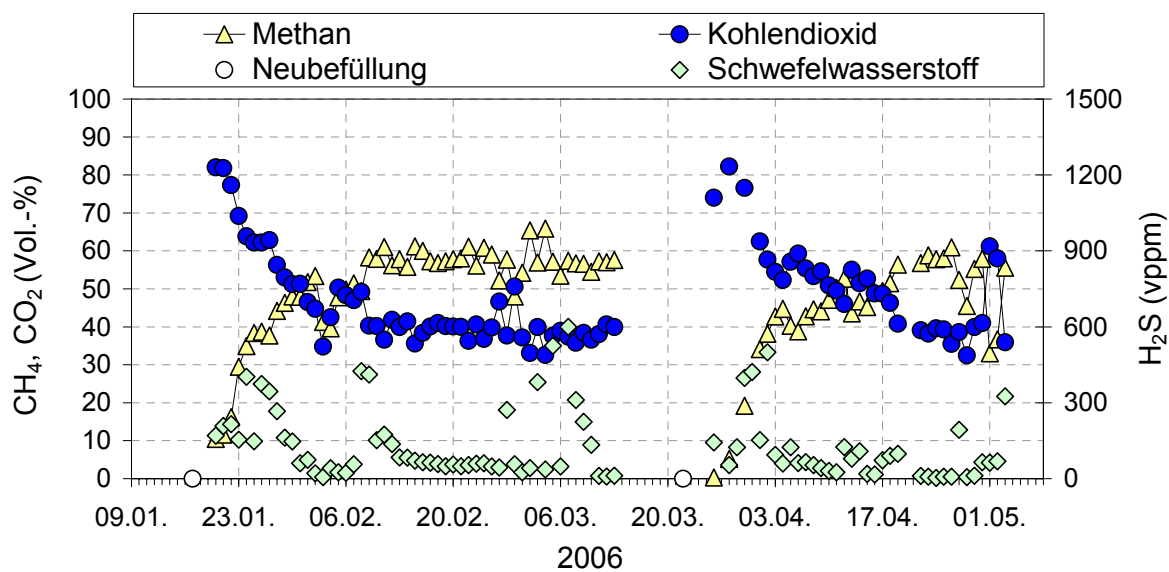


Abb. 56: Verlauf der Gaszusammensetzung aus dem großtechnischen Trockenfermenter TF3 während Zeitraum I

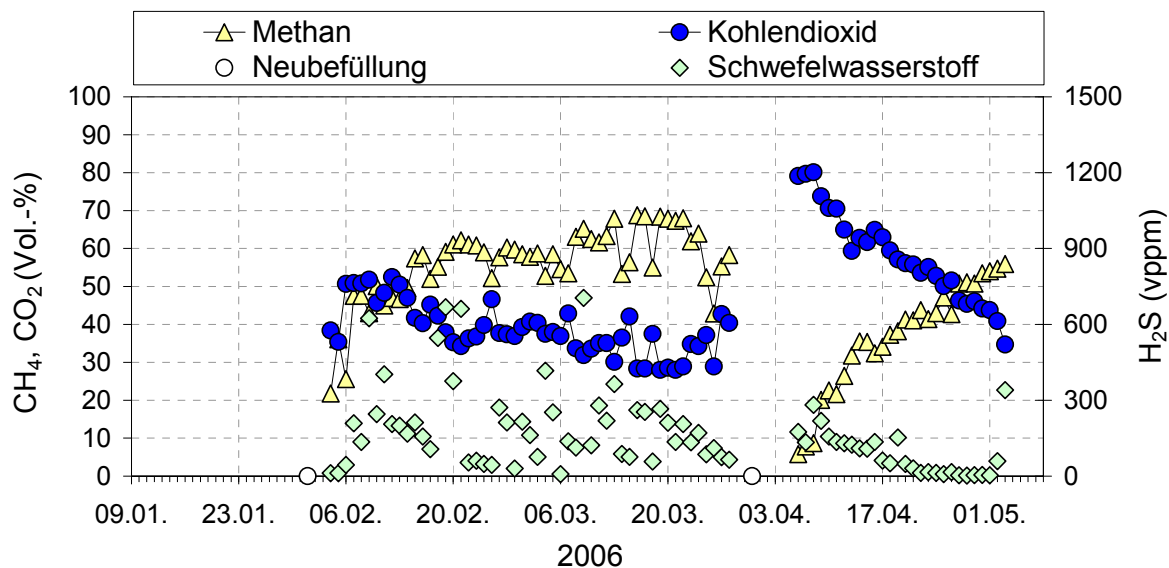


Abb. 57: Verlauf der Gaszusammensetzung aus dem großtechnischen Trockenfermenter TF4 während Zeitraum I

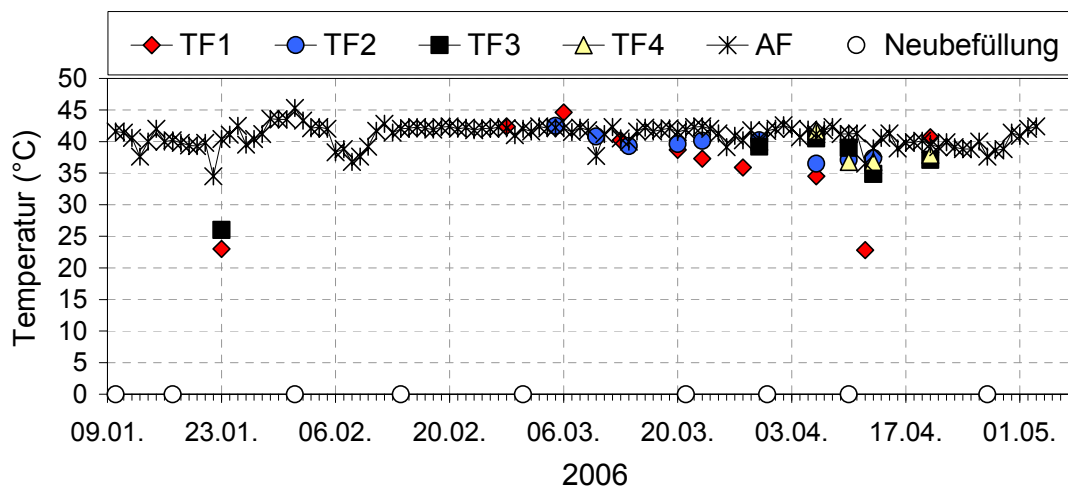


Abb. 58: Verlauf der Prozesstemperatur in den Reaktoren der großtechnischen Pilotanlage während Zeitraum I

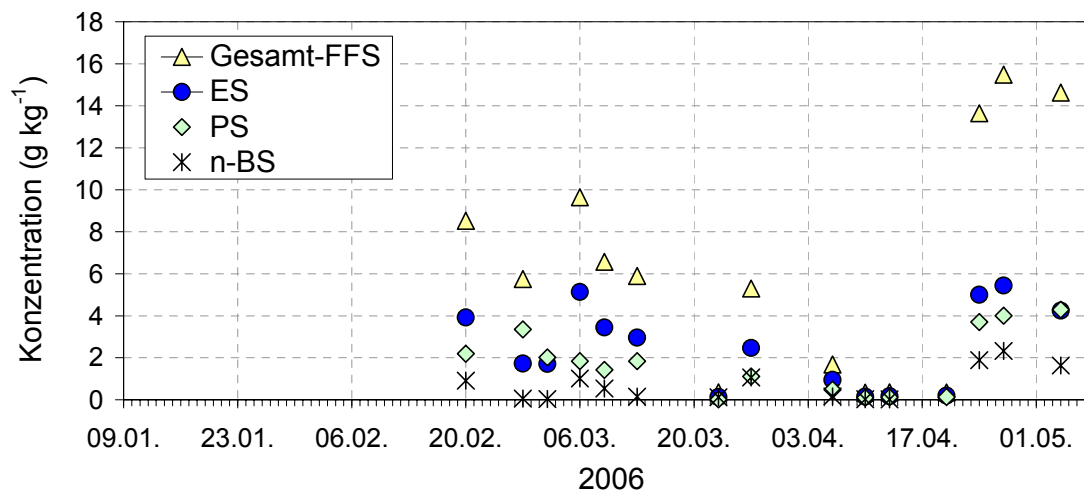


Abb. 59: Verlauf der Konzentrationen an flüchtigen Fettsäuren (Gesamt-FFS), Essigsäure (ES), Propionsäure (PS) und n-Buttersäure (n-BS) im Ablauf vom großtechnischen Anaerobfilter während Zeitraum I

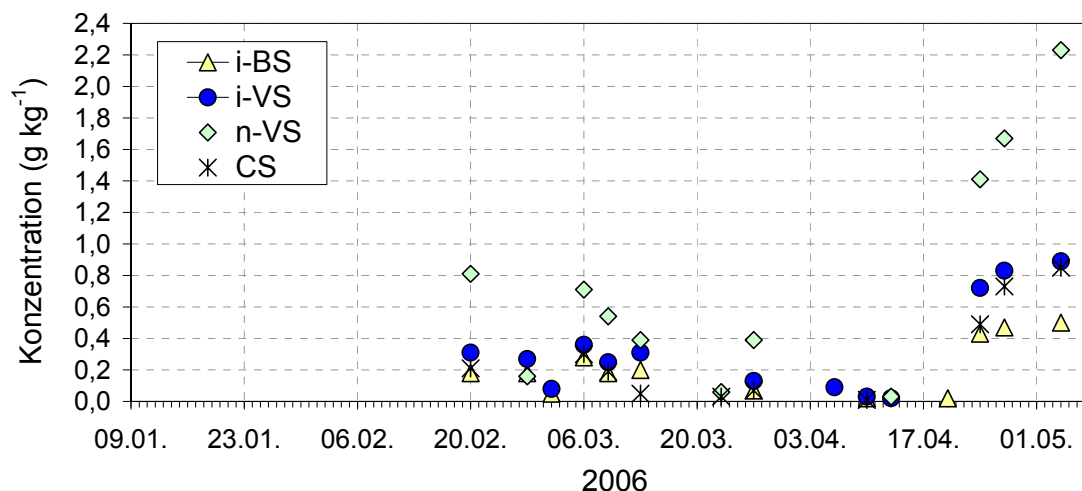


Abb. 60: Verlauf der Konzentrationen an iso-Buttersäure (i-BS), iso-Valeriansäure (i-VS), n-Valeriansäure (n-VS) und Capronsäure (CS) im Ablauf vom großtechnischen Anaerobfilter während Zeitraum I

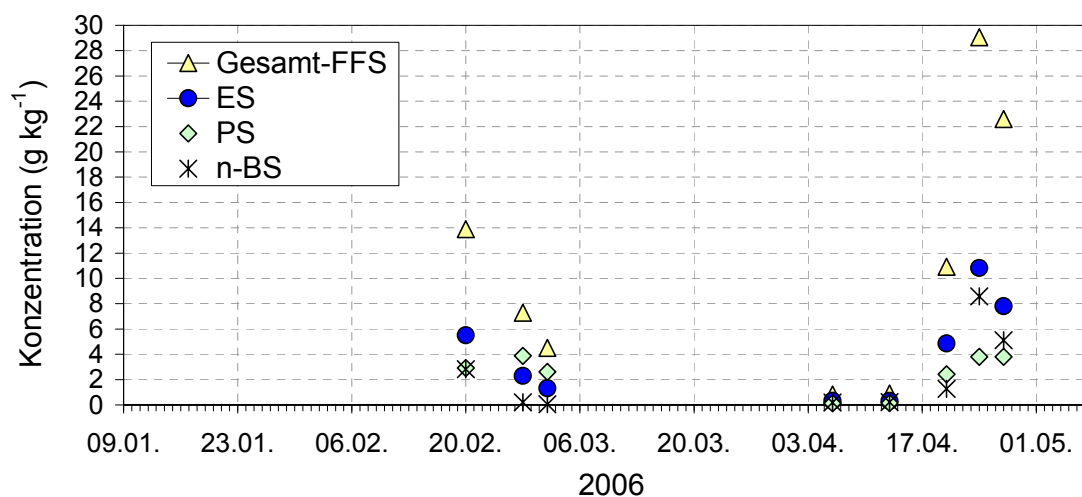


Abb. 61: Verlauf der Konzentrationen an flüchtigen Fettsäuren (Gesamt-FFS), Essigsäure (ES), Propionsäure (PS) und n-Buttersäure (n-BS) im Ablauf vom großtechnischen Trockenfermenter TF1 während Zeitraum I

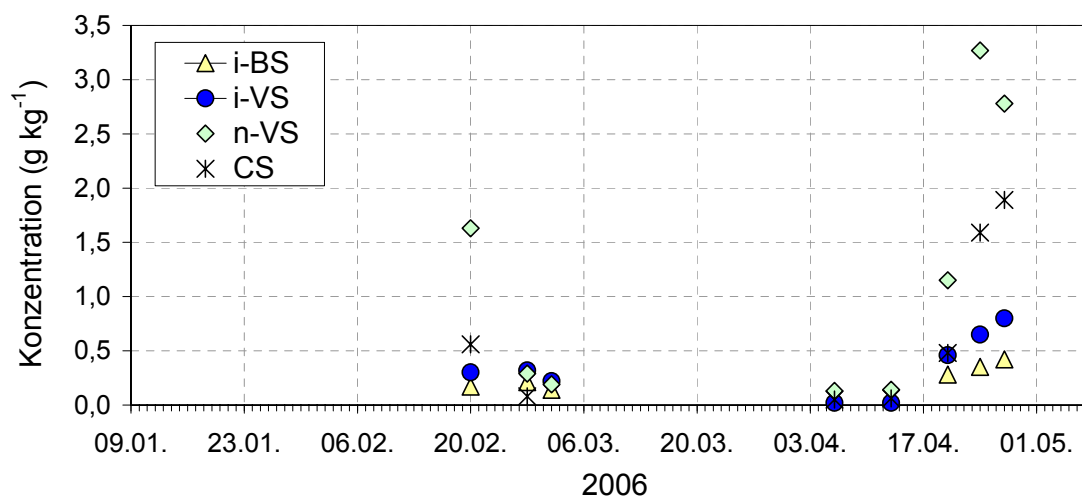


Abb. 62: Verlauf der Konzentrationen an iso-Buttersäure (i-BS), iso-Valeriansäure (i-VS), n-Valeriansäure (n-VS) und Capronsäure (CS) im Ablauf vom großtechnischen Trockenfermenter TF1 während Zeitraum I

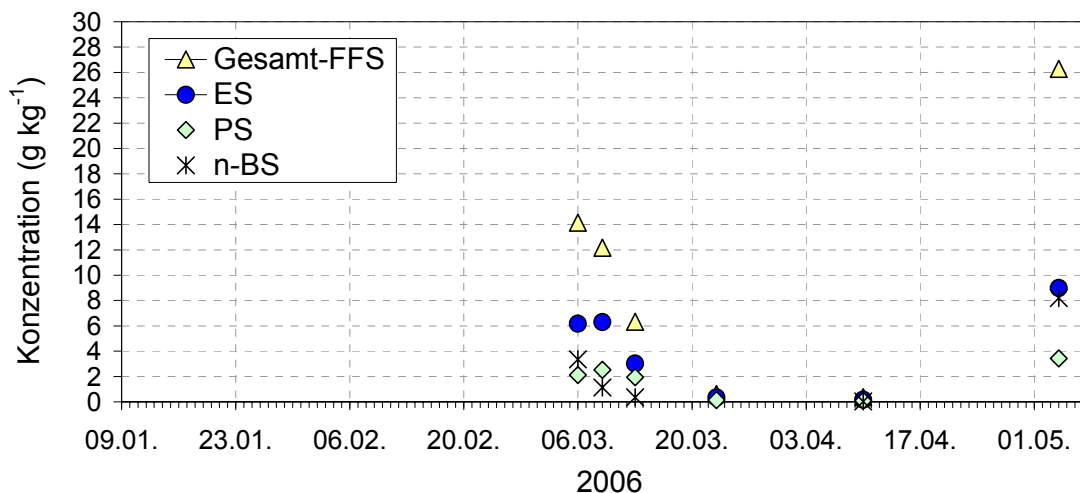


Abb. 63: Verlauf der Konzentrationen an flüchtigen Fettsäuren (Gesamt-FFS), Essigsäure (ES), Propionsäure (PS) und n-Buttersäure (n-BS) im Ablauf vom großtechnischen Trockenfermenter TF2 während Zeitraum I

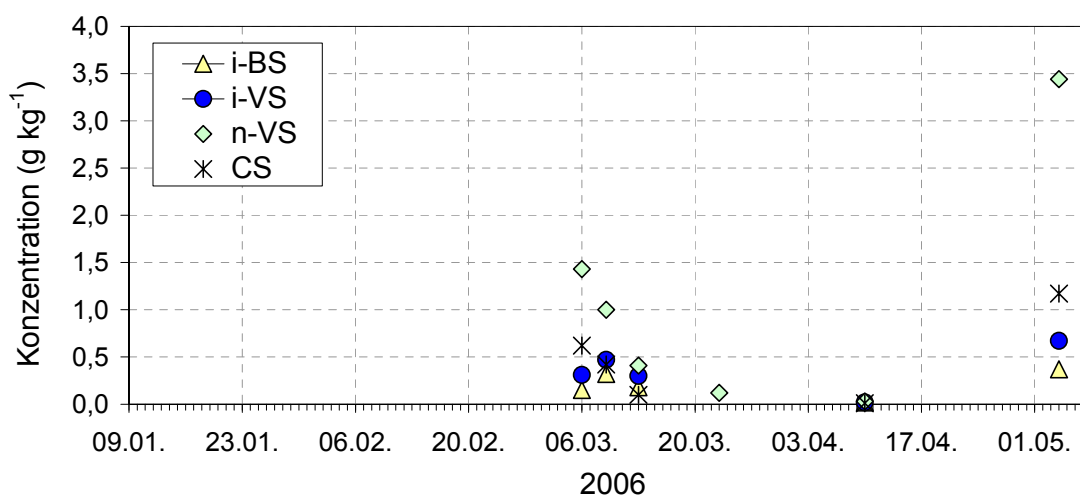


Abb. 64: Verlauf der Konzentrationen an iso-Buttersäure (i-BS), iso-Valeriansäure (i-VS), n-Valeriansäure (n-VS) und Capronsäure (CS) im Ablauf vom großtechnischen Trockenfermenter TF2 während Zeitraum I

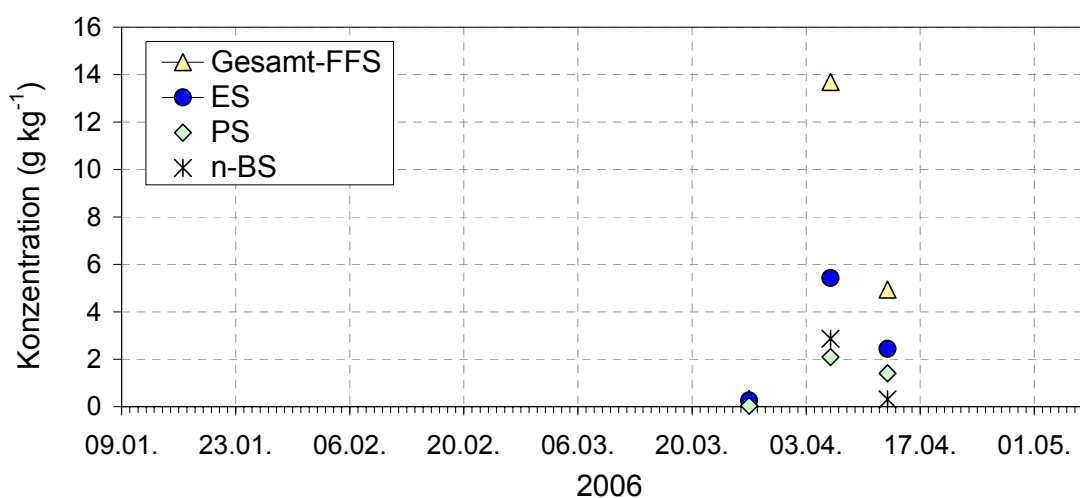


Abb. 65: Verlauf der Konzentrationen an flüchtigen Fettsäuren (Gesamt-FFS), Essigsäure (ES), Propionsäure (PS) und n-Buttersäure (n-BS) im Ablauf vom großtechnischen Trockenfermenter TF3 während Zeitraum I

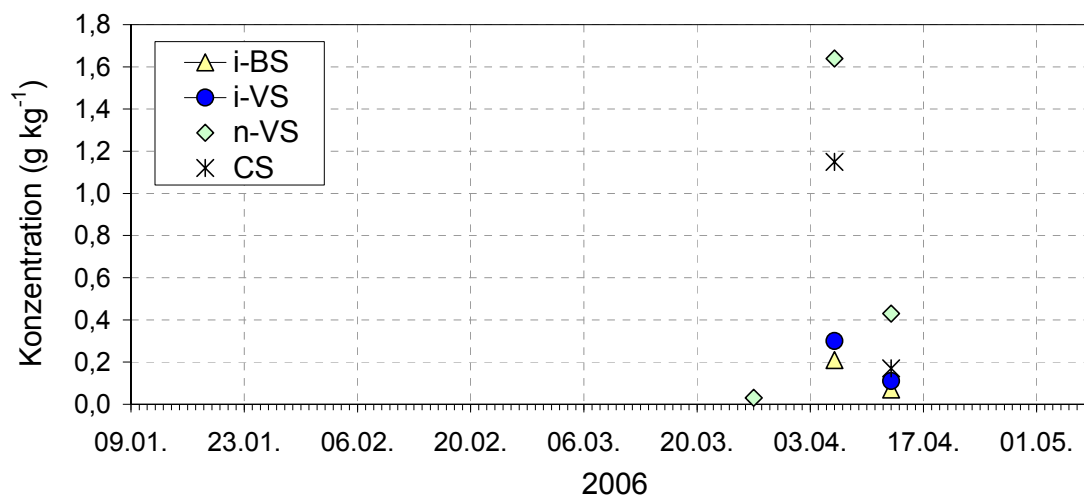


Abb. 66: Verlauf der Konzentrationen an iso-Buttersäure (i-BS), iso-Valeriansäure (i-VS), n-Valeriansäure (n-VS) und Capronsäure (CS) im Ablauf vom großtechnischen Trockenfermenter TF3 während Zeitraum I

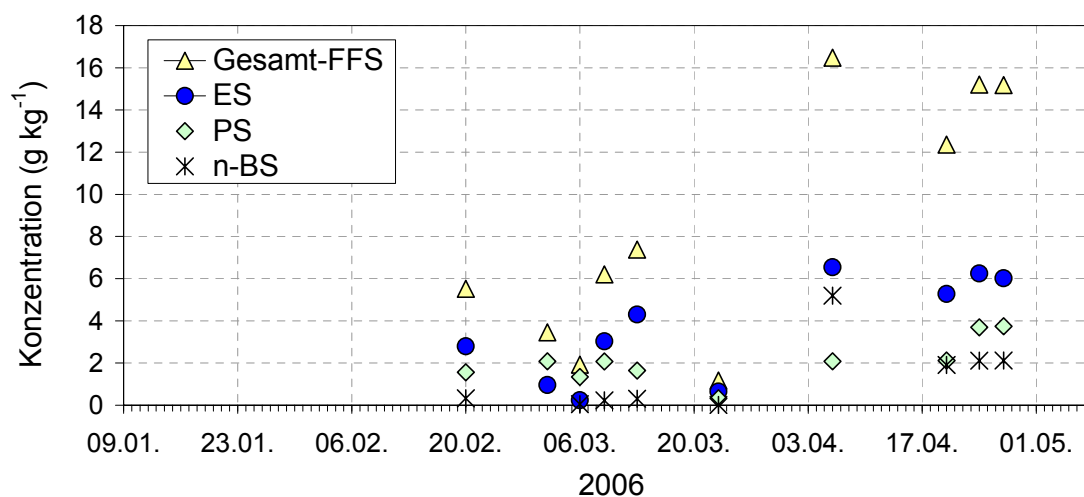


Abb. 67: Verlauf der Konzentrationen an flüchtigen Fettsäuren (Gesamt-FFS), Essigsäure (ES), Propionsäure (PS) und n-Buttersäure (n-BS) im Ablauf vom großtechnischen Trockenfermenter TF4 während Zeitraum I

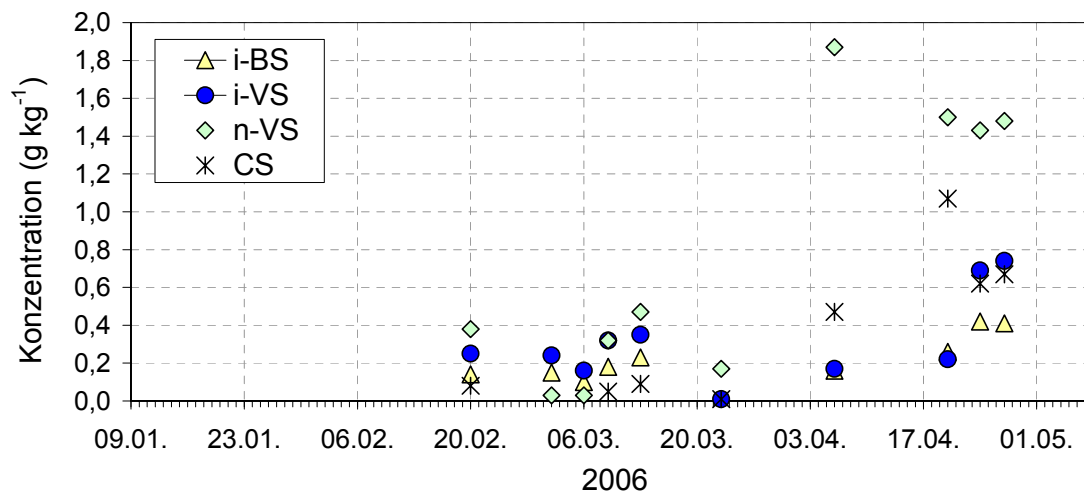


Abb. 68: Verlauf der Konzentrationen an iso-Buttersäure (i-BS), iso-Valeriansäure (i-VS), n-Valeriansäure (n-VS) und Capronsäure (CS) im Ablauf vom großtechnischen Trockenfermenter TF4 während Zeitraum I

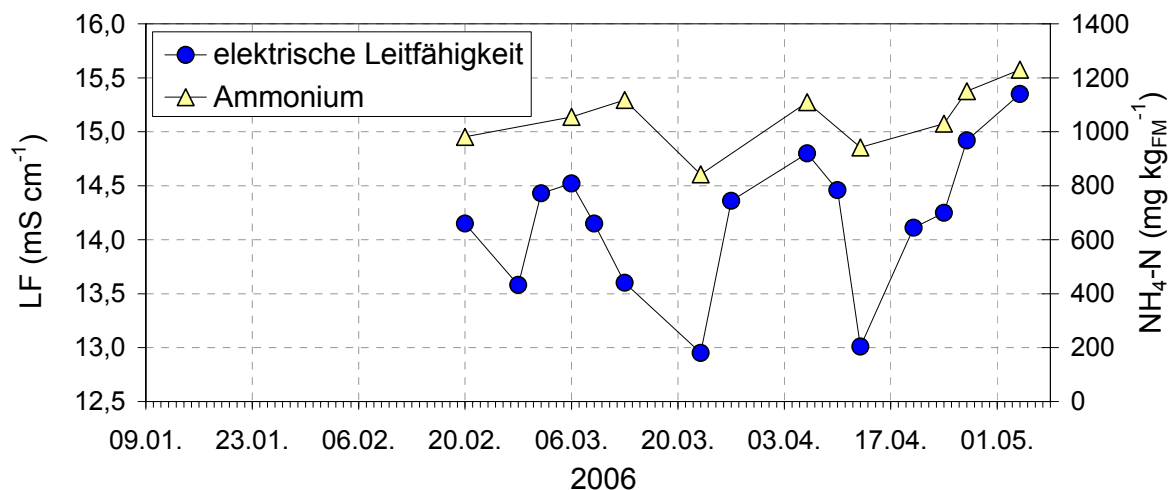


Abb. 69: Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit (LF) sowie der Ammoniumkonzentration in der Eintaufflüssigkeit der großtechnischen Versuchsanlage während Zeitraum1

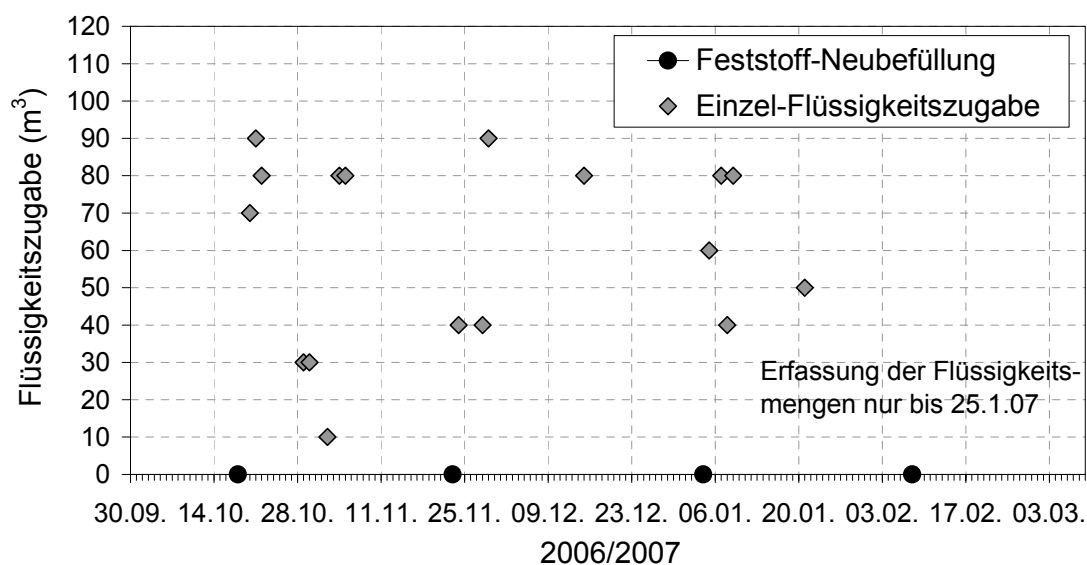


Abb. 70: Einzel-Zugaben an Prozessflüssigkeit in den großtechnischen Trockenfermenter TF1 während Zeitraum2

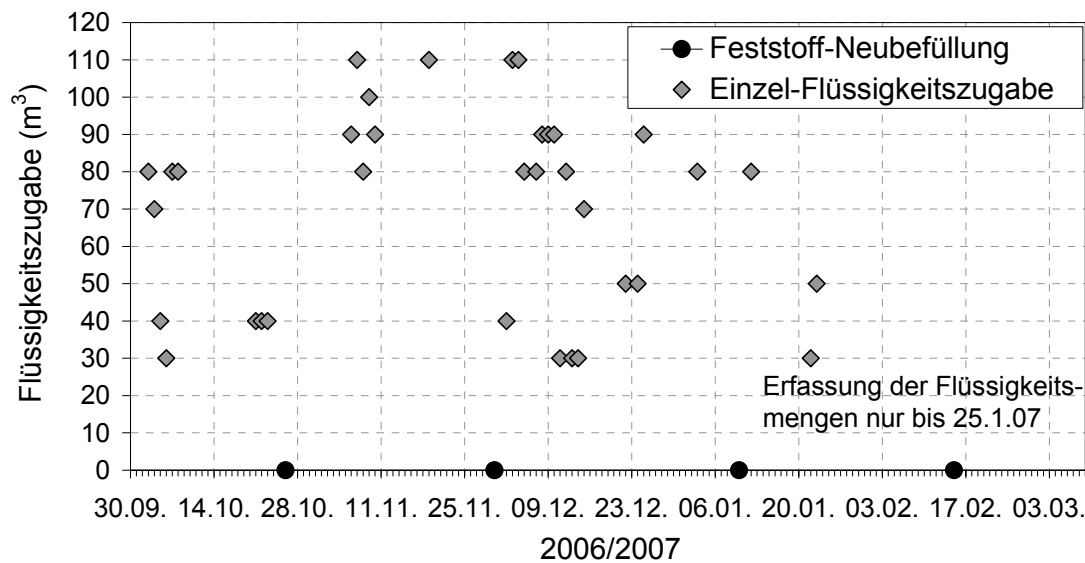


Abb. 71: Einzel-Zugaben an Prozessflüssigkeit in den großtechnischen Trockenfermenter TF2 während Zeitraum2

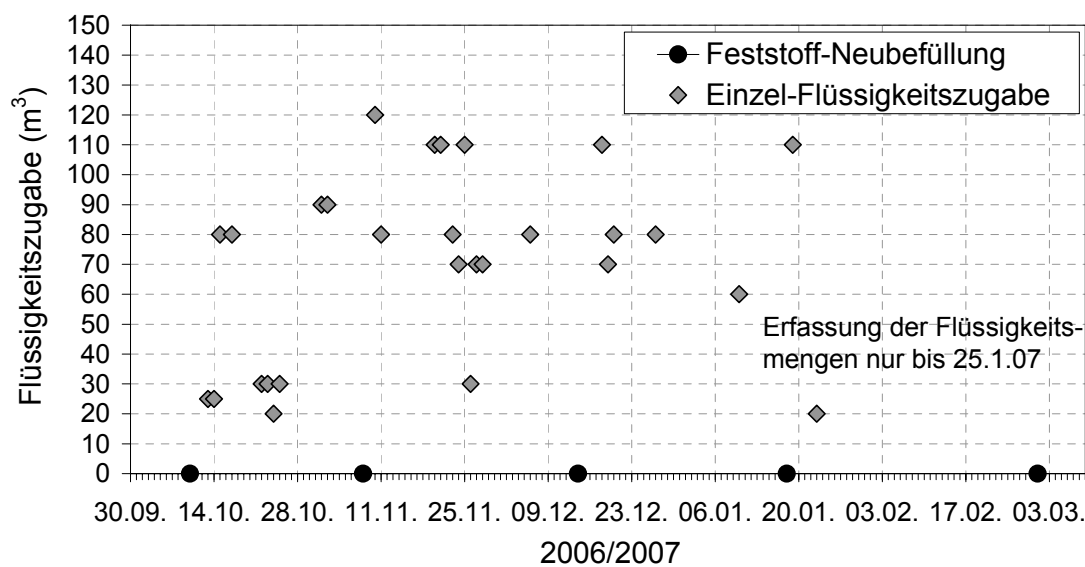


Abb. 72: Einzel-Zugaben an Prozessflüssigkeit in den großtechnischen Trockenfermenter TF3 während Zeitraum2

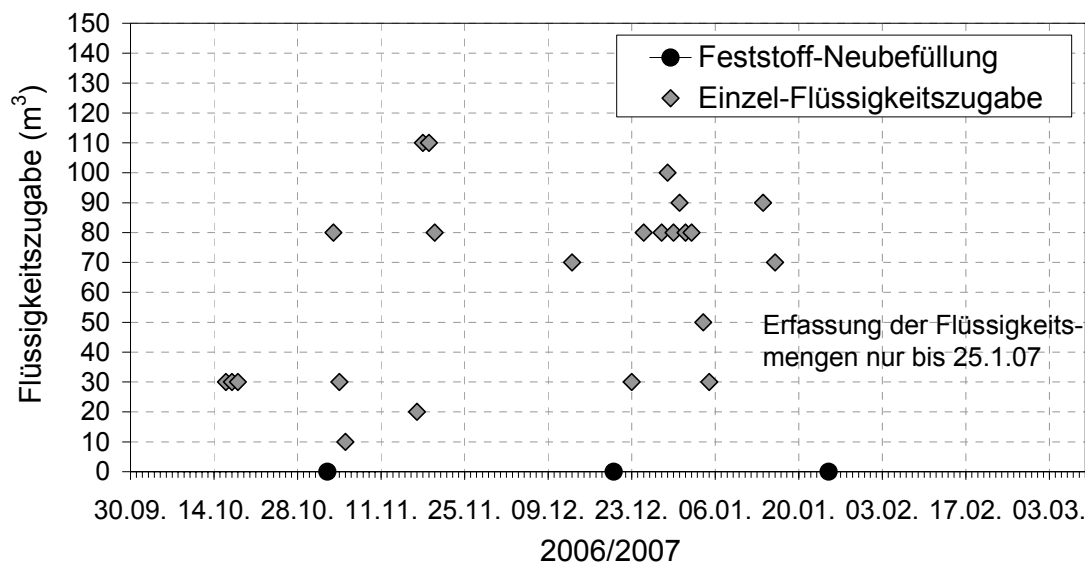


Abb. 73: Einzel-Zugaben an Prozessflüssigkeit in den großtechnischen Trockenfermenter TF4 während Zeitraum2

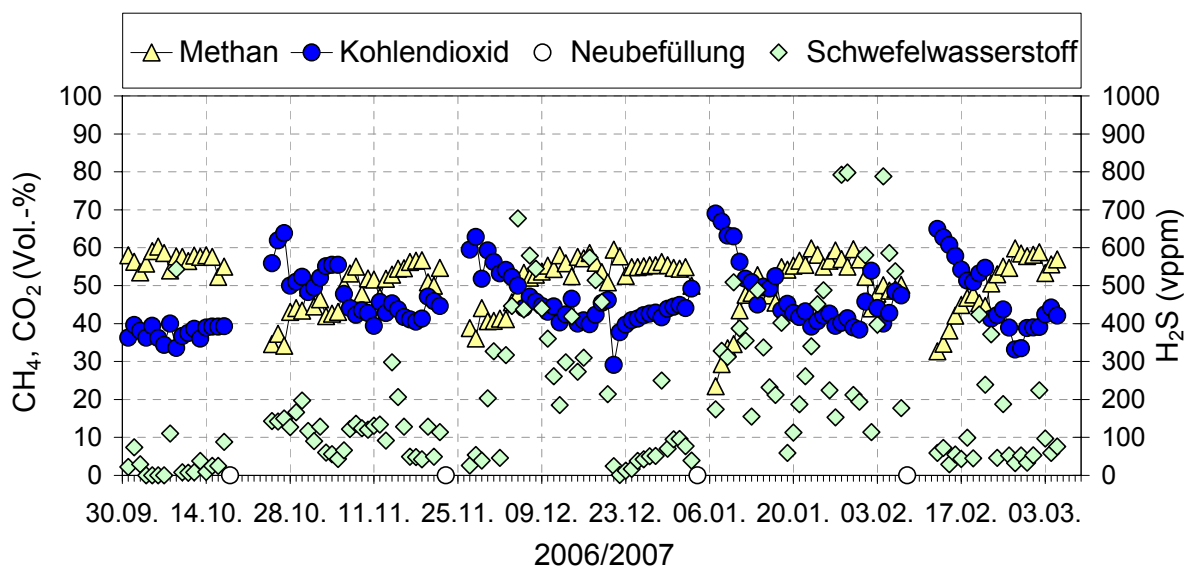


Abb. 74: Verlauf der Gaszusammensetzung aus dem großtechnischen Trockenfermenter TF1 während Zeitraum2

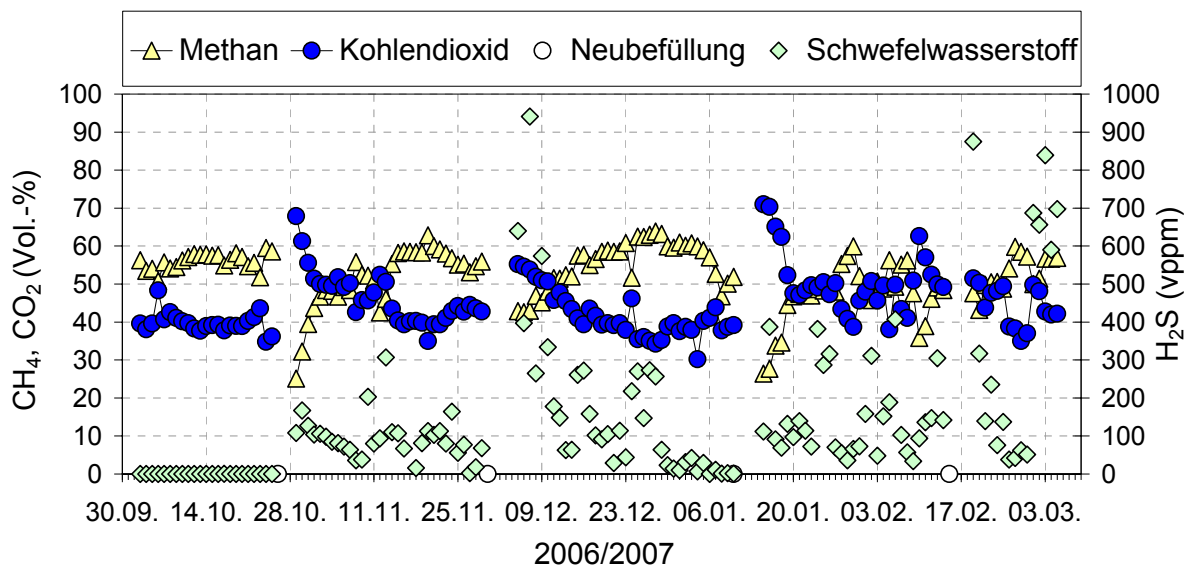


Abb. 75: Verlauf der Gaszusammensetzung aus dem großtechnischen Trockenfermenter TF2 während Zeitraum2

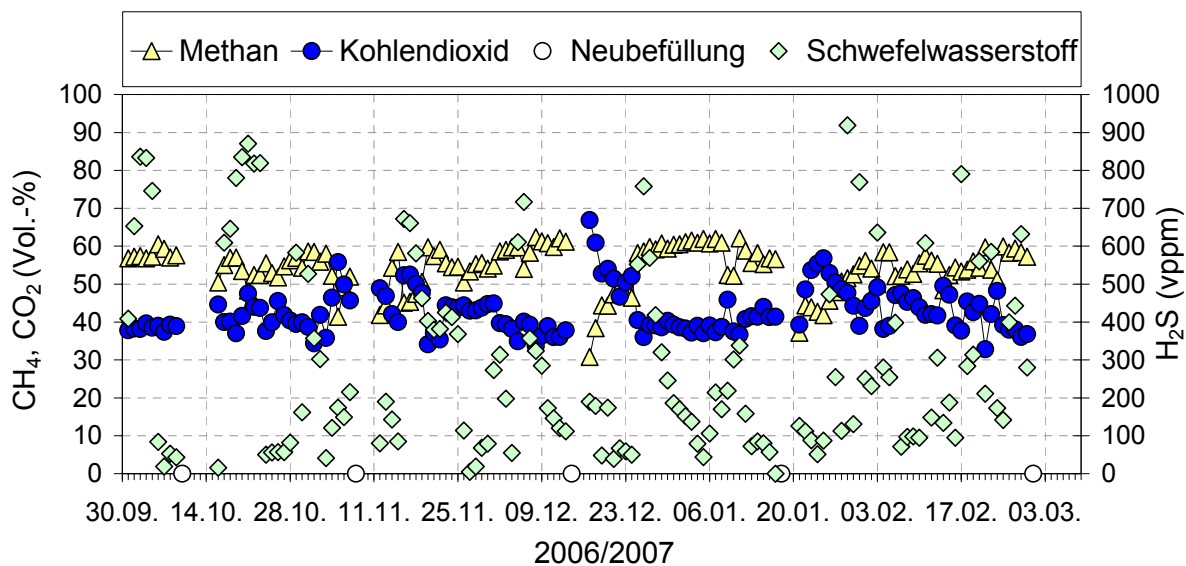


Abb. 76: Verlauf der Gaszusammensetzung aus dem großtechnischen Trockenfermenter TF3 während Zeitraum2

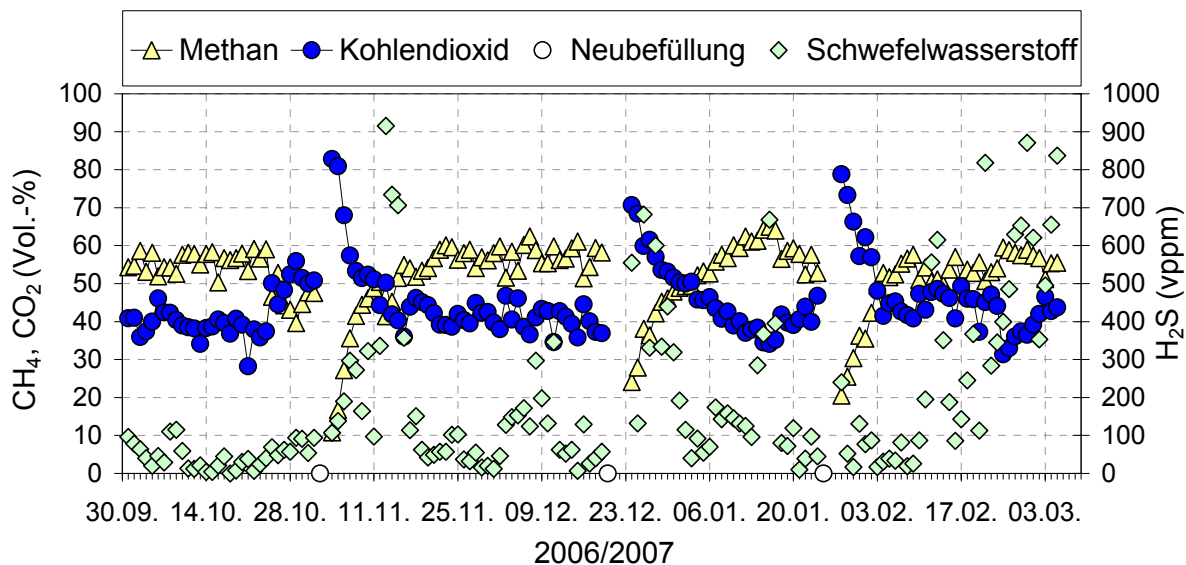


Abb. 77: Verlauf der Gaszusammensetzung aus dem großtechnischen Trockenfermenter TF4 während Zeitraum2

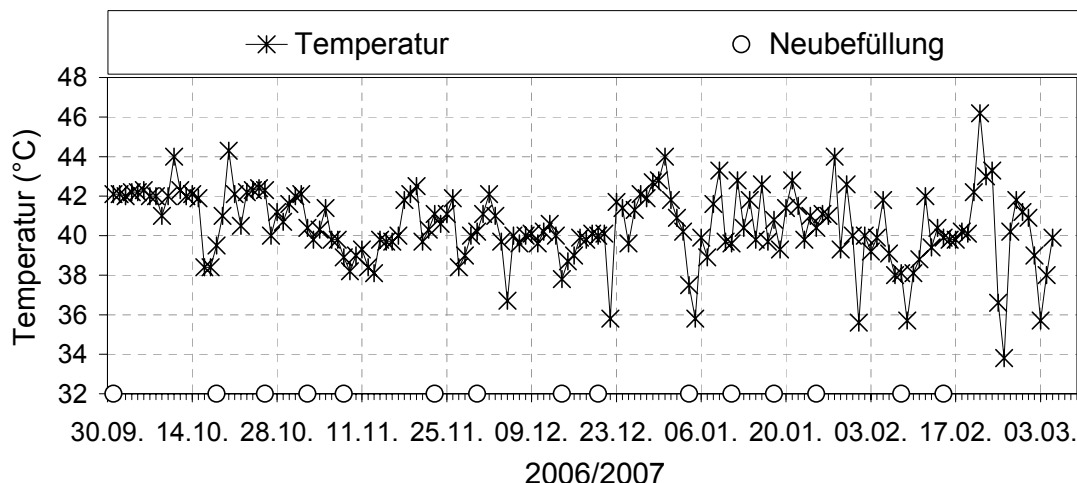


Abb. 78: Verlauf der Prozesstemperatur im großtechnischen Anaerobfilter während Zeitraum2

3 Voraussichtlicher Nutzen

Die Ergebnisse des Vorhabens zeigen, dass NawaRos neben der konventionellen Nassfermentation auch im Bioleaching-Verfahren vergoren werden können. Der wesentliche Vorteil der sich hierdurch ergibt, ist der verminderte Energiebedarf, da nur die Flüssigphase bewegt werden muss. Zusätzlich verspricht das Verfahren bei optimaler Gestaltung eine höhere Leistungsfähigkeit und Stabilität aufgrund des Einsatzes eines Hochleitungsreaktors.

Der praktische Nutzen für die Agrargenossenschaft „Bergland“ e.G. Clausnitz liegt in der nachhaltigen Herstellung der Funktionsfähigkeit der Pilotanlage. Für das Ingenieurbüro Ratzka ergeben sich aus dem abgeschlossenen Vorhaben weit reichende Kenntnisse zur zukünftigen, optimalen anlagentechnischen Gestaltung des Bioleaching-Verfahrens. Das ATB nutzt die Ergebnisse zu Publikationen und Präsentationen auf Fachveranstaltungen.

4 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Mit den Erkenntnissen aus diesem Vorhaben konnten die notwendigen Grundlagen zur weiteren Verbreitung des Bioleaching-Verfahrens zur Fermentation nachwachsender Rohstoffe

bereitgestellt werden. Während zuvor veröffentlichte Ergebnisse anderer Arbeitsgruppen auf eine nur geringe Leistungsfähigkeit der satzweisen Trockenfermentation hindeuteten (Kusch et al. 2006; Gronauer 2006) zeigten die Ergebnisse dieser Untersuchung, dass im optimierten Verfahren zumindest vergleichbare Leistungsparameter wie bei der konventionellen Nassfermentation zu erzielen sind.

Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf wird insbesondere in der Gestaltung der Methanstufe und der Steuerung des Flüssigkeitsaustausches gesehen. Auch die Anwendung einer thermophilen Betriebsweise erscheint aufgrund der höheren Abbaugeschwindigkeit eine gezielte Untersuchung zu rechtfertigen. Eine Tiefergehende Analyse der am Abbau beteiligten Mikroorganismen, wodurch der Verständnis der Funktionsweise des Bioleaching-Verfahrens vertieft werden könnte, stet bislang ebenfalls noch aus.

5 Veröffentlichung der Ergebnisse

Ein Teil der Ergebnisse des Vorhabens wurde in Form von Artikeln und Tagungsbeiträgen bereits veröffentlicht bzw. zur Veröffentlichung eingereicht. Weitere Publikationen sind geplant.

Linke, B., Heiermann, M., Mumme, J. (2006): Ergebnisse aus den wissenschaftlichen Begleitungen der Pilotanlagen Pirow und Clausnitz, In Trockenfermentation - Stand der Entwicklungen und weiterer F&E-Bedarf, Gülzower Fachgespräche Band 24, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Herausgeber), Gülzow, S. 95-102.

Mumme, J., Linke, B. (2006): Solid state anaerobic digestion – state of the art for agricultural biomass. In: Proceedings Updating and Perspective for the Biogas Production in Cuba. Workshop 27.-29.03.2006 in Sancti Spiritus, Cuba

Mumme, J., Linke, B., Heiermann, M. (2006): Fermentation von Energiepflanzen im Bioleaching-Verfahren In: Tagungsunterlagen „Symposium zur Trockenfermentation von Energiepflanzen“, FH-Giessen, 23.05.2007

eingereicht

Mumme, J., Linke, B., Heiermann, M. (2006): Trockenfermentation nachwachsender Rohstoffe - Stand der Forschung und Entwicklung. In: Tagungsunterlagen „Energiepflanzen im Aufwind - Wissenschaftliche Ergebnisse und praktische Erfahrungen zur Produktion von Biogaspflanzen und Feldholz“ Potsdam, 12.-13.06.2007

Klocke, M., Mumme, J., Souidi, K., Mundt, K., Nettmann, E., Bergmann, I., Linke, B. (2007): High diversity of methanogenic Archaea in a maize silage utilizing two-stage digester with anaerobic filter. Applied and Environmental Microbiology

Literaturverzeichnis

Bidlingmaier, W. and J. Müsken (1977): Biotechnologische Verfahren zur Behandlung fester Abfallstoffe, in Umweltbiotechnologie, edited by W. Bidlingmaier, J. C. G. Ottow and Bidl, G. Fischer, Stuttgart.

Bischofsberger, W. (1993): Übersicht über anaerobe Verfahrenstechniken, in Handbuch der anaeroben Behandlung von Abwasser und Schlamm, S. 96, Springer-Verlag.

- Dauber, S. (1993): Einflussfaktoren auf die anaeroben biologischen Abbauvorgänge, in *Anaerobtechnik*, S. 62-95, Springer-Verlag, Berlin.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Ergebnisse des Biogas-Messprogramms, Gülzow, 2005.
- Ghosh, S.; Klass, D. L. (1978): Two-phase anaerobic digestion. *Process Biochemistry* 13, S. 15-24.
- Gronauer, A. (2006): Möglichkeiten und Grenzen des Batch-Verfahrens "Bioferm", in *Trockenfermentation - Stand der Entwicklungen und weiterer F&E-Bedarf*, edited by Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., S. 103-111, Gülzow.
- Kroiss, H. and K. Svardal (2005): Einflussfaktoren auf die anaerobe biologischen Abbauvorgänge, in *Anaerobtechnik*, 2. Auflage, edited by W. Bischofsberger, N. Dichtl, K. H. Rosenwinkel, C. F. Seyfried and B. Böhnke, S. 49-86, Springer-Verlag, Berlin.
- KTBL (2005): *Gasausbeuten in landwirtschaftlichen Biogasanlagen*, Darmstadt
- Kusch, S., H. Oechsner and T. Jungbluth (2006): Vergärung landwirtschaftlicher Substrate in diskontinuierlichen Feststofffermentern. *Agrartechnische Forschung* 11, S. 81-91
- Linke, B. and M. Heiermann (2006): Schlussbericht zur wissenschaftlichen Begleitung des Projektes „Regenerative Energieerzeugung auf Landwirtschaftsbetrieben durch die effiziente Nutzung nachwachsender Rohstoffe und biogener Reststoffe in einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft für Biomasse“, Potsdam.
- Linke, B., M. Heiermann and J. Mumme (2006): Ergebnisse aus den wissenschaftlichen Begleitungen der Pilotanlagen Pirow und Clausnitz, in *Trockenfermentation - Stand der Entwicklungen und weiterer F&E-Bedarf*, vol. 24, edited by Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., S. 95-102, Gülzow.
- Linke, B.; Mähnert, P. (2005): Biogasgewinnung aus Rindergülle und nachwachsenden Rohstoffen. *Agrartechnische Forschung* 11(5), S. 125-132.
- Nordberg, A.; Jarvis, A.; Stenberg, B.; Mathisen, B.; Svensson, B. H. (2007): Anaerobic digestion of alfalfa silage with recirculation of process liquid. *Bioresource Technology* 98(1), S. 104-111.
- Svensson, L., L. Bjornsson and B. Mattiasson (2006): Enhancing performance in anaerobic high-solids stratified bed digesters by straw bed implementation. *Bioresource Technology* 98 (1), S. 46-52
- Thomé-Kozmiensky, K. J. (1995): *Biologische Abfallbehandlung*, EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik.
- Weiland, P. (2001): *Grundlagen der Methangärung - Biologie und Substrate*. S. 19-32.
- Wellinger, A., W. Edelmann, R. Favre, B. Seiler and D. Woschütz (1984): *Biogas-Handbuch. Grundlagen-Planung-Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen*, Verlag Wirz AG, Aarau.

Anlage

I Erfolgskontrollbericht

I.1 Beitrag des Ergebnisses zu förderpolitischen Zielen

Eine zentrale Herausforderung der Zukunft besteht in der Sicherung der Energieversorgung durch schrittweise Umstellung von fossilen auf erneuerbare Energieträger bei gleichzeitiger Minderung der klimaschädlichen CO₂-Emissionen. Deshalb hat die Europäische Kommission ihre Energiepolitik aktualisiert und beschlossen, den Anteil erneuerbarer Energien auf 20 % bis zum Jahr 2020 zu erhöhen. Auf nationaler Ebene will Deutschland bis zum Jahr 2010 etwa 10 % des Primärenergieverbrauchs aus regenerativen Energiequellen bereitzustellen und unterstützt z.B. durch entsprechende Förderprogramme, insbesondere durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Projekte im Bereich Bioenergie. Dabei bildet die Nutzung von Biogas aus Biomasse eine wichtige Säule im künftigen Energiemix. Besondere Bedeutung kommt dieser Form der Energiebereitstellung zu, da sie weitgehend den Anforderungen an eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft gerecht wird, CO₂-neutral ist, Arbeitsplätze im ländlichen Raum sichert und schafft sowie besonders kleine und mittelständischen Unternehmen der Biogasbranche stärkt. Die Ergebnisse dieses Vorhabens unterstützen diese Entwicklung durch die Bereitstellung von Grundlagenkenntnissen zu einem neuen Verfahren der Biogasgewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen. Dieses als Bioleaching bezeichnete Verfahren zeichnet sich insbesondere durch einen gegenüber Alternativverfahren geringeren Energiebedarf aus.

I.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis

Gülle und Energiepflanzen werden heute überwiegend als Substratmischung in vollständig durchmischten Fermentern vergoren und liefern neben Biogas einen flüssigen Gärrest, der die für die Biogasgewinnung erforderliche methanogene Mischpopulation enthält. In einem neuen Forschungsansatz sollte untersucht werden, ob dieser flüssige Gärrest als Impfschlamm in Wannenreaktoren für die Gewinnung von Biogas aus nachwachsenden Rohstoffen geeignet ist. Zur Anwendung kam dabei ein satzweise arbeitendes Trockenfermentationsverfahren, das praxisnah in der Agrargenossenschaft Bergland (Clausnitz/Sa.) und unter Laborbedingungen am Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim erprobt wurde. Es war vorgesehen, die in die Fermenter durch lose Schüttung eingebrachte Biomasse durch eine aufwärtsgerichtete Strömung mit flüssigem Gärrest aus einer bereits bestehenden Nassfermentationsanlage anzupflanzen und überschüssige, die Biogasbildung hemmende organischen Säuren im Trockenfermenter mit Hilfe des eingestauten flüssigen Gärrestes abzuführen und in die bestehende Nassfermentationsanlage zur Biogasbildung zu pumpen. Aus Labor- und Praxisversuchen hat sich gezeigt, dass diese Kreislaufführung von flüssigen Gärrest aus der Nassfermentation von Rindergülle mit nachwachsenden Rohstoffen nicht anwendbar ist, da wegen der noch vorhandenen hohen Viskosität nur die äußerste Schicht der in den Trockenfermentern vorhandenen Biomasse durchdrungen wurde und ein Großteil der Biomasse nicht für die Biogasbildung zur Verfügung stand. So konnte in der Anlage Clausnitz nach diesem Konzept nur etwa 25 % des aus Triticale-GPS möglichen Biogaspotenzials gewonnen werden.

Auf der Grundlage der nicht zufrieden stellenden Versuchsergebnisse wurde das ursprüngliche Verfahrenskonzept der Kombination aus Nassfermentation und Feststofffermentation verlassen und statt dessen ein eigenständiges zweistufiges Verfahren zur Feststofffermentation mit einer niedrigviskosen und in einer separaten Methanisierungsstufe zu regenerierenden Einstauflüssigkeit (Bioleaching) sowohl in der Pilotanlage Clausnitz als auch im kleintechnischen Maßstab am ATB etabliert. Versuche in einer kleintechnischen Versuchsanlage (3 Tro-

ckenfermenter und 1 Anaerobfilter, je 65 l) mit Triticale- GPS, die durchschnittlich 28% oTS in der Frischmasse enthielt, zeigten, dass bei Monofermentation von Triticale- GPS etwa 2/3 der Methanmenge vom Anaerobfilter und 1/3 von den Trockenfermentern gebildet wird. Bezogen auf die oTS der Triticale-GPS wird eine Biogas- und Methanausbeute von 581 bzw. 292 l kg⁻¹ erreicht. Im Vergleich mit den für die Nassfermentation angegebenen Ausbeuten von Getreide-GPS liegen die hier gemessenen Werte in vergleichbarer Höhe. In der Pilotanlage Clausnitz stand neben vier befahrbaren Boxenfermentern, mit einem Nutzvolumen von je 120 m³ nach Umrüstung auf das zweistufige Verfahren zusätzlich ein Anaerobfilter mit einem Volumen von 150 m³ (Anaerobfilter mit Aufwuchsträgern vom Typ BIOPAC 10 der Firma ENVICON) zur Verfügung. Im Zeitraum Januar 2006 bis März 2007 wurden Messungen an der Pilotanlage durchgeführt, denen insgesamt 24 Befüllungen überwiegend mit Triticale-Ganzpflanzensilage (GPS) zugrunde lagen. Die im kleintechnischen Versuch unter optimalen Prozessbedingungen ermittelten Biogas- und Methanausbeuten konnten nur vereinzelt in der Praxisanlage erreicht werden. Ursachen waren neben technischen Problemen und nicht gemessenen Biogasmengen eine nicht optimierte Betriebsweise des Gesamtsystems, insbesondere, der Austausch der Einstauflüssigkeit zwischen den Trockenfermentern und dem Anaerobfilter. Der aus den Trockenfermentern anfallende Gärrest bleibt nach Abtropfen der Einstauflüssigkeit stapelbar und kann z.B. durch Radlader oder Greifer als organischer Dünger verwertet werden.

I.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Mit der Entwicklung eines satzweise arbeitenden Verfahrens zur Trockenfermentation durch Kombination von eingestauten Trockenfermentern und einer separaten Methanreaktors, der die Funktion des Abbaus gelöster organischer Zwischenprodukte aus den Trockenfermentern übernimmt, steht der Biogaspraxis ein weiteres Verfahren zur Verfügung, das insbesondere für die Biogasgewinnung aus Halmgütern und/oder Stallmist geeignet ist. Mit der Bearbeitung des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens wurde ein Problem aufgegriffen, das insbesondere in der Durchmischung der Reaktionsmasse bei strukturreichen Biomassen besteht solche Substrate von der Biogasgewinnung ausschloss, die zur verstärkten und kaum beherrschbaren Schwimmschichten neigen. Das an der Durchführung des Vorhabens beteiligte Ingenieurbüro Ratzka sowie weitere Planer landwirtschaftlicher Biogasanlagen, die auch im Bereich der Trockenfermentation tätig sind, können die Ergebnisse nutzen, um das in nachwachsenden Rohstoffen vorhandene Methanpotenzial bei einfacher und betriebssicherer Verfahrensgestaltung zu erschließen.

Das Ingenieurbüro Ratzka strebt die Errichtung einer Referenzanlage an, bei der alle Erkenntnisse aus der Erprobung der Pilotanlage genutzt werden. Hierzu gehört eine verbesserte Tor-konstruktion, eine leistungsfähigere Methanstufe um auf den Einsatz von festen Impfmateri-al verzichten zu können, sowie eine weitgehend automatisierte Steuerung des Prozessflüssig-keitsaustausches. Zusätzlich soll die gesamte Anlage hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit in Gestaltung und Dimensionierung überarbeitet werden.

Ergebnisse aus dem FuE- Vorhaben haben z.B. Eingang gefunden in „Gülzower Fachgesprä- che“ Band 24 sowie in nationalen Fachtagungen im Jahr 2007. Geplant sind weitere Veröf- fentlichungen in Fachzeitschriften.

I.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Die Verwendung von flüssigem Gärrest aus einer konventionellen Nassfermentationsanlage, die Gülle und/oder nachwachsende Rohstoffe verarbeitet, als Einstauflüssigkeit für die Fer- mentation organischer Feststoffe hat zu keiner Lösung geführt. Wegen der noch vorhandenen hohen Viskosität des flüssigen Gärrestes wurde nur die äußere Schicht der in den Trocken-

fermentern vorhandenen Biomasse durchdrungen. Die inneren Schichten wurden von der Einstauflüssigkeit nicht erreicht und waren deshalb von der Biomethanisierung ausgeschlossen. Folglich lagen die gemessenen Biogas- und Methanausbeuten weit unter den zu erwartenden Werten. Die weitere Erprobung erfolgte mit Genehmigung der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. nach einem geänderten Verfahrenskonzept als eigenständiges, von einer Nassfermentationsanlage unabhängiges System der Trockenfermentation

I.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Das Ingenieurbüro bietet interessierten Anwendern die Möglichkeit zu einer Führung über die Trockenfermentations-Pilotanlage an der Agrargenossenschaft „Bergland“ Clausnitz. Interessierte Anwender können sich diesbezüglich direkt mit dem Ingenieurbüro Ratzka in Verbindung setzen.

I.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Die ursprüngliche Arbeits- und Zeitplanung musste aufgrund technischer Schwierigkeiten an der Pilotanlage Clausnitz verändert werden. Im Wesentlichen betrafen die Schwierigkeiten die Zuführung von bakterienhaltiger Flüssigkeit in die Trockenfermenter. So konnte mit der ursprünglich vorgesehenen Verwendung von flüssigem Gärrest aus einer güllevergärenden Nassfermentationsanlage aufgrund einer zu hohen Viskosität keine Durchströmung des Feststoffstapels erzielt werden. Daraufhin wurde, nach Genehmigung durch die FNR, anstelle des alten Konzeptes das Verfahren des Bioleachings unter Verwendung einer eigenen feststoffarmen Prozessflüssigkeit verfolgt und anlagentechnisch umgesetzt. Gleichzeitig wurde bei der FNR auch eine Mittelaufstockung beantragt, die ebenfalls genehmigt wurde. Aus diesen Gründen konnte erst im Januar 2006 mit der Erprobung der prinzipiell funktionsfähigen Pilotanlage begonnen werden. Durch einen Defekt der Trockenfermenter-Tore in Verbindung mit entsprechenden Reparaturarbeiten musste die wissenschaftliche Erprobung der Pilotanlage zwischen Mai und September 2006 unterbrochen werden. Anschließend wurden die Erprobungsarbeiten ab Oktober 2006 wieder aufgenommen.

Aufgrund der durch die Veränderung des Verfahrenskonzeptes sowie den technischen Störungen stark verkürzten Erprobungszeit wurde der Arbeitsplan reduziert. So wurde die zu untersuchende Palette an NawaRos im Wesentlichen auf Triticale-GPS beschränkt. Daneben wurde auf die ursprünglich vorgesehenen Parallelversuche zur Feststofffermentation ohne Einstauflüssigkeit verzichtet. Alle Veränderungen im Arbeitsplan wurden durch die FNR genehmigt. Ebenfalls von der FNR genehmigt wurde die kostneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um 3 Monate bis einschließlich Februar 2007. Hierdurch konnte nach der Wiederinbetriebnahme der Pilotanlage ein zweiter Betriebszeitraum von Oktober 2006 bis Februar 2007 wissenschaftlich ausgewertet werden.

Die von der FNR genehmigte Ausgaben- und Zeitplanung wurde somit nicht überschritten.

II Kurzfassung (Berichtsblatt)

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Schlussbericht
3a. Titel des Berichts Wissenschaftliche Begleitung – Pilotanlage mit Wannenreaktoren zur Biogasgewinnung aus organischen Feststoffen	
3b. Titel der Publikation Vergärung von Energiepflanzen im Bioleaching-Verfahren	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Linke, Bernd; Mumme, Jan; Ratzka, Peter; Eckardt, Lothar	5. Abschlussdatum des Vorhabens Februar 2007
	6. Veröffentlichungsdatum
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n)) Linke, Bernd; Mumme, Jan	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Leibnitz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB) Max-Eyth-Allee 100 14469 Potsdam	9. Ber.Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen *) 22004803
	11a. Seitenzahl Bericht
	11b. Seitenzahl Publikation
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL)	12. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Durch den verstärkten Einsatz fester nachwachsender Rohstoffe in konventionellen Nassfermentationsanlagen werden besonders hohe Anforderungen an die Durchmischung des Fermenterinhalt gestellt, da die zugeführten Stoffe stärker als bei Gülle zur Bildung von Schwimm- und Sedimentschichten neigen. Ein alternatives Verfahren ist das Bioleaching, bei dem die Feststoffe in einem undurchmischten Trockenfermenter von einer Prozessflüssigkeit durchströmt werden. Zur Regeneration wird die Prozessflüssigkeit neben dem Trockenfermenter auch durch einen Nassfermenter, der mit einer Biomasserückhaltung ausgestattet ist, zirkuliert. Die Eignung dieses Verfahrens für nachwachsende Rohstoffe wurde durch Gärversuche sowohl für den kleintechnischen als auch großtechnischen Maßstab festgestellt.	
19. Schlagwörter Trockenfermentation, Bioleaching, NawaRos	
20. Verlag	21. Preis

*) Auf das Förderkennzeichen und die Förderung durch das BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

1. ISBN oder ISSN	2. Type of Report Final report
3a. Report Title Scientific monitoring - pilot plant with tub shaped reactors for biogas production from organic solids	
3b. Title of Publication Anaerobic digestion of energy crops in a leach bed process	
4a. Author (s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Linke, Bernd; Mumme, Jan; Ratzka, Peter; Eckardt, Lothar	5. End of Project February 2007
	6. Publication Date
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s)) Linke, Bernd; Mumme, Jan	7. Form of Publication
8. Performing Organization (s) (Name, Address) Leibnitz-Institute of Agricultural Engineering Potsdam-Bornim e.V. (ATB) Max-Eyth-Allee 100 14469 Potsdam	9. Originators Report No.
	10. Reference No. 22004803
	11a. No. of Pages Report
	11b. No. of Pages Publication
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL)	12. No. of References
	14. No. of Tables
	15. No. of Figures
16. Supplementary Notes	
17. Presented at (Title, Place, Date)	
18. Abstract As a side effect of fast growing usage of energy crops in processes of slurry digestion requirements on mixing are increasing constantly. This is caused by substrates natural disposition for sedimentation and flotation. An alternative method for digesting energy crops is the leach bed process, with an unstirred leach bed digester in combination with a high performance digester with immobilized microorganisms. This process has been proven to be effective for energy crops in small and full scale application.	
19. Keywords energy crops, leach bed, anaerobic digestion, solid state digestion	
20. Publisher	21. Price