Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Verbundvorhaben: Untersuchungen zum phytosanitären Risiko durch die anaerobe Vergärung von pflanzlichen Biomassen in Biogasanlagen; Teilvorhaben 3

Zuwendungsempfänger und ausführende Stelle:

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB) - Abteilung Technikbewertung und Stoffkreisläufe

Förderkennzeichen:

22028508 bzw. **08NR285**

Laufzeit:

01.05.2009 bis **31.12.2011**

Datum der Veröffentlichung:

Gefördert durch:

Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMELV für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gliederung **Seite**

I Kurzdarstellungen ... 3
I.1 Aufgabenstellung ... 3
I.2 Vorhabensvoraussetzungen ... 3
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens ... 4
I.4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn ... 4
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen ... 5
II Eingehende Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse ... 6
II.1 Siliertechnik und Methodik standardisierter Silierversuche ... 6
II.1.1 Modellsilierung im Glas ... 6
II.1.2 Modellsilierung im Fass ... 7
II.2 Kontinuierliche Vergärung ... 9
II.2.1 Konti-Versuchsanlage ... 9
II.2.2 Betriebs- und Analyseparameter ... 11
II.2.3 Vorversuche ... 11
II.2.3.1 Stabilitätsprüfung Keimträger ... 12
II.2.3.2 Stoffaustausch Keimträger ... 12
II.2.4 Hauptversuch ... 14
II.2.4.1 Schadorganismen ... 14
II.2.4.2 Substrate ... 15
II.2.4.3 Prozessführung ... 18
II.3 Praxisversuche ... 21
II.3.1 Versuchsanlage ... 21
II.3.2 Konstruktion und Bau von Probenträger und Probenhalter ... 21
II.3.3 Einschleusungen ... 22
II.3.4 Anlagenmonitoring ... 22
II.4 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse ... 23
II.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen ... 24
II.6 Literaturverzeichnis ... 25
II.7 Projektbezogene Publikationen und Vorträge ... 26
A Anhang ... 27

I Kurzdarstellungen

I.1 Aufgabenstellung

Ziel des Verbundvorhabens war die Einschätzung des Verbreitungsrisikos von Pflanzenkrankheiten und Unkrautdiasporen durch den vermehrten Einsatz von NawaRos und Gülle in Biogasanlagen sowie die Entwicklung von Vermeidungsstrategien.

Das Verbundvorhaben beinhaltete die Schwerpunkte:

- Einschätzung des Verbreitungsrisikos von Pflanzenkrankheiten und Unkrautdiasporen durch den vermehrten Einsatz von NawaRos und Gülle in Biogasanlagen
- Abschätzung der Inaktivierung der Schadorganismen und Diasporen durch die anaerobe Vergärung
- Einfluss der Expositionszeit (tatsächliche Aufenthaltszeit der Schadorganismen im Vergärungsprozess)
- Gärtemperatur und suboptimaler Bedingungen auf die spezifischen Schadorganismen
- Erfassung der Auswirkungen des Silierprozesses und der Lagerung des Gärrests auf die Tenazität der Schadorganismen und Diasporen
- Entwicklung von Vermeidungsstrategien
- Formulierung von Mindestanforderungen an Technik und Betrieb von Biogasanlagen zur Gewährleistung der phytohygienischen Unbedenklichkeit der eingesetzten Substrate und Gärreste
- und ggfs. Definition düngemittelrechtlicher Anforderungen an die phytohygienische Beschaffenheit eingesetzter Substrate und/oder die Gärreste aus Biogasanlagen

Für das **Teilvorhaben 3** wurden folgende Aufgabenstellungen formuliert:

- Beratung zur Siliertechnik und Methodik standardisierter Silierversuche zur termingerechten Bereitstellung geeigneter Silagen für die Versuche der Partner und der
- Durchführung kontinuierlicher Gärversuche (incl. Vorversuche zur Klärung der Eignung der Methodik und Umsetzung der Einschleusung von Pflanzenpathogenen via Keimträger).

I.2 Vorhabensvoraussetzungen

Die Koordination des Verbundprojektes erfolgte durch die Humboldt Universität zu Berlin, Dept. Nutzpflanzen- und Tierwissenschaften – Phytomedizin (Prof. Dr. Carmen Büttner). Die Aufgabenstellungen wurden in Zusammenarbeit mit folgenden Projektpartnern bearbeitet:

- Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für nationale/internationale Angelegenheiten der Pflanzengesundheit, Braunschweig und Kleinmachnow
- Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland, Braunschweig
- Universität Rostock, Institut für Landnutzung - Phytomedizin
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft - Systembewertung

Die Durchführung des Teilvorhabens 3 erfolgte unter Leitung des Leibniz-Instituts für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Abteilung Technikbewertung und Stoffkreisläufe unter Mitwirkung der ATB-Werkstatt und in enger Kooperation mit der BioenergieBeratung Bornim (B^3) GmbH sowie dem Praxispartner als Betreiber der Biogasanlage Dahmetal in Wildau.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die im Kap. I.1 aufgeführten Schwerpunkte wurden mit den Partnern des Verbundprojekts entwickelt und im Rahmen der Zusammenarbeit umgesetzt.

Die methodische Vorgehensweise und das Versuchsdesign der Arbeiten mit den Laborfermentern wurde sowohl Projektintern als auch extern im Rahmen eines Expertengesprächs vorgestellt und diskutiert. Zu diesem Arbeitsgespräch wurden neben den Projektpartnern weitere Experten aus den Bereichen „Qualitätssicherung in der Biogaserzeugung“ und „Phytohygiene“ eingeladen. In enger Abstimmung mit den Partnern wurde ein Probenplan für die Ein- und Ausschleusungen der Keimträger erarbeitet. Im Projektverlauf wurden witterungs- und pflanzenbaulich bedingte Abweichungen vom Versuchsplan einvernehmlich abgestimmt.

Die weitere Vorgehensweise im Rahmen der Praxisversuche erfolgte ergebnisorientiert, d.h. auf Basis der erzielten Laborergebnisse und Erkenntnisse, ebenfalls in Absprache mit den Projektpartnern. Zum Abschluss des Projektes wurden die Ergebnisse im Rahmen eines Fachgesprächs am 14.11.2011 in Berlin vorgestellt, diskutiert und Handlungsempfehlungen formuliert.

I.4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn

In landwirtschaftlichen Biogasanlagen kommen vornehmlich Wirtschaftsdünger und Energiepflanzen zum Einsatz. Nach dem Konversionsprozess erfolgt eine Rückführung der Gärprodukte als Dünger auf landwirtschaftliche Flächen und schließt somit Stoffkreisläufe. Zur Frage, welche Hygieneanforderungen erforderlich und geeignet sind, um die phytohygienische Unbedenklichkeit von Gärresten, insbesondere aus der kontinuierlichen mesophilen Vergärung von Nachwachsenden Rohstoffen zu gewährleisten, besteht Klärungsbedarf.

Nur für wenige Schadorganismen an pflanzlichen Substraten ist bekannt, wie sich die anaerobe Behandlung auf das mögliche Infektionspotenzial dieser Organismen auswirkt. Gleiches gilt für die in der Praxis übliche Silierung zur Konservierung der Substrate im Vorfeld der Vergärung.

Als Einflussfaktoren auf die Inaktivierung der Schadorganismen werden neben Temperatur auch pH-Wert, die Bildung organischer Säuren und die unmittelbare strukturelle Schädigung durch Mikroorganismen benannt. Allerdings liegen wissenschaftliche Untersuchungen zur Überlebensfähigkeit von Schadorganismen in nur geringer Anzahl vor. Im Projekt „Evaluierung des Hygienisierungspotentials des Biogasprozesses in Modellsystemen und aktuelles phytosanitäres Risiko in Biogasanlagen“ an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft wird das Hygienisierungspotential von Biogasanlagen für vier Quarantäne-Schaderreger der Kartoffel untersucht. Das Projekt hat im Juli 2006 begonnen. Erste Ergeb-

nisse zeigen, dass die Kartoffelzystennematoden (*Globodera pallida* u. *G. rostochiensis*) und die Schleimfäule (*Ralstonia solanacearum*) nach ca. 7 Tagen im mesophilen Vergärungspozess nicht mehr vital sind. Die bakterielle Ringfäule (*Clavibacter michiganensis* ssp. *sepedonicus*) und der Kartoffelkrebs (*Synchytrium endobioticum*) hingegen lassen längere Überdauerungszeiten erwarten (Kämmerer et al., 2008). Diese Arbeiten an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft beschreiben einen methodischen Ansatz zur Einschleusung der Erreger mittels Keimträger, die in einer Schiene arretiert, quer zur Strömungsrichtung befestigt sind. In zukünftigen Untersuchungen ist zu bestätigen, dass ein Austausch zwischen Keimträger und Fermenterinhalt stattfindet.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

National und international ist das ATB in zahlreiche Netzwerke und Verbundvorhaben eingebunden. Die Basis hierfür sind intensive Kooperationen mit Hochschulen und außeruniversitären Einrichtungen im In- und Ausland. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes kommt der engen Kooperation des ATB mit dem Verbundvorhaben EVA2 -„Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands“ (FKZ: 22013308) und dem DFG-Projekt „Struktur und Entwicklung der mikrobiellen Lebensgemeinschaften in Silagen und ihr Einfluss auf die aerobe Stabilität“ (DFG GZ: KL 2069/2-1) besondere Bedeutung zu. In dem Forschungsschwerpunkt Konservierung und Lagerung bestehen langjährige Zusammenarbeiten mit dem Julius Kühn-Institut Braunschweig-Völkenrode (Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde), der Universität Rostock (Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät) sowie dem DLG-Bundesarbeitskreis Futterkonservierung.

II Eingehende Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

II.1 Siliertechnik und Methodik standardisierter Silierversuche

Im Rahmen dieses Projektes waren Frischmassen (Erntegüter) und Silagen sowohl als Grundsubstrat zur Fütterung der Fermenter als auch zum Einbringen in die Keimträger erforderlich (**Tab. II.1-1**). Je nach Verwendungszweck wurden unterschiedliche Mengen an Silagen im Modellsilo Weck-Glas oder PVC-Tonne zubereitet und gelagert. Die Modellsilierversuche wurden entsprechend den Richtlinien für die Prüfung von Siliermitteln auf DLG-Gütezeichen-Fähigkeit (DLG, 2000) angesetzt.

Tab. II.1-1: Übersicht der Frischmasse- und Silagevarianten

Erntegüter	Frischmasse	Silierung in		
		Modellsilo Glas	Modellsilo Tonne	Praxissilo
Mais-Ganzpflanze	X	X		X
Getreide-Ganzpflanze	X	X		X
Hirse-Ganzpflanze	X	X	X	
Kartoffelknolle	X			
Rübenkörper	X			
Getreidekorn	X			

II.1.1 Modellsilierung im Glas

Hierfür wurde seitens des ATB für die Projektpartner die Möglichkeit geschaffen, unter gleichen Bedingungen Erntegut zu konservieren. Dazu wurden einheitlich 1,5 l Modelsilos (1,5 Liter Tulpengläser der Fa. WECK) sowie eine Vorrichtung für die manuelle Verdichtung des Gutes (Eigenbau ATB; vgl. **Bild II.1.1-1**) übergeben und die Handhabung erläutert.

Bild II.1.1-1: Manuelle Verdichtungsvorrichtung

Bild II.1.1-2: Lagerung der Modellsilos

Die Silierung erfolgte unmittelbar nach dem Transport des frisch gehäckselten Erntegutes ins Labor der jeweiligen Partnereinrichtung bzw. nach Zerkleinerung geernteter Ganzpflanzen mit Hilfe eines Laborhäckslers. Die Verdichtung im Laborsilo wurde nach intensivem Durchmischen des Siliergutes manuell durchgeführt, wobei mehrere Lagen des Siliergutes im WECK-Glas mit Hilfe der Verdichtungsapparatur komprimiert wurden. In Abhängigkeit der zu untersuchenden Wirt-Pathogen-Systeme wurde hierbei entweder inokuliertes Pflanzenmate-

rial als Siliergut verwendet oder infizierte Getreidekörner als Infektionsträger zwischen das Siliergut eingebracht (Details s. Berichte der Projektpartner). Nach dem Befüllen des Glases wurde dieses sorgfältig mit einem Glasdeckel mit Gummiring, gehalten von vier Klammern, luftdicht verschlossen. Die Lagerung der Laborsilos erfolgte in einem dunklen temperierten Raum bei 25°C (vgl. **Bild II.1.1-2**) über einen mit den Projektpartnern abgestimmten Zeitraum von mindestens 30 Tagen. Für jede Variante wurde Siliergut in mehrfacher Wiederholung in Laborsilos konserviert. Es wurden keine Silierhilfsmittel verwendet.

Die Laborsilos wurden nach Ablauf der Lagerdauer geöffnet und der Siliererfolg beurteilt. Da im Rahmen dieses Projektes aufgrund der eingebrachten Schadorganismen keine chemische Analytik hinsichtlich der unerwünschten Stoffabbauprodukte in den Silagen (z.B. Butter- und Essigsäure) gemäß DLG-Bewertungsschlüssel (DLG 2006) durchgeführt werden konnte, wurde neben der Bestimmung des pH-Wertes eine Sinnenprüfung entsprechend DLG (2006) auf Auffälligkeiten bei Geruch, Gefüge und Färbung der Silage durch die Versuchsansteller vorgenommen. Die Beobachtung entsprechender Auffälligkeiten war bei Darstellung der Gärqualitäten anzumerken und bei der Versuchsauswertung zu berücksichtigen.

II.1.2 Modellsilierung im Fass

Zur Bereitung der Fütterungssilagen wurden 120 Liter Weithalsfässer (HDPE blau mit PE Deckel und Klemmring; Fa. Rexius) verwendet. Je nach Trockenmassegehalt des Siliergutes können 60 bis 75 kg Pflanzenmasse in ein 120 Liter Fass eingelagert werden. Dazu wurde das zu silierende Gut schichtenweise in das Fass gegeben und von einer Person mit den Füßen festgestampft (vgl. **Bild. II.1.2-1**). Nach dem Befüllen wurde das Fass mittels Klemmring und Deckel verschlossen. Die Lagerung erfolgte bei Umgebungstemperatur (frostfrei) über einem Mindestzeitraum von 60 Tagen.

Bild II.1.2-1: Verdichtung im Modellsilo Fass

Von Feldversuchsflächen der HU-Berlin (Standort Dahlem) wurden Mais- und Hirseganzpflanzen (*Sorghum sudanense*) am 22.09.2009 mit einem Häcksler HEGE 212 (Fa. Kemper) geerntet. Die Hirse konnte in der beschriebenen Weise ins Fass siliert werden. Hingegen wies das Erntegut Mais für eine qualitätsgerechte Silierung zu hohe Trockenmassegehalte auf und wurde deshalb lediglich als frisches Fütterungssubstrat (s. **Tab. II.2.4.2-1**) verwendet.

Nach Ablauf der Lagerdauer wurden die Silos fassweise geöffnet, entleert und der Siliererfolg zunächst mittels Sinnenprüfung beurteilt. Anschließend wurden Mischproben für die chemische Analytik (**Tab. II.2.2-1**) entnommen und die Silage als Fütterungssubstrat portioniert in Plastikbeutel gefüllt und bei -18°C gelagert.

II.2 Kontinuierliche Vergärung

Bei der kontinuierlichen Vergärung erfolgt eine ständige bzw. chargenweise Beschickung des Fermenters. Die Vergärung des Zulaufs wird kontinuierlich in einem oder mehreren Fermentern parallel (einstufiges Verfahren) oder seriell (zwei- oder mehrstufiges Verfahren) durchgeführt. Nach der Vergärung wird der Gärrest für einen Zeitraum von bis zu sechs Monaten in einem Behälter gelagert.

Ein im steady-state betriebener Labor-Durchflussfermenter entspricht von den Milieubedingungen her einem Praxisfermenter. Bei den Versuchen im Labormaßstab, wo die Substratzugabe portioniert nur einmal täglich erfolgt, handelt es sich eigentlich um eine semikontinuierliche Vergärung. Der Einfachheit halber wird im Folgenden jedoch von kontinuierlicher Vergärung gesprochen.

Das Versuchsprogramm des Teilprojekts 3 zur kontinuierlichen Vergärung gliedert sich in die beiden Schwerpunkte Vor- und Hauptversuch (**Tab. II.2-1).**

Tab. II.2-1: Übersicht Versuchsprogramm

Versuchsschwerpunkt		**Fermenter (R)**
Vorversuch	Stabilitätsprüfung Keimträger	R5
	Stoffaustausch Keimträger	R3, R4
Hauptversuch	Einschleusung der Keimträger	
	bei üblicher Raumbelastung (B_R = 3 g oTM $\cdot l^{-1} \cdot d^{-1}$)	R1 - R10
	bei gesteigerter Raumbelastung (B_R = 4,5 g oTM $\cdot l^{-1} \cdot d^{-1}$)	(R3, R4,)* R8

*Auf die Einschleusungen bei gesteigerter Raumbelastung in die Fermenter R3 und R4 wurde durch den Projektpartner verzichtet.

II.2.1 Konti-Versuchsanlage

Für die Versuche wurde am ATB eine von der BioenergieBeratungBornim GmbH geleaste Versuchsanlage mit zehn vollständig durchmischten Rührkesselreaktoren mit einem Nutzvolumen von 8 l und einem Kopfraumvolumen von ca. 2 l eingesetzt (**Bild II.2.1-1**). Die Temperierung der Reaktoren auf 37°C ± 1°C (mesophiler Prozess) erfolgte über thermostatbeheizte Wassermäntel, wobei ein Thermostat jeweils fünf Reaktoren beheizte.

Die Durchmischung des Reaktorinhaltes wurde über zeitschaltuhrgesteuerte Rührwerke *OST basic* (Fa. IKA, Staufen)[1] mit Stahl-Rührstäben gewährleistet. Die Rührstäbe drehten sich frei in einer in den Reaktorinhalt eintauchenden Rührerhülse und ein im Rührerboden angebrachten Kugellager. Die jeweils in 3 unterschiedlichen Höhen angebrachten Plexiglas-Rührblätter wurden im Vorfeld den Untersuchungsanforderungen angepasst, d.h. jedes Rührblatt wurde mit drei kreisrunden Bohrungen zur Aufnahme der Keimträger versehen (vgl. **Bild II.2.1-1**).
Das Rühren erfolgte im Hauptversuch jeweils stündlich für 15 Minuten im Drehzahlbereich von 50-100 min^{-1} mit Ausnahme des Reaktors 6, bei dem aufgrund der Substratbeschaffenheit ein Dauerrühren erforderlich war.

[1] http://www.ika.de

Bild II.2.1-1: links: Konti-Versuchsanlage; rechts: modifizierte Rührpaddel mit Probenträger

Die Substrate (s. **Tab. II.2.4.2-1**) wurden an sechs Tagen je Woche einmal täglich in der Zeit zwischen 6:30 und 10:00 Uhr über einen im Deckel angebrachten und in den Fermenterinhalt eintauchbaren Zulaufstutzen zugegeben. Dazu wurde dem Reaktor zuvor über einen Ablaufkanal Fermenterinhalt zum Anmaischen des Substrates sowie für Analysen (einmal pro Woche) entnommen. Von der Abnahmemenge wurde nach der Zugabe wieder so viel Reaktorablauf in den Reaktor gegeben, dass sich der gleiche Volumenpegel wie zuvor einstellte.

Zur Erfassung der Gasmenge und –zusammensetzung des jeweils produzierten Biogases diente eine automatische, prozessgesteuerte Datenerfassung. Dazu wurde das Biogas für jeden Reaktor in einem Gasbeutel vor einem außerhalb der Messung geschlossenem Magnetventil gespeichert. Die Ausgänge aller 2/2-Wege-Klein-Magnetventile *Type 6013* (Fa. Bürkert, Ingelfingen)[2] mündeten zusammen mit einem Drucksensor *MPX 2010 DP* (Fa. Conrad, Hischau)[3] über PVC-Schläuche in der Zuleitung zur Gasuhr. Der Ausgang dieses Trommelgaszählers *TG 1/5* (Fa. Ritter, Bochum)[4] führte wiederum zum Gasanalysegerät SSM 6000 (Fa. Pronova, Berlin)[5]. Ein PC-gesteuerter Microcontroller ermöglichte die zyklisch wiederkehrende Gasmengenerfassung wahlweise mit und ohne Gasanalyse in wählbaren Zeitabständen. Die Magnetventile wurden dazu alle 24 Stunden nacheinander um 15:00 Uhr beginnend, geöffnet. Zeitgleich setzten die Bypass-Pumpe des Analysegerätes sowie gegebenenfalls die Analysenpumpe ein. Erstere pumpte das Biogas aus dem jeweils geöffneten Gasbeutel durch die Gasuhr. Diese sendete über einen Analogausgang Impulse entsprechen der Gasmenge an den Microcontroller. Parallel hierzu erzeugte der Drucksensor analog zur Differenz zwischen Umgebungs- und Systemdruck eine Spannung. Bei geleertem Gasbeutel und entsprechendem Unterdruck fiel die Spannung ab, das Ventil wurde geschlossen, und die Bypass-Pumpe wurde durch den Microcontroller bei Erreichen eines definierten Grenzwertes abgeschaltet. Ein Protokoll mit den reaktorspezifischen Angaben zu Pumpdauer, Durchflussgeschwindigkeit, Druckdifferenz, Gasmenge sowie die im Gasanalysegerät gespeicherten Gaszusammensetzungen (Methan (CH_4), Kohlendioxid (CO_2), Schwefelwasserstoff (H_2S) und Sauerstoff (O_2)) des Biogases wurden an den PC ausgegeben und dort ausgewertet. Gasanalysen wurden in der Regel ein bis zwei Mal wöchentlich durchgeführt.

[2] http://www.buerkert.de
[3] http://www.conrad.de
[4] http://www.ritter.de
[5] http://www.pronova.de

II.2.2 Betriebs- und Analyseparameter

Die Laborreaktoren (Fermenter) sollten während der Einschleusephase im Hauptversuch mit einer konstanten Fütterung betrieben werden. Als Parameter zur Fütterungsbemessung dient die Raumbelastung (B_R), d.h. die Menge Substrat in Gramm organischer Trockenmasse (oTM) pro Fermentervolumeneinheit und Tag ($g_{oTM} \cdot l_F^{-1} \cdot d^{-1}$). Zielwert für die konstante Fütterung war 3,0 $g_{oTM} \cdot l_F^{-1} \cdot d^{-1}$. Dies wurde in der Anfahrphase in wöchentlichen Steigerungen um 0,5 $g_{oTM} \cdot l_F^{-1} \cdot d^{-1}$ ausgehend von einer Startraumbelastung von 1,0 $g_{oTM} \cdot l_F^{-1} \cdot d^{-1}$ erreicht. Nach der Steigerung auf den Zielwert wurden die Reaktoren für vier Wochen weiter ohne Störung gefüttert, um eine konstante Betriebsweise zu erlangen.
Der Erfolg der Anfahrphase und die Stabilität der Vergärung während der Einschleusephase wurden durch die Analyse der Basis- und Fütterungssubstrate sowie der Gärreste überprüft. Die Substrate und der Gärrest wurden auf den Gehalt an Trockenmasse bei 105 °C, organische Trockenmasse, organische Säuren, Ammonium- und Gesamtstickstoff analysiert. Weiterhin wurden der pH-Wert und die Leitfähigkeit ermittelt sowie mittels Gaschromatografie (GC) die wichtigsten flüchtigen organischen Verbindungen bestimmt. Hierbei kamen die in **Tab. II.2.2-1** aufgeführten Analysemethoden zur Anwendung.
Die Biogasausbeuten wurden in Liter pro Tag gemessen. Durch die automatisierte Messung wurde garantiert, dass jeweils nach exakt 24 Stunden gemessen wurde. Diese Gasmengen wurden dann auf Normliter (l_N), d.h. bezogen auf eine Gastemperatur von 0 °C, eine relative Gasfeuchte von 0 % und einen Gasdruck von 101,325 kPa, umgerechnet (VDI 2006). Die Werte wurden schließlich auf die tägliche Fütterungsmenge (s. **Tab. II.2.4.3-1**), angegeben in Gramm organische Trockenmasse und Tag ($l_N \cdot g_{oTM}^{-1} \cdot d^{-1}$), bezogen dargestellt.

Tab. II.2.2-1: Übersicht der verwendeten Analysemethoden

Parameter	Methode	Referenz	Literatur
pH	VDLUFA	VDLUFA MB. BD. 3, Kap. 18.1	VDLUFA (1997)
LF	DIN	DIN EN 27888	DIN (1987)
TM	ATB	VDLUFA MB. BD. 3, Kap. 3.1	VDLUFA (1997)
		WEISSBACH & KUHLA (1995)	WEISSBACH & KUHLA (1995)
oTM	VDLUFA	VDLUFA MB. BD. 3, Kap. 8.1	VDLUFA (1997)
Org. Säuren	DIN	DIN 38409 H21	DIN (1987)
NH_4-N	VDLUFA	VDLUFA MB. BD. 3, Kap. 4.8.1	VDLUFA (1997)
N_{tot}	ATB	DIN EN ISO 16634	DIN (2006)
		VDLUFA MB. BD. 3, Kap. 4.1.1	VDLUFA (1997)

LF = elektrische Leitfähigkeit; TM = Trockenmasse; oTM = organische Trockenmasse; org. S. = organische Säuren; NH_4-N = Ammonium-Stickstoff; N_{Ges} = Gesamtstickstoff;

II.2.3 Vorversuche

Um einen einfachen Ablauf beim Ein- und Ausschleusen sowie einen zeitgleichen Austausch der Keimträger zu ermöglichen, wurden 10 zusätzliche Rührstäbe mit jeweils in 3 unterschiedlichen Höhen angebrachten Plexiglas-Rührblätter in der eigenen Werkstatt angefertigt. Wie bereits im **Abschnitt II.2.1** erwähnt, wurde jedes Rührblatt mit drei kreisrunden Bohrungen versehen (vgl. **Bild II.2.1-2**). Diese Löcher in den Paddeln gestatten eine sichere und schnelle Aufnahme und Befestigung der Keimträger. Vor dem Einsatz im Hauptversuch wurden die Keimträger auf grundsätzliche Dichtigkeit (durch JKI-Kleinmachnow) und mechanische Beständigkeit bei Rotation (ATB) geprüft. In einem weiteren Vorversuch war die Permeabilität der Abschlussmembranen zu untersuchen. Der zuletzt aufgeführte Untersu-

chungsaspekt stellt eine Abweichung vom ursprünglichen Versuchsplan dar, wurde aber auf Anregung der Experten (Expertengespräch vom 04.09.09 in Fulda) in das Versuchsprogramm aufgenommen.

II.2.3.1 Stabilitätsprüfung Keimträger

Für die Bearbeitung der Fragestellung, ob die Keimträgermembranen der Belastung durch Feststoffpartikel widerstehen, wurde hartfaseriges Pflanzenmaterial (Mais frisch; **Tab. II.2.4.2-1**) verwendet. Nach Befüllen des Laborreaktors (R5) mit Fermenterinhalt (**Tab. II.2.4.2-1**) erfolgte auf zwei aufeinander folgenden Tagen die Zugabe von jeweils 200 g des frischen Kosubstrats. Der Reaktor wurde mit 9 Keimträgern – ebenfalls mit Fermenterinhalt gefüllt – beschickt und in Betrieb genommen. In den folgenden 7 Tagen wurde der Fermenter unter Extrembedingungen wie häufiges Anfahren (15 min/15 min) und auf hohe Drehzahl (150 min^{-1}) gefahren. Die Sichtprüfung ergab, dass die Keimträger sowohl bei einem hohen Feststoffanteil als auch bei gesteigerter Rotation eine sehr gute mechanische Beständigkeit aufweisen (vgl. **Bild II.2.3.1-1)**.

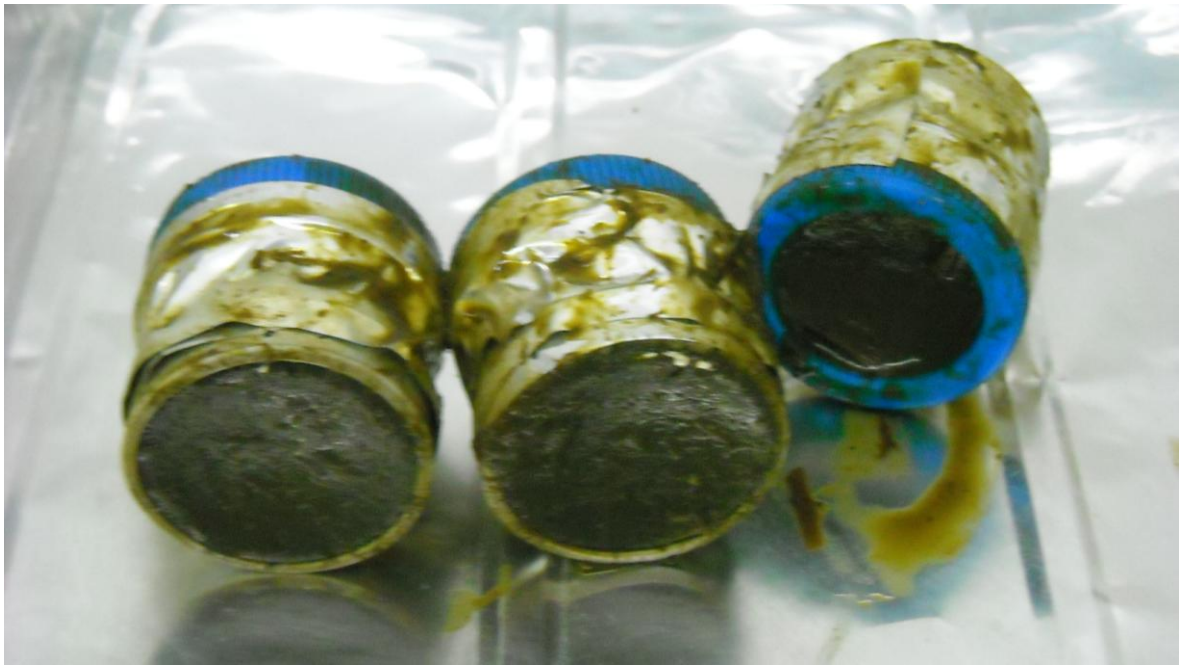

Bild II.2.3.1-1: Unbeschädigte Keimträgermembranen (Stabilitätsprüfung)

II.2.3.2 Stoffaustausch Keimträger

Im Hauptversuch sollten in Abhängigkeit der zu untersuchenden Wirt-Pathogen-Systeme Keimträger mit unterschiedlichen Membranweiten zum Einsatz kommen. DeshaIb wurde im Rahmen dieses Vorversuchs geprüft, ob bei den unterschiedlichen Porengrößen ein Austausch zwischen Keimträger und Fermenterinhalt stattfindet. Es galt zu belegen, dass die bei der Vergärung und Silierung entstehenden Säuren durch die Membran in den Keimträger eindringen können bzw. im Keimträger keine Übersäuerung entsteht.

Als „Modellsäure“ für den Test auf Matrixaustausch Keimträger/Reaktorinhalt wurde Valeriansäure ($C_5H_{10}O_2$) gewählt, da sich diese durch eine etwas höhere Stabilität als Milch- und Buttersäure auszeichnet und nicht so schnell abgebaut wird. Die 9 Keimträger des Fermenter I wurden mit Valeriansäure (10 g l^{-1}) befüllt. Für den Fermenterinhalt (Fermenter II) wurde eine Valeriansäurekonzentration von 2 g l^{-1} gewählt, um eine optimale Wiederfindung bei der GC-Analyse zu gewährleisten. Die Versuchsanordnung mit den Keimträgerpositionen und jeweiligen Membranweiten ist in **Bild II.2.3.2-1** dargestellt.

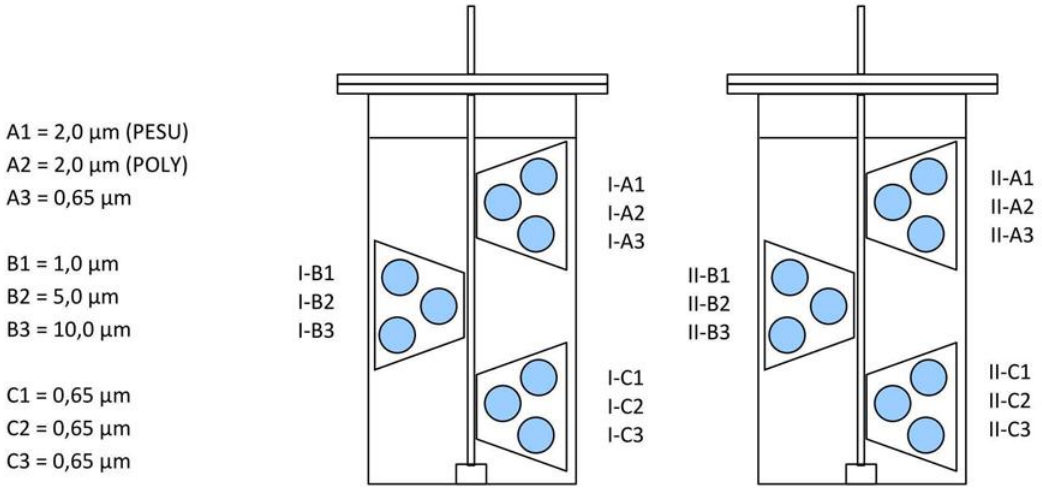

Bild II.2.3.2-1: Versuchsanordnung zur Prüfung der Membranpermeabilität bei unterschiedlichen Porengrößen und Membranherstellern.

Der Vorversuch wurde mit den Standardeinstellungen des Hauptversuchs (Rührzeit 15 min^{-1}; Drehzahl 50 min^{-1}) gefahren. Nach 6 h, 24 h und 72 h wurde jeweils ein Keimträger aus jeder Höhe sowie eine Probe des Fermenterinhalts genommen und auf pH-Wert und Säurespektrum analysiert.

Die Ergebnisse beider Versuchsansätze belegen eine sehr hohe Membranpermeabilität und einen guten Stoffaustausch im untersuchten Porenbereich. In den Keimträgern des Fermenter I konnte keine Übersäuerung festgestellt werden. Zum Versuchsstart wurde für den Reaktorinhalt ein pH-Wert von 7,9 und für die Valeriansäure in den Keimträgern (10 g l^{-1}) ein pH-Wert von 3,0 gemessen. Bereits nach 6 h betrug der pH-Wert in den untersuchten Keimträgern 8,6 oder 8,7 und diese Werte wurden ebenfalls für die 24 h- und 72 h-Proben gemessen. Auch der pH-Wert des Fermenterinhalts war über den Untersuchungszeitraum konstant (8,0). Zwischen der Reaktorflüssigkeit und der in den Keimträgern stellte sich ein Gleichgewicht der Valeriansäurekonzentrationen ein. Nach 24 h wurde in beiden Matrices ein Wert von 0,12 bzw. 0,14 g l^{-1} bestimmt.

II.2.4 Hauptversuch

Die Konzeption, Planung und Durchführung des Hauptversuches erfolgte in enger Absprache und Zusammenarbeit mit den Projektpartnern.

II.2.4.1 Schadorganismen

Für die Einschleusungen im Hauptversuch wurden die Schaderreger *Fusarium culmorum, Fusarium avenaceum, Fusarium proliferatum, Fusarium verticilloides, Rhizoctonia solani, Alternaria spp., Claviceps purpurea, Potato virus Y, Beet necrotic yellow vein virus, Clavibacter michiganensis ssp. Sepedonicus und Synchitrium endobioticum* ausgewählt. Aufgrund starken Auftretens im Jahr 2009 erfolgte die zusätzliche Aufnahme von *Tilletia caries* (Weizensteinbrand) in das Versuchsprogramm.
Die Umgangsgenehmigungen für die Quarantäneschadorganismen *Clavibacter michiganensis ssp. sepedonicus* und *Synchytrium endobioticum* wurden mit dem Projektpartner JKI-Kleinmachnow erarbeitet und durch das ATB eingereicht. Die Genehmigung erteilte der Pflanzenschutzdienst des Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung, Frankfurt (Oder).
Die Projektpartner hatten sicherzustellen, dass zum festgelegten Zeitpunkt geeignetes infektiöses Pflanzenmaterial (frisch, siliert) in ausreichender Menge zur Verfügung stand. Für die Versuchsdurchführung wurden folgende Parameter festgelegt:
3 Expositionszeiten (6 h, 24 h, 138 h)
3 Gärrest-Lagerzeiten (0 h, 4 Wochen, 6 Monate) bei 20°C
2 Wiederholungen

Die Abfolge der Einschleusungen (vgl. **Tab. II.2.4.3-1**) für die Erreger wurde unter den Versuchsanstellern abgestimmt, unter der Maßgabe, montags Vorbereitungstag, dienstags Beginn der Einschleusungen der Schadorganismen.

Die Ein- und Ausschleusungen (**Anhang, Tab. A1**) erfolgten zu den vereinbarten Terminen zwischen 7:30 und 19.00 Uhr, wobei die Mitarbeiter des ATB das Öffnen der Fermenter, Einbringen der Rührer mit den am Rührpaddel angebrachten Keimträgern in den Reaktor sowie das Verschließen der Reaktoren übernahmen.

Je nach Ergebnislage wurden die Expositionszeiten im weiteren Versuchsverlauf z.T. erregerspezifisch modifiziert (s**. Anhang, Tab. A1**).

II.2.4.2 Substrate

Die bei den kontinuierlichen Versuchen eingesetzten Basis- und Kosubstrate sind in **Tab. II.2.4.2-1** in einer Übersicht zusammengestellt. Die Basissubstrate wurden für das Befüllen der Fermenter und für die Fütterung während der Einfahr- und Einschleusephasen verwendet. Weiterhin wurden den Projektteilnehmern Frischgülle und Fermenterinhalte für Vorversuche (z.B. Materialbeständigkeit und Dichtigkeit der Keimträger), für die Versuchsvariante Keimträger-Lagerung und zum Befüllen der Transportboxen der Keimträger überlassen.

Die Fütterungssubstrate für die kontinuierliche Vergärung wurden in den notwendigen Mengen und Qualitäten (vgl. **Tab. II.2.4.2-2**) durch Projektpartner bereitgestellt. Die unterschiedlichen Substrattypen wurden entweder bei den Partnern oder vor Ort bevorratet. Mit Ausnahme von Kartoffel, Zuckerrübe und Getreidekorn wurden die Frischmassen und Silagen bis kurz vor der Verwendung tiefgefroren gelagert. Kartoffel, Zuckerrübe und Getreidekorn wurden für die Vergärung praxisüblich aufbereitet, d.h.

Kartoffelknolle: häckseln (Tischkutter *Robot Coupe R10* [6] 3000 U/min; 3 x 2 Sekunden
Zuckerrübenkörper: häckseln und musen (Küchenmaschine Typ: *Gastroback advanced* mit Fleischwolfaufsatz; Sieb mit Lochdurchmesser 4 mm)
Getreidekorn: schroten (Getreidemühle *Neuhaus Neotec*[7]; Spaltbreite der Schneidwalzen 0,2 mm

Wöchentlich wurden die aufgetauten bzw. aufbereiteten Substrate in Tagesrationen abgewogen und bei +5°C zwischengelagert. Die Qualität der Substrate sowie einzelner Chargen wurde während des Versuchszeitraums mehrfach untersucht und kontrolliert. Die Analysenergebnisse belegen repräsentative, praxisübliche Substratqualitäten, die sich im Zeitverlauf nicht deutlich verändert haben

[6] http://www.gastroback.de

[7] http://www.neuhaus-neotec.de

Tab. II.2.4.2-1: Übersicht der verwendeten Substrate

Substrate	Bezeichnung	Verwendung	Herkunft
Basissubstrate	Fermenterinhalt 22.10.09	Vorversuch Stoffaustausch Vorversuch Stabilitätsprüfung	Gärrestlager Biogasanlage Rhinmilch GmbH
	Fermenterinhalt 22.10.09	Hauptversuch - Befüllen der Fermenter	Nachfermenter Biogasanlage Rhinmilch GmbH
	Frischgülle 1. Charge 11.11.09	Hauptversuch - Fütterung Einfahrphase	Milchviehstall Rhinmilch GmbH
	Frischgülle,verdünnt 2. Charge 17.12.09	Hauptversuch - Fütterung Einschleusung	Milchviehstall Rhinmilch GmbH
	Frischgülle 3. Charge 28.01.10	Hauptversuch - Fütterung Einschleusung ab 01.02.2010	Milchviehstall Rhinmilch GmbH
Kosubstrate	Mais frisch	Vorversuch Stabilitätsprüfung Hauptversuch R1, R2	Mais-Ganzpflanze gehäckselt; HUB, Lehr- und Forschungs-station Standort Dahlem; Sortenversuch geerntet am 22.09.09
	Mais siliert	Hauptversuch R3, R4	Mais-Ganzpflanze; Praxis-silage; geerntet und siliert 09.09.09
	Getreide GP frisch	Hauptversuch R2	Getreide-Ganzpflanze (Gerste, Roggen, Weizen), Gewächs-haus JKI-BS; Ernte im Stadium der Milchreife am 21.01.2010
	Getreide GP siliert	Hauptversuch R3	Roggen-Ganzpflanze, Praxis-silage; geerntet und siliert am 11.06.09 mit Siliermittel BIOSIL
	Kartoffel frisch	Hauptversuch R5	Kartoffelknolle (Öko) Parzel-lenversuch Dahnsdorf, JKI-VKD; geerntet am 22.09.09
	Rübe frisch	Hauptversuch R6	Zuckerrübenkörper; Praxisfläche, geerntet am 23.09.09 JKI-BS
	Hirse frisch	Hauptversuch R7	Hirse-Ganzpflanze (*Sorghum sudanense,* Sorte Lussi) gehäckselt; HUB, Lehr- und Forschungsstation Standort Dahlem; geerntet am 22.09.09
	Hirse siliert	Hauptversuch R8	Hirse frisch; Modellsilierung Fass
	Korn frisch	Hauptversuch R9, R10	Winterroggen (50%), Winter-weizen (50%); Parzellenver-suche, geerntet am 28.07.09 (JKI-BS)

Tab. II.2.4.2-2: Chemische und physikalische Eigenschaften der Basis- und Kosubstrate für die kontinuierliche Vergärung

Substrate	**Bezeichnung** Analysedatum	**pH**	**LF** $mS \cdot cm^{-1}$	**TM** %	**oTM** % TM	**org. S.** $g \cdot kg_{FM}^{-1}$	**NH_4-N** $g \cdot kg_{FM}^{-1}$	**N_{Ges}** $g \cdot kg_{FM}^{-1}$
Basissubstrate	Fermenterinhalt							
	22.10.09	7,9	20,9	5,3	71,8	2,37	2,4	4,1
	Fermenterinhalt							
	22.10.09	7,9	19,9	5,4	71,1	0,95	2,2	3,9
	Frischgülle							
	1. Charge 11.11.09	7,4	15,8	8,4	78,3	8,24	1,8	3,9
	Frischgülle, verdünnt							
	2. Charge 17.12.09	7,3	14,7	9,0	81,3	6,29	1,5	3,8
	Frischgülle							
	3. Charge 28.01.10	6,9	14,2	7,9	81,2	7,79	1,5	3,5
Kosubstrate	Mais frisch							
	24.09.09	5,4	1,3	30,5	95,3	0,49	0,03	3,3
	14.01.10	5,8	1,2	34,1	95,8	0,38	0,05	4,3
	28.01.10	5,8	1,1	33,4	95,7	0,53	0,03	3,6
	Mais siliert							
	04.11.09	3,9	1,1	26,5	92,4	3,58	0,16	2,8
	07.01.10	3,8	1,2	32,6	95,9	4,60	0,18	3,4
	28.01.10	3,8	1,3	32,7	95,8	4,65	0,17	4,1
	Getreide GP frisch							
	26.01.10	6,2	1,9	12,4	95,6	0,35	0,05	3,4
	Getreide GP siliert							
	07.01.10	3,6	1,6	29,9	96,2	7,12	0,41	5,0
	Kartoffel frisch							
	21.10.09	6,4	0,9	21,9	94,9	0,34	0,03	3,29
	07.01.10	6,5	0,9	21,5	95,6	-	0,03	3,82
	08.03.10	6,5	0,6	21,6	95,2	0,25	0,01	3,70
	Rübe frisch							
	21.10.09	4,8	0,5	25,2	97,6	2,07	0,03	1,84
	14.01.10	4,6	0,3	34,9	98,3	0,55	<2 mg	1,84
	Hirse frisch							
	24.09.09	5,3	0,7	24,7	94,5	0,45	0,01	2,38
	14.01.10	5,7	1,0	24,1	94,1	0,31	<2 mg	2,43
	Hirse siliert							
	12.11.09	4,1	1,1	22,5	93,2	3,74	0,08	1,94
	Korn frisch							
	Weizen 21.10.09	6,7	0,4	85,5	98,6	0,17	0,02	17,4
	Weizen 07.01.10	6,6	0,5	84,7	98,5	0,33	0,03	17,8
	Roggen 21.10.09	6,8	0,5	86,8	98,2	0,39	0,02	15,2
	Roggen 07.01.10	6,8	0,7	84,5	98,3	0,17	0,03	15,0

LF = elektrische Leitfähigkeit; TM = Trockenmasse; oTM = organische Trockenmasse; org. S. = organische Säuren; NH_4-N = Ammonium-Stickstoff; N_{Ges} = Gesamtstickstoff;

II.2.4.3 Prozessführung

Die kontinuierliche Vergärung wurde in KW 46 (2009) mit der Anfahrphase gestartet, wobei die einzelnen Substrattypen auf die 10 Reaktoren (s. **Tab. II.2.4.3-1**) verteilt wurden. Nach Erreichen der gewünschten Raumbelastung (B_R = 3 g oTM·l^{-1}·d^{-1}) und einer mehrwöchigen Stabilisierungsphase erfolgten die Einschleusungen der Probenträger in den KW 1 bis KW 21 (2010). Reaktor 6 musste aufgrund von Substratbedingter starker Schaumbildung bei einer reduzierten Raumbelastung von B_R = 1,5 g oTM·l^{-1}·d^{-1} betrieben werden. Ab der KW 5 (2010) erfolgte die Umstellung zweier Fermenter Mais auf Getreide GP frisch bzw. siliert. Wegen Problemen bei der Einbringung wurde die Fütterungsmenge der Getreide-Ganzpflanze (frisch) zur KW 8 leicht auf B_R = 2,0 g oTM·l^{-1}·d^{-1} abgesenkt. Mit der KW 17 erfolgte die Erhöhung der Raumbelastung der Reaktoren R3 (Getreide-Ganzpflanzensilage), R4 (Mais-Ganzpflanzensilage), R8 (Hirse-Ganzpflanzensilage) auf 4,5 g oTM·l^{-1}·d^{-1}. Bei den Reaktoren R3 und R4 wurde allerdings durch den verantwortlichen Projektpartner auf eine Einschleusung verzichtet. Die Einschleusungen in den Reaktor 8 wurden in den KW 20 und KW 21 (2010) vorgenommen. Mit der letzten Entnahme der Probenträger am 01.06.2010 (KW 22) wurde die Versuchsphase beendet.
Die jeweiligen Belastungsstufen wurden mit den Kosubstraten und einer täglichen Zugabe von ca. 117 g FM Rindergülle pro Reaktor eingestellt (**Tab. II.2.4.3-1)**.

Tab. II.2.4.3-1: Tägliche Futterrationen der Kosubstrate für die unterschiedlichen Belastungsstufen

Kosubstrate in g FM·d^{-1}		**Raumbelastung B_R in g oTM · l^{-1} · d^{-1}**			
Fermenter	Bezeichnung	B_R = 3	B_R = 3,5	B_R = 4	B_R = 4,5
R1	Mais frisch	69,7	-	-	-
R2	Mais frisch	69,7	-	-	-
R2	Getreide GP frisch	128,1*)	-	-	-
R3	Getreide GP siliert	69,9	85,7	101,6	117,4
R3	Mais siliert	64,8	-	-	-
R4	Mais siliert	64,8	79,5	94,2	108,9
R5	Kartoffel frisch	100,1	-	-	-
R6	Rübe frisch	81,8 / 40,9**)	-	-	-
R7	Hirse frisch	86,6	-	-	-
R8	Hirse siliert	96,6	118,5	140,4	162,3
R9	Korn frisch***)	12,1 + 11,9	-	-	-
R10	Korn frisch***)	12,1 + 11,9	-	-	-

*) Reduzierung der Ration (B_R = 2) ab dem 25.02.10
**) Halbierung der Ration (B_R = 1,5) ab dem 22.12.09
***) 50% Weizen, 50% Roggen

Anhand der zeitlichen Verläufe der erzeugten Biogasmenge bzw. der Methangehalte lässt sich trotz der Vielzahl an Fermenteröffnungen eine stabile Betriebsweise der Reaktoren ableiten. Die Schwankungen in der Gasproduktion resultieren aus der sonntäglichen Nicht-Fütterung (**Bild II.2.4.3-1**).
Während des Versuchszeitraums schwankte der Methangehalt des Biogases zwischen 40% und 50%. Nach Korrektur des Lufteintrags betrug der mittlere Methangehalt der zehn Reaktoren zwischen 51% und 54%.
Die Öffnung der Reaktoren zur Einschleusung führte jeweils zu einer geringen Abnahme des Methan- und Kohlendioxidgehalts und gleichzeitiger Zunahme des Sauerstoffgehalts. Dieser lag nach längerer ungestörter Phase unter 0,5% und stieg nach Öffnung der Reaktordeckel auf 1% bis 2% an. Ausnahmen bildeten hier einige Einschleusungen in den Reaktoren R1 und R2, bei denen an zwei Einschleuseterminen der Sauerstoffgehalt auf bis zu 14% anstieg. Der Verlauf der Biogasbildung zeigt jedoch, dass hiervon keine Störung der Vergärung ausging, sondern lediglich ein kompletter Austausch des Biogases im Kopfraum mit Umgebungsluft stattfand.

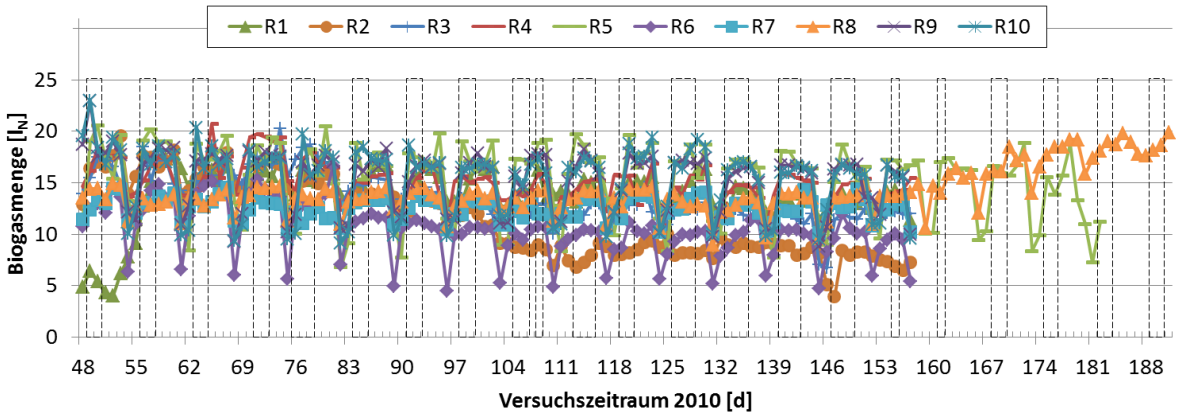

Bild II.2.4.3-1: Biogasbildung in den einzelnen Reaktoren. Gestrichelte Linien: Zeiträume mit Einschleusungen

Die Analysen der Gärreste zeigten ebenfalls einen stabilen Vergärungsprozess. Die Gehalte an TM schwankte über alle Reaktoren zwischen 5% FM und 6% FM. Diese Schwankungen zeigten keinen Unterschied zwischen Anfahr- und Einschleusephase. Die flüchtigen Fettsäuren bewegten sich im Mittel zwischen 1,3 und 2,7 g·kg FM^{-1} bei geringer Schwankungsbreite.

Bild II.4.3-1: Übersicht der Zeitplanung und Reaktorbelegung im Versuchszeitraum 2010

		Januar				Februar				März					April					Mai		
	KW	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21/22
		04.01.10	11.01.10	18.01.10	25.01.10	01.02.10	08.02.10	15.02.10	22.02.10	01.03.10 05.03.10	08.03.10 11.03.10 12.03.10	15.03.10 16.03.10	Mo.22.03.2010 Di.23.>9:00/15:00 Mi.24.>9:00/15:00 Do.25.>15:00	Mo.29.03.2010 Di:30.>R10:9:00/15:00 Mi.31.>9:00/15:00 Do.1.4.>15:00	Mo.05.04.2010, Di:06.>9:00/11:00/ 15:00/17.00 Mi.07.>9:00/15:00 Do.08.>9:00/15:00	Mo.12.04.2010>9:00; Di.13.>11:00/17:00 Mi.14.>8:00/9:00/ 15:00/17:00 Do.15.>9:00/15:00 Fr.16.>9:00	Mo.19.04.2010, Mi.21.>8:00/9:00/ 14:00/17:00 Do.22.>14:00	Mo.26.04.10 Mi.28.>7:30 Do.29.>7:30/17:30 Fr.30.>7:30	Mo.03.05.2010, Di.04.>9:00/15:00 Mi.05.>15:00	Mo.10.05.2010 bis So.16.05.2010	Mo.17.05.2010 bis So. 23.05.2010 Belastungs-versuche	Mo.24.05.2010 bis Di. 01.06.2010 Belastungs-versuche
R	Raumb.	B_R = 3	B_R = 3	B_R = 3	B_R = 3	B_R = 3	B_R = 3	B_R = 3	B_R = 3	B_R = 3	B_R = 3	B_R = 3	B_R = 3	B_R = 3	B_R = 3	B_R = 3	B_R = 3	B_R = 3,5	B_R = 4	B_R = 4,5	B_R = 4,5	B_R = 4,5
1	Mais frisch	ausgesetzt			F. verticillioides	F. avenaceum									R. solani 3. Wh.							
2	Mais frisch / Getr. GP frisch	F. culmorum		R. solani		Umstellung des Fermenters auf Getreideganzpflanze, frisch					A.alternata		F. avenaceum		F. verticillioides		Mi:9:00(138h†)					
3	Mais siliert / Getr. GP siliert	F. avenaceum		F. verticilloides		Umstellung des Fermenters auf Getreideganzpflanze, siliert					A.alternata		F. avenaceum		F. verticillioides		Mi:9:00(138h†)	Belastungssteigerung				
4	Mais siliert	F. culmorum		R. solani			R. solani 3. Wh.	F. culm. 3. Wh.														
5	Kartoffel frisch	Cms		R.solani		PVY		S. endobioticum			Cms 3. Wh.	Wh. 24 h	S. endobioticum		R. solani (3 Häckselängen)			Cms Mi(7:30)9x 24h	PVY Di(9Uhr):9x 6h	S. endobioticum		
6	Rübe frisch	S. sclerotiorum		S. sclerotiorum Sklerotien		Rhizomania **entfällt**										S. sclerotiorum (3 Häckselllängen)						
7	Hirse	F. proliferatum		F. verticillioides											F. verticillioides (3 Häckselängen)	F. proliferatum (3 Häckselängen)						
8	Hirse siliert	F. proliferatum		F. verticillioides														Belastungssteigerung			F. proliferatum	F. verticillioides
9	Korn frisch	C. purpurea		F. avenaceum		Tilletia		F. culm. 3. Wh.		Tilletia 3. Wh.				F. culmorum (ganzes Korn)		F. culmorum (ganzes Korn)						
10	Korn frisch	A. alternata		F. culmorum					A. alternata 3. Wh.	A. alternata 3. Wh.		A. alternata 3. Wh.	A. alternata	F. culmorum (grob zerkl. Korn)		F. culmorum (grob zerkl. Korn)						

JKI Braunschweig JKI Kleinmachnow HU-Berlin

II.3 Praxisversuche

II.3.1 Versuchsanlage

Bei der Biogasanlage für die Praxisversuche handelt es sich um eine mesophil betriebene einstufige Durchflussanlage. Als Fermenter dient ein stehender Rundbehälter (800 m³), der mit einer Betondecke ausgestattet ist. Die Substratmischung umfasst Schweinegülle und Maissilage, die im stündlichen Intervall dem Fermenter zugeführt werden.
Der Fermenter wird dabei mit einer durchschnittlichen Raumbelastung von ca. 5 g $oTM \cdot l^{-1} \cdot d^{-1}$ gefüttert, wobei eine Verweilzeit von 35 Tagen erzielt wird. Die Durchmischung des Gärguts erfolgt im Fermenter über nieder-tourig laufende Rührwerke. Dazu sind jeweils ein Paddel- sowie ein Langachs-Rührwerk installiert, die alternierend betrieben werden. Als Gärrestlager (1200 m³) wird ein stehender Rundbehälter aus Beton verwendet, dessen Folienhaube gleichzeitig als Gasspeicher dient. Zur Reduzierung der benötigten Lagerkapazität wird ein Pressschneckenseparator zur Fest-/Flüssigtrennung des Gärrestes eingesetzt. Die Gasnutzung erfolgt über ein Zündstrahlaggregat mit einer Nennleistung von 250 kW_{el}.

II.3.2 Konstruktion und Bau von Probenträger und Probenhalter

Die Vorrichtung zur Einschleusung der Probenträger bestand aus einer ortsfest installierten modifizierten Fermenterabdeckung sowie zwei mobilen Probenhaltern (**Bild II.3.2-1**). Konstruktion und Bau der Probenhalter sowie die Modifizierung der Abdeckung erfolgten durch die Bioenergie Beratung Bornim GmbH (B³) und der ATB eigenen Werkstatt.

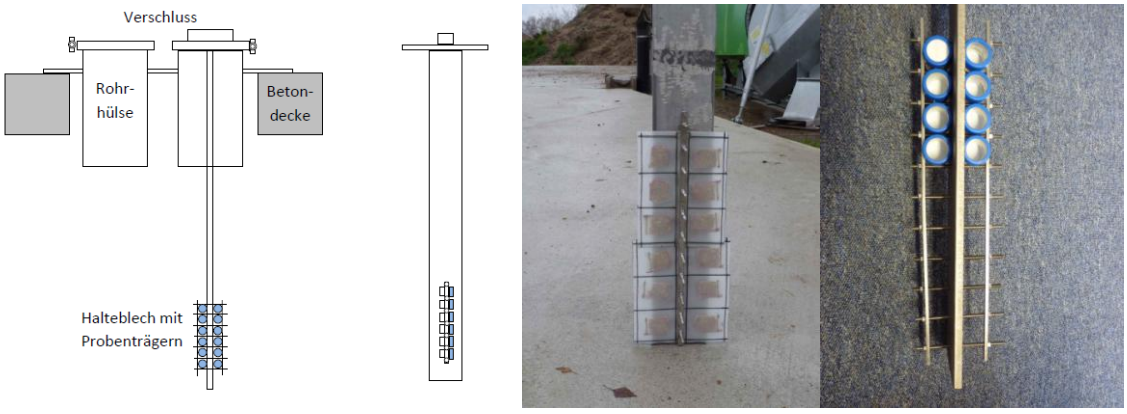

Bild II.3.2-1: links: Prinzipskizze der Trägerkonstruktion und des Probenhalters; rechts: Halterungen der Probenträger/Probenbeutel

Als Probenhalter diente ein Edelstahlblech (1745 x 100 mm). Im Eintauchbereich standen je Probenhalter 2 x 10 Messplätze für die Probenträger zur Verfügung. Die Befestigung der Probenträger erfolgte über durchgehende Gewindestäbe und Haltebleche. Als Einhängepunkt dienten zwei in die Fermenterabdeckung eingelassene Rohrhülsen.

Mittels Verschlussklammern konnten die Probehalter über Flansche lagestabil fixiert und auf die Strömungsrichtung im Fermenter angepasst werden (**Bild II.3.2-2**).

Bild II.3.2-2: Modifizierte Fermenterabdeckung mit Trägerkonstruktion

Für die Einschleusung der Unkrautdiasporen wurden anstatt der Keimträger Gazebeutel verwendet. Um die Durchströmung mit Fermenterflüssigkeit zu gewährleisten, wurde der Versuchsaufbau leicht modifiziert und zusätzliche Abstandhalter zwischen Probenbeutel und Probenhalter eingesetzt.

II.3.3 Einschleusungen

Die Einschleusung der Phytopathogenen erstreckte sich über zwei Versuchsreihen (KW 42-43 sowie KW 48-49). Die Durchführung der Versuche mit den Unkrautdiasporen erfolgten im direkten Anschluss in den KW 49-51 (2010).
Die erste Versuchsreihe beinhaltete die Erreger *Fusarium proliferatum* und *Fusarium verticillioides* jeweils unbehandelt und siliert (21 d und 35 d) mit Expositionszeiten von 6 h, 24 h und 138 h, sowie den Erreger *Sclerotinia sclerotiorum*, unbehandelt mit einer Expositionszeit von 6 h. Je Variante wurden 10 Probenträger verwendet und eine Wiederholung durchgeführt.
In der zweiten Versuchsreihe wurden die Erreger *Fusarium proliferatum* (unbehandelt/ 70 d Silierdauer) und *Fusarium verticillioides* (unbehandelt/ 49 d silierdauer) bei Expositionszeiten von 48 h, 72 h und 96 h getestet. Hier wurden bei einer Wiederholung je Variante 5 Probenträger verwendet.
Die Durchführung der Versuche mit den Unkrautdiasporen erfolgten im direkten Anschluss in den KW 49-51 (2010). Getestet wurden *Abutilon theophrasti* Population Deutschland 2003 (ABUTH-D2003), *Abutilon theophrasti* Population Spanien 2008 (ABUTH-ES2008), *Chenopodium album* (CHEAL), *Lycopersicon esculentum* (LYCES), *Malve neglecta* (MALNE), *Fallopia convolvulus* (POLCO). Die Expositionszeiten betrugen 24 h, 72 h, 14 h und 216 h bei einer Wiederholung.

II.3.4 Anlagenmonitoring Praxisanlage

Das Monitoring der Biogasanlage wurde zehn Kalenderwochen vor Versuchsbeginn aufgenommen. Dies entspricht ca. zwei Verweilzeiten. Der Beobachtungszeitraum endete zum Ende des Jahres 2010 und belief sich damit auf insgesamt 21 Kalenderwochen.

Bei nahezu konstanten Fütterungsmengen setzte sich die Substratmischung anteilig zu je 50% der Frischmasse aus Schweinegülle und Maissilage zusammen.
Analysen des Fermenters wurden durch den Anlagenbetreiber in 14-tägigen Abstand auf die Parameter Essigsäure, Propionsäure, Ammonium-Stickstoff sowie pH-Wert untersucht. Die Verläufe von Fermentertemperatur und pH-Wert weisen auf einen störungsfreien Betrieb hin (**Bild II.3.4-1**).

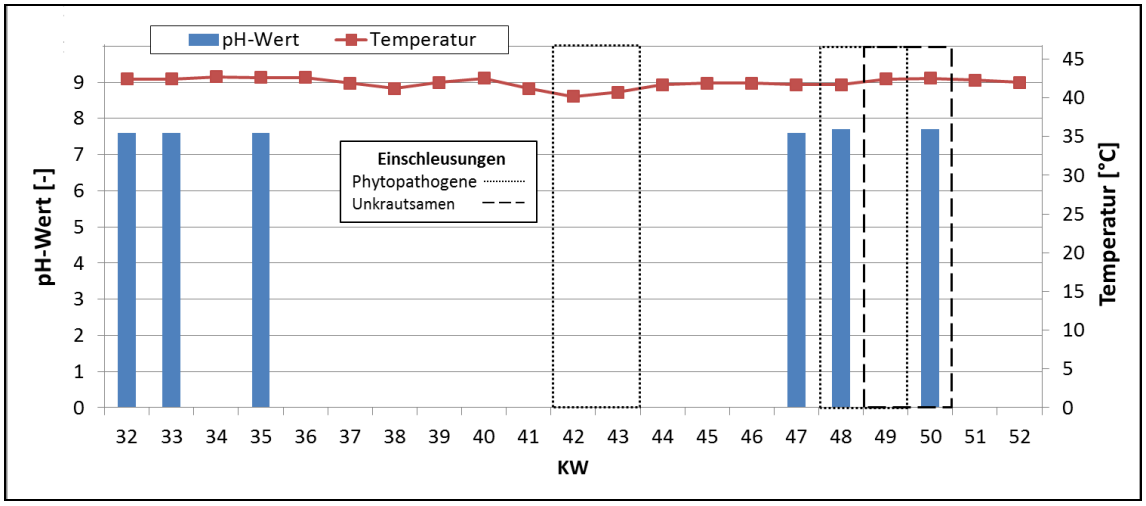

Bild II.3.4-1: Entwicklung von Temperatur und pH-Wert mit Einschleusezeiten in der Praxisanlage Gestrichelte Linien: Zeiträume mit Einschleusungen.

Die Essigsäurekonzentration bewegte sich zwischen 0,1 g/l und 1,6 g/l. Im Durchschnitt wurden 0,6 g/l, ermittelt. Propionsäure konnte im Beobachtungszeitraum nicht nachgewiesen werden. Bei Ammonium-Stickstoff wurde ein Spitzenwert von 3,4 g/l bei mittleren 2,4 g/l ermittelt. Insgesamt blieben sowohl Essigsäure als auch Ammonium-Stickstoff in normalen Bereichen.

II.4 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Aus der Bewertung der Ergebnisse lässt sich folgendes Fazit ziehen: Die Durchführung der Einschleuseversuche im Labor kann aus Sicht des Fermenterbetriebs als erfolgreich betrachtet werden. Die Störungen durch das Einschleusen führten zu keiner nennenswerten Beeinträchtigung der Vergärung, sodass die Einschleusung der unterschiedlichen Erreger in einer dichten zeitlichen Folge durchgeführt werden konnte und somit eine optimale Ausnutzung der Fermenter möglich war. Die abschließende Steigerung der Raumbelastung und somit das Heranführen an eine extreme Betriebsweise ermöglichte das Austesten der phytosanitären Wirkung der Vergärung unter Störungsbedingungen. Weiterhin wurden durch die Versuche in den Laborfermentern die Voraussetzungen gelegt, um die Versuche in Praxisanlagen zielgerichtet durchführen zu können.
Für den ausgewählten Fermenter konnte somit eine geeignete Methode zur Einschleusung von Phytopathogenen via Probenträger entwickelt werden. Hierzu wurde eine Vorrichtung zur Arretierung und Einschleusung via mobilen Probenhalter konzipiert und eine ortsfest installierte Fermenterabdeckung modifiziert. Die im Hinblick auf verwertbare und reproduzierbare Ergebnisse wichtige vollständige Durchströmung der Probenträger konnte auch unter Praxisbedingungen gewährleistet werden. Sowohl das Einbringen der Probenträger in den Fermenter als auch das Wiederfinden der Probenbehälter funktionierte komplikationslos und ohne Beschädi-

gung bzw. Verluste von Probenträgern. Art und Größe der Fermenteröffnung erlaubte eine zügige Beprobung. Der häufige Ein- und Ausbau der Probenhalter konnte somit problemlos in den laufenden Anlagenbetrieb integriert werden.

Aus den im Rahmen des Verbundprojektes gewonnenen Untersuchungsergebnissen wurden in Verbindung mit Ergebnissen anderer Untersuchungen erste Empfehlungen zur Vergärung von NawaRos unter phytohygienischen Aspekten abgeleitet (vgl. KTBL (2012); S. 84).

II.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Ergebnisse anderer Untersuchungen werden ausführlich in der KTBL-Sonderveröffentlichung (2012) dargestellt und diskutiert. In Bezug auf die Arbeitsschwerpunkte des Teilvorhabens 3 ist festzuhalten, dass neue methodische Ansätze bzw. Entwicklungen zum Einschleusen von Pathogenen in den Biogasprozess nicht bekannt sind. Hingegen konnten im Rahmen des EVA-Verbundvorhabens (FKZ 22002605) weitere Erkenntnisse in Bezug auf Ernte und Silierung pflanzlicher Substrate für die Biomethanisierung gewonnen werden (Herrmann 2010; Herrmann et al. 2011a, Herrmann et al. 2011b).

II.6 Literaturverzeichnis

DIN (2006): Deutsches Institut für Normierung e.V., (Norm-Entwurf) DIN EN ISO 16634, Standard 2006-07. Cereals, pulses, milled cereal products, oilseeds and animal feeding stuffs - Determination of the total nitrogen content by combustion according to the Dumas principle and calculation of the crude protein content. Beuth-Verlag, Berlin.

DIN (1987): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser- Abwasser und Schlammuntersuchung DIN 38409 H21, DIN EN 27888, 1987. Physikalische, chemische, biologische Verfahren. Band 5. 62. Beuth-Verlag, Berlin.

DLG (2006): DLG-Ausschuss für Futterkonservierung. Grobfutterbewertung. Teil B: DLG-Schlüssel zur Beurteilung der Gärqualität von Grünfuttersilagen auf der Basis der chemischen Untersuchung. DLG e.V. (Hrsg.): DLG-Information 2/2006, 5 S.

DLG (2000): DLG-Zertifizierungsstelle für Produkte und Personal. DLG-Richtlinien für die Prüfung von Siliermitteln auf DLG-Gütezeichen-Fähigkeit. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 16 S.

Herrmann, C. (2010): Ernte und Silierung pflanzlicher Substrate für die Biomethanisierung – Prozessgrundlagen und Bewertung. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, Cuvillier Verlag Göttingen, ISBN: 978-3-86955-535-5, S. 332.

Herrmann, C.; Heiermann, M.; Idler, C. (2011a): Effects of ensiling, silage additives and storage period on methane formation of biogas crops. Bioresource Technology, doi:10.1016/j.biortech.2011.01.012, 102 (2011), p. 5153-5161.

Herrmann, C.; Prochnow, A.; Heiermann, M. (2011b): Influence of chopping length on capacities, labour time requirement and costs in the harvest and ensiling chain of maize. Biosystems Engineering, doi:10.1016/j.biosystemseng.2011.09.004, 110 (3), p. 310-320.

Kämmerer, D., Büttner, P., Seigner, L., Friedrich, R. (2008): Phytopathogene im Biogasprozess. Mitteilungen aus dem Julius-Kühn-Institut 417, 239-240.

KTBL (Hrsg.) (2012): Untersuchungen zum phytosanitären Risiko bei der anaeroben Vergärung von pflanzlichen Biomassen in Biogasanlagen. KTBL-Fachgespräch, 11.11.2011, Berlin. KTBL-Sonderveröffentlichung, 88 S.

VDI Fachausschuss Regenerative Energien (2006). Vergärung organischer Stoffe. Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4630, Beuth Verlag Berlin, 92 S.

VDLUFA (1997): Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten. Methodenbuch - Band III. Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. VDLUFA-Verlag, Speyer.

Weissbach, F., Kuhla, S. (1995): Substance losses in determining the dry matter content of silage and green fodder: arising errors and possibilities of correction. Übersicht Tierernährung 23, 189-214.

II.6 Projektbezogene Publikationen und Vorträge

Publikationen

Heiermann, M.; Plöchl, M.; Plogsties, V. (2012): Methoden zur Probeneinschleusung in Labor- und Praxis-Biogasanlagen. In: KTBL (Hrsg.) (2012): Untersuchungen zum phytosanitären Risiko bei der anaeroben Vergärung von pflanzlichen Biomassen in Biogasanlagen. KTBL-Fachgespräch, 14.11.2011, Berlin. KTBL-Sonderveröffentlichung, S. 5-14.

Heiermann, M.; Plöchl, Pietsch, M.; Müller, P.; Rodemann, B. Pottberg, U.; Schleusner, Y., Bandte, M.; Büttner, C. (2011): Risk reduction in spreading plant pathogens by anaerobic digestion? First results from laboratory experiments. International Conference „Progress in Biogas II“, Stuttgart, Germany, March 30 – April 1, 2011, p. 149-154.

Vorträge

Heiermann, M.; Plöchl, M.; Plogsties, V. (2012): Methoden zur Probeneinschleusung in Labor- und Praxis-Biogasanlagen. Vortrag im Rahmen des KTBL-Fachgesprächs am 14.11.2011 in Berlin.

Heiermann, M.; Plöchl, Pietsch, M.; Müller, P.; Rodemann, B. Pottberg, U.; Schleusner, Y., Bandte, M.; Büttner, C. (2011): Risk reduction in spreading plant pathogens by anaerobic digestion? First results from laboratory experiments. International Conference „Progress in Biogas II“, Stuttgart, Germany, March 30 – April 1, 2011, p. 149-154.

ANHANG

Tab. A1: Detaillierter Einschleusungsplan. Pfeile: Einschleusungen (↓) bzw. Ausschleusungen (↑)

KW	Datum	Erreger	Wieder-holung	Expositionszeiten	
Reaktor 1					
1	05.01.2010	**ausgesetzt**			
4	26.01.2010	**F. verticillioides**	**1**	**6h/24h**	8:35(6h↓) - 14:40(6↑-24h↓)
	27.01.2010			**138h**	14:40(24h↑-138h↓)
5	02.02.2010		**2**	**6h/24h**	8:35(138h↑-6h↓) - 14:40(6↑-24h↓)
	03.02.2010			**138h**	14:45(24h↑-138h↓)
6	09.02.2010	**F. avenaceum**	**1**	**6h/24h**	8:45(138h↑-6h↓) - 14:40(6↑-24h↓)
	10.02.2010			**138h**	14:45(24h↑-138h↓)
7	16.02.2010		**2**	**6h/24h**	9:00(138h↑-6h↓) - 15:00(6↑-24h↓)
	17.02.2010			**138h**	14:50(24h↑-138h↓)
8	23.02.2010			**138h**	9:00(138h↑)
14	06.04.2010	**R. solani**	**3**	**6h/24h**	9:00(138h↑-6h↓) - 15:00(6↑-24h↓)
	07.04.2010			**138h**	15:00(24h↑-138h↓)
				138h	9:00(138h↑)
Reaktor 2					
1	05.01.2010	**F. culmorum**	**1**	**6h/24h**	8:00(6h↓) - 14:15(6↑-24h↓)
	06.01.2010			**138h**	14:25(24h↑-138h↓)
2	12.01.2010		**2**	**6h/24h**	8:00(138h↑-6h↓) - 14:15(6↑-24h↓)
	13.01.2010			**138h**	14:15(24h↑-138h↓)
3	19.01.2010	**R. solani**	**1**	**6h/24h**	8:40(138h↑-6h↓) - 15:05(6↑-24h↓)
	20.01.2010			**138h**	15:00(24h↑-138h↓)
4	26.01.2010		**2**	**6h/24h**	8:35(138h↑-6h↓) - 14:50(6↑-24h↓)
	27.01.2010			**138h**	14:45(24h↑-138h↓)
5	02.02.2010			**138h**	8:45(138h↑)
		Umstellung auf Getreide-GP frisch			
10	09.03.2010	**A. alternata**	**1**	**6h/24h**	9:10(6h↓) - 15:10(6↑-24h↓)
	10.03.2010			**138h**	15:00(24h↑-138h↓)
11	16.03.2010		**2**	**6h/24h**	9:15(138h↑-6h↓) - 15:15:00(6↑-24h↓)
	17.03.2010			**138h**	15:10(24h↑-138h↓)
	23.03.2010			**138h**	09:25(138h↑)
12	24.03.2010	**F. avenaceum**	**1**	**6h/24h**	9:00(138h↑-6h↓) - 15:00(6↑-24h↓)
	25.03.2010			**138h**	15:20(24h↑-138h↓)
13	31.03.1900		**2**	**6h/24h**	9:30(138h↑-6h↓) - 15:30(6↑-24h↓)
	01.04.2010			**138h**	15:20(24h↑-138h↓)
14	07.04.2010	**F. verticillioides**	**1**	**6h/24h**	9:00(138h↑-6h↓) - 15:00(6↑-24h↓)
	08.04.2010			**138h**	154:00(24h↑-138h↓)
15	14.04.2010		**2**	**6h/24h**	9:10(138h↑-6h↓) - 15:10(6↑-24h↓)
	15.04.2010			**138h**	15:15(24h↑-138h↓)
16	21.04.2010			**138h**	9:15(138h↑)

Tab. A1: Detaillierter Einschleusungsplan (Fortsetzung)

KW	Datum	Erreger	Wieder-holung	Expositionszeiten	
Reaktor 3					
1	05.01.2010	**F. avenaceum**	**1**	**6h/24h**	8:10(6h↓) - 14:25(6↑-24h↓)
	06.01.2010			**138h**	14:25(24h↑-138h↓)
2	12.01.2010		**2**	**6h/24h**	8:00(138h↑-6h↓) - 14:00(6↑-24h↓)
	13.01.2010			**138h**	14:25(24h↑-138h↓)
3	19.01.2010	**F. verticilloides**	**1**	**6h/24h**	8:55(138h↑-6h↓) - 15:15(6↑-24h↓)
	20.01.2010			**138h**	15:05(24h↑-138h↓)
4	26.01.2010		**2**	**6h/24h**	8:55(138h↑-6h↓) - 15:00(6↑-24h↓)
	27.01.2010			**138h**	14:55(24h↑-138h↓)
5	02.02.2010			**138h**	8:00(138h↑)
		Umstellung auf Getreide-GP frisch			
10	09.03.2010	**A. alternata**	**1**	**6h/24h**	9:00(6h↓) - 15:20(6↑-24h↓)
	10.03.2010			**138h**	15:10(24h↑-138h↓)
11	16.03.2010		**2**	**6h/24h**	9:45(138h↑-6h↓) - 15:45(6↑-24h↓)
	17.03.2010			**138h**	15:30(24h↑-138h↓)
	23.03.2010			**138h**	9:30(138h↑)
12	24.03.2010	**F. avenaceum**	**3**	**6h/24h**	9:20(138h↑-6h↓) - 15:20(6↑-24h↓)
	25.03.2010			**138h**	15:10(24h↑-138h↓)
13	31.03.1900		**2**	**6h/24h**	9:20(138h↑-6h↓) - 15:20(6↑-24h↓)
	01.04.2010			**138h**	15:10(24h↑-138h↓)
14	07.04.2010	**F. verticillioides**	**1**	**6h/24h**	9:30(138h↑-6h↓) - 15:30(6↑-24h↓)
	08.04.2010			**138h**	15:00(24h↑-138h↓)
15	14.04.2010		**2**	**6h/24h**	9:00(138h↑-6h↓) - 15:00(6↑-24h↓)
	15.04.2010			**138h**	15:00(24h↑-138h↓)
16	21.04.2010			**138h**	15:00(138h↑)
Reaktor 4					
1	05.01.2010	**F. culmorum**	**1**	**6h/24h**	8:30(6h↓) - 14:40(6↑-24h↓)
	06.01.2010			**138h**	14:40(24h↑-138h↓)
2	12.01.2010		**2**	**6h/24h**	8:00(138h↑-6h↓) - 14:00(6↑-24h↓)
	13.01.2010			**138h**	14:35(24h↑-138h↓)
3	19.01.2010	**R. solani**	**1**	**6h/24h**	9:05(138h↑-6h↓) - 15:25(6↑-24h↓)
	20.01.2010			**138h**	15:20(24h↑-138h↓)
4	26.01.2010		**2**	**6h/24h**	9:00(138h↑-6h↓) - 15:10(6↑-24h↓)
	27.01.2010			**138h**	15:05(24h↑-138h↓)
5	02.02.2010			**138h**	9:00(138h↑)
6	09.02.2010	**R. solani**	**3**	**6h/24h**	9:10(138h↑-6h↓) - 14:50(6↑-24h↓)
	10.02.2010			**138h**	14:50(24h↑-138h↓)
7	16.02.2010	**F. culmorum**	**3**	**6h/24h**	9:20(138h↑-6h↓) - 15:20(6↑-24h↓)
	17.02.2010			**138h**	15:10(24h↑-138h↓)
8	23.02.2010			**138h**	9:00(138h↑)

Tab. A1: Detaillierter Einschleusungsplan (Fortsetzung)

KW	Datum	Erreger	Wieder-holung	Expositionszeiten	
Reaktor 5					
1	05.01.2010	**Cms**	**1**	**6h/24h**	7:30(6h↓) - 13:30(6↑-24h↓)
	06.01.2010			**138h**	13:30(24h↑-138h↓)
2	12.01.2010		**2**	**6h/24h**	7:30(138h↑-6h↓) - 13:30(6↑-24h↓)
	13.01.2010			**138h**	13:30(24h↑-138h↓)
3	19.01.2010	**R. solani**	**1**	**6h/24h**	10:40(6h↓) - 16:40(6↑-24h↓)
	20.01.2010			**138h**	16:40(24h↑-138h↓)
4	26.01.2010		**2**	**6h/24h**	10:15(138h↑-6h↓) - 16:25(6↑-24h↓)
	27.01.2010			**138h**	16:30(24h↑-138h↓)
5	02.02.2010	**PVY**	**1**	**6h/24h**	10:20(138h↑-6h↓) - 16:20(6↑-24h↓)
	03.02.2010			**138h**	10:20(24h↑-138h↓)
6	09.02.2010		**2**	**6h/24h**	10:20(138h↑-6h↓) - 16:20(6↑-24h↓)
	10.02.2010			**138h**	16:20(24h↑-138h↓)
7	16.02.2010	**S. endobioticum**	**1**	**6h/24h**	8:00(138h↑-6h↓) - 14:00(6↑-24h↓)
	17.02.2010			**138h**	14:05(24h↑-138h↓)
8	23.02.2010		**2**	**6h/24h**	8:10(138h↑-6h↓) - 14:10(6↑-24h↓)
	24.02.2010			**138h**	14:30(24h↑-138h↓)
9	02.03.2010			**138h**	8:30(138h↑)
	02.03.2010	**S. endobioticum**	**3**	**138h**	8:30(6h↓) 14:30(6h↑)
	05.03.2010	**Cms**	**3**	**138h**	13:30(138h↓)
10	11.03.2010			**6h/24h**	7:30(138h↑-6h↓) - 13:30(6↑-24h↓)
	12.03.2010			**24h**	13:30(24↑)
12	23.03.2010	**S. endobioticum**	**1**	**14 Tage**	9:45(14d↓)
14	06.04.2010	**R. solani**	**3 Größen**	**6h/16h**	9:30(14d↑) 11:50(6h↓) 17:50 (6h↑-16h↓)
	07.04.2010				10:00(16↑)
17	28.04.2010	**Cms**	**3**	**24h**	7:30(24h↓)
	28.04.2010			**14h**	7:30(24h↑) 17:30-14h↓)
					7:30(14↑)
18	04.05.2010	**PVY**		**6h/24h**	9:00 (6h ↓) 15:00 (6 ↑ - 24h ↓)
	05.05.2010			**138h**	15:00 (24h ↑ - 138h↓))
19	11.05.2010				9:00 (138h↑)
	11.05.2010	**S. endobioticum**		**6h/24h**	9:00 (6h ↓) 15:00 (6 ↑ - 24h ↓)
	12.05.2010			**138h**	15:00 (24h ↑ - 138h↓))
20	18.05.2010				9:00 (138h↑)
Reaktor 6					
1	05.01.2010	**S. sclerotiorum**	**1**	**6h/24h**	12:00(6h↓) - 18:15(6↑-24h↓)
	06.01.2010			**138h**	18:15(24h↑-138h↓)
2	12.01.2010		**2**	**6h/24h**	10:00(138h↑-6h↓) - 16:05(6↑-24h↓)
	13.01.2010			**138h**	16:05(24h↑-138h↓)

Tab. A1: Detaillierter Einschleusungsplan (Fortsetzung)

KW	Datum	Erreger	Wieder-holung	Expositionszeiten	
3	19.01.2010	**S. sclerotiorum Sklerotien**	**1**	**6h/24h**	10:00(138h↑-6h↓) - 16:00(6↑-24h↓)
	20.01.2010			**138h**	16:05(24h↑-138h↓)
4	26.01.2010		**2**	**6h/24h**	9:40(138h↑-6h↓) - 15:45(6↑-24h↓)
	27.01.2010			**138h**	15:50(24h↑-138h↓)
5	02.02.2010			**138h**	8:00(138h↑)
15	13.04.2010	**S. sclerotiorum**		**6h/16h**	11:00 (6h ↓) - 17:30(6h↑-16h↓)
	14.04.2010			**16h**	9:30 (16h↑)
Reaktor 7					
1	05.01.2010	**F. proliferatum**	**1**	**6h/24h**	12:45(6h↓) - 18:45(6↑-24h↓)
	06.01.2010			**138h**	18:20(24h↑-138h↓)
2	12.01.2010		**2**	**6h/24h**	10:10(138h↑-6h↓) - 16:15(6↑-24h↓)
	13.01.2010			**138h**	16:20(24h↑-138h↓)
3	19.01.2010	**F. verticillioides**	**1**	**6h/24h**	10:05(138h↑-6h↓) - 16:10(6↑-24h↓)
	20.01.2010			**138h**	16:30(24h↑-138h↓)
4	26.01.2010		**2**	**6h/24h**	9:55(138h↑-6h↓) - 16:00(6↑-24h↓)
	27.01.2010			**138h**	16:05(24h↑-138h↓)
5	02.02.2010			**138h**	10:00(138h↑)
14	06.04.2010	**F. verticillioides**	**3 Größen**	**16h**	17:25(16h↓)
	07.04.2010			**24h**	9:40 (16h↑ - 24h↓)
15	08.04.2010			**24/72h**	9:30 (24h↑72h↓)
15	15.04.2010	**F. proliferatum**	**3 Größen**	**72h/24h**	10:00 (72h↑24h↓)
	16.04.2010			**24h**	10:00 (24h↑)
Reaktor 8					
1	05.01.2010	**F. proliferatum**	**1**	**6h/24h**	13:00(6h↓) - 19:00(6↑-24h↓)
	06.01.2010			**138h**	18:50(24h↑-138h↓)
2	12.01.2010		**2**	**6h/24h**	10:15(138h↑-6h↓) - 16:30(6↑-24h↓)
	13.01.2010			**138h**	16:30(24h↑-138h↓)
3	19.01.2010	**F. verticillioides**	**1**	**6h/24h**	10:30(138h↑-6h↓) - 16:30(6↑-24h↓)
	20.01.2010			**138h**	16:30(24h↑-138h↓)
4	26.01.2010		**2**	**6h/24h**	10:05(138h↑-6h↓) - 16:15(6↑-24h↓)
	27.01.2010			**138h**	8:00(24h↑-138h↓)
5	02.02.2010			**138h**	10:15(138h↑)
17	26.04.2010	**Belastungs-steigerung**			
20	18.05.2010	**F. proliferatum**		**6h/24h**	9:00 (6h ↓) 15:00 (6 ↑ - 24h ↓)
	19.05.2010			**138h**	15:00 (24h ↑ - 138h↓)
21	25.05.2010				9:00 (138h↑)
	25.05.2010	**F. verticillioides**		**6h/24h**	9:00 (6h ↓) 15:00 (6 ↑ - 24h ↓)
	26.05.2010			**138h**	15:00 (24h ↑ - 138h↓)
22	01.06.2010				9:00 (138h↑)

Tab. A1: Detaillierter Einschleusungsplan (Fortsetzung)

KW	Datum	Erreger	Wieder-holung	Expositionszeiten	
Reaktor 9					
1	05.01.2010	**C. purpurea**	**1**	**6h/24h**	8:40(6h↓) - 14:20(6↑-24h↓)
	06.01.2010			**138h**	14:40(24h↑-138h↓)
2	12.01.2010		**2**	**6h/24h**	8:30(138h↑-6h↓) - 14:00(6↑-24h↓)
	13.01.2010			**138h**	14:45(24h↑-138h↓)
3	19.01.2010	**F. avenaceum**	**1**	**6h/24h**	9:20(138h↑-6h↓) - 15:50(6↑-24h↓)
	20.01.2010			**138h**	15:30(24h↑-138h↓)
4	26.01.2010		**2**	**6h/24h**	9:05(138h↑-6h↓) - 15:20(6↑-24h↓)
	27.01.2010			**138h**	15:20(24h↑-138h↓)
5	02.02.2010	**Tilletia**	**1**	**6h/24h**	9:20(138h↑-6h↓) - 15:20(6↑-24h↓)
	03.02.2010			**138h**	15:20(24h↑-138h↓)
6	09.02.2010		**2**	**6h/24h**	9:25(138h↑-6h↓) - 15:15(6↑-24h↓)
	10.02.2010			**138h**	15:10(24h↑-138h↓)
7	16.02.2010	**F. culmorum**	**3**	**6h/24h**	9:45(138h↑-6h↓) - 15:40(6↑-24h↓)
	17.02.2010			**138h**	15:45(24h↑-138h↓)
8	23.02.2010			**138h**	9:45(138h↑)
9	02.03.2010	**Tilletia**	**3**	**6h/24h**	9:00(6h↓) - 15:00(6↑-24h↓)
	03.03.2010			**138h**	15:10(24h↑-138h↓)
10	09.03.2010			**138h**	8:00(138h↑)
13	30.03.1900	**F. culmorum (ganzes Korn)**	**1**	**18h**	15:00(18h↓)
	31.03.2010			**6h/24h**	9:00(18h↑-6h↓)/15:00(6h↑-24h↓)
	01.04.2010			**24h**	15:00(24h↑)
14	06.04.2010		**2**	**18h**	15:00(18h↓)
	07.04.2010			**6h/24h**	9:00(18h↑-6h↓)/15:00(6h↑-24h↓)
	08.04.2010			**24h**	15:00(24h↑)
15	14.04.2010	**F. culmorum (ganzes Korn)**	**1**	**9h**	8:30(9h↓)/17:30(9h↑)
16	21.04.2010	**F. culmorum (ganzes Korn)**	**2**	**9h**	8:00(9h↓)/17:00(9h↑)
Reaktor 10					
1	05.01.2010	**A. alternata**	**1**	**6h/24h**	13:00(6h↓) - 19:10(6↑-24h↓)
	06.01.2010			**138h**	19:00(24h↑-138h↓)
2	12.01.2010		**2**	**6h/24h**	10:30(138h↑-6h↓) - 16:50(6↑-24h↓)
	13.01.2010			**138h**	16:50(24h↑-138h↓)
3	19.01.2010	**F. culmorum**	**1**	**6h/24h**	9:40(138h↑-6h↓) - 15:40(6↑-24h↓)
	20.01.2010			**138h**	15:45(24h↑-138h↓)
4	26.01.2010		**2**	**6h/24h**	9:20(138h↑-6h↓) - 15:35(6↑-24h↓)
	27.01.2010			**138h**	15:20(24h↑-138h↓)
5	01.02.2010			**138h**	8:00(138h↑)
8	23.02.2010	**A. alternata.**	**3**	**6h/24h**	10:50(6h↓) - 17:00(6↑-24h↓)
	24.02.2010			**138h**	17:00(24h↑-138h↓)
9	02.03.2010			**138h**	11:00(138h↑)

Tab. A1: Detaillierter Einschleusungsplan (Fortsetzung)

KW	Datum	Erreger	Wieder-holung	Expositionszeiten	
11	16.03.2010	**A. alternata.**	**3**	**6h/24h**	9:55(6h↓) - 15:55(6↑-24h↓)
	17.03.2010			**138h**	15:40(24h↑-138h↓)
12	23.03.2010			**138h**	9:15(138h↑-6h↓) - 15:15(6↑-24h↓)
	24.03.2010				15:15(24h↑-138h↓)
13	30.03.2010	**F. culmorum (grob zerkl. Korn)**	**1**	**18h**	15:15(138h↑-18h↓)
	31.03.2010			**6h/24h**	9:10(18h↑-6h↓)/15:10(6h↑-24h↓)
	01.04.2010			**24h**	15:10(24h↑)
14	06.04.2010	**F. culmorum (grob zerkl. Korn)**	**2**	**18h**	15:15(18h↓)
	07.04.2010			**6h/24h**	9:15(18h↑-6h↓)/15:20(6h↑-24h↓)
	08.04.2010			**24h**	15:20(24h↑)
15	14.04.2010	**F. culmorum (grob zerkl. Korn)**	**1**	**9h**	8:40(9h↓)/17:40(9h↑)
16	21.04.2010	**F. culmorum (grob zerkl. Korn)**	**2**	**9h**	8:15(9h↓)/17:15(9h↑)