

Entwicklung und Optimierung von standortangepassten Anbau- systemen für Energiepflanzen im Fruchtfolgeregime

Teilbericht

„Hohenheimer Biogasertragstest“

Dieses Vorhaben wird vom BMELV über die FNR gefördert
und seitens der TLL koordiniert
(FKZ: 22013008)

Projekt-Nr.: 99.16



Langtitel: Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands (EVA II) - Teilbericht „Hohenheimer Biogasertragstest“

Kurztitel: Entwicklung und Optimierung von standortangepassten Anbausystemen für Energiepflanzen im Fruchtfolgeregime - Teilbericht HBT

Projektleiter: Dr. habil. Armin Vetter

Abteilung: 200/400

Abteilungsleiter: Dr. Matthias Leiterer/ Dr. habil. Armin Vetter

Laufzeit: 01.02.2009 - 30.09.2012

Auftraggeber: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV)

Namen der Bearbeiter: Frank Hengelhaupt,
Dr. Katja Gödeke,
Christoph Strauß,
Christian Weiser
Dr. Gerd Reinhold

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung und Zielstellung	1
2.	Gärtest im Labormaßstab nach Prinzip des Hohenheimer Biogasertragstests (HBT) - Methoden und Qualitätssicherung	2
2.1.	Etablierung des HBT	2
2.2.	Probenumfang HBT	2
2.3.	Hohenheimer Biogasertragstest	3
2.3.1.	Aufbau und Funktion	3
2.3.2.	Praktische Umsetzung	4
2.4.	Arbeiten nach VDI-Richtlinie 4630 und VDLUFA Verbandsmethode	4
2.5.	Teilnahme an Ringversuchen	5
3.	Ergebnisse	6
3.1.	Spezifische Gasausbeuten einzelner Fruchtarten	6
3.2.	Zusammenhang von Gasausbeuten und Inhaltstoffen verschiedener Fruchtarten	13
3.3.	Untersuchungen zum Einfluss der Gärsäuren auf die Biogas- und Methanausbeute	20
3.4.	Methanhektarerträge von Fruchtfolgen	26
3.5.	Praxisversuch: Test einer Methode zur Bestimmung des Abbauverhaltens von Biogassubstraten	30
3.6.	Untersuchungen zum Restgaspotenzial landwirtschaftlicher Biogasanlagen	34
4.	Weitere Tätigkeiten	38
4.1.	Teilnahme am Arbeitskreis Biogas (VDLUFA)	38
4.2.	Betreuung von Praxis-, Bachelor-, bzw. Diplomarbeiten; Zusammenarbeit Fachhochschule Jena	39
5.	Zusammenfassung und Ausblick	40
6.	Literatur	43
7.	Aus der HBT-Arbeitsgruppe entstandene Veröffentlichungen	44
	Anhang 1: Methanhektarerträge am Standort Dornburg und statistische Verrechnung	IX

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Kolbenprobers	3
Abbildung 2: Rotoraufbau im Trockenschrank bei dem Versuchsaufbau der TLL	4
Abbildung 3: Spezifische Biogas- und Methanausbeuten sowie Ligningehalte aller bisher im HBT untersuchten Fruchtarten, nach absteigender Methanausbeute geordnet (n = 732)	6
Abbildung 4: Abhängigkeit der Biogas- (links) und Methanausbeute (rechts; je in l_N/kg_{OTS}) vom Ligningehalt (% TM) über alle untersuchten Fruchtartengruppen (n = 732)	8
Abbildung 5: Abhängigkeit der Biogas- (links) und Methanausbeute (rechts; je in l_N/kg_{OTS}) vom Ligningehalt (% TM) bis 4 %TM (oben) und über 4,0 % TM (unten), über alle untersuchten Fruchtartengruppen (n = 732)	9
Abbildung 6: Spezifische Biogas- und Methanausbeuten sowie Ligningehalte der bisher untersuchten Fruchtartengruppen aus EVA I und EVA II; nach absteigender Methanausbeute innerhalb der Fruchtartengruppen geordnet (n = 384)	10
Abbildung 7: Spezifische Biogas- und Methanausbeuten sowie Ligningehalte der untersuchten Fruchtartengruppen aus EVA I und EVA II unterteilt nach Erntezeitpunkt bzw. Fruchtfolgestellung; nach absteigender Methanausbeute innerhalb der Fruchtartengruppen geordnet (n = 384)	11
Abbildung 8: Methanerträge der Fruchtarten	14
Abbildung 9: Fraktionen der erweiterten Weender-Futtermittelanalyse (Rohasche, -protein, -fett sowie NDF, ADF, ADL, Stärke und Zucker) der vier Fruchtarten absteigend nach Methanertrag geordnet	17
Abbildung 10: NDF-, ADF- und Ligningehalte der vier Fruchtarten absteigend nach Methanertrag geordnet	18
Abbildung 11: Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis der vier Fruchtarten absteigend nach Methanertrag geordnet	19
Abbildung 12: Übersicht der gemittelten Biogaserträge aller betrachteten Fruchtarten und Trocknungsgrade (Rohmittelwerte)	22
Abbildung 13: Übersicht der gemittelten Methanerträge aller betrachteten Fruchtarten und Trocknungsgrade (Rohmittelwerte)	22
Abbildung 14: Auswirkung der Trocknung auf den Gehalt an Essigsäure verschiedener Fruchtarten (Auswahl)	23
Abbildung 15: Auswirkung der Trockenmassekorrektur auf den Biogasertrag frischer Silagen (Rohmittelwerte)	24
Abbildung 16: Auswirkung der Trockenmassekorrektur auf den Methanertrag frischer Silagen (Rohmittelwerte)	24

Abbildung 17: Potenzielle Methanhektarerträge der Fruchtfolgen am Standort Dornburg (2005 - 2007 linke Balken; 2009 - 2011 rechte Balken; unterschiedliche Farben kennzeichnen unterschiedliche Fruchtarten)	27
Abbildung 20: Beutel im Versuchsbehälter	31
Abbildung 21: Darstellung der C-Verluste durch den TM-Verlust im In sacco-Versuch und möglichen C-Abbau, berechnet durch das HBT-Restgaspotenzial.....	33
Abbildung 22: Zusammenhang zwischen Raumbelastung (in kg oTS/m ³) und Verweilzeit (in Tagen)	35
Abbildung 23: Abhängigkeit des Restgaspotenzials (in %, bezogen auf die Biogasausbeute) von der Inkubationstemperatur (37 °C, 25 °C, 10 °C)	36
Abbildung 24: Abhängigkeit des Restgaspotenzials (in %, bezogen auf die Methanausbeute) von der Verweilzeit (in Tagen)	37
Abbildung 25: Abhängigkeit des Restgaspotenzials (in %, bezogen auf die Methanausbeute) von der Raumbelastung (in kg oTS/m ³)	37

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mittlere spezifische Biogas- und Methanausbeuten sowie mittlere Ligningehalte aller bisher untersuchten Fruchtarten (n = 732; LSQ-Means $\pm$ Standardfehler; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$; die Fruchtarten sind nach Methanausbeute absteigend geordnet).....	7
Tabelle 2: Mittlere spezifische Biogas- und Methanausbeuten sowie mittlere Ligningehalte der bisher untersuchten Fruchtarten aus EVA I und EVA II; nach absteigender Methanausbeute innerhalb der Fruchtartengruppen geordnet (n = 384; LSQ-Means $\pm$ Standardfehler; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$)	10
Tabelle 3: Mittlere spezifische Biogas- und Methanausbeuten sowie mittlere Ligningehalte der bisher untersuchten Fruchtarten nach Fruchtfolgestellung aus EVA I und EVA II (n = 384; LSQ-Means $\pm$ Standardfehler; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$ <u>innerhalb einer Fruchtart</u>).12	
Tabelle 4: Anzahl Messungen der jeweiligen Fruchtarten.....	14
Tabelle 5: Bestimmtheitsmaß der Regression zur Schätzung des Biogas- und Methanertrages durch einzelne Kohlenstofffraktionen über alle Fruchtarten	15
Tabelle 6: C:N-Verhältnisse der vier Fruchtarten absteigend nach Methanertrag geordnet ..	18
Tabelle 7: Übersicht über das verwendete Datenspektrum.....	21
Tabelle 8: Einfluss der Trocknung auf den Gehalt ausgewählter Gärssäuren (wobei n.s. = nicht signifikant; * = $p \leq 0,05$; ** = $p \leq 0,01$; *** = $p \leq 0,001$)	23
Tabelle 9: Vergleich der Methanhektarerträge innerhalb der Fruchtfolgen zwischen den Jahren	29
Tabelle A1: Übersicht der im Rahmen des Fruchtfolgeversuchs 2005-2007 abgeleiteten Methanhektarerträge und statistische Verrechnung (je Jahr bzw. im Vergleich der 3-jährigen Fruchtfolgen); Basis: Siehe Kapitel 3.2.2	IX
Tabelle A2: Übersicht der im Rahmen des Fruchtfolgeversuchs 2009 - 2011 abgeleiteten Methanhektarerträge und statistische Verrechnung (je Jahr bzw. im Vergleich der 3-jährigen Fruchtfolgen); Basis: Siehe Kapitel 3.2.2	X

Abkürzungsverzeichnis

ADF	acid detergent fiber, Cellulose + Lignin
ADL	acid detergent lignin, Lignin
AK	Arbeitskreis
ATB	Leibnitz Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim
AW	Aufwuchs
BG	Biogas
BGA	Biogasanlage
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucher- schutz
CH ₄	Methan
C:N-Verhältnis	Kohlenstoff:Stickstoff-Verhältnis
EVA	Entwicklung und Vergleich von standortangepassten Anbausystemen für Energiepflanzen
FF	Fruchtfolge
FM	Frischmasse
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe
GC	Gaschromatograph
Gesamt C/ C	Gesamtkohlenstoff
GP	Ganzpflanze
GPS	Ganzpflanzensilage
GS	Gärsäuren
HBT	Hohenheimer Biogasertragstest
HF	Hauptfrucht
IR	Infrarot
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
LfL	Landesanstalt für Landwirtschaft
MHE	Methanhektarertrag
NAWARO	Nachwachsende Rohstoffe
NDF	neutral detergent fiber, Gerüstsubstanzen
NfE	N freie Extraktstoffe
n.s.	nicht signifikant
oTM	organische Trockenmasse

oTS	organische Trockensubstanz
RA	Rohasche
RF	Rohfaser
RL	Rohfett
RP	Rohprotein
SoZwF	Sommerzwischenfrucht
spez.	Spezifisch
ST	Stärke
TLL	Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
US	Untersaat
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
WiZwF	Winterzwischenfrucht
ZF	Zweitfrucht
ZU	Zucker

1. Einleitung und Zielstellung

Im Rahmen des Verbundprojektes EVA I wurden in den Jahren 2007 und 2008 in der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) Gärtests, die nach der Systematik des Hohenheimer Biogasertragstests (HBT) arbeiten, in Betrieb genommen. Seit 2008 wurde auf Basis dieser Geräte eine kontinuierliche Messung von Biogas- und Methanausbeuten ermöglicht.

Hauptziel war die Möglichkeit der Nutzung eines großen Probendurchsatzes zur Ermittlung von Biogas- und Methanausbeuten des silierten Materials zur Abbildung ganzer Fruchtfolgen und die Ableitung von Methanhektarerträgen durch die Verknüpfung der Messergebnisse mit Ertragswerten vom Standort Dornburg.

Somit wurden auch Jahreseinflüsse und die Fruchtfolgestellung sowie deren Auswirkung auf den Biogas- und Methanertrag erfasst und realitätsgetreu abgebildet.

Die Arbeiten in EVA II dienten weiterhin der Vertiefung und Absicherung der Ergebnisse, die auf Basis einer intensiven Weiternutzung der Gärtests sowie der Neuanschaffung eines weiteren Gerätes erfolgen konnte. Somit wurden durch die HBT-Messungen die Untersuchungen im Rahmen des Teilvorhabens 4 (Batch-Tests ATB) und die im Rahmen des Satellitenvorhabens „Ackerfutter- und Grünlandmischungen“ durchgeführten Batch-Tests (AG FUKO, Niedersachsen) sinnvoll ergänzt.

Des Weiteren konnte so in EVA II die Datenbasis zur Ableitung von Zusammenhängen zwischen stofflicher Zusammensetzung von Silagen und Biogas-/Methanausbeuten erweitert werden. Durch die kontinuierlichen Messungen unter kompetenter Leitung, konnte die Qualitätssicherung der HBT-Methodik und damit eine umfassende Absicherung der Ergebnisse gewährleistet werden.

Aufgrund der Möglichkeit eines hohen Probendurchsatzes lag immer auch ein Fokus auf der Stichprobenvergrößerung einzelner, im EVA-Projekt wenig vorkommender Fruchtarten. Zudem wurden Messwerte neuer, in den EVA-Fruchtfolgen nicht angebauter Fruchtarten, hinzugezogen. So konnten vielfältige Untersuchungen einbezogen werden, um die Aussagekraft des EVA-Projektes zu erhöhen.

2. Gärtest im Labormaßstab nach Prinzip des Hohenheimer Biogasertrags-tests (HBT) - Methoden und Qualitätssicherung (Frank Hengelhaupt)

2.1. Etablierung des HBT

Im Jahr 2007 wurde im Rahmen des EVA-Projektes an der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, ein Gärtest im Labormaßstab, welcher nach der Systematik des Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) arbeitet, in Betrieb genommen. Die Einarbeitung und der Testbeginn stehen im Zusammenhang mit der Anfertigung von zwei Diplomarbeiten. Diese beschäftigten sich zum einen mit dem Vergleich der Methoden von Gärversuchen am ATB und der Methode des HBT (FH-Nordhausen, A. Kretschmer, 2007, unveröffentlicht; Kretschmer et al., 2007) sowie zum anderen mit der Biogasausbeute unter besonderer Berücksichtigung der Fruchtarten und Fruchtfolgestellung (FH-Jena, F. Hengelhaupt, 2007, unveröffentlicht; Hengelhaupt et al., 2007). Die beiden Arbeiten fanden Ende 2007 ihren Abschluss.

Seit Januar 2008 werden kontinuierlich Gärtests an der TLL durchgeführt. Dabei wurden bisher hauptsächlich die Silageproben aus den EVA I und EVA II Projekten auf ihren Biogas- und Methanertrag untersucht. Im April 2008 erfolgten die Anschaffung und die erfolgreiche Inbetriebnahme eines zweiten HBT. Aufgrund der längerfristigen Weiterführung der Gärversuche durch die Genehmigung des EVA II Projekts im Jahr 2009, wurde der HBT systematisch am Standort Jena im Laborbereich 'Anorganische Analytik' integriert. Es erfolgte die Etablierung der Methode des HBT als Untersuchungsmethode im Bereich Untersuchungswesen.

Im Juni 2009 wurde, wie im Projekt vorgesehen, ein dritter HBT angeschafft. Zunächst erfolgte eine Probephase zur Abschätzung des aufkommenden Arbeitsaufwandes durch drei laufende HBT-Geräte sowie zur Integration des dritten Gerätes in den bestehenden Arbeitsablauf. Anschließend konnte der dritte Gärtest vollständig in Betrieb genommen werden. Damit stehen seit diesem Zeitpunkt drei parallel laufende Geräte, welche in einem zeitversetzten Ansatz betrieben werden, zur Verfügung. Der Probendurchsatz konnte damit merklich gesteigert werden.

Nach einer gründlichen Vorbereitung und der Erstellung der notwendigen Unterlagen (z.B. Standardarbeitsanweisungen für HBT), konnte auf Wunsch der Abteilungsleitung Untersuchungswesen der TLL, die Akkreditierung im Rahmen des Qualitätsmanagements im November 2009 erfolgreich absolviert werden. Somit ist der Gärversuch mittels HBT seit diesem Zeitpunkt eine akkreditierte Untersuchungsmethode der Abteilung Untersuchungswesen der TLL, was sich unmittelbar positiv auf die Qualitätssicherung und die Ergebnisse in den Ringversuchen auswirkt.

2.2. Probenumfang HBT

Mit drei laufenden HBT-Geräten konnte ein relativ hoher Probendurchsatz im Bereich Biogas erreicht werden. Seit dem Jahr 2008 wurden bisher 104 Versuchsdurchgänge realisiert und damit ca. 1.400 Proben auf ihren Biogas- und Methangehalt untersucht. Dabei stellen die Proben, welche direkt aus Material der EVA-Fruchtfolgen erstellt wurden, den größten Anteil dar. Ergänzt werden diese zur Erweiterung und Absicherung von Aussagen, schwerpunktmäßig aus EVA-nahen FNR-Projekten sowie weiteren Versuchen:

- EVA-Satellitenversuch „Ackerfutter- und Grünlandansaatsmischungen“
- Mischsilagen Deutsches Weidelgras-Ampfer
- FNR-Projekt „Ganzpflanzengetreide“
- Ganzpflanzengetreide Landessortenversuche TH
- FNR-Projekt „Durchwachsene Silphie“
- Mischsilagen Getreide-Leguminosengemenge
- Biogaspflanzen Landessortenversuche ST

Des Weiteren wurden zusätzliche Proben für betreute Bachelorarbeiten sowie die Teilnahme an Ringversuchen und die Untersuchung von Gärresten integriert. Alle Ergebnisse stehen für die Ziele des EVA-Projektes zur Verfügung.

2.3. Hohenheimer Biogasertragstest

2.3.1. Aufbau und Funktion

Der Hohenheimer Biogasertragstest ist ein Gärtest im Labormaßstab und dient zur Ermittlung der Biogas- und Methanausbeute aus organischen Substanzen. Der HBT zählt zu den diskontinuierlichen Verfahren (Batch-Verfahren), d.h. während der Versuchsdauer erfolgt keine Substratzuführung bzw. Substratentnahme. Als Fermenter dienen Kolbenprober mit einem Volumen von 100 ml (Glasspritzen, Abb. 1), mit einer 1:1 Graduierung und mit einem Kapillaransatz. Auf diesem ist ein Schlauchstück aufgesetzt, welches mit einer Schlauchklemme verschlossen werden kann. Zwischen dem Kolben und dem Stopfen fungiert eine Silikonpaste als Dicht- und Schmiermittel.

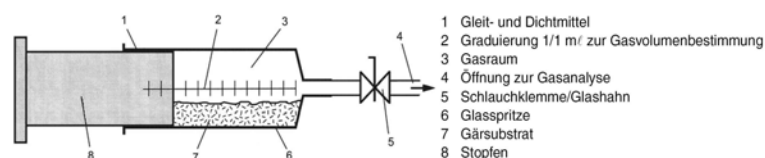


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Kolbenprobers

In den Kolben wird das Gärsubstrat (z.B. Mischung aus Impfmateriel und Testsubstrat) gegeben. Anschließend wird mit dem Stopfen, welcher vorher mit der Dichtpaste behandelt wurde, die Restluft aus dem Kolben gedrückt und die Schlauchklemme geschlossen. Die befüllten Kolbenprober werden in einen langsam drehenden Rotor eingesteckt (Abb. 2). Damit lassen sich eine kontinuierliche Durchmischung des Gärsubstrates und eine gleichmäßige Umlagerung der Dichtpaste realisieren. Der Rotoraufbau befindet sich in einem Trockenschrank, so dass für die gesamte Versuchsdauer eine konstante Gärtemperatur eingestellt werden kann.

Durch die einsetzenden Aktivitäten der Mikroorganismen kommt es zur Biogasbildung. Das entstehende Gas drückt den Stopfen heraus und der Füllstand des Kolbens kann über die Graduierung abgelesen werden. Bei einem ausreichend hohen Gasvolumen wird, nach dessen Erfassung, das Gas über das Schlauchstück einem externen Gerät zur Analyse zugeführt. Dabei wird das gesamte Biogas herausgedrückt und die Schlauchklemme anschließend wieder verschlossen (Helffrich et al., 2003).



Abbildung 2: Rotoraufbau im Trockenschrank bei dem Versuchsaufbau der TLL

2.3.2. Praktische Umsetzung

Die Untersuchungen werden i.d.R. am einsilierten, getrockneten und vermahlenen Pflanzenmaterial vorgenommen. Dabei kommen je Kolbenprober ca. 400 mg an Probenmaterial mit ca. 35 g an Impfmateriel in Mischung zum Ansatz. Als Impfmateriel wird ausgegorene Gülle eingesetzt, das heißt diese hat schon einmal den Biogasprozess durchlaufen. Damit bildet die Gülle nur einen geringen Eigengasanteil und das Impfmateriel dient somit nur als Träger der Mikroorganismen. In jedem Versuchsdurchgang wird zudem die reine Impfgülle als Nullvariante und mikrokristalline Cellulose als Referenzprobe sowie eine Maissilage mitgeführt.

Die Proben werden in dreifacher Wiederholung angesetzt. Damit kommen in einem Durchgang, bei 57 zur Verfügung stehenden Rotorsteckplätzen, 17 Proben sowie eine Nullvariante und die Referenzproben zur Untersuchung. Für die Gasanalyse wird ein externes Messgerät eingesetzt, welches den Methangehalt ausgibt (nach IR-Methode). Voraussetzung für eine repräsentative Messung ist ein Mindestvolumen von 25 - 30 ml Biogas im Kolbenprober.

Am Ende eines Versuchsdurchgangs erhält man somit die drei grundlegenden Ergebnisse Biogasvolumen, Methanvolumen sowie Methangehalt.

Die Versuchsdauer beträgt in der Regel 30 Tage. Dabei wird eine konstante Gärtemperatur von 37 °C realisiert. Die Durchführungen sowie die Umrechnungen der Rohdaten erfolgt nach der VDI-Richtlinie 4630 „Vergärung organischer Stoffe Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche“ und nach der VDLUFA Verbandsmethode „Bestimmung der Biogas- und Methanausbeute in Gärtests“ (Methodenbuch VII).

2.4. Arbeiten nach VDI-Richtlinie 4630 und VDLUFA Verbandsmethode

Die Untersuchungen am HBT erfolgen grundlegend nach der VDI-Richtlinie 4630 „Vergärung organischer Stoffe Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche“ (Stand April 2006). In dieser Richtlinie sind umfassende, grundlegende Informationen zur Theorie von Gärversuchen sowie deren praktischen Durchführung hinterlegt. Es werden dabei Vorgaben zur Berechnung, Durchführung und Einhaltung qualitativer Parameter (z.B. Beschaffenheit Impfmateriel, Mitführung Referenzprobe, Ansatzverhältnis im Fermenter, Versuchsdauer) gemacht. Teilweise ist diese Richtlinie etwas weitläufig formuliert, welches dem Anwender gewisse Freiheiten bei der praktischen Umsetzung lässt.

Seit Ende 2011 wird zudem nach der VDLUFA Verbandsmethode „Bestimmung der Biogas- und Methanausbeute in Gärtests“ (Methodenbuch VII, 2011) gearbeitet. Diese baut auf der

VDI-RL 4630 auf, enthält aber genauere Vorgaben zur Durchführung, Ergebnisberechnung sowie Qualitätssicherung und ist anwenderspezifisch für Batch-Versuche ausgelegt.

Für die Versuche an der TLL lässt sich wie folgt an einigen Beispielen die Beachtung der geforderten Qualitätskriterien aufzeigen. Bei dem eingesetzten Impfmateriel handelt es sich um eine Mischung von Gärresten/Güllen aus verschiedenen Biogasanlagen, welcher vor den Gärversuchen konstant bei 37 °C ausgefault wird. In den Versuchsansätzen werden als Referenzproben die mikrokristalline Cellulose und eine Maissilage mitgeführt. Deren geforderten Richtwerte werden in den Gärversuchen erreicht und mittels Kontrollkarten dokumentiert. Die Proben kommen im Versuch in dreifacher Wiederholung zum Ansatz, die maximale Abweichung nach VDLUFA Methode wird eingehalten. Die Versuchsdauer beträgt in der Regel 30 Tage und das geforderte Abbruchkriterium wird damit eingehalten.

2.5. Teilnahme an Ringversuchen

Das KTBL und der VDLUFA führen in Zusammenarbeit seit einiger Zeit Ringversuche im Bereich Biogas durch. Im Jahr 2007 konnte die TLL erstmals mit dem HBT daran teilnehmen. Untersucht wurden eine Cellulose- sowie eine Gras- und eine Maisprobe. Der kurz vorangegangenen Inbetriebnahme des HBT und der bis dahin wenig gesammelten Erfahrung im Bereich der Gärversuche geschuldet, konnte nur ein mäßiges Abschneiden erreicht werden. Im März/April 2008 erfolgte die Teilnahme am Ringversuch „Biogaserträge 2008“ des KTBL und der VDLUFA (insgesamt 30 Teilnehmer am Ringversuch). Untersucht wurden wieder eine Probe mikrokristalline Cellulose sowie je eine Probe Maissilage und Grassilage. Dabei konnte ein besseres Abschneiden als im Vorjahr erreicht werden. Die Werte lagen nun im Mittelfeld für die Methanerträge bzw. im unteren Mittelfeld für die Biogasausbeuten bei insgesamt 29 ausgewerteten Teilnehmern am Ringversuch.

Im Jahr 2011 wurde im Zeitraum von Juli bis Oktober 2011 der KTBL/VDLUFA Ringversuch „Biogaserträge 2011“ durchgeführt. An diesem nahmen wieder insgesamt 30 verschiedene Labore teil. Dabei kamen drei unterschiedliche Substrate zur Untersuchung (mikrokristalline Cellulose, Maissilage, Rapskuchen). Die TLL bestand mit dem HBT erfolgreich im guten Mittelfeld.

Seit 2009 finden die „LfL Biogas-Ringversuche“, organisiert von der Bayrischen Landesanstalt für Landwirtschaft, statt. Schwerpunkt dieser Ringuntersuchungen war bisher die Analytik von Fermenterinhalt bzw. Einsatzsubstrat auf z.B. flüchtige Gärsäuren oder Schwermetalle. Seit dem 4. Ringversuch 2011 wird zudem eine Probe Gärrest auf sein Restgaspotenzial untersucht. An diesem Ringversuch konnte die TLL mit dem HBT erfolgreich teilnehmen. Der im Jahr 2012 durchgeführte 5. „LfL Biogas-Ringversuch“ wurde Seitens der TLL ebenfalls erfolgreich absolviert.

Eine Teilnahme an weiteren Ringversuchen im Bereich Biogas/Biogaserträge ist auf jeden Fall wünschenswert, da dies ein wichtiges Qualitätskriterium für die Vergleichbarkeit und Absicherung der gewonnenen Ergebnisse sowie auch für die praktische Durchführung ist.

3. Ergebnisse

3.1. Spezifische Gasausbeuten einzelner Fruchtarten (Frank Hengelhaupt)

Einleitung und Methode

Bedingt durch eine veränderte Energiepolitik und der damit verbundenen günstigen Gesetzeslage, wurde ein verstärktes Interesse an der Biogasproduktion, vor allem im landwirtschaftlichen Bereich, gefördert. Bisher kam als Kosubstrat hauptsächlich Mais zum Einsatz. Um Informationen zu pflanzenbaulichen Optionen für eine vielfältige Gestaltung von Fruchtfolgen zu bieten, wurden im Rahmen des Verbundprojektes EVA und dessen Nachfolgeprojekt EVA 2 (gefördert vom BMELV über die FNR, Laufzeit 2005 - 2008 bzw. 2009 - 2012) am Standort Dornburg, 8 verschiedene Fruchtfolgen mit insgesamt 12 unterschiedlichen Fruchtarten angebaut. Diese gelten dabei als mögliche Biogassubstrate.

Um Aussagen über das Biogas- und Methanpotenzial zu erhalten, wird das einsilierte Pflanzenmaterial mittels HBT untersucht (nach VDI-RL 4630 und VDLUFA Methodenbuch VII). Besondere Berücksichtigung bei der Auswertung finden dabei das Anbausystem bzw. die Fruchtfolgestellung (Hauptfrucht/ Zweitfrucht), sowie die Inhaltsstoffe und die Ernteerträge der einzelnen Fruchtarten.

Ergebnisse

Alle Fruchtarten

Für eine bessere Übersicht sind in Abbildung 3 und Tabelle 1 die spezifischen Biogas- und Methanausbeuten sowie Ligningehalte aller bisher im HBT untersuchten Fruchtarten dargestellt (bis einschließlich 2012).

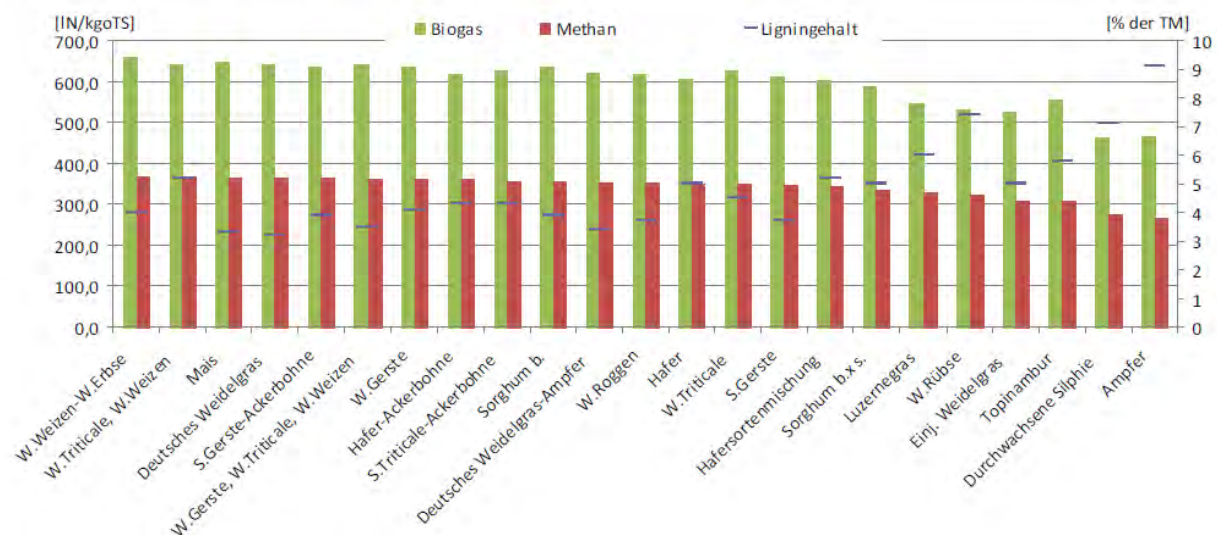


Abbildung 3: Spezifische Biogas- und Methanausbeuten sowie Ligningehalte aller bisher im HBT untersuchten Fruchtarten, nach absteigender Methanausbeute geordnet (n = 732)

Die höchste spezifische Biogasausbeute liefert die Mischsilage W.Weizen-W.Erbse mit 657,8 l_N/kg_{OTS}, gefolgt von Mais mit 648,8 l_N/kg_{OTS} und der Artenmischung W.Gerste-W.Triticale-W.Weizen mit 641,8 l_N/kg_{OTS}. Es folgen die weiteren Fruchtarten mit einer absteigenden Biogasausbeute in der Spanne von 640,0 l_N/kg_{OTS} bis zu 612,4 l_N/kg_{OTS}. Erst der Hafer mit einer Biogasausbeute von 606,2 l_N/kg_{OTS} unterscheidet sich signifikant von der „Spitzengruppe“ der ersten drei Fruchtarten. Ab einer Biogasausbeute von 617,0 l_N/kg_{OTS} (Hafer-Ackerbohne) bis 589,1 l_N/kg_{OTS} (Sorghum b.x s.) lässt sich eine weitere Gruppe von dem großen Mittelfeld statistisch unterscheiden. Topinambur mit 558,0 l_N/kg_{OTS} grenzt sich wiederum statistisch von der letztgenannten Gruppe ab. Das Deutsche Weidelgras mit einer Biogasausbeute von 525,9 l_N/kg_{OTS} bildet den dann folgenden statistisch abgrenzbaren Wert. Das Schlusslicht, mit der geringsten Biogasausbeute bilden der Ampfer mit 465,2 l_N/kg_{OTS} und die Durchwachsene Silphie mit 463,5 l_N/kg_{OTS}. Hierbei sollte beachtet werden, dass die Spanne der Messungen bei der Durchwachsenen Silphie in der Biogasausbeute von 305,0 l_N/kg_{OTS} bis 615,0 l_N/kg_{OTS} reicht. Es ist somit erhebliches Züchtungspotenzial (Selektionsmöglichkeiten) erkennbar.

Tabelle 1: Mittlere spezifische Biogas- und Methanausbeuten sowie mittlere Ligningehalte aller bisher untersuchten Fruchtarten (n = 732; LSQ-Means ± Standardfehler; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede mit p ≤ 0,05; die Fruchtarten sind nach Methanausbeute absteigend geordnet)

Fruchtart	n	Ligningehalt*		V _{BG, spez.} **		V _{CH₄, spez.} **	
		[% TS]		[l _N /kg _{OTS}]		[l _N /kg _{OTS}]	
W.Weizen-W.Erbse	3	4,0 ± 0,80	def	657,8 ± 21,2	a	369,2 ± 11,2	a
W.Triticale, W.Weizen	3	5,2 ± 0,80	cd	640,0 ± 24,5	ab	367,7 ± 12,9	a
Mais	134	3,3 ± 0,12	f	648,8 ± 3,7	a	362,6 ± 1,9	a
Deutsches Weidelgras	15	3,2 ± 0,36	f	638,9 ± 11,0	ab	362,3 ± 5,8	a
S.Gerste-Ackerbohne	6	3,9 ± 0,57	def	638,2 ± 17,3	ab	362,3 ± 9,1	a
W.Gerste, W.Triticale, W.Weizen	12	3,5 ± 0,40	def	641,8 ± 12,3	a	360,9 ± 6,4	a
W.Gerste	24* / 53**	4,1 ± 0,28	de	635,3 ± 5,8	ab	360,3 ± 3,1	a
Hafer-Ackerbohne	10	4,3 ± 0,44	de	617,0 ± 13,4	abc	359,2 ± 7,1	ab
S.Triticale-Ackerbohne	9	4,3 ± 0,46	de	626,3 ± 14,2	ab	355,8 ± 7,4	ab
Sorghum b.	11	3,9 ± 0,42	def	636,0 ± 12,8	ab	355,4 ± 6,7	ab
Deutsches Weidelgras-Ampfer	59	3,4 ± 0,18	ef	619,0 ± 5,5	ab	353,5 ± 2,9	ab
W.Roggen	38* / 71**	3,7 ± 0,23	def	617,5 ± 5,0	ab	353,5 ± 2,7	ab
Hafer	18	5,0 ± 0,33	d	606,2 ± 10,0	bc	351,4 ± 5,3	ab
W.Triticale	33* / 68**	4,5 ± 0,24	d	625,8 ± 5,2	ab	349,4 ± 2,7	ab
S.Gerste	18	3,7 ± 0,28	def	612,4 ± 10,0	abc	345,0 ± 5,3	bc
Hafersortenmischung	18	5,2 ± 0,33	cd	600,7 ± 10,0	bc	342,5 ± 5,3	bc
Sorghum b.x s.	36	5,0 ± 0,23	d	589,1 ± 7,1	c	337,4 ± 3,7	c
Luzernegras	66	6,0 ± 0,17	c	546,3 ± 5,2	de	328,3 ± 2,8	d
W.Rübsse	7	7,4 ± 0,52	b	533,0 ± 16,1	de	322,5 ± 8,4	de
Einj. Weidelgras	16	5,0 ± 0,35	d	525,9 ± 10,6	e	307,9 ± 5,6	e
Topinambur	25	5,8 ± 0,28	c	558,0 ± 8,5	d	307,4 ± 4,5	e
Durchwachsene Silphie	138* / 98**	7,1 ± 0,12	b	463,5 ± 4,3	f	274,8 ± 2,3	f
Ampfer	13	9,1 ± 0,36	a	465,2 ± 11,8	f	266,4 ± 6,2	f

Bei Betrachtung der Methanausbeuten ergibt sich ein ähnliches Bild (Tab. 1). Die höchste Methanausbeute weist auch hier die Mischsilage W.Weizen-W.Erbse mit 369,2 l_N/kg_{OTS} auf. Der Mais mit 362,6 l_N/kg_{OTS} wird von der Artenmischung W.Triticale-W.Weizen mit 367,7 l_N/kg_{OTS} von Platz zwei verdrängt. Es schließt sich ein sehr großes Feld an Fruchtarten an. Erst bei einer Methanausbeute von 345,0 l_N/kg_{OTS} (S.Gerste) lässt sich ein statistischer Unterschied zur sieben Fruchtarten enthaltenden Spitzengruppe nachweisen, in der die W-Gerste mit 360,3 l_N/kg_{OTS} die geringste Methanausbeute aufweist. In den folgenden, weiter absteigenden Methanausbeuten lassen sich die Fruchtarten deutlicher statistisch unterscheiden. Die Reihenfolge entspricht in etwa der bei den Biogasausbeuten geschilderten. Schlusslichter auch hier die Durchwachsene Silphie mit 274,8 l_N/kg_{OTS} und der Ampfer mit 266,4 l_N/kg_{OTS}. Nochmals sei betont, dass die gemessene Spanne der Methanausbeuten bei der Durchwachsenen Silphie von 181,0 l_N/kg_{OTS} bis 330 l_N/kg_{OTS} reicht und sich darin die bisher geringe züchterische Arbeit offenbart.

Ein deutlicher Einfluss des Ligningehaltes auf die Gasausbeuten lässt sich mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,77$ für die Biogasausbeute sowie $R^2 = 0,72$ für die Methanausbeute über alle Fruchtarten feststellen (Abb. 4).

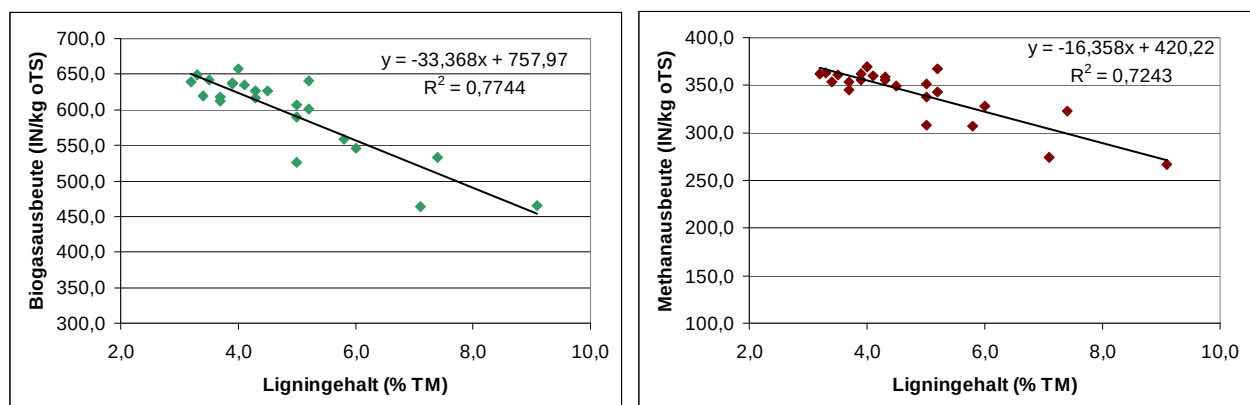


Abbildung 4: Abhängigkeit der Biogas- (links) und Methanausbeute (rechts; je in l_N/kg_{OTS}) vom Ligningehalt (% TM) über alle untersuchten Fruchtartengruppen (n = 732)

Dies zeigt, dass mit einem zunehmenden Ligningehalt die jeweilige Gasausbeute deutlich sinkt. Jedoch lassen sich bei der Gesamtübersicht der Fruchtarten einige identifizieren, die einen höheren Ligningehalt aufweisen als andere Fruchtarten, trotzdem jedoch eine höhere Gasausbeute erreichen. Es liegt die Vermutung nahe, dass ähnlich dem Schnelltest in der Papierindustrie auf „holzfrei“ oder „nicht holzfrei“, ein Schwellenwert für Lignin existiert, unterhalb dessen die Gehaltsschwankungen offensichtlich keinen Einfluss auf die Gasausbeute zeigen bzw. bei dem aufgrund der Gehalte andere Inhaltsstoffe die Wirkung ausgleichen können. Der Grenzwert aus der Papierindustrie liegt bei 4 % Lignin in der TM. Wird der Zusammenhang der Ligningehalte mit den Gasausbeuten bis zu und über diesem Grenzwert einzeln betrachtet, so wird bestätigt, dass der starke Zusammenhang zwischen Ligningehalt und Gasausbeute sich erst ab einem Ligningehalt ab 4 % bestätigt (Abb. 5). Die Schwankungen des Ligningehaltes unter 4 % TM zeigen keinen Einfluss auf die jeweilige Gasausbeute.

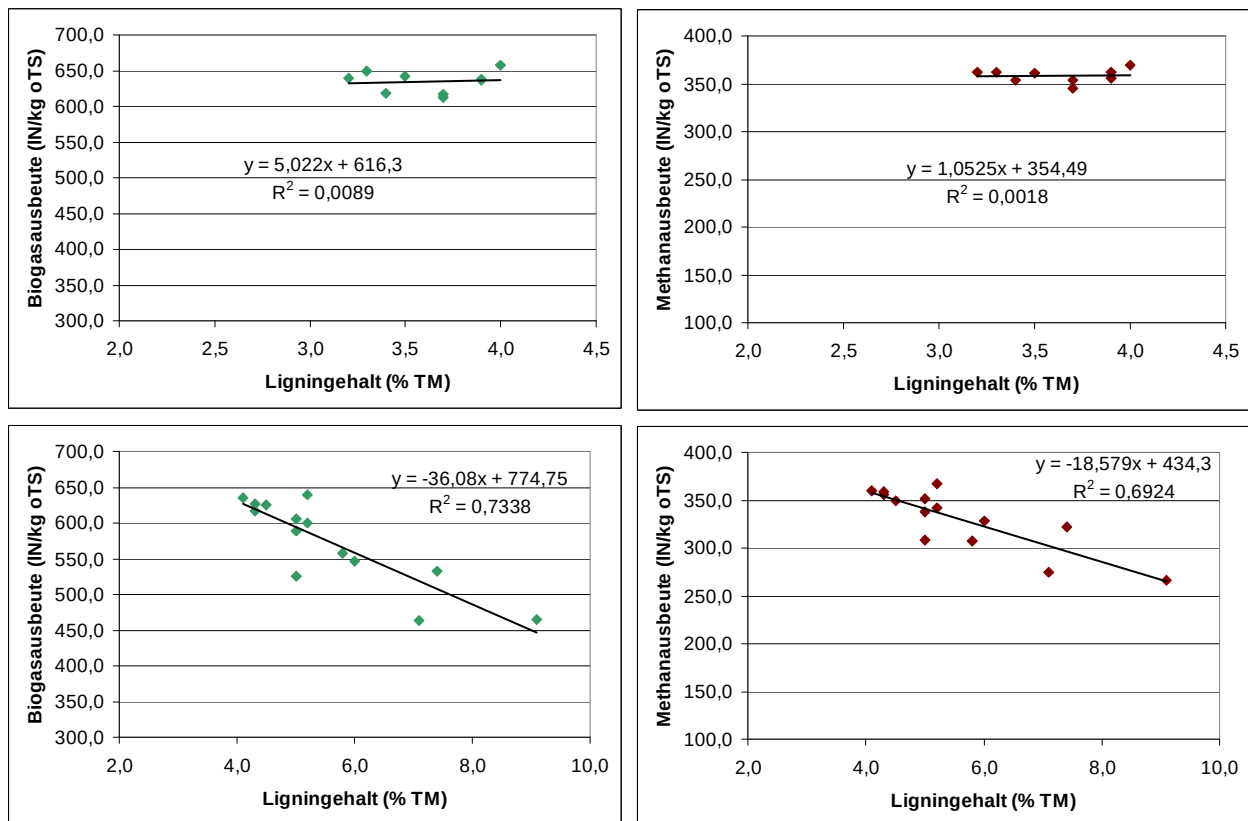


Abbildung 5: Abhängigkeit der Biogas- (links) und Methanausbeute (rechts; je in $\text{I}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$) vom Ligningehalt (% TM) bis 4 %TM (oben) und über 4,0 % TM (unten), über alle untersuchten Fruchtartengruppen ($n = 732$)

Welche Inhaltsstoffe hier maßgeblich „ausgleichend“ wirken und ob es immer dieselben sind, um trotz des höheren Ligningehaltes hohe Gasausbeuten zu realisieren, muss noch im Einzelnen geklärt werden.

EVA-Fruchtarten

Im Folgenden wird explizit auf Ergebnisse der spezifischen Biogas- und Methanausbeuten sowie Ligningehalte der Fruchtarten und -gruppen aus dem EVA-Projekt (EVA I und EVA II) eingegangen (Abb. 6 und Tab. 2).

So weist Mais mit $649,2 \text{ I}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$ die höchste Biogasausbeute auf, die Fruchtarten Sorghum b., W.Gerste, W.Roggen (WiZwF), die Artenmischungen W.Gerste-W.Triticale-W.Weizen und W.Triticale-W.Weizen unterscheiden sich mit Werten zwischen $646,5 \text{ I}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$ bis $636,0 \text{ I}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$ jedoch nicht signifikant vom Mais. Die geringste Biogasausbeute liefert die Gruppe der Gräser (Luzernegras und Einj. Weidelgras) mit unter $550 \text{ I}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$.

Bei den Methanausbeuten verliert der Mais auch in dieser Stichprobe seine Spitzenstellung. Hier übernimmt der W.Roggen (WiZwF) mit $373,4 \text{ I}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$ diese Position, dicht gefolgt von der Artenmischung W.Triticale-W.Weizen mit $367,7 \text{ I}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$ und der W.Gerste mit $364,7 \text{ I}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$. Alle anderen Fruchtarten unterscheiden sich signifikant vom W.Roggen (WiZwF), bilden jedoch mit den beiden anderen Fruchtarten der Spitzengruppe ein insgesamt großes Mittelfeld, bis zu der Methanausbeute von $345 \text{ I}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$ (S.Gerste). Die geringsten Methanausbeuten bilden auch hier wieder die Gräser (Luzernegras und Einj. Weidelgras) mit $328,3 \text{ I}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$ bis $307,9 \text{ I}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$ und Topinambur mit $307,4 \text{ I}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$.

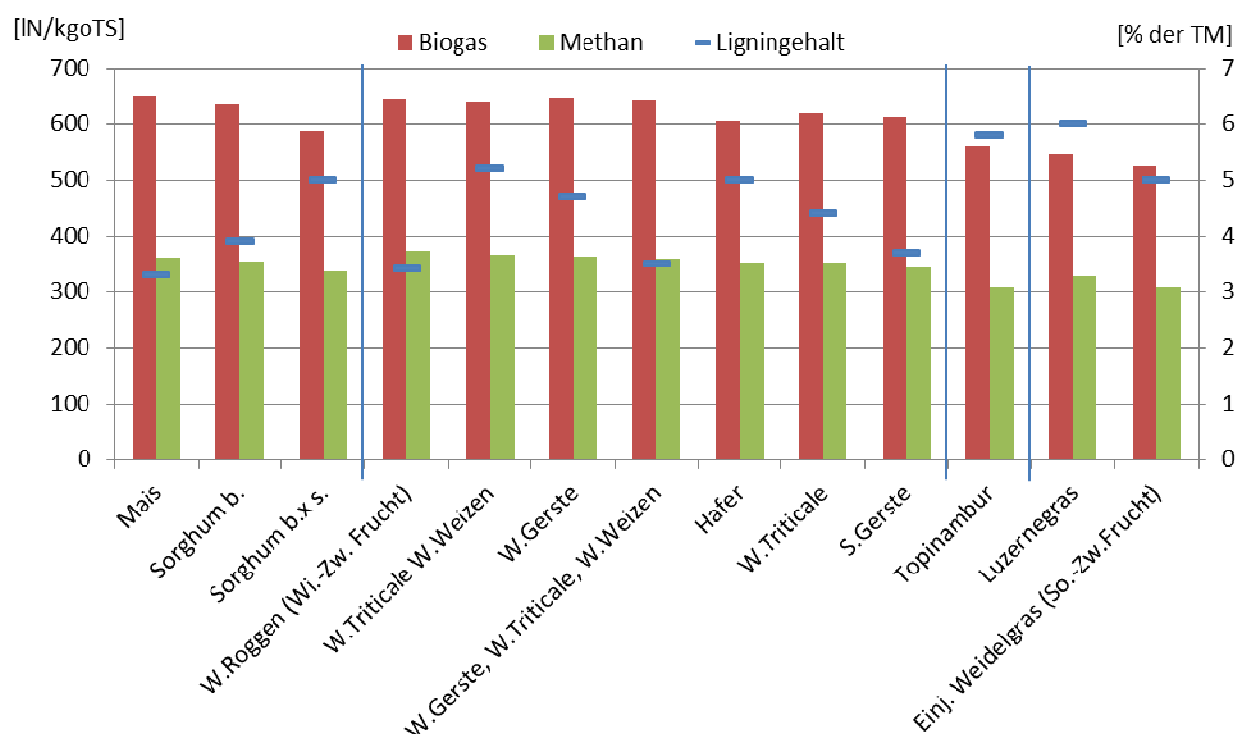


Abbildung 6: Spezifische Biogas- und Methanausbeuten sowie Ligningehalte der bisher untersuchten Fruchtartengruppen aus EVA I und EVA II; nach absteigender Methanausbeute innerhalb der Fruchtartengruppen geordnet (n = 384)

Zur besseren Einordnung, sind beim Ligningehalt die signifikant geringsten Gehalte und bei den Gasausbeuten die jeweils signifikant höchsten Werte in Tabelle 2 fett markiert

Tabelle 2: Mittlere spezifische Biogas- und Methanausbeuten sowie mittlere Ligningehalte der bisher untersuchten Fruchtarten aus EVA I und EVA II; nach absteigender Methanausbeute innerhalb der Fruchtartengruppen geordnet (n = 384; LSQ-Means ± Standardfehler; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede mit p ≤ 0,05)

Fruchtart	n	Ligningehalt*		V _{BG, spez.} **		V _{CH₄, spez.} **	
		[% TS]		[l _N /kg _{oTS}]		[l _N /kg _{oTS}]	
Mais	110	3,3 ± 0,11	d	649,2 ± 4,4	a	363,0 ± 2,2	b
Sorghum b.	11	3,9 ± 0,35	cd	636,0 ± 14,0	abc	355,4 ± 6,9	b
Sorghum b.x s.	36	5,0 ± 0,20	b	589,1 ± 7,8	c	337,4 ± 3,8	cd
W.Roggen (WiZwF)	30	3,4 ± 0,21	d	643,7 ± 8,5	ab	373,4 ± 4,2	a
W.Triticale W.Weizen	3	5,2 ± 0,68	ab	640,0 ± 26,9	abc	367,7 ± 13,1	ab
W.Gerste	6	4,7 ± 0,48	bc	646,5 ± 19,0	ab	364,7 ± 9,3	ab
W.Gerste, W.Triticale, W.Weizen	12	3,5 ± 0,34	d	641,8 ± 13,4	ab	360,9 ± 6,6	b
Hafer	36	5,0 ± 0,28	b	606,2 ± 11,0	c	351,4 ± 5,4	b
W.Triticale	15	4,4 ± 0,30	bc	620,0 ± 12,0	bc	350,4 ± 5,9	bc
S.Gerste	24* / 18**	3,7 ± 0,24	cd	612,4 ± 11,0	bc	345,0 ± 5,4	bc
Topinambur	25	5,8 ± 0,23	a	558,1 ± 9,3	d	307,4 ± 4,6	e
Luzernegras	66	6,0 ± 0,14	a	546,3 ± 5,7	de	328,3 ± 2,8	d
Einj. Weidelgras (SoZwF)	16	5,0 ± 0,29	b	525,9 ± 11,6	e	307,9 ± 5,7	e

Die Abhängigkeit der Gausausbeute vom Ligningehalt der Pflanzenproben zeigt sich bei den EVA-Proben nicht so stark, da hier vor allem bei den Getreideganzpflanzenarten oft der Ligningehalt von 4,0 % TM überschritten aber trotzdem eine hohe Gausausbeute erreicht wird.

EVA-Fruchtarten nach Fruchtfolgestellung der Fruchtarten im Jahr

Zu den einzelnen Fruchtarten können dabei zum Teil genauere Angaben, wie z.B. Fruchtfolgestellung oder Schnittzeitpunkt sowie zu einzelnen Pflanzenteilen, gemacht werden (Abb. 7, Tab. 3).

Bei Luzernegras können z. B. unterschiedliche Ausbeuten für die einzelnen Schnittzeitpunkte ausgemacht werden, der 1. Schnitt erreicht dabei die signifikant höchste Biogas- sowie Methanausbeute innerhalb der Fruchtart. Der folgende zweite Schnitt unterscheidet sich nicht statistisch abgesichert, weder vom ersten Schnitt noch von den Folgeaufwüchsen oder der Untersaat; er nimmt eine Mittelstellung ein.

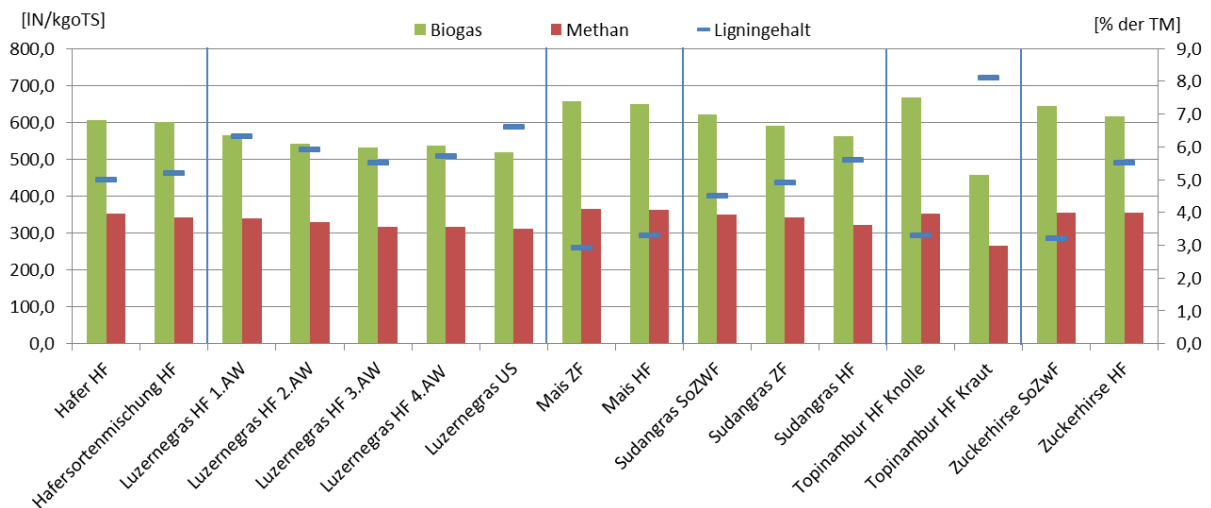


Abbildung 7: Spezifische Biogas- und Methanausbeuten sowie Ligningehalte der untersuchten Fruchtartengruppen aus EVA I und EVA II unterteilt nach Erntezeitpunkt bzw. Fruchtfolgestellung; nach absteigender Methanausbeute innerhalb der Fruchtartengruppen geordnet (n = 384)

Signifikant höhere Biogasausbeuten erreicht auch Sorghum b.x s. als Sommerzwischenfrucht im Verhältnis zu Sorghum b.x s. als Haupt- bzw. Zweitfrucht. In den Methanausbeuten unterscheiden sich dagegen Sorghum b.x s. als Sommerzwischenfrucht und als Zweitfrucht nicht nachweislich voneinander. Eine signifikant geringere Methanausbeute liefert dagegen auch hier Sorghum b.x s. als Hauptfrucht.

Tabelle 3: Mittlere spezifische Biogas- und Methanausbeuten sowie mittlere Ligningehalte der bisher untersuchten Fruchtarten nach Fruchtfolgestellung aus EVA I und EVA II (n = 384; LSQ-Means $\pm$ Standardfehler; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$ innerhalb einer Fruchtart)

Fruchtart	n	Ligningehalt [% TS]		$V_{BG, \text{ spez.}}$ [l _N /kg _{oTS}]		$V_{CH_4, \text{ spez.}}$ [l _N /kg _{oTS}]	
Hafer (HF)	18	5,0 $\pm$ 0,23	a	606,2 $\pm$ 8,7	a	351,4 $\pm$ 4,5	a
Hafersortenmischung (HF)	18	5,2 $\pm$ 0,23	a	600,7 $\pm$ 8,7	a	342,5 $\pm$ 4,5	a
Luzernegras (HF) 1.AW	27	6,3 $\pm$ 0,19	a	564,0 $\pm$ 7,1	a	339,3 $\pm$ 3,7	a
Luzernegras (HF) 2.AW	15	5,9 $\pm$ 0,25	ab	541,1 $\pm$ 9,5	ab	328,2 $\pm$ 4,9	ab
Luzernegras (HF) 3.AW	15	5,5 $\pm$ 0,25	b	532,7 $\pm$ 9,5	b	317,0 $\pm$ 4,9	b
Luzernegras (HF) 4.AW	3	5,7 $\pm$ 0,56	ab	536,1 $\pm$ 21,3	b	316,9 $\pm$ 11,0	b
Luzernegras (US)	6	6,6 $\pm$ 0,40	a	518,4 $\pm$ 15,1	b	312,3 $\pm$ 7,8	b
Mais (ZF)	15	2,9 $\pm$ 0,25	a	655,7 $\pm$ 9,5	a	366,1 $\pm$ 4,9	a
Mais (HF)	95	3,3 $\pm$ 0,20	a	648,1 $\pm$ 3,8	a	362,5 $\pm$ 2,0	a
Sorghum b.x s. (SoZwF)	6	4,5 $\pm$ 0,33	a	621,6 $\pm$ 12,3	a	350,8 $\pm$ 6,4	a
Sorghum b.x s. (ZF)	15	4,9 $\pm$ 0,25	ab	590,6 $\pm$ 9,5	b	341,6 $\pm$ 4,9	a
Sorghum b.x s. (HF)	15	5,6 $\pm$ 0,28	b	562,8 $\pm$ 10,7	b	322,3 $\pm$ 5,5	b
Topinambur (HF) Knolle	12	3,3 $\pm$ 0,28	a	666,9 $\pm$ 10,7	a	353,2 $\pm$ 5,5	a
Topinambur (HF) Kraut	13	8,1 $\pm$ 0,27	b	457,6 $\pm$ 10,2	b	265,2 $\pm$ 5,3	b
Sorghum b. (SoZwF)	8	3,2 $\pm$ 0,35	a	643,5 $\pm$ 13,0	a	355,7 $\pm$ 6,7	a
Sorghum b. (HF)	3	5,5 $\pm$ 0,56	b	616,0 $\pm$ 21,3	a	354,5 $\pm$ 11,0	a

Topinambur-Kraut und -Knolle unterscheiden sich in allen drei betrachteten Parametern signifikant voneinander, wobei stets die Knolle die für die Vergärung besseren Werte aufweist.

Bei Mais und Sorghum b. konnten in dieser Stichprobe keine Unterschiede der Biogas- und Methanausbeuten durch die Fruchtfolgestellung bzw. beim Hafer, zwischen Reinsaat und Sortenmischung, signifikant nachgewiesen werden, obwohl ein Trend erkennbar ist.

Allerdings unterscheidet sich Sorghum b.x s. als Sommerzwischenfrucht (SoZwF) signifikant von der Biogasausbeute der Sorghum b.x s. als Zweit- oder Hauptfrucht sowie Sorghum b.x s. als Sommerzwischenfrucht oder Zweitfrucht in der Methanausbeute von der als Hauptfrucht angebaute Sorghum b.x s. Dies lässt sich mit der fortgeschrittenen Entwicklung und dem damit verbundenen steigenden Ligningehalt der Pflanze erklären.

Schlussfolgerungen

Es konnte gezeigt werden, dass zwischen den Fruchtarten z. T. deutliche Unterschiede zwischen den Gasausbeuten bestehen. Die nachweisbaren Unterschiede richten sich erwartungsgemäß auch nach der Stichprobengröße. In der Fruchtartengruppe Getreide bzw. Mischungen mit Getreide erreichten jedoch stets einzelne Fruchtarten gleich hohe wie bzw. höhere Methanausbeuten als Mais; hier scheinen der W.Weizen, auch in Mischung, und die W.Gerste vielversprechend. Innerhalb der Fruchtarten erbrachte immer der Erntezeitpunkt im früheren Entwicklungsstadium, wie es beim Anbau von Zwischenfrüchten und Zweitfrüchten der Fall ist, die jeweils höhere spezifische Gasausbeute aufgrund des geringeren Ligningehaltes. Der Einfluss des Ligningehaltes auf die Gasausbeuten über alle Fruchtarten und Erntezeitpunkte konnte lediglich ab einem Gehalt von über 4 % Lignin in der TM als deutlich

bezeichnet werden. Bis zu diesem Gehaltswert lässt sich keine Abhängigkeit der Gasausbeute vom Ligningehalt nachweisen. Der Einfluss anderer Inhaltsstoffe ist hier noch zu klären.

Einige exotische Fruchtarten, die z.T. ein noch sehr bescheidenes Gasbildungspotenzial zeigen, versprechen aber aufgrund der großen Streubreite der Messwerte, bei weiterer züchterischer Bearbeitung, durchaus eine zukünftige Relevanz als Einsatzsubstrat in der Biogasanlage zu erlangen.

Würde man die durchschnittlichen Fruchtarten-Werte in Fruchtfolgen aufsummieren, käme man u. U. zu falschen Ergebnissen bei der Fruchtfolgeplanung für die Biogasnutzung. Denn es ist wichtig, die Bestimmungen des Gasertrages der einzelnen Fruchtarten über die Jahre, mit solchen, die Jahreseinflüsse und die Fruchtfolgestellung im Jahr berücksichtigen, zu ergänzen (siehe Kap. 3.5).

3.2. Zusammenhang von Gasausbeuten und Inhaltstoffen verschiedener Fruchtarten

(Dr. Katja Gödeke)

Diese, hier ausgewählt dargestellten Ergebnisse, wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit mit dem Thema „Einfluss ausgewählter Kohlenstofffraktionen unterschiedlicher Einsatzsubstrate auf deren Biogas- und Methanertrag“ von Frau Anne Kastner (FH-Jena, 2011) angefertigt. Die Betreuung lag bei Dr. Katja Gödeke für die Erstellung der Arbeit und Herrn Frank Hengelhaupt für die praktische Durchführung. Die Proben und Daten stammen aus dem EVA-Projekt.

Einleitung und Methode

Für die effektive Nutzung von Biogasanlagen ist es notwendig nach neuen Substraten zu suchen und deren Einfluss auf die Biogas- und Methanerträge festzustellen. Es wurden 12 Substrate auf deren Biogas- und Methanausbeuten untersucht und der Einfluss ihrer Kohlenstofffraktionen auf die Gaserträge analysiert. Ziel war es, Fraktionen zu finden, welche den Gasertrag maßgeblich beeinflussen und sich zur Schätzung der Erträge mittels Formeln eignen.

Die Erfassung der Biogas- und Methanausbeuten erfolgte über den Hohenheimer Biogasertragstest. Die Analyse der Kohlenstofffraktionen wurde über die Weender-Futtermittelanalytik vorgenommen. Um den Einfluss der Kohlenstofffraktionen auf die Biogas- und Methanausbeuten festzustellen, wurden diese einzeln betrachtet, auf die Gaserträge bezogen und anschließend mittels Regressionen auf Tauglichkeit auch zur multivariaten Schätzung getestet. Abbildung 8 zeigt die Einsatzsubstrate, absteigend geordnet nach ihrem Methangehalt.

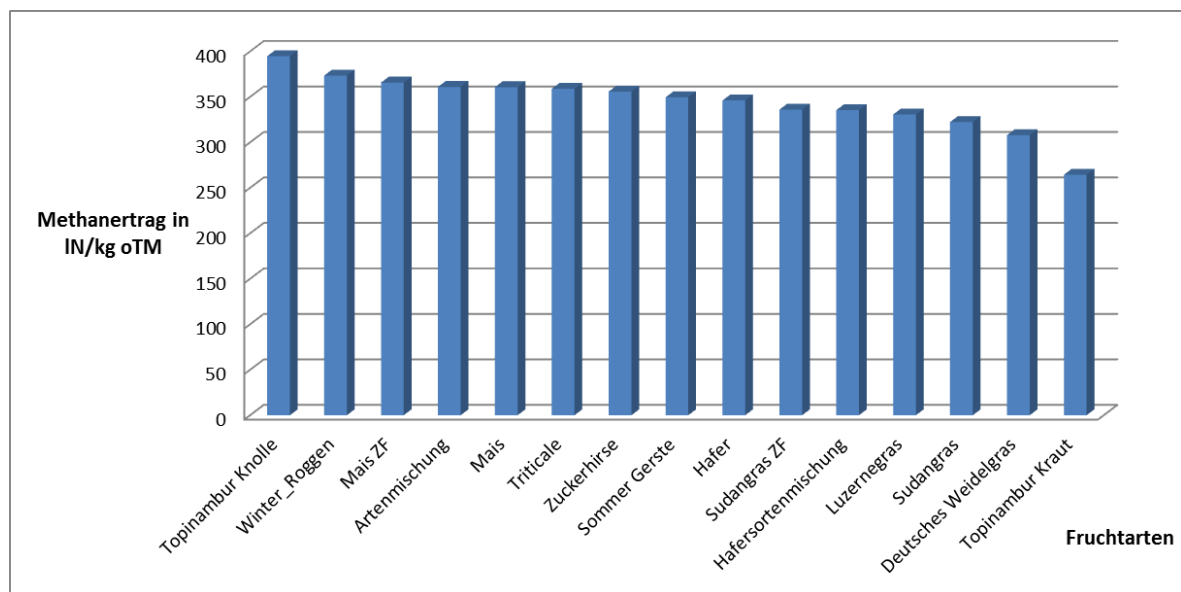


Abbildung 8: Methanerträge der Fruchtarten

Topinambur-Knolle hat den größten Methanertrag von 394,7 I_N/kg_{oTS}, gefolgt von Winterroggen mit 373,3 I_N/kg_{oTS}. Topinambur-Kraut liefert am wenigsten Methan mit 264,4 I_N/kg_{oTS}. Die in der Abbildung gezeigten Fruchtarten in der Reihenfolge Mais bis Deutsches Weidelgras, ergeben durchschnittlich ähnlich viel Methan, im Mittel 344,1 I_N/kg_{oTS}.

Die aus der Weender-Futtermittelanalyse gewonnenen Daten wurden für jede Fruchtart einzeln betrachtet. Hierzu wurde der Mittelwert aller erhaltenen Werte bestimmt, berücksichtigt wurden hierbei die Gehalte an Rohasche, Rohprotein, Rohfett, Rohfaser, NfE, NDF, ADF, Lignin, Stärke, Gesamtzucker und Gesamt-C.

Zunächst sollte beachtet werden, dass nicht jede Fruchtart die gleiche Anzahl an Messwerten (Tab. 4) aufweist, was bei der Auswertung berücksichtigt werden muss.

Tabelle 4: Anzahl Messungen der jeweiligen Fruchtarten

Fruchtart	Anzahl Messwerte
Artenmischung	12
Hafersortenmischung	12
Hafer	12
Deutsches Weidelgras	16
Luzerne	48
Mais	81
Mais Zweitfrucht	12
Sommergerste	18
Zuckerhirse (Sorghum b.)	12
Sudangras (Sorghum b.x s.) Zweitfrucht	12
Topinambur Knolle	8
Topinambur Kraut	12
Triticale	12
Artenmischung	12
Hafersortenmischung	12

Die Fruchtart Mais besitzt somit die größte Anzahl an Messpaaren und weist damit auch die größte Aussagekraft bei genügenden Wiederholungen auf. Topinambur-Knolle wurde nur achtmal in der Analyse untersucht, die Daten sind weniger aussagekräftig, jedoch ausreichend, um eine erste Untersuchung des Einflusses auf den Methanertrag vorzunehmen. Dies war Fokus der Arbeit.

Jede Fruchtart ist pro Probe mit dem Inhalt von vier Silagegläsern beschrieben. Um jedoch auch die exotischen Fruchtarten mit in die Berechnungen einbeziehen zu können, wurden die Messwerte, d.h. der Mittelwert der dreifachen Gasmesswiederholungen pro Glas bei allen Proben herangezogen, ansonsten wären die interessanten Fruchtarten aus der Betrachtung herausgefallen. Dieses Vorgehen wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit als das zweckmäßigste erachtet, um eine erste annähernde Aussage zu diesem Thema machen zu können.

Ergebnisse

Um einen möglichen, direkten linearen Zusammenhang zwischen Kohlenstofffraktionen und Methanertrag festzustellen, wurden zunächst alle Messwerte der Weender-Futtermittelanalytik zusammen genommen und eine Korrelation durchgeführt. Anhand der Korrelation lässt sich sagen, dass der Methangehalt in geringem linearen Zusammenhang zu dem ADF-Gehalt steht. Einen eindeutigeren linearen Zusammenhang gibt jedoch der Wert zu Lignin wieder. Dies war zu erwarten, da die beiden Gerüstsubstanzen nur schlecht bis gar nicht von den Mikroorganismen in der Gülle abgebaut werden können. Um diese Zusammenhänge mathematisch darzustellen oder additive Zusammenhänge zwischen den Fraktionen zu finden, wurden bei einfachen Abhängigkeiten Regressionen und bei mehrfachen Abhängigkeiten auch multiple Regressionen berechnet.

Es zeigt sich, dass nur mit der Variablen Lignin (ADL) eine annähernde Schätzung des Biogas- und Methanertrags über alle Fruchtarten möglich ist (Tab. 5).

Tabelle 5: Bestimmtheitsmaß der Regression zur Schätzung des Biogas- und Methanertrages durch einzelne Kohlenstofffraktionen über alle Fruchtarten

	oTS	RA	RP	RL	RF	NfE	NDF	ADF	ADL	ST	ZU	C
Biogasertrag	x	x	x	x	x	x	x	x	0,6737	x	x	x
Methanertrag	x	x	x	x	x	x	x	x	0,5495	x	x	x

Im Folgenden werden nun einige ermittelte Formeln zur Schätzung des Biogas- und Methanertrages aufgezeigt. Um leichter Aussagen zum Einfluss der Kohlenstofffraktionen treffen zu können und um die Stoffgruppen, die gegenseitig Bestandteil sind, zu trennen, wurden die Kohlenstofffraktionen in vier Gruppen eingeteilt. Die erste Gruppe **(1)** besteht aus der organischen Trockensubstanz (oTS), die zweite Gruppe **(2)** umfasst die Fraktionen der einfachen Weender-Futtermittelanalyse und dem Parameter Stickstofffreie-Extraktstoffe (NfE). Die dritte Gruppe **(3)** besteht aus den Stoffen der erweiterten Weender-Futtermittelanalytik, wie Zucker, Stärke und die Rohfaserbestandteile NDF, ADF und ADL. Der Gesamtkohlenstoff und der Gesamtstickstoff (= Rohproteingehalt/6,25) bilden die vierte Gruppe **(4)**. Zusätzlich wurde noch das C:N-Verhältnis **(5)** der einzelnen Fruchtarten bestimmt und auch mit diesem Wert eine Regression zur Schätzung der Biogas- und Methanausbeute durchgeführt. Die Bestimmtheitsmaße der Formeln werden jeweils bei der Gruppenzuordnung mit angegeben. Im Folgenden sind einige der gefundenen Formeln dargestellt.

Der **Biogas- und Methanertrag von Topinambur-Knolle** ließ sich jeweils nur durch die Rohfaser schätzen. Hierbei ergab sich für den Biogasertrag:

- (2)/(3) Durch die Rohfaser ($R^2 = 0,60$):
$$\text{Biogasertrag in } l_N/kg_{oTS} = 1051,23 - 58,87 * RF$$

Und für den Methanertrag:

- (2)/(3) Durch die Rohfaser ($R^2 = 0,54$):
$$\text{Methanertrag in } l_N/kg_{oTS} = 535,84 - 28,02 * RF$$

Rohasche, Rohprotein, Lignin- und Zuckergehalt scheinen die Größen zur Schätzung des **Biogasertrages bei Sorghum b.** zu sein. Es wurden diese Formeln für den **Biogasertrag** berechnet:

- (1) Durch die oTS ($R^2 = 0,76$):
$$\text{Biogasertrag in } l_N/kg_{oTS} = 4711,48 - 44,54 * oTS$$
- (2) Durch Rohasche und Rohprotein ($R^2 = 0,88$):
$$\text{Biogasertrag in } l_N/kg_{oTS} = 444,71 - 8,24 * RA + 28,38 * RP$$
- (3) Durch Rohprotein, ADL und Zucker ($R^2 = 0,94$):
$$\text{Biogasertrag in } l_N/kg_{oTS} = 209,2 + 37,52 * RP + 24,11 * ADL - 2,04 * ZU$$
- (5) Durch das C:N-Verhältnis ($R^2 = 0,82$):
$$\text{Biogasertrag in } l_N/kg_{oTS} = 853,54 - 6,99 * C:N$$

Für die Schätzung des **Methanertrages bei Sorghum b.** eigneten sich die Gruppen 2 und 5:

- (2) Durch Rohprotein und Zucker ($R^2 = 0,78$):
$$\text{Methanertrag in } l_N/kg_{oTS} = 328,68 + 3,33 * RP - 11,25 * ZU$$
- (5) Durch das C:N-Verhältnis ($R^2 = 0,78$):
$$\text{Methanertrag in } l_N/kg_{oTS} = 328,68 + 3,33 * RP - 11,25 * ZU$$

Für **Topinambur-Kraut** eigneten sich die Gruppen 1 und 3 zur Schätzung des **Biogasertrages**:

- (1) Durch die oTS ($R^2 = 0,70$):
$$\text{Biogasertrag in } l_N/kg_{oTS} = 4801,51 - 48,03 * oTS$$
- (3) Durch Rohasche und NDF ($R^2 = 0,70$):
$$\text{Biogasertrag in } l_N/kg_{oTS} = -58,27 + 51,46 * RA + 0,59 * NDF$$

Zur Veranschaulichung der Zusammensetzung der organischen Masse, werden nun die **Kohlenstofffraktionen der Gruppe 3**: Rohasche, Rohprotein, Rohfett, NfE, NDF, ADF, ADL, Zucker und Stärke betrachtet (Abb. 9).

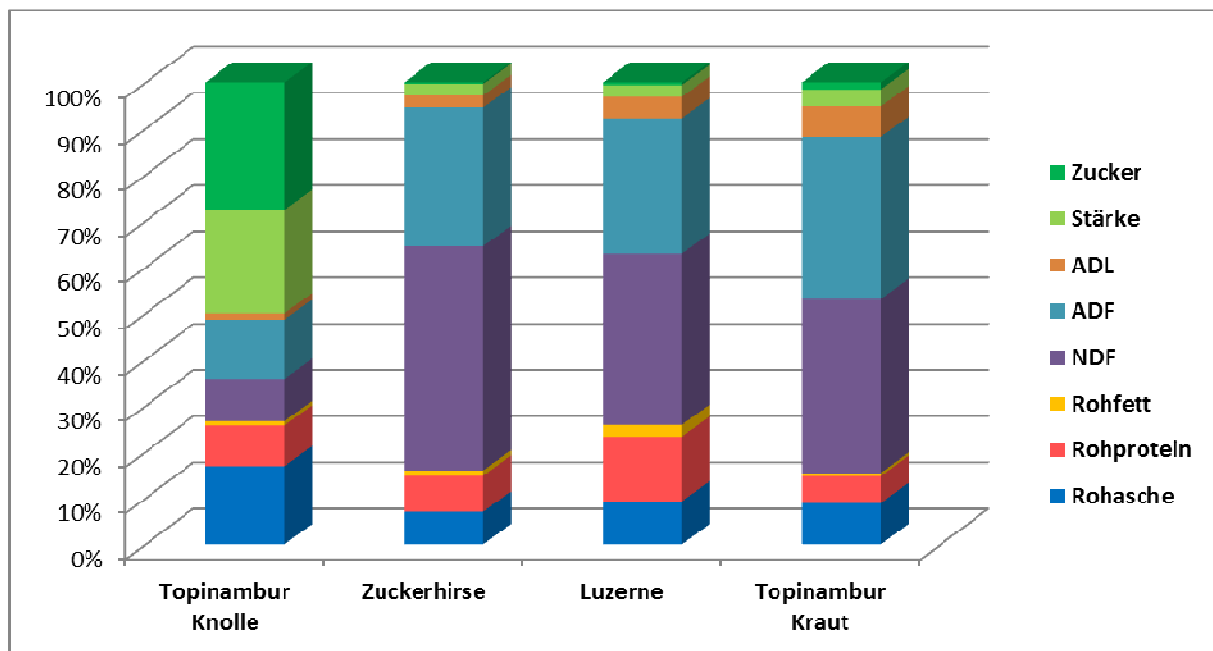


Abbildung 9: Fraktionen der erweiterten Weender-Futtermittelanalyse (Rohasche, -protein, -fett sowie NDF, ADF, ADL, Stärke und Zucker) der vier Fruchtarten absteigend nach Methanertrag geordnet

In den Kohlenstofffraktionen der Gruppe 3 der vier gezeigten Fruchtarten werden zusätzlich zu denen in der Gruppe 2 noch Stärke und Zucker betrachtet und die Fraktion Rohfaser wird in NDF, ADF und ADL aufgeteilt. An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass NDF, ADF und ADL ineinander enthaltene Größen sind. Daher ist eine Aufsummierung in Abbildung 9 (und Folgende) rechnerisch nicht korrekt, aber als Darstellung günstiger, da ein guter Überblick vermittelt wird, ob die Auswirkung auf die Gasausbeuten an den Einzelfraktionen oder deren Summen liegt ($NDF = ADF - \text{Hemicellulose}$ und $ADF = ADL - \text{Cellulose}$). So zeigt sich, dass der Anteil an ADF und ADL im Topinambur-Kraut deutlich steigt, obwohl der NDF-Gehalt im Vergleich zu Zuckerhirse (*Sorghum b.*) und Luzerne sinkt (s.u. und Abb. 10).

Auffallend sind der hohe Zucker- und Stärkegehalt der Topinambur-Knolle (26 % bzw. 21,4 % in der TS). Die anderen Fruchtarten enthielten Zuckergehalte von durchschnittlich 0,9 % und der Stärkegehalt erreicht bei Zuckerhirse (*Sorghum b.*) und Luzerne 3 % sowie bei Topinambur-Kraut 4 % in der TS. Ein klarer Trend ist nicht zu erkennen, jedoch scheint sich der hohe Zucker- und Stärkegehalt der Topinambur-Knolle positiv auf deren hohen Methanertrag auswirken. Mais und die Getreideartenmischung besitzen im Vergleich dazu gleichfalls einen relativ hohen Methanertrag und weisen dabei auch einen hohen Stärkegehalt auf, die Getreideartenmischung zudem auch einen relativ hohen Gesamtzuckeranteil. Dies unterstützt die These, dass hohe Zucker- und Stärke-Werte den Methanertrag steigern. Der Anteil an N-freien Extraktstoffen aus der vorigen Betrachtung der Stoffgruppe 2 bestätigt diese These.

Vergleicht man nun noch einmal gesondert die Anteile der Gerüstsubstanzen NDF, ADF und Lignin, ist deutlich zu erkennen, dass die Topinambur Knolle einen sehr viele geringeren An-

teil an diesen Fraktionen aufweist (Abb. 10). Der Teil an NDF reicht von 9 % bis 60 %, der von ADF von 12 % bis 38 %. Mit steigendem Gehalt der Gerüstsubstanzen sinkt auch der Methanertrag.

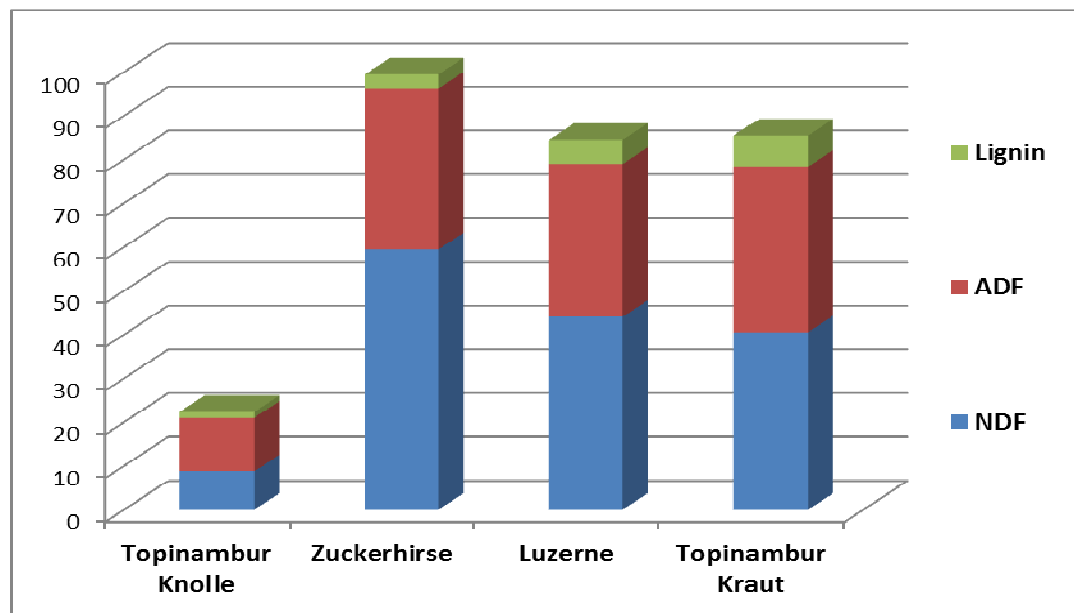


Abbildung 10: NDF-, ADF- und Ligningehalte der vier Fruchtarten absteigend nach Methanertrag geordnet

Das C:N-Verhältnis in dem eingesetzten Pflanzenmaterial sollte im Bereich 10 - 30 liegen, um Prozessstörungen, durch Bildung von Ammoniak oder den nicht vollständigen Umsatz von Kohlenstoff, zu vermeiden.

Die C:N-Verhältnisse der Fruchtarten mit hohen bis sehr hohe Methanerträgen liegen alle im gewünschten Bereich, hier bei einem Verhältnis von 17,5 bis 30,1 (Tab. 6).

Tabelle 6: C:N-Verhältnisse der vier Fruchtarten absteigend nach Methanertrag geordnet

Fruchtart	C:N-Verhältnis
Topinambur-Knolle	29,5
Zuckerhirse	30,1
Luzernegrass	17,5
Topinambur-Kraut	44,0

Lediglich das Topinambur-Kraut weicht mit einem C:N-Verhältnis von 44 deutlich von dem empfohlenen Wert eines tolerierbaren Verhältnisses von 30 ab, was in diesem Fall aber auch erwartungsgemäß mit einem geringen Methanertrag einhergeht.

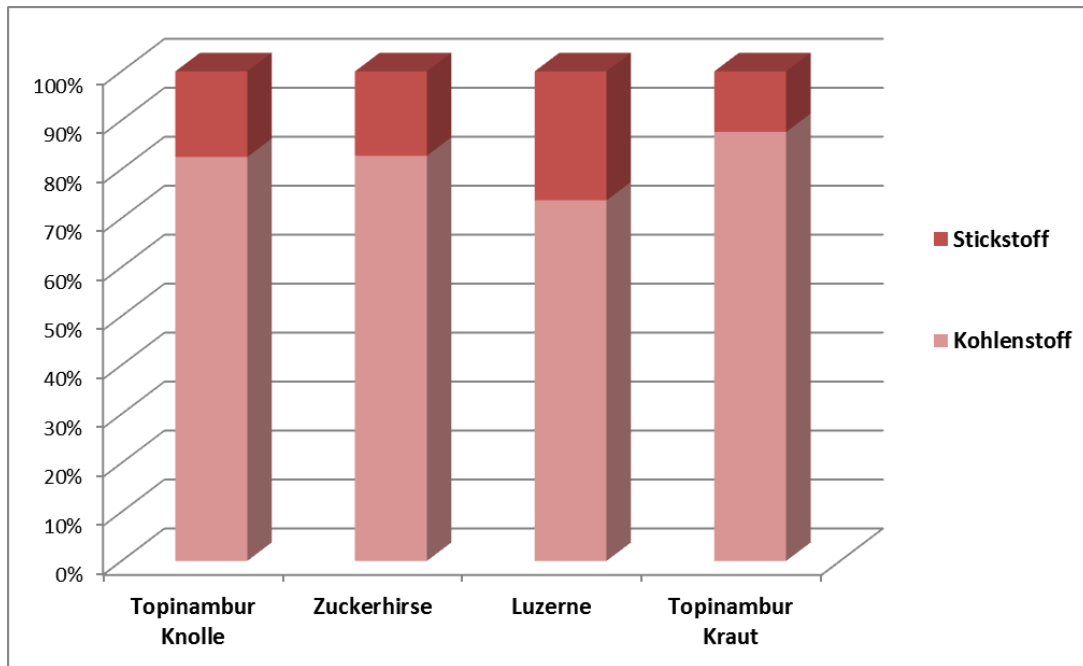


Abbildung 11: Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis der vier Fruchtarten absteigend nach Methanertrag geordnet

Es wurden nun die Verhältnisse zwischen elementarem Kohlenstoff und Stickstoff (= Rohproteingehalt/6,25) gegenübergestellt, um einen eventuellen Zusammenhang bzw. eine bestimmte Verhältnismäßigkeit im C:N-Verhältnis und deren Wirkung auf den Gasertrag sichtbar zu machen (Abb. 11). Auf den ersten Blick ergeben sich keine großen Unterschiede, nur der Stickstoffgehalt von Luzerne ist etwa doppelt so groß wie bei den anderen Fruchtarten; dies ergibt zwar ein enges C:N-Verhältnis im Sollbereich, erbringt aber nur durchschnittliche Methanausbeuten. Hierbei lassen sich folglich keine offensichtlichen Zusammenhänge erkennen.

Schlussfolgerungen

Abschließend lässt sich feststellen, dass sich jede Kohlenstofffraktion mindestens einmal zur Schätzung eignete. Die organische Trockensubstanz, Rohasche, Rohprotein, ADL und das C:N-Verhältnis konnten dreimal in Gleichungen zur Schätzung des Biogasertrags einfließen. Rohfaser konnte sogar viermal genutzt werden. Die anderen Kohlenstofffraktionen eigneten sich nur jeweils einmal zur Prognose des Biogasertrages. Rohfett konnte nicht einmal zur Schätzung genutzt werden. Auffällig ist, dass die Formeln zur Schätzung des Biogas- und Methanertrages bei einer multiplen Regression genauer ausfallen. Betrachtet man die Bestimmtheitsmaße der einfachen Regression über die Fruchtarten, so sind diese geringer als wenn dieselben Kohlenstofffraktionen gemeinsam in Formeln der multiplen Regression auftreten. Die Rohfaser eignet sich allein mit einer Genauigkeit von 47 % zur Schätzung des Biogasertrages, fließt diese Kohlenstofffraktion jedoch in Gruppe 2 der multiplen Regression ein, so ergibt sich z.B. eine Formel mit 97 %iger Wahrscheinlichkeit auf Genauigkeit des Schätzergebnisses bei dem Deutschen Weidelgras. Dies bestätigt sich auch bei den anderen Kohlenstofffraktionen, welche bei der multiplen Regression besser zur Schätzung geeignet waren, als alleine bei der einfachen Regression.

Gruppe 3 der Kohlenstofffraktionen, in denen Rohfaser durch NDF, ADF und ADL ersetzt wurde und NfE durch Zucker und Stärke, eignete sich in jedem Fall besser zur Schätzung des Biogas- und Methanertrages. Die Bestimmtheitsmaße der Gruppe 3 lagen immer höher als in Gruppe 1, 2, 4 und 5. Um eine genauere Formel zur Prognose zu finden, sollte also in jedem Fall die Fraktion Rohfaser durch NDF, ADF und ADL ersetzt werden und die Fraktion NfE durch Stärke und Zucker.

Es sind weitere Versuche nötig, um die angeführten Thesen abzusichern.

3.3. Untersuchungen zum Einfluss der Gärsäuren auf die Biogas- und Methanausbeute

(Dr. Katja Gödeke)

Diese, hier ausgewählt dargestellten Ergebnisse, wurden im Rahmen der Bachelorarbeit mit dem Thema „Auswirkung der Trocknungsintensität bei der Probenvorbereitung von Silagen auf den Gehalt der Gärsäuren und das Gärsäurespektrum sowie deren Einfluss auf den Biogas- und Methanertrag“ von Herrn Sebastian Pietschmann (FH-Jena, 2012) angefertigt. Die Betreuung lag bei Dr. Katja Gödeke für die Erstellung der Arbeit und Herrn Frank Hengelhaupt für die praktische Durchführung des HBT sowie bei Herrn Stefan Petzold für die praktische Durchführung der Gärsäurenbestimmung. Die Proben und Daten stammen aus dem EVA-Projekt.

Einleitung und Methode

Bei der Trocknung von Silagen gehen flüchtige Substanzen, wie bspw. einige freie Fettsäuren und Alkohole, verloren. Dadurch kommt es je nach Stoffgehalt in der Silage zu einem evtl. nicht unerheblichen Gewichtsverlust der Probe und somit zu einer falschen Einschätzung des TS-Gehaltes. Dies ist schon seit längerem bekannt und somit ist in der Futtermittelanalyse die Korrektur des TS-Gehaltes weithin übliche Praxis. In Folge des Einsatzes von Silagen als Substrat für die Vergärung in Biogasanlagen wird auch hier die Forderung nach einer wissenschaftlichen Einschätzung der Auswirkung auf diese Verluste an Gärsäuren bei der Trocknung unterschiedlicher Silagen immer stärker.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde siliertes Pflanzenmaterial von acht Maisproben, vier Weidelgrasproben, vier Sudangrasproben, einer Topinambur-Knolle-Probe und einer Dauergrünlandprobe sowohl in Hinblick auf den Verlust an Gärsäuren und Alkoholen bei der Trocknung, als auch dessen Auswirkungen auf die Vergärbarkeit und somit das Biogas- und Methanpotenzial untersucht. Des Weiteren sollte überprüft werden, inwieweit sich eine Trockenmassekorrektur auf die Gasausbeuten, die ja sowohl frisch als auch getrocknet vergoren auf die oTS bezogen werden, auswirken.

Die drei untersuchten Trocknungsstufen waren hierbei frisch siliert, bei 60 °C getrocknet und bei 105 °C getrocknet. Die Gärsäurebestimmung und deren Gehalt wurden gaschromatographisch ermittelt, die Vergärung erfolgte nach Systematik des Hohenheimer Biogasertrags-tests (HBT).

Ergebnisse

Die getroffenen Aussagen beziehen sich lediglich auf das ausgewählte Probenspektrum und können nur Tendenzen aufzeigen.

Gärsäuren

Der Großteil der für diesen Versuch zur Verfügung gestellten Proben wies schon einen sehr geringen Gehalt an den verschiedenen Gärsäuren (GS) in der Frischmasse (FM) auf, daher lagen viele der ermittelten Gehalte unter der Bestimmungsgrenze des Gaschromatographen (GC) in Verbindung mit der gewählten Methode. Die Bestimmungsgrenze lag hier bei 0,05 g/kg FM. Da für einige Gärsäuren keine oder zu wenig Daten ermittelt werden konnten, wurde es anhand des zur Verfügung stehenden Probenspektrums nicht möglich eine Aussage über den Verlust an Capronsäure, Valeriansäure, Isovaleriansäure und Isobuttersäure zu treffen. Somit ergibt sich die in Tabelle 7 dargestellte Datenverteilung, Nullen stehen hierbei für nicht verwendbare Ergebnisse, aufgrund ungeeigneter Datenstruktur.

Tabelle 7: Übersicht über das verwendete Datenspektrum

Fruchtart	Trocknungsgrad	Probenanzahl „n“ zur Interpretation der jeweiligen Parameter				
		Ethanol	Essigsäure	Propionsäure	Buttersäure	Milchsäure
produktives Grünland	Frisch	1	1	1	1	1
	60 °C	1	1	1	1	1
	105 °C	1	1	1	1	1
Topinambur-Knolle	Frisch	1	1	0	0	1
	60 °C	1	1	0	0	1
	105 °C	1	1	0	0	1
Sudangras	Frisch	2	4	0	0	1
	60 °C	2	4	0	0	4
	105 °C	2	4	0	0	4
Weidelgras	Frisch	4	4	0	0	1
	60 °C	4	4	0	0	4
	105 °C	4	4	0	0	4
Mais	Frisch	1	8	2	2	4
	60 °C	1	8	2	2	8
	105 °C	1	8	2	2	8
Gesamt:		27	54	9	9	44

Wie zu erkennen ist, wurden in allen Fruchtarten und Trocknungsstufen ausreichende Gehalte an Ethanol, Essigsäure und Milchsäure gefunden. Propionsäure und Buttersäure konnten nur in wenigen Proben nachgewiesen werden, da diese Gärsäuren aber auch auf Fehlgärungen hindeuten, muss bei diesen von einer schlechten Silagequalität ausgegangen werden. Diese Proben eigneten sich aber daher gut, Effekte auch auf diese Gärsäuren zu untersuchen.

Biogas- und Methanertrag

Bei der Analyse der Daten des Biogasertragstests konnten starke Unterschiede innerhalb der Silageart und silageartübergreifend festgestellt werden (Abbildung 12). So zeigte sich, dass Weidelgras den geringsten Biogasertrag aufwies, in aufsteigender Reihenfolge folgen

Sudangras (*Sorghum b.x s.*), Grünland, Mais und die Topinambur-Knolle. Gut zu erkennen ist der sinkende Biogasertrag mit steigender Trocknungstemperaturstufe der Silagen.

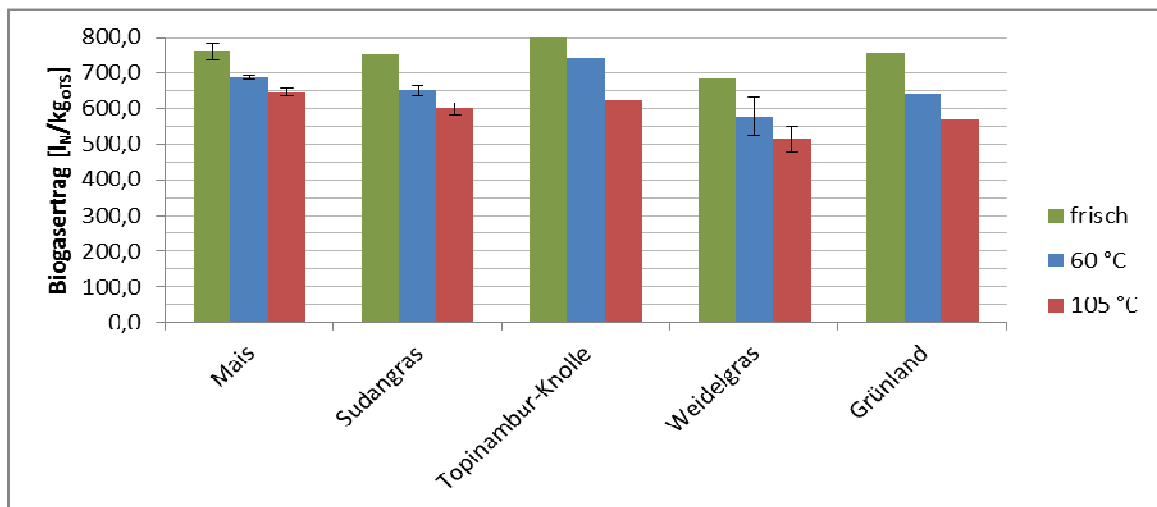


Abbildung 12: Übersicht der gemittelten Biogaserträge aller betrachteten Fruchtarten und Trocknungsgrade (Rohmittelwerte)

Bei den Methanerträgen verhält es sich wie bei den Biogaserträgen (Abbildung 13). Auch hier zeigt sich der deutliche Temperatureinfluss der Probetrocknung auf die Vergärung. Je höher die Probetrocknungstemperatur, desto niedriger der Methanertrag. Allerdings verschieben sich hier die Relationen der Fruchtarten zueinander, da Grünland als frische Probe den höchsten Methanertrag aufweist, gefolgt von der Topinambur-Knolle, dem Sudangras, Mais und dem Weidelgras. Diese Relation ist aber erstens den unterschiedlichen Probenanzahlen der Fruchtarten und zweitens der stark variierenden Silagequalität einzelner Proben, zuzuschreiben.

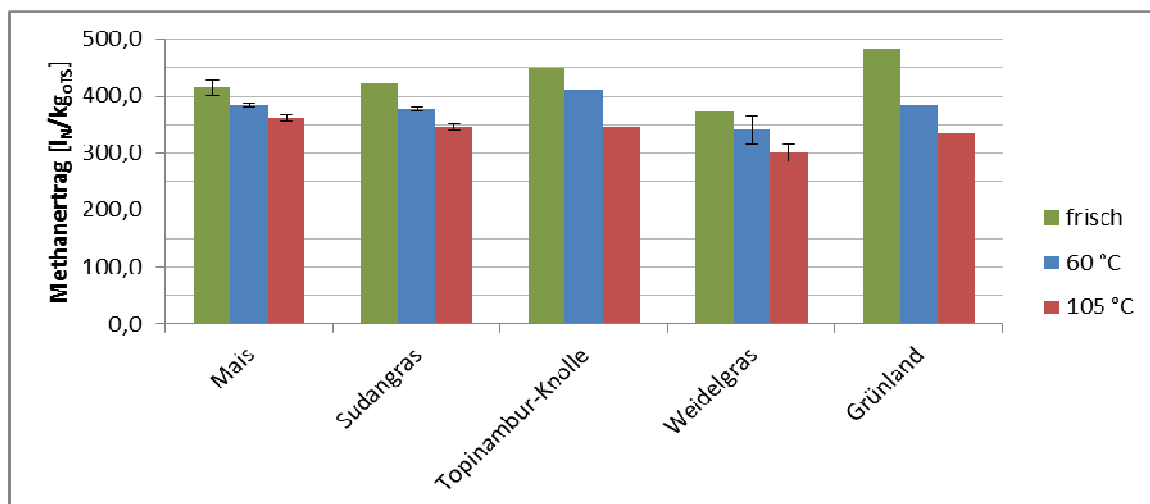


Abbildung 13: Übersicht der gemittelten Methanerträge aller betrachteten Fruchtarten und Trocknungsgrade (Rohmittelwerte)

Auswirkung der Trocknung auf den Gehalt ausgewählter Gärsäuren

Bei der Trocknung der Silagen kam es wie angenommen zu einem Verlust der Gehalte an Gärsäuren, jedoch hatte die Trocknung nicht auf jede Gärsäure den gleichen Effekt (Tab. 8).

Tabelle 8: Einfluss der Trocknung auf den Gehalt ausgewählter Gärsäuren (wobei n.s. = nicht signifikant; * = $p \leq 0,05$; ** = $p \leq 0,01$; *** = $p \leq 0,001$)

betrachtete Trocknungsstufen	Parameter	Einfluss Fruchtart	Einfluss Trocknungsgrad Signifikanz	Probenanzahl	R ²
frisch 60 °C 105 °C	Ethanol	n.s.	***	27	0,64
	Essigsäure	***	***	54	0,87
	Propionsäure	n.s.	***	9	0,97
	Buttersäure	*	n.s.	9	0,71
	Milchsäure	**	n.s.	24	0,65

Die größten Verluste bei der Trocknung konnten zwischen dem Trocknungsgrad „frisch“ und „60 °C“ festgestellt werden, zwischen der 60 °C getrockneten Probe und der 105 °C getrockneten Probe war nur noch ein geringer Verlust zu verzeichnen (Abb. 14).

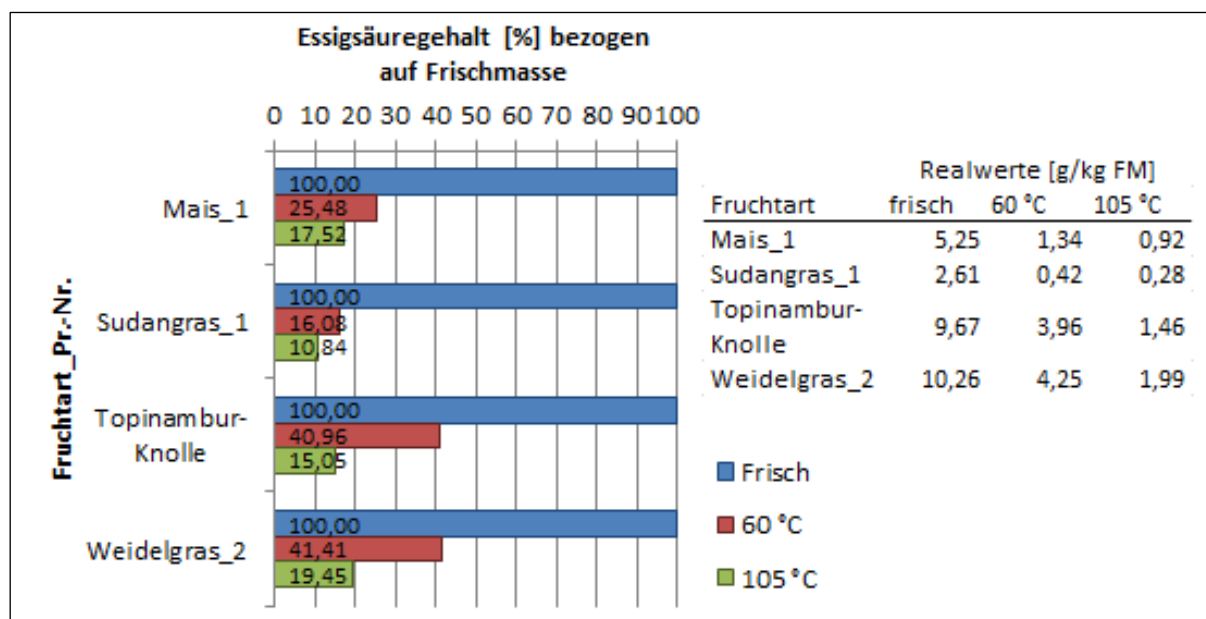


Abbildung 14: Auswirkung der Trocknung auf den Gehalt an Essigsäure verschiedener Fruchtarten (Auswahl)

Auswirkung der Trockenmassekorrektur auf den Biogas- und Methanertrag

Die Biogas- und Methanerträge wurden zusätzlich mittels Trockenmassekorrektur nach WEIßBACH und KUHLE (1995) korrigiert, um eine Überschätzung der Erträge frischer Silagen zu vermeiden. Hierbei wird die anzuwendende Formel nach Art der zu analysierenden Silage unterschieden:

Maissilage: korrigierte TS [%] = $2,22 + 0,960 \cdot \text{unkorrigierte TS [\%]}$

Grassilage: korrigierte TS [%] = $2,08 + 0,975 \cdot \text{unkorrigierte TS [\%]}$

Sowohl die TS-Gehalte von Mais, als auch von Topinambur-Knolle wurden mit der Formel für Maissilagen korrigiert, alle übrigen Silagen mit der Formel für Grassilagen.

Laut Theorie sollten die korrigierten Erträge der frischen Silagen mit den Erträgen der bei 60 °C getrockneten Proben übereinstimmen; bis auf die Grünland- und Weidelgrasprobe wird diese Erwartung weitgehend bestätigt (Abbildung 15), wobei jedoch immer die geringe Stichprobengröße beachtet werden muss.

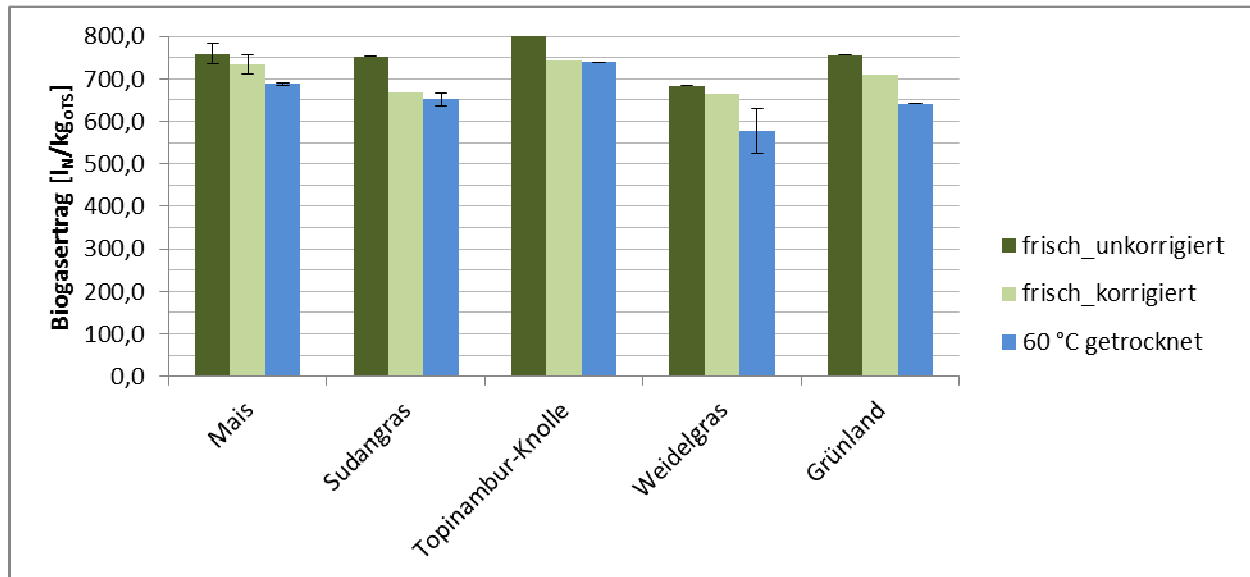


Abbildung 15: Auswirkung der Trockenmassekorrektur auf den Biogasertrag frischer Silagen (Rohmittelwerte)

Gleiche Auswirkungen zeigen sich bei der Trockenmassekorrektur bei frischen Silagen auf deren Höhe des Methanertrages (Abbildung 16). Hierbei stimmen die korrigierten Erträge der frischen Silagen noch besser mit den Erträgen der 60 °C getrockneten Proben überein. Die Grünlandprobe bildet hierbei mit ihrer hohen Abweichung die Ausnahme.

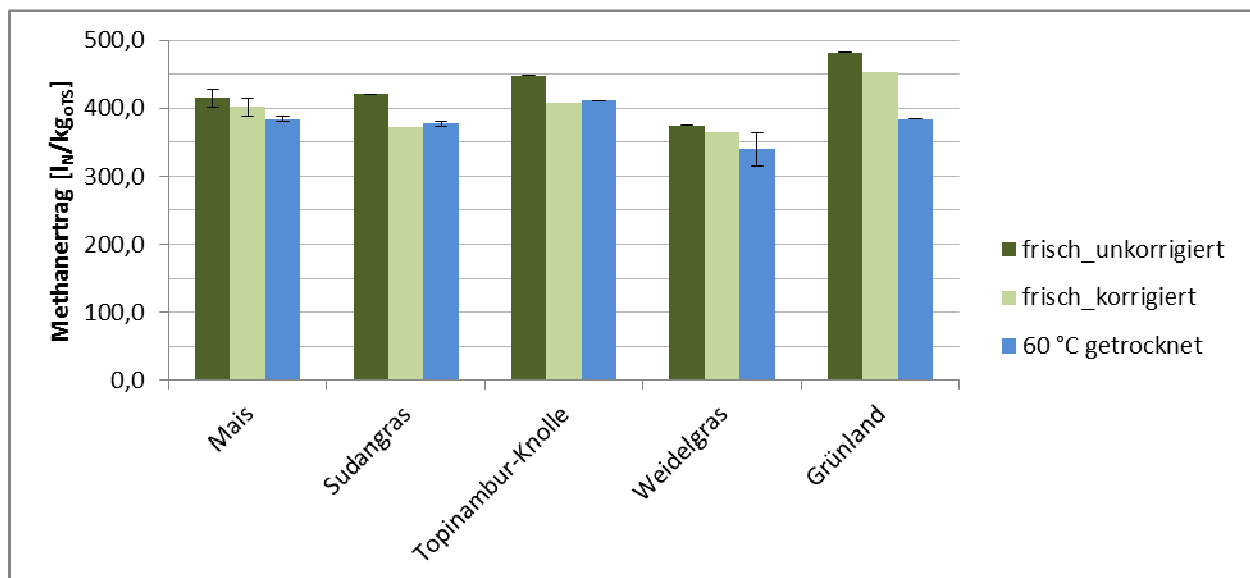


Abbildung 16: Auswirkung der Trockenmassekorrektur auf den Methanertrag frischer Silagen (Rohmittelwerte)

Da es sich um eine pauschalisierte Korrektur handelt, um die Anwendbarkeit zu erweitern, werden Proben mit für die Rinderfütterung „extremen“ Gärsäuregehalten vermutlich nicht richtig abgebildet. Daher wird z. B. die frische Grünlandprobe mit ihrem extrem hohen Buttersäuregehalt, der sich ja bei der Trocknung verflüchtigt, aber bei der Pauschalkorrektur nicht in vollem Umfang berücksichtigt wird, überschätzt.

Schlussfolgerungen

Gärsäuren

Die Fruchtart zeigt auf den Ethanolgehalt keinen signifikanten Einfluss, jedoch aber die Trocknung in hochsignifikantem Maß. Gleiches gilt für den Propionsäuregehalt; aufgrund des sehr geringen Probenspektrums ist letztere Aussage jedoch nicht sicher festzustellen. Auf den Essigsäuregehalt hat sowohl die Fruchtart als auch der Trocknungsgrad hochsignifikanten Einfluss. Auf den Gehalt an Buttersäure hat die Fruchtart einen signifikanten Einfluss, jedoch nicht die Trocknung. Auch hier war das Probenspektrum zu klein um diese Aussage abzusichern. Auf den Milchsäuregehalt hat mit hoher Wahrscheinlichkeit sowohl die Trocknung, als auch die Fruchtart einen signifikanten Einfluss, in welchem Maß kann jedoch anhand des vorliegenden Probenspektrums nicht geklärt werden.

Innerhalb der einzelnen Fruchtarten kommt es jedoch zu starken Abweichung zwischen den Proben in den Gehalten der einzelnen Gärsäuren, woraus zu schließen ist, dass der Silieinfluss wahrscheinlich grundsätzlich größer ist als der Fruchtarteinfluss.

Biogas- und Methanertrag und der Einfluss der Trockenmasskorrektur

Sowohl der Biogas- als auch der Methanertrag sind hochsignifikant von Fruchtart und Trocknungsgrad abhängig. Ohne Trockenmassekorrektur der frischen Silagen kommt es zu einer Überschätzung des Biogas- und Methanertrags frischer Silagen. Eine Trockenmassekorrektur zur korrekten Berücksichtigung der flüchtigen Bestandteile in den Silagen ist somit notwendig zur Berechnung der oTS und somit zur Einwaageberechnung sowie zum Bezug des Gasertrages, wenn frisches Material in den Batch-Tests eingesetzt wird.

Bei Einsatz eines HBT ist eine Korrektur nicht notwendig, da bei 60 °C getrocknete Proben vergoren werden. Der Anteil der dann noch flüchtigen Bestandteile im Vergleich zur 105 °C getrockneten Probe kann vernachlässigt werden, denn z.B. hohe Gehalte an Gärsäuren aus Fehlgärungen verflüchtigen sich bereits fast vollständig bei der ersten Trocknungsstufe, führen somit nicht mehr zu Überschätzungen des Gasertrages aufgrund des falschen Bezuges auf oTS.

Die Berechnungsformel nach WEIßBACH und KUHLA (1995) berücksichtigt dem Anschein nach keine Proben mit erhöhten Gehalte einzelner Gärsäuren, die im optimalen Rinderfutter auch nicht vorkommen sollten. Für Aussagen zur Biogasproduktion müssten daher konkrete Analysewerte in die Korrekturberechnung einfließen oder Batch-Testergebnisse von 60 °C getrockneten Proben herangezogen werden.

Ein größeres Probenspektrum ist jedoch zur Ergebnisabsicherung unbedingt erforderlich.

3.4. Methanhektarerträge von Fruchtfolgen (Christoph Strauß)

Einleitung und Methode

Seit 2005 werden am Standort Dornburg im Rahmen des EVA-Verbunds pflanzenbauliche Parzellenversuche mit Energiepflanzen durchgeführt (Nehring et al., 2005; Lorenz et al., 2012). Wichtige Zielsetzung dieser Versuche ist es, Aussagen zur Produktivität unterschiedlicher Anbausysteme zu machen.

Um Aussagen zum Methanhektarertrag (MHE), der zentralen Produktivitätskennziffer, zu ermöglichen, wurde das Erntegut sämtlicher Prüfglieder des Fruchtfolgeversuches untersucht.

Die Mittelwerte der ermittelten Ertragswerte [dt TM/ha] wurden dazu mit denen der Methanausbeuten [$\text{I}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$] multipliziert, wobei Siliverluste nicht berücksichtigt wurden.¹ Die hier gewonnenen Daten sind somit weitestgehend als potenzielle Methanhektarerträge zu charakterisieren. Als Basis dienen demnach, neben den in Kapitel 3.1. dargestellten Werten, auch der Frischmasseertrag und Trockensubstanzgehalt (Trocknung bei 105°C), in vierfacher Wiederholung auf Parzellenebene (15 m²).

Vorgestellt werden die abgeschlossenen Untersuchungen der Versuchsanlagen 2005 - 2007 sowie 2009 - 2011 des Fruchtfolgeversuchs, mit teilweise mehreren Ernten je Fruchtfolge und Jahr (v. a. bei mehrschnittigen Fruchtarten). Aus den vorliegenden Einzelwerten lassen sich über Formeln der Fehlerfortpflanzung auch Methanhektarerträge statistisch belastbar berechnen.²

Ergebnisse

Unter Berücksichtigung der in den Parzellenversuchen erzielten Erträge und der im HBT erzielten Methanausbeuten, weisen die unterschiedlichen Fruchtfolgen in dem zwei- bis dreijährigen Ausschnitt der Rotationen, in denen für die Biogaserzeugung nutzbare Substrate erzeugt wurden, im Jahresmittel Methanhektarerträge zwischen rund 3.000 m³ CH₄/ha und 6.000 m³ CH₄/ha auf.

Bei den Fruchtfolgen mit dreijähriger Ganzpflanzennutzung (Fruchtfolgen 1, 3, 5 und 6) weist in der Phase 2005 - 2007 die Mais-Selbstfolge (FF7) mit 18.149 m³ CH₄/ha die signifikant höchsten Erträge auf. Es folgen Fruchtfolge 3 (Mais - W.Roggen (WZwF)/ Sorghum b.x s. – W.Triticale) mit 16.361 m³ CH₄/ha und Topinambur in dreijähriger Nutzung mit 15.349 m³ CH₄/ha, die sich nicht signifikant voneinander unterscheiden.

Die nächst höheren Erträge erreichen mit 14.472 m³ CH₄/ha Fruchtfolge 1 (S.Gerste - Öletich (WiZwF) - Mais - W.Triticale (GPS)/ Sorghum b. (SoZwF)) und mit 8.866 m³ CH₄/ha Fruchtfolge 4 (S.Gerste mit Luzernegras-Untersaat - Luzernegras mehrj.). Die Fruchtfolge 4 weist damit weniger als die Hälfte des Methanhektarertrags der Mais-Selbstfolge und somit die signifikant niedrigsten Erträge auf.

¹ Es ist in diesem Zusammenhang darauf zu verweisen, dass Ergebnisse nicht als Richtwerte zu verstehen sind. So handelt es sich um pflanzenbauliche Parzellenerträge, die erfahrungsgemäß über Erträgen der Praxis liegen. Zweitens wurden über die Modellsilierung in Gläsern hohe Silagequalitäten erzielt. Drittens erlauben Batch-Versuche zu Gasausbeuten unterschiedlicher Substrate aufgrund unterschiedlicher Aufbereitung und unterschiedlicher Verweildauern keine direkten Aussagen über deren Ausbeute in Praxisfermentern.

² Da die Wiederholungen des pflanzenbaulichen Versuchs (Parzellen a - d) nicht direkt mit den Probenwiederholungen im Biogasertragstest übereinstimmen (n = 4 aus einer Mischprobe) konnte keine Auswertung über ein standardisiertes, varianzanalytisches Verfahren erfolgen, was die Auswertbarkeit der Ergebnisse jedoch nicht einschränkt.

In der Phase 2009 - 2011 konnte neben der Mais-Selbstfolge (FF7) auch die angepasste Fruchtfolge 1 Methanausbeuten von über 18.000 m³ CH₄/ha erzielen. Auffallend sind die durch Sortenwechsel bedingten Mindererträge der Topinambur-Knollen. Ebenfalls fallen die in der zweiten Phase sehr hohen Methanhektarerträge des mehrschnittigen Luzernegrases auf. Dieses erzielte Methanhektarerträge, die mit knapp über 16.000 m³ CH₄/ha mit denen von Fruchtfolge 3 vergleichbar waren, und somit signifikant über denen des Topinambur lagen (Abb. 17).

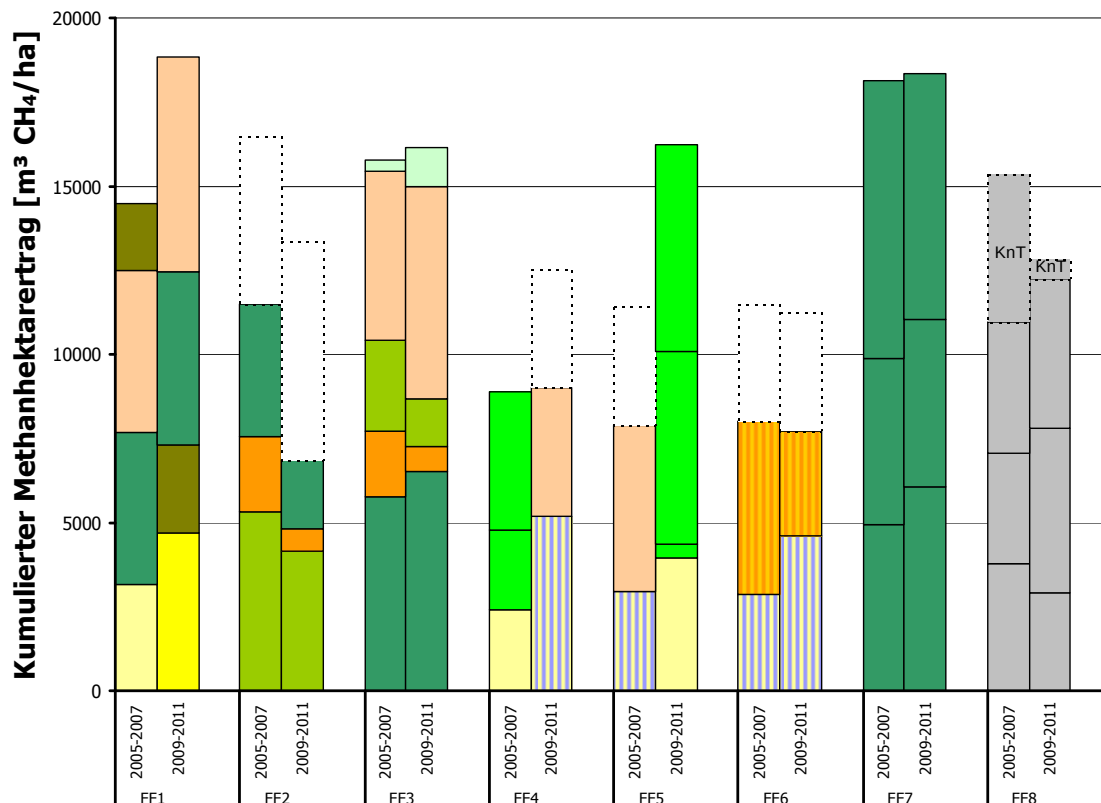


Abbildung 17: Potenzielle Methanhektarerträge der Fruchtfolgen am Standort Dornburg (2005 - 2007 linke Balken; 2009 - 2011 rechte Balken; unterschiedliche Farben kennzeichnen unterschiedliche Fruchtarten)

Ergebnisvergleich innerhalb der einzelnen Untersuchungsjahre

2005: Mehrere Gruppen von Fruchtarten sind zu unterscheiden: Die geringste Produktivität wiesen die Sommergetreidearten auf, die sowohl im Ertrag als auch in der Methanausbeute vergleichsweise schlecht abschnitten. Im Methanhektarertrag können Hafer, Hafersortenmischung, Sommergerste und Sommergerste mit Untersaat (2.412 - 3.140 m³ CH₄/ha) signifikant von den anderen Fruchtarten unterschieden werden. Bei einem Signifikanzniveau von 0,05 lässt sich ferner ein negativer Effekt der Untersaat herausstellen: Die dünner gesäte Sommergerste mit Untersaat hatte somit einen signifikant niedrigeren Methanhektarertrag als die Sommergerste ohne Untersaat. Eine mittlere Produktivität konnte Topinambur-Kraut aufweisen. Die signifikant höchsten Methanhektarerträge wurden durch die C₄-Pflanzen Mais und Sorghum ermöglicht (4.926 - 5.755 m³ CH₄/ha).

2006: Den signifikant höchsten MHE ermöglichte 2006 die Kombination von Grünschnittroggen mit Mais als Zweitfrucht ($6.161 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ha}$), die niedrigsten MHE wurden durch die Luzernegrasmischung ($2.373 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ha}$), gefolgt vom Topinambur-Kraut ($3.262 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ha}$) erzielt. Das aus zwei Varianten Mais (Fruchtfolge 1 und 7) sowie aus Grünschnittroggen, Sorghum und Getreide-Ganzpflanze (W.Triticale, Artenmischung) bestehende „Mittelfeld“ ($4.524 - 5.108 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ha}$) lässt sich noch weiter differenzieren. So schnitten die Wintergetreide besser ab als der in Fruchtfolge 1 angebaute Silomais ($\alpha = 0,01$) bzw. Wintertriticale-GP zusätzlich auch besser als die Kombination Grünschnittroggen-Sudangras ($\alpha = 0,05$).

2007: Erneut zeigte Luzernegras den niedrigsten MHE ($4.081 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ha}$), produktiver war die Kombination von Wintertriticale (GP) mit der Zwischenfrucht Einjähriges Weidelgras ($5.932 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ha}$), wiederum produktiver war dessen Kombination mit der Zwischenfrucht Sorghum b.x s. ($6.808 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ha}$). Die signifikant höchsten MHE konnten mit Silomais in Hauptfruchtstellung und der kombinierten Kraut-Knollen-Ernte von Topinambur erzielt werden (8.274 bzw. $8.309 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ha}$).

2009: Es zeigte sich eine sehr große Spanne zwischen den Einzelerträgen der Fruchtfolgen. Die neu geprüfte Kombination Wintergerste GP-Sorghum b.x s. (SoZwF) hatte als produktivste Variante (ca. $7.300 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ha}$) ein höheres Methanhektarpotenzial als Mais in Hauptfruchtstellung (Sorte Atletico). Interessanterweise konnte der in Fruchtfolge 1 (C3/C4-Fruchtfolge) angebaute Mais gegenüber Fruchtfolge 7 (Mais-Selbstfolge) einen signifikant höheren Ertrag erzielen (6.525 ggü. $6.075 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ha}$). Es folgten die Sommergetreidearten, wobei, anders als im Jahr 2005 die Hafersortenmischung (Fruchtfolge 4, nach Weizen-Ackerfutter) die höchsten Erträge erzielen konnte (ggü. Hafer nicht gesichert). Topinambur enttäuschte abge schlagen (ca. $2.900 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ha}$) aufgrund ungünstiger Substratqualitäten.

2010: Mit einem insgesamt niedrigeren Ertragsniveau konnte in diesem Jahr Luzernegras als produktivste Variante hervorstechen. Es folgten Mais und Topinambur-Kraut, wobei in diesem Jahr die Unterschiede von etwa $200 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ha}$ zwischen Mais in Fruchtfolge 1 und Mais in der Selbstfolge nicht gesichert sind. Das schlechteste Ergebnis wurde mit der Zweikulturnutzungsvariante Grünroggen-Sorghum b.x s. erzielt ($2.150 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ha}$), während auch die andere Zweikulturnutzungs-Variante (Grünroggen-Mais) und Wintergetreide-GP Werte unter $4.000 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ha}$ erzielten.

2011: Mit nur $4.416 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ha}$ erzielte der Anbau von Topinambur das schlechteste Ergebnis. Besser schnitten Luzernegras und Wintertriticale (FF1) mit jeweils über $6.000 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ha}$ ab. Durch die zusätzliche Ernte von einjährigem Weidelgras (FF3) konnte die Kombination Wintertriticale-Sommerzwischenfrucht zusammen mit Mais die höchsten Erträge erzielen.

Vergleich der Jahre

Bei einem Vergleich der Jahreserträge, die innerhalb der jeweiligen Fruchtfolgen am meisten zu dem Gesamtergebnis der Fruchtfolgen beitragen konnten, lassen sich Unterschiede hervorheben (Tab. 9). Zwar waren innerhalb aller Fruchtfolgen die Jahre 2007 und 2011 vergleichsweise produktiv sowie 2005 und 2010 vergleichsweise ertragsschwach, doch zeigt sich, dass die Effekte zwischen den Fruchtarten, die innerhalb der Fruchtfolgen geprüft wurden, nicht zwingend gleichgerichtet sein müssen.

So konnte 2006 bei insgesamt niedrigem Ertragsniveau mit der Kombination Grünroggen-Mais ein gutes Ergebnis erzielt werden. In der zweiten Rotation (2010) war gerade diese Variante weniger erfolgreich, während Luzernegrass, das 2006 die geringsten Methanerträge lieferte, in 2010 ein sehr gutes Ergebnis erzielen konnte. Auch konnten die Bedingungen des Jahres 2009 vor allem Mais und die neu eingefügte Variante Wintergerste-Sorghum b.x s. (SoZwF) begünstigen, während Topinambur gegenüber dem Jahr 2005 geringere Erträge zeigte.

Tabelle 9: Vergleich der Methanhektarerträge innerhalb der Fruchtfolgen zwischen den Jahren (Orange: Jahreserträge bis 4.000; Gelb: > 4.000 - 6.000; Grün: > 6.000 [m³ CH₄/ha]; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede je Zeile mit $p \leq 0,05$)

	EVA I						EVA II					
	2005		2006		2007		2009		2010		2011	
FF1	e	3140	d	4524	a	6808	a	7299	c	5150	b	6380
FF2	b	5332	a	6161			c	4136	d	2713		
FF3	bc	5755	d	4674	c	5932	b	6525	e	2144	a	7464
FF4	c	2412	c	2373	b	4081	a	5186	b	3827		
FF5	c	2964	b	4935			b	4343	a	5757	a	6126
FF6	b	2880	a	5109			a	4592	b	3140		
FF7	d	4926	d	4949	a	8274	c	6075	d	4943	b	7304
FF8	c	3777	d	3262	a	8309	d	2901	b	4906	b	5003

Schlussfolgerungen

Unter der Annahme, dass sowohl die Relationen der erzielten Erträge als auch der erzielten Methanausbeuten für den praktischen Landbau Gültigkeit haben, lassen sich folgende Aussagen festhalten:

- Aus Sicht des Methanhektarertrags erreichte die Mais-Selbstfolge die höchste Leistung.
- In jedem der Prüffahre konnte aber mindestens eine andere Fruchtart/Fruchtartenkombination signifikant höhere oder zumindest vergleichbare, (d.h. keine signifikant niedrigeren) Methanhektarerträge im Vergleich zu Mais in Hauptfruchtstellung erzielen.
- Die biomassebetonten Fruchtfolgen (FF1 und FF3) zeigen, dass C3-/C4-Pflanzen-Fruchtfolgen bei günstiger Kombination auch ein hohes Leistungsniveau erreichen können.
- Auch die Luzernegrasmischung überrascht unter günstigen Bedingungen mit gleichwertigen Erträgen wie die Biomasse-Fruchtfolgen (FF1 und FF3).
- Ein stabil hohes Ertragsniveau zeigten die Fruchtfolge 3, 7 (Mais-Selbstfolge) und 8 (Topinambur).
- Topinambur-Kraut bringt einen hohen Trockenmasseertrag, damit auch einen relativ günstigen Methanhektarertrag. Es weist jedoch eine schlechte spezifische Gasausbeute auf, so dass die hohen Trockenmasseerträge bei dieser Fruchtart am stärksten relativiert werden, wenn es um die Umsetzung in nutzbare Energie geht. Zudem ist auf die spezifischen Substrateigenschaften zu verweisen, die einen praktischen Einsatz in Biogasanlagen vor zusätzliche Herausforderungen stellen (hohe Faseranteile im Kraut, schlechte Siliereigenschaften von Kraut und Knolle).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich die relative Vorzüglichkeit von Fruchtfolgen mit Mais durch die gute Abbaubarkeit des Substrates verbessert. Dennoch können viele der anderen geprüften Anbauoptionen auch hinsichtlich der Methanhektarerträge gute Ergebnisse aufweisen und für eine praktische Anbaugestaltung interessant sein. Dies betrifft sowohl Getreide (GPS), Luzernegrass als auch Kombinationen von C3- und C4-Pflanzen, wie z.B. die Variante Wintergerste-Sorghum.

3.5. Praxisversuch: Test einer Methode zur Bestimmung des Abbauverhaltens von Biogassubstraten (Christian Weiser)

Die Versuchsdurchführung lag bei Herrn Christian Weiser im Rahmen des EVA-Projektes. Weiterhin haben Herr Christoph Strauß und Dr. Gerd Reinhold am Versuch mitgearbeitet. Die Durchführung des HBT wurde von Herrn Frank Hengelhaupt geleitet. Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf die wichtigsten Ergebnisse. Ein detaillierter Bericht kann auf Anfrage zu Verfügung gestellt werden.

Einleitung und Methode

Seit Mitte des 20. Jh. werden methodische Arbeiten mittels Nylonbeutel-Technik (In sacco- bzw. In situ-Verfahren) zur Bestimmung des Futtermittelabbaus im Pansen genutzt. Bei diesem Verfahren werden die Futtersubstrate in Beuteln aus synthetischem Material in die Pansen von Wiederkäuern eingeführt. Nach der Untersuchung der Futtermittel vor und nach der Inkubation können die eingesetzten Substrate im Hinblick auf ihre Verwertbarkeit beurteilt werden. In einem Tastversuch sollte geprüft werden, inwieweit die in Flachowsky et al. (1987) dargestellte Methode genutzt werden kann, um die laboranalytische Ermittlung von Biogas- und Methanerträgen an geringen Substratmengen auch anhand von Praxisuntersuchungen zu unterlegen. Im Mittelpunkt stand die Übertragung der Methode auf Praxisbedingungen einer Biogasanlage mit einem parallelen Testdurchlauf von Silage in Praxisanlage und HBT bzw. nur im HBT.

Für die Untersuchungen wurde eine 526 kW Anlage in Ostthüringen ausgewählt. Die Anlage liegt 2 km von der Versuchsstation Dornburg entfernt. Für die Versuchsdurchführung wurde ein Behälter (Abb. 18 und 20) mit den Maßen 100 x 100 x 120 cm zwischen Fermenterablauf und Gärrestlager geschaltet. Das Nettofassungsvermögen dieses Behälters betrug ca. 850 cm³. Ein kontinuierlicher Zufluss von Gärrest (70 m³/d) sorgte für die Durchmischung im Versuchsbehälter. Anhand von Aufzeichnungen der vorgelagerten Anlage (Fütterung und Gasbildung) wurde sichergestellt, dass während des Versuchs ein kontinuierlicher Betrieb erfolgte und die Bedingungen im Versuchsbehälter die Bedingungen in der Biogasanlage ausreichend widerspiegeln.



Abbildung 18: Versuchsbehälter



Abbildung 19: Beutel mit groben Maschen



Abbildung 20: Beutel im Versuchsbehälter

Die Probenahme der verwendeten Maissilage aus dem Silo erfolgte nach den dafür vorgesehenen hausinternen Richtlinien der TLL (2001). Neben der Bestimmung des gravimetrischen Wassergehaltes wurden Proben zur einfachen Weender-Futtermittelanalyse und für die Bestimmung der Gasausbeuten im HBT genommen.

Die Maissilage wurde zu jeweils $730 \text{ g FM} \pm 150 \text{ g}$ in rechteckige Beutel aus synthetischem Material, mit den Maßen $300 \times 500 \text{ mm}$, gefüllt. Die verschiedenen Maschenweiten betrugen bei den feinen Beuteln $0,07 \text{ mm}^2/\text{mm}^2$, bei den mittleren $0,58 \text{ mm}^2/\text{mm}^2$ und bei den groben $0,68 \text{ mm}^2/\text{mm}^2$ (Abb. 19). Von den feinen und groben Beuteln wurden jeweils sechs Wiederholungen und von den mittleren drei Wiederholungen befüllt. Um einen möglichst vollständigen Luftabschluss der Beutel zu gewährleisten wurden diese mit Steinen von jeweils $200 - 560 \text{ g}$ zusätzlich beschwert. So wurden die Beutel in das in Abbildung 18 dargestellte Güllebassin eingelassen.

Die Verweildauer der Beutel betrug 31 d (je 3 Wdh.) bzw. 67 d (nur feine und grobe je 3 Wdh.). Unmittelbar nach Entnahme der Proben aus dem Becken wurden die Beutel kurz in Wasser von Grobbestandteilen befreit und zur gründlicheren Reinigung eine Minute mit einer Bürste gereinigt. Eine normierte und reproduzierbare Reinigung der Beutel mittels Waschautomaten wie in FLACHOWSKY et al. (1987) wurde wegen der Befürchtung zu hoher Auswaschverluste aus den grobmaschigen Beuteln verworfen. Nach der Inkubation erfolgte an jeder Probe die Bestimmung der verbleibenden Trockenmasse (TM) und der Gehalte an Kohlenstoff, Stickstoff, Rohasche, Lignin sowie des pH-Wertes und des Restgaspotenzials.

Ergebnisse

Die Untersuchungsergebnisse der Inhaltsstoffe und der Biogasausbeute der eingesetzten Maissilage vor und nach der Inkubation sind in Tab. 10 dargestellt; mit fast $430 \text{ l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$ zeigt sich deren hohe Qualität für die Biogaserzeugung.

Tabelle 10: Eigenschaften der verwendeten Maissilage (n = 3) und der Gärreste (n = 9); dargestellt sind Mittelwerte ($\bar{x}$) und Standardabweichung ($\pm \sigma$) der jeweiligen Ergebnisse

	TS	oTS	C-Gehalt	N-Gehalt	Roh-faser	Lignin	Roh-fett	N-freie Extrakt-stoffe	HBT Biogas	CH ₄ -Gehalt
	[%]	[%]	[% der TM]	[% der TM]	[% der TM]	[% der TM]	[% der TM]	[% der TM]	[l _N /kg _{oTS}]	[%]
$\bar{x} (\pm \sigma)$ Mais-silage	28 ($\pm 0,9$)	95,9 ($\pm 0,2$)	47,6 ($\pm 0,2$)	1,4 (-)	17,8 ($\pm 0,6$)	2,7 ($\pm 0,4$)	3,0 ($\pm 0,2$)	66,5 ($\pm 0,8$)	730,7 ($\pm 3,5$)	56,4 ($\pm 0,1$)
$\bar{x} (\pm \sigma)$ Gärreste	10,3 ($\pm 0,7$)	83,4 ($\pm 4,4$)	43,8 ($\pm 1,9$)	2,2 ($\pm 0,4$)	-	15,6 ($\pm 5,2$)	-	-	429,9 ($\pm 89,9$)	58,5 ($\pm 1,8$)

Zu den Kontrollterminen war die starke Bildung von Blasen (7 Tage nach Versuchsbeginn) und einer 5 - 15 cm Schwimmschicht (21 Tage nach Versuchsbeginn) zu beobachten. Vor allem bei Beuteln mit der feinen Maschenweite war die vollständige Bedeckung mit Gärresten nicht immer gewährleistet. Die jeweiligen Beutel wurden manuell untergetaucht.

Die Analyseergebnisse der Beutelinhalte ergaben mittlere Trockenmasseverluste von 69 % (grob), 56 % (mittel) und 58 % (fein). Die Schwankungen der Mittelwerte betrugen 19,6 % (grob), 10,6% (mittel) und 4,4 % (fein). Maximalwerte zum TM-Verlust zeigten sich in den weitmaschigen Beuteln mit Werten von 80,6 %. Die geringsten TM-Verluste wurden mit 50,4 % in den mittleren Beuteln erfasst. Der pH-Wert des Gärrestes betrug $8,9 \pm 0,3$.

Nach Bestimmung des TS-Gehaltes und des Trockenmasseverlustes der Beutel zum 2. Entnahmeterrn mussten diese Proben wegen nicht plausibler Ergebnisse verworfen werden.

Die mittleren Kohlenstoffverluste im Vergleich von Ausgangssubstrat und Gärsubstrat über den Versuchszeitraum waren $60 \% \pm 3,3 \%$ (fein), $60 \% \pm 5 \%$ (mittel) und $72 \% \pm 12,1 \%$ (grob). Die vorläufig gemessenen Restgaspotenziale aus dem HBT ergeben in der Rückrechnung mittlere Biogasbildungswerte des Einsatzsubstrats in der Biogasanlage von $509 \text{ l}_N/\text{kg}_{oTS} \pm 11,3 \%$ (fein), $370 \text{ l}_N/\text{kg}_{oTS} \pm 24,8 \%$ (mittel) und $411 \text{ l}_N/\text{kg}_{oTS} \pm 18,1 \%$ (grob).

Der mittels Restgaspotenzial berechnete C-Verlust der Silage und der Gärreste sowie den tatsächlichen C-Verlust der Gärreste war bei den mittleren Beuteln mit einer durchschnittlichen Abweichung von 3,85 % am nächsten an den C-Verlusten der Silage und die durchschnittlichen Werte der feinen Beutel mit 5,5 % am weitesten davon entfernt (Abb. 21).

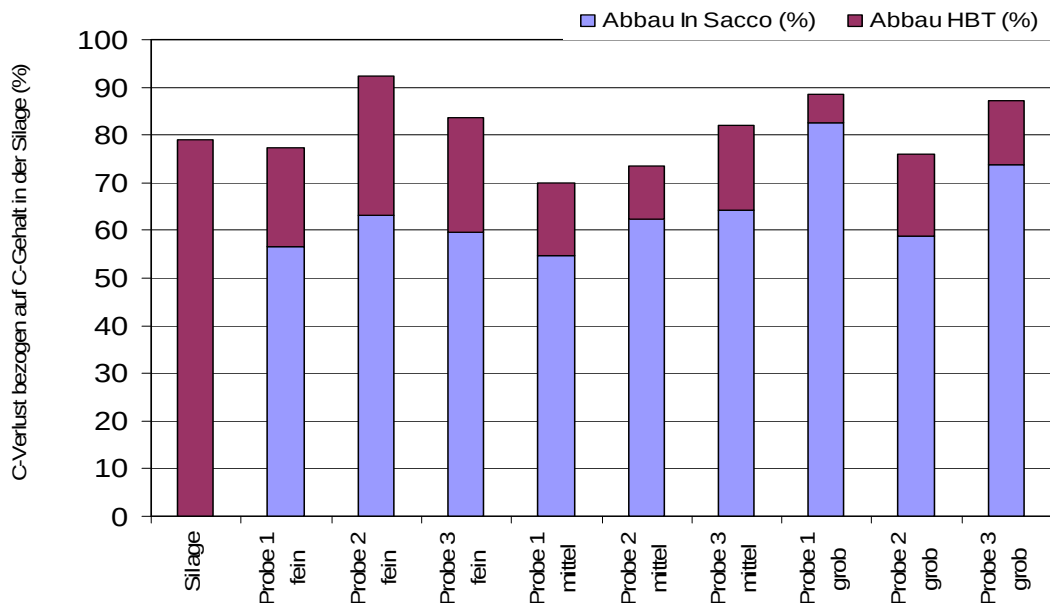


Abbildung 21: Darstellung der C-Verluste durch den TM-Verlust im In sacco-Versuch und möglichen C-Abbau, berechnet durch das HBT-Restgaspotenzial

Die Gehalte an Lignin und Rohasche steigen in allen drei Beuteltypen im Vergleich zu den Gärresten absolut gesehen an. Die höchsten Anstiege verzeichnen dabei die Beutel mit der mittleren Maschenweite mit einer Zunahme des Lignins um + 228 % und einer Zunahme der Rohasche um 110 %.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass, anhand der in den Praxisuntersuchungen gewonnenen Ergebnisse mit dem gewählten In sacco-Verfahren, noch keine ausreichende Ergebnissicherheit hinsichtlich der Prüfung von Substraten erzielt werden kann.

Die Schwankungen der TM-Verluste sind nur zwischen den Mittelwerten der einzelnen Beutel, innerhalb der Werte der feinen Säcke, unterhalb der rel. Standardabweichung von 7 %. Bei Bewertung der Kohlenstoffverluste war die Streuung der Ergebnisse innerhalb der feinen und mittleren Maschenweiten geringer als zwischen allen Beuteln. Die beobachteten Trockenmasse- und Kohlenstoffverluste und die möglichen Kohlenstoffverluste durch das Restgaspotenzial zeigen im Vergleich mit den Werten der Silage ein zufriedenstellendes Bild.

Die starken absoluten Anstiege der Lignin- und Rohaschegehalte lassen allerdings eine starke Verunreinigung der Gärreste vermuten. Da aber nicht die groben Beutel das Maximum der Anstiege zeigen, wie erwartet werden könnte, ist die mögliche Fehlerquelle bis jetzt noch nicht klar. Vermutlich ist aber von einer Auswaschung von Material in diesen Beuteln auszugehen.

Sollte die Methode auch zur Prüfung von Substraten eingesetzt werden, ist eine Weiterentwicklung notwendig. Folgendes wird dafür empfohlen:

- Zur ressourcenschonenden Versuchsdurchführung ist eine runde Beutelform zu bevorzugen, um die Reinigung und damit die erneute Nutzung der Beutel zu vereinfachen. Die Dimension der Beutel kann im Einsatz an der BGA mindestens 10-mal größer ausfallen.

Auch die Menge des eingesetzten Substrates sollte für die aufgeworfene Fragestellung auf 1.000 g FM erhöht werden. Die bisherigen Mengen lassen in der Rückwaage nur wenig Spielraum für die Durchführung des HBT, der Weender-Futtermittelanalyse und der Wassergehaltsbestimmung.

- Zur praktischen Durchführung sollte in einem Behälter mit oben beschriebener Abmessung die Anzahl der eingesetzten Beutel nicht erhöht werden. Bei einer Erhöhung der Anzahl kommt es zur Überlagerung und Beeinträchtigung der Beutel untereinander. Diese Effekte könnten durch in die Beutel eingelassene Drahtformen minimiert werden. Des Weiteren können bei einer zu hohen Anzahl an Beuteln nicht alle optimal vom Gärrest umschlossen sein. Zur Gewährleistung eines kompletten Umschlusses des Substrates mit Gärrest sind die Beutel mit Gewichten zu je 1.000 g zu beschweren und auf unterschiedlichen Höhen im Versuchsbehälter zu platzieren.
- Die Inkubationszeit kann im Gegensatz zu Versuchen bei Tieren (bis zu 96 h) 1 bis 2 Monate andauern. Nach der Entnahme und der groben Reinigung der Beutel im Wasserbad ist ein normiertes und reproduzierbares Verfahren zur Reinigung zu bevorzugen. Wie in FLACHOWSKY et al. (1987) beschrieben, kann das durch die Reinigung mittels Waschautomat (~20 min. Spülprogramm) durchgeführt werden. Zusätzlich kann im Vorfeld auch das Auswasch- bzw. Lösungsverhalten bestimmt werden.
- Wie bei der Futtermittelbewertung für Wiederkäuer müssen die an der BGA genutzten Beutel und Garne aus synthetischem Material bestehen. Die Maße der gewählten Beutel fallen jedoch bei der Untersuchung an der BGA deutlich größer aus. Werden allein die TM-Verluste betrachtet ist die in FLACHOWSKY et al. (1987) genannte mittlere Porengröße von 30 - 40 μm nach bisherigen Erkenntnissen nicht nötig. Werden bei den feinen Beuteln gleichförmig runde Poren angenommen, können bei den bestimmten Maschenweiten (0,07 mm^2/mm^2) mittlere Porendurchmesser von 80 μm ausreichend sein. Das gilt umso mehr, weil die Substrate an der BGA im Gegensatz zur Inkubation im Pansen nicht gemahlen werden.

3.6. Untersuchungen zum Restgaspotenzial landwirtschaftlicher Biogasanlagen (Dr. Katja Gödeke)

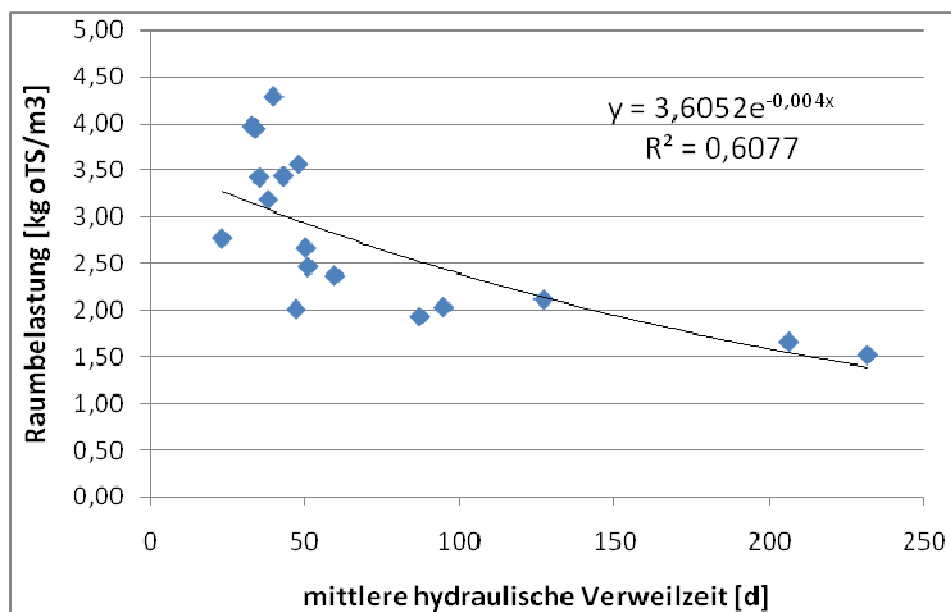
Die hier ausgewählten Ergebnisse wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit mit dem Thema „Restgaspotenziale von Gärresten aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen Thüringens unter verschiedenen Temperaturbedingungen im Labormaßstab“ von Herrn Marcus Kohlhasse (FH-Jena, 2010) angefertigt. Die Betreuung lag bei Dr. Katja Gödeke und Dr. Gerd Reinhold für die Erstellung der Arbeit und Herrn Frank Hengelhaupt für die praktische Durchführung.

Einleitung und Methode

Die Erzeugung und Verwertung von Biogas bringt neben vielen ökologischen Vorteilen (CO_2 -neutrale Energieerzeugung, Verminderung der Methanemission durch Wirtschaftsdünger-
vergärung, Energiegewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen) auch Nachteile mit sich. Denn neben seiner Funktion als Energieträger stellt Methan auch ein bedeutendes Treibhausgas dar. In der Biogasproduktion entsteht Methan nicht nur kontrolliert im Fermenter, sondern in Abhängigkeit von den Verfahrensparametern auch in den z.T. nicht gasdicht abgedeckten Gärrestlagern. Dies ist insofern bedenklich, wenn die Gärreste noch nicht vollständig ausgegast sind und weiter Biogas produzieren. Man spricht hierbei vom Restgaspotenzial.

Im Rahmen der Untersuchung wurden Gärrestproben von 17 verfahrenstechnisch sehr unterschiedlichen Biogasanlagen mit Hilfe des HBT auf Grundlage der VDI-Richtlinie 4630 und der DIN 38414-8 auf deren Restgaspotenzial untersucht. Die Prozessdaten wurden für jede Anlage über einen Fragebogen erhoben. Da die Gärreste aus Praxisanlagen in der Regel nicht bei 37 °C gelagert werden, fanden zusätzliche Untersuchungen bei zwei weiteren Temperaturstufen statt. Damit sollten möglichst praxisnahe Verhältnisse für die Restgasbildung erzielt werden. Die Temperaturstufen lagen bei 37 °C (Laborstandard = Restgaspotenzial), bei Raumtemperatur 25 °C (maximale Lagertemperatur im Sommer) und bei 10 °C (maximale Lagertemperatur im Winter).

Die untersuchten 17 Biogasanlagen wurden unter anderem auch wegen ihrer deutlich unterschiedlichen Prozessparameter ausgewählt. Die Raumbelastung variiert hierbei zwischen 1,5 kg/m³ und 4,3 kg/m³, wobei der überwiegende Teil der Anlagen (13 Anlagen) eine Raumbelastung von 2 bis 3 kg/m³ aufweist. Die mittlere hydraulische Verweilzeit liegt zwischen 23 Tagen und 232 Tagen, wobei auch hier 12 von 17 Anlagen eine Verweilzeit zwischen 23 und 60 Tagen aufweisen. Zwischen den beiden Größen, mittlere hydraulische Verweilzeit und Raumbelastung, besteht eine Abhängigkeit, die jedoch nicht linear ist (Abb. 22).



Abbil- 22: Zusammenhang zwischen Raumbelastung (in kg oTS/m³) und Verweilzeit (in Tagen)

Anlagen mit längerer Verweilzeit besitzen eine geringere Raumbelastung, die auch aufgrund des deutlich erhöhten NAWARO-Anteiles am Einsatzsubstrat notwendig ist. Die deutlich kürzere Verweilzeit ist bei gülledominierten Anlagen, in Verbindung mit einer größeren Streuung der Raumbelastung, zu finden.

Ergebnisse

Inkubationstemperatur

Die Temperatur, bei der die Untersuchungen durchgeführt wurden, hat einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis der Restgasmessungen (Abb. 23).

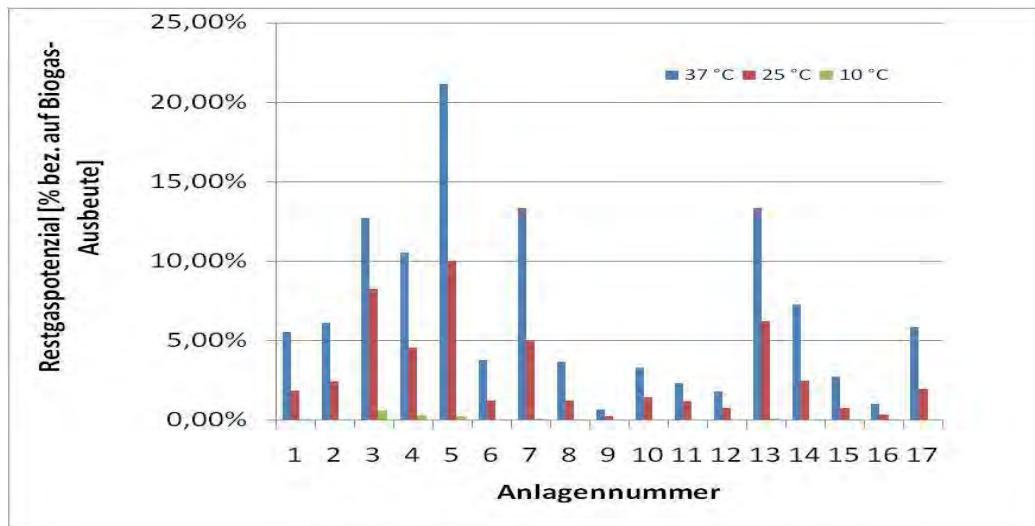


Abbildung 23: Abhängigkeit des Restgaspotenzials (in %, bezogen auf die Biogasausbeute) von der Inkubationstemperatur (37 °C, 25 °C, 10 °C)

Bei 10 °C wurde so wenig Biogas innerhalb der 40 Tage produziert, dass eine Methanmessung nicht möglich war und die Ergebnisse sich auf das gesamte gebildete Biogas beschränken. Lag jedoch z.B. das Restgaspotenzial in Extremwerten bei 37 °C sehr hoch, so traten von derselben Probe bei 25 °C (Sommerlagerung) im Durchschnitt nur noch ca. 50 % der bei 37 °C erreichten Restgasemissionen auf. Bei 10 °C Vergärungstemperatur (Winterlagerung) kam die Methanbildung fast zum Erliegen. Es ist jedoch eine sehr große Streuung der Ergebnisse zu erkennen, was auf den starken Einfluss der verfahrenstechnischen Anlagenparameter sowie der Zusammensetzung der Gärsubstrate schließen lässt.

Verweilzeit und Raumbelastung

Wesentliche Unterschiede zwischen den einzelnen Anlagen lassen sich mit Hilfe der anlagenspezifischen Prozessparameter ermitteln. Ziel hierbei war es, zu erfahren welche Auswirkungen die Parameter Verweilzeit und Raumbelastung auf das Restgaspotenzial der Gärreste haben. Die Betrachtungen für diesen Vergleich bezogen sich hierbei aber ausschließlich auf die Temperatur von 37 °C. Der Grund hierfür war, dass bei dieser Temperatur die im Versuch höchstmögliche Methanausbeute erzielt wurde, die Daten somit gut vergleichbar waren und nicht zusätzlich durch den Parameter Temperatur beeinflusst wurden. Es war zu erkennen, dass mit steigender Verweilzeit das Restgaspotenzial abnimmt, wobei auch hier keine lineare Abhängigkeit zu erkennen ist (Abb. 24).

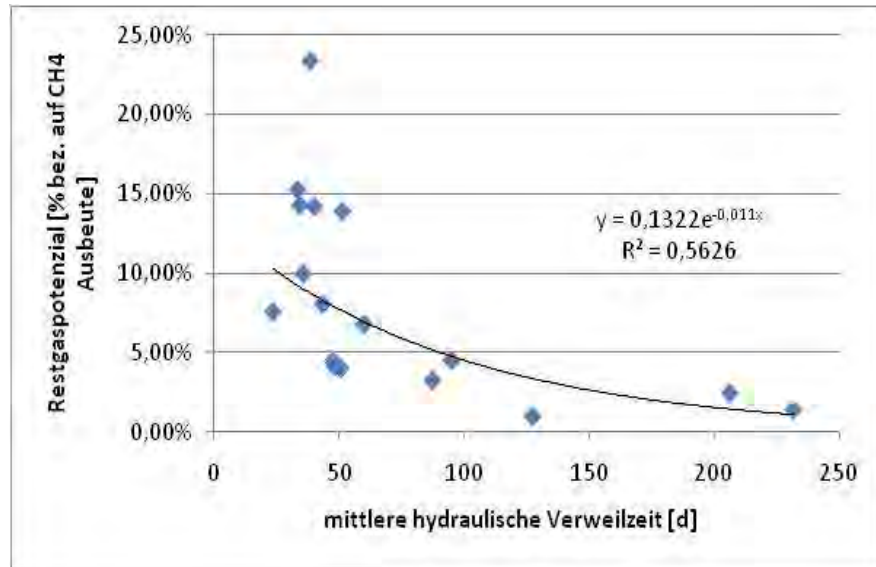


Abbildung 24: Abhängigkeit des Restgaspotenzials (in %, bezogen auf die Methanausbeute) von der Verweilzeit (in Tagen)

Anders verhält es sich hinsichtlich der Raumbelastung. Es wurde deutlich, dass mit steigender Raumbelastung auch das Restgaspotenzial zunimmt, wobei auch hier einige „Ausreißer“ zu verzeichnen waren (Abb. 25).

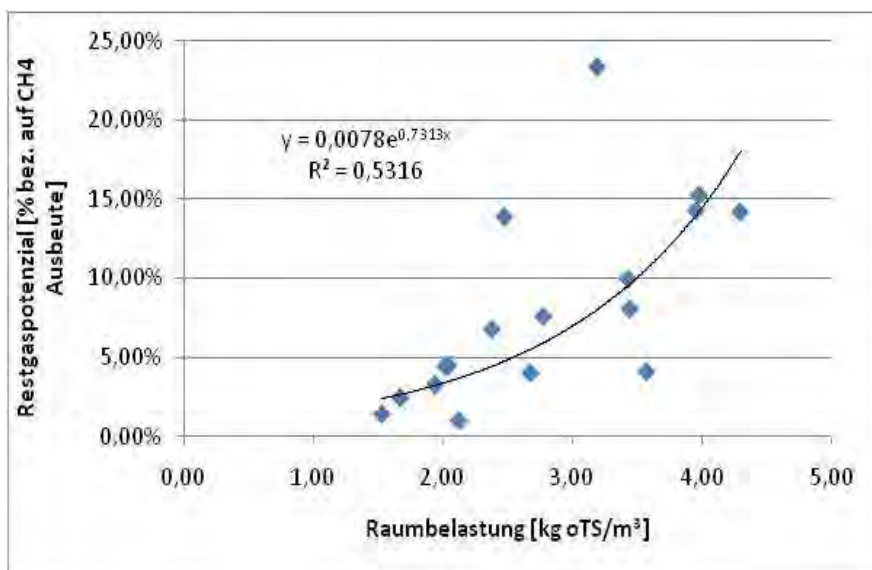


Abbildung 25: Abhängigkeit des Restgaspotenzials (in %, bezogen auf die Methanausbeute) von der Raumbelastung (in kg oTS/m³)

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Anlagenanalysen bzgl. Verfahrensparameter und der Untersuchungen des Restgaspotenzials der Biogasanlagen, haben gezeigt, dass sich in den Gärresten aus Biogasanlagen mit kurzer Verweilzeit und/oder hoher Raumbelastung, noch ein hohes Methanpotenzial nachweisen lässt. Aus den Untersuchungen heraus ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Mit steigender mittlerer hydraulischer Verweilzeit sinkt das Restgaspotenzial deutlich.
- Mit steigender Raumbelastung steigt auch das Restgaspotenzial an.
- Bei der Vergärungstemperatur von 25 °C (Sommerlagerung) liegt die Methanemission der Gärreste im Durchschnitt unter 50 % des bei 37 °C ermittelten Restgaspotenzials.
- Bei einer Vergärungstemperatur von 10 °C (Winterlagerung) war nahezu keine Gasbildung mehr erkennbar.

Eine gasdichte Abdeckung der Gärrestlager ist sinnvoll oder sogar notwendig für Anlagen mit kurzer Verweilzeit und hoher Raumbelastung. Hierbei können sich für diese Anlagen, deren Restgaspotenzial erwartungsgemäß sehr hoch ist, auch wirtschaftliche Vorteile aus der Abdeckung ergeben, da die hier entstandenen Biogasmengen einen zusätzlichen Erlös bringen könnten. Bei niedrigen Lagerungstemperaturen und/oder vorangehenden langen Verweilzeiten bzw. niedrigen Raumbelastungen im Biogasfermenter, kann demnach u. U. auf die gasdichte Gärrestlagerabdeckung verzichtet werden.

4. Weitere Tätigkeiten

4.1. Teilnahme am Arbeitskreis Biogas (VDLUFA)

In Hinblick auf die Aktualität und Entwicklung im Sektor Biogas wurde von der VDLUFA der Arbeitskreis Biogas ins Leben gerufen. Der Grundgedanke ist, fachliche Fragen und Diskussionen, welche von einzelnen Einrichtungen bearbeitet werden, zu bündeln und gemeinsam eine Lösung zu finden. Im März 2008 kam der Arbeitskreis Biogas zur 1. Sitzung zusammen und hat bisher 11-mal getagt. Seit 2010 ist der bis dahin fachgruppenübergreifende AK Biogas der Fachgruppe VIII (Umweltanalytik) der VDLUFA zugeordnet.

Ein Schwerpunkt der bisherigen Tätigkeit war die Entwicklung einer allgemein anwendbaren Probenahmenvorschrift zur Gewinnung einer Probe von flüssigem Behälterinhalt in Biogasanlagen. Die Proben können für unterschiedliche Zwecke gewonnen werden, der Schwerpunkt lag hierbei aber bei der Laborbestimmung, der für eine Biogasanlage notwendigen Parameter. Der Gedanke war hierbei, dass durch eine unsachgemäße oder einer nicht einheitlichen Vorgehensweise bei der Probeentnahme und dem Transport, die Aussage einer guten und gründlichen Laboranalyse verfälscht bzw. unbrauchbar werden kann.

Bei diesen Arbeiten konnte sich die TLL (Frank Hengelhaupt, Dr. Katja Gödeke) federführend einbringen. Es wurde u. a. die komplette Zusammenstellung des strukturellen Grundgerüsts der Probenahmenvorschrift von der TLL übernommen und die notwendigen fortführenden Arbeiten dazu durchgeführt. Zudem wurde der Entwurf des zugehörigen Probenahmeprotokolls angefertigt und es konnte zu den Begriffsdefinitionen und inhaltlichen Schwerpunkten beigetragen werden. Die Probenahmenvorschrift konnte so Ende 2009 fertig gestellt und in die erste sowie zweite Lesung durch den AK Biogas bzw. durch die Fachgruppe gebracht werden. Seit 2011 ist die Methode unter dem Titel "Probenahme in Biogasanlagen" im VDLUFA Methodenbuch VII zu finden.

Weiterhin wurde an der Erstellung der VDLUFA Verbandsmethode „Bestimmung der Biogas- und Methanausbeute in Gärtests“ gearbeitet. Die Methode dient der Bestimmung der Biogas- und Methanausbeute von Einsatzstoffen für Biogasanlagen in Gärtests unter Laborbedingungen. Ziel bei der Erstellung war es eine Standardisierung der Gärtests unter Laborbedingungen mit Basis für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu schaffen. Über die erste und

zweite Lesung konnte konstruktiv (Frank Hengelhaupt) an der Gestaltung und Verbesserung der Methode bis hin zu ihrer Fertigstellung mitgewirkt werden. 2011 ist diese im VDLUFA Methodenbuch VII aufgenommen worden.

Momentan wird an zukünftigen Methoden wie z.B. zur FOS/TAC Bestimmung und zur Probenvorbereitung von Proben aus Biogasanlagen gearbeitet.

4.2. Betreuung von Praxis-, Bachelor-, bzw. Diplomarbeiten; Zusammenarbeit Fachhochschule Jena

Im Zeitraum von März bis Ende Juli 2010 konnte die Praxismodulararbeit sowie die Bachelorarbeit vom Herrn Marcus Kohlhasse (FH Jena) betreut und erfolgreich zum Abschluss gebracht werden. In der Praxisarbeit „Praktische Durchführung von Gärtests mit dem Hohenheimer Biogasertragstest“ wurde vor allem der systematische Aufbau und die praktische Durchführung des Hohenheimer Biogastests behandelt. Darauf aufbauend erfolgte die Erstellung der Bachelorarbeit „Restgaspotenziale von Gärresten aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen Thüringens unter verschiedenen Temperaturbedingungen im Labormaßstab“. Dazu wurden Gärreste aus verschiedenen Biogasanlagen auf ihr Restgaspotenzial im HBT untersucht (s. Kap. 3.6, Betreuung Dr. K. Gödeke, Dr. G. Reinhold, F. Hengelhaupt).

Weiterhin wurde 2010 im Rahmen der Erstellung der Bachelorarbeit „Vergleich verschiedener Messsysteme zur Erfassung der Biogasausbeute und Zusammensetzung in Bezug auf den Einsatz in der Forschung“ durch Frau Harnisch (FH Jena) mit der FH Jena zusammengearbeitet. Dabei sind Proben (Klärschlamm, Cellulose) im HBT und parallel an der FH im Messsystem untersucht und verglichen worden. Im Zuge dessen konnte zur Lösung von diverser Problematiken des Bluesens-Systems beigetragen werden (Betreuung F. Hengelhaupt).

Im Jahr 2011 konnte von März bis Ende August 2011 die Praxismodulararbeit sowie Bachelorarbeit von Frau Anne Kastner (FH-Jena) betreut und erfolgreich zum Abschluss gebracht werden. In der Praxisarbeit „Ermittlung der Standardabweichungen von Messergebnissen des Hohenheimer Biogastests“ wurde vor allem auf die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse des HBTs eingegangen (überprüft anhand der Standardabweichungen von zwei verwendeten Standards - Mais und mikrokristalline Cellulose - und dem Blindwert der Impfgülle). Darauf aufbauend erfolgte die Erstellung der Bachelorarbeit mit dem Thema „Einfluss ausgewählter Kohlenstofffraktionen unterschiedlicher Einsatzsubstrate auf deren Biogas- und Methanertrag“. Dazu wurde mit dem vorliegenden Datensatz der bisher auf Inhaltsstoffe und im HBT untersuchten Proben gearbeitet (s. Kap. 3.2, Betreuung Dr. K. Gödeke, F. Hengelhaupt).

Im November 2011 hat Frau Nicole Zimmer (FSU-Jena) beim HBT ein Praktikum absolviert. (Betreuung F. Hengelhaupt).

Von März bis September 2012 wurde erneut eine Praxismodulararbeit mit anschließender Bachelorarbeit von Herrn Sebastian Pietschmann (FH-Jena) zum Abschluss gebracht. Die Praxismodulararbeit trug den Titel „Gärsäurespektrumbestimmung mittels GC an siliertem Pflanzenmaterial in Abhängigkeit der Probentrocknungstemperatur“ und befasste sich mit der praktischen Durchführung der klassischen Gärsäurebestimmung an frischem Silagematerial sowie der Methodenentwicklung der Gärsäurenbestimmung an getrocknetem Material. In der Bachelorarbeit mit dem Thema „Auswirkung der Trocknungsintensität bei der Probenvorbereitung von Silagen auf den Gehalt der Gärsäuren und das Gärsäurespektrum sowie deren Einfluss auf den Biogas- und Methanertrag“ konnten die Einflüsse der Fruchtarten, der Si-

lierqualität und der Trocknungsstufe auf die Gärsäuren sowie die Gasausbeute diskutiert werden (s. Kap. 3.3, Betreuung Dr. K. Gödeke, F. Hengelhaupt).

5. Zusammenfassung und Ausblick

Methodik

- In der HBT-Arbeitsgruppe der TLL und damit bei der Durchführung des HBT ist es gelungen, seit Etablierung der Methode in der TLL (2007), die Aussagequalität und die Vergleichbarkeit der gewonnenen Werte abzusichern. Dies wird gewährleistet durch die Akkreditierung im eigenen Hause sowie mit der kontinuierlichen Teilnahme am VDLUFA-AK Biogas und an den Ringversuchen.
- Es besteht zudem eine nachgewiesene hohe Übereinstimmung mit den Batchtest-Werten des ATB Potsdam-Bornim.
- Somit konnten umfassende, fachlich und methodisch abgesicherte Ergebnisse erzielt werden, die eine gute Ergänzung zu den Aussagen der EVA-Partner ATB und AG FUKO (LWK-NI) darstellen.

Wissenschaftlicher Erkenntnisgewinn

- Unter dem Einfluss der Anbaujahre und der Fruchtfolgegestaltung im Fruchtfolgeablauf über mehrere Rotationen konnten die Biogas- und Methanausbeuten der Fruchtarten sowie die Methanhektarerträge betrachtet werden und Größenordnungen für das Potenzial unterschiedlicher Anbauoptionen abgeleitet werden. Darin liegt die bisherige Einzigartigkeit dieser Untersuchungen.
 - Die Vorzüglichkeit von Mais zur Biogasproduktion konnte bestätigt werden; es zeigten sich aber auch weitere Fruchtarten/-kombinationen (wie Winter-Ganzpflanzengehälter oder W.Roggen (WiZwF) mit Sorghum b.x s. (ZF) oder auch mehrj. Luzernegras), die eine hohe Biogas- bzw. Methanausbeute aufwiesen und somit als Ergänzung in der Fruchtfolgegestaltung mit Energiepflanzen herangezogen werden können.
 - Einzelnen Fruchtarten zeigen sich durchaus unterschiedlich in den verschiedenen Jahren hinsichtlich ihres Methanhektarpotenzials, wobei die ertragstabilsten Fruchtfolgeleistungen über die Jahre bisher von Fruchtfolge 3 (Mais - W.Roggen (WZwF) / Sorghum b.x s. - W.Triticale), Fruchtfolge 7 (Mais-Selbstfolge) und Fruchtfolge 8 (mehrj. Topinamburanbau, Ernten: 3 x Kraut und 1 x Knollen) erbracht wurden.
 - Die Notwendigkeit der Ergänzung von Trockenmasseerträgen mit experimentell ermittelten Methanausbeuten, wird am Beispiel des Topinambur besonders deutlich. Die hohe Masseleistung des Kraits wird hinsichtlich der energetischen Nutzbarkeit, aufgrund niedriger spezifischer Gasausbeuten, relativiert. Gleichzeitig zeigen sich auf diese Weise Ansätze für Pflanzenbau (optimierte Erntetermine), Substrataufbereitung (Aufschlussverfahren) und Züchtung (Verbesserte Substrateigenschaften).
- Untersuchungen der Abhängigkeiten des Gasertrages von pflanzlichen Inhaltsstoffen (z.B. Roh Nährstoffe, Gärsäuren) ist notwendig, um Zuchtziele oder Erntezeitpunkte identifizieren zu können und ggf. zu einer schnellen Abschätzung des möglichen Gaspotenzials zu kommen.

-
- Die Pflanzeninhaltsstoffe sind bisher nur bedingt zur Abschätzung der Gasausbeuten geeignet. Es zeigen sich starke Fruchtartenunterschiede. Grundsätzlich ist eine multivariate Schätzung mit Parametern der erweiterten Weender-Futtermittelanalyse einfachen Schätzverfahren mit Summenparametern vorzuziehen.
 - Der Ligningehalt hat unter einem Gehaltswert von etwa 4 % in der pflanzlichen TM scheinbar keinen Einfluss auf die Gasausbeuten. Erst bei Überschreitung dieses Gehaltswertes und fehlendem „Ausgleich“ durch die Wirkung anderer Inhaltsstoffe zeigt sich eine sehr deutliche Abhängigkeit der Gasausbeuten vom Ligningehalt. Hier sind dringend weitere Untersuchungen und Auswertungen erforderlich.
 - Es zeigt sich dennoch ein relativ hohes Bestimmtheitsmaß der Schätzgenauigkeit der Gasausbeuten anhand des Ligningehaltes über alle Fruchtarten. Aufgrund des Detailwissens muss nun aber davon ausgegangen werden, dass die errechneten Gasausbeuten mit diesem Schätzverfahren für Pflanzenmaterial mit geringen Ligningehalten ($\leq 4\%$ TM) falsch sind.
 - Beim Vergleich der Gärsäurespektren und -gehalte sowie deren Auswirkungen auf die Gasausbeuten in Abhängigkeit der Probentrocknung (frische, bei 60 °C und bei 105 °C getrocknete Silage) zeigte sich, dass der größte Verlust an flüchtigen Bestandteilen im Trocknungsschritt von frisch zu 60 °C getrocknet liegt. Hier reduziert sich der Gärsäuregehalt (abhängig von Gärsäure, Fruchtart und Silierqualität) bis auf zu 20 % des Ausgangsgehaltes. Bei dem folgenden Trocknungsschritt bei 105 °C wird der Gehalt lediglich nur noch auf 10 % des Ausgangsgehaltes im frischen Material reduziert.
 - So muss bei der Vergärung des frischen Silagematerials eine Trockenmassekorrektur vorgenommen werden, um die Gasausbeute auf den korrekten oTS-Wert zu beziehen und die Gasausbeute nicht zu überschätzen. Diese aus der Futtermittelbewertung stammende Pauschal-Korrektur ist scheinbar nicht für Silagen geeignet, die starke Fehlgärungen aufweisen und somit bestimmte Gärsäuren in hohen Gehalten aufweisen, die im Futtermittelbereich unerwünscht und selten sind, jedoch ein hohes Gasbildungspotenzial erzielen. Trotz Korrektur werden bei diesen Proben die Gasausbeuten überschätzt. Hier bedarf es der Berechnung mit tatsächlichen Gehalten.
 - Der HBT setzt 60 °C getrocknete Proben ein, die keiner Trockenmassekorrektur bedürfen und somit auch auf den jeweils wahrscheinlicheren oTS bezogen werden, da die Restgehalte an flüchtigen Bestandteilen vernachlässigbar gering sind (Differenz der Gehalte in der 60 °C und 105 °C getrockneten Probe).
- Aussagen zum Restgaspotenzial in Abhängigkeit der Lagertemperatur ermöglichen die Einschätzung der Notwendigkeit z.B. einer gasdichten Abdeckungspflicht für Gärrestlager.
 - Das Restgaspotenzial von Gärresten (bei 37 °C) ist abhängig von der Kombination der Anlagenparameter Raumbelastung und Verweilzeit, die tatsächliche Restgasemission zusätzlich von der Gärrest-Lagertemperatur (10 °C, 25 °C).
 - Mit sinkender mittlerer hydraulischer Verweilzeit und/oder steigender Raumbelastung steigt auch das Restgaspotenzial an. Bei der Vergärungstemperatur von 25 °C (Sommerlagerung) liegt die Methanemission der Gärreste im Durchschnitt unter 50 % des bei 37 °C ermittelten Restgaspotenzials. Bei einer Vergärungstemperatur von 10 °C (Winterlagerung) war nahezu keine Gasbildung mehr erkennbar.

-
- Eine gasdichte Abdeckung der Gärrestlager ist daher sinnvoll oder sogar notwendig für Anlagen mit kurzer Verweilzeit und hoher Raumbelastung.
 - Die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse bzgl. Abbauverhalten des Einsatzsubstrats und Gasbildungsvermögen in die Praxis ist ein großes Anliegen. Daher wurde im Rahmen des EVA-Projekts ein methodischer Tastversuch an einer Praxisbiogasanlage unternommen.
 - Der an die Futtermittelbewertung angelehnte Versuch mit einer „In sacco“-Methode zur Beurteilung des TM- und C-Abbaus in einer Praxisbiogasanlage hat die Erkenntnis gebracht, dass weitere methodische Arbeiten erforderlich sind. Dabei wäre z.B. eine runde Beutelform zu bevorzugen, um die Reinigung und damit die erneute Nutzung der Beutel zu vereinfachen. Die Dimension der Beutel sollte mind. 10-mal größer ausfallen als im Versuch und die Menge des eingesetzten Substrates kann somit auf 1 kg FM erhöht werden. Im Vergleich zum Verfahren am Tier kann auch die Inkubationszeit auf 1 bis 2 Monate verlängert werden.
 - Die schonende Reinigung der Beutel und die Quelle der Roh Nährstoffzufuhr im Substrat durch den Vergärungsvorgang sind weitere Punkte, die noch zu klären sind.

Ausblick

- Eine Ergebnisverwertung findet u. a. in Form der Einarbeitung in eine sogenannte „Biogasmatrix“ statt, die Substrate relativ zum Mais einordnet. Diese wird im EVA-Projekt vom ATB erstellt, aktualisiert und mit Hilfe der HBT-Werte ergänzt.
- Des Weiteren konnten die erzielten Ergebnisse in Tabellenwerke wie „Gasausbeuten Landwirtschaftlicher Biogasanlagen“ (KTBL) mit einfließen und wurden in diversen Veröffentlichungen der Öffentlichkeit präsentiert (siehe Kapitel 7) und dort diskutiert.
- Eine direkte Nutzbarkeit für die praktische Landwirtschaft bzw. die Planung von Biogasanlagen und Anbausystemen ist somit gewährleistet.

6. Literatur

- FNR (Hrsg., 2009): Standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen, Ergebnisse des Verbundprojektes „Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands, EVA I“, Gülzow
- Helffrich, D.; Oechsner, H. (2003): Hohenheimer Biogasertragstest - Vergleich verschiedener Laborverfahren zur Vergärung von Biomasse, Agrartechnische Forschung, Heft 3, S. 27 - 30
- Lorenz, M.; Nehring, A.; Freund, D.; Oswald, M., Vetter, A. (2012): Entwicklung und Optimierung von standortangepassten Anbausystemen für Energiepflanzen im Fruchtfolgeregime, Teilbericht Standort Dornburg, Anlage 7b des Gesamtberichtes EVA II, Gefördert durch das BMELV über die FNR, FKZ: 22013008
- Nehring, A.; Vetter, A. (2009): Entwicklung und Optimierung von standortangepassten Anbausystemen für Energiepflanzen im Fruchtfolgeregime, Abschlussbericht 2009 Teilprojekt 1, Verbundvorhaben, Gefördert durch das BMELV über die FNR FKZ: 22002305
- Mukengele, M.; Oechsner, H. (2007): Einfluss der Silierung auf den spezifischen Methanertrag bei Mais, Landtechnik, Heft 1/2007, S. 20 - 21.
- VDLUFA-Verbandsmethode (2011) Bestimmung der Biogas- und Methanausbeute in Gärtests, Methodenhandbuch VII „Umweltanalytik“, 4. Auflage 2011, Kapitel 4.1.1 Biogasertragsmessung, VDLUFA-Verlag Darmstadt
- VDI 4630 (2006) VDI-Richtlinie „Vergärung organischer Stoffe Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche, VDI-Handbuch Energietechnik und VDI-Handbuch Landwirtschaft/Landtechnik, Beuth-Verlag
- Weißbach, F. und S. Kuhla (1995): Stoffverluste bei der Bestimmung des Trockenmassegehaltes von Silagen und Grünfütter: Entstehende Fehler und Möglichkeiten der Korrektur“ In: Übersicht zur Tierernährung, Bd. 23, S. 189 - 213

7. Aus der HBT-Arbeitsgruppe entstandene Veröffentlichungen

2007

- Hengelhaupt, F.; Kretschmer, A.; Vetter, A. (2007) Neue Energiepflanzen und ihre Biogasausbeuten, Posterpräsentation, VDI-Tagung Energietechnik, „Biogas - Energieträger der Zukunft“, 14/15.06.2007, Berlin
- Kretschmer, A.; Hengelhaupt, F.; Gödeke, K.; Vetter, A. (2007) Neue Energiepflanzen und ihre Biogasausbeuten, Posterpräsentation, 119. VDLUFA-Kongress, 18.-21.09.2007 in Göttingen
- Kretschmer, A.; Hengelhaupt, F.; Gödeke, K.; Vetter, A. (2007) Neue Energiepflanzen und ihre Biogasausbeuten, Kongressband, 119. VDLUFA-Kongress, 18.-21.09.2007 in Göttingen, VDLUFA-Schriftenreihe Bd. 63/2008, S. 271 - 276

2008

- Gödeke, K.; Hartung, H.; Nehring, A.; Hengelhaupt, F. (2008) Contents of Phenolic Acids in Different Crop Species, Posterpräsentation, Ferulate '08-Conference, 25.-27. August 2008, Minneapolis/St. Paul; USA, Abstract Book, CPE-1903/7.08, S. 63 - 64
- Hengelhaupt, F.; Nehring, A.; Gödeke, K. (2008) Biogas- und Methanerträge alternativer Fruchtarten, Posterpräsentation, 120. VDLUFA-Kongress, 16.-19.09.2008, Jena
- Hengelhaupt, F.; Nehring, A.; Gödeke, K. (2008), Biogas- und Methanerträge alternativer Fruchtarten, Tagungsband zum 120. VDLUFA-Kongress 16.-19.09.2008 in Jena, VDLUFA Schriftenreihe Bd. 64, S. 361 - 368, Darmstadt
- Reinhold G.; Gödeke K. (2008) Einfluss von Substrat und Verfahrenstechnik auf Gaserträge und Eigenschaften der Biogas Gülle, 17. OTTI-Symposium Bioenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, OTTI Regensburg, ISBN 978-3-934681-87-3, S. 156 - 161

2009

- Gödeke, K.; Hengelhaupt, F. (2009) Biogas- und Methanerträge verschiedener Fruchtarten in unterschiedlicher Fruchtfolgestellung, Vortrag auf der Vortragstagung „Pflanzenbau aktuell“, LLFG, Bernburg
- Hengelhaupt, F.; Nehring, A.; Gödeke, K. (2009) Biogas- und Methanerträge verschiedener Ackerfrüchte und Grünlandaufwüchse, Posterpräsentation auf dem Biogaskongress Biogas in der Landwirtschaft, BMELV/FNR und KTBL 15./16.09.2009, Weimar

2010

- Gödeke, K.; Hengelhaupt, F.; Hochberg, H. (2010) Biogas and methane yields from perennial rye grass (*Lolium perenne*) in dependence on the fraction of obtusifolious sorrel (*Rumex obtusifolius*), Aspects of Applied Biology 101, Non Food Uses of Crops, ISSN 0265-1491, pp. 17 - 24
- Hengelhaupt, F.; Nehring, A.; Strauß, C. (2010) Biogasausbeuten verschiedener Fruchtarten unter besonderer Berücksichtigung des Anbausystems und dem Flächenertrag, Postervorstellung VDLUFA Tagung 2010, Kiel

Hengelhaupt, F.; Nehring, A.; Strauß, C. (2010) Biogasausbeuten verschiedener Fruchtarten unter besonderer Berücksichtigung des Anbausystems und dem Flächenertrag, Tagungsbandbeitrag erschienen in VDLUFA Schriftenreihe 66/2010

Kohlhase, M.; Reinhold, G.; Gödeke, K. (2010) Vergleich der Restgaspotenziale von Gärresten verschiedener Biogasanlagen bei drei Temperaturstufen, Tagungsband, 122. VDLUFA-Kongress, 21.-24.September 2010 in Kiel, VDLUFA Schriftenreihe 66/2010, VDLUFA-Verlag Darmstadt, S. 193 - 200

Reinhold, G.; Kohlhase, M.; Gödeke, K. (2010) Bedeutung verfahrenstechnischer Parameter für Biogasausbeute und Restgaspotenzial, Institut für Umweltingenieurwesen, Band 27, Tagungsband des 4. Rostocker Bioenergieforums, 27./28.Oktober 2010, Rostock, ISBN 978-3-940364-12-8, S. 305 - 314

2011

Hengelhaupt, F.; Strauß, C.; Gödeke, K. (2011) Biogasausbeuten verschiedener Fruchtarten unter besonderer Berücksichtigung des Anbausystems und dem Flächenertrag, Poster-vorstellung FNR/KTBL Kongress „Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven“ 2011 in Göttingen

Hengelhaupt, F.; Strauß, C.; Gödeke, K. (2011) Biogasausbeuten verschiedener Fruchtarten unter besonderer Berücksichtigung des Anbausystems und dem Flächenertrag, Tagungsband FNR/KTBL Kongress „Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven“ 2011 in Göttingen, KTBL Darmstadt 2011, S. 288 - 289

Hengelhaupt, F. (2011) Hohenheimer Biogasertragstest, Vortrag im Rahmen des Abteilungskolloquiums Untersuchungswesen der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, www.tll.de/ainfo/pdf/biog1211.pdf

Kastner, A. (2011) Einfluss ausgewählter Kohlenstofffraktionen unterschiedlicher Einsatzsubstrate auf deren Biogas- und Methanertrag, Vortrag im Rahmen des Abteilungskolloquiums Untersuchungswesen der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, www.tll.de/ainfo/pdf/biog0112.pdf

Strauß, C.; Hengelhaupt, F.; Biertümpfel, A.; Rudel, H. (2011) Ertragszuwachs und Methan-ausbeuten von Ganzpflanzengetreide vom Ährenschieben bis zur Teigreife, Versuchsbericht, Projekt Nr. 94.11., verfügbar unter: <http://www.tll.de/ainfo/pdf/meth0511.pdf>

2012

FNR (Hrsg., 2012): Energiepflanzen für Biogasanlagen - Thüringen, Broschüre, Gülzow/Rostock, FNR Best. Nr. 552

Pietschmann, S.; Hengelhaupt, F.; Petzold, S.; Gödeke, K. (2012) Auswirkung der Trocknungsintensität von Silagen auf den Biogas- und Methanertrag, Posterpräsentation auf dem 124. VDLUFA-Kongress, 18.-21.09.2012 in Passau

Pietschmann, S.; Hengelhaupt, F.; Petzold, S.; Gödeke, K. (2012) Auswirkung der Trocknungsintensität von Silagen auf den Biogas- und Methanertrag, Tagungsband, 124. VDLUFA-Kongress, 18.-21.09.2012 in Passau, VDLUFA Schriftenreihe (im Druck)

Anhang 1: Methanhektarerträge am Standort Dornburg und statistische Verrechnung

Tabelle A1: Übersicht der im Rahmen des Fruchtfolgeversuchs 2005-2007 abgeleiteten Methanhektarerträge und statistische Verrechnung (je Jahr bzw. im Vergleich der 3-jährigen Fruchtfolgen); Basis: Siehe Kapitel 3.2.2

	Fruchtfolge 1				Fruchtfolge 2				Fruchtfolge 3				Fruchtfolge 4				Fruchtfolge 5				Fruchtfolge 6				Fruchtfolge 7				Fruchtfolge 8			
	Fruchtart	Ertrag [dt TM/ha]	Methanausbeute [CH4/kg TM]	Methanhektarertrag [m³/ha]	Fruchtart	Ertrag [dt TM/ha]	Methanausbeute [CH4/kg TM]	Methanhektarertrag [m³/ha]	Fruchtart	Ertrag [dt TM/ha]	Methanausbeute [CH4/kg TM]	Methanhektarertrag [m³/ha]	Fruchtart	Ertrag [dt TM/ha]	Methanausbeute [CH4/kg TM]	Methanhektarertrag [m³/ha]	Fruchtart	Ertrag [dt TM/ha]	Methanausbeute [CH4/kg TM]	Methanhektarertrag [m³/ha]	Fruchtart	Ertrag [dt TM/ha]	Methanausbeute [CH4/kg TM]	Methanhektarertrag [m³/ha]	Fruchtart	Ertrag [dt TM/ha]	Methanausbeute [CH4/kg TM]	Methanhektarertrag [m³/ha]	Fruchtart	Ertrag [dt TM/ha]	Methanausbeute [CH4/kg TM]	Methanhektarertrag [m³/ha]
2005	Sommergerste GPS	99	317	3140	Sorghum b. x s.	176	304	5332	Mais	163	352	5755	Sommergerste + US	78	308	2412	Hafersortenmischung GPS	98	302	2964	Hafer GPS	91	317	2880	Mais	149	330	4926	Topinambur-kraut	162	234	3777
	Σ Jahr			3140	Σ Jahr			5332	Σ Jahr			5755	Σ Jahr			2412	Σ Jahr			2964	Σ Jahr			2880	Σ Jahr			4926	Σ Jahr			3777
	c				a				a				cd				cd				cd				a				b			
2006	Mais	135	335	4524	Grünroggen (WZF)	64	348	2232	Grünroggen (WZF)	58	338	1949	Luzerne-gras	24	300	706	Wintertriticale GPS	137	361	4935	Artemischung GPS*	146	349	5109	Mais	143	346	4949	Topinambur-kraut	136	240	3262
					Mais	113	348	3929	Sorghum b. x s.	84	325	2725		22	276	613																
														6	279	172																
														32	276	881																
	Σ Jahr			4524	Σ Jahr			6161	Σ Jahr			4674	Σ Jahr			2373	Σ Jahr			4935	Σ Jahr			5109	Σ Jahr			4949	Σ Jahr			3262
d				a				cd				f				bc				b				bcd				e				
2007	Wintertriticale GPS	143	340	4846	Wintertriticale Korn				Wintertriticale GPS	147	340	5002	Luzernegras	62	337	2093	Winterraps Korn				Winterraps Korn				Mais	230	360	8274	Topinambur-kraut	175	223	3906
	Sorghum b.x b. (SZF)	57	342	1962	nicht als Biogassubstrat gewertet				einj. Weidelgras (SZF)	15	219	323		34	309	1063	nicht als Biogassubstrat gewertet				nicht als Biogassubstrat gewertet								Topinambur-knolle	133	331	4403
										21	291	607		31	299	925																
	Σ Jahr			6808					Σ Jahr			5932	Σ Jahr			4081									Σ Jahr			8274	Σ Jahr			8309
b								c				d												a				a				
05-07	Σ Rotation			14472					Σ Rotation			16361	Σ Rotation			8866									Σ Rotation			18149	Σ Rotation			15349
				c								b			d												a			b		

Tabelle A2: Übersicht der im Rahmen des Fruchtfolgeversuchs 2009 - 2011 abgeleiteten Methanhektarerträge und statistische Verrechnung (je Jahr bzw. im Vergleich der 3-jährigen Fruchtfolgen); Basis: Siehe Kapitel 3.2.2

	Fruchtfolge 1				Fruchtfolge 2				Fruchtfolge 3				Fruchtfolge 4				Fruchtfolge 5				Fruchtfolge 6				Fruchtfolge 7				Fruchtfolge 8				
	Fruchtart	Ertrag [dt TM/ha]	Methanausbeute [CH4/kg TM]	Methanhektarertrag [m³/ha]	Fruchtart	Ertrag [dt TM/ha]	Methanausbeute [CH4/kg TM]	Methanhektarertrag [m³/ha]	Fruchtart	Ertrag [dt TM/ha]	Methanausbeute [CH4/kg TM]	Methanhektarertrag [m³/ha]	Fruchtart	Ertrag [dt TM/ha]	Methanausbeute [CH4/kg TM]	Methanhektarertrag [m³/ha]	Fruchtart	Ertrag [dt TM/ha]	Methanausbeute [CH4/kg TM]	Methanhektarertrag [m³/ha]	Fruchtart	Ertrag [dt TM/ha]	Methanausbeute [CH4/kg TM]	Methanhektarertrag [m³/ha]	Fruchtart	Ertrag [dt TM/ha]	Methanausbeute [CH4/kg TM]	Methanhektarertrag [m³/ha]	Fruchtart	Ertrag [dt TM/ha]	Methanausbeute [CH4/kg TM]	Methanhektarertrag [m³/ha]	
2009	Wintergerste GPS	136	344	4675	Sorghum b. x s.	130	319	4136	Mais	182	358	6525	Hafer-SM GPS	156	333	5186	Sommergerste 2	123	321	3947	Hafer GPS	139	331	4592	Mais	167	363	6075	Topinambur Kraut	124	233	2901	
	Sorghum b. x s.	78	339	2624													Luzerne Gras US	14	277	395													
	Σ Jahr			7299	Σ Jahr			4136	Σ Jahr			6525	Σ Jahr			5186	Σ Jahr			4343	Σ Jahr			4592	Σ Jahr			6075	Σ Jahr			2901	
	Norm. Schuppen (=0,05)			a				e				b				d				e				de				c				f	
2010	Mais	146	352	5150	Grünroggen (WZF)	20	339	690	Grünroggen (WZF)	21	354	727	W. Triticale	114	336	3827	Luzerne Gras	78	310	2422	Artemisch ung GPS*	92	340	3140	Mais	141	349	4943	Topinambur Kraut	193	255	4906	
					Mais	58	346	2023	Sorghum b. x s.	43	328	1417								39	298	1165											
																				43	279	1211											
	Σ Jahr			5150	Σ Jahr			2713	Σ Jahr			2144	Σ Jahr			3827	Σ Jahr			5757	Σ Jahr			3140	Σ Jahr			4943	Σ Jahr			4906	
2011	Wintertriticale GPS	173	369	6380	Wintertriticale Korn				Wintertriticale GPS	172	369	6330	Wintertraps Korn				Luzerne Gras	62	329	2031	Wintertraps Korn				Mais	200	365	7304	Topinambur Kraut	160	276	4416	
					nicht als Biogassubstrat gewertet				einj. Weidelgras (SZF)	37	308	1134	nicht als Biogassubstrat gewertet					51	307	1552	nicht als Biogassubstrat gewertet								Knolle	16	360	586	
																				53	296	1573											
	Σ Jahr			6380					Σ Jahr			7464					Σ Jahr			6126					Σ Jahr			7304	Σ Jahr			4416	
09-11	Σ Rotation			18828					Σ Rotation			16132					Σ Rotation			16226					Σ Rotation			18322	Σ Rotation				12223
	=0,05)			a								b								b								a					c