

Vermeidung von Ammoniak- und Lachgasemissionen im Ökologischen Landbau durch gemeinsame Vergärung von Kleegras und Wirtschaftsdünger

BMU – Demonstrationsvorhaben BMU UM06 - 001186

Abschlussbericht

Februar 2006

Institut für Technologie und Biosystemtechnik

Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)
Braunschweig

Abschlussbericht

über das BMU-Demonstrationsvorhaben

Vermeidung von Ammoniak- und Lachgasemissionen im Ökologischen Landbau durch gemeinsame Vergärung von Kleegras und Wirtschaftsdünger

durch das

Institut für Technologie und Biosystemtechnik

Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)
Braunschweig

Projektleiter: Dir. und Prof. Dr.-Ing. P. Weiland

Berichterstatter: Dipl.-Ing (FH) Jens Schröder

Dir. und Prof. Dr.-Ing. P. Weiland

Braunschweig, Februar 2006

Anschrift

Institut für Technologie und Biosystemtechnik Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) Bundesallee 50

D-38116 Braunschweig

Telefon: +49 (0)531 / 596 4131

Telefax: +49 (0)531 / 596 4199

e-mail: peter.weiland@fal.de

Vorwort

Wesentliche Ziele im ökologischen Landbau sind eine umwelt- und ressourcenschonende Wirtschaftsweise bei gleichzeitiger Ertrags- und Qualitätsoptimierung. Dies erfordert eine effiziente Ausnutzung der innerbetrieblichen Nährstoffressourcen, bei gleichzeitiger Minderung von Nährstoffverlusten und Umweltbelastungen durch klimawirksame Spurengasemissionen. Da Stickstoff besonders verlustgefährdet ist und gleichzeitig den wichtigsten ertragsbildenden Faktor darstellt, muss dem Stickstoffmanagement eine besonders hohe Aufmerksamkeit zukommen.

Unter diesem Gesichtspunkt wurde vom Biolandhof Ebeling in Püggen (Wendland) eine Biogasanlage errichtet, um den Kleegrasschnitt, der nach Auflösung der Milchviehhaltung nicht mehr verfüttert werden kann, zur Nährstoffkonservierung sowie für die Energieerzeugung in einer Biogasanlage zu nutzen. Mit diesem Nutzungsweg bleiben die positiven ackerbaulichen Effekte des Kleegrasanbaus uneingeschränkt erhalten und gleichzeitig wird über die Vergärung ein wertvoller organischer Dünger produziert, der zum optimalen Zeitpunkt pflanzenbedarfsgerecht eingesetzt werden kann. Um einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb zu erreichen, werden neben Kleegras auch Maissilage, Roggen und verschiedene weitere Kulturen eingesetzt.

Da dieser Lösungsansatz erstmals auf einem Praxisbetrieb erprobt wird und beispielhaft für andere Betriebe sein kann, wurde das Vorhaben durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) finanziell gefördert. Um abgesicherte Daten über die Funktion, Leistung und Effizienz des Verfahrens sowie über einzelne Stoffund Energieflüsse zu erhalten, wurde das Institut für Technologie und Biosystemtechnik der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) mit der wissenschaftlichen Begleitung des Vorhabens beauftragt.

Für die finanzielle Unterstützung der Begleitforschung sei an dieser Stelle dem BMU besonders gedankt. Dank gebührt auch dem Bauherrn und Betreiber der Biogasanlage, Herrn Manfred Ebeling, der die Arbeiten zur Begleitforschung vor Ort stets unterstützt hat und eine uneingeschränkte Einsicht in die betrieblichen Abläufe ermöglicht hat.

Braunschweig, im Februar 2006

Die Berichterstatter

Inhaltsverzeichnis

Verze	ichnis der Abbildungen	II
Verze	ichnis der Tabellen	III
Abküı	rzungsverzeichnis	IV
1 Einl	eitung	1
2 A	Anlagenbeschreibung	2
3 <i>A</i>	Anlagenbetrieb	4
3.1	\mathcal{E}	
3.2	Verfahrenstechnische Probleme	8
4 \	Verwendete Substrate	
4.1	Zeitlicher Verlauf der Substratströme	
4.2	•	10
	2.1 Analysen	
4.3		
5 E	Betriebsparameter	
5.1	Raumbelastung	
5.2		
5.3	\mathcal{E}	
5.4	\mathcal{C}	
	Energiebilanz	
7 N	Nährstoffbilanzen	
7.1	Kjeldahl – N	
7.2	Ammonium-Stickstoff	
	Ammonifizierung im Hauptfermenter und Nachgärer	
7.3	1 ' ' /	
7.4		
7.5	\mathcal{C}	
7.6	\mathcal{E}	
	Ourchgeführte Laborversuche	
8.1	Begleitende Gärversuche	
8.2		
	3.2.1 Versuchsaufbau	
	3.2.2 Versuchsdurchführung	
_	3.2.3 Versuchsergebnisse	36
8.3		
	3.3.1 Versuchsaufbau	
	No. 3.3.2 Versuchsdurchführung	
8.4	Lagerversuche	46
	Spurengasmessung mit GC	46
	3.4.2 Ammoniakmessung mit FTIR	
	3.4.3 Versuchsaufbau	
	3.4.4 Versuchsdurchführung	48
8.5	\mathcal{E}	
	Wirtschaftlichkeitsberechnung	
10	Zusammenfassung	
11	Literaturverzeichnis	
12 	Anhang	
veröf	fentlichungen	67

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Verfahrenstechnisches Fließbild der Biogasanlage	2
Abbildung 2: Drehkolbenpumpe	3
Abbildung 3: Verteilung Heizung	3
Abbildung 4: Endlagerbehälter, Nachgärer und Fermenter	4
Abbildung 5: Achswaage	
Abbildung 6: Digitale Gewichtsanzeige der Waage	5
Abbildung 7: Silageplatte mit Maissilage und Grassilage	5
Abbildung 8: Feststoffbeschicker mit Messeinrichtung	6
Abbildung 9: 3 Zündstrahl – BHKW, Fa. Deutz a 110 KW _{el}	6
Abbildung 10: Heizöltank	7
Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf der Substratströme	9
Abbildung 12: Maissilage	.10
Abbildung 13: Grassilage	.10
Abbildung 14: Roggen gequetscht	
Abbildung 15: Raumbelastung und Verweilzeit im Hauptfermenter und Nachgärer	. 19
Abbildung 16: Zusammensetzung des Biogases	.22
Abbildung 17: Biogas- und Methanproduktion	.23
Abbildung 18: Produzierte Strommenge und Eigenverbrauch	. 25
Abbildung 19: Produzierte Strom- Wärmemenge	.26
Abbildung 20: Kjeldahl-Stickstoff Konzentrationen	
Abbildung 21: Ammonium-Stickstoff (NH ₄ -N) Konzentrationen	
Abbildung 22: Verhältnis Ammonium / Gesamtstickstoff	.28
Abbildung 23: Ortho – Phosphat (PO ₄ -P) Konzentrationen	.29
Abbildung 24: Kalium (K) Konzentrationen	
Abbildung 25: Befüllter Gärbehälter (Batch)	
Abbildung 26: Methansummenkurve	.36
Abbildung 27: Methanproduktion der Substrate	.37
Abbildung 28: Abbaugrade der Gärsubstrate	
Abbildung 29: Quasi-kontinuierlicher Reaktor	.41
Abbildung 30: Methanproduktivität des ersten Versuchsansatzes	
Abbildung 31: Methanproduktivität des zweiten Versuchsansatzes	
Abbildung 32: Methanproduktion des Gärgutes bei unterschiedlichen Lagertemperaturen	
Abbildung 33: Methansummenkurve Kleegras 2. Schnitt	
Abbildung 34: Methansummenkurve Kleegras 4. Schnitt	
Abbildung 35: Methansummenkurve frisches Kleegras	
Abbildung 36: Methansummenkurve zugekaufte Grassilage	.62
Abbildung 37: Methansummenkurve Extensivgras 1. Schnitt	
Abbildung 38: Methansummenkurve frisches Extensivgras	
Abbildung 39: Methansummenkurve Maissilage	
Abbildung 40: Methansummenkurve ganze Kartoffeln	
Abbildung 41: Methansummenkurve zerkleinerte Kartoffeln	
Abbildung 42: Poster EuroTier 2004 und AGRITECHNICA 2005	.66

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Leistung der Einzelkomponenten	7
Tabelle 2: Stoffdaten der verwendeten Substrate von Juni 2004 bis Dezember 2004	13
Tabelle 3: Stoffdaten der verwendeten Substrate von Januar 2005 bis Mai 2005	14
Tabelle 4: Substratmengen von Juni 2004 bis Dezember 2004	14
Tabelle 5: Substratmengen von Januar 2005 bis Mai 2005	14
Tabelle 6: Raumbelastung Hauptfermenter und Nachgärer von Juni 2004 bis Dezember 2004	16
Tabelle 7: Raumbelastung Hauptfermenter und Nachgärer von Januar 2005 bis Mai 2005	16
Tabelle 8: Rechnerische Verweilzeiten des Substrates von Juni 2004 bis Dezember 2004 unter	17
Tabelle 9: Rechnerische Verweilzeiten des Substrates von Januar 2005 bis Mai 2005 unter Annahme	18
Tabelle 10: Reale Verweilzeiten des Substrates von Juni 2004 bis Dezember 2004 unter Annahme	18
Tabelle 11: Reale Verweilzeiten des Substrates von Januar 2005 bis Mai 2005 unter Annahme	19
Tabelle 12: oTS - Ein / Austräge und Abbaugrade von Juni 2004 bis Dezember 2004	21
Tabelle 13: oTS - Ein / Austräge und Abbaugrade von Januar 2005 bis Mai 2005	21
Tabelle 14: Energiebilanz elektrisch und thermisch vom Juni 2004 bis Dezember 2004	24
Tabelle 15: Energiebilanz elektrisch und thermisch vom Januar 2005 bis Mai 2005	25
Tabelle 16: Nährstofffrachten aus dem Nachgärer	31
Tabelle 17: Substrateigenschaften der untersuchten Substrate	35
Tabelle 18: Methanproduktion der Substrate	37
Tabelle 19: Methanausbeute und –ertrag der Gärsubstrate	38
Tabelle 20: Abbaugrade der Gärsubstrate	39
Tabelle 21: Durchschnittliche Biogaszusammensetzung	40
Tabelle 22: Substratmengen erster Ansatz	42
Tabelle 23: Substratmengen zweiter Ansatz	42
Tabelle 24: Trockenrückstand und organischer Trockenrückstand erster Versuchsansatz	42
Tabelle 25: Trockenrückstand und organischer Trockenrückstand zweiter Versuchsansatz	43
Tabelle 26: Zugabemengen der Versuchsreaktoren erster Ansatz	43
Tabelle 27: Zugabemengen der Versuchsreaktoren zweiter Ansatz	43
Tabelle 28: Betriebsbedingungen des Gaschromatographen	47
Tabelle 29: Substrateigenschaften vom Ausgangsmaterial für die Lagerversuche	48
Tabelle 30: Maximale N ₂ O-Konzentrationen des Biogases bei den Lagerversuchen	49
Tabelle 31: Wirtschaftlichkeitsberechnung der Biogasanlage Püggen 2004/2005 (01.07.04 – 30.06.05)	51
Tabelle 32: Energiebilanz BHKW 1 elektrisch vom Juni 2004 bis Dezember 2004	58
Tabelle 33: Energiebilanz BHKW 1 elektrisch vom Januar 2005 bis Mai 2005	58
Tabelle 34: Energiebilanz BHKW 2 elektrisch vom Juni 2004 bis Dezember 2004	59
Tabelle 35: Energiebilanz BHKW 2 elektrisch vom Januar 2005 bis Mai 2005	59
Tabelle 36: Energiebilanz BHKW 3 elektrisch vom Juni 2004 bis Dezember 2004	60
Tabelle 37: Energiebilanz BHKW 3 elektrisch vom Januar 2005 bis Mai 2005	60

Abkürzungsverzeichnis

BHKW	Blockheizkraftwerk	NH_3	Ammoniak
B_R	Raumbelastung	NH ₄ -N	Ammonium
ca.	circa	Nm^3	Normkubikmeter
CH_4	Methan		(bei Normaldruck)
CO_2	Kohlenstoffdioxid	NO	Stickoxid
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf	NO_2	Nitrit
d	Tage	NO_3	Nitrat
ECD	Elektroneneinfang-Detektor	O_2	Sauerstoff
EEG	Erneuerbaren-Energien-Gesetz	oTR / oTS	organische Trockensubstanz
FID	Flammenionisationsdetektor	$oTS_{(Abl)}$	organische Trockensubstanz
FM	Frischmasse		des Ablaufs
FTIR	Fourier-Transformations-	$oTS_{(Sub)}$	organische Trockensubstanz
	Infrarot-Spektrometer		des Substrats
g	Gramm	PO ₄ -P	Ortho-Phosphat
GC	Gaschromatograph	ppm	parts per million (1 _E ⁻⁶)
HRT	hydraulische Aufenthaltszeit	t	Zeit
	(hydraulic retention time)	TR / TS	Trockensubstanz
H_2S	Schwefelwasserstoff	$V_{\rm m}$	Volumenstrom des
K	Kalium		zugegebenen Substrates
kg	Kilogramm	Vol%	volumetrischer Raumanteil
KW	Kalenderwoche	V_R	Reaktorvolumen
kW	Kilowatt	WLD	Wärmeleitfähigkeitsdetektor
kWh	Kilowattstunden	z.B.	zum Beispiel
1	Liter	° C	Grad Celsius
l_n	Normliter	$\eta_{(oTS)}$	Abbaugrad über die
m _(ab)	ausgefaulte Substratmenge	,	Flüssigphase
m^3	Kubikmeter		
m _(org. Subst.)	Masse des organischen Stoffes		
$m_{(zu)}$	zugeführte Substratmenge		
N	Stickstoff		
N_2O	Lachgas		
NawaRo	Nachwachsender Rohstoff		
N_{ges} -N	Kjeldahl – Stickstoff		

1 Einleitung

Der vorliegende Abschlussbericht fasst die im Zeitraum von Juni 2004 bis Juni 2005 im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung des BMU – Forschungsvorhabens

"Vermeidung von Ammoniak- und Lachgasemissionen im Ökologischen Landbau durch gemeinsame Vergärung von Kleegras und Wirtschaftsdünger"

gesammelten und ausgewerteten Daten, sowie die Erkenntnisse über die anaerobe Vergärung der Biogasanlage Püggen, auf dem Biolandhof Ebeling zusammen.

Bei dem vom Bundesumweltministerium (BMU) geförderten Forschungsvorhabens der Biogasanlage Püggen wurden erstmals Kleegras- und Maissilagen sowie Gras und Grassilagen aus dem ökologischen Landbau vergoren. Da Ökolandbetriebe herkömmlichen mineralischen Dünger nicht nutzen dürfen, wird Kleegras als Stickstoffdünger angebaut. Sofern das Kleegras nicht als Futter genutzt werden kann, sondern untergepflügt wird, besteht die Gefahr einer Verfrachtung von Stickstoff ins Grundwasser und die Bildung von Lachgas. Durch die anaerobe Vergärung soll das Kleegras zu einem lagerfähigen Stickstoffdünger umgewandelt werden, der pflanzenbedarfsgerecht eingesetzt werden kann, ohne dass es zu unerwünschten Nährstoffverlusten und klimawirksamen Spurengasemissionen kommt. Das dabei produzierte Biogas, welches zum größten Teil aus Methan besteht, kann dabei zur Produktion von elektrischem Strom und thermischer Energie genutzt werden. Der erzeugte Strom wird in das öffentliche Netz eingespeist. Die produzierte Wärme dient zur Bereitstellung der benötigten Prozesswärme und der Versorgung der umliegenden Wohnhäuser.

Ziel der vom Institut für Technologie und Biosystemtechnik der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) durchgeführten wissenschaftlichen Begleitung war es, die einzelnen Stoffströme, sowie der Energie- und Stoffbilanz der Biogasanlage zu bewerten, um so die Basis für eine Übertragung des Modellvorhabens auf andere Standorte und Betriebsverhältnisse zu schaffen.

Durchgeführte Laborversuche zur Vergärung und Lagerung von den in der Biogasanlage verwendeten Substrate sollen fernerhin aufzeigen, welche Biogasausbeuten aus den Substraten bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen erreicht werden können und mit welchen Schadgasemissionen bei der Lagerung des Gärgutes zu rechnen ist.

2 Anlagenbeschreibung

Bei der Anlage (**Abbildung 1**) handelt sich um ein zweistufiges mesophiles Nassvergärungsverfahren. Die Anlage besteht aus einer Güllegrube, zwei stehenden Fermentern aus Betoneinem 1500 m³ großen Fermenter mit Feststoffeintrag sowie, einem 1500 m³ Nachgärfermenter - und einem offenen, ca. 600 m³ großen Endlagerbehälter (**Abbildung 4**) aus Stahl. Hauptfermenter und Nachgärer sind über einem Freispiegelüberlauf verbunden.

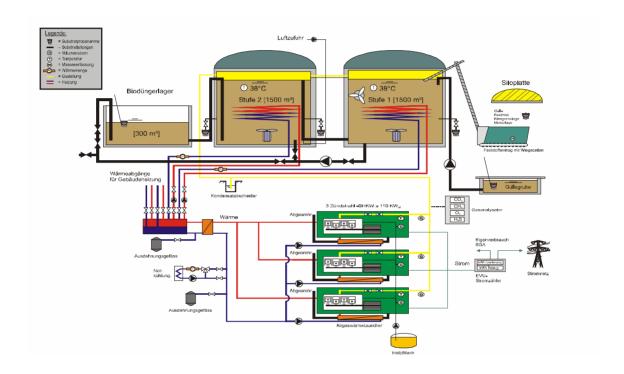


Abbildung 1: Verfahrenstechnisches Fließbild der Biogasanlage

Die Gülle, die von anderen Betrieben bei Bedarf bezogen wird, kann mit Hilfe einer Drehkolbenpumpe (Hersteller: Eisele) (**Abbildung 2**) in den Fermenter gefördert werden. Mit dieser Drehkolbenpumpe kann gegebenenfalls auch Gärgut aus dem Nachgärer in den Fermenter zurückgeführt werden.



Abbildung 2: Drehkolbenpumpe

Die Beheizung der Fermenter, die mit 10 cm dicken PU – Hartschaumplatten isoliert sind, erfolgt durch wand– und fußbodenverlegte Heizungsrohre (**Abbildung 3**). Die Durchmischung in der ersten Stufe (Hauptfermenter) erfolgt durch ein Großflügelrührwerk (Hersteller: Streisal) und einem Tauchmotorrührwerk (Hersteller: AT - MIX), in der zweiten Stufe (Nachgärer) nur durch ein Tauchmotorrührwerk.



Abbildung 3: Verteilung Heizung

Die Biogasspeicherung erfolgt im Hauptfermenter- und Nachgärer, die mit einem 1,5 mm starken EPDM – Foliendach (**Abbildung 4**) abgedeckt sind. Das produzierte Biogas wird durch Einblasen von Luft biologisch entschwefelt und drei Zündstahl- BHKW a 110 kW_{elektrisch} (Hersteller: Dreyer & Bosse) (**Abbildung 9**) zur Strom und Wärmeerzeugung zugeführt.



Abbildung 4: Endlagerbehälter, Nachgärer und Fermenter

3 Anlagenbetrieb

3.1 Funktion der Biogasanlage

Die Gewichte der angelieferten Substrate werden mit einer Achswaage (**Abbildung 5**) erfasst. Mit Hilfe einer digitalen Anzeige (**Abbildung 6**) wird das Gewicht angezeigt und dokumentiert.



Abbildung 5: Achswaage



Abbildung 6: Digitale Gewichtsanzeige der Waage

Nach der Erfassung auf der Waage werden die angelieferten Substrate auf der Silageplatte (**Abbildung 7**) zwischengelagert.



Abbildung 7: Silageplatte mit Maissilage und Grassilage

Die Gärsubstrate werden mit Hilfe eines Radladers in einen 30 m³ Feststoffbeschicker (Hersteller: UTS) (**Abbildung 8**) mit Messeinrichtung eingebracht und über eine Wiegezelle einzeln erfasst. Durch eine seelenlose und voll gekapselte Förderschnecke (Hersteller: LAU) erfolgt die Beschickung des Hauptfermenters.



Abbildung 8: Feststoffbeschicker mit Messeinrichtung

In der ersten Stufe der Biogasanlage, dem Hauptfermenter, wird das zu vergärende Material auf ca. 38°C erwärmt und mit Hilfe eines Tauchmotor- und eines Großflügelrührwerkes vermischt. Durch einen Freispiegelüberlauf im ersten Gärbehälter wird das Substrat in die 2. Stufe, den Nachgärer, überführt, wobei nur soviel Material in den Nachgärer überströmt, wie zuvor frisches Substrat in den Hauptfermenter zugeführt wurde. Der Nachgärer wird ebenfalls mit einer Temperatur von 38°C betrieben. Das Gas beider Fermenterstufen wird drei BHKW's (Abbildung 9) zugeführt. Das entstandene Biogas wird unter einem Foliendach, das sich auf dem Hauptfermenter und dem Nachgärer befindet, gespeichert und durch Einblasen von Luft in den Gärraum biologisch entschwefelt.



Abbildung 9: 3 Zündstrahl – BHKW, Fa. Deutz a 110 KW_{el}

Da es sich um Zündstrahl- BHKW's handelt, wird zusätzlich Heizöl benötigt, um das Biogas im Motor zu verbrennen. Das Heizöl wird in einem Tank (**Abbildung 10**) gelagert und über eine unterirdische Leitung dem BHKW zugeführt.



Abbildung 10: Heizöltank

Der erzeugte Strom wird in das öffentliche Netz nach EEG eingespeist. Die bei der Verstromung anfallendwe Wärme, die über Wärmemengenzähler (Hersteller: KUIDO) erfasst wird, dient zur Bereitstellung der benötigten Prozesswärme sowie zur Wärmeversorgung der Betriebsgebäude. Über eine im Dezember 2004 installierte Wärmeleitung werden mit der überschüssigen Wärme die umliegenden sieben Wohnhäuser versorgt.

In der **Tabelle 1** sind die Leistungsaufnahmen der wichtigsten Aggregate der Biogasanlage einzeln aufgelistet.

Tabelle 1: Leistung der Einzelkomponenten

Einzelkomponenten	Leistungsaufnahme
Drehkolbenpumpe	7,5 kW
Tauchmotorrührwerke	2 x 13 kW
Großflügelrührwerk	11 kW (5 kW im Dauerbetrieb)
Feststoffbeschicker mit Schneckeneintrag	9 kW
Weitere Aggregate (z.B. Warmwasserpumpen, Lüfter, Pumpen)	10 kW

3.2 Verfahrenstechnische Probleme

Während des Berichtszeitraumes traten mehrere kleine Probleme in der Anlage auf, die durch Reparaturen oder Ersetzen von Anlagenkomponenten behoben werden konnten. Die wesentlichen Störungen in der Anlage waren defekte Tauchmotorrührwerke im Hauptfermenter (1. Stufe) und im Nachgärbehälter (2. Stufe). Das Rührwerk im Hauptfermenter hatte nach Angaben des Anlagenbetreibers einen Getriebeschaden und das im Nachgärer einen Masseschluss durch Eindringen von Feuchtigkeit in den Motor. Des weiteren trat eine Verstopfung des Überlaufs und der darüber befindlichen Biogasleitung vom Fermenter zum Nachgärer durch Zusetzen mit Gärsubstrat auf, die jedoch schnell beseitigt werden konnte. Ein weiteres Problem war, dass die BHKW's nicht die gewünschte Wärmemenge lieferten, die zur Versorgung der Wohnhäuser benötigt wird. Es wurden diesbezüglich Gespräche mit dem BHKW-Hersteller durchgeführt, um die Wärmeausbeute zu verbessern.

4 Verwendete Substrate

4.1 Zeitlicher Verlauf der Substratströme

Gemäß der Anlagenkonzeption werden in der Biogasanlage hauptsächlich nachwachsende Rohstoffe vergoren. Im Betrachtungszeitraum kamen neben frischem Kleegras, Kleegrassilagen, Grassilagen von extensiven Flächen auch Maissilagen und Festmist sowie Roggen zum Einsatz.

Im Zuge der wissenschaftlichen Begleitung wurden sämtliche Inputströme aufgenommen. Wie **Abbildung 11** zeigt, wurde in den ersten Wochen eine fast konstante Menge an Roggen eingebracht.

Die Zugabe der Kleegrassilage wurde dagegen erst langsam gesteigert. In der 27 KW hatte eines der Tauchrührwerke einen Motorschaden, so dass anschließend erst wieder eine langsame Steigerung der Zugabe erfolgen konnte. Von der 29 bis zur 30 KW fiel restlicher Festmist durch das Abschaffen der Kühe aus den Stallungen an, der ebenfalls in der Biogasanlage vergoren wurde.

Substratzufuhr (wöchentlich)

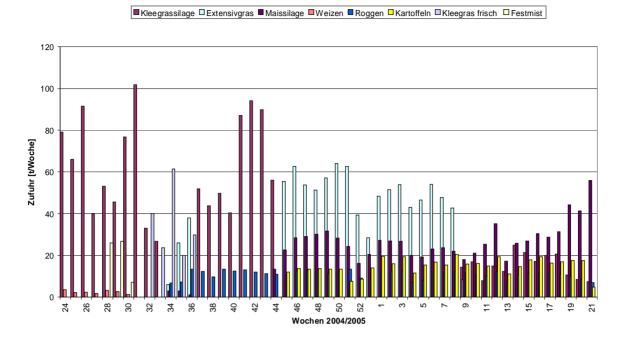


Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf der Substratströme

Ab der 31 KW wurde die Anlage mit frischen Kleegras- und Gras von Extensivflächen beschickt, da die Kleegrassilage zu Neige ging. Seit der 37 Kalenderwoche wurden kontinuierlich ca. 12 Tonnen Roggen in der Biogasanlage vergoren, der vom Anlagenbetreiber zugekauft wurde. Die neue Kleegrassilage stand ebenfalls seit dieser Kalenderwoche wieder zur Verfügung und wurde dementsprechend in der Anlage erneut eingesetzt. Ab der 44 KW wurde Maissilage wie geplant eingesetzt und die Belastung von Woche zu Woche gesteigert. Die Zufuhr der Kleegrassilage wurde dementsprechend zurückgenommen und in der 45 KW durch Grassilage von Extensivflächen ersetzt. Des weiteren wurden ca. 15 Tonnen Kartoffeln pro Woche verarbeitet. Ab der 8 KW wurde die Extensivgrassilage durch Kleegrassilage ersetzt und die Zugabemenge erheblich verringert. Im gleichen Zuge wurde Zugabe der Maissilage erhöht, wohingegen die Substratzufuhr der Kartoffeln und des Roggens relativ konstant blieb.

Die Maissilage (**Abbildung 12**) wurde auf landwirtschaftlichen Flächen als reguläre Ackerfrucht angebaut sowie von unterschiedlichen Betrieben im Umland angeliefert. Das Gras wurde auf den umliegenden Wiesen gemäht und zu Silage (**Abbildung 13**) verarbeitet oder frisch in den Hauptfermenter gefahren. Die verwendeten Substrate stammen zu 60 % vom eigenen Biolandbetrieb und zu 40 % von konventionellen Betrieben.



Abbildung 12: Maissilage



Abbildung 13: Grassilage



Abbildung 14: Roggen gequetscht

4.2 Analysen und Stoffdaten der verwendeten Substrate

4.2.1 Analysen

Die hier aufgeführten Analysenvorschriften entsprechen den an der FAL angewandten Standardanalysen.

Für alle Analysen gelten die folgenden nicht quantifizierbaren Fehlerquellen, welche durch sorgfältiges Arbeiten möglichst vermieden wurden:

- Nicht repräsentative Probenentnahme auf der Anlage
- Nicht repräsentative Teilentnahme aus Probenflaschen zur Analyse

Um diese nicht quantifizierbaren Fehler möglichst gering zu halten, wurden die Analysenergebnissen mit ähnlichen Proben verglichen, auf Plausibilität überprüft und gegebenenfalls nochmals analysiert.

4.2.1.1 Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)

Der CSB wird mit dem Dr. Lange Küvettentest Nr. LCW 514 bestimmt. Der Test beruht auf DIN 38409 (DEV, 2001). Alle oxidierbaren Bestandteile werden mit Natriumdichromat sauer aufgeschlossen. Da der Messbereich des Tests zwischen 1 und 2000 mg/l liegt, muss die Probe entsprechend dem erwarteten CSB verdünnt werden. Um trotz der starken Verdünnung eine repräsentative Probe der teilweise sehr feststoffreichen Materialien zu bekommen, werden ca. 100 g Material entweder in der Kugelmühle oder in einer Hochleistungs-Messermühle (Grindomix der Firma Retsch) zerkleinert. Die Zerkleinerung wird visuell überwacht und so lange fortgesetzt, bis die Partikel die für die Analyse notwendige Größe erreicht haben. Von der Verdünnung werden 2 ml in die Küvette pipettiert und die Probe anschließend 2 h bei 148°C aufgeschlossen. Nach dem Abkühlen der Probe auf Raumtemperatur wird der CSB photometrisch bestimmt. Von jeder Probe wird eine Parallele bestimmt.

Mögliche Analysenfehler bei der CSB-Bestimmung resultieren aus der nicht repräsentativen Probenahme beim Pipettieren aus der Verdünnung infolge vorhandener Schwebstoffe in der Probe (z.B. Fasern).

4.2.1.2 Kjeldahl-Stickstoff (Nges-N)

Für Proben aus der anaeroben Vergärung ergibt die Bestimmung des Kjeldahl-Stickstoffs gleichzeitig die Höhe des Gesamt-Stickstoffgehalts (N_{ges} -N), da oxidierte Formen von Stickstoff (NO_3^- , NO_2^-) nicht vorkommen.

Für die Bestimmung des N_{ges}-N werden 5 g des Probenmaterials in einen Glaskolben eingewogen und nach Zugabe eines Kjeldahltaps (Kaliumsulfat und Selenkatalysator), Entschäumers, Siedesteinchen und 10 ml konzentrierter Schwefelsäure bei bis zu 410°C vollständig aufgeschlossen. Dabei werden die organischen Stickstoffverbindungen in Ammoniumsulfat überführt. Das Ammonium wird im Vapodest 6 der Firma Gerhardt durch Zugabe von Natronlauge als Ammoniak gasförmig ausgetrieben (Wasserdampfdestillation), in einer sauren Vorlage aufgefangen und die pH-Werterhöhung mittels 0,05 molarer Schwefelsäure gegentitriert. Über die Menge verwendeter Schwefelsäure wird der Gehalt an Kjeldahl-Stickstoff berechnet. Die Analyse erfolgt für jede Probe in zwei Parallelen.

Entsprechend der zahlreichen Aufbereitungsschritte gibt es mannigfaltige Fehlerquellen, die über die Analyse von Standards kontrolliert wurden. Da deren Wiederfindung bei ca. 98 % liegt, ist dieser Fehler vernachlässigbar gering. Der Analysenfehler zwischen den Parallelen liegt zwischen 0,5 und 4 % des Wertes.

4.2.1.3 Ammonium-Stickstoff (NH₄-N)

Der Ammonium-Stickstoffgehalt wird ebenfalls aus der unverdünnten Probe bestimmt. Von der Probe werden ca. 5 g in einen entsprechenden Glaskolben eingewogen. Der NH₄-N-Gehalt wird entsprechend der N_{ges} -N-Bestimmung im Vapodest 6 durch Wasserdampfdestillation bestimmt. Die geringe Anzahl an Aufbereitungsschritten führt zu einer guten Standardwiederfindung von 98 bis 101 %. Der Analysenfehler liegt zwischen 0,5 und 5 % des Wertes.

4.2.1.4 Orthophosphat-Phosphor (PO₄-P)

Zur Bestimmung des PO₄-P werden ca. 5 g der Probe wie für die N_{ges}-N-Bestimmung aufgeschlossen. Die Probe wird nach dem Aufschluss möglichst heiß in Bechergläser überführt und der pH-Wert mit konzentrierter Natronlauge auf pH 3-4 eingestellt. Der pH sollte möglichst nahe bei 3 liegen, da das Phosphat sonst wieder ausfällt. Die Probe wird entsprechend des erwarteten PO₄-P-Gehalts verdünnt (zumeist auf 250 ml) und in einen Messkolben über ein Faltenfilter quantitativ überführt. Die Bestimmung des PO₄-P erfolgt mit dem Dr. Lange Küvettentest Nr. LCK 349. Zehn Minuten nach dem Pipetieren in die Küvette kann die Probe photometrisch ausgewertet werden. Für jede Probe werden drei Parallelen analysiert.

4.2.1.5 pH-Wert

Der pH-Wert wird bei Raumtemperatur ohne zu rühren mit einer Einstab-Glaselektrode bestimmt. Je nach erwartetem pH-Wert, wird die Elektrode zuvor mit Pufferlösung bei pH 7 und 4 bzw. 7 und 10 kalibriert.

Zur Kontrolle der Milieubedingungen für die Mikrobiologie in den Reaktoren wird der pH-Wert zusätzlich noch direkt im Reaktor gemessen, da es nach der Probenahme durch Ausgasen von CO₂ zu einem Anstieg des pH-Werts kommt.

Auch alle pH-Elektroden, welche im Rahmen von anderen Analysen Anwendung finden, wurden an jedem Analysentag kalibriert und regelmäßig gewartet.

Der auftretende Fehler ist somit nur noch gerätespezifisch und kann vernachlässigt werden.

4.2.1.6 Trockensubstanz (TS) und organische Trockensubstanz (oTS)

Der Trockenrückstand der Proben wird durch 48-stündiges Trocknen der Proben bei 105°C bestimmt und der Aschegehalt, aus dem der organische Trockenrückstand rückgerechnet wird, durch anschließendes Veraschen bei 500°C ermittelt.

Bei Proben mit hohen Gehalten an flüchtigen organischen Säuren kann es zu Fehlbestimmungen kommen, da die flüchtigen Komponenten bereits bei der Trocknung der Probe entweichen, was eine Unterbestimmung des TS und oTS zur Folge hat..

4.2.1.7 Kaliumbestimmung

Von der gut durchmischten Originalprobe wird 0.4 gin entsprechenden Aufschlussmesskolben eingewogen (hier 40 ml). Es werden ein Glaskügelchen, 5 ml konzentrierte Salpetersäure mit Perchlorsäure und 1 ml konzentrierte Schwefelsäure zugeben. Die Proben werden im Aufschlussblock 1,5 Stunden bei 185°C und 1,5 Stunden bei 320°C aufgeschlossen. Nach dem Aufschluss werden die Proben 30 Minuten abkühlt und die Kolben mit dest. Wasser bis Messmarke augefüllt. Das Kalium wird bei einer Wellenlänge von 766,4 nm am Flammenfotometer bestimmt. Zur Messung werden die Kolben gut geschüttelt und dann der Ansaugschlauch in den Kolben gesteckt.

0,4 g wurden in 40 ml gelöst. Dies entspricht einer Verdünnung von 1:100. Der Messwert wird ist in mg/l ausgegeben, so dass er durch 1000 dividiert werden muss, um auf g/kg umzurechnen.

4.3 Stoffdaten

Während der wissenschaftlichen Begleitung wurden in der Biogasanlage Püggen neben Maisund Grassilagen auch zugekaufte externe Substrate (z.B. Roggen, Kartoffeln) verarbeitet. In den nachfolgenden **Tabelle 2 und Tabelle 3** werden die Substrateigenschaften und Substratmengen näher aufgeführt.

Tabelle 2: Stoffdaten der verwendeten Substrate von Juni 2004 bis Dezember 2004

	TS	oTS	CSB	GesN	NH ₄ -N	PO ₄ -P	K
	[% FM]	[% FM]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]
Kleegrassilage	19-23	15-21	156-249	2,8-8,0	0,69-1,58	0,50-0,78	3,95-5,7
Kleegras frisch	22-25	20-23	168-337	7,2-9,7	0,42-0,68	0,68-0,96	6,3-6,7
Extensivgras	34-40	31-36	337-397	3,5-4,5	0,35-0,5	0,8-1,66	3,9-4,0
Maissilage	30-32	29-30	323-356	3,2-3,5	0,30-0,32	0,56-0,62	3,95-5,95
Roggen	85-87	84-85	875-954	13,7-15,6	1,70-2,01	2,42-2,60	4,55-4,75
Weizen	86-87	81-85	671-720	17,8-18,3	2,94-3,06	3,09-3,37	4,5-4,6
Festmist	18-31	15-26	220-420	4,0-9,0	0,5-1,8	1,0-1,3	6,5-7,0
Kartoffeln	18-24	17-22	177-262	2,7-4,2	0,63-1,28	0,35-0,45	4,27-4,35

Tabelle 3: Stoffdaten der verwendeten Substrate von Januar 2005 bis Mai 2005

	TS	oTS	CSB	GesN	NH ₄ -N	PO ₄ -P	K
	[% FM]	[% FM]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]
Kleegrassilage	34,3-52,2	29,4-46,8	301-360	8,0-8,3	0,8-1,44	1,2-1,24	8,5-9,05
Extensivgras	15,5-19,4	12,7-15,4	189-244	2,66-4,92	0,4-0,72	0,4-1,2	2,23-3,95
Maissilage	29,4-36,8	27,8-35,0	349-417	3,30-4,79	0,5-2,2	0,95-1,17	3,95-5,95
Roggen	86-87	83-85	637-1071	15,5-17,7	0,86-2,30	2,80-3,0	4,55-4,82
Kartoffeln	17,9-23,5	16,8-21,9	177-262	2,73-4,19	0,63-1,28	0,35-0,45	4,27-4,35

Die in die Biogasanlage über den Zeitraum Juni 2004 bis Mai 2005 eingebrachten Substratmengen sind in den nachfolgenden **Tabelle 4** und **5** nochmals dargestellt, um die Berechnungen übersichtlicher zu machen.

Tabelle 4: Substratmengen von Juni 2004 bis Dezember 2004

	Juni 2004	Juli 2004	August 2004	September 2004	Oktober 2004	November 2004	Dezember 2004				
		[kg]									
Kleegrassilage	249712	287745	75890	160998	351612						
Kleegras frisch			153058	21537							
Extensivgras			40932	28919		237666	222736				
Maissilage			5738	1040	13277	118428	104103				
Roggen			17163	51952	52603	52394	47573				
Weizen	7880	8679									
Festmist		59630									
Kartoffeln						56359	47485				
Gesamt	257592	356054	292781	264446	417492	464847	421897				

Tabelle 5: Substratmengen von Januar 2005 bis Mai 2005

	Januar 2005	Februar 2005	März 2005	April 2005	Mai 2005
			[kg]		
Kleegrassilage			62029	83856	49919
Extensivgras	210683	190857	8282		
Maissilage	108825	91178	109174	112019	176618
Roggen	48468	45760	47818	45685	37632
Kartoffeln	71595	70568	71791	67947	58865
<u>Gesamt</u>	439571	398363	299094	309507	323034

Im Hinblick auf eine stabile Prozessführung muss darauf geachtet werden, dass ein in Menge und Zusammensetzung möglichst konstantes Substratgemisch in den Hauptfermenter eingebracht wird, um die Fermenterbiologie mit einer möglichst gleich bleibenden organischen Fracht und Nährstoffzusammensetzung zu versorgen. Andernfalls besteht die Gefahr, dass es durch einen schnellen Wechsel der Substrate zu einem Zusammenbruch der

Fermenterbiologie und damit zu einem Abfall der Gasproduktion kommt. Bei der Biogasanlage Püggen kam es in den letzten beiden Maiwochen zu einem derartigen Zusammenbruch der Methanproduktion, was auf die starke Erhöhung der Maissilagezugabe zurückgeführt werden kann.

5 Betriebsparameter

5.1 Raumbelastung

Anhand der in **Tabelle 6** dargestellten Monatswerten können die wesendlichen Belastungsparameter berechnet werden.

Die Raumbelastung wird als Menge organischer Substanz definiert, die dem Fermenter je Zeit- und Volumeneinheit zugeführt wird. Die Menge der organischen Stoffe wird dabei in kg CSB oder kg oTS angegeben.

$$B_{\text{R}} = \frac{m_{(\text{org.Subst.})}}{V_{\text{R}}*t}$$

mit:

 B_R = Raumbelastung [kg/m³ d]

 $m_{(org. Subst.)}$ = Masse des organischen Stoffes [kg]

 V_R = Reaktorvolumen [m³]

t = Zeit[d]

Gleichung 1: Raumbelastung

Bei einem Nutzvolumen vom Hauptfermenter und Nachgärer von je 1.500 m^3 ergibt sich für den Hauptfermenter eine durchschnittliche Raumbelastung (B_R) im Zeitraum von Juni 2004 bis Dezember 2004 von $\mathbf{2,39 \ kg \ CSB}$ je \mathbf{m}^3 und Tag bzw. $\mathbf{1,99 \ kg \ oTS}$ je \mathbf{m}^3 und Tag. Für den Nachgärer ergibt sich für diesen Zeitraum eine durchschnittliche Raumbelastung (B_R) von $\mathbf{0,62 \ kg \ CSB}$ je \mathbf{m}^3 und Tag bzw. $\mathbf{0,41 \ kg \ oTS}$ je \mathbf{m}^3 und Tag. Die monatlichen Raumbelastungen sind in der $\mathbf{Tabelle \ 6}$ dargestellt.

Tabelle 6: Raumbelastung Hauptfermenter und Nachgärer von Juni 2004 bis Dezember 2004

	Haupt- fermenter	Nach- gärer	Haupt- fermenter	Nach- gärer	Haupt- fermenter	Nach- gärer	Haupt- fermenter	Nach- gärer
	kg	CSB	kg	kg oTS		B _R [kg CSB/m ^{3*} d]		S/m3*d]
Juni 2004	51533	13431	44680	10721	1,43	0,37	1,24	0,30
Juli 2004	77582	20667	68262	15913	1,67	0,44	1,47	0,34
August 2004	91801	17877	79772	13497	1,97	0,38	1,72	0,29
September 2004	81791	16505	85630	10746	1,82	0,37	1,90	0,24
Oktober 2004	137984	38739	109312	23588	2,97	0,83	2,35	0,51
November 2004	158054	43989	123899	26268	3,51	0,98	2,75	0,58
Dezember 2004	148836	43242	109702	27369	3,20	0,93	2,36	0,59
<u>Gesamt</u>	747581	194451	621256	128107	2,39	0,62	1,99	0,41

In der **Tabelle 7** sind die Raumbelastungen (B_R) von Januar 2005 bis Mai 2005 aufgeführt. Die durchschnittlichen Raumbelastungen für den Hauptfermenter liegen hier bei **2,87 kg CSB** je m³ und Tag bzw. **2,47 kg oTS** je m³ und Tag und im Nachgärer bei **0,75 kg CSB** je m³ und Tag bzw. **0,51 kg oTS** je m³ und Tag.

Tabelle 7: Raumbelastung Hauptfermenter und Nachgärer von Januar 2005 bis Mai 2005

	Haupt- fermenter	Nach- gärer	Haupt- fermenter	Nach- gärer	Haupt- fermenter	Nach- gärer	Haupt- fermenter	Nach- gärer
	kg	CSB	kg oTS		B _R [kg CSB/m ^{3*} d]		B _R [kg oTS/m ^{3*} d]	
Januar 2005	163834	45697	119968	32349	3,52	0,98	2,58	0,70
Februar 2005	129615	40204	101750	24650	3,09	0,96	2,42	0,59
März 2005	112572	26641	104725	17906	2,42	0,57	2,25	0,39
April 2005	117816	26526	110060	17734	2,62	0,59	2,45	0,39
Mai 2005	118626	29265	116354	21069	2,73	0,67	2,67	0,48
<u>Gesamt</u>	642463	168333	552858	113708	2,87	0,75	2,47	0,51

Es ist zu erkennen, dass die Raumbelastung im Hauptfermenter in den ersten 6 Monaten von 1,24 auf 2,75 kg oTS/m³*d ansteigt. Dies ist darauf zurückzuführen, da Roggen als Substrat verwendet wurde. Dieses Substrat weist relativ hohe organische CSB- und Trockensubstanzgehalte auf (CSB ca. 915 g/kg FM und oTS ca. 845 g/kg FM). Des weiteren wurden ab November 2004 größere Mengen an Mais- und Grassilagen mit höheren CSB und oTS Gehalten (Tabelle 2) in den Fermenter eingebracht. Ab Dezember 2004 fällt die Raumbelastung wieder ab, da die Mengen der CSB- und oTS Frachten abnimmt, was auf die Rücknahme der Substratmengen zurückzuführen ist.

Die in **Tabelle 7** aufgeführten oTS Raumbelastungen sind über den gesamten Zeitraum relativ konstant. Eine Ausnahme ist hier der Monat März, bei dem die Raumbelastung auf **ca. 2,25 kg oTS** je m³ und Tag absinkt. Die Ursache liegt darin, dass die Extensivgrassilage mit einem hohen oTS Gehalt zu Ende ging und mit Grassilage ersetzt wurde, die einen geringeren oTS Gehalt hatte.

5.2 Verweilzeit

Die Verweilzeit eines Fermenters errechnet sich als Quotient aus Volumen des Fermenters und der pro Zeiteinheit zugeführten Substrattmenge und stellt die mittlere Zeit dar, die das zugeführte Substrat im Fermenter verweilt, bevor es ausgeschleust wird.

$$HRT = \frac{V_R}{\dot{V}_{zu}}$$

wobei: HRT = Verweilzeit [d]

 V_R = Reaktorvolumen [m³]

 \dot{V}_{zu} = Volumenstrom des zugegebenen Substrates [m³/d]

Gleichung 2: Verweilzeit im Fermenter

Aus der Gleichung 1 und der Tabelle 4 und Tabelle 5 lassen sich die Verweilzeiten (Tabelle 8 und Tabelle 9) für die einzelnen Monate berechnen. Es zeigt sich, dass die Verweilzeiten im Hauptfermenter und Nachgärer mit jeweils durchschnittlich 129 Tagen weit über den sonst üblichen Gesamtverweilzeiten von 60 – 90 Tagen liegen. Da mit dieser Biogasanlage eine möglichst vollständige energetische Verwertung von nachwachsenden Rohstoffen (NawaRo's) angestrebt wird, wurden größere Verweilzeiten angestrebt.

Tabelle 8: Rechnerische Verweilzeiten des Substrates von Juni 2004 bis Dezember 2004 unter **Annahme einer Substratdichte von 1 t/m**³

	Substratmenge		Verweilzeit [d]	Verweilzeit [d]	Verweilzeit [d]
	[t]	[t/d]	(Hauptfermenter)	(Nachgärer)	(Gesamt)
Juni 2004	258	10,8	139	139	278
Juli 2004	356	11,5	130	130	260
August 2004	293	9,5	158	158	316
September 2004	264	8,8	170	170	340
Oktober 2004	417	13,5	111	111	222
November 2004	465	15,5	97	97	194
Dezember 2004	422	13,6	110	110	220
Gesamt	2475	11,6	129	129	258

Tabelle 9: Rechnerische Verweilzeiten des Substrates von Januar 2005 bis Mai 2005 unter Annahme einer Substratdichte von 1 t/m³

	Substratmenge		Verweilzeit [d]	Verweilzeit [d]	Verweilzeit [d]	
	[t]	[t/d]	(Hauptfermenter)	(Nachgärer)	(Gesamt)	
Januar 2005	440	14,2	105	105	210	
Februar 2005	399	14,0	107	107	214	
März 2005	299	9,6	156	156	312	
April 2005	310	10,3	145	145	290	
Mai 2005	323	10,4	144	144	288	
<u>Gesamt</u>	1771	11,7	128	128	256	

Die hydraulische Verweilzeit für das Substrat in **Tabelle 10 und Tabelle 11** wurde ebenfalls mit der **Gleichung 2** berechnet. Dabei ist die Substratmenge berücksichtigt worden, die aus dem Nachgärer in den Hauptfermenter zurückgeführt wird. Die Rückführung des Substrates ist notwendig, da es sonst durch zu hohe Trockenmasse-Gehalte zu Problemen mit den Rührwerken kommen kann. Des weiteren werden methanogene Bakterien in den Hauptfermenter zurückgeführt, die für den Abbau der Substrate notwendig sind. Hieraus ergeben sich hydraulische Verweilzeiten im Hauptfermenter von ca. **14 Tagen** und bis zu **28 Tagen im Gesamtsystem**.

Tabelle 10: Reale Verweilzeiten des Substrates von Juni 2004 bis Dezember 2004 unter Annahme einer Substratdichte von 1 t/m³

	Substratmenge		Substrat	trückführung	Verweilzeit [d]	Verweilzeit [d]	Verweilzeit [d]
	[t]	[t/d]	[t]	[t/d]	(Hauptfermenter)	(Nachgärer)	(Gesamt)
Juni 2004	258	10,8	2400	100	13,5	13,5	27,0
Juli 2004	356	11,5	3100	100	13,4	13,4	26,8
August 2004	293	9,5	3100	100	13,7	13,7	27,4
September 2004	264	8,8	3000	100	13,8	13,8	27,6
Oktober 2004	417	13,5	3100	100	13,2	13,2	26,4
November 2004	465	15,5	3000	100	13,0	13,0	26,0
Dezember 2004	422	13,6	3100	100	13,2	13,2	26,4
Gesamt	2475	11,6	20800	100	13,4	13,4	26,8

Tabelle 11: Reale Verweilzeiten des Substrates von Januar 2005 bis Mai 2005 unter Annahme einer Substratdichte von 1 t/m³

	Substratmenge		Substratrückführung		Verweilzeit [d]	Verweilzeit [d]	Verweilzeit [d]
	[t]	[t/d]	[t]	[t/d]	(Hauptfermenter)	(Nachgärer)	(Gesamt)
Januar 2005	440	14,2	3100	100	13,1	13,1	26,2
Februar 2005	391	14,0	2800	100	13,2	13,2	26,4
März 2005	299	9,6	3100	100	13,7	13,7	27,4
April 2005	310	10,3	3000	100	13,6	13,6	27,2
Mai 2005	323	10,4	3100	100	13,6	13,6	27,2
Gesamt	1771	11,7	15100	100	13,4	13,4	26,8

In **Abbildung 15** ist die zeitliche Veränderung der Raumbelastungen sowie der Verweilzeit über den Zeitraum des Berichtes (07.06.2004 – 31.05.2005) abgebildet mit der Annahme das der Hauptfermenterablauf gleich dem Zulauf des Nachgärers ist.

Anhand der **Abbildung 15** ist zu erkennen, dass die oTS Raumbelastung in den ersten 6 Monaten ansteigt. Die Verweilzeit steigt aber ebenfalls in den ersten 4 Monaten an, mit Ausnahme des Monats Juli, was damit zu erklären ist, dass Substrate mit etwas höheren oTS-Gehalt in den Hauptfermenter eingebracht wurden. Eine Ausnahme bildet der Monat August, hier steigt die Verweilzeit analog zur Raumbelastung an.

Dieses ist darauf zurückzuführen, da durch den Einsatz von Weizen, Roggen und frischen Extensivgras, die einen hohen organischen Trockensubstanzgehalt haben, die Raumbelastung im Hauptfermenter und zugleich die Verweilzeit auf Grund der verminderten hydraulischen Belastung ansteigt.

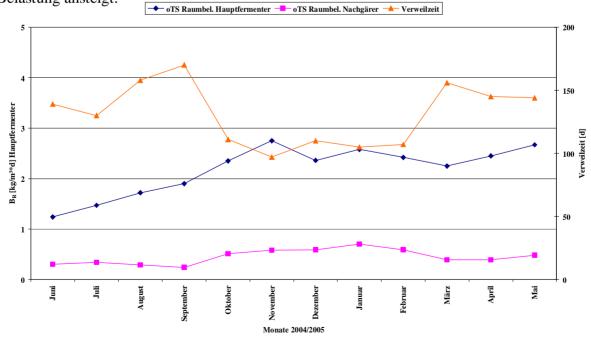


Abbildung 15: Raumbelastung und Verweilzeit im Hauptfermenter und Nachgärer

Vom November 2004 bis Februar 2005 blieben die oTS Raumbelastungen und die Verweilzeiten im Hauptfermenter relativ konstant, da in diesem Zeitraum die Substratzufuhr und die oTS Gehalte konstant gehalten wurden. Ab März 2005 erhöhte sich die Verweilzeit, wobei die oTS Raumbelastung konstant blieb. Dieses ist darauf zurückzuführen, dass das Extensivgras mit geringerem oTS-Gehalt zu Ende ging und stattdessen Kleegrassilage in kleinerer Menge mit höherem oTS-Gehalt zur Beschickung der Anlage verwendet wurde.

5.3 Abbaugrad

Der Abbaugrad macht eine Aussage über die effiziente Ausnutzung der eingesetzten Substrate. Da der Hauptfermenter mit einem Freispiegelüberlauf ausgerüstet ist, wird angenommen, dass das täglich zugeführte Substratvolumen in den Nachgärer mit dem Ablauf aus dem Hauptfermenter übereinstimmt.

Anhand der **Gleichung 3** lassen sich die oTS- Abbaugrade des Hauptfermenters und des Nachgärers berechnen. Analog ist die Bestimmung des CSB- Abbaugrades mit der Gleichung möglich.

$$\eta_{(oTS)} = \frac{oTS(Sub.) * m_{zu} - oTS(Abl.) * m_{ab}}{oTS(Sub.) * m_{zu}} * 100$$

 $\eta_{(oTS)}$ = Abbaugrad über die Flüssigphase [%]

 $m_{(zu)}$ = zugeführte Substratmenge [kg/d]

 $m_{(ab)}$ = ausgefaulte Substratmenge [kg/d]

oTS_(Sub.) = organische Trockensubstanz des Substrats [kg/m³]

oTS_(Abl) = organische Trockensubstanz des Ablaufs [kg/m³]

Gleichung 3: Berechnung des oTS-Abbaugrades

In **Tabelle 12** sind die Ein – und Austräge, sowie die Abbaugrade aufgelistet, die während des Betriebszeitraumes von Juni 2004 bis Dezember 2004 erzielt wurden.

Tabelle 12: oTS - Ein / Austräge und Abbaugrade von Juni 2004 bis Dezember 2004

	Eintrag	Ablauf (Hauptfermenter)	Ablauf (Nachgärer)	Abbaugrad (Hauptfermenter)	Abbaugrad (Nachgärer)	Abbaugrad (Gesamt)	
		[kg oTS]		oTS Abbaugrad [%]			
Juni 2004	44680	10721	10334	76,0	3,6	76,9	
Juli 2004	68262	15918	14676	76,7	7,8	78,5	
August 2004	79772	13497	10774	83,0	20,2	86,5	
September 2004	85630	10746	10174	87,5	5,3	88,1	
Oktober 2004	109312	23588	22537	78,4	4,5	79,4	
November 2004	123899	26268	23911	78,8	9,0	80,7	
Dezember 2004	109702	27369	21144	75,1	22,7	80,7	
Gesamt	621256	128107	113550	79,4	11,4	81,7	

In der **Tabelle 13** sind die Ein – und Austräge, sowie die Abbaugrade aufgelistet, die während des Betriebszeitraumes von Januar bis Mai 2005 erzielt wurden.

Tabelle 13: oTS - Ein / Austräge und Abbaugrade von Januar 2005 bis Mai 2005

	Eintrag	Ablauf (Hauptfermenter)	Ablauf (Nachgärer)	Abbaugrad (Hauptfermenter)	Abbaugrad (Nachgärer)	Abbaugrad (Gesamt)	
		[kg oTS]		oTS Abbaugrad [%]			
Januar 2005	119968	32349	25029	73,0	22,6	79,1	
Februar 2005	101750	24650	19580	75,8	20,6	80,8	
März 2005	104725	17906	14471	82,9	19,2	86,2	
April 2005	110060	17734	14465	83,9	18,4	86,9	
Mai 2005	116354	21069	15021	81,9	28,7	87,1	
Gesamt	552857	113708	88566	79,4	22,1	84,0	

Aus der Berechnung ergibt sich für den Zeitraum Juni bis Dezember 2004 ein durchschnittlicher Abbaugrad im Hauptfermenter von **79,4** % und im Nachgärer von **11,4** %. Für den Zeitraum Januar bis Mai 2005 ergeben sich Abbaugrade von **79,4** % bzw. **22,1** % Die monatlichen Abbaugrade können jeweils der **Tabelle 12 und Tabelle 13** entnommen werden. Anhand dieser Werte ist zu erkennen, dass nach der Einlaufphase Abbaugrade von über **80** % erreicht wurden, was auf eine stabile Betriebsweise zurückzuführen ist. Die höheren Abbaugrade von Dezember 2004 bis Mai 2005 im Nachgärer sind damit zu erklären, dass sich die Fermenterbiologie erst an die Substratänderung anpassen musste. Dieses ist auch daran zu erkennen, dass die Abbaugrade im Fermenter im gleichen Zeitraum von **75,1** % auf **81,9** % ansteigen.

5.4 Gaszusammensetzung

In **Abbildung 16** sind die Konzentrationen der wichtigsten Bestandteile des Biogases aufgeführt.

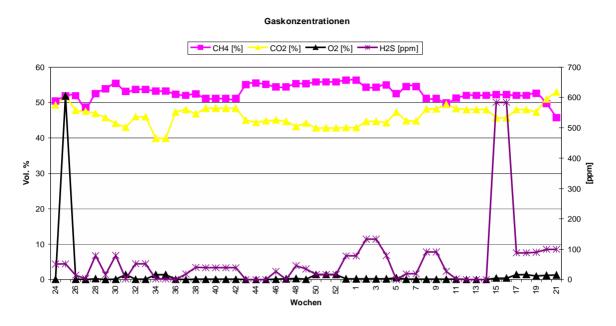


Abbildung 16: Zusammensetzung des Biogases

Aus **Abbildung 16** ist zu ersehen, dass während des Berichtszeitraumes Methangehalte von 50 bis 56 Vol-% und CO₂ -Gehalte von 50 bis 44 Vol-% erreicht wurden. Die Schwefelwasserstoffgehalte (H₂S) liegen bei 0 – 130 ppmV und die Sauerstoffgehalte (O₂) bei ca. 0 bis 1,40 Vol-%. Die Biogaszusammensetzung ist mit der von konventionellen Biogasanlagen, die mit nachwachsenden Rohstoffen betrieben werden, vergleichbar. Die scheinbar hohen H₂S – Werte in der 15 und 16 KW und der sehr hohe O₂- Wert in der 25 KW sind auf einen Defekt des Messgerätes zurückführen.

Das Absinken der CH₄- und die Erhöhung der CO₂ -Werte in der 20 und 21 KW sind eine Folge der starken Änderung der Substratmischung, die zu einer Überlastung der Fermenterbiologie führte (**Tabelle 3**).

Aus der **Abbildung 17** sind die Biogas- und Methanproduktionen zu entnehmen, die während des Berichtszeitraumes erreicht wurden. Die Abbildung zeigt, dass es in den ersten 10 Wochen zu Schwankungen in der Biogas- bzw. Methanproduktion kam, was auf den Anfahrbetrieb der Biogasanlage zurückzuführen ist. Die Schwankungen in den darauf folgenden Wochen hängen mit den Substratwechseln zusammen.

Biogas- und Methanproduktion

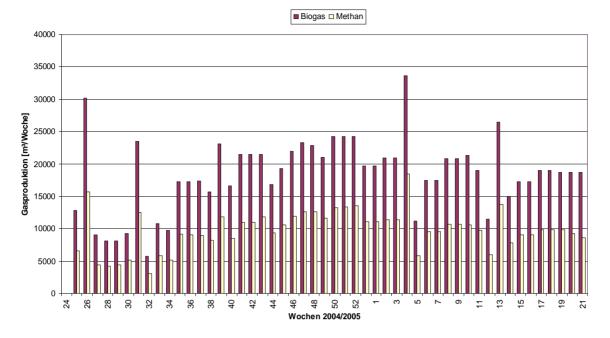


Abbildung 17: Biogas- und Methanproduktion

6 Energiebilanz

Für die energetische Bewertung der BHKW's werden in diesem Kapitel der Verbrauch an Biogas und Zündöl der daraus gewonnene Menge an Strom und Wärme gegenübergestellt.

Hieraus errechnet sich zum einen der elektrische Wirkungsgrad des BHKW und zum anderen der BHKW- Ausnutzungsgrad. In der **Tabelle 14** ist der Zeitraum vom Juni 2004 bis Dezember 2004 bzw. in **Tabelle 15** vom Januar 2005 bis Mai 2005 dargestellt.

Die Biogaszusammensetzung veränderte sich über den Betrachtungszeitraum von Juni 2004 bis Dezember 2004 nur geringfügig. Der Methangehalt, der den BHKW- Wirkungsgrad beeinflusst, liegt im Durchschnitt bei über 51 %. Die H₂S- Konzentration im Biogas liegt mit durchschnittlich 100 ppm deutlich unter dem geforderten Wert zur Einhaltung der Herstellergarantie (200 ppm).

Der errechnete elektrische Wirkungsgrad des BHKW liegt über den gesamten Betrachtungszeitraum bei über 36 %, wobei der thermische Wirkungsgrad von ca. 30 % im August auf ca. 27 % im Dezember 2004 fällt.

Für die Berechnung des Ausnutzungsgrades der elektrischen Leistung wurde von einer installierten Gesamtleistung aller drei BHKW von 330 kW ausgegangen. **Tabelle 14** ist zu entnehmen, das der Ausnutzungsgrad in den ersten **7 Monaten von ca. 60 auf ca. 86 %** ansteigt, was im direkten Zusammenhang mit dem Anstieg der Gasproduktion steht.

Tabelle 14: Energiebilanz elektrisch und thermisch vom Juni 2004 bis Dezember 2004

		Jun 04	Jul 04	Aug 04	Sep 04	Okt 04	Nov 04	Dez 04
Gasproduktion	[Nm³]	49448	47464	53506	75553	80312	87954	89247
Gasqualität	[]	10 1 10			7,0000	00012	0.00.	002
	CH ₄ [%]	51,4	53,5	53,5	51,6	53	55	55
	CO ₂ [%]	48,3	45	42,9	47,6	46,5	44,5	44,5
	H ₂ S [%]	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
CH₄-Produktion								
	[Nm³]	25416	25393	28626	38985	42565	48375	49086
Energieproduktion Met	han [kWh]	253399	253171	285400	388682	424375	482298	489384
Zündölverbrauch	[m³]	3,86	3,61	3,73	4,56	5,19	5,76	9,09
Energieproduktion Zün	döl [kWh]	38561	36144	37274	45616	51918	57586	90857
Energieproduktion ge	samt [kWh]	291961	289316	322675	434298	476294	539884	580241
erzeugter Strom	[kWh]	113236	<u>102103</u>	<u>121255</u>	<u>165002</u>	<u>183454</u>	200610	209887
el. Wirkungsgrad	[%]	38,8	35,3	37,6	38,0	38,5	37,2	36,2
max. nutzbare el. Leis	stung [kW]	330	330	330	330	330	330	330
Ausnutzungsgrad	[%]	59,6	41,6	49,4	69,4	74,7	84,4	85,5
erzeugter Wärme	[kWh]	60557	77570	97374	129840	134585	151206	154883
them. Wirkungsgrad	[%]	20,7	26,8	30,2	29,9	28,3	28,0	26,7

Aus Tabelle 15 ist für den Zeitraum Januar bis Mai zu ersehen, dass der elektrische Wirkungsgrad des BHKW ebenfalls bei über 36 % liegt, der thermische Wirkungsgrad sinkt seit Februar 2005 von ca. 36 auf 26 %. Es ist jedoch ebenfalls der Tabelle zu entnehmen, dass seit Januar 2005 der Methangehalt von 54,5 auf 50 Vol.-% abnimmt und der Ausnutzungsgrad von 84,3 auf 66 % sinkt. Dieses hängt offensichtlich mit der Änderung der Substrate und einer Überlastung der Fermenterbiologie zusammen. Hierdurch ging auch die Methanproduktion zurück. Die Stromproduktion wurde durch eine Erhöhung des Zündölanteiles konstant gehalten.

Tabelle 15: Energiebilanz elektrisch und thermisch vom Januar 2005 bis Mai 2005

		Jan 05	Feb 05	Mrz 05	Apr 05	Mai 05
Gasproduktion						
	[Nm³]	87544	73740	79429	69899	78972
Gasqualität						
	CH ₄ [%]	54,3	54,5	51,3	52,1	50
	CO ₂ [%]	44,7	44,8	48,3	46,8	50
	H ₂ S [%]	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01
CH ₄ -Produktion						
	[Nm³]	47537	40188	40747	36418	39486
Energieproduktion Me	ethan					
	[kWh]	473939	400678	406249	363083	393678
Zündölverbrauch						
	[m³]	7,09	6,12	5,64	4,46	6,17
Energieproduktion Zü						
	[kWh]	70897	61189	56448	44626	61748
Energieproduktion (_		40400=			
_	[kWh]	544836	461867	462697	407709	455425
erzeugter Strom	[kWh]	206889	170893	178608	154615	161971
el. Wirkungsgrad			<u> </u>			
	[%]	38,0	37,0	38,6	37,9	35,6
max. nutzbare el. Le	eistung					
	[kW]	330	330	330	330	330
Ausnutzungsgrad						
	[%]	84,3	77,1	72,7	65,1	66,0
erzeugter Wärme						
	[kWh]	164587	167409	135995	117136	119979
them. Wirkungsgrad	[O/ 1	30,2	36,2	29,4	28,7	26,3
	[%]	ა∪,∠	30,∠	29,4	20,1	20,3

In der **Abbildung 18** ist die produzierte Strommenge des BHKW dem Eigenverbrauch der Gesamtanlage gegenübergestellt. Die produzierte Strommenge ist hierbei die Menge, die das BHKW durch Verbrennung von Biogas und Zündöl erzeugt. Der Eigenverbrauch setzt sich aus dem Verbrauch der unterschiedlichen Anlagenkomponenten (z.B. Rührwerke, Pumpen, usw.) zusammen. Am Anfang des Betrachtungszeitraumes lag der Eigenverbrauch bei ca. 20 % des produzierten Stromes, ab August 2004 liegt dieser Wert bei durchschnittlich 7 %.

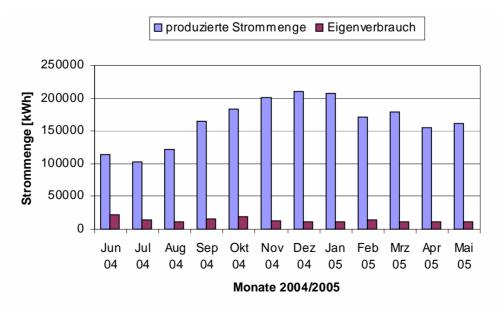


Abbildung 18: Produzierte Strommenge und Eigenverbrauch

In **Abbildung 19** ist zur besseren Übersicht die produzierte Strom- und Wärmemenge aus **Tabelle 14** und **Tabelle 15** dargestellt. Aus dieser Gegenüberstellung ist zu ersehen, dass die Wärmemenge, die von den BHKW's erzeugt wurde, unter der Strommenge liegt. Eine Ausnahme bildet der Februar 2005, hier betragen Strom- und Wärmemenge ca. 170 MWh.

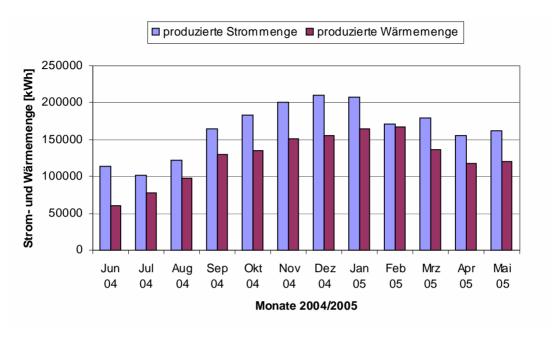


Abbildung 19: Produzierte Strom- Wärmemenge

7 Nährstoffbilanzen

7.1 Kjeldahl - N

Der Gehalt an Kjeldahl-N ist die Summe aus organisch gebundenem Stickstoff und Ammonium-Stickstoff. Da über die Gasphase bzw. durch das produzierte Biogas kaum Stickstoff verloren gehen kann (bis auf geringe Spuren von NH₃), verlässt der Stickstoff die Biogasanlage nur über den Nachgärer. Dies bedeutet, dass sich der Gesamt-N-Gehalt im Hauptfermenter und Nachgärer an den des zugeführten Substratgemisches angleicht.

Die in der **Abbildung 20** dargestellten monatlichen Stickstoff-Konzentrationen weisen im Jahresverlauf deutliche Unterschiede auf. Auffällig ist hierbei besonders der Anstieg zwischen August und September. Ursache hierfür ist, dass im August damit begonnen wurde, verstärkt Roggen zu verarbeiten (**Tabelle 4**).

Die erheblichen Unterschiede von zugeführten zu ausgeschleusten Stickstoff von **Juni bis November** 2004 sind darauf zurückzuführen, dass die Eigenschaften des Fermenterablaufs

zunächst durch das Animpfmaterial beeinflußt wurden, welches zunehmend durch das zugeführte Substrat ausgewaschen wurde.

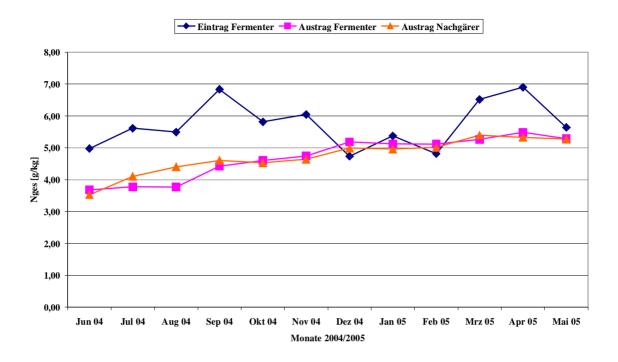


Abbildung 20: Kjeldahl-Stickstoff Konzentrationen

7.2 Ammonium-Stickstoff

Durch den Fermentationsprozess wird organisch gebundener Stickstoff in Ammonium-Stickstoff umgesetzt. Dieser stellt die Hauptstickstoffquelle für das Bakterienwachstum dar, jedoch können sich zu hohe Ammonium- Konzentrationen negativ auf den Abbauprozess auswirken.

In **Abbildung 21** sind die Konzentrationen an Ammonium-Stickstoff aufgetragen. Wie erwartet sind die Ammonium-Stickstoff-Gehalte im Gärgut angestiegen, es kam aber noch zu keiner Hemmung durch NH₃ im Hauptfermenter.

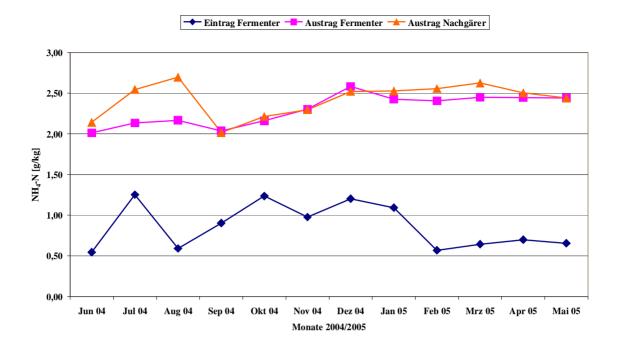


Abbildung 21: Ammonium-Stickstoff (NH₄-N) Konzentrationen

7.2.1 Ammonifizierung im Hauptfermenter und Nachgärer

In der **Abbildung 22** ist das Verhältnis zwischen Ammonium- Stickstoff zum Gesamt-Stickstoff im Hauptfermenter und Nachgärer aufgetragen.

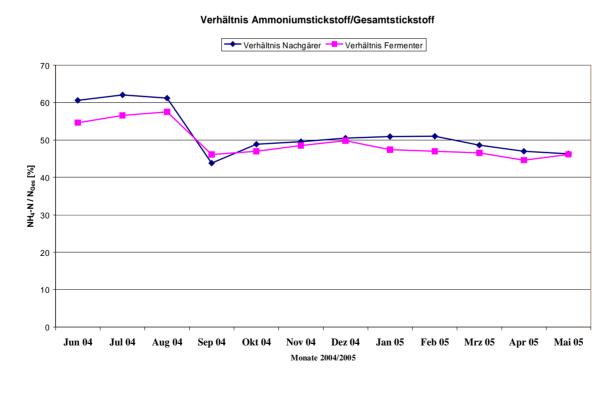


Abbildung 22: Verhältnis Ammonium / Gesamtstickstoff

Das Verhältnis im Hauptfermenter und Nachgärer liegt im Durchschnitt in den ersten drei Monaten bei ca. 58 bis 60 % und fällt danach auf einen durchschnittlichen Wert von ca. 47 %.

7.3 Ortho - Phosphat (PO₄-P)

Phosphat stellt neben Stickstoff einen wichtigen Nährstoff für die Bakterien dar und bestimmt den Düngewert des Gärgutes. Da beim anaeroben Prozess weder Stickstoff noch Phosphat freigesetzt werden, sind die Ablauf- Konzentrationen von der jeweils zugeführten Substratmenge und -zusammensetzung abhängig. Auch beim zeitlichen Verlauf der monatlichen Phosphat- Konzentrationen (**Abbildung 23**) zeigen sich ähnlich wie beim Gesamtstickstoff, daß die Zulauf- Konzentrationen zunächst deutlich höher sind als die Ablaufwerte.

Hierzu kommt, dass Phosphat zu einem hohen Anteil in partikulärer Form vorliegt, und es durch Bildung von Sedimentschichten zu einer Akkumulation von PO₄-P im Hauptfermenter kommt. Betrachtet man jedoch den Ablauf des Hauptfermenters mit dem des Nachgärers, so ist zu erkennen, dass die Phosphat-Konzentrationen weitgehend überein stimmen.

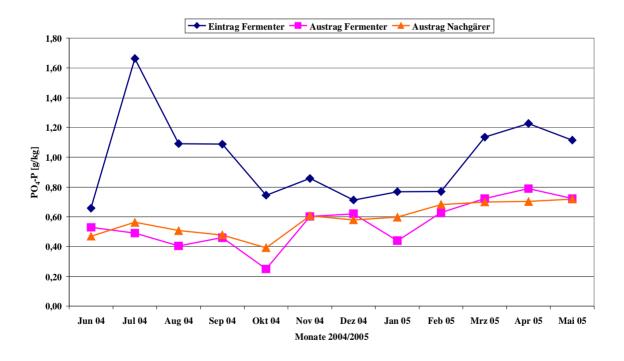


Abbildung 23: Ortho – Phosphat (PO₄-P) Konzentrationen

7.4 Kalium (K)

Kalium ist ebenfalls ein essentieller Nährstoff für Pflanzen. In **Abbildung 24** ist der zeitliche Verlauf der Kalium- Konzentrationen abgebildet, die über den Betrachtungszeitraum in den Hauptfermenter eingebracht wurde und mit dem Gärgut als Dünger verwertet wurde.

Anhand der Abbildung ist zu erkennen, dass die Kalium- Konzentrationen die durch das Substrat eingebracht wurden, von den Konzentrationen im Hauptfermenter und Nachgärer abweichen. Dieses hat einen direkten Zusammenhang mit der am Anfang und Ende des Betrachtungszeitraumes zugefütterten Kleegrassilage, die eine hohe Kaliumkonzentration aufwies. Das Kalium wird jedoch nach einem gewissen Zeitraum in gleicher Höhe ausgeschleust. Es kommt zu keiner Anreicherung im Hauptfermenter oder Nachgärer. Das Kalium steht als Dünger im vollen Umfang zur Verfügung.

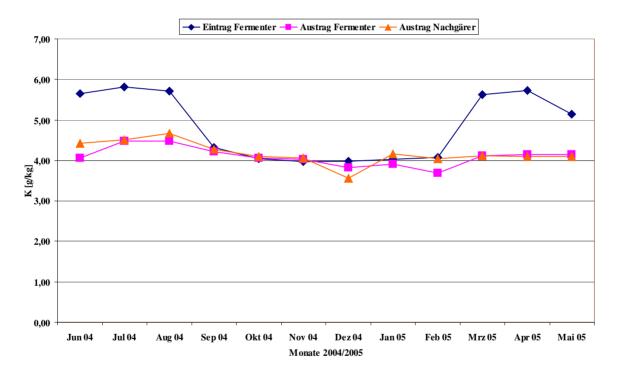


Abbildung 24: Kalium (K) Konzentrationen

7.5 Nährstofffrachten aus dem Nachgärer

In **Tabelle 16** sind die Nährstofffrachten die in den Hauptfermenter eingebracht werden und die Frachten aus dem Nachgärer aufgelistet, die dem Betrieb als Dünger das Jahr über zur Verfügung stehen.

Tabelle 16: Nährstofffrachten aus dem Nachgärer

	Haupt-	Nach-	Haupt-	Nach-	Haupt-	Nach-	Haupt-	Nach-
	fermenter	gärer	fermenter	gärer	fermenter	gärer	fermenter	gärer
	Ges.	-N	NH ₄	_: -N	PO ₄ -P		K	
				[k	g]			
Juni 2004	1285	912	141	553	170	121	1459	1142
Juli 2004	1999	1461	446	906	593	201	2071	1605
August 2004	1608	1288	173	789	320	149	1673	1367
September 2004	1807	1216	239	532	288	127	1144	1131
Oktober 2004	2428	1889	516	924	311	164	1685	1712
November 2004	2809	2155	454	1067	399	283	1847	1888
Dezember 2004	1989	2106	513	1064	301	245	1679	1504
Januar 2005	2362	2180	480	1110	338	263	1772	1826
Februar 2005	1951	2012	229	1026	312	274	1631	1614
März 2005	1950	1613	192	785	340	209	1684	1230
April 2005	2136	1649	216	775	380	218	1737	1269
Mai 2005	1820	1702	212	788	360	233	1659	1324

Für die Nährstofffrachten ergeben sich die gleichen Zusammenhänge, die bereits bei den Konzentrationen erläutert wurden.

7.6 Schlussfolgerungen und Ausblick zu den Nährstoffbilanzen

Anhand der durchgeführten Stoffbilanzen ist zu erkennen, dass es bei der Vergärung zu keinen Nährstoffverlusten kommt. Es werden lediglich partikulär vorliegende Nährstoffe vorübergehend im Hauptfermenter oder Nachgärer akkumuliert (aus den in den Kapitel 7 erwähnten Gründen). Die bisher vorliegenden Untersuchungen über die direkten pflanzenbaulichen Auswirkungen des Einsatzes vergorener organischer Dünger aus Biogasanlagen beschränken sich auf die Analysen der durch die Vergärung induzierten stofflichen Veränderungen von Biogasgülle gegenüber unbehandelter Gülle sowie auf die Beschreibung der direkten Auswirkungen auf die Pflanzen, die mit vergorenen organischen Wirtschaftsdüngern gedüngt wurden (MERZ, 1988; MEßNER, 1988). Bekannt ist, dass der Stickstoff im Gärprodukt im Vergleich zum Stickstoff in einer nicht behandelten Gülle für die

Pflanzen schneller verfügbar ist und somit stärker zur direkten N-Versorgung der Pflanze beiträgt. Vergleichbares gilt auch für das Phosphat (MEßNER, 1988).

Größere Untersuchungen zu den pflanzenbaulichen Auswirkungen der Biogasvergärung auf der Gesamt-Betriebsebene wurden dagegen noch nicht durchgeführt. Dies gilt sowohl für den konventionellen als auch den ökologischen Landbau. Aus diesem Grund liegen noch keine Ergebnisse über die Auswirkungen auf die Produktivität der Ackerflächen im Gesamtsystem vor (MÖLLER; 2005).

Es sind allerdings eine Vielzahl von möglichen Auswirkungen auf den N-Haushalt und auf die N-Verluste denkbar, die sich auf die Flächenproduktivität im ökologischen Landbau auswirken können. Es ist hier jedoch zu unterscheiden, ob es sich um einen viehhaltenden oder um einen viehlosen Betrieb handelt.

Nach bisherigen Untersuchungen kann davon ausgegangen werden, dass sich die Vergärung der Ausscheidungen aus dem Stall positiv auf den N-Haushalt viehhaltender Betriebe auswirkt, sofern Emissionsverluste während der Lagerung durch Abdeckung des Gärrestlagers sowie durch eine bodennahe, fachgerechte Ausbringung vermieden werden. Bei offener Lagerung können je nach Lagerdauer und Speichersystem Verluste von über 20 % auftreten. Dieses wirkt sich im ökologischen Landbau unmittelbar auf die Erträge aus, da eine Ergänzungsdüngung durch Mineraldünger nicht zulässig ist.

Bei der Vergärung in einer Biogasanlage (geschlossene Behälter) treten so gut wie keine N-Verluste auf (SCHULZ, 1996). Der besseren N-Verfügbarkeit steht jedoch die höhere Gefahr von Ammoniak-N-Verlusten während der Ausbringung gegenüber. Die Gärprodukte aus der Biogasanlage enthalten zwar höhere Ammoniumgehalte und einen höheren pH-Wert als normal gelagerte Gülle (beides führt zu N-Verluste), sie sind jedoch dünnflüssiger und sickern daher schneller ein, welches zu einem reduzierten N-Verlust führt. Dieses wird auch durch Ergebnisse aus Bonn bestätigt (CLEMENS et al., 2001).

Bei viehlosen Betrieben wurde aufgrund von Problemen bei der Vergärung der Einsatz von Biogasanlagen bisher kaum in Erwägung gezogen. Erst mit der Entwicklung spezieller Vergärungsanlagen für nachwachsende Rohstoffe hat die Biogasvergärung für viehlose Betriebe Bedeutung erlangt.

In Betrieben ohne Viehhaltung fallen viele Substrate an, die betriebs- und marktbedingt keine Verwendung finden und sich für eine Vergärung gut eignen (z.B. Kleegras, Erbsen). Die im ökologischen Landbau üblichen Leguminosen-Gras-Rotationsgrünbrachen, die bisher gemulcht wurden und auf dem Feld verblieben, sind dabei von besonderem Interesse. Das

Mulchen bewirkt eine geringere Biomassebildung im Vergleich zur Nutzung wenn geschnitten wird. Durch das Mulchen reichern sich jedoch erhebliche Mengen an Stickstoff im Boden an, die durch die Folgefrucht nicht verwertet werten können. Erfahrungen mit Saugkerzen belegen drastische Nitratverluste (> 20 % des Netto-N Gewinns) nach gemulchtem Kleegras (RUHE et al., 2001). Die im Vergleich zur Schnittnutzung nicht erhöhte N-Wirkung in der Nachfrucht (WICHMANN et al., 2001; AHRBERG, 2001) deutet ebenso auf ein hohes Verlustrisiko hin. Durch die negativen Umweltwirkungen von Leguminosen-Gras-Rotationsgrünbrachen kommt auch eine erhebliche Minderung der biologischen Stickstofffixierungsleistung bei gemulchten gegenüber genutzten Leguminosen-Gras-Grünbrachen (BECKMANN et al., 2000) hinzu. Nach Ergebnissen von HEUWINKEL (2001) können diese bei ca. 30 % liegen. Wird die Biomasse der Aufwuchsflächen hingegen einer Biogasanlage zugeführt, so steht der gesamten Stickstoff dem Betrieb nach der Vergärung als mobil einsetzbarer Dünger zur Verfügung. Die Nutzung der Grünflächen durch Vergärung der Biomasse führt somit neben der Erzielung entsprechender Energieerträge (Strom und Wärme) auch zu einer Erhöhung der Stickstoffinputs im Betrieb. Im großen und ganzen sind die positiven Ertrags- und Umwelteffekte der Biogasvergärung in vieharmen bzw. viehlosen Betrieben sehr viel größer sein als in Betrieben mit starker Viehhaltung (MÖLLER, 2005).

Insgesamt lassen die Ergebnisse erwarten, dass durch die geringeren Stoffverluste es zu einer Erhöhungen der Mengen an verfügbaren Nährstoffen und zugleich zu einer schnelleren Wirksamkeit des Stickstoffs kommt. Pflanzenbaulich führt dieses zu einer deutlichen Steigerung der Biomasseerträge im ökologischen Landbau (um 10 bis 25 %) im Vergleich zur üblichen Stallmistwirtschaft (MÖLLER, 2005).

Erhöhte Erträge bedeuten eine Steigerung der Substratmenge für die Biogaserzeugung und damit auch eine Steigerung der Gärrückstandsmenge. Dies kann in einem System mit starker Nährstofflimitierung, wie dem ökologischen Landbau, zu einer weiteren Steigerung der Erträge und somit zu einer gewissen positiven Rückkopplung zwischen Biogaserzeugung und Erträgen führen.

8 Durchgeführte Laborversuche

8.1 Begleitende Gärversuche

Im Rahmen des Projektes wurden zur Bewertung der unterschiedlichen Substrate diskontinuierliche sowie quasi-kontinuierliche Gärversuche in doppelten Ansätzen durchgeführt. Die Versuche dienten dazu die substratspezifischen Eigenschaften, wie maximale Methanausbeute und maximaler anaerober Abbaugrad der verwendeten Hauptsubstrate, zu ermitteln. Des weiteren wurden Versuche durchgeführt, um Rückschlüsse auf das Abbauverhalten der Substrate bei steigender Raumbelastung zu erzielen. Für die Gärversuche wurden die gleichen Substrate eingesetzt, die in der Anlage Püggen zum Einsatz kamen

8.2 Diskontinuierliche Versuche

Um eine Aussage über die maximalen Methanausbeuten sowie über den maximal erzielten Abbaugrad zu erhalten, wurden diskontinuierliche Gärversuche (Batchversuche) durchgeführt.

Hierbei wird das zu untersuchende Material mit einem adaptierten Animpfmaterial versetzt und über einen Zeitraum von mindestens 50 Tagen unter Sauerstoffabschluss bei einer Temperatur von 38° C vergoren. Das entstehende Biogas wird in Gasbeuteln aufgefangen und regelmäßig analysiert.

8.2.1 Versuchsaufbau



Abbildung 25: Befüllter Gärbehälter (Batch)

Für die Versuchsdurchführung wurden Glasbehälter (**Abbildung 25**) mit einem Volumen von 32 Litern verwendet, die mit einem Glasdeckel gasdicht verschlossen sind und mit etwa 20 bis 25 l Arbeitsvolumen betrieben werden. Über eine Öffnung im oberen Bereich des Glasdeckels wird während der gesamten Versuchsdurchführung das entstehende Biogas in einem Gasbeutel aufgefangen. Während des Versuches wurden die Gärbehälter täglich einmal aufgeschüttelt.

8.2.2 Versuchsdurchführung

Zum Animpfen des anaeroben Prozesses wurde ausgefaultes Material aus der Anlage Püggen verwendet. Insgesamt wurden neun Substrate untersucht, die jeweils als Parallel-Versuche angesetzt wurden. In **Tabelle 17** sind die Substrateigenschaften der Gärversuche aufgelistet.

Tabelle 17: Substrateigenschaften der untersuchten Substrate

	TS	oTS	CSB	N _{ges}	NH ₄ -N	PO ₄ -P
	[%]	[%]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg	[g/kg]
Kleegrassilage 1.Schnitt	19,52	15,42	229,0	4,20	1,58	0,52
Kleegrassilage 2. Schnitt	28,96	25,81	255,4	6,24	0,49	0,68
Kleegrassilage4. Schnitt ¹	65,02	57,70	820,0	4,92	0,72	0,40
Kleegras Frisch	22,36	19,75	250,0	7,20	0,42	0,98
Grassilage Zukauf	34,27	31,53	288,9	7,64	1,42	0,97
Extensivgras 1. Schnitt ²	40,32	36,84	297,5	3,51	0,35	0,85
Extensivgras Frisch	34,27	31,53	472,2	4,25	0,50	1,66
Maissilage	34,30	33,10	349,6	3,30	2,02	0,95
Kartoffeln	23,55	21,90	262,5	2,73	1,28	0,22

² TS und oTS – Gehalt sehr hoch durch schlechte Hächselung

¹ TS und oTS – Gehalt sehr hoch wegen starker Verholzung

Die dargestellten Ergebnisse der einzelnen Substrat – Gärtests wurden jeweils um die aus dem Impfschlamm stammende Gasmenge bereinigt. Zu diesem Zweck wurden zu den eigentlichen Gärtests so genannte Nullansätze durchgeführt, mit denen die Biogasproduktion des Impfschlammes ermittelt wurde.

8.2.3 Versuchsergebnisse

8.2.3.1 Gasproduktion

Anhand des Beispieles "Kleegrassilage 1. Schnitt" soll der Kurvenverlauf erläutert werden, alle weiteren Versuchsergebnisse befinden sich im Anhang. Beim diskontinuierlichen Gärversuch nähert sich die Summe der gebildeten Methanmenge mit Fortschreiten des Versuches einem Endwert an, der für das jeweilige Substrat den maximalen Methanertrag kennzeichnet.

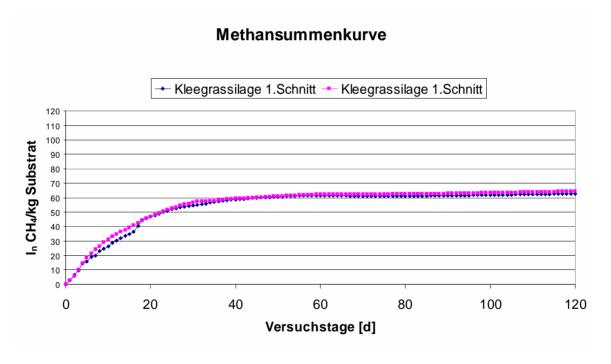


Abbildung 26: Methansummenkurve

Wie aus **Abbildung 26** zu ersehen ist, verläuft die Summenkurve in leichter S – Form. Da sich die im Gärgut vorhandenen Bakterien nicht erst an die veränderten Milieubedingungen anpassen müssen, ist die so genannte lag- Phase sehr kurz, da das Animpfmaterial schon gut adaptierte Bakterien enthielt.

Anschließend kommt es zu einem starken Anstieg der gebildeten Methanmenge. In dieser Phase charakterisiert die Steigung der Summenkurve die Abbaurate der leicht abbaubaren Stoffe im Substrat. Sind diese Inhaltsstoffe aufgebraucht, steigt die Summenkurve nur noch gering an und es werden überwiegend nur noch die schwerer abbaubaren Inhaltsstoffe von den Bakterien abgebaut, bis sich die Kurve dem maximalen Methanertrag nähert. In **Tabelle** 18 und in **Abbildung 27** ist die ermittelte Methanproduktion der einzelnen Substrate dargestellt.

Tabelle 18: Methanproduktion der Substrate

Substrat	Spez. Methanproduktion [l CH4/kg Substrat]	theor. Methanpotential (aus CSB) [l CH ₄ /kg Substrat]
Kleegrassilage 1.Schnitt	64,2	73,3
Kleegrassilage 2. Schnitt	70,6	88,3
Kleegrassilage 4. Schnitt	136,6	262,4
Kleegras Frisch	70,4	80,0
Grassilage Zukauf	58,9	92,5
Extensivgras 1. Schnitt	63,7	95,0
Extensivgras Frisch	146,0	151,0
Maissilage	88,9	111,9
Kartoffeln ganz	72,1	91,9
Kartoffeln zerkleinert	73,1	91,9

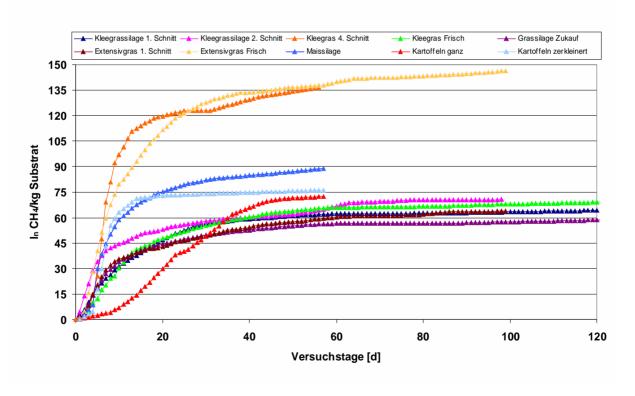


Abbildung 27: Methanproduktion der Substrate

Die in **Tabelle 19** aufgelistete Methanausbeute beschreibt die Methanmenge, die pro Einheit zugeführter CSB-Fracht gebildet wird. Diese liegt in der Regel unter einem theoretisch

erreichbaren Maximalwert von 320 l CH₄ je kg zugeführten CSB, da ein vollständiger Abbau nicht erreicht wird.

Der Methanertrag ist die Menge an Methan, die pro Einheit abgebauter organischer Fracht gebildet wird. Hier sollte der Wert von 320 1 CH₄ je kg CSB im Gegensatz zur Methanausbeute erreicht werden.

Tabelle 19: Methanausbeute und -ertrag der Gärsubstrate

	CH ₄ -Ausbeute	CH ₄ -Ertrag	CH ₄ -Ertrag
	[l/kg CSB]	[l/kg CSB]	[l/kg oTS]
Kleegrassilage 1.Schnitt	281	346	488
Kleegrassilage 2. Schnitt	276	371	505
Kleegrassilage 4. Schnitt	167	325	399
Kleegras Frisch	276	371	505
Grassilage Zukauf	203	253	443
Extensivgras 1. Schnitt	215	252	199
Extensivgras Frisch	310	379	532
Maissilage	254	292	308
Kartoffeln ganz	276	295	465
Kartoffeln zerkleinert	290	300	353

8.2.3.2 Abbaugrad

Der Abbaugrad gibt an, wie viel Prozent des zugegebenen Substrats bei einer definierten Raumbelastung abgebaut wird. Diese Bestimmung kann sowohl über die Gasphasenanalytik als auch über die Flüssigphasenanalytik durchgeführt werden.

Bei der Bestimmung über die Gasphasenanalytik nimmt man an, dass aus dem Abbau von einem Kilogramm CSB ca. 320 l Methan entstehen. In **Tabelle 20** sind die Abbaugrade der Gärversuche für die Gas- und Flüssigphase dargestellt.

Tabelle 20: Abbaugrade der Gärsubstrate

	Abbaugrad (Gasphase)	Abbaugrad (Flüssigphase nach CSB)	Abbaugrad (Flüssigphase nach oTS)
	[%]	[%]	[%]
Kleegrassilage 1.Schnitt	88	81	85
Kleegrassilage 2. Schnitt	86	75	84
Kleegrassilage 4. Schnitt	52	51	59
Kleegras Frisch	86	73	82
Grassilage Zukauf	63	80	69
Extensivgras 1. Schnitt	67	85	87
Extensivgras Frisch	97	82	87
Maissilage	79	87	87
Kartoffeln ganz	86	93	90
Kartoffeln zerkleinert	90	96	98

Die Abbaugrade aus **Tabelle 20** sind in der nachfolgenden **Abbildung 28** nochmals zur besseren Übersicht abgebildet.

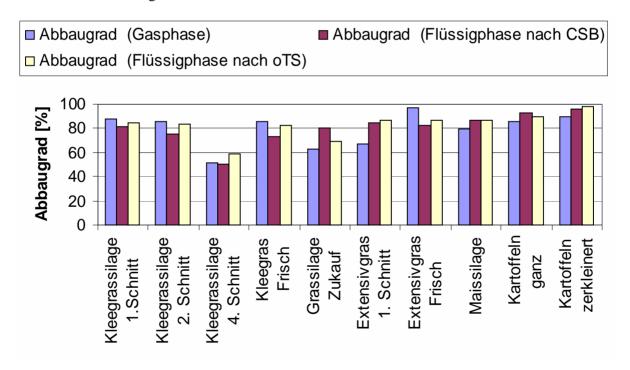


Abbildung 28: Abbaugrade der Gärsubstrate

Die zum Teil abweichenden Ergebnisse von der Gas- und Flüssigphasen- Analytik lassen sich hauptsächlich auf die durchgeführte CSB- Analytik zurückführen, da es hier insbesondere durch Entmischung während der Probenahme zu fehlerhaften Ergebnissen kommen kann. Deswegen sind die Abbaugrade der Gasphase als verlässlicher anzusehen.

Es zeigt sich, dass sich die Substrate überwiegend sehr gut abgebaut haben. Eine Ausnahme bilden die zugekaufte Grassilage, das Extensivgras 1.Schnitt und das Kleegras 4. Schnitt,

welche nur einen Abbaugrad von ca. **52 bis 67 %** aufweisen. Dieses liegt vermutlich daran, dass das Extensivgras (1.Schnitt) vorher nicht ausreichend gehäckselt wurde und die Kleegrassilage (4. Schnitt) zu stark verholzt war.

Die Ergebnisse der Biogasanlage Püggen zeigen, dass die hohen Abbaugrade (**Tabelle 12 und Tabelle 13**) auch unter Praxisbedingungen erreicht wurden, was in der Regel nicht der Fall ist, da die Verweilzeiten in den kontinuierlich betriebenen Praxisanlagen üblicherweise kürzer sind. Da es sich bei der Biogasanlage allerdings um eine NawaRo Anlage handelt sind größere Verweilzeiten eingeplant und damit auch höhere Abbaugrade erreichbar.

8.2.3.3 Gaszusammensetzung

Um eine Aussage über die Qualität des Biogases zu bekommen, wurde während der gesamten Versuchsdurchführung die Zusammensetzung analysiert. Bei diesen Versuchen stellt sich nach einem längeren Zeitraum eine konstante Gaszusammensetzung ein.

Es handelt sich hier um Werte (**Tabelle 21**), die im Labormaßstab und nach langen Vergärungszeiten erreicht wurden. Diese Gaswerte sind nur schwer in der Praxis zu erreichen, was man auch Anhand von **Tabelle 14** und **Tabelle 15** ersehen kann.

Tabelle 21: Durchschnittliche Biogaszusammensetzung

	Methan	Kohlendioxid
	[Vol%]	[Vol%]
Kleegrassilage 1.Schnitt	56,6	43,3
Kleegrassilage 2. Schnitt	53,4	47,9
Kleegrassilage 4. Schnitt	58,4	41,9
Kleegras Frisch	54,6	44,5
Grassilage Zukauf	54,9	44,3
Extensivgras 1. Schnitt	53,5	45,3
Extensivgras Frisch	51,8	49,2
Maissilage	57,1	42,7
Kartoffeln ganz	54,9	45,5
Kartoffeln zerkleinert	53,1	45,9

8.3 Quasi-kontinuierliche Versuche

Im Gegensatz zu den in **Kapitel** 8.2 erläuterten Batchversuchen, können anhand der quasi – kontinuierlichen Gärversuchen die Prozessstabilität und das Abbauverhalten bei steigender Raumbelastung ermittelt werden.

8.3.1 Versuchsaufbau

Da diesen Reaktoren während der gesamten Versuchsdauer Substrat zugeführt wird, sind die in **Kapitel 8.2.1** beschriebenen Gärbehälter so aufgebaut, dass während der Substratzugabe kein Sauerstoff eingetragen wird. Die Reaktoren (**Abbildung 29**) mit einem Volumen von ca. 20 Litern sind hierzu mit einem Befüllstutzen versehen, der in einem Winkel von ca. 45° unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche in den Reaktor mündet.

Nach außen ist der Stutzen mit einem Kunstoffpfropfen verschlossen. Durch diese Bauweise ist es möglich, ohne Sauerstoffeintrag Probenmaterial zu entnehmen und Substrat hinzuzugeben. Nach oben sind die Reaktorbehälter mit einem Deckel verschlossen, der fest mit dem Reaktor verspannt ist. Die installierte Rührwelle, die mit Rührarmen versehen ist, wird durch einen Intervallgesteuerten Motor angetrieben. Dadurch wird eine vollständige Durchmischung des Reaktors erreicht.



Abbildung 29: Quasi-kontinuierlicher Reaktor

Für die nötige Prozesstemperatur (38°C) sind die Reaktoren doppelwandig ausgeführt. Durch den Zwischenraum der Wände wird beheiztes Wasser, welches durch ein Thermostat erhitzt wird, gepumpt.

Das gebildete Biogas wird analog zu den Batch-Versuchen über eine Ventilöffnung im Reaktordeckel in speziellen Gasbeuteln aufgefangen und anschließend analysiert

8.3.2 Versuchsdurchführung

Im Rahmen der fachlichen Projektbegleitung wurden zwei Versuchsreihen mit jeweils zwei Reaktoren durchgeführt. Im ersten Ansatz wurden die ersten 9 Wochen und im zweiten Versuchsansatz der Anlagenbetrieb von Januar bis Mai simuliert. Um eine möglichst genaue Substratmischung zu erhalten, wurden für diese Zeiträume die durchschnittlichen Substratzusammensetzungen errechnet (**Tabelle 22 und Tabelle 23**).

Tabelle 22: Substratmengen erster Ansatz

Substrat	Menge (Ersten 9 Wochen)	Proz. Anteil
	[t]	[%]
Kleegrassilage	ca. 587	ca. 97,3 %
Weizen	ca. 16,5	ca. 2,7 %
Gesamt	603,5	100 %

Tabelle 23: Substratmengen zweiter Ansatz

Substrat	Menge	Proz. Anteil
	[t]	[%]
Kartoffeln	ca. 142	ca. 16,9 %
Getreide	ca. 95,8	ca. 11,4 %
Maissilage	ca. 200	ca. 23,8 %
Kleegrassilage	ca. 402	ca. 47,9 %
Gesamt	839,8	100 %

Bei Versuchsbeginn wurden die Reaktoren mit 15 Litern ausgefaulten Gärgut von der Biogasanlage Püggen befüllt. Danach wurden die Reaktoren mit Stickstoff gespült, um den enthaltenden Sauerstoff zu verdrängen.

Anschließend wurde den Reaktoren, beginnend mit einer Raumbelastung von 1 g oTS/l*d, das in Püggen verwendete Substratgemisch zugeführt.

Für die Berechnung der täglichen Zugabemenge wurde der organische Trockenrückstand (oTS) bestimmt (**Tabelle 24 und Tabelle 25**).

Tabelle 24: Trockenrückstand und organischer Trockenrückstand erster Versuchsansatz

	TS	oTS
	[%]	[%]
Kleegrassilage	18,32	15,30
Weizen	86,28	80,58
Gemisch	20,7	17,58

Tabelle 25: Trockenrückstand und organischer Trockenrückstand zweiter Versuchsansatz

	TS	oTS
	[%]	[%]
Kartoffeln	17,92	16,85
Getreide	87,25	83,56
Maissilage	30,92	29,5
Kleegrassilage	16,53	14,31
Gemisch	28,24	26,23

Die tägliche Raumbelastung errechnet sich nach der Gleichung 1 im Kapitel 5.1. Hiermit ergeben sich die in Tabelle 26 und Tabelle 27 aufgeführten Zugabemengen und Raumbelastungen.

Tabelle 26: Zugabemengen der Versuchsreaktoren erster Ansatz

Mischungsverhältnis und Einwaagen								
	rel. Anteil an		Zugabe [g FM/d]					
	FM		Raumb	elastung [g o	TS / I*d]			
	LIAI	1,00	1,00 1,50 2,00 2,50 3,00					
Kleegrassilage	97,30%	83,02	124,53	166,04	207,55	249,06		
Weizenschrot	2,70%	2,30	2,30 3,46 4,61 5,76 6,91					
		85,32	127,99	170,65	213,31	255,97		

Tabelle 27: Zugabemengen der Versuchsreaktoren zweiter Ansatz

Mischungsverhältnis und Einwaagen								
	rel. Anteil an		Zugabe [g FM/d]					
	FM		Raumb	elastung [g o	TS / I*d]			
	FIVI	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00		
Kartoffeln	16,90%	9,66	14,50	19,33	24,16	28,99		
Roggen	11,45%	6,55	9,82	13,10	16,37	19,64		
Maissilage	23,80%	13,61	20,42	27,22	34,03	40,83		
Kleegrassilage	47,85%	27,36 41,05 54,73 68,41 82,09						
		57,19	85,78	114,37	142,97	171,56		

Um eine ausreichende Genauigkeit für die ermittelten Analysedaten zu erreichen, wird über einen Zeitraum von ca. 3 – 4 Wochen eine konstante Raumbelastung eingehalten. Durch diese Versuchsführung ergibt sich eine fast konstante Biogasproduktion, welche den Zustand des quasi-kontinuierlichen Anlagenbetriebs widerspiegelt. Die Bakterien im Reaktor haben sich dann an die herrschende Raumbelastung angepasst. Ist diese Anpassung erfolgt, wird die Raumbelastung vorsichtig gesteigert werden, um die Biologie im Fermenter nicht zu überlasten.

Um vergleichbare Betriebsbedingungen zu erhalten, wird der Flüssigkeitsspiegel im Reaktor konstant gehalten. Dies wird dadurch erzielt, dass vor der Zugabe eine ausreichende Menge an Gärgut entnommen wird und nach der Zugabe des Mischsubstrates der Flüssigkeitsstand mit dem vorher entnommenen Gärgutes wieder auf sein altes Niveau eingestellt wird. Danach wird der Reaktor wieder verschlossen und der Gasbeutel ausgetauscht und analysiert. In **Abbildung 30** ist die Methanproduktivität und die Raumbelastung des ersten Versuchsansatzes mit Kleegras und Weizen über der Versuchszeit aufgetragen. Die Gasausbeute des ersten Versuchsansatzes liegt bei einer Raumbelastung von 1,0 bei 190 l/kg CSB bzw. 47,3 l/kg FM und bei einer Raumbelastung von 1,5 bei 170 l/kg CSB bzw. 42 l/kg FM. In den Monaten Juni und Juli 2004 wurde in der Praxisanlage bei dieser Raumbelastung eine Methanausbeute von ca. 393 l/kg CSB bzw. 82,7 l/kg FM erreicht.

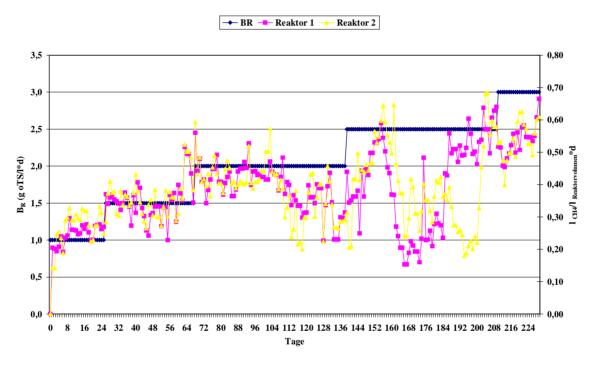


Abbildung 30: Methanproduktivität des ersten Versuchsansatzes

Anhand der **Abbildung 30** ist zu erkennen, dass die Raumbelastung der beiden Reaktoren zunächst bis Raumbelastung 1,5 g oTS / l*d gesteigert werden konnten. Die Steigerung der Raumbelastung wurde jeweils in Schritten von 0,5 g oTS / l*d durchgeführt. Um eine Überlastung der Biologie zu vermeiden, wurde erst dann eine Steigerung der Raumbelastung vorgenommen, wenn die Methanproduktivität relativ konstant war. Bei der weiteren Steigerung der Raumbelastung auf 2,0 g oTS / l*d zeigt sich jedoch bereits ein Abbruch der Gasproduktion und damit auch ein Zusammenbruch der Fermenterbiologie.

Zwar konnte die Versuchsdurchführung nach einer Erholungspause der Reaktoren wieder aufgenommen werden, doch auch hier zeigte sich, das nach kurzer Zeit die Gasproduktion bei

einer Raumbelastung von 2,5 g oTS / l*d wieder zusammenbrach. Der Versuchsansatz des Reaktors 1 erholte sich relativ schnell, der des zweiten Reaktors benötigte etwas länger. Es wurde dann noch eine Raumbelastung von 3,0 g oTS / l*d vorgenommen, bei der allerdings keine Steigerung der Gasproduktivität festgestellt werden konnte. In der Praxisanlage bestätigte sich, dass die Biogasanlage durch eine Beschickung von Kleegras und Weizen bei einer Raumbelastung von 1,5 bis 2,0 g oTS / l*d stabil und betriebssicher betrieben werden kann.

1n **Abbildung 31** ist die Methanproduktivität und die Raumbelastung des zweiten Versuchsansatzes mit Kleegrassilage, Maissilage, Roggen und Kartoffeln über den Versuchszeitraum aufgetragen. Beim zweiten Versuchsansatz liegt die Methanausbeute durchschnittlich bei ca. 213 l/kg CSB bzw. ca. 74 l/kg FM, wobei die Methanausbeute in der Praxisanlage bei fast gleichem Substratgemisch und gleicher Raumbelastung bei ca. 326 l/kg CSB bzw. 113 l/kg FM liegt.

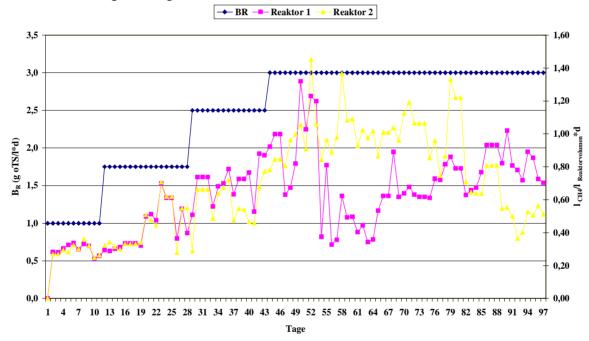


Abbildung 31: Methanproduktivität des zweiten Versuchsansatzes

Nach dem Beginn der Versuchsreihe konnte die Gasproduktion der beiden Reaktoren bis zur Raumbelastung von 1,5 g oTS / l*d gesteigert werden. Die Raumbelastung wurde in den ersten beiden Schritten um jeweils 0,75 g oTS / l*d erhöht. Auch bei dieser Versuchsreihe wurde die Steigerung der Raumbelastung erst vorgenommen, wenn die Gasproduktion relativ konstant war. Bei der Steigerung auf Raumbelastung 2,5 g oTS / l*d erhöhte sich auch die Gasproduktion. Durch eine Undichtigkeit des Versuchsreaktors 2 am 37. Tag kam es zu einem Lufteintrag und dadurch zu einer kurzzeitigen Rückgang der Gasproduktion. Der Reaktor erholte sich jedoch relativ schnell, so das mit der Versuchsreihe fortgefahren werden

konnte. Bei einer weiteren Belastungssteigerung auf 3,0 g oTS / l*d zeigte sich, dass nach kurzer Zeit die Gasproduktion im Reaktor 1 zurückging, was auf eine Überlastung der Fermenterbiologie zurückzuführen ist. Es konnte zwar nach einer längeren Erholungsphase der Reaktor 1 wieder mit Substrat gefüttert werden, doch auch hier konnte keine Erhöhung der Raumbelastung vorgenommen werden. Im Versuchsreaktor 2 konnte man mit der Erhöhung der Raumbelastung auch eine Steigerung der Gasproduktion erzielt werden. Bei diesem Versuchsansatz kam es erst am Ende der Versuchsreihe zum Zusammenbruch der Biologie, was auf eine Übersäuerung zurückzuführen ist.

Die Versuchsergebnisse dieser Versuchsreihen wurden von den Ergebnissen der Praxisanlage bestätigt. Die Biogasanlage Püggen konnte mit diesem Substrat bei einer Raumbelastung von ca. 1,0 bis 2,0 g oTS / l*d sicher betrieben werden.

8.4 Lagerversuche

Die Lagerversuche wurden durchgeführt, um mögliche Auswirkungen der Vergärung auf die Spurengasemissionen zu ermitteln, die bei der Lagerung im Gärrückstandslager entstehen. Neben den N₂O – Emissionen können unter anderen auch Ammoniakemissionen auftreten. Darüber hinaus trägt die mitteleuropäische Landwirtschaft zur Gesamtbelastung durch Methan bei. Ein Anteil von 20 bis 25 % der mit der Tierhaltung in Zusammenhang gebrachten Methanemissionen stammen aus den Tierexkrementen (BOUWMAN, 1991; HÜTHER, 1999; IPCC, 1992; SOMMER und MÖLLER, 2000).

Die nachfolgenden Ergebnisse sollen aufzeigen, ob durch eine anaerobe Vergärung die Spurengasemissionen bei unterschiedlichen Lagerungstemperaturen vermindert werden können.

8.4.1 Spurengasmessung mit GC

Die Bestimmung der CH₄-, N₂O- und CO₂- Konzentrationen in den Gasproben erfolgte mit einem Gaschromatographen (GC) der Firma Shimadzu (GC14B) mit einem Headspace-Autosampler. Das GC- System besteht aus mehreren geschalteten Säulen und 3 Detektoren (FID, ECD und WLD). Die Spurengase Methan und Lachgas werden im FID und WLD bzw. ECD und WLD detektiert. Welches Signal letztlich zur Ermittlung der Gaskonzentration herangezogen wird, richtet sich nach dem Messbereich des jeweiligen Detektors. Die

Bestimmung der Kohlendioxid-, Sauerstoff- und Stickstoffkonzentration erfolgt grundsätzlich im WLD.

Die Betriebsbedingungen für das GC-System sind in Tabelle 28 zusammengestellt.

Tabelle 28: Betriebsbedingungen des Gaschromatographen

Probenaufgabe:	Headspace-Sampler (HSS), 40° C
Probenvolumen:	1 mL Gas
Trennsäulen:	Vorsäule: Porapak QS (80/100 mesh), 1,5 m x 3 mm, Stahl
	Säule 1: Porapak QS (80/100 mesh), 3 m x 3 mm, Stahl
	Säule 2: Molsieb 5 A (60/80 mesh), 4 m x 3 mm, Stahl
Säulenschaltung:	12-Port Ventil, geschaltet nach 1,9 min
Detektoren:	WLD (100 mA, 100°C)
	FID (320°C)
	ECD (1 nA, 320° C)
Trägergas:	Helium 4.6 (2,80 bar; Fluß: 18mL/min)
Make-up-Gas für ECD:	Stickstoff 5.0 (0,35 bar; Fluß: 9 mL/min)
Brenngase für FID:	Wasserstoff 5.0 (0,6 bar)
	Luft (0,6 bar)
Ofentemperatur:	80° C

8.4.2 Ammoniakmessung mit FTIR

Die Ammoniakmessung erfolgte mittels FTIR-Spektroskopie. Dafür wurde das Gerät Magna-IR 550 der Firma Nicolet mit einer Ever-GloTM Lichtquelle, einem Kaliumbromid-Strahlungsteiler, einem Neon-Helium-Laser zur Positionierung der Spiegel und einem DTGS (KBr) Detektor verwendet. Die Auflösung betrug 0,125 cm⁻¹. Die Ansteuerung der Anlage geschah über einen IBM-kompatiblen PC (486 DX2-66) mit dem Softwarepaket OMNIC der Firma Nicolet.

Zuerst wurde die gesamte Messanlage auf eine Temperatur von 50°C aufgeheizt. Anschließend wurde die gesamte Messanlage mit ca. 80 1 Stickstoff (N₂) gespült und anschließend ein Hintergrundspaktrum aufgenommen. Dieses wurde vom Computer automatisch von den gemessenen Spektren der Proben abgezogen.

Zur Messung wurde die Messzelle mit 40 l Probegas gespült, was durch einen Volumenzähler der Firma Ritter kontrolliert wurde. Danach wurde das System geschlossen und die Messung durchgeführt. Für die Messung wurden immer wieder die selben Beutel verwendet. Dadurch soll eine Absättigung der Innenseite des Beutels mit Ammoniak erreicht werden, um Absorptionseffekte auszuschließen.

Für Bestimmung der Ammoniakkonzentrationen aus den Spektren wurden vier Absorptionsbanden verwendet, aus denen die Konzentration einzeln bestimmt wurde. Anschließend wurde der Mittelwert gebildet (THOMAS WALUGA, 2005)

8.4.3 Versuchsaufbau

Für die Versuchsdurchführung wurden Glasbehälter (**Abbildung 25**) mit einem Volumen von 32 Litern verwendet, die mit einem Glasdeckel gasdicht verschlossen sind. Über eine Öffnung im oberen Bereich des Glasdeckels wird während der gesamten Versuchsdurchführung das entstehende Biogas in einem Gasbeutel aufgefangen und in regelmäßigen Abständen analysiert. Die Volumenbestimmung erfolgte über speziellen Gasuhren der Firma Ritter.

8.4.4 Versuchsdurchführung

Der zu untersuchende Gärrückstand (**Tabelle 29**) wurde aus dem Nachgärer der Biogasanlage entnommen und in 8 gasdichte Glasbehälter abgefüllt. Jeder Glasbehälter wurde mit 20 kg Gärgut befüllt und bei unterschiedlichen Temperaturen (4 °C, 11 °C, 20 °C und 39 °C) über drei Monate gelagert

Tabelle 29: Substrateigenschaften vom Ausgangsmaterial für die Lagerversuche

	TS	oTS	CSB	N _{ges}	NH ₄ -N	PO ₄ -P
	[%]	[%]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]
Gärgut Nachgärer	5,0	4,68	82,02	5,26	2,52	0,52

Nachfolgend werden die Versuchsergebnisse der Lagerversuche bei den unterschiedlichen Temperaturen dargestellt

8.4.4.1 Methanemissionen

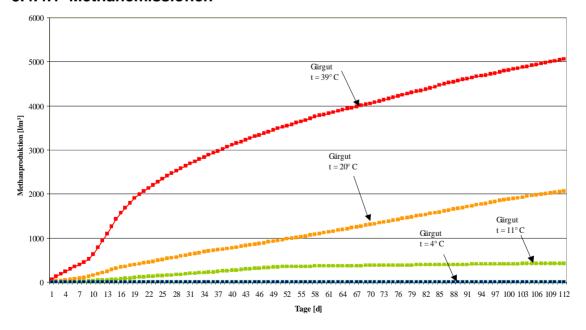


Abbildung 32: Methanproduktion des Gärgutes bei unterschiedlichen Lagertemperaturen

Anhand der **Abbildung 32** ist zu erkennen, das bei einer Lagertemperatur von 39 °C und einer Lagerzeit von ca. 112 Tagen die höchste Methanproduktion (ca. 5 m³ CH₄ / m³ Gärgut) stattfand. Dieses hängt damit zusammen, da bei dieser Temperatur die Methanbakterien die besten Milieubedingungen vorfinden. Dadurch können auch noch die restlichen schwer abbaubaren Verbindungen zu Methan umgesetzt werden.

Es ist ebenfalls zu erkennen, dass mit dem Abfall des Temperaturniveaus auch die Methanproduktion sinkt. Bei einer Temperatur von ca. 4 °C kommt sie sogar völlig zum Erliegen.

Aufgrund dieser Ergebnisse ist dringend zu empfehlen, das Gärrückstandslager abzudecken um das entstehende Methan (Restgaspotenzial) im BHKW energetisch zu verwerten und klimaschädliche Methanemissionen zu vermeiden.

8.4.4.2 Lachgasemissionen

Die Produktion von Lachgas (N_2O) aus dem verwendeten Gärgut war bei den Lagerversuchen so gering, das in der nachfolgenden **Tabelle 30** lediglich die Konzentrationen dargestellt werden kann.

Tabelle 30: Maximale N₂O-Konzentrationen des Biogases bei den Lagerversuchen

Temperatur	N_2O – Konzentration
[°C]	[ppm]
4	0 – 0,18
11	0 - 0.10
20	0 - 0.16
39	0 - 0.07

Die N_2O - Bildung trat bei allen Versuchsansätzen nur in den ersten Tagen auf. Aufgrund dieser Feststellung kann man davon ausgehen, dass die Lachgasproduktion für die Praxis ohne Relevanz ist. Die Ergebnisse zeigen, dass die Temperaturen keinen Einfluss auf die N_2O -Konzentrationen haben.

8.4.4.3 Ammoniakemissionen

Zu den Ammoniakemissionen können anhand der durchgeführten Lagerversuche keine genauen Aussagen gemacht werden. Der Grund liegt darin, dass die Biogasmengen, die während des Versuchszeitraumes gebildet wurden, zu gering waren um genauer Messungen mit dem FTIR durchzuführen.

Es wurden allerdings Gasproben von der Biogasanlage genommen und über den FTIR auf Ammoniak untersucht. Bei diesen Analysen hat sich gezeigt, dass die Ammoniakkonzentrationen im Biogas zwischen 10 und 20 ppm liegen.

Es sind daher weitere Versuche erforderlich, um genaue Aussagen über die Höhe von Ammoniakemissionen machen zu können.

8.5 Schlussfolgerungen und Ausblick zu den Emissionen

Die Denitrifikation, die zu Lachgasemissionen aus dem Boden führt, wird mit der Konzentration an flüchtigen Fettsäuren (PAUL und BEAUCHAMP, 1989) bzw. mit der Zufuhr von leicht abbaubarem Kohlenstoff im Wirtschaftsdünger (BEAUCHAMP et al., 1989) in Verbindung gebracht. Diese Erhöhungen kann man auf folgende Mechanismen zurückführen: Der erhöhte Abbau der zugeführten organischen Substanz durch das nicht vergorene Substrat, verbunden mit der steigenden Atmungsaktivität der heterotropher Bakterien, begünstigt die Schaffung von anoxischen Bedingungen im Boden (RICE et al., 1988). Unter diesen anoxischen Bedingungen kommt es zur Denitrifikation, bei der zur Energiegewinnung Elektronen statt auf elementarem Sauerstoff (O₂) auf den Sauerstoff des Nitrats (NO₃) unter Bildung von NO₂, NO, N₂O und N₂ übertragen werden.

Bei einer anaeroben Vergärung wird der leicht abbaubare Kohlenstoff in energetisch nutzbares Methan umgewandelt. Das nach der Vergärung gelagerte und ausgebrachte Gärprodukt enthält keine oder nur sehr geringe Gehalte an leicht abbaubaren Kohlenstoff. Dieser Effekt dürfte der Bildung anoxischen Verhältnissen im Boden weitgehend entgegentreten und verminderte Denitrifikationsraten erzielen. Es ist allerdings zu beachten, das es zu Ammoniak- Emissionen nach der Ausbringung des Gärproduktes kommt, diese Emissionen sind jedoch nach Ergebnissen von CLEMENS (2001) wegen besserer Fließeigenschaften bezogen auf den Gesamt-NH₄-Gehalt geringer als bei nicht vergorener Wirtschaftsdünger.

Im ökologischen Landbau werden über Ernterückstände und den eingearbeiteten Aufwuchs von Gras- und Zwischenfrüchten große Mengen an organischer Substanz dem Boden zugeführt. Die Einarbeitung der organischen Substanzen in den Boden ist meistens sehr inhomogen, was zu relativ hohen Lachgasemissionen und zu N-Verlusten im Betriebskreislauf führt.

Die Vergärung in einer Biogasanlage dürfte daher nicht nur zu einer Erhöhung des mobil einsetzbaren Düngers und der Erträge (einschließlich der Energieerträge) führen, des weiteren trägt diese dazu bei die treibhauswirksamem und ozonschädigenden Emissionen zu reduzieren

9 Wirtschaftlichkeitsberechnung

In **Tabelle 31** ist die Wirtschaftlichkeitsberechnung der Biogasanlage für das Betriebsjahr 2004/2005 dargestellt.

Tabelle 31: Wirtschaftlichkeitsberechnung der Biogasanlage Püggen 2004/2005 (01.07.04 – 30.06.05)

	Betriebsy	virt	schaftliche Kennzahle	n der l	Biogasanl	age - Püggen 16	
	Investition von	n 01	1.07.2004 bis zum 30.0	6.2005			
	587.700	€	Biogasanlage (209.309	9 €BH	KW)		
			Siloplatte	, 0211			
			Nahwärmenetz				
	742.000	€	Gesamtinvestition				
[,	Ergebnis des 1	. w	irtschaftjahres 2004/2	005			
	1. Erträge						
	285.572,80	€	Strom				
	1.327,19						
	,		Verkauf Gärsubstrat				
	294.345,07	€	Gesamterträge				
			Strom für Eigenverbra	uch			
			Heizöl für BHKW				
	,		Personalkosten Motoröle				
			Unterhaltung (Reperati	uren ele	ekt Motor	en Redarfart)	
			Fortbildung (incl. Reis				
			Versicherung (Biogasa		2007,77	,	
			Substrat (Zukauf)	0 /			
			Zinsen für Darlehen				
	79.600,00	€	AFA				
	108.351,00	€	Substrate (Biomasse si	ehe III.)		
	260.094,02	€	Gesamtkosten		·		
	34.251,05	€	Gewinnbeitrag - lanw	irtsch	aftlicher I	Betrieb Ebeling	
I.	Substrat - Bior	nas	se im Wirtschaftjahr 2	2004 / 2	2005		
	157 835	kα	Getreide	711	8,50 €	38.916 €	
			Kartoffeln	zu zu	0,50 € 1,00 €	4.470 €	
	59.630	_		zu zu	0,00 €	4.470 €	
			Kleegrassilage	zu	2,50 €	30.221 €	
		_	Maissilage	zu	2,70 €	22.843 €	
		_	Kleegras frisch	zu	2,50 €	3.121 €	
		_	Grassilage extensiv	zu	1,00 €	8.779 €	
			g			100.251 5	
			Summe Substratkosten	l		108.351 €	

Die Berechnung wurde mit den Investitionen, Erträgen und Kosten durchgeführt, die vom Betreiberfür das Wirtschaftjahr 2004/2005 übermittelt wurden. Der erzielte Gewinnbeitrag von **34.251,05** € des landwirtschaftlichen Betriebes Ebeling kann allerdings nur für dieses Wirtschaftjahr und für diesen ökologisch arbeitenden Betrieb angesetzt werden.

Durch unterschiedliche Einflussfaktoren kann der Erlös allerdings noch gemindert oder gesteigert werden. Eine Steigerung des Erlöses kann bei erhöhtem Bedarf an Wärme erzielt werden, da zur Zeit nur 7 Wohnhäuser am Wärmenetz angeschlossen sind und insgesamt 16 Wohnhäuser mit Wärme versorgt werden sollen. Durch den besseren Düngewert wird wahrscheinlich der Biomasseertrag pro ha erhöht, was zu einer Steigerung der Substratmenge für die Biogasvergärung führt.

Negativ würde sich eine Kürzung der Einspeisevergütung auswirken. Wenn z. B. die Vergütung für diese Biogasanlage um 2 Cent/kWh zurückgenommen wird und alle anderen Kosten und Erträge konstant bleiben vermindert sich der Gewinn von 34.251,05 € auf – 2.319,06 €

Anhand von diesem Beispiel ist zu erkennen, das der Erlös bei einer Biogasanlage stark vom Stromerlös und der Einspeisevergütung abhängig ist und im Bereich des ökologischen Landbaus auch sehr schnell zu Verlusten führen kann.

10 Zusammenfassung

Die Biogasanlage Püggen auf dem Biolandhof Ebeling wurde insgesamt über einen Zeitraum von 14 Monaten wissenschaftlich begleitet. In diesem Zeitraum wurde die Funktion und Leistung der Anlage bewertet und eine Bilanzierung der einzelnen Massen-, Energie- und Stoffströme durchgeführt.

Bei der Anlage handelt sich um ein zweistufiges mesophiles Nassvergärungsverfahren. Die Anlage besteht aus zwei stehenden Fermentern in Betonbauweise - einem 1500 m³ großen Hauptfermenter mit Feststoffeintrag sowie einem 1500 m³ Nachgärer - und einem offenen, ca. 600 m³ großen Endlagerbehälter aus Stahl. Hauptfermenter und Nachgärer sind über einem Freispiegelüberlauf verbunden. Die Beheizung der mit 10 cm dicken PU – Hartschaumplatten isolierten Fermenter erfolgt durch wand– und fußbodenverlegte Heizungsrohre. Zur Durchmischung ist der Hauptfermenter mit einem Großflügelrührwerk und einem Tauchmotorrührwerk ausgerüstet, während der Nachgärer nur über ein Tauchmotorrührwerk verfügt. Die Biogasspeicherung erfolgt im Kopfraum von Hauptfermenter und Nachgärer, die jeweils mit einem 1,5 mm starken EPDM – Einfachfoliendach abgedeckt sind.

Gemäß der Anlagenkonzeption werden in der Biogasanlage hauptsächlich nachwachsende Rohstoffe vergoren. Im Betrachtungszeitraum kamen neben frischem Kleegras, Kleegrassilage und Grassilage von extensiven Flächen auch Maissilage und Festmist sowie geschroteter Roggen zum Einsatz. Im Zuge der wissenschaftlichen Begleitung wurden sämtliche Inputströme ermittelt und stofflich analysiert.

Von Juni 2004 bis Dezember 2004 wurde der Hauptfermenter mit einer durchschnittlichen Raumbelastung (B_R) von **1,99 kg oTS**/(**m**³***d**) betrieben. Für den Nachgärer ergibt sich für diesen Zeitraum eine durchschnittliche Raumbelastung von **0,41 kg oTS**/(**m**³***d**). In der Zeit von Januar bis Mai 2005 konnte die Belastung nochmals gesteigert werden, so dass der Hauptfermenter im Durchschnitt mit einer Raumbelastung von **2,47 kg oTS**/(**m**³***d**) und der Nachgärer mit **0,51 kg oTS**/(**m**³***d**) betrieben werden konnte.

Die Verweilzeiten im Hauptfermenter und Nachgärer liegen mit jeweils durchschnittlich **129 Tagen** (gesamt ca. 258 Tage) weit über den sonst üblichen Gesamtverweilzeiten von 60 – 90 Tagen, wodurch eine gute Prozessstabilität und eine sehr weitgehende energetische Verwertung der eingesetzten Substrate erreicht wird.

Die erzielten oTS-Abbaugrade der Gesamtanlage liegen durchweg bei über 80 % und erreichen zeitweise Werte von bis zu 87 %. Die Biogaszusammensetzung von durchschnittlich 53 % CH₄, 47 % CO₂ und einigen ppm H₂S ist vergleichbar mit

Ergebnissen von reinen Energiepflanzen-Vergärungsanlagen, die mit konventionell angebauten Substraten betrieben werden.

Messungen des Restmethanpotenzials vom Gärrückstands haben gezeigt, dass bei einer Lagertemperatur von 39 °C und einer Lagerzeit von ca. 112 Tagen noch maximal 5 m³ CH₄ / m³ Gärgut gebildet werden, wobei dieser Wert auf ca. 2 m³ CH₄/m³ Gärgut fällt, wenn eine an die realen Verhältnisse angepasste Lagertemperatur von 20 °C eingestellt wird. Auch wenn im Vergleich zu konventionellen Anlagen die Methanemissionen aus dem Gärrestlager gering sind, sollte im Hinblick auf den Klimaschutz ein gasdicht abgedecktes Gärrestlager verwendet werden. Die Bildung von Lachgas im Gärrestlager ist demgegenüber vernachlässigbar gering. Während des Berichtszeitraumes traten mehrere Defekte an den Rührwerken sowie eine Verstopfung am Überlauf zwischen Hauptfermenter und Nachgärer auf, die durch Reparaturen bzw. Ersatz der defekten Anlagenkomponenten zeitnah behoben werden konnten. Ein Hauptproblem war die unzureichende Bereitstellung der erforderlichen Wärmemenge durch die drei BHKW's, die neben der Versorgung der Biogasanlage mit Prozesswärme seit Dezember 2004 zusätzlich sieben Wohnhäuser mit Wärme versorgen.

Der elektrische Gesamtwirkungsgrad aller drei BHKW's beträgt etwa 36 %. Der thermische Gesamtwirkungsgrad weist mit ca. 30 % einen ausgesprochen geringen Wert auf und ist Ursache für die aufgetretenen Probleme bei der Wärmeversorgung der Wohnhäuser. Der Ausnutzungsgrad der installierten elektrischen Leistung stieg in den ersten 7 Monaten von ca. 60 % auf ca. 86 % an.

Die Bilanzierung und Analyse der Stoffströme hat gezeigt, dass sämtliche Nährstoffe, die mit den Substraten in die Biogasanlage eingebracht wurden, vollständig für die Düngung zur Verfügung stehen. Durch die Entnahme des Aufwuchses aus dem Kleegrasanbau und dessen Verwertung in der Biogasanlage können höhere Stickstofferträge auf der Fläche erzielt werden und gleichzeitig Emissionen an Stickstoff und Lachgas vermieden werden, die bei unkontrollierter Zersetzung der organischen Masse auf dem Feld entstehen würden. Mit der Vergärung wird ein gut handhabbarer Flüssigdünger gewonnen, der zum optimalen Zeitpunkt pflanzenbedarfsgerecht eingesetzt werden kann, da der Stickstoff überwiegend in leicht verfügbarer Form vorliegt.

Insgesamt ist daher zu erwarten, dass es durch die geringen Nährstoffverluste und die verbesserte Wirksamkeit des Stickstoffs zu einer deutlichen Steigerung der Biomasseerträge im untersuchten Biolandbetrieb kommt. Erhöhte Erträge im Bereich der Energiepflanzenproduktion bewirken gleichzeitig eine Steigerung der verfügbaren Substratmenge für die Biogaserzeugung und führen damit wiederum zu einer Steigerung der

anfallenden Mengen an organischem Dünger. Exakte Aussagen zu den pflanzenbaulichen Auswirkungen der Nutzung des Gärrückstands auf den Ernteertrag sind aufgrund der kurzen Projektlaufzeit jedoch nicht möglich. Hierzu wäre eine mehrjährige Begleitung über mehrere Vegetationsperioden notwendig.

Der Gewinn der Biogasanlage Püggen liegt für das Betriebsjahr 2004/2005 bei ca. **34.000** € Dieser Gewinn kann allerdings nur für dieses Wirtschaftjahr und auf diesen landwirtschaftlichen Betrieb angesetzt werden. Durch die erhöhte Verfügbarkeit an Nährstoffen ist zu erwarten, dass langfristig höhere Biomasseerträge erzielt werden, die sich positiv auf die Erlössituation auswirken. Fernerhin kann durch Anschluss weiterer Wohnhäuser an das Nahwärmenetz der Erlös weiter gesteigert werden, sofern es durch technische Maßnahmen gelingt, den thermischen Wirkungsgrad der BHKW's weiter zu verbessern.

11 Literaturverzeichnis

AHRBERG, S. (2001): Einfluss differenzierter Bodenbearbeitung und unterschiedlicher Vorfrüchte auf die Stickstoffdynamik des Bodens sowie auf die Stickstoffaufnahme und Ertragsbildung von Winterweizen im Ökologischen Landbau. Diplomarbeit an der Professur für Organischen Landbau, Universität Gießen.

BEAUCHAMP, E.G., J.T. TREVORS, J.W. PAUL (1989): Carbon sources for denitrification. In: STEWARD, B.A. (ed): Advances in Soil Science, S. 113-142. Springer-Verlag, New York.

BECKMANN, Uta; H. KOLBE, A. MODEL, R. RUSSOW (2000): Abschlussbericht zum Projekt "Reduzierung gasförmiger Emissionen und der Nährstoffverlagerung durch optimale Ausgestaltung von extensiven landwirtschaftlichen Anbausystemen mit unterschiedlich hohem Tierbesatz".

BOUWMAN, A.F. (1991): Schriftliche Stellungnahme zur öffentlichen Anhörung Landwirtschaft I der Enquete-

CLEMENS, J., C. RIGER, P. WEILAND, R. VANDRÉ, I. SCHUMACHER, S. WULF (2001): Eigenschaften, Verwendung und Umgang mit Biogasgülle. In: Fachverband Biogas (Hrsg.): Beiträge zur 10. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V. vom 9. bis 12. Januar 2001 in Borken bei Kassel, S. 44-51.

HEUWINKEL, H. (2001): N₂-Bindung in gemulchtem Kleegras: Messmethodik und Fixierleistung. In: H.-J. REENTS (Hrsg.): Beiträge zur 6. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau, Weihenstephan, 183-186.

HÜTHER, Liane (1999): Entwicklung analytischer Methoden und Untersuchung von Einflussfaktoren auf Ammoniak-, Methan- und Distickstoffmonoxisemissionen aus Flüssig- und Festmist. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 200, ISBN 3-933140-22-6.

IPCC (Intergovernamental Panel on Climate Change) (1992): The IPCC-Supplement.

MERZ, H.U. (1988): Untersuchungen zur Wirkung von unbehandelter und methanvergorener Rindergülle auf den Numsatz unter *Dactylis glomerat* L. sowie auf das Keimverhalten verschiedener Pflanzenarten. Dissertation der Fakultät III, Agrarwissenschaften I der Universität Hohenheim.

MEßNER, H. (1988): Düngewirkung anaerob fermentierter und unbehandelter Gülle. Diss. an der TU München-Weihenstephan, LS. für Pflanzenernährung.

MÖLLER, K. (2005): Systemwirkung einer "Biogaswirtschaft" im ökologischen Landbau: Pflanzenbauliche Aspekte, Auswirkungen auf den N-Haushalt und auf Spurengasemissionen.

RICE, C.W., P.E. SIERZEGA, J.M. TIEDJE, L.W. JACOBS (1988): Stimulated denitrification in the microenvironement of a biodegradable organic waste injected into soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 52, 102-108.

RUHE, I., R. LOGES, F. TAUBE (2001): Vergleichende Analyse der N-Flüsse von Fruchtfolgen N-intensiver und Nextensiverökologischer Produktionssysteme unter besonderer Berücksichtigung der Nitratverluste. In: H.-J. REENTS (Hrsg.): Beiträge zur 6. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau, 237-240.

SCHULZ, H. (1996): Biogas-Praxis. Oecobuch-Verlag.

SOMMER, S.G., H.B. MÖLLER (2000): Emission of greenhouse gases during composting of deep litter from pig production - effect of straw content. J. Agric. Sci., Camb. 134, 327-335.

WICHMANN, S., S. DREYMANN, R. LOGES; F. TAUBE (2001): Ertrag, N₂-Fixierungsleistung und Vorfruchtwert von Futtererbsen im Vergleich zu Rotkleegras. Unveröffentlichter Vortrag im Rahmen der 6. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau in Freising-Weihenstephan.

THOMAS WALUGA (2005): Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss von Stickstoff im Substrat auf die Entstehung von Biogas (in Abhängigkeit von verschiedenen Prozessbedingungen)

12 Anhang

Tabelle 32: Energiebilanz BHKW 1 elektrisch vom Juni 2004 bis Dezember 2004

		Jun 04	Jul 04	Aug 04	Sep 04	Okt 04	Nov 04	Dez 04
Gasproduktion								
	[Nm³]	25396	29314	28100	24416	21887	32040	29221
Gasqualität								
	CH ₄ [%]	51,4	53,5	53,5	51,6	53	55	55
	CO ₂ [%]	48,3	45	42,9	47,6	46,5	44,5	44,5
	H ₂ S [%]	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
CH₄-Produktion								
	[Nm³]	13054	15683	15034	12598	11600	17622	16071
Energieproduktion Me								
	[kWh]	130145	156358	149885	125607	115651	175693	160231
Energieproduktion Zür								
	[kWh]	16664	21633	18061	17955	15238	21177	19550
Energieproduktion g	jesamt [kWh]	146809	177991	167946	143562	130888	196870	179782
erzeugter Strom								
	[kWh]	<u>61684</u>	<u>58978</u>	<u>66920</u>	<u>52287</u>	<u>55537</u>	<u>76422</u>	<u>66580</u>
el. Wirkungsgrad								
	[%]	42,0	33,1	39,8	36,4	42,4	38,8	37,0
max. nutzbare el. Le	_							
	[kW]	110	110	110	110	110	110	110
Ausnutzungsgrad								
	[%]	97,4	72,1	81,8	66,0	67,9	96,5	81,4

Tabelle 33: Energiebilanz BHKW 1 elektrisch vom Januar 2005 bis Mai 2005

		Jan 05	Feb 05	Mrz 05	Apr 05	Mai 05
Gasproduktion						
	[Nm³]	30168	19478	20560	11721	20982
Gasqualität						
	CH ₄ [%]	54,3	54,5	51,3	52,1	46,5
	CO ₂ [%]	44,7	44,8	48,3	46,8	52,5
	H ₂ S [%]	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01
CH ₄ -Produktion						
	[Nm³]	16381	10616	10547	6107	9757
Energieproduktion M						
	[kWh]	163323	105838	105154	60882	97274
Energieproduktion Zi						
	[kWh]	19880	23499	16361	8077	18393
Energieproduktion	gesamt					
	[kWh]	183203	129337	121515	68959	115667
erzeugter Strom						
	[kWh]	<u>72017</u>	<u>47819</u>	<u>47303</u>	<u>26337</u>	<u>43929</u>
el. Wirkungsgrad						
	[%]	39,3	37,0	38,9	38,2	38,0
max. nutzbare el. Le	eistung					
	[kW]	110	110	110	110	110
Ausnutzungsgrad						
	[%]	88,0	64,7	57,8	33,3	53,7

Tabelle 34: Energiebilanz BHKW 2 elektrisch vom Juni 2004 bis Dezember 2004

	Jun 04	Jul 04	Aug 04	Sep 04	Okt 04	Nov 04	Dez 04
Gasproduktion							
[Nm³]	7528	4527	13420	32090	32162	24335	32816
Gasqualität							
CH₄ [%]	51,4	53,5	53,5	51,6	53	55	55
CO ₂ [%]	48,3	45	42,9	47,6	46,5	44,5	44,5
H ₂ S [%]	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
CH₄-Produktion							
[Nm³]	3869	2422	7180	16558	17046	13384	18049
Energieproduktion Methan							
[kWh]	38577	24148	71582	165088	169947	133440	179945
Energieproduktion Zündöl							
[kWh]	6610	3969	10048	14929	19876	15664	20680
Energieproduktion gesamt							
[kWh]	45187	28117	81630	180017	189823	149104	200625
erzeugter Strom							
[kWh]	<u>17094</u>	<u>10404</u>	<u> 26965</u>	<u>68345</u>	<u>68866</u>	<u>53623</u>	<u>73535</u>
el. Wirkungsgrad							
[%]	37,8	37,0	33,0	38,0	36,3	36,0	36,7
max. nutzbare el. Leistung							
[kW]	110	110	110	110	110	110	110
Ausnutzungsgrad			-				
[%]	27,0	12,7	32,9	86,3	84,1	67,7	89,9

Tabelle 35: Energiebilanz BHKW 2 elektrisch vom Januar 2005 bis Mai 2005

		Jan 05	Feb 05	Mrz 05	Apr 05	Mai 05
Gasproduktion						
	[Nm³]	31101	26400	31122	35085	34451
Gasqualität						
	CH ₄ [%]	54,3	54,5	51,3	52,1	46,5
	CO ₂ [%]	44,7	44,8	48,3	46,8	52,5
	H ₂ S [%]	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01
CH ₄ -Produktion						
	[Nm³]	16888	14388	15966	18279	16020
Energieproduktion M						
	[kWh]	168371	143448	159178	182242	159717
Energieproduktion Z						
	[kWh]	23263	20630	20088	20600	27002
Energieproduktion						
	[kWh]	191635	164078	179266	202842	186719
erzeugter Strom						
	[kWh]	<u>71464</u>	<u>60859</u>	<u>66843</u>	<u>72497</u>	<u>68705</u>
el. Wirkungsgrad						
	[%]	37,3	37,1	37,3	35,7	36,8
max. nutzbare el. L	eistung		-		-	
	[kW]	110	110	110	110	110
Ausnutzungsgrad		•	_	•	_	
	[%]	87,3	82,3	81,7	91,5	84,0

Tabelle 36: Energiebilanz BHKW 3 elektrisch vom Juni 2004 bis Dezember 2004

	Jun 04	Jul 04	Aug 04	Sep 04	Okt 04	Nov 04	Dez 04
Gasproduktion							
[Nm³] 16524	13623	11986	19047	26263	31579	27210
Gasqualität							
CH ₄ [%	51,4	53,5	53,5	51,6	53	55	55
CO ₂ [%	48,3	45	42,9	47,6	46,5	44,5	44,5
H ₂ S [%	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
CH ₄ -Produktion	1						
[Nm³	8493	7288	6413	9828	13920	17369	14966
Energieproduktion Methan							
[kWh] 84677	72665	63933	97987	138778	173166	149208
Energieproduktion Zündöl							
[kWh] 15287	10543	9166	12731	16804	20744	50626
Energieproduktion gesamt [kWh	99964	83208	73099	110719	155582	193910	199834
erzeugter Strom	-						
[kWh] <u>34458</u>	<u>32721</u>	<u>27370</u>	<u>44371</u>	<u>59051</u>	<u>70565</u>	<u>69773</u>
el. Wirkungsgrad							
[%] 34,5	39,3	37,4	40,1	38,0	36,4	34,9
max. nutzbare el. Leistung [kW] 110	110	110	110	110	110	110
Ausnutzungsgrad [%	54,4	40,0	33,4	56,0	72,2	89,1	85,3

Tabelle 37: Energiebilanz BHKW 3 elektrisch vom Januar 2005 bis Mai 2005

		Jan 05	Feb 05	Mrz 05	Apr 05	Mai 05
Gasproduktion					·	
•	[Nm³]	26275	27862	27748	23094	23539
Gasqualität						
	CH ₄ [%]	54,3	54,5	51,3	52,1	46,5
	CO ₂ [%]	44,7	44,8	48,3	46,8	52,5
1	H₂S [%]	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01
CH₄-Produktion						
	[Nm³]	14267	15185	14234	12032	10946
Energieproduktion I	Methan					
	[kWh]	142245	151392	141918	119960	109129
Energieproduktion 2						
	[kWh]	27753	17059	19999	15949	16353
Energieproduktion	n gesamt					
	[kWh]	169998	168451	161917	135909	125482
erzeugter Strom						
	[kWh]	<u>63408</u>	<u>62214</u>	<u>64463</u>	<u>55782</u>	<u>49336</u>
el. Wirkungsgrad						
	[%]	37,3	36,9	39,8	41,0	39,3
max. nutzbare el. l	Leistung	•				
	[kW]	110	110	110	110	110
Ausnutzungsgrad		•				
	[%]	77,5	84,2	78,8	70,4	60,3

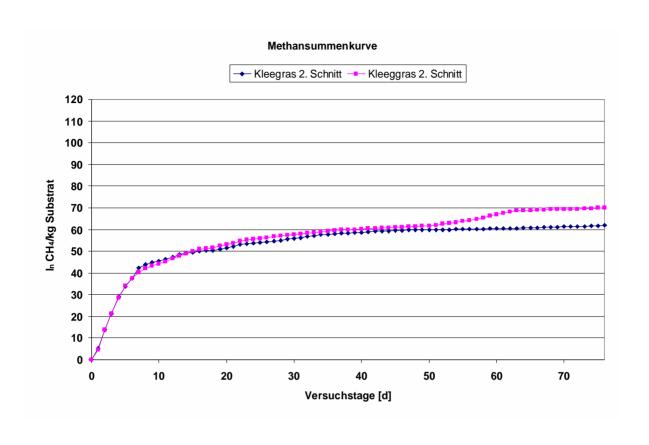


Abbildung 33: Methansummenkurve Kleegras 2. Schnitt

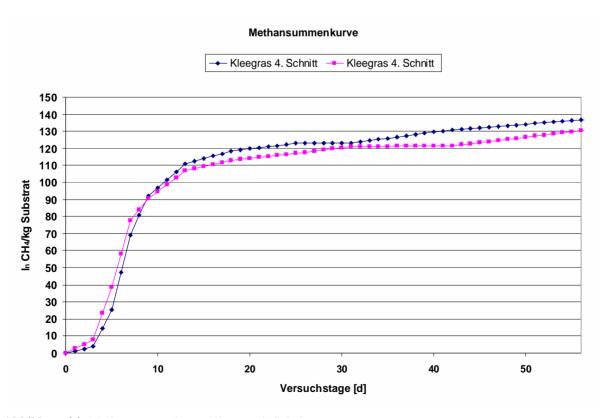


Abbildung 34: Methansummenkurve Kleegras 4. Schnitt

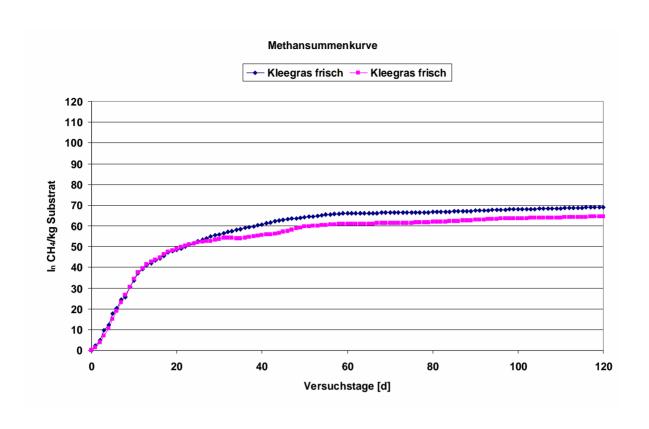


Abbildung 35: Methansummenkurve frisches Kleegras

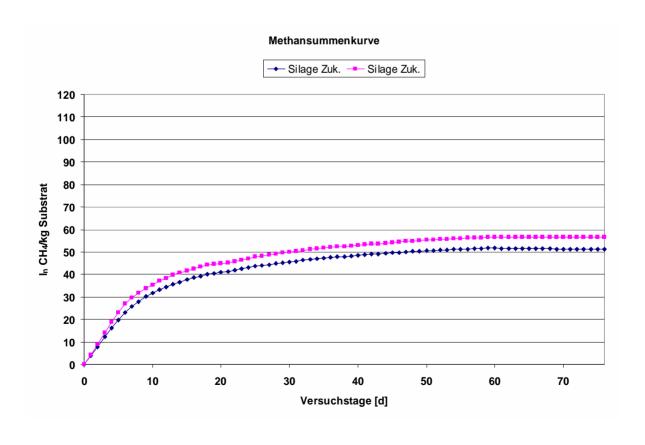


Abbildung 36: Methansummenkurve zugekaufte Grassilage

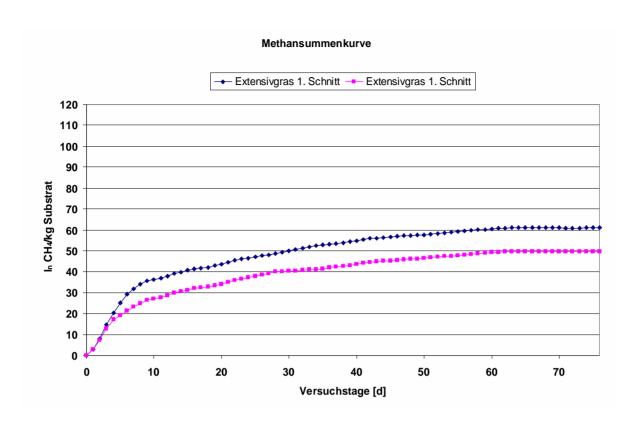


Abbildung 37: Methansummenkurve Extensivgras 1. Schnitt

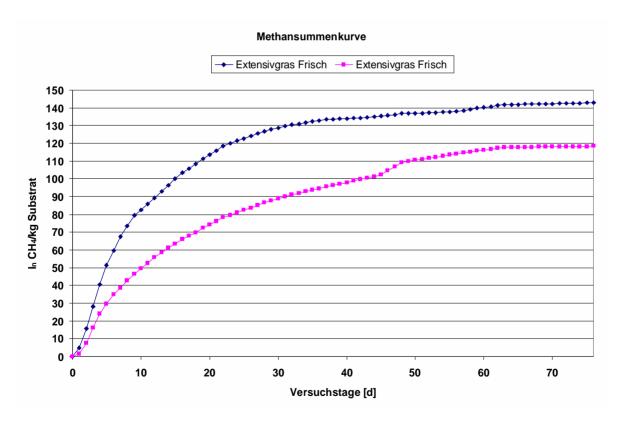


Abbildung 38: Methansummenkurve frisches Extensivgras

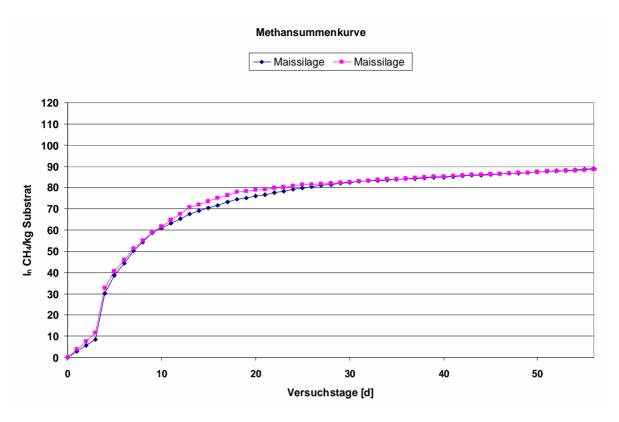


Abbildung 39: Methansummenkurve Maissilage

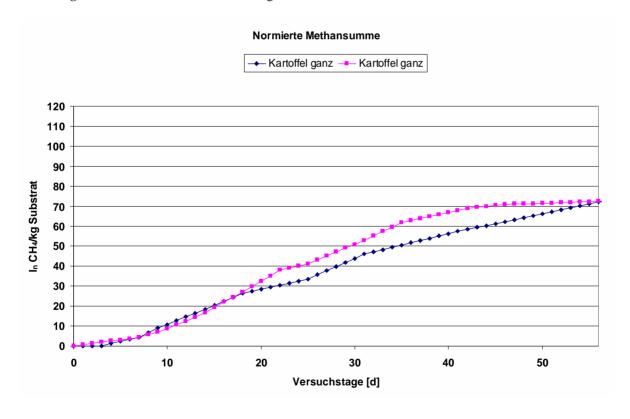


Abbildung 40: Methansummenkurve ganze Kartoffeln

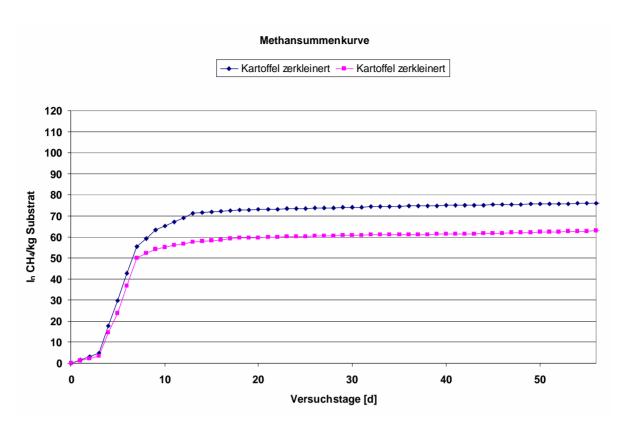


Abbildung 41: Methansummenkurve zerkleinerte Kartoffeln

Vergärung von Kleegras- und Maissilage auf einem Biolandbetrieb



Jens Schröder und Peter Weiland

Institut für Technologie und Biosystemtechnik - Abteilung Technologie - Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)

⊠ Bundesallee 50 - D-38116 Braunschweig - 🕿 +49 531 596-4161 - 🗊 +49 531 596-4199 - 🖃 jens.schroeder@fal.de - www.fal.de

Ziele

- Erprobung von neuartigen nachwachsenden Rohstoffen für den Biogasprozess.
- Erfolgreiche Integration der Anlage in ein lokales Energienutzungskonzept.
- Vermeidung von Ammoniak- und Lachgasemissionen.
- Bereitstellung von Nährstoffen für den Marktfruchtanbau auf den umliegenden landwirtschaftlichen Nutzflächen.



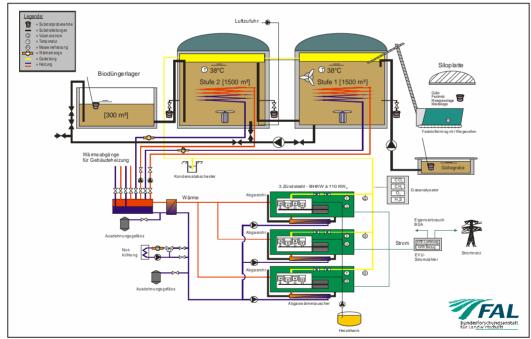
Feststoffbeschickung mit Messeinrichtung

Ergebnisse

- Die Anlage ist seit September 2004 im Volllastbetrieb.
- Die Methanausbeute je Tonne Substrat beträgt 140 m³ bei einer Raumbelastung von 2,1 kg oTR / m³ * d
- Der CH₄-Gehalt im Biogas erreicht substratabhängig 52-54 %.
- Durch biologische Entschwefelung liegt der H₂S-Gehalt im Biogas unter 200 ppm.
- Der Biodünger weist im derzeitigen Betrieb folgende Nährstoffzusammensetzung auf: 4,60 g N /kg, 0,27 g PO₄-P /kg , 4,39 g K /kg.



Zündstrahl - BHKW, Fa. DEUTZ, 110 kW_{el}



Verfahrenstechnisches Fliessbild der zweistufigen mesophilen Biogasanlage

Projektförderung: BMU UM06 - 001186

Abbildung 42: Poster EuroTier 2004 und AGRITECHNICA 2005

Veröffentlichungen

Schröder, J.; Weiland P.

"Vermeidung von Ammoniak- und Lachgasemissionen im ökologischen Landbau durch gemeinsame Vergärung von Kleegras und Wirtschaftsdünger"

1. Zwischenbericht; Braunschweig 2004

Schröder, J.; Weiland P.

"Vergärung von Kleegras- und Maissilage auf einem Biolandbetrieb" Poster; EuroTier 2004

Schröder, J.; Weiland P.

"Vergärung von Kleegras- und Maissilage auf einem Biolandbetrieb" Poster; AGRITECHNICA 2005

Schröder, J.; Weiland P.

"Biogasanlage zur Vergärung von Kleegras- und Maissilage auf einem Biolandbetrieb" Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) (Hrsg.); Jahresbericht 2004; S. 115f.; Braunschweig 2005