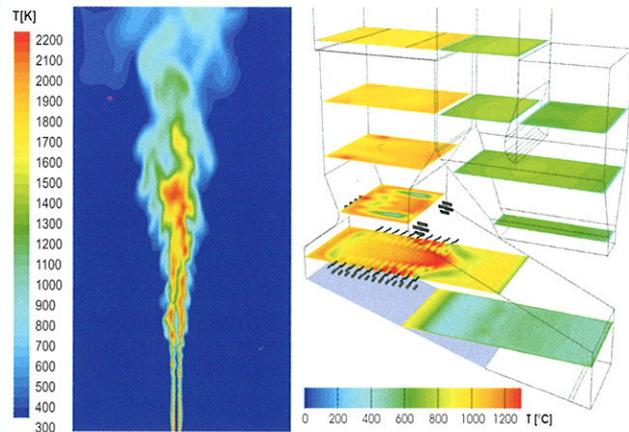
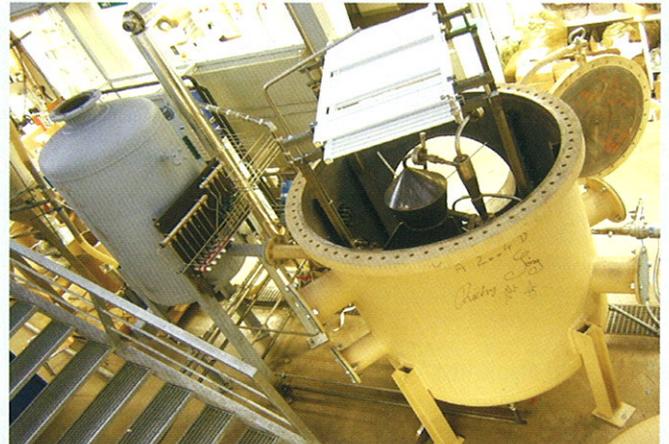


Biomasse-Verbrennung



Biomasse-Vergasung



Modellierung und Simulation



Messtechnik und Analytik



# Detaillierte Stoff- und Energiebilanzierung der Erzeugung und Nutzung von Biogas in einer landwirtschaftlichen Biogasanlage sowie deren verfahrenstechnische Bewertung

Von Jörg Pfeifer und Ingwald Obernberger, Graz

Mit 5 Abbildungen und 14 Tabellen

(Eingelangt am 5. Oktober 2006)



Dipl.-Ing.  
Jörg Pfeifer



Prof. Univ.-Doz. Dipl.-Ing.  
Dr. Ingwald Obernberger

## Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zur Optimierung von Biogasanlagen und zum besseren Verständnis der Prozesse einer derartigen Anlage mit Unterstützung des Zukunftsfonds des Landes Steiermark und des Landesenergievereins Steiermark an einer modernen landwirtschaftlichen Biogasanlage ein umfassendes Anlagenmonitoring samt Bewertung der Anlage durchgeführt. Das Projekt diente dazu wichtige Parameter, die für den optimierten Betrieb von Biogasanlagen relevant sind, zu vermessen und zu erarbeiten. Dazu wurde nach Erfassung aller relevanten betriebstechnischen Daten ein Langzeitmonitoring durchgeführt, welches monatliche Aus- und Bewertungen wesentlicher Betriebsdaten über ein gesamtes Betriebsjahr beinhaltet. Im Rahmen zweier gezielter Testläufe wurden weiters detaillierte Untersuchungen der eingesetzten Substrate, des produzierten Gaststroms, des Gärückstands sowie der Abgase der nachgeschalteten Blockheizkraftwerkanlage mittels modernster Analysen- und Messtechnik durchgeführt. Durch diese Arbeiten wurde die Basis für eine Aus- und Bewertung der Betriebsdaten sowie eine Erfassung und Bewertung der Gasqualität und deren Einflussparameter, welche wesentlich für die Gasreinigung in Abhängigkeit der weiteren Nutzung des Biogases sind, geschaffen. Im Anschluss an die Auswertung dieser Daten erfolgte eine umfassende Stoff- und Energiebilanzierung für einzelne wichtige Komponenten der Anlage wie den Gasmotor und die Fermenter, sowie für die Gesamtanlage.

In der vorliegenden Arbeit sind die durchgeführten Messungen und Analysen, die dazu angewandte Methodik sowie die Ergebnisse bezüglich Charakterisierung und Bewertung der eingesetzten Substrate und des Gärrests, des Biogases, des Motorabgases und des Kondensats dargestellt und beschrieben. Darauf aufbauend wurde eine Schwachstellenanalyse und Bewertung der Produktion von Biogas in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, gefolgt von Schlussfolgerungen und Empfehlungen, durchgeführt.

## Abstract

This work, which was funded by „Zukunftsfonds des Landes Steiermark“ and „Landesenergieverein Steiermark“, focuses on

the optimisation of biogas plants and the improved understanding of biogas production processes based on the detailed monitoring and evaluation of a modern biogas plant. Important parameters for the improved operation of biogas plants were measured and characteristic values defined. The project included a one-year monitoring phase for the acquisition and monthly evaluation of relevant operational data and two detailed test runs, which served to examine the substrate streams, the biogas produced, the digestate and the emissions of the gas engine. These data form the basis for evaluating plant operation, gas quality and the parameters affecting it as well as the gas cleaning technology required for specific biogas applications. Moreover, a comprehensive mass and energy balance was performed for the whole plant and for selected components such as the digesters and the gas engine.

The paper presented gives a comprehensive survey of the measurements and analyses performed, the methods applied as well as the results of the analyses of the substrates used, the digestate, the biogas, the emissions of the gas engine as well as the condensate and the desulphurisation air. It concludes with a technological evaluation of the plant examined, a weak point analysis, a summary of relevant guiding values and a short outline of the conclusions drawn from the project.

## Abkürzungen, chemische Formelzeichen und Indizes (alphabetisch geordnet)

AG	Aschegehalt
BHKW	Blockheizkraftwerk
C	Kohlenstoff
Ca	Kalzium
CCM	Corn-Cob-Mix
Cd	Kadmium
CH <sub>4</sub>	Methan
Cl	Chlor
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
f	feucht
FS	Frischsubstanz
GR	Gärrest
H	Wasserstoff
H <sub>2</sub> O	Wasser
H <sub>2</sub> S	Schwefelwasserstoff
H <sub>o</sub>	Brennwert
H <sub>u</sub>	Heizwert
IC	Ionenchromatographie
ICP-MS	Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma
ICP-OES	Optische Emissionsspektrometrie
φ	Gasfeuchte
K	Kalium
Mg	Magnesium
Mo	Molybdän
MS	Maissilage

MSR	Mess-Steuer-Regel-Technik
MW	Mittelwert
N	Elementarer Stickstoff
N <sub>2</sub>	Stickstoff
Na	Natrium
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
Ni	Nickel
NMKW	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe
NO <sub>x</sub>	Stickoxid
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
P	Phosphor
Pb	Blei
pH	pH-Wert
RL	Rücklauf
S	Schwefel
SG	Schweinegülle
Si	Silizium
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
STABW	Standardabweichung
T	Gastemperatur
TOC	Total organic carbon (gesamter organischer Kohlenstoff)
tr	trocken
TS	Trockensubstanz
VL	Vorlauf
Zn	Zink

### 1. Einleitung

Die Technologie der Biogaserzeugung mit nachgeschalteter gasmotorischer Nutzung stellt in Abhängigkeit der jeweiligen Stromeinspeisetarife in Europa eine interessante und erfolgversprechende Anwendung im Bereich der kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung aus Biomasse für Leistungen im Bereich von 100 bis über 1.000 kW<sub>el</sub> dar. Aufgrund der in den letzten Jahren guten Rahmenbedingungen für die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energieträgern und dem daraus resultierenden Aufschwung bei der Realisierung derartiger Projekte stieg die Leistung der in Österreich genehmigten und als Ökostromanlagen anerkannten Biogasanlagen von 34 MW<sub>el</sub> 2004 im 1. Quartal 2005 auf eine Gesamtleistung von über 71 MW<sub>el</sub> [1]. Auch das verfügbare Potential für die Biogasproduktion in landwirtschaftlichen Anlagen von rund 670 Millionen m<sup>3</sup>/a [2] aus der Nutztierhaltung und etwa 1.800 Millionen m<sup>3</sup>/a [2] aus der Pflanzenproduktion (Heizwert Biogas: 4,8 bis 7,5 kWh/m<sup>3</sup>) zeigt, dass Biogas auch künftig eine große Rolle am Sektor der erneuerbaren Energieträger in Österreich spielen kann. Dabei wird vor allem neben der Verstromung in Gasmotoren auch die Einspeisung in Erdgasnetze und die Nutzung von Biogas als Treibstoff zu beachten sein.

Trotzdem fehlen für die Erzeugung von Biogas und dessen Nutzung nach wie vor detaillierte verfahrenstechnische Bilanzen von Biogasanlagen. Stoff- und Energiestromanalysen sind jedoch eine wichtige Grundlage bei der Planung und Auslegung von Biogasanlagen bzw. der Optimierung von Anlagen zur Erhöhung der Energieeffizienz durch Steigerung der Gasausbeute und des Methangehalts im Rohgas sowie bezüglich der Optimierung der Gasqualität und für Schwachstellenanalysen von Anlagen. Da moderne Biogasanlagen zur Erhöhung der Gasausbeute als Kofermentationsanlagen ausgelegt werden und an die Erbauer und Betreiber hohe Anforderungen, wie ein wirtschaftlicher funktionssicherer Anlagenbetrieb gestellt werden, müssen umfangreiche Informationen sowohl über die Anlage selbst als auch über die eingesetzten Substrate bekannt sein. Zu diesen zählen auch entsprechendes Know-how auf den Gebieten Chemie, Mikrobiologie, Energietechnik, Gastechnik und

vielen mehr. Um etwaige Probleme möglichst früh erkennen und die richtigen Maßnahmen ergreifen zu können, ist eine regelmäßige Überwachung und ein gutes Verständnis der Funktionsweise der Fermentation erforderlich. Weiters müssen für die Nutzung des Biogases die Gasinhaltsstoffe des Biogases genau charakterisiert sein, um eine entsprechende Gasreinigung vorsehen zu können. Die Ergebnisse dieser Arbeit können daher als wichtige Grundlage für eine zukünftig verbesserte Konzeption und den optimierten Betrieb von Biogasanlagen gesehen werden.

Weitere Monitoringprojekte am Sektor Biogas überschneiden sich nicht mit den hier beschriebenen Inhalten, da der Begriff „Monitoring“ sehr unterschiedlich verstanden werden kann. So beschäftigen sich Monitoringprojekte der Programmlinie „Energiesysteme der Zukunft“ wie „Best Biogas Practice“ [3] mit der Bildung eines dauerhaft bestehenden, österreichweiten Biogaszetwerkes bzw. der Entwicklung und Etablierung von „Best Biogas Practice“ Richtlinien und „Gütesiegel Ökogas“ [3] mit der sozioökonomischen Beurteilung von Biogasanlagen, auf deren Basis zur Standardisierung ein Gütesiegel eingeführt werden soll. Weitere Projekte [4,5], beschäftigen sich mit der groben Erfassung von Biogasanlagen und deren Betrieb oder mit alternativen Nutzungsmöglichkeiten wie das Projekt AMONCO [6] mit der Verwendung von Biogas in Brennstoffzellen. Eine derart detaillierte und umfassende Untersuchung wie jene im vorgestellten Bericht, wird in keinem anderen laufenden Projekt durchgeführt.

### 2. Zielsetzung

Um die einleitend angesprochenen Punkte näher zu beleuchten, wurde in einem vom Zukunftsfonds des Landes Steiermark und dem Landesenergieverein Steiermark geförderten Projekt an einer modernen landwirtschaftlichen Biogasanlage ein umfassendes Anlagenmonitoring samt Anlagenbewertung durchgeführt. Dabei wurden wichtige Parameter, die für den optimierten Betrieb von Biogasanlagen relevant sind, vermessen und erarbeitet. Dazu erfolgte nach Erfassung aller relevanten betriebstechnischen Daten ein Langzeitmonitoring, welches monatliche Aus- und Bewertungen wesentlicher Betriebsdaten über ein gesamtes Betriebsjahr beinhaltete. Im Rahmen zweier gezielter Testläufe wurden weiters detaillierte Untersuchungen der eingesetzten Substrate, des produzierten Gasstroms, des Gärückstands sowie der Abgase der nachgeschalteten BHKW-Anlage mittels modernster Analysen- und Messtechnik durchgeführt. Durch diese Arbeiten wurde die Basis für eine Aus- und Bewertung der Betriebsdaten, sowie eine Erfassung und Bewertung der Gasqualität und deren Einflussparameter, welche wesentlich für die Gasreinigung in Abhängigkeit der weiteren Nutzung des Biogases sind, geschaffen. Im Anschluss an die Auswertung dieser Daten erfolgte eine umfassende Stoff- und Energiebilanzierung sowie eine verfahrenstechnische Bewertung der Anlage und die Zusammenstellung technischer Kenn- und Richtwerte. Weiters wurde eine Bewertung der Gasqualität durchgeführt, welche die für die anschließende Nutzung des Biogases erforderliche Gasaufbereitung bzw. Gasreinigung vordefiniert.

Eine wirtschaftliche und ökologische Bewertung sowie eine darauf basierende Schwachstellenanalyse für den optimierten Betrieb und die korrekte Auslegung von Biogasanlagen sind die noch offenen folgenden Schritte im Verlauf des Projekts, die in diesem Beitrag ebenso nicht diskutiert werden, wie die Ergebnisse aus dem zweiten der beiden Testläufe.

Die detaillierten Zielsetzungen des Projekts beinhalten folgende Punkte:

- Umfassendes Betriebsmonitoring für eine ausgewählte Biogasanlage über ein gesamtes Betriebsjahr

Für das Projekt wurde eine moderne landwirtschaftliche Biogasanlage ausgewählt, die für Österreich repräsentative Substrate wie Maissilage und Gülle einsetzt und auch aufgrund ihrer Größe (500 kW<sub>e</sub>) wirtschaftlich zu betreiben ist. Für die ausgewählte Anlage in der Oststeiermark erfolgte ein umfassendes Monitoring über ein gesamtes Betriebsjahr. Dieses inkludierte monatliche Auswertungen der Betriebsdaten und die Bewertung der Anlage (z.B. hinsichtlich Verfügbarkeit und erreichbaren Jahresnutzungsgraden), um relevante Zusammenhänge zwischen Substrat, anderen wichtigen Betriebsparametern und der Gasausbeute aufzuzeigen sowie Schwachstellen zu erkennen und zu bewerten.

- Durchführung von zwei umfassenden Testläufen  
Zusätzlich zum angeführten Langzeitmonitoring und der monatlichen Betriebsdatenerfassung wurden 2 gezielte Testläufe durchgeführt, deren Ergebnisse als Basis für die detaillierte, verfahrenstechnische Bilanzierung und Bewertung der Anlage herangezogen werden sollen. Diese Testläufe, von denen nur die Ergebnisse des ersten Testlaufs in dieser Arbeit beschrieben werden, beinhalteten:
  - Eine umfassende Analyse der Substrate und Gärreste  
Da bisher nur wenig Erkenntnisse über die Zusammensetzung der Substrate und Gärreste vorliegen, schloss die umfassende Analyse die Bestandteile C, H, N, S, Cl, Na, Mg, Si, P, K, Ca, Cr, Ni, Cu, Zn, Mo, Cd, Pb, TS- und Aschegehalt sowie Ho und pH-Wert ein, um eine detaillierte Bilanzierung und Bestimmung der Umsetzungsraten zu ermöglichen.  
Weiters können durch diese Analysen bessere Erkenntnisse über die Möglichkeiten des Einsatzes des Gärrests auf landwirtschaftlichen Nutzflächen hinsichtlich Düngewirkung, Wirkung auf den Boden und Stickstoffverlusten gewonnen werden. Daneben wurden auch die Zusammenhänge zwischen den eingesetzten Substratmischungen, der Biogasausbeute, der daraus resultierenden Stromausbeute und dem elektrischen Wirkungsgrad aufgezeigt.
  - Eine umfassende Analyse des erzeugten Biogases, die neben den Hauptbestandteilen auch hinsichtlich Gasverwertung wichtige Nebenbestandteile beinhaltet  
Besonderes Augenmerk wurde bei der Analyse des Biogases auf den Einfluss der eingesetzten Substrate auf die Gasqualität gelegt, da diese wesentlich für die weitere Nutzung des Biogases bzw. die erforderliche Gasaufbereitung und Gasreinigung ist. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der Testläufe das Biogas neben den Hauptbestandteilen CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O und O<sub>2</sub> auch auf weitere Komponenten wie CO, Siloxane, Hg, und HCl untersucht.
  - Eine Untersuchung der Abgase der nachgeschalteten BHKW-Anlage im Rahmen der Testläufe  
Die Untersuchung sollte den Zusammenhang zwischen Substrat, Rohgas und Abgas aufzeigen, bzw. die entstehenden Emissionen (CO, CO<sub>2</sub>, TOC, HCl, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, Hg) dokumentieren und bewerten.
- Erstellung umfassender Stoff- und Energiebilanzen samt deren Bewertung  
Aus den im Rahmen des Monitorings und der Testläufe erfassten und auf Plausibilität geprüften Daten wurden detaillierte Stoff- und Energiebilanzen für die Anlage erstellt, um daraus die Transferkoeffizienten für Nähr- und Schadstoffe bzw. Gasinhaltsstoffe zu erhalten. Weiters erfolgte eine Bewertung der Anlage hinsichtlich der eingesetzten Konversions- und Gasreinigungstechnologie, der erzielten Umsetzungsraten, Wirkungs- und Nutzungsgrade sowie deren Verfügbarkeit.

- Detaillierte verfahrenstechnische Bewertung  
Es erfolgte eine detaillierte verfahrenstechnische Bewertung (eingesetzte Technologie, Einbindung der Komponenten in die Gesamtanlage, technische Optimierungspotentiale) der untersuchten Anlage auf Basis der Bilanzierungs- und Monitoringergebnisse.

Aufbauend auf den erfolgten Bewertungen wurde auch eine Schwachstellenanalyse für die ausgewählte Biogasanlage durchgeführt.

- Erfassung wichtiger Betriebsparameter und Erarbeitung von Kenn- und Richtwerten für den optimierten Betrieb von Biogasanlagen

Aus den Monitoring- und Bilanzierungsarbeiten wurden weiters wesentliche Einfluss- und Betriebsparameter erarbeitet und bewertet. Diese Kenn- und Richtwerte sollen zukünftig als Basis für die Planung und den optimierten Betrieb von Biogasanlagen und das verbesserte grundlegende Verständnis bezüglich der Funktion derartiger Anlagen dienen.

### 3. Methodik

#### 3.1 Anlagen- und Messstellenbeschreibung

Die Testläufe zur Bestimmung der Basisdaten für die Stoff- und Energiebilanzierung, welche die Analyse der Zusammensetzung von Substrat, Biogas, Gärrest und Abgas beinhalteten, wurden an einer modernen landwirtschaftlichen Biogasanlage in der Oststeiermark mit einer elektrischen Leistung des BHKW von 500 kW durchgeführt. Der überwiegende Einsatz der Substrate Schweinegülle und Maissilage war ein Auswahlkriterium für die Repräsentanz der ausgewählten landwirtschaftlichen Anlage. In dieser werden täglich rund 24 t FS an Maissilage und 15 m<sup>3</sup> Schweinegülle vergärt. Die Maissilage wird dazu auf dem anlageneigenen Fahrsilo gelagert, mittels Radlader in den Mischer eingebracht und dabei gleichzeitig verwogen. Alle zwei Stunden wird dann über eine Schnecke der Fermenter beschickt. Die kostenlose Schweinegülle wird mittels Vakuumpfass bei den Landwirten abgeholt bzw. von diesen angeliefert und in der Vorgrube unter dem Anlagengebäude gespeichert und über die zentrale Pumpstation in den Fermenter gefördert. Der Gärrest gelangt über einen Überlauf in das Gärrestlager, von wo aus er dann an die Landwirte abgegeben wird.

Die Biogasanlage (Schema siehe Abbildung 1) besteht aus folgenden Hauptkomponenten:

- Fahrsilo zur Lagerung der erforderlichen Maissilage bzw. möglicher anderer Substrate wie Roggen, Gras oder CCM.
- Güllegrube zur Speicherung der mittels Güllefässern angelieferten Schweinegülle.
- Substratmischer mit Schneckenförderer für die Maissilage (die Förderung der Schweinegülle erfolgt über die zentrale Pumpstation aus der Vorgrube).
- Fermenter und Nachfermenter mit Heizung und Rührwerken zur Regelung des Gärprozesses, Nachfermenter mit Gashaube zur Speicherung des Biogases.
- Zentrale Pumpstation zur Verteilung von Gülle und Gärrest sowie zur Spülung der Leitungen.
- Kondensatschacht zur Entwässerung des Biogases vor dem Motor-BHKW.
- Endlager für den Gärrest.
- Motor-BHKW samt Katalysator zur Erzeugung von Strom und Wärme.
- Wärmezentrale zur Auskopplung der BHKW-Abwärme (nicht dargestellt).

Die in der Anlage erzeugte Wärme wird teilweise zur Beheizung der Fermenter und des Betriebsgebäudes sowie der angrenzenden Stallungen genutzt. Der Rest der vorhandenen Abwärme wird über einen Tischkühler an die Umgebung abgegeben.

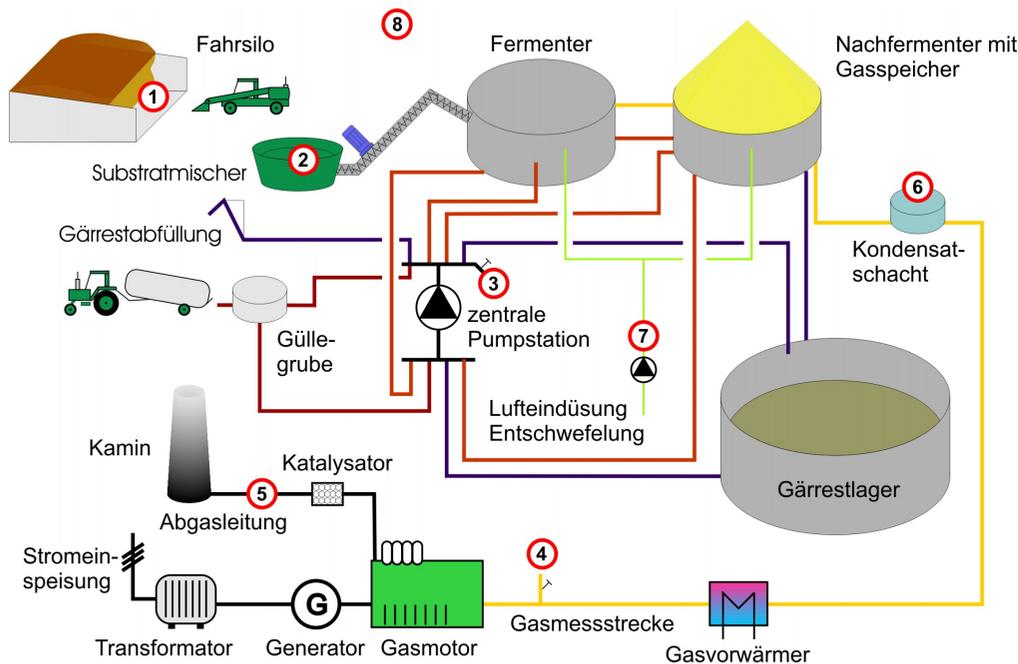


Abb.1. Schematische Darstellung der untersuchten landwirtschaftlichen Biogasanlage sowie Position der Mess- und Probenahmestellen (1-8)

### 3.2 Langzeitmonitoring

Im Rahmen des Langzeitmonitorings über ein Jahr wurden relevante Betriebsdaten der Biogasanlage wie Gasmenge, Methan-gehalt, H<sub>2</sub>S-Gehalt, Gastemperatur, BHKW-Wirkleistung und Eigenbedarf, VL-Temperatur der Fermenterheizung, VL- und RL-Temperatur des Fernwärmestrangs, Temperaturen der einzelnen Behälter, Außentemperatur, Betriebsstunden des BHKW und die Lagerstände bzw. Einsatzmengen an Substrat vom Prozessvisualisierungssystem aufgezeichnet, gespeichert und anschließend aus- und bewertet.

### 3.3 Durchführung von speziellen Testläufen mit umfassenden Messungen und Analysen

Um den Anlagenbetrieb im Detail untersuchen zu können und wichtige Daten für die Bilanzierung und Bewertung der Anlage zu sammeln, wurde im April der erste und im Juli 2005 der zweite dreitägige Testlauf mit umfangreichen Messungen, Probenahmen und Analysen durchgeführt. In dieser Arbeit werden jedoch nur die Ergebnisse des ersten Testlaufs betrachtet, da die Daten des zweiten Messlaufs derzeit noch nicht vollständig ausgewertet vorliegen.

#### 3.3.2 Probenahmen, Mess- und Analysenprogramm

Wie einleitend bereits erwähnt, wurden von allen relevanten ein-(Substrate) und austretenden Strömen (Gärrest, Biogas, Abgas, Kondensat) Proben gezogen und nachfolgend analysiert.

Im Detail wurden dabei folgende Messungen und Probenahmen an den in Abbildung 1 gekennzeichneten und in Klammer angeführten Messstellen durchgeführt:

- Beprobung der eingesetzten Substrate Maissilage (ca. 24 t/Tag) und Schweinegülle (ca. 15 m<sup>3</sup>/Tag) sowie des Gärrests. Zur Absicherung der Ergebnisse wurden Proben aus dem Fahrsilo (1) gezogen und mit den Ergebnissen der Proben aus dem Mischer (2) verglichen. An der zentralen Pumpstation (3) wurden die Proben der Schweinegülle und des Gärrests gezogen. Die Maissilageproben wurden jeweils nach dem Mischvorgang aus dem Mischer entnommen, um nicht von den rotierenden Mischerschaufeln verletzt zu werden. Zur Probenahme der Schweinegülle wurde diese einige Minuten

in der Vorgrube im Kreis gepumpt, um eine repräsentative Probe zu erhalten. Gleiches gilt für den Gärrest, wobei das große Endlagervolumen zu berücksichtigen ist (siehe Kapitel 4.1).

- Alle Proben wurden hinsichtlich C, H, N, S, Cl, Na, Mg, Si, P, K, Ca, Cr, Ni, Cu, Zn, Mo, Cd, Pb, TS- und Aschegehalt sowie H<sub>2</sub>O und pH-Wert analysiert.
- Bei der Gasmessstrecke (4) vor dem Gasmotor wurde eine kontinuierliche Bestimmung der Biogazusammensetzung bezüglich CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, Temperatur und Feuchte durchgeführt bzw. diskontinuierlich der Gehalt an HCl, und Hg bestimmt.
- In der Abgasleitung (5) wurde am Austritt aus dem Gasmotor nach dem Katalysator die Abgaszusammensetzung bezüglich O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und TOC-Gehalt (kontinuierlich), als auch der Gehalt an Hg, HCl und SO<sub>x</sub> (diskontinuierlich) bestimmt.
- Die diskontinuierliche Messung der eingeblasenen Entschwefelungsluftmenge erfolgte bei der Messstelle Entschwefelungsluftpumpe (7).
- Die anfallende Kondensatmenge wurde im Kondensatschacht (6) nach dem Gaslager in regelmäßigen Abständen gemessen und die Kondensatzusammensetzung hinsichtlich Cl, S, und NH<sub>4</sub>-N untersucht, sowie deren pH-Wert und die Temperatur bestimmt.
- Auf dem Gelände der Anlage (8) wurde zusätzlich noch die Außentemperatur gemessen.

#### 3.3.3 Probenaufbereitung

Für die biogenen Substrate Maissilage und Schweinegülle sowie den Gärrest wurde die Probenvorbereitung wie für herkömmliche Biomasse durchgeführt. Lediglich die Probenaufbereitung gestaltete sich aufgrund der hohen Wassergehalte hinsichtlich Trocknung aufwändiger (speziell bei Schweinegülle und Gärrest) als bei herkömmlichen Biomassebrennstoffproben (z.B. Hackschnitzel). Die Verfahrensschritte unterteilten sich wie folgt in:

- Trocknung der Probe
- Mahlung der getrockneten Proben in einer Ultrazentrifugalmühle (<200 µm) aus Titan

Für die Schweinegülle und den Gärrest müsste aufgrund der Zusammensetzung, insbesondere aufgrund des Ammoniumgehalts, eine Auftrennung der Analysenproben vor der Trocknung der Probe erfolgen. Da sich teilweise der Stickstoff in Form von Ammoniak während der Trocknung verflüchtigt, wird das Messergebnis verfälscht. Um den Gesamtstickstoffgehalt korrekt zu erfassen, müsste vor der Trocknung eine Trennung sowie Reduktion, Ansäuerung und Destillation erfolgen. Aufgrund der dafür erforderlichen teuren Geräte wird eine derartige Analyse nur sehr selten durchgeführt, da Gülle mit einem sehr geringen Trockensubstanzgehalt als Substrat eine eher untergeordnete Rolle bei der Gasproduktion spielt und hauptsächlich aus anderen Gründen (Nährstoffgehalt, Einsatzstoffs substitut, TS-Gehaltsregulierung) in der Biogasanlage eingesetzt wird. Aus Kostengründen wurde auch im vorliegenden Projekt auf diese sehr aufwendige Untersuchung verzichtet und stattdessen der Ammoniumstickstoff, der nur wenig vom Gesamtstickstoffgehalt abweicht, sowie die auf diesen Wert umgerechneten Gehalte von C, H, O, und AG, zur Bilanzierung herangezogen. Für die Kondensatwasserproben war keine Aufbereitung notwendig.

### 3.3.4 Probenaufschluss und Vermessung der festen und flüssigen Proben

Die Analyse der gezogenen Substrat- und Gärrestproben umfasste die folgenden Punkte:

- Bestimmung des C-, H-, N-Gehalts mittels Verbrennung mit nachgeschalteter gaschromatographischer Trennung; Elementaranalysator (Erba EA 1108); Doppelbestimmung (in Anlehnung an ÖNORM G 1071, G 1072, G 1073).
- Bestimmung des Ammoniumstickstoffs (NH<sub>4</sub>-N) durch direkte Destillation. Die Bestimmung in der Maissilage und im Gärrest erfolgte mittels wässriger Extraktion. Die maßanalytische Bestimmung des Ammoniumstickstoffs erfolgte nach Destillation in Anlehnung an DIN 38406 E5-2.
- Bestimmung von S, Ca, Cr, Cu, K, Mg, Na, Ni, P, Si, Zn durch zweistufigen mikrowellenunterstützten Säuredruckaufschluss (HNO<sub>3</sub> / HF / H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) in der Teflonbombe. Die Bestimmung erfolgte mittels ICP-OES.
- Bestimmung von Cl, F durch Aufschluss mit Verbrennung in der Sauerstoffbombe. Als Pufferlösung wurde 10 ml NaOH (0,05 molar) verwendet. Die Messung erfolgte über IC.
- Bestimmung von Hg, Mo, Cd, Pb durch zweistufigen mikrowellenunterstützten Säuredruckaufschluss (HNO<sub>3</sub> / HF / H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) in der Teflonbombe. Die Bestimmung erfolgte mittels ICP-MS.
- Bestimmung des Wassergehaltes in Anlehnung an ÖNORM G 1074 (Bestimmung des Gewichtsverlustes bei Trocknung bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz).
- Bestimmung des Aschegehaltes in Anlehnung an SS 187171 (Veraschung bei 550 °C).
- Bestimmung des Brennwertes. Durch Verbrennung im Bombenkalorimeter mit Sauerstoff (40 bar) ergibt sich der Brennwert durch Temperaturerhöhung des Kalorimeters.
- Die pH-Wert-Bestimmung erfolgte mittels pH-Wert-Messgerät für Schweinegülle und Gärrest in der flüssigen Phase, für die Maissilage in Anlehnung an EN 12176 (Charakterisierung von Schlamm).
- Der Sauerstoff-Gehalt wurde aus den Gehalten von C, H, N und dem Aschegehalt AG rechnerisch ermittelt (Summe = 100%).

Die Bestimmung von Cl, S, und NH<sub>4</sub>-N im Kondensatwasser erfolgte entsprechend den oben angeführten Methoden.

### 3.3.5 Vermessung der gasförmigen Ströme Biogas und Abgas

#### 3.3.5.1 Biogasanalytik

Im Biogas wurden die relevanten Haupt- und Spurenkomponenten kontinuierlich über mehrere Stunden gemessen, über Nacht wurde aus Sicherheitsgründen (Explosionsgefahr) auf eine unbeaufsichtigte Messung verzichtet. Da in der Literatur Werte oft ohne Bezug angegeben werden, ist bei Vergleichen immer darauf zu achten, ob es sich um trockenes oder feuchtes Gas bzw. Norm- oder Betriebskubikmeter handelt. In Abbildung 2 ist die Messstelle 4 für die Entnahme des Biogases abgebildet.



Abb.2. Ansicht Gasmessstrecke Biogasmessung – Messstelle 4

#### 3.3.5.2 Messung der Haupt- und Spurenkomponenten

Die Messung der Hauptkomponenten (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) bzw. Spurenstoffe im Biogas (O<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>S und NH<sub>3</sub>) erfolgte mit einem eigens für diese Messungen angeschafften Biogasmessgerät, dem Bio-/Deponiegasmonitor GA2000+. Dieses tragbare Gerät ist speziell an die Anforderungen bei der Messung von Biogas angepasst und verfügt daher auch über eine für explosionsfähige Atmosphären erforderliche ATEX-Zulassung. Es können bis zu 6 Komponenten gleichzeitig gemessen werden. Die eingesetzte Infrarot-Technik verhindert mittels selektiver Wellenlängen eine gegenseitige Beeinflussung von CH<sub>4</sub> und CO<sub>2</sub>. Die Komponenten O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CO und NH<sub>3</sub> werden elektrochemisch gemessen. Das Gerät verfügt über einen internen Datenspeicher, der über eine serielle RS-232-Schnittstelle zur Datenübertragung ausgelesen werden kann. Die Genauigkeit der Messung ist abhängig vom Anteil der jeweiligen Komponente im Gas und beträgt für CH<sub>4</sub> und CO<sub>2</sub> zwischen ± 0,5% und ± 3%, für O<sub>2</sub> ± 1% und für CO, H<sub>2</sub>S und NH<sub>3</sub> ± 10%.

Die Komponenten Hg und HCl wurden mittels nasschemischer Analyse diskontinuierlich bestimmt. Die Probenahme erfolgte bei Messstelle 4 (siehe Abbildung 1). Die Bestimmung der HCl-Konzentrationen erfolgte mit Vorlagen von H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Die Ionen wurden mittels ICP-MS oder ICP-OES (je nach Konzentration) bestimmt. Für Hg wurde eine Vorlage von H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> und KMnO<sub>3</sub> eingesetzt. Die Bestimmung erfolgte mittels ICP-MS.

Weiters wurden 3 Biogasproben mittels Gaschromatograph über Wärmeleitfähigkeitsdetektoren in Anlehnung an VDI 3865 auf Siloxane untersucht.

3.3.5.3 Feuchte- und Temperaturmessungen

Im Rahmen des Testlaufs wurde auch kontinuierlich die Feuchte und die Temperatur des Biogases gemessen (bei Messstelle 4, siehe Abbildung 2). Die ausgewerteten Daten der Messungen sind im Abschnitt „Ergebnisse“ dargestellt.

3.3.5.4 Rauchgasanalytik

Die Messung der Abgaszusammensetzung erfolgte am Austritt aus dem Gasmotor nach dem Katalysator, der für die Einhaltung der CO- und NMKW-Emissionen erforderlich ist. Die kontinuierliche Rauchgasmessung umfasste dabei eine Bestimmung des Sauerstoff-, Kohlenmonoxid- und Kohlendioxidgehalts (Rosemount NGA 2000, paramagnetische O<sub>2</sub>- und Infrarotadsorptionsmessung für CO und CO<sub>2</sub>, Fehlergrenze ≤ 1%), die Bestimmung des TOC mittels Flammenionisationsdetektor (Bernath Atomic GmbH & CO KG, Fehlergrenze ≤ 1%) sowie die Bestimmung des Stickoxidanteils NO im Rauchgas über Chemilumineszenz-Reaktionen (ECO Physics CLD 700 EL ht, Fehlergrenze ≤ 0,5 %).

Die Bestimmung der HCl-, SO<sub>x</sub>-, sowie der Hg-Konzentrationen erfolgte diskontinuierlich an Messstelle 5. Zur Messung der Konzentrationen wurde eine Teilgasstromabsaugung mit Gaswäsche durch drei in Serie geschaltete Waschflaschen, gleich wie für Biogas, durchgeführt. Für HCl und SO<sub>x</sub> wurde eine Vorlage von H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, für Hg eine Vorlage von H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> und KMnO<sub>3</sub> eingesetzt. Die Bestimmung erfolgte mittels ICP-MS.

3.3.5.5 Kondensatmessung

Die diskontinuierliche Erfassung der Kondensatmengen erfolgte an Messstelle 6 (Kondensatschacht). Dabei wurde die anfallende Kondensatmenge in regelmäßigen Abständen erfasst und eine Stichprobe hinsichtlich SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NH<sub>4</sub>-N, pH-Wert und Temperatur entsprechend den beschriebenen Methoden analysiert.

3.3.5.6 Luftendüsung Entschwefelung

Die zur Entschwefelung des Biogases eingeblasene Luftmenge wurde mittels Volumenstrommessung etwa alle 60 Minuten bei Messstelle 7 (Luftendüsung Entschwefelung) abgelesen.

4. Ergebnisse und Diskussionen

4.1 Ergebnisse der Messungen und Analysen der eingesetzten Substrate und des Gärrests

Während des ersten Testlaufs wurde eine Mischung aus Maissilage und Schweinegülle als Substrat eingesetzt. Die Maissilage ist aufgrund der feinen Silierung (Korngröße < 2cm) relativ homogen in ihrer Zusammensetzung. Bei der Schweinegülle traten größere Inhomogenitäten auf, welche auf die tierische Herkunft und die große Anzahl an Einflussfaktoren, wie zum Beispiel Art, Alter und Haltung der Tiere, zurückzuführen ist. Bezüglich der Gärrestproben ist anzumerken, dass aufgrund des großen Volumens des Endlagers auch hier mit erhöhten Inhomogenitäten durch Entmischungsvorgänge (die schwerere Trockensubstanz sinkt auf den Boden des Gärrestlagers ab) zu rechnen ist. Eine Übersicht der Analyseergebnisse in Form der Mittelwerte und Standardabweichungen für Schweinegülle, Maissilage und Gärrest ist in Tabelle 1 dargestellt.

Aus Kostengründen wurde, wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, auf eine aufwendige und teure Analyse des Gesamtstickstoff für Gärrest und Schweinegülle verzichtet und stattdessen nur der Ammoniumstickstoffgehalt bestimmt, da die Abweichungen zum Gesamtstickstoffgehalt (Verhältnis Gesamt-N/NH<sub>4</sub>-N = 100/70 [12]) aufgrund des geringen Trockensubstanzgehalts für die Biogaserzeugung nur von geringer Relevanz sind. Für den Brennwert der Schweinegülle wurde nur eine Analyse durchgeführt, wodurch kein Mittelwert bzw. keine Standardabweichung angegeben ist.

Beim Vergleich der Ergebnisse mit den wenigen verfügbaren Literaturquellen [7,8,9] fällt auf, dass die im Rahmen des Projekts ermittelten Daten für Schweinegülle und Maissilage im Wesentlichen gut mit den Literaturwerten übereinstimmen. Es muss aber, wie bereits ausgeführt wurde, berücksichtigt werden, dass speziell bei Schweinegülle viele Einflüsse wie Haltung und Art bzw. Größe der Tiere die Zusammensetzung stark beeinflussen und direkte Vergleiche daher nur bedingt möglich sind. Auch bei Mais sind aufgrund der Sorte, des Anbaus, der Erntetechnik sowie des Erntezeitpunkts starke Abweichungen

Bezeichnung		SG	SG	MS	MS	GR	GR
		MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW
Probenanzahl		7		7		4	
C	[%TS]	34,77	2,51	45,93	0,21	38,62	6,33
H	[%TS]	4,42	0,35	6,30	0,08	4,76	0,58
N	[%TS]	10,36	4,19	1,10	0,08	5,17	1,42
O	[%TS]	17,04	3,44	42,53	0,40	23,85	3,03
S	[mg/kgTS]	7.290	3.041	846	121	6.763	1.178
Cl	[mg/kgTS]	22.075	2.000	1.575	172	15.343	1.579
Na	[mg/kgTS]	16.344	3.824	40	13	4.798	225
Mg	[mg/kgTS]	15.921	3.573	1.071	31	9.454	335
Si	[mg/kgTS]	11.663	1.890	6.190	184	29.275	5.881
P	[mg/kgTS]	24.391	3.371	1.979	125	17.239	710
K	[mg/kgTS]	68.517	20.444	7.769	194	54.159	3.215
Ca	[mg/kgTS]	38.927	4.744	1.842	24	19.671	417
Cr	[mg/kgTS]	14	2	1	1	8	1
Ni	[mg/kgTS]	20	2	1	0	10	2
Cu	[mg/kgTS]	342	97	3	0	118	30
Zn	[mg/kgTS]	1.502	633	21	2	542	30
Mo	[mg/kgTS]	12	1	0	0	4	2
Cd	[mg/kgTS]	0,47	0,07	0,06	0,01	0,37	0,05
Pb	[mg/kgTS]	4	1	0	0	3	1
TS	[%FS]	2,10	0,63	33,27	0,53	4,00	0,97
AG	[%TS]	33,41	2,83	4,14	0,29	27,60	7,96
Ho <sub>gem</sub>	[MJ/kgTS]	16,50		18,02	0,25	15,67	1,49
pH	-	7,14	0,13	4,22	0,66	7,72	0,11

**Tabelle 1:** Übersicht der Analyseergebnisse für Schweinegülle (SG), Maissilage (MS) und Gärrest (GR)

möglich (z.B. erhöhter Aschegehalt durch zu tiefen Ernteschnitt und Eintrag von Erde).

Da für Gärrest bislang keine derart umfassenden Analysen durchgeführt wurden, konnten die Daten nur mit Grenzwerten in Richtlinien und der Düngemittelverordnung [10,11] hinsichtlich Stickstoff und Schwermetallen verglichen werden. Dabei ist anzumerken, dass die Grenzwerte zur Ausbringung von Stickstoff bei der Ausbringung über die Regulierung der Mengen an Gärrest angepasst werden, die Grenzwerte für Schwermetallkonzentrationen werden für alle in den Richtlinien erfassten Schwermetalle (Pb, Cd, Cr, Ni, Hg) unterschritten.

Der Gärrest stellt aufgrund seiner Nährstoffgehalte einen wertvollen Dünger für die Landwirtschaft dar. Durch seine Rückführung auf landwirtschaftliche Nutzflächen kann ein Teil an Kunstdünger ersetzt, die Umwelt geschont, Kosten eingespart sowie der Kreislauf der Nährstoffe weitgehend geschlossen werden.

#### 4.2 Ergebnisse der Messungen und Analysen des Biogases

Die Mittelwerte der Messdaten aus der kontinuierlichen Messung des Biogases sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Ergebnisse der diskontinuierlichen Messung hinsichtlich HCl und Hg sind in Tabelle 3 zu finden. Der Heizwert des Biogases wurde rechnerisch ermittelt. Alle hinsichtlich der Siloxane L2, L3, D3, D4, D5 (kettenförmige und zyklische Methylsiloxane) untersuchten Proben waren negativ, das heißt es wurden keine Siloxane gefunden.

**Tabelle 2:**  
Zusammenstellung der aufgezeichneten Biogasedaten (Mittelwert über 1 Messtag)

	CH <sub>4</sub> Vol% <sub>f</sub>	CO <sub>2</sub> Vol% <sub>f</sub>	O <sub>2</sub> Vol% <sub>f</sub>	N <sub>2</sub> Vol% <sub>f</sub>	H <sub>2</sub> O Vol% <sub>f</sub>	CO vppm <sub>f</sub>	NH <sub>3</sub> vppm <sub>f</sub>	H <sub>2</sub> S vppm <sub>f</sub>	T °C	H <sub>u</sub> MJ/Nm <sup>3</sup>
MW	49,24	47,04	0,04	1,44	2,18	383,67	63,50	167,84	31,49	17,52
STABW	0,65	0,62	0,06	0,02	0,20	17,57	30,24	15,32	1,05	0,25
STABW %	1,30	1,29	134,20	1,40	8,96	4,52	47,35	9,01	3,33	1,41

**Tabelle 3:**  
Ergebnisse der Biogaseinzelanalysen bezüglich HCl und Hg

		Probe 1	Probe 2	Probe 3	MW	STABW
HCl	[mg/Nm <sup>3</sup> tr. BG]	1,63	1,07	2,37	1,69	0,65
Hg	[mg/Nm <sup>3</sup> tr. BG]	<0.00078	<0.00078	<0.00078	-	-

Erläuterungen: Hg ... unter der Nachweisgrenze

Ein Vergleich der Messdaten mit Literaturwerten [12,13,14] zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der in Tabelle 2 dargestellten Daten mit den üblichen Konzentrationsbereichangaben für landwirtschaftliche Biogasanlagen. Auffällig ist jedoch der relativ geringe Methangehalt, der durch die eingesetzte Substratmischung bedingt ist und verbessert werden könnte [14], indem zum Beispiel alternative Substrate (z.B. Sonnenblumen, CCM) eingesetzt werden. Dabei spielen die entsprechenden Substratkosten eine wichtige Rolle, die letztendlich für oder gegen ein Substrat sprechen. Direkt vom Methangehalt beeinflusst wird auch der Heizwert des Biogases, da dieser fast zur Gänze jenem des im Gas enthaltenen Methans entspricht. Positiv fällt der niedrige Schwefelwasserstoffgehalt auf, der auf eine gut funktionierende Entschwefelung zurückzuführen ist, was sich auch im Sauerstoffgehalt widerspiegelt. Erfahrungsgemäß sind bei der Nutzung in Gasmotoren H<sub>2</sub>S-Werte zwischen 200 und 300 ppm bzw. Sauerstoffgehalte von <2% im Biogas nach Entschwefelung üblich [14]. Daraus lässt sich ableiten, dass bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen biologische Entschwefelungsanlagen mit Einblasung von Luft für die Reinigung des Biogases meist ausreichend sind. Ob andere Gründe wie ein verbesserter Gärprozess in Abwesenheit von Luft oder eine höhere Reinigungsleistung für eine andere Entschwefe-

lungstechnologie sprechen, ist von Fall zu Fall zu untersuchen. Für den reibungslosen Betrieb des Gasmotors ist auch unbedingt eine Entfeuchtung des Biogases vorzusehen, die im betrachteten Fall sehr gut funktioniert, wie der geringe Wasseranteil von ~2% zeigt. Übliche Werte landwirtschaftlicher Biogasanlagen liegen zwischen 2 und 7% [14].

Für den Vergleich der Messdaten von HCl und CO stehen keine konkreten Literaturwerte zur Verfügung, es wird jedoch in der Literatur darauf verwiesen, dass diese als Spurenkomponenten im Biogas enthalten sind [12,13,14].

Die zur Entschwefelung eingeblasene Luft wird unregelmäßig eingeblasen und ändert sich daher nicht. Die Luftmenge, welche konstant eingeblasen wird, hängt neben der Größe der Anlage und somit der Biogasmenge auch von der Schwefeleinbringung (über die Substrate) in den Fermenter ab und sollte 3-5% der Biogasmenge betragen, um eine entsprechende Entschwefelung zu gewährleisten [14]. Bei der untersuchten Anlage ist ein Luftanteil von nur rund 1% der Biogasmenge ausreichend.

#### 4.3 Ergebnisse der Messungen und Analysen des Motorabgases

In Tabelle 4 ist die gemittelte Abgaszusammensetzung übersichtlich zusammengefasst dargestellt. Der Grenzwert für NO<sub>x</sub> wurde während des Testlaufs aufgrund von Verschmutzungen der Zylinder überschritten. Im Rahmen eines Services erfolgte eine Nachjustierung der Verbrennungsluftregelung und eine Reinigung, wonach die Grenzwerte wieder eingehalten wurden.

Bei den Messwerten für TOC (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) ist anzumerken, dass der Grenzwert sich nur auf die Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMKW) bezieht. Bei der Messung von TOC wird aber auch Methan mit vermessen, was den TOC-Gehalt über dem Grenzwert erklärt. Der Methananteil kommt durch unvollständige Verbrennung sowie Spaltverluste bzw. Undichtheiten zustande. Aus diesem Grund ist dem Motor ein Katalysator nachgeschaltet, der die Einhaltung des CO-, sowie des NMKW-Grenzwerts gewährleisten soll.

Die Ergebnisse der HCl-, SO<sub>x</sub> und Hg-Analysen der diskontinuierlich gezogenen Abgasproben sind in Tabelle 5 dargestellt. Die Werte für Hg im Abgas lagen, wie auch im Biogas, unter der Nachweisgrenze.

Die Emissionen aus der Verbrennung im Motor sind aufgrund der Biogaszusammensetzung hinsichtlich HCl und SO<sub>x</sub> gering (vgl. Tabelle 5). In der Technischen Grundlage für die Beurteilung von Emissionen aus Stationärmotoren [15] sind daher keine Grenzwerte für HCl und SO<sub>x</sub> angeführt. Auch das Merkblatt „Biogasanlagen im land- und forstwirtschaftlichen Bereich“ gibt für Anlagen mit einer Brennstoffwärmeleistung größer 250 kW nur einen SO<sub>x</sub>-Grenzwert von 150 mg/Nm<sup>3</sup> tr. RG bei 5% O<sub>2</sub> Restsauerstoffgehalt an.

Komponente	Einheit	Messwert MW	Messwert STABW	Grenzwert
N <sub>2</sub>	Vol% <sub>tr</sub>	68,82	-	-
CO <sub>2</sub>	Vol% <sub>tr</sub>	11,71	0,10	-
H <sub>2</sub> O	Vol% <sub>tr</sub>	13,54	-	-
O <sub>2</sub>	Vol% <sub>tr</sub>	5,88	0,04	-
CO	mg/Nm <sup>3</sup> <sub>tr</sub> (5% O <sub>2</sub> )	533,20	5,85	650
NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup> <sub>tr</sub> (5% O <sub>2</sub> )	518,09	25,22	400
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	mg/Nm <sup>3</sup> <sub>tr</sub> (5% O <sub>2</sub> )	257,08	1,52	150 <sup>1)</sup>

Erläuterungen: H<sub>2</sub>O und N<sub>2</sub> aus Bilanz berechnet, NO<sub>x</sub> als NO<sub>2</sub>; <sup>1)</sup> Grenzwert bezogen auf NMKW; Quelle Grenzwerte: [15]

**Tabelle 4:**

Übersicht der durchschnittlichen Abgaszusammensetzung im Vergleich mit den Grenzwerten für Stationärmotoren

		Probe 1	Probe 2	Probe 3	MW	STABW
HCl	[mg/Nm <sup>3</sup> tr. RG 5% O <sub>2</sub> ]	1,00	1,55	2,88	1,81	0,97
SO <sub>x</sub>	[mg/Nm <sup>3</sup> tr. RG 5% O <sub>2</sub> ]	32,89	45,64	41,30	39,94	6,48
Hg	[mg/Nm <sup>3</sup> tr. RG 5% O <sub>2</sub> ]	<0.00078	<0.00078	<0.00078		

Erläuterungen: SO<sub>x</sub> als SO<sub>2</sub>; Hg ... unter der Nachweisgrenze; die Teilstromabsaugung erfolgte je Probe über einen Zeitraum von 1 h

**Tabelle 5:**

Übersicht der Emissionen an HCl, SO<sub>x</sub> und Hg im Abgas nach dem Gasmotor-BHKW (Messstelle nach Katalysator)

Die Technologie der Verbrennung von Gas in einem Motor ist Stand der Technik und ist auch an das Brenngas Biogas entsprechend angepasst worden. Die während der Messung aufgefallenen Überschreitungen einzelner Grenzwerte stellen nicht den regulären Betriebsfall dar (NO<sub>x</sub>) bzw. sind auf die angewandte Messmethodik zurückzuführen (TOC).

**4.4 Ergebnisse der Messungen und Analysen des anfallenden Kondensats**

Bezüglich der anfallenden Kondensatmenge ist festzuhalten, dass diese in Abhängigkeit der Biogastemperatur unterschiedlich hoch ausfällt. Da sich der Gasspeicher mit seiner Umgebung erwärmt, kann entsprechend mehr oder weniger Wasser im Biogas aufgenommen werden. In der in der Erde geführten Gasleitung, welche das gesamte Jahr über nur geringen Temperaturschwankungen unterliegt, kann dieses dann als Kondensat abgeschieden werden. Die gemessene Schwankungsbreite liegt für den betrachteten Zeitraum zwischen 1,2 und 3,0 Liter Kondensatanfall pro Stunde, wodurch die Feuchte im Biogas unter 50 % bei ~32°C Gastemperatur gesenkt werden kann. Als Richtwerte werden von BHKW-Herstellern eine Gasfeuchte kleiner 80 % und Gastemperaturen < 40°C gefordert, um Kondensation und somit Korrosion zu vermeiden.

**Tabelle 6:** Analysenergebnisse einer Kondensatwasserprobe bezüglich S, Cl und NH<sub>4</sub>-N

Probe	Einheit	Wert
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	[mg/l]	1,68
Cl	[mg/l]	<0,2
NH <sub>4</sub> -N	[mg/l]	1,474
pH-Wert	-	7,32
Temperatur	°C	12,50

Erläuterungen: Cl ... Chlorgehalt [unter der Nachweisgrenze]

Verglichen mit Erfahrungswerten [16] kann festgestellt werden, dass der pH-Wert im Neutralbereich liegt und die untersuchten Kondensate hinsichtlich S, Cl und NH<sub>4</sub>-N gering belastet sind. Das Kondensat wird entweder in den Fermenter oder das Endlager rückgeführt.

**4.5 Ergebnisse der durchgeführten Stoff- und Energiebilanzierung**

Mit den während dem Testlauf samt begleitender Betriebsdatenerfassung ermittelten Daten wurde eine umfangreiche und detaillierte Bilanzierung der Biogasanlage durchgeführt. Beginnend bei der Einbringung der Substrate, über die Vergärung, die

Entschwefelung in den Gärbehältern, die Entfeuchtung im Kondensatschacht bis hin zur Gasnutzung im Gasmotor-BHKW zur Erzeugung von Strom und Wärme und die dabei entstehenden Emissionen wurde die Anlage mittels Stoff- und Energiebilanzen nachgerechnet. Dazu wurden sowohl um Einzelkomponenten wie Fermenter und BHKW, als auch um die Gesamtanlage Bilanzen berechnet, um so die Ergebnisse bestmöglich auf Plausibilität zu prüfen und die Basis für eine umfassende Anlagenbewertung zu schaffen.

Zur Absicherung der Berechnungen wurde als erster Schritt die Bilanz um das BHKW gerechnet, da die dafür erforderlichen Messdaten aus der Biogas- und der Abgasmessung verglichen mit den übrigen Massenströmen der Anlage am Belastbarsten sind. Nach Erstellung der Elementbilanzen für C, H, N, S und O für das BHKW wurden die Ergebnisse anhand einer Verbrennungsrechnung und durch Vergleich mit Herstellerangaben (z.B. Abgasvolumenstrom, Wirkungsgrade, usw.) auf Plausibilität geprüft und deren Richtigkeit bestätigt. Im nächsten Schritt wurde die Bilanzierung auf die Fermenter und schließlich auf die Gesamtanlage ausgeweitet. Auch bei diesen Berechnungen erfolgte nach Erstellung der Elementbilanzen stets eine Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse durch Vergleich mit Anlagenaufzeichnungen, Richt- und Literaturwerten bzw. Herstellerangaben. Für alle Bilanzen in den Tabellen 7 bis 13 wurde zusätzlich eine Kontrollsumme für die ein- und austretenden Ströme angeführt um diese miteinander vergleichen zu können. Um die Bilanzkreisläufe vollständig schließen zu können (aufgrund der Messtoleranzen der eingesetzten Messgeräte kommt es zu Abweichungen zwischen der Berechnung und den Messwerten) wurden ausgehend von den Messwerten und unter Berücksichtigung relevanter Rahmenbedingungen (z.B. Summe aus CH<sub>4</sub>-Gehalt und CO<sub>2</sub>-Gehalt ≤ 100%) die Zusammensetzungen des Biogases und des Gärrests sowie die Massenströme des Abgases, des Gärrests und der Verbrennungsluft geringfügig angepasst und anschließend mit den Messwerten verglichen. Der Vergleich der angeglichenen Berechnungswerte mit den Messdaten zeigte nur geringe Abweichungen, welche alle innerhalb der Messtoleranzen der eingesetzten Messgeräte lagen und bestätigte somit die Bilanzierung.

Die Ergebnisse der Bilanzierung sind zusammenfassend in den folgenden Tabellen und Abbildungen dargestellt. Beginnend mit der Massenbilanz für die Fermenter (Tabelle 7), das Gasmotor-BHKW (Tabelle 8) und die Gesamtanlage (Tabelle 9, Abbildung 3), über die entsprechenden Energiebilanzen (siehe Tabelle 10, Tabelle 11, Tabelle 12 und Abbildung 4) sind abschließend noch

die Stoffbilanzen für die wichtigsten Elemente C, H, N und S angeführt (Tabelle 13, Abbildung 5). Da sich die Bilanzen auf die im Prozess umgesetzte Trockensubstanz beziehen, muss für die Reaktion der Biogasbildung ein Reaktionswasserstrom auf der Eingangsseite berücksichtigt werden. Dieser wurde nach der Formel von Buswell [17] berechnet und bezogen auf den Biomasseabbau von ~82% (siehe Tabelle 14) in der Bilanz als Reaktionswasser ausgewiesen. Damit wird jenes Wasser berücksichtigt, welches für die Bildung von CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>S im Fermenter laut Reaktionsgleichung erforderlich ist.

Das angeführte Einsatzgemisch besteht aus Maissilage, Schweinegülle und Oberflächenwasser bzw. Gärsäften, die gesammelt und in die Anlage eingebracht werden.

**Tabelle 7:** Massenbilanz um die Fermenter

Fermenter + Nachfermenter	Eintritt [kgTS/h]	Austritt [kgTS/h]
Einsatzgemisch (Substrate)	348,3	
Reaktionswasser	50,8	
Luft-Entschwefelung	5,9	
Biogas		327,0
Gärrest		78,1
Kontrollsumme	405,0	405,0

**Tabelle 8:** Massenbilanz um das Gasmotor-BHKW

BHKW	Eintritt [kg <sub>f</sub> /h]	Austritt [kg <sub>f</sub> /h]
Biogas	331,3	
Verbrennungsluft	2.347,4	
Abgas		2.678,7
Kontrollsumme	2.678,7	2.678,7

Die Massenbilanz um den Motor basiert auf dem gemessenen Biogasvolumenstrom, der über die Luftüberschusszahl λ bestimmten Verbrennungsluftmenge sowie der Biogas-, der Abgas- und der Luftzusammensetzung.

In der Bilanz um die Gesamtanlage ist zusätzlich noch das bei der Gastrocknung anfallende Kondensat berücksichtigt.

Aus dem Stoffflussdiagramm um die Gesamtanlage kann die im Verhältnis zur Biogasmenge große Menge an Gärrest (TS-Gehalt: 4-7 Gew%) abgelesen werden, die hauptsächlich aus Wasser besteht. Die über die Substrate zugeführte große Wassermenge ist erforderlich, um das Gemisch im Fermenter noch

rühren zu können und muss daher auch wieder mit dem Gärrest ausgebracht werden.

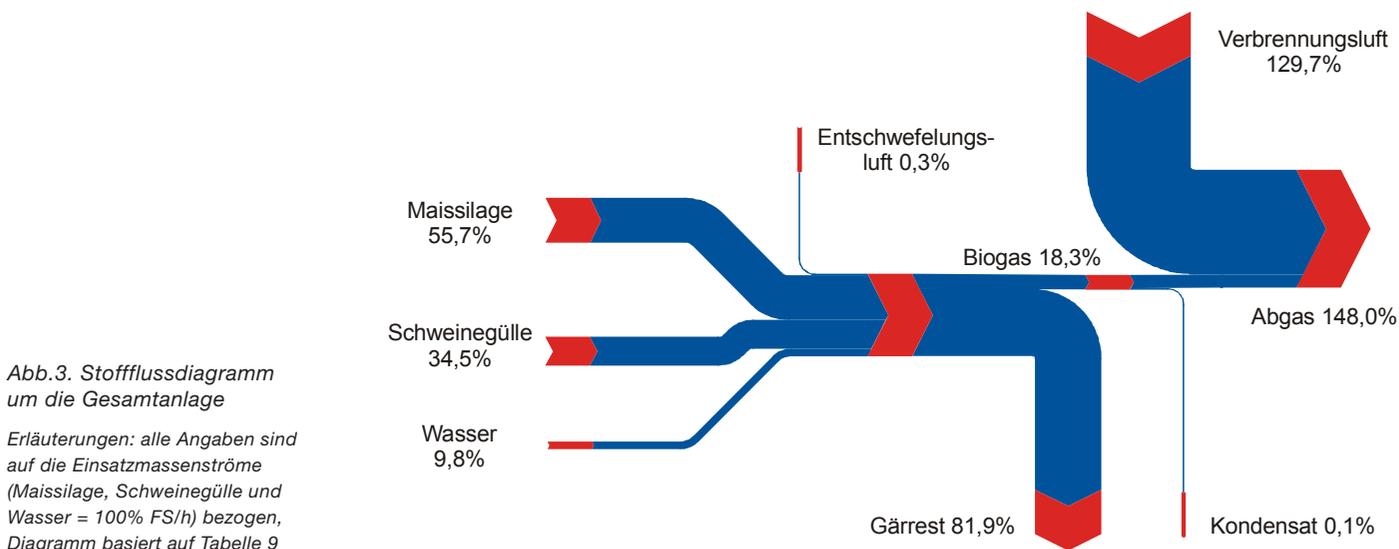
Um die NO<sub>x</sub>-Emissionen des BHKW möglichst gering zu halten und eine vollständige Verbrennung zu gewährleisten, ist ein Luftüberschuss von λ > 1,45 notwendig, der in vergleichsweise großen Verbrennungsluftmengen resultiert (siehe Abbildung 3). Der Kondensatstrom stellt zwar verglichen mit den anderen Strömen der Anlage nur einen sehr geringen Strom dar, sollte aber zur Vermeidung von Korrosion und hinsichtlich eines problemlosen Betriebs des BHKW bei der Planung und dem Betrieb von Biogasanlagen nicht vernachlässigt werden.

**Tabelle 9:** Massenbilanz um die Gesamtanlage

Gesamtanlage	Eintritt [kg FS/h]	Austritt [kg FS/h]
Einsatzgemisch (Substrate)	1.809,7	
Luft-Entschwefelung	6,0	
Kondensat aus der Gastrocknung		2,2
Verbrennungsluft	2.347,4	
Gärrest		1.482,2
Abgas		2.678,7
Kontrollsumme	4.163,1	4.163,1

Die Erstellung der Energiebilanzen, die parallel zur Stoffbilanzierung durchgeführt wurde, erfolgte ebenso wie für die Stoffbilanzen schrittweise. Beginnend mit dem BHKW wurde die Bilanzierung basierend auf den Messdaten bzw. Daten aus der Stoffbilanz durchgeführt und mittels Richt- und Literaturwerten bzw. Herstellerangaben auf Plausibilität geprüft, um die Ergebnisse zu verifizieren. Auf dieselbe Weise wurden anschließend auch die Fermenter und die Gesamtanlage bilanziert. Wie für die Stoffbilanzen wurde für die Energiebilanzen eine Kontrollsumme für die ein- und austretenden Ströme berechnet.

Bei der Berechnung der Energiebilanz für die Gesamtanlage wurde der Energieinhalt der Substrate (bezogen auf H<sub>2</sub>), der Entschwefelungs- und der Verbrennungsluft auf der Eingangsseite und die produzierte elektrische und thermische Energie, der Energieinhalt des Abgases und des Gärrests sowie sonstige auftretende Verluste auf der Ausgangsseite berücksichtigt. Als Basis für die Berechnung der Enthalpien wurde der Nullpunkt mit 273,15 K und 1.013 mbar festgelegt. Die Eintrittstemperatur der Substrate wurde als Jahresdurchschnitt mit 17,4°C angenommen, die Abgastemperatur mit 180°C. Den Berechnungen liegen weiters atmosphärische Bedingungen, eine



**Abb.3.** Stoffflussdiagramm um die Gesamtanlage

Erläuterungen: alle Angaben sind auf die Einsatzmassenströme (Maissilage, Schweinegülle und Wasser = 100% FS/h) bezogen, Diagramm basiert auf Tabelle 9

## Detaillierte Stoff- und Energiebilanzierung der Erzeugung und Nutzung von Biogas

Außentemperatur (Jahresmittel 2005, Bezirk Radkersburg) von 10,4°C, ein Luftüberschuss von  $\lambda = 1,47$ , ein elektrischer Wirkungsgrad des BHKW von ~39%, ein thermischer Wirkungsgrad von ~44% (jeweils bezogen auf  $H_{u, \text{Biogas}}$ ) sowie 8.380 Jahresvolllaststunden zugrunde.

**Tabelle 10:** Energiebilanz um die Fermenter

Fermenter + Nachfermenter	Eintritt [kW]	Austritt [kW]
Einsatzgemisch (bezogen auf $H_u$ )	1.640,63	
Biogas (bezogen auf $H_u$ )		1.296,77
Entschwefelungsluft	0,02	
Gärrest		372,52
Wandverluste		18,51
Heizung	47,15	
Kontrollsumme	1.687,81	1.687,81

**Tabelle 11:** Energiebilanz um das Gasmotor-BHKW

BHKW	Eintritt [kW]	Austritt [kW]
Biogas (bezogen auf $H_u$ )	1.296,06	
Verbrennungsluft	6,88	
produzierte thermische Energie		578,50
elektrische Nutzenergie		500,00
Verluste-BHKW		71,02
Abgas		153,42
Kontrollsumme	1.302,94	1.302,94

**Tabelle 12:** Energiebilanz um die Gesamtanlage

Gesamtanlage	Eintritt [kW]	Austritt [kW]
Einsatzgemisch (bezogen auf $H_u$ )	1.640,63	
Verbrennungsluft	6,88	
Entschwefelungsluft	0,02	
elektrische Nutzenergie <sup>1)</sup>		472,05
thermisch verfügbare Energie <sup>2)</sup> (theoretisches Potential)		531,35
Anlagenverluste <sup>3)</sup>		27,95
Gärrest		372,52
Wandverluste		18,51
Abgas ( $T_{\text{Abgas}} = 180^\circ\text{C}$ )		153,42
Verluste BHKW		71,02
Verluste Gastrocknung		0,71
Kontrollsumme	1.647,53	1.647,53

Erläuterungen: <sup>1)</sup> Nettoeinspeisung... Nutzenergie nach Abzug des elektrischen Eigenbedarfs; <sup>2)</sup> nach Abzug des thermischen Eigenbedarfs; <sup>3)</sup> Anlagenverluste beinhalten die Wärmeverluste durch Rührwerke, Fördereinrichtungen, Ventilatoren, Gebläse und MSR-Technik

Für die Berechnung der erforderlichen Heizleistung wurde der durchschnittliche Verbrauch der untersuchten Anlage für Fermenterheizung, sowie die Versorgung des Betriebsgebäudes und der angrenzenden Landwirtschaft über ein Jahr herangezogen. Die Wandverluste wurden mit der jeweiligen mittleren Monatsaußentemperatur, der wirksamen Außenfläche der Behälter, den Temperaturen von 38 und 35°C für Fermenter und Nachgärbehälter sowie einem für Biogasanlagen üblichem k-Wert von 0,35 W/m<sup>2</sup>K berechnet, der sich über die Isolierschichtdicke der Fermenter ermitteln lässt.

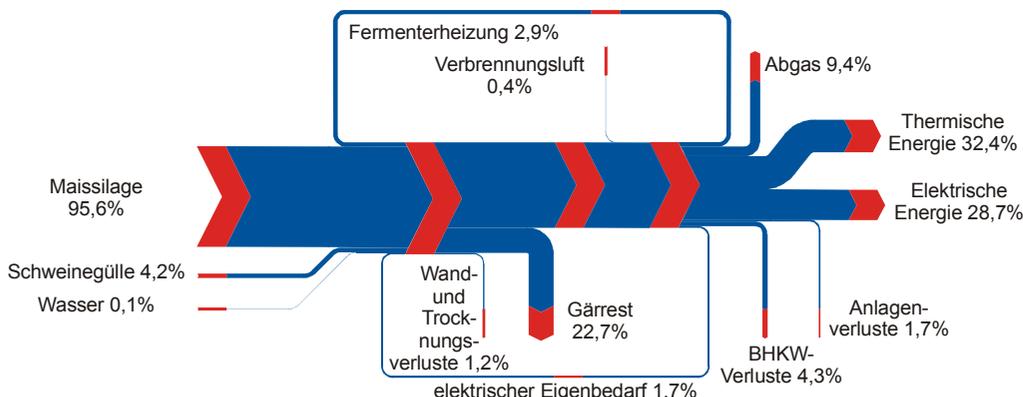
Die Differenz der Werte für Biogas aus Tabelle 10 und Tabelle 11 stellt den Energieinhalt der bei der dem BHKW vorgelagerten Gastrocknung abgeführten Wassermenge dar. Der Punkt Verluste-BHKW umfasst jene thermische Energie des BHKW (z.B. Strahlungswärme, Kühlwärme), die nicht mehr genutzt werden kann.

Im Energieflussdiagramm fällt der im Gärrest verbleibende Energieinhalt auf. Trotz des guten Abbaugrades der organischen Substanz von über 80% verbleibt ein organischer Anteil im Gärrest, der aber aufgrund seiner faserigen Struktur für Bakterien nur mehr schwer abbaubar ist. Um diese Energie besser ausnutzen zu können wäre eine noch feinere Zerkleinerung der Substrate erforderlich. Eine Temperaturerhöhung im Fermenter oder eine Erhöhung der Verweilzeit würden diesbezüglich keine wesentlichen Verbesserungen bringen.

Aus dem Energieflussdiagramm ist weiters zu entnehmen, dass ein wesentlicher Teil der im Substrat enthaltenen Energie (mehr als 30%) als Nutzwärme zur Verfügung steht, welche aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen auch so gut als möglich verwertet werden sollte.

Um die entsprechenden Jahresnutzungsgrade der untersuchten Anlage bestimmen zu können, wurde den Berechnungen die Substratmischung des Monats April 2005, in dem der Testlauf stattfand, für das ganze Jahr zugrunde gelegt, da in diesem Monat ausschließlich die Hauptsubstrate Maissilage und Schweinegülle eingesetzt wurden. Zusätzlich werden in der Anlage zeitweise Substrate wie Roggen (4% der FS/a), CCM (6% der FS/a) und Gras (nach Anfall) statt Maissilage eingesetzt, diese wurden aber im Rahmen des Projekts nicht untersucht und deshalb auch nicht berücksichtigt. Der Fehler aufgrund dieser Annahme ist als gering einzuschätzen, da die ersetzten Mengen gering und die Substratzusammensetzungen (vor allem bei CCM) ähnlich sind.

Zur Bestimmung des elektrischen Jahresnutzungsgrads wurde die nach Abzug des Eigenbedarfs nutzbare elektrische Energiemenge der zugeführten Energiemenge der Substrate (bezogen auf  $H_u$ ) gegenübergestellt und so ein Wert von rund 28 % erhalten. Der erreichte elektrische Jahresnutzungsgrad stellt einen sehr guten Wert dar. Weitere Verbesserungen sind für zukünftige Anlagen nur möglich, wenn der Motorwirkungsgrad weiter gesteigert



**Abb. 4.** Energieflussdiagramm der Gesamtanlage

Erläuterungen: alle Angaben sind auf  $H_u$ , Einsatz und Enthalpie des Einsatzes (Maissilage, Schweinegülle und Wasser = 100%) bei 0 °C und 1013 mbar bezogen; Diagramm basiert auf Tabelle 12; Anlagenverluste beinhalten die Wärmeverluste durch Rührwerke, Fördereinrichtungen, Ventilatoren, Gebläse und MSR-Technik

gert werden kann bzw. eine Verstromung der Abwärme möglich wird.

Da die für die Beheizung des Betriebsgebäudes bzw. der Höfe samt Stallungen benötigte Wärmemenge an der untersuchten Biogasanlage nicht aufgezeichnet wird (die beheizten Gebäude sind im Besitz der Betreiber der Anlage), musste die ausgekoppelte Wärmemenge in Absprache mit den Betreibern aus den vor der Errichtung der Biogasanlage zur Beheizung benötigten Wärmemengen berechnet bzw. abgeschätzt werden. Bei der Berechnung der Wärmenutzung der Anlage wurde weiters der für die Fermenterbeheizung benötigte Wärmebedarf (thermischer Eigenbedarf: 8,7% der produzierten thermischen Energie) nicht berücksichtigt, da es sich um einen internen Wärmestrom der Anlage handelt. Somit ergibt sich ein Wärmebedarf von durchschnittlich 553 MWh/a, aus dem sich ein thermischer Jahresnutzungsgrad der Biogasanlage von rund 4 % errechnet. Daraus ergibt sich für die Anlage ein Gesamtjahresnutzungsgrad von nur ~32 %. Würde die gesamte anfallende Wärme des BHKW genutzt werden, könnte dieser auf 62 % verbessert werden. Aus diesem Grund sollte unbedingt ein entsprechendes Wärmenutzungskonzept erarbeitet werden, um die Effizienz der Anlage zukünftig zu erhöhen. Dieser Punkt ist auch bezüglich der Standortwahl und der Konzeption neuer Biogasanlagen sehr wichtig.

Im Vergleich zu den berechneten Jahresnutzungsgraden der Anlage ergaben sich für den durchgeführten Testlauf (Nennlastbetrieb der Anlage) ein thermischer Anlagenwirkungsgrad von 4,1%, ein elektrischer Anlagenwirkungsgrad von 29,7% sowie ein Gesamtanlagenwirkungsgrad von 33,8%. Im Unterschied zum Wirkungsgrad, der sich nur auf einen Betriebspunkt bezieht, wird der Nutzungsgrad über einen längeren Zeitraum ermittelt und beinhaltet somit auch zusätzlich Verluste durch Stillstandszeiten, Teillastbetrieb und Ausfälle.

Aus den Daten des Langzeitmonitorings konnte für die Anlage eine Verfügbarkeit des Gasmotor-BHKW von rund 97% ermittelt

werden. Dabei wurden ca. 8.380 Jahresvolllaststunden erreicht. Als Richtwert sollten aus wirtschaftlichen Gründen unbedingt über 7.900 Volllaststunden pro Jahr angestrebt werden. Dazu bieten BHKW-Hersteller Wartungsverträge für ihre Aggregate an, die eine bestimmte Verfügbarkeit (z.B. 95%) garantieren. Die durchschnittliche elektrische Nettoleistung (abzüglich elektrischem Eigenstrombedarf) die ins Netz eingespeist werden konnte, betrug im untersuchten Jahr rund 450 kW. Der elektrische Eigenbedarf (z.B. für Pumpen, Rührwerke, usw.) liegt mit  $\varnothing$  5,6% der produzierten Leistung im in der Literatur angegebenen Bereich von 3-9% [14].

Aus den Elementbilanzen können die in der Biogasanlage erreichten Umsätze (Anteile des jeweiligen Elements im Biogas bezogen auf die im Substrat enthaltene Elementmenge) abgelesen werden. Diese liegen für Kohlenstoff bei rund 83%, für Wasserstoff bei ca. 84% (wenn das Reaktionswasser mitberücksichtigt wird), für Stickstoff bei etwa 1% und für Schwefel bei rund 14%. Für die Stickstoffbilanz wurde der Stickstoff der Entschwefelungsluft nicht berücksichtigt, da er für den Umsatz aus den Substraten nicht relevant ist. Der Schwefel im Biogas liegt vorwiegend als  $H_2S$ , der Stickstoff im Gärrest hauptsächlich als  $NH_4-N$  vor. Relevante Elemente mit Düngewirkung stellen vor allem Stickstoff, Phosphor, Magnesium und Calcium dar. Diese verbleiben fast zur Gänze im Gärrest, der auf die Felder rückgeführt wird, wodurch der Mineralienkreislauf der Natur weitgehend geschlossen werden kann.

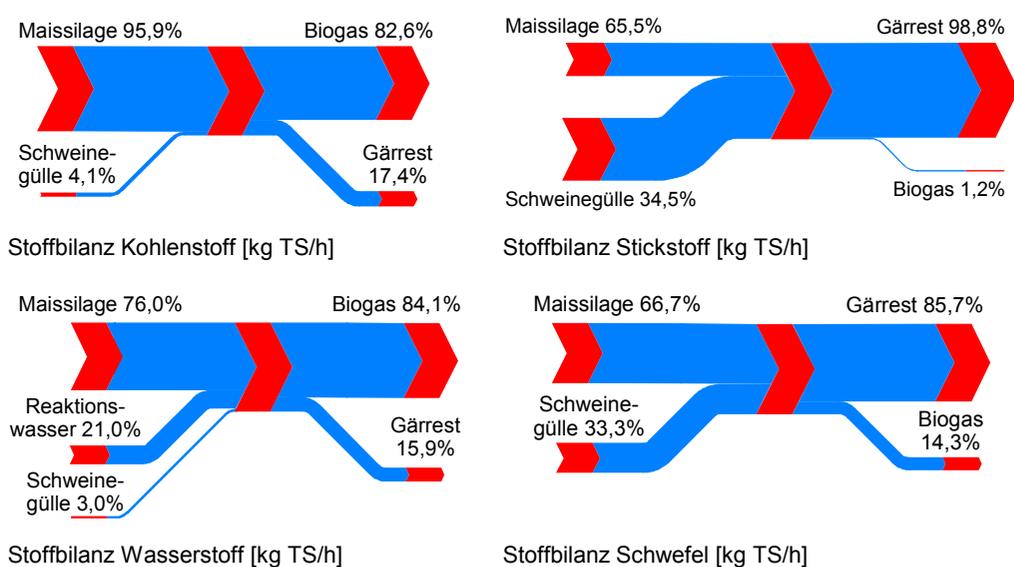
Der Abbau der organischen Trockensubstanz beträgt rund 82% (vgl. Tabelle 14). Hinsichtlich der durch die Anlage durchgesetzten Wassermenge kann festgehalten werden, dass nur rund 3,9% der eintretenden Wassermenge (Reaktionswasser und Feuchte) ins Biogas übergehen, der Rest wird mit dem Gärrest wieder ausgeschleust.

In Abbildung 5 ist für die Elemente C, H, N und S die Stoffbilanz grafisch dargestellt.

**Tabelle 13:**  
Stoffbilanzen um die Fermenter für die Elemente C, H, N und S

Erläuterungen: alle Ströme in kg TS/h

	C		H		N		S	
	Ein	Aus	Ein	Aus	Ein	Aus	Ein	Aus
Schweinegülle	6,51		0,83		1,94		0,14	
Maissilage	153,37		21,04		3,69		0,28	
Reaktionswasser			5,82					
Gärrest		27,86		4,40		5,56		0,36
Biogas		132,02		23,29		0,07		0,06
Kontrollsumme	159,88	159,88	27,69	27,69	5,63	5,63	0,42	0,42



**Abb.5. Stoffflussdiagramme für die Elemente C, H, N, S**

Erläuterungen: alle Diagramme beziehen sich auf Trockensubstanz [kg TS/h], Reaktionswasser berechnet nach Buswell [17]; Diagramme basieren auf Tabelle 13

### 5. Kenngrößen und Richtwerte

Im Rahmen der Arbeit wurden zum Vergleich von Biogasanlagen Kennwerte basierend auf den Aus- und Bewertungen des Testlaufs sowie des Langzeitmonitorings, auf Erfahrungswerten sowie auf Basis einer umfassenden verfahrenstechnischen Bewertung ausgearbeitet und zusammengestellt, die die Bewertung des Betriebs einer Anlage vereinfachen und effizienter gestalten sollen. Die in Tabelle 14 dargestellten Kenngrößen charakterisieren die untersuchte Anlage und wurden mit den ebenfalls in Tabelle 14 enthaltenen Richtwerten für Biogasanlagen, welche unter bestimmten Rahmenbedingungen gültig sind, verglichen, um eine Bewertung der Anlage durchführen zu können.

Da die untersuchten Kenngrößen stark von der Anlagengröße und der Anlagentechnologie bzw. von den eingesetzten Substraten abhängig sind, ist eine eindeutige Zuordnung von allgemeinen Richtwerten nur bedingt möglich. Deshalb ist vor dem Vergleich unbedingt auf die jeweiligen Rahmenbedingungen zu achten, um eine korrekte Abschätzung durchführen zu können. In Tabelle 14 wird in der Spalte Bemerkung darauf hingewiesen, welchen Einflüssen die Daten unterliegen.

Die untersuchte Anlage liegt bei allen dargestellten Kennwerten nahe dem Optimum. Ausnahmen dabei stellen der erreichte Methangehalt und der thermische Jahresnutzungsgrad dar. Eine Bewertung und Diskussion der Ergebnisse erfolgt im nächsten Abschnitt.

### 6. Schwachstellenanalyse und verfahrenstechnische Bewertung

Im Rahmen der Arbeit wurde anhand der angeführten Kennwerte (siehe Tabelle 14) eine Schwachstellenanalyse durchgeführt, die Optimierungspotentiale und Verbesserungsmöglichkeiten aufzeigen soll. Dabei wurden die in den folgenden Abschnitten behandelten Punkte als besonders wichtig bezüglich deren Beachtung bei der Planung von Neuanlagen, bzw. hinsichtlich des Betriebs von Biogasanlagen generell empfunden.

#### 6.1 Methanausbeute

Ein wichtiger Punkt bei der Planung von Biogasanlagen ist die bei der Auslegung für das Substrat angenommene Gasausbeute. Um diese nicht zu überschätzen, wodurch die Gasmenge für die volle Leistung des Gasmotors zu gering wäre und die Einnahmen der Anlage reduziert werden würden, sollte auf Erfahrungswerte oder Gärversuche zurückgegriffen werden. Die untersuchte Anlage ist diesbezüglich gut abgestimmt worden, bietet aber noch Optimierungspotential hinsichtlich des Methangehalts im Biogas. Dieses könnte durch verbesserte Substratmischungen ausgenutzt werden, wobei jedoch immer die für landwirtschaftliche Anlagen geltenden Richtlinien hinsichtlich Substrateinsatz und natürlich auch die Wirtschaftlichkeit zu berücksichtigen sind, wie auch der nachfolgende Abschnitt erläutert.

#### 6.2 Kohlenstoff- und oTS-Abbau, pH-Wert, Fermentertemperaturen, C/N-Verhältnis

Der Abbau des oTS-Gehalts und speziell der Umwandlungsgrad des Kohlenstoffs hängen von vielen Faktoren ab. Unter anderem spielt das eingesetzte Substrat hinsichtlich Zusammensetzung und Korngröße eine wichtige Rolle. Andere Einflussgrößen sind etwa der pH-Wert und diverse Säurekonzentrationen (Essigsäure, Buttersäure, Propionsäure, Valeriansäure), der Stickstoffgehalt sowie die Raumbelastung und die Temperatur des Fermenters. Für einstufige mesophile Systeme, wie sie in landwirtschaftlichen Anlagen üblich sind, sollte ein

pH-Wert von 6-8, sowie eine Temperatur in den Fermentern von 38-40°C eingehalten werden. Im Fall der untersuchten Anlage wurden ein guter Umwandlungsgrad des Kohlenstoffs von über 83% und ein Abbaugrad der organischen Trockensubstanz von ~ 82% erreicht. Eine regelmäßige Kontrolle der angeführten Parameter ist für einen stabilen Vergärungsprozess zu empfehlen. Weiters ist für einen stabilen Prozessablauf das C/N-Verhältnis des Einsatzstroms zu berücksichtigen. Abhängig ob ein ein- oder mehrstufiges Verfahren verwendet wird, sollte das C/N-Verhältnis nicht zu hoch sein, um den Kohlenstoff möglichst vollständig umsetzen zu können, aber auch nicht zu niedrig, da Stickstoffüberschuss zur Bildung von Ammoniak führt, der das Bakterienwachstum hemmt. Für ein einstufiges System, wie das untersuchte, sollte ein C/N-Verhältnis zwischen 10 und 30 eingehalten werden (Messwert 36,5), welches durch Mischung von Substraten entsprechend eingestellt werden sollte.

#### 6.3 Raumbelastung, hydraulische Verweilzeit

Zwischen der Raumbelastung und der hydraulischen Verweilzeit besteht ein enger Zusammenhang, da dem Fermenter mit steigender Raumbelastung mehr Substrat zugeführt wird und somit die Verweilzeit verringert wird. Je höher die Raumbelastung umso weniger Zeit bleibt den Bakterien das Substrat abzubauen und es werden mehr Bakterien aus dem Fermenter ausgetragen, wodurch der Abbaugrad sinkt. Die Raumbelastung bzw. die hydraulische Verweilzeit bestimmen daher in großem Ausmaß, wie gut die eingesetzten Substrate vergoren werden können. Wird die Verweilzeit zu kurz gewählt, wird mit dem Gärrest viel organische Substanz ungenutzt ausgetragen. Eine zu hohe Verweilzeit resultiert in erhöhten Investitionskosten, da die Behältergröße steigt.

Die korrekte Auslegung ist stark von den eingesetzten Substraten und dem Temperaturniveau der Anlage abhängig. Für landwirtschaftliche Anlagen im mesophilen Betrieb sollte die Verweilzeit zwischen 50 und 90 Tagen und die Raumbelastung für den Fermenter 2-3 bzw. für die Gesamtanlage (Fermenter und Nachfermenter) 3-8 (oTS/d)/m<sup>3</sup> betragen. Im vorliegenden Fall werden eine hydraulische Verweilzeit von rund 82 Tagen sowie Raumbelastungen von 2,29 bzw. 4,58 kg (oTS/d)/m<sup>3</sup> erreicht.

#### 6.4 Fermenterheizung und -kühlung

Neben einer vernünftigen Abwärmenutzung sollte auch, speziell bei Biogasanlagen die mit Maissilage und Gülle oder nur Maissilage betrieben werden, der mehrfach aufgetretene Effekt der Selbsterwärmung des Fermenters in den heißen Sommermonaten beachtet werden. Das kann dazu führen, dass mesophil betriebene Fermenter im Betrieb Temperaturen über 40°C erreichen und eventuell gekühlt werden sollten, wenn diese Temperaturverhältnisse über längere Zeiträume anhalten. Es sollte daher bei der Planung berücksichtigt werden, dass eine Kühlmöglichkeit vorhanden ist. Dadurch wird eine Abkühlung durch Verdünnung des Einsatzstroms bzw. ein Zurückfahren der Anlage zur Verhinderung eines hohen Einbruchs bei der Methanproduktion oder gar eines Absturzes des Fermenters vermieden.

Die untersuchte Biogasanlage verfügt über kein Kühlsystem, wodurch es aufgrund der hohen Außentemperaturen im Sommer 2005 bereits zu einem mehrtägigen Anstieg der Fermentertemperatur auf über 40 °C kam. Aufgrund der geringen Raumbelastung und dem nachfolgenden Absinken der Außentemperaturen wurde der Betrieb der Anlage aber nicht beeinträchtigt.

Zur optimalen Ausnutzung der Substrate sollte beim Einsatz eines Nachfermenters auch dessen Beheizung auf ein Temperaturniveau von ca. 38°C vorgesehen werden, da in diesem Bereich das Temperaturoptimum für die angesiedelten Bakte-

**Tabelle 14:** Parameter zur Beschreibung und Bewertung landwirtschaftlicher Biogasanlagen

Kennwert	Einheit	Messung	Richtwert	Bemerkung
Fermentervolumen	m <sup>3</sup>	3.450		Je nach Anlagengröße
Massendurchsatz	kg FS/d	43.400		Je nach Anlagengröße und Substrat
Trockensubstanzgehalt Einsatz	Gew%	19,25		Ist auf den TS-Gehalt im Fermenter abzustimmen, der unter 12% betragen soll
organischer Trockensubstanzgehalt	Gew%TS	94,76	>90	Je höher der oTS-Gehalt umso mehr Substanz kann verwertet werden, obere Grenze durch AG
Fermenter- / Nachfermenter-temperatur	°C	38 / 35	38-40 / 38-40	für mesophile Betriebsweise, 55-60°C für thermophilen Betrieb
pH-Wert Fermenter / Nachfermenter	-	7,6 / 7,8	6 – 8 / 6 - 8	Abhängig ob ein- (6-8) oder mehrstufiges Verfahren (5,2-6,3 Hydrolyse, 6,7-7,5 Methanisierung)
Gasertrag (bei Anlage mit P <sub>el</sub> = 500 kW)	Nm <sup>3</sup> <sub>tr</sub> /d	5.800		Abhängig von Substrat und Raumbelastung
Gasausbeute	Nm <sup>3</sup> tro/kg oTS	0,73	0,5 – 0,8	Abhängig vom Substratmix 0,30-0,46 für Schweinegülle 0,60-0,80 für Maissilage
Methangehalt vor Gasmotor	Vol% <sub>f</sub>	50	> 50	Abhängig von Substrat und Raumbelastung
Schwefelwasserstoffgehalt vor Gasmotor	Vol% <sub>f</sub>	0,02	möglichst gering < 0,03	Abhängig von Substrat und Entschwefelung sowie der weiteren Nutzung des Biogases
Wassergehalt vor Gasmotor	Vol% <sub>f</sub>	2,18	möglichst gering < 6%	Je geringer der Wassergehalt desto stabiler der BHKW-Betrieb
Kohlenstoffumwandlungsgrad	%	83,29	> 80	Abhängig vom Substrat und dessen Aufbereitung bzw. der Anlagenkonzeption
oTS-Abbaugrad	%	81,86	> 70	Abhängig vom Substrat und dessen Aufbereitung bzw. der Anlagenkonzeption
C/N-Verhältnis des Einsatzes	kmol/kmol	36,50	10-40	Abhängig ob ein- (10-30) oder mehrstufiges Verfahren (10-45 Hydrolyse, 20-30 Methanisierung)
Raumbelastung Gesamtanlage (bezogen auf Gesamtvolumen)	(kg oTS/d)/m <sup>3</sup>	2,29	2-3	Je niedriger, desto stabiler der mikrobiologische Abbauprozess
Raumbelastung Fermenter	(kg oTS/d)/m <sup>3</sup>	4,58	3-8	Je niedriger, desto stabiler der mikrobiologische Abbauprozess
Gasausbeute pro Tag und m <sup>3</sup> Faulraum	(Nm <sup>3</sup> /d)/m <sup>3</sup>	1,77		Abhängig von Substrat, Raumbelastung und Betriebsweise
Hydraulische Verweilzeit (Gesamtanlage)	d	81,69	50-90	Je nach Anlagentechnologie und Substrat
Spezifische elektrische Leistung pro Anbaufläche	kW <sub>el</sub> /ha	2,08	1-3	Abhängig vom Substratgemisch (relevant bei Einsatz landwirtschaftlicher Nutzpflanzen)
Spezifische elektrische Leistung je m <sup>3</sup> Faulraum	kW <sub>el</sub> /m <sup>3</sup>	0,14	0,09-0,2	Abhängig von Substrat, Raumbelastung und Betriebsweise
Elektrischer Eigenbedarf	%	5,6	3-9	Abhängig von der Anzahl der Rührwerke und deren Laufzeit
Thermischer Eigenbedarf	%	8,7	2-40	Abhängig vom Anlagenkonzept
Jahresvolllaststunden	h/a	8.380	7.900	Wichtiges Kriterium für Wirtschaftlichkeit von BGA
Jahresnutzungsgrad <sub>thermisch</sub>	%	3,9	> 35	Eine Wärmenutzung ist unbedingt anzustreben
Jahresnutzungsgrad <sub>elektrisch</sub>	%	28,7	> 25	Abhängig von der Motorengröße
Jahresnutzungsgrad <sub>gesamt</sub>	%	32,6	> 60	Wichtiges Kriterium für Wirtschaftlichkeit von BGA
Verfügbarkeit der Anlage bezogen auf 8.760 Jahresstunden	%	96,96	> 90	Wichtiges Kriterium für Wirtschaftlichkeit von BGA

Erläuterungen: Messung beinhaltet die Daten der untersuchten Anlage, unter Richtwert sind die anzustrebenden Werte bzw. Bereiche dargestellt

rien liegt. Dadurch kann die Gasausbeute verbessert, Substrat eingespart und die anfallende Abwärme des BHKW sinnvoll genutzt werden. Im untersuchten Fall wurde die entsprechende Heizleitung zu gering dimensioniert.

### 6.5 Entschwefelung

Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, kann durch eine Änderung des Substrateinsatzes die Biogasqualität entscheidend beeinflusst werden. Eine entsprechende Auslegung der Entschwefelungsanlage, welche mitverantwortlich für einen störungsfreien Betrieb des Gasmotor-BHKW ist, sollte daher unter Berücksichtigung aller eventuell vorgesehenen Substrate erfolgen. Für eine reine Maisanlage bzw. Mais/Gülleanlage reicht eine interne biologische Entschwefelung mittels Lufterdüsung vollkommen aus, wenn diese eine gute Verteilung der Luft im Fermenter gewährleistet. Sollten andere Substrate (z.B. Kartoffelpülpe) eingesetzt werden, die höhere  $H_2S$ -Gehalte verursachen, muss eine kostenintensivere externe Entschwefelung (z.B. Füllkörperkolonne mit Lufterdübung oder Eisenoxide) vorgesehen werden.

Mit der biologischen Entschwefelung mittels Lufterdübung kann bei der untersuchten Anlage ein annähernd konstanter Schwefelwasserstoffgehalt von rund 170 ppm erzielt werden, der für landwirtschaftliche Biogasanlagen einen guten Wert (Richtwert: < 200-300 ppm) darstellt und auch den Gasmotor-BHKW-Betrieb nicht beeinträchtigt.

### 6.6 Gastrocknung

Ein wesentlicher Anlagenteil, der in keiner modernen Biogasanlage fehlen darf, ist die Entfeuchtung des Biogasstromes. Diese kann im einfachsten Fall durch eine im Erdreich geführte Leitung vor der Gaskompressionsanlage für den Gasmotor erfolgen, in der das Biogas abkühlt, ein Teil des enthaltenen Wassers auskondensiert und am tiefsten Punkt der Leitung abgeführt wird. Die Länge der Leitung muss entsprechend der Erdreichtemperatur und der Verlegungstiefe gewählt werden, wodurch sich Längen von bis zu 40 m ergeben. Weiters können Wasserabscheider und Kühlfallen zur Trocknung des Gases eingesetzt werden. Die betrachtete Anlage nutzt eine unterirdische Leitung zur Abkühlung des Gases, die ausreicht, um Kondensation bei der Verbrennung im Gasmotor weitgehend auszuschließen.

### 6.7 Nutzungsgrade, elektrischer und thermischer Eigenbedarf, Abwärmenutzung, Verfügbarkeit der Anlage, Jahresvolllaststunden

Zu den wichtigsten und aussagekräftigsten Vergleichswerten zählen die Jahresnutzungsgrade (elektrisch, thermisch, gesamt) sowie die Verfügbarkeit einer Anlage. Die Jahresnutzungsgrade zeigen die genutzten Energiemengen im Verhältnis zu den der Anlage zugeführten Energiemengen ( $H_u$  der Substrate) und können daher auch mit anderen Kraft-Wärme-Kopplungs-Technologien verglichen werden. In der Berechnung wurden der elektrische und der thermische Eigenbedarf der Anlage nicht in der genutzten Energiemenge berücksichtigt, da es sich um interne Ströme handelt. Der thermische Eigenbedarf ist wesentlich von der Anlagenkonzeption (mesophiler/thermophiler Betrieb, Nachfermenter beheizt/nicht beheizt, usw.) abhängig und beträgt normalerweise zwischen 2 und 40%, im untersuchten Fall 8,7%, der produzierten Wärmemenge. Der elektrische Eigenbedarf, der hauptsächlich von der Anzahl der Rührwerke und deren Laufzeit abhängig ist, liegt im untersuchten Fall mit 5,8% im Bereich der üblichen 3-9% der produzierten elektrischen Leistung.

Wie aus der Energiebilanz ersichtlich, bildet die erzeugte thermische Energie einen der beiden Hauptströme bei der Nutzung von Biogas in einem Gasmotor-BHKW. Aus diesem Grund sollte die verfügbare Abwärme auch möglichst vollständig genutzt werden. Dadurch können nicht nur die Erlöse aus dem Wärmeverkauf zur Wirtschaftlichkeit der Anlage beitragen, es können auch die Kosten für den elektrischen Eigenbedarf reduziert werden, da die überschüssige Wärme nicht über einen Tischkühler abgeführt werden muss. Eine effiziente Wärmeauskopplung zur Erreichung der Richtwerte, erfordert jedoch einen geeigneten Standort für die Anlage, an dem entsprechende Wärmeabnehmer vorhanden sind. Im Fall der untersuchten Anlage konnte bislang noch keine Einigung mit einem benachbarten Industriebetrieb erreicht werden, wodurch nur geringe Wärmemengen für die Beheizung der Fermenter und der benachbarten Stallungen, sowie des Betriebsgebäudes genutzt werden, wie der schlechte thermische Jahresnutzungsgrad von 3,9% zeigt.

Der elektrische Jahresnutzungsgrad (künftige Verbesserungen nur über Steigerung des Motorwirkungsgrads bzw. durch Verstromung der Abwärme möglich) der Biogasanlage von 28,7% kann als sehr gut bezeichnet werden. Aufgrund der schlechten Wärmenutzung ergibt sich aber ein Gesamtjahresnutzungsgrad von nur 32,6%. Eine Optimierung der Bestandsanlage ist nur über ein verbessertes Wärmenutzungskonzept möglich (würde die gesamte anfallende Wärme des BHKW genutzt werden, könnte ein Gesamtjahresnutzungsgrad von 62 % erzielt werden). Ein geringfügiges Verbesserungspotential ist auch noch über eine weitere Erhöhung des Abbaugrades der organischen Substanz (Optimierung des Substrateinsatzes) gegeben.

Die Verfügbarkeit des BHKW, errechnet aus den Betriebsstunden und bezogen auf ein Jahr, erreichte im betrachteten Zeitraum mit 96,96 % einen sehr guten Wert (Richtwert: > 95%), der die Technologiereife der Nutzung von Biogas in Gasmotoren unterstreicht. Die produzierte Energiemenge entspricht etwa 8.380 Volllaststunden. Um eine hohe Verfügbarkeit und jährliche Volllaststundenanzahl zu erreichen, ist eine gute Wartung des BHKW sowie der Biogasanlage unerlässlich und sehr wichtig.

## 7. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Das an einer modernen landwirtschaftlichen Biogasanlage durchgeführte Langzeitmonitoring über ein Jahr sowie die Ergebnisse aus einem umfassenden Testlauf samt anschließender verfahrenstechnischer Bewertung zeigen, dass die Technologie der Biogasproduktion zur Erzeugung von Strom und Wärme sinnvoll sein kann, wenn gewisse grundsätzliche Rahmenbedingungen erfüllt werden.

Bei den Analysen der Substrate Maissilage und Schweinegülle sowie des Gärrests konnte festgestellt werden, dass die vorliegenden Einsatzstoffe aus landwirtschaftlicher Produktion aus verfahrenstechnischer Sicht gut für die Erzeugung von Biogas geeignet sind, wie bereits aus der Literatur bekannt ist. Die Ergebnisse zeigen einen guten Abbau der organischen Trockensubstanz. Neben Parametern wie Fermentertemperatur und pH-Wert sollten aber auch die Raumbelastung und diverse Säurekonzentrationen im Fermenter regelmäßig kontrolliert werden, um einen stabilen Betrieb sicher zu stellen.

Der im Gärrest verbleibende TS-Anteil ist für Bakterien nur schwer abbaubar und würde eine weitere Reduzierung der Korngröße des Substrats erfordern, um dieses noch besser ausnutzen zu können. Eine Beheizung des Nachfermenters sollte unbedingt erfolgen, bringt aber ebenso wie eine Erhöhung der Verweilzeit nur geringe Verbesserungen des Abbaus. Da der im Gärrest enthaltene Stickstoff hauptsächlich in Form von  $NH_4-N$  vorliegt, stellt der Gärrest einen sehr guten Dünger für

landwirtschaftliche Flächen dar. Die Nährstoffe aus den Substraten gelangen über den Gärrest wieder in den Boden und der Nährstoffkreislauf kann weitgehend geschlossen werden. Die Massenbilanz zeigt die im Verhältnis zur Biogasmenge große Wassermenge im Gärrest (TS-Gehalt: 4-7 Gew%), die für den Prozess der Biogaserzeugung erforderlich ist und wieder mit dem Gärrest ausgebracht werden muss.

Die Analysen des produzierten Biogases zeigen einen Methan-gehalt von rund 50% der für landwirtschaftliche Biogasanlagen durchaus üblich ist, durch eine Änderung der eingesetzten Substratmischung aber noch verbessert werden könnte. Dabei müssen aber die Verfügbarkeit, die Substratkosten und die entsprechenden Transportwege der in Betracht kommenden Substrate berücksichtigt werden, wodurch wiederum die Auswahl eingegrenzt wird. Der ermittelte durchschnittliche Schwefelwasserstoffgehalt von rund 170 ppm im Biogas ist für den Einsatz eines Gasmotors ein guter Wert, der mit einer biologischen Entschwefelung erreicht werden konnte. Je nach Substrat kann dieser aber auch wesentlich höher ausfallen. Es sollte daher schon im Vorfeld untersucht werden, welche Substrate eingesetzt werden sollen und welche Gasreinigung dafür erforderlich ist. Siloxane konnten keine im Biogas festgestellt werden. Weiters ist bei der Verstromung von Biogas in einem Gasmotor die Feuchte des Gases zu berücksichtigen. Um Kondensation im Motor zu vermeiden sollte das Gas gekühlt und entfeuchtet werden, was im einfachsten Fall durch eine unterirdische Leitung mit Kondensatfalle funktioniert. Wie sich bei den Messungen zeigte ist eine derartige Entfeuchtung bei richtiger Dimensionierung ausreichend.

Die Messung der Emissionen des Gasmotors zeigte, dass sämtliche Grenzwerte hinsichtlich CO, NO<sub>x</sub> und NMKW mit modernen Motoren eingehalten werden können. Im vorliegenden Fall musste jedoch erst eine Nachjustierung der Verbrennungsluftmenge erfolgen, um die geforderten Emissionsgrenzwerte für NO<sub>x</sub> zu erreichen. Hinsichtlich HCl und SO<sub>x</sub> sind in den Richtlinien für Stationärmotoren keine Grenzwerte festgelegt, da diese aufgrund der Biogaszusammensetzung gering sind, wie die Messungen bestätigen.

Die Ergebnisse aus der auf den Daten des Langzeitmonitorings und den Messdaten basierenden Stoff- und Energiebilanzierung zeigen auch, wie die im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten Kenn- und Richtwerte, die größte Schwachstelle der untersuchten Biogasanlage auf, die Abwärmenutzung. Trotz einer sehr guten Verfügbarkeit der Anlage von ca. 97 %, die als Ziel für jede Anlage anzusehen ist, und einem guten elektrischen Jahresnutzungsgrad von ~28%, werden in der Anlage nur geringe Mengen der anfallenden Wärme genutzt. Diese wird hauptsächlich zur Erwärmung des Fermenters sowie zur Beheizung des Betriebsgebäudes, der Wohnhäuser der Betreiber und deren Stallungen genutzt. Hinsichtlich Wärmenutzung ist somit noch großes Optimierungspotential gegeben (derzeit werden nur 11% der verfügbaren Wärme genutzt).

Zusammenfassend können für Biogasanlagen aus verfahrenstechnischer Sicht folgende Empfehlungen abgeleitet werden: Da die Substratzusammensetzung und deren Korngröße großen Einfluss auf den Gärprozess haben, sollte eine entsprechend ausgewogene Mischung eingesetzt werden, um möglichst gute Abbauraten zu erhalten, bzw. um gute Methangehalte im Biogas erzielen zu können. Dabei ist auch neben für die Vergärung relevanter Parameter wie C/N-Verhältnis und TS-Gehalt auf die entsprechende Gasausbeute des Substrats zu achten. Weiters muss auch die Entschwefelung auf die eingesetzten Substrate und die Nutzung des Biogases abgestimmt werden.

Trockensubstanzgehalt, C/N-Verhältnis der Einsatzstoffmischung, pH-Wert, Raumbelastung und Verweilzeit sind wichtige Kennwerte, die sich abhängig von Anlagengröße, Anlagen-

system und Einsatzstoffen ändern, aber unbedingt bei der Planung und dem Betrieb von Biogasanlagen berücksichtigt werden müssen. Entsprechende Richtwerte müssen eingehalten werden um einen stabilen Betrieb zu gewährleisten.

Um Kondensation und Korrosion zu vermeiden, muss eine entsprechend der Gasnutzung angepasste Wasserabscheidung aus dem Rohgas vorgesehen werden.

Die richtige Wahl eines geeigneten Standorts ist die Grundvoraussetzung für einen wirtschaftlich und ökologisch sinnvollen Betrieb einer Biogasanlage. Besonders wichtig ist dieses Kriterium bei der Nutzung des Biogases in einem Gasmotor, damit die Kühlwärme des BHKW sinnvoll genutzt werden kann. Ein entsprechendes Wärmenutzungskonzept ist daher unerlässlich, Gesamtnutzungsgrade der Anlage bezogen auf den Heizwert der eingesetzten Substrate über 60% sollten unbedingt angestrebt werden.

Um eine hohe Verfügbarkeit (> 7.900 h/a) zu gewährleisten sind eine gute Wartung des Gasmotor-BHKW und der erforderlichen Pumpen und Rührwerke sowie der zugehörigen Peripherie zu empfehlen.

Bei der Planung von Anlagen ist auf die richtige Konzeption der Fermenter und in Abhängigkeit des Substrateinsatzes, der Raumbelastung und insbesondere des Klimas auf die erforderliche Beheizung bzw. Kühlung zu achten.

Abschließend soll noch auf das hohe zukünftige Entwicklungspotential der Technologie Biogas hingewiesen werden, das sich von verbesserten Motorwirkungsgraden, der Abwärmenutzung in ORC-Anlagen, über die Biogasnutzung in Brennstoffzellen und die Einspeisung in Erdgasnetze bis hin zur besonders interessanten zukünftigen Nutzungsmöglichkeit als Treibstoff erstreckt.

## 8. Literatur

- [1] E-CONTROL, 2005: Bericht über die Ökostrom-Entwicklung und fossile Kraft-Wärme-Kopplung in Österreich, Energie-Control GmbH, Wien, Österreich
- [2] PÖLZ W., SALCHENEGGER S., 2005: Biogas im Verkehrssektor, Technische Möglichkeiten, Potential und Klimarelevanz, Band 283, ISBN: 3-85457-799-0 Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien
- [3] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, INNOVATION UND TECHNOLOGIE, 2006: Projektdatenbank Energiesysteme der Zukunft, <http://www.energiesystemederzukunft.at/projekte/index.htm> [16.11.2005]
- [4] ENERGIEBEAUFTRAGTER DES LANDES STEIERMARK, 2004: Biogasanlagen in der Steiermark, Informationsbroschüre, Landesenergieverein Steiermark, Graz
- [5] AMON T., HOPFNER-SIXT K., 2003: Monitoring von landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Oberösterreich, Universität für Bodenkultur, Department für Nachhaltige Agrarsysteme, Institut für Landtechnik, Wien
- [6] AUSTRIAN ENERGY AGENCY, 2003: Advanced prediction, monitoring and controlling of anaerobic digestion processes behaviour towards Biogas usage in Fuel Cells, In: Proceedings of the „Bio-energy enlarged perspectives“ meeting, 16-17.10.2003, Budapest, Hungary
- [7] VAN DER DRIFT, A., VAN DOORN, J., 1998: Phyllis ECN. Operationeel maken – fase 2 (in Dutch). ECN-CX-98-138, Netherlands Energy Research Foundation, Petten, Netherlands
- [8] HOFBAUER H., 2005: BIOBIB – A Database for biofuels, University of Technology Vienna, Institute of Chemical Engineering, Fuel and Environmental Technology, <http://www.vt.tuwien.ac.at/biobib/biobib.html> [16.11.2005]
- [9] OBERNBERGER Ingwald, BIEDERMANN Friedrich, DAHL Jonas, 2000: BioBank, Database on the chemical composition of biomass fuels, ashes and condensates from flue gas condensers from real-life installations, BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, Graz and Institute of Chemical Engineering Fundamentals and Plant Engineering, Graz University of Technology, Graz, Austria, <http://www.ieabcc.nl> [20.10.2005]

- [10] FACHBERIRAT FÜR BODENFRUCHTBARKEIT UND BODENSCHUTZ, 2001: Richtlinien für den sachgerechten Einsatz von Biogasgülle und Gär-rückständen im Acker- und Grünland, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien
- [11] BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT, 2004: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, mit der Bestimmungen zur Durchführung des Düngemittelgesetzes 1994 erlassen werden (Düngemittelverordnung 2004), BGBl 100/2004, Wien
- [12] WELLINGER, A. BASERGA. U., EDELMANN W., EGGER K. SEILER B., 1991: Biogas Handbuch, ISBN: 3-85983-035-X, Verlag Wirz AG, Aarau, Schweiz
- [13] GRAF W., 2002: Der Biogasreport, ISBN: 3-8311-3494-4, Books on Demand GmbH, Norderstedt, Deutschland
- [14] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (FNR), 2004: Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung, ISBN 3-00-014333-5, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.) Leipzig, Deutschland
- [15] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ARBEIT, 2001: Technische Grundlage für die Beurteilung von Emissionen aus Stationärmotoren, Arbeitskreis „Emissionen von Stationärmotoren“, Wien
- [16] SCHILIRÒ, M. 2005: LEA Training - Besonderheiten beim Biogasbetrieb. In: Tagungsband zum Expertenlehrgang Biogas kompetent, LEA Oststeiermark (Hrsg.), Jänner 2005, Gleisdorf
- [17] BUSWELL, A.M., WHITE H.L., SCHLENZ H.E., PEARSON E.L., SYMONS G.E., 1930: Studies on Two-stage Sludge Digestion, Illinois State Water Survey, Champaign, USA

Dipl.-Ing. Jörg Pfeifer <sup>1)</sup>  
 Prof. Univ.-Doz. Dipl.-Ing Dr. Ingwald Obernberger <sup>1,2,3)</sup>

- <sup>1)</sup> Institut für Ressourcenschonende und Nachhaltige Systeme  
 Technische Universität Graz  
 Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz
- <sup>2)</sup> BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH  
 Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz
- <sup>3)</sup> Austrian Bioenergy Centre GmbH  
 Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

**ihr partner für alle lösungen im bereich  
 biogasanlagen**

schilfweg 1, a-6972 fussach  
 telefon: +43 5578 7946  
 telefax: +43 5578 7946 - 800  
 mail: office@entec-biogas.at  
 web: www.entec-biogas.at



Tornitz/Deutschland



Tamsweg/Österreich



Juneda/Spanien

**Planungs-Know-how für die derzeit weltweit größte Biogasanlage auf Basis nachwachsender Rohstoffe kommt aus Österreich!**

Die österreichische Firma entec biogas gmbh aus Fußach/Vorarlberg zeichnet für die gesamte Planung, Bauleitung, und Inbetriebnahme für ein 3 MW – Biogas-Kraftwerk in Sentenberg/Deutschland verantwortlich!

Die im Oktober 2006 in Betrieb genommene Biogasanlage produziert aus 40.000 t/a nachwachsenden Rohstoffen (Mais/Roggen) ca. 24.000.000 kWh Strom pro Jahr. Unter Zugrundelegung eines durchschnittlichen österreichischen Haushaltsverbrauchs von ca. 4.750 kWh pro Jahr entspricht die produzierte Menge dem Jahresbedarf von rund 5.000 Haushalten!

www.entec-biogas.at

