



Das Lebensministerium



## Trockenfermentation im Siloschlauch

Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft  
Heft 16 - 10. Jahrgang 2005

**Demonstration und Entwicklung des Verfahrens der Trockenfermentation  
im Siloschlauch zur Nutzung in der landwirtschaftlichen Praxis**

## Inhaltsverzeichnis

1 Ziel- und Problemstellung	5
1.1 Projektziele	5
1.2 Energiegehalt und Verstromung	7
2 Aufbau der Demonstrationsanlage	7
2.1 Aufbau der Versuchsanlage in Köllitsch	7
2.2 Versuchsanordnung in Köllitsch	9
3 Technologische Arbeitsabläufe der Anlage	10
3.1 Befüllung der Schläuche	10
3.1.1 Vorbereitung der Befüllung	10
3.1.2 Befüllung	11
3.1.3 Nacharbeiten	13
3.2 Ablauf der Beräumung	14
3.3 Probleme bei Befüllung und Beräumung	16
3.4 Tägliche Arbeitsschritte an der Versuchsanlage	16
3.5 Arbeitszeitbedarf insgesamt	16
3.6 Liegezeiten der Schläuche	19
4 Versuchsdurchführung und Messwerterfassung	20
4.1 Versuchsdurchführung	20
4.2 Einfluss der Vorbehandlung des Substrates auf den Gärprozess	22
4.2.1 Mischung	22
4.2.2 Vorrotte	23
4.3 Ermittlung der Inputmengen	23
4.4 Messwerterfassung	24
4.5 Gemessene Parameter	25
4.6 Substratbeobachtung von In- und Output	28
4.7 Probleme während der Versuche	28
4.8 Technische Veränderungen während der Versuchsdurchführung	29
5 Ergebnisse und Diskussion	30
5.1 Messung der Gasproduktion	30
5.2 Energiebilanz des BHKW	32
5.3 Gaserträge der einzelnen Schläuche	35

5.4 Gaszusammensetzung	42
5.5 Einfluss der Substrateigenschaften	48
5.5.1 Gehalt an Trockensubstanz und organischer Trockensubstanz	50
5.5.2 pH-Wert	51
5.5.3 Temperaturen und Kondensatmengen	53
5.5.4 Verweildauer (Liegezeit des Schlauches)	60
5.6 Verwendung des Gärhilfsmittels MethaPlus 100	60
5.7 Winterprojekt	62
6 Betriebswirtschaftliche Aspekte	68
6.1 Kosten der Energieerzeugung im Folienschlauch	68
6.2 Erlöse der Energieerzeugung im Folienschlauch	70
6.3 Gesamtwirtschaftlichkeit	71
7 Zusammenfassung	74
8 Literaturverzeichnis	76
9 Anhang	77

## **Verzeichnis der Abbildungen**

Abbildung 2.2-1	Versuchsaufbau Trockenfermentationsanlage
Abbildung 3.1.1-1	Vormischen des Festmistes
Abbildung 3.1.1-2	Vorarbeiten zur Schlauchbefüllung (Variante ohne Bodenheizung)
Abbildung 3.1.2-1	Beschickung mittels Frontlader
Abbildung 3.1.2-2	Beschickung mittels Kran
Abbildung 3.1.3-1	Einsetzen des Ventils zur Gasableitung
Abbildung 3.1.3-2	Isolieren des Schlauches
Abbildung 3.2-1	Öffnen des Folienschlauches
Abbildung 3.2-2	Reinigung der AG-BAG Silopresse
Abbildung 5.7-1	Wärmedämmung mit Dämmstoff Roofmate
Abbildung 5.7-2	Wärmedämmung mit Dämmstoff Schotter

## **Verzeichnis der Diagramme**

Diagramm 3.5-1	Arbeitszeit in AKh im Zusammenhang mit der Inputmenge
Diagramme 5.3-1 bis 5.3-7	Verlauf der Gasentwicklung in allen Schläuchen
Diagramm 5.3-8	Gasausbeute in m <sup>3</sup> Gas je m <sup>3</sup> Substrat und in Litern je kg organischer Trockensubstanz
Diagramm 5.4-1	CH <sub>4</sub> - Gehalt in den Schläuchen 3 und 4 im Jahr 2002
Diagramm 5.4-2	H <sub>2</sub> S- Gehalt in den Schläuchen 3 und 4 im Jahr 2002
Diagramm 5.4-3	CH <sub>4</sub> - Gehalt in den Schläuchen 11 und 12 im Jahr 2003
Diagramm 5.4-4	H <sub>2</sub> S - Gehalt in den Schläuchen 11 und 12 im Jahr 2003
Diagramm 5.5.1-1	TS-Gehalt bei der Befüllung und Gasertrag
Diagramm 5.5.2-1	pH-Werte zur Befüllung und Entleerung
Diagramm 5.5.2-2	pH- Wert bei der Befüllung und Gasertrag
Diagramm 5.5.3-1	Schlauch- und Außentemperaturmessungen 2002
Diagramm 5.5.3-2	Substrattemperatur in °C, Kondenswasseranfall in ml sowie der TS-Gehalt des Inputs in % bei allen Schläuchen
Diagramm 5.5.3-3	Temperaturverlauf im Substrat der Schläuche 10, 11 und 12
Diagramm 5.5.3-4	Substrat- und Außentemperatur sowie Gasausbeute in l/kg oTS für alle Schläuche
Diagramm 5.5.4-1	Gasertrag und Liegezeit
Diagramm 5.7-1	Außen- und Substrattemperaturen von Schlauch 8
Diagramm 5.7-2	Wärmezufuhr und Stromeinspeisung vom Schlauch 8
Diagramm 5.7-3	Gasausbeute und Stromeinspeisung vom Schlauch 8

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 3.5-1	Vorbereitung des Untergrundes für die Folienschläuche
Tabelle 3.5-2	Arbeitszeit in AKh bei der Trockenfermentation
Tabelle 3.5-3	Arbeitszeit in AKh/t Input bei der Trockenfermentation
Tabelle 3.6-1	Liegezeiten der einzelnen Schläuche in Tagen
Tabelle 4.1-1	Versuchszeiträume, Mengen und Substrate im Folienschlauch
Tabelle 5.1-1	Gegenüberstellung der Biogaserträge in VN[m <sup>3</sup> ] gemessen an den Flügelradsonden und am Gasbalgenzähler vor dem BHKW
Tabelle 5.2-1	Monatliche Energiemengen 2002
Tabelle 5.2-2	Monatliche Energiemengen 2003
Tabelle 5.3-1	Mengen und Gasausbeuten der einzelnen Siloschläuche
Tabelle 5.3-2	Übersicht über die Gasproduktion
Tabelle 5.4-1	Durchschnittliche Biogaszusammensetzung
Tabelle 5.5-1	Laborergebnisse und sensorische Merkmale des Outputs
Tabelle 5.5.1-1	TS- und oTS- Gehalte der Substrate bei der Befüllung und Entleerung der Folienschläuche
Tabelle 5.5.2-1	pH-Werte der Substrate bei der Befüllung und Entleerung der Folienschläuche
Tabelle 5.5.3-1	Temperaturmessung am Substrat und Isolierung der Folienschläuche
Tabelle 5.5.3-2	Durchschnittliche Substrattemperaturen aller Schläuche
Tabelle 5.6-1	Vergleich der Schläuche S14 und S15
Tabelle 6.1-1	Betriebskosten benötigter Maschinen und Geräte (nach KTBL)
Tabelle 6.1-2	Betriebskosten der Schlauchfermentation
Tabelle 6.3-1	Wirtschaftlichkeitsberechnung der Trockenfermentation im Siloschlauch
Tabelle 6.3-2	Wirtschaftlichkeitsberechnung der Trockenfermentation im Siloschlauch mit verbesserter Gaserzeugung und geringeren AKh
Tabelle 9-1	Schwermetalle im Gärsubstrat - Befüllung
Tabelle 9-2	Schwermetalle im Gärsubstrat - Entleerung
Tabelle 9-3	Nährstoffe im Gärsubstrat - Befüllung
Tabelle 9-4	Nährstoffe im Gärsubstrat - Entleerung

## **1 Ziel- und Problemstellung**

### **1.1 Projektziele**

Stand der Biogastechnik ist die Nassvergärung, bei der Trockensubstanzeinträge bis 12 % möglich sind. Betriebe, die auf Güllebasis arbeiten, wählen dieses Verfahren. Für Betriebe die ausschließlich mit Festmist, Geflügelfäkalien oder mit pflanzlichen Substraten arbeiten, steht bisher keine Technologie zur Verfügung. Mit einer wirtschaftlichen Technologie wären auch diese Stoffe für die Landwirtschaft energetisch nutzbar. Gleichzeitig könnte ein höherer Beitrag zur CO<sub>2</sub>- Reduzierung erreicht werden. Es arbeiten bereits mehrere Institutionen an Methoden zur Trockenfermentation. Im Labor- und Kleinmaßstab werden schon länger Versuche unternommen. Jeder verfolgt jedoch eine etwas andere Technologie. Bisher wurden vorrangig Versuche mit Containern durchgeführt (FH Weihenstephan, Prof. Hoffmann).

Ziel des Projektes war die Erprobung und Weiterentwicklung einer mobilen Trockenfermentationsanlage (unter Benutzung einer Folienschlauchpresse) unter Praxisbedingungen. Die Nutzung energiereicher Feststoffe könnte bedeutende ökonomische Vorteile aufweisen. Das Verfahren sollte bis zur Praxistauglichkeit verbessert werden, die Untersuchung folgender Hauptschwerpunkte steht dabei im Vordergrund:

- technologische Verfahrensverbesserung
- Feststellung der Qualitätsansprüche an das Substrat
- optimale Temperaturführung in Abhängigkeit von der Außentemperatur

Mit diesem Verfahren eröffnet sich die Möglichkeit, zusätzliche organische Substanzen mit einer Trockensubstanz über 15 % für die Energiegewinnung im ländlichen Raum zu nutzen. Der Neuwert wäre sehr hoch, weil es in Deutschland kein weiteres Praxisbeispiel für diese Technologie gibt. So bestünde die unmittelbare Möglichkeit, die Vergärung mit der Kompostierung zu kombinieren. Besitzer einer Folienschlauchpresse können das Dienstleistungsangebot für den ländlichen Raum erhöhen.

Der größte Nutzen des Verfahrens liegt in der dezentralen Energiegewinnung und in der Verbesserung der Umweltsituation im ländlichen Raum. Außerdem ermöglicht es die Schaffung einer zusätzlichen Einkommensquelle für die Landwirte. Die Erzeugung von Biogas aus stapelbarem, organischem Material, das einen TS-Gehalt von 18 bis 50 % hat, ist erst in den letzten Jahren Gegenstand vieler Versuchsvorhaben geworden. Diese Verfahren werden als Trockenfermentation bezeichnet, wenn keine weitere Flüssigkeit zugegeben wird. Für die Trockenfermentation fester, stapelbarer oder schütffähiger Masse mit Trockensubstanzen über 15 % wie Festmist und landwirtschaftliche Biomasse steht bisher keine praxistaugliche Technologie zur Verfügung. Mit einer wirtschaftlichen Technologie wären auch diese Stoffe für die Landwirtschaft energetisch nutzbar.

Die Trockenfermentation im AG-BAG-Folienschlauch ist eine Weltneuheit und kann ausschließlich in Zusammenarbeit mit der Firma Budissa Agroservice GmbH erfolgen. Es handelt sich um ein Verfahren im Folienschlauch, das die Firma AG-BAG entwickelt hat und in Europa als Marktführer vertreibt. Die Verwendung der AG-BAG Folienschlauchtechnologie hat sich in den vergangenen Jahren in unterschiedliche Richtungen weiterentwickelt und wurde kontinuierlich verbessert. Dies gilt sowohl für die Silierung im AG-BAG-Folienschlauch als auch für die Kompostierung. Ein bis dato vollkommen neues Gebiet ist die Produktion von Biogas im Folienschlauch.

Das große Interesse am Thema Biogas ist mit dem neuen Energieeinspeisegesetz, kurz EEG, vom August 2004 und den damit verbundenen Vergütungen von bis zu 19,5 Cent/kWh für die Trockenfermentation deutlich verstärkt worden. Die Vorteile des Verfahrens, nicht nur im Vergleich zu herkömmlichen Biogasanlagen, sind die einfache und kostengünstige sowie mobile Bauweise der Anlage und ein hoher Gasertrag je Tonne Biomasse. Eine Entschwefelung des Biogases für einen dauerhaften BHKW Betrieb ist vermutlich unnötig. Aber auch die einfache Bedienbarkeit der Anlage und ihr geringer Prozessenergiebedarf sind große Vorteile der Trockenfermentation. Je nach Betriebsgröße ist es möglich, bis zu 200 t (bei 8'x 60m; Durchmesser: 2,40m) je Folienschlauch in Abhängigkeit der Zusammensetzung und des Trockensubstanzgehaltes der Biomasse zu entsorgen.

Die besonderen Umwelteffekte liegen in folgenden Bereichen:

- a) Bisher werden die festeren landwirtschaftlichen Produkte (Stallmist u.a.) zwischengelagert, die Energie geht ungenutzt verloren. Nunmehr kann eine energetische Nutzung erfolgen, andere bisher genutzte Energiequellen können substituiert werden.
- b) Die erzeugte Energie wird ohne größere zusätzliche Transportaufwendung gewonnen. Das heißt, die Gewinnung und Verwertung der Energie erfolgt am Ort des Anfalls. Dies ist im Vergleich zu den meisten anderen herkömmlichen Formen der Energiegewinnung ein unschätzbare Vorteil für die Umwelt.
- c) Verbleibende Reststoffe (entgaster Stallmist, andere Stoffe eines Landwirtschaftsbetriebes) können ohne weitere Behandlungen verwertet werden, nämlich wie bisher als organischer Dünger. Es sind keine kostenaufwendigen Behandlungen (z. B. Hygienisierung) notwendig.

Für die Trockenfermentation können organische Stoffe z. B. aus der Landwirtschaft und dem Gartenlandschaftsbau eingesetzt werden. Dazu werden lediglich ebene befestigte Flächen wie Beton und Asphalt oder ungenutzte Fahrsilos benötigt. Die Einspeisung der erzeugten Elektroenergie ins Netz erfolgt über eine Trafostation.



## **1.2 Energiegehalt und Verstromung**

Neben dem Gasertrag je Tag und Tonne ist die Gasqualität eines der Hauptkriterien zur Beurteilung des Energiegehaltes von Biogas und den damit verbundenen Erlösen aus dem Strom- bzw. gegebenenfalls aus dem Wärmeverkauf.

In einem Kubikmeter Biogas stecken etwa 6 kWh Energie, wenn man von einem Methangehalt von 60 % im Biogas ausgeht. Ein in der Biogastechnik verwendetes BHKW besitzt je nach Größe und Motorenart einen elektrischen Wirkungsgrad zwischen 30 % und 38 %, d. h. aus einem Kubikmeter Biogas werden 1,8 kWh Strom erzeugt. Weil Energie nie verloren geht, sondern nur umgewandelt werden kann, entstehen aus der noch verbleibenden Energie etwa 4,2 kWh je m<sup>3</sup> thermische Energie, also nutzbare Wärme, der dann noch verbleibende Rest sind Umwandlungsverluste des Prozesses. Der Gasertrag und der Energiegehalt sind immer vom verwendeten Material, dessen Zustand sowie der technischen Umsetzung abhängig. Als geeignete Stoffe zur Biogasnutzung im AG-BAG-Folienschlauch können Rindermist, Schweinemist, Hühnerkot, Schafmist, Pferdemist, Silage, Klee, Rübenblatt, Kartoffelkraut, Laub, Schlempe, Trester, Treber, Gemüseabfälle, Kräuter, Mühlenrückstände, Schrot, Bioabfall, Grünschnitt, Mähgut, Fettabscheiderrückstand und Speiseabfälle verwendet werden.

Mit dem hier dargestellten Biogaskonzept lassen sich organische Massen aus den Bereichen Landwirtschaft sowie Garten- und Landschaftsbau sinnvoll veredeln. Sie bilden eine Brücke vom Anfall der Biomasse über deren wertvolle energetische Nutzung bis hin zu hochwertigem Kompost oder Dünger. Letztere können im selben Folienschlauch nach Beendigung der Entgasung und durch eine Prozessumkehr hergestellt werden.

Auf Grund der Kenntnisse über die Kosten bei der Silierung mit der AG-BAG-Technologie und grundlegender Aussagen zu Biogasanlagen konnte geschätzt werden, dass unter Berücksichtigung aller gesetzlichen Regelungen (Einspeisegesetz, investive Förderung) für den Landwirtschaftsbetrieb die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens gegeben sein müsste. Eine genaue Darstellung sollte im Rahmen des Projektes erarbeitet werden. Zu diesem Zweck wurde eine Pilotanlage im Lehr- und Versuchsgut Köllitsch konzipiert. Diese Anlage bedarf keiner immissionsschutzrechtlichen Genehmigung (BImSchG), weil sie allein der Verwertung nichtüberwachungsbedürftiger landwirtschaftlicher Stoffe dient.

## **2 Aufbau der Demonstrationsanlage**

### **2.1 Aufbau der Versuchsanlage in Köllitsch**

Der für die Versuchsanlage zur Verfügung stehende Platz auf dem Gelände in Köllitsch bietet Raum für die Installation von drei Schlauchfermentern mit einer Länge von etwa 40 bis 50 m. Sämtliche Rohrleitungen für das gebildete Biogas und für die Beheizung der Schläuche wurden fest

installiert. Das BHKW, der Gasspeicher sowie der Messrechner sind in jeweils einem Container untergebracht.

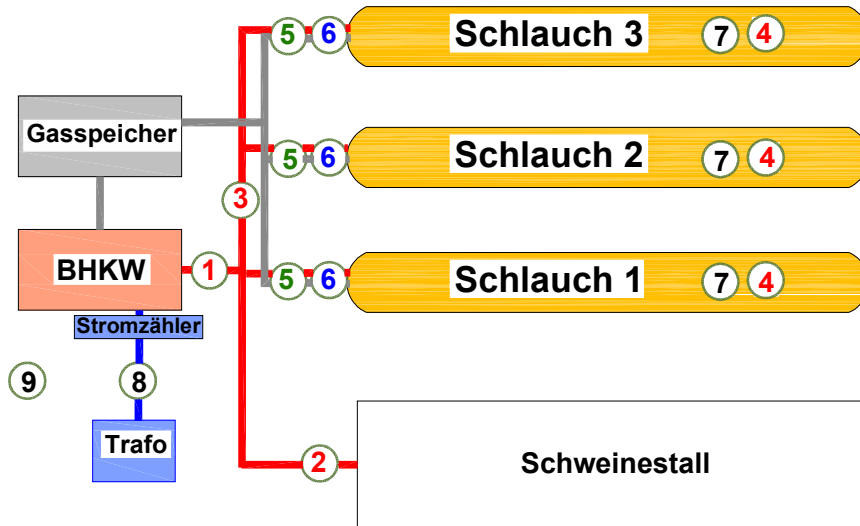
Das entstehende Biogas wird an der Oberseite des Fermenters durch ein flexibles Drainagerohr zum Ende des Schlauches geleitet, an dem mittels eines Flansches der Anschluss an eine flexible Metallleitung erfolgt. Die Weiterleitung des Gases geschieht von dort über starre Metallrohrleitungen. Die Sammelleitung führt zunächst zu einem Sammelbehälter für anfallendes Kondensat und anschließend zum Gasspeicher und zum BHKW. Das BHKW, in dem ein zum Gasmotor umgebauter Dieselmotor zum Einsatz kommt, besitzt folgende technische Daten:

- elektrische Leistung: ca. 40 kW
- thermische Leistung: ca. 80 kW
- elektrischer Wirkungsgrad  $\eta_{el}$ : ca. 33 %
- thermischer Wirkungsgrad  $\eta_{th}$ : ca. 50 bis 60 %
- Feuerungswärmeleistung: ca. 130 kW

Um die angegebenen Leistungen zu erreichen, muss der Motor pro Stunde bis zu 22 m<sup>3</sup> Biogas mit einem Heizwert von 6 kWh/m<sup>3</sup> verbrennen. Das entspricht einem Methangehalt von etwa 60 Vol.-%. Der Startvorgang des BHKW wird im regulären Betrieb automatisch durch einen füllstandsabhängigen Schalter am Gasspeicher ausgelöst. Das Abschalten erfolgt über einen Druckwächter, der in der Gasleitung zwischen Gasspeicher und BHKW eingebaut ist, bei einem Unterdruck von 1 mbar (100 Pa).

Die drei Fermenter werden über einen Wasserkreislauf, der an das Kühlsystem des BHKW angeschlossen ist, beheizt. Bei 50 °C Kühlwassertemperatur schaltet eine Heizungspumpe zu und leitet das erwärmte Wasser in den Heizkreislauf. Ab einer Temperatur von 70 °C wird zusätzlich der Notkühler zugeschaltet, der überschüssige Wärme ableitet.

## 2.2 Versuchsanordnung in Köllitsch



### Messpunkte

- 1 Messung der Gesamtwärmeerzeugung
- 2 Messung des Wärmeverbrauchs
- 3 Messung der Prozesswärme
- 4 Temperaturmessung im Substrat

- 5 Messung Temperatur, Druck, Biogasmenge, Methangehalt
- 6 Entnahmestelle für H<sub>2</sub>S-Messung
- 7 Substratbeprobung vor und nach Einpressen
- 8 Ermittlung - Wirkungsgrad, Laufzeiten, Störungen
- 9 Ermittlung - Außentemperatur

**Abbildung 2.2-1: Versuchsaufbau Trockenfermentationsanlage**

Durch die Firma BAG Budissa erfolgte die Anlieferung von zwei Containern mit BHKW und Gas-2-rungswärmeleistung von 130 kW hat, fällt es nicht in die Genehmigungspflicht. Seit 08/2001 besteht diese ab einer Feuerungsleistung von 1000 kW. Der Aufbau des Wasser-, Heizungs- und Gasleitungssystems wurde ebenfalls durch Firma BAG Budissa organisiert und ausgeführt. Ebenso das Anliefern, Auslegen, Verbinden und Zusammenschrauben der Heizstäbe.

Ausgediente Förderbandmatten aus einem ehemaligen Tagebau wurden mit einem Autokran angeliefert, mittels Trennschleifer auf Größe geschnitten und mit Gabelstapler und Schlepper ausgelegt.

### **3 Technologische Arbeitsabläufe der Anlage**

#### **3.1 Befüllung der Schläuche**

##### **3.1.1 Vorbereitung der Befüllung**

Drei Tage vor Befüllung der Folienschläuche erfolgte mit einem Kran T 188 die Vermischung des Mistes. Für alle Versuche wurde immer Rindermist verwendet, der frisch bzw. abgelagert war und mit Futterresten oder Silage vermischt wurde. Eine gleichmäßige Vermischung ist sehr wichtig, um ein homogenes und vorgerottetes Substrat für die Vergärung zu erhalten. Am Befüllungstag wurde der AG-Bagger in Startposition gestellt, der Folienschlauch aufgezogen und verschlossen. Danach erfolgte die Aufstellung eines Gitters und die Einlegung der Drainageschläuche.



**Abbildung 3.1.1-1: Vormischen des Festmistes**



**Abbildung 3.1.1-2: Vorarbeiten zur Schlauchbefüllung (Variante ohne Bodenheizung)**

### **3.1.2 Befüllung**

Der vermischte Rindermist wurde mit einem Kran T188 auf den HW 80 geladen; mit dem Schlepper John Deere erfolgte die Anlieferung des Inputmaterials. Als Antriebsaggregat der AG-BAG Silopresse G 7000 diente ein Schlepper mit einer Leistung von mindestens 100 PS (in Abhängigkeit von der Größe der Silopresse). Die Beschickung des AG-Baggers erfolgte über das Futtertischband mittels Frontlader (Weidemann).

Eine laufende Kontrolle der Seilwinden und Haken während der Beschickung des Folienschlauches war unabdingbar, weil die Gefahr des Einschneidens bzw. Aufreißens des Folienschlauches bestand. Zum Schutz des Schlauches wurden Seilwinde und Haken mit Pappe umwickelt. Die unterschiedlichen Bremsdrücke lagen zu Beginn und zur Beendigung der Arbeiten bei 10-20 bar, während der Befüllung bei 50-60 bar. Es erfolgte durch die Mitarbeiter eine ständige Beobachtung des Befüllgutes auf dem Futtertischband, um Störstoffe sofort aussortieren zu können.



**Abbildung 3.1.2-1: Beschickung mittels Frontlader**



**Abbildung 3.1.2-2: Beschickung mittels Kran**



### 3.1.3 Nacharbeiten

Nach dem Verschließen des Folienschlauches wurden Ventile zur Gasableitung und zur Temperaturmessung in den Schlauchfermenter eingesetzt, anschließend erfolgte die Isolation des Folienschlauches. Dazu wurden verschiedene Isoliermaterialien wie z. B. Dämmwolle, Luftpolsterfolie, Rüben- und Nadelvlies verwendet und anschließend mit Folie abgedeckt. Damit die Abdeckung nicht verrutscht bzw. sich löst, wurde alles mit alten Autoreifen- ca. 80 pro Schlauch - beschwert. Am Ende der Befüllung erfolgte die Reinigung des AG-Baggers und der Arbeitsflächen.



Abbildung 3.1.3-1: Einsetzen des Ventils zur Gasableitung



**Abbildung 3.1.3-2: Isolieren des Schlauches**

### **3.2 Ablauf der Beräumung**

Zunächst wurden die Autoreifen entfernt, anschließend die Messtechnik und Ventile, die Abdeckfolie und das Isoliermaterial. Nach dem Aufschneiden des Folienschlauches erfolgte die Beräumung des vergorenen Materials mittels Kran und Miststreuer. Zum Schluss wurde die Schlauchliegefläche gereinigt und die Abdeckfolie ordnungsgemäß beseitigt.





**Abbildung 3.2-1: Öffnen des Folienschlauches**



**Abbildung 3.2-2: Reinigung der AG-BAG Silopresse**

### **3.3 Probleme bei Befüllung und Beräumung**

Zur Verdichtung des Siliergutes wie auch des Gärsubstrates, wird üblicherweise ein Stahl- bzw. Aluminiumgitter verwendet. Dessen Handhabung ist, bedingt durch seine Größe und sein Eigengewicht, etwas arbeitsaufwändig. Zukünftig wird zur Verdichtung des Siliergutes oder Gärsubstrates das neu entwickelte Ankersystem eine Rolle spielen. Weiterhin sehr arbeitsaufwendig war das Abdecken der Fermenterschläuche mit Planen und Autoreifen in Handarbeit. Diese Arbeiten sind körperlich sehr anstrengend, wenig für Einzelpersonen geeignet und sollten insbesondere von Männern durchgeführt werden.

### **3.4 Tägliche Arbeitsschritte an der Versuchsanlage**

Wichtig war die tägliche Kontrolle an der Versuchsanlage. So konnten Störungen schnell erkannt und Maßnahmen zu deren Behebung eingeleitet werden. Aufgetretene Fehlermeldungen, Unregelmäßigkeiten und sonstige Vorfälle wurden dokumentiert. Im Container 1 erfolgte die Kontrolle des Schaltschranks, im Container 2 die Kontrolle des Gasspeichers und im Container 3 wurden die Messtechnik und der PC untergebracht, die täglich kontrolliert wurden. Weiterhin wurden alle Haupthähne an den Verbindungsleitungen, alle Ventile auf Dichtheit kontrolliert und die Schlauchabdeckung auf mechanische Beschädigung hin untersucht.

Am BHKW wurden die Betriebsstunden und am Gaszähler das verbrannte Gas abgelesen. Weiterhin erfolgte die Erfassung der Zählerstände des Notkühlers und der Heizungspumpe. Täglich wurden die Außentemperatur und die Schlauchtemperaturen erfasst und im PC vermerkt. Jeder Folienschlauch wurde mit einem Messpunkt versehen. Dort erfolgte die Ermittlung der anfallenden Kondenswassermengen in einem Messzylinder und die Messung der Gasqualität mit dem Gasmessgerät SR2-DO. Lagen mehrere Schläuche, wurde das Kondenswasser an einer Sammelstelle erfasst.

### **3.5 Arbeitszeitbedarf insgesamt**

Der Arbeitszeit- und Arbeitskräfteaufwand bei der Trockenfermentation im Folienschlauch ist durch das Befüllen und Beräumen wesentlich höher als bei der Nassfermentation. Für die Mistmischung von ca. 150 t benötigt man 3 bis 4 Stunden und für die Befüllung eines Schlauches ca. 4 Stunden. Ein extrem hoher Arbeitszeitanteil ist für die Isolation (Abdeckung) des Folienschlauches nötig. Acht bis 10 Personen brauchen dafür 2 bis 3 Stunden. Für die Vorbereitung und Mistmischung wurde in der Regel jeweils eine Arbeitskraft benötigt, für die Befüllung des Schlauches vier Arbeitskräfte. Für Nacharbeiten wie Flächenreinigung und Reinigung des AG Baggers sind zwei Arbeitskräfte ausreichend.

Die Arbeitszeiten für das Errichten der Anlage mit BHKW, Gasspeicher und -leitungen sowie Messtechnik und Anlieferung der Gummibänder wurden nicht erfasst. Die Arbeitsgänge für den Betrieb der Anlage beinhalten das einmalige Herrichten des Untergrundes für die Siloschläuche sowie folgende Arbeitsschritte für jede Versuchsdurchführung:

### Vorbereitung

- Mischen des Festmistes 1 - 3 Tage im Voraus
- Positionieren des AG-Baggers
- Aufziehen des Schlauches auf die Maschine
- Aufstellen des Gitters des AG-Baggers als Anfangsbegrenzung
- Einlegen des Drainageschlauches für die Gasableitung

### Befüllung

- Transport des Gärmaterials zur Befüllmaschine
- Befüllung des Schlauches mittels Silopresse, Kran oder Frontlader

### Nacharbeiten

- Schließen des Folienschlauches
- Setzen der Ventile für Gasleitung und Messanlagen
- Abdecken des Folienschlauches mit Abdeckmaterial (Dämmwolle, Filz oder Luftpolsterfolie und Silofolie)
- Befestigung der Silofolie mit Autoreifen
- Reinigung des AG-Baggers
- Reinigung der Flächen um den Siloschlauch

Die Arbeitszeit für die Vorbereitung des Untergrundes ist aus nachfolgender Tabelle ersichtlich.

**Tabelle 3.5-1: Vorbereitung des Untergrundes für die Folienschläuche**

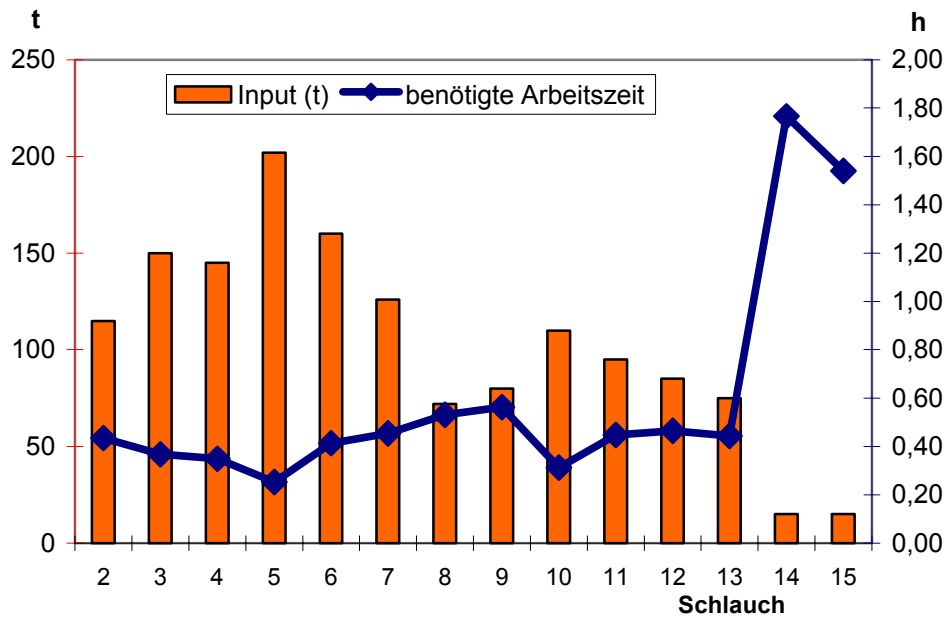
Tätigkeit	Arbeitszeit (h)		
	Schlauch 1	Schlauch 2	Schlauch 3
Ausrollen und Zerschneiden der Gummimatten	12,0	12,0	7,5
Verlegen der Heizstäbe	1,0	2,0	1,0
<b>gesamt:</b>	<b>13,0</b>	<b>14,0</b>	<b>8,5</b>

**Tabelle 3.5-2: Arbeitszeit in AKh bei der Trockenfermentation**

	Arbeitszeit (AKh)														
Schlauch	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Vorbereitung	6,5	8,5	7,5	7,0	6,0	9,3	8,0	8,0	7,0	3,0	6,0	7,5	7,5	5,0	4,5
Befüllung	15,0	13,5	20,0	13,5	24,0	40,0	25,5	6,0	8,0	15,0	14,0	27,0	9,8	17,5	14,6
Nacharbeiten	31,0	28,0	27,5	30,0	21,0	17,0	23,8	24,3	30,0	16,3	22,5	5,0	16,0	4,0	4,0
<b>gesamt</b>	<b>52,5</b>	<b>50,0</b>	<b>55,0</b>	<b>50,5</b>	<b>51,0</b>	<b>66,3</b>	<b>57,3</b>	<b>38,3</b>	<b>45,0</b>	<b>34,3</b>	<b>42,5</b>	<b>39,5</b>	<b>33,3</b>	<b>26,5</b>	<b>23,1</b>

**Tabelle 3.5-3: Arbeitszeit in AKh/t Input bei der Trockenfermentation**

	Arbeitszeit (h / t Input)														
Schlauch (Nr./ Durchg.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Input (t)	100	115	150	145	202	160	126	72	80	110	95	85	75	15	15
Vorbereitung	0,07	0,07	0,05	0,05	0,03	0,06	0,06	0,11	0,09	0,03	0,06	0,09	0,10	0,33	0,30
Befüllung	0,15	0,12	0,13	0,09	0,12	0,25	0,20	0,08	0,10	0,14	0,15	0,32	0,13	1,17	0,97
Nacharbeiten	0,31	0,24	0,18	0,21	0,10	0,11	0,19	0,34	0,38	0,15	0,24	0,06	0,21	0,27	0,27
<b>gesamt</b>	<b>0,53</b>	<b>0,43</b>	<b>0,37</b>	<b>0,35</b>	<b>0,25</b>	<b>0,41</b>	<b>0,45</b>	<b>0,53</b>	<b>0,56</b>	<b>0,31</b>	<b>0,45</b>	<b>0,46</b>	<b>0,44</b>	<b>1,77</b>	<b>1,54</b>



**Diagramm 3.5-1: Arbeitszeit in AKh im Zusammenhang mit der Inputmenge**

Es ist ersichtlich, dass ein Zusammenhang zwischen Arbeitszeit und Länge bzw. Inhalt der Schläuche besteht, der negativ miteinander korreliert. Die Schläuche 14 und 15 wurden jeweils nur mit 15 t statt mit ca. 100 t Rindermist befüllt. Das erklärt den hohen Arbeitszeitaufwand von 1,77 AKh bzw. 1,54 AKh pro t Input bei der Befüllung, weil sich alle durchzuführenden Arbeiten auf eine geringe Menge Inputmaterial beziehen.

### 3.6 Liegezeiten der Schläuche

Die Liegezeiten der Folienschläuche im Versuch waren sehr unterschiedlich. Schlauch 10 lag mit 160 Tagen am längsten. Schlauch 6 musste bereits nach 43 Tagen beräumt werden, weil durch einen Sturmschaden der Folienschlauch großflächig zerrissen wurde. Die meisten Schläuche hatten eine Liegezeit zwischen 11 und 13 Wochen.

**Tabelle 3.6-1: Liegezeiten der einzelnen Schläuche in Tagen**

<b>Schlauch- Nr.</b>	<b>Liegezeit (Tage)</b>	<b>Schlauch- Nr.</b>	<b>Liegezeit (Tage)</b>
1	78	9	83
2	66	10	160
3	76	11	86
4	90	12	76
5	90	13	49
6	43	14	49
7	52	15	49
8	77		

#### **4.1 Versuchsdurchführung und Messwerterfassung**

##### **4.1.1 Versuchsdurchführung**

Bis zum 02.08.2002 war die Befüllung von fünf Schläuchen geplant, für die im Projektplan eine Liegezeit von jeweils sechs Wochen vorgesehen war. Alle zwei Wochen sollte ein neuer Schlauch befüllt werden. Diese Planung wurde aber bereits mit den ersten beiden Versuchen nicht eingehalten. Für den verspäteten Start des Versuchs 2 waren fehlende Messtechnik und zu klärende Fragen hinsichtlich des Explosionsschutzes mit verantwortlich. Deshalb musste der Beginn um reichlich eine Woche verschoben werden. Weitere Abweichungen vom Zeitplan kamen in erster Linie dadurch zustande, dass sich die Versuchsdurchführung u. a. nach der Verfügbarkeit von Gärmaterial, Technik und Arbeitskräften des Lehr- und Versuchsguts richten musste, das für die Absicherung der Versuche verantwortlich war.

In den Sommermonaten waren die verfügbaren personellen und technischen Ressourcen oft aufgrund der Erntesaison begrenzt. Im Jahr 2003 wurden acht Schläuche befüllt, wobei als einziger der Schlauch 14 neben frischem Rindermist noch das Gärhilfsmittel MethaPlus 100 enthielt. Die genauen Versuchszeiträume sind der Tabelle 4.1-1 zu entnehmen.

Für alle Versuche wurde das eingesetzte Inputmaterial nach der Mischung durch einen Bagger oder Frontlader einer etwa dreitägigen Vorrotte ohne aktive Belüftung unterzogen. Die Befüllung der Schläuche erfolgte mit einem AG-Bagger G 7000. Im ersten Versuch wurde für die Beschickung zunächst ein Anhänger mit Kippvorrichtung (Rückwärtskipper) eingesetzt. Diese Technik bewährte sich jedoch nicht, weil durch die große, schlagartig zugeführte Menge Materialstaus am AG-Bagger auftraten. Zudem musste zwischen den bereits verlegten Heizungselementen mit Trak-

tor und Anhänger rangiert werden, was sich als sehr umständlich erwies. Bei einer in einem Betrieb festen Anlage sollten die Heizelemente ebenerdig im Boden installiert werden, um die Fläche befahrbar zu machen. Im weiteren Versuchsverlauf wurde die Befüllung entweder mittels Radlader von vorn oder mit Kran seitlich durchgeführt.

Nach Abschluss der Befüllung erfolgte in der Regel noch am gleichen Tag der Anschluss von Heizung und Gasleitungen sowie die Inbetriebnahme der zugehörigen Messtechnik. In den Versuchen S1, S2, S3 und S5 kam als Substrat eine Mischung aus frischem und gelagertem Rindermist im Verhältnis 1:1 zum Einsatz. Im Schlauch 1 wurde während der Befüllung im Substrat ein großer Anteil Futterreste festgestellt, weil hauptsächlich aus Platzgründen auf dem Versuchsgut keine ausreichende Trennung und separate Lagerung der Materialien erfolgte. Daher konnte auch über die Anteile an frischem und gelagertem Mist sowie an Futterresten keine genaue Aussage getroffen werden. Dieser Mangel wurde aber im Hinblick auf die Folgeversuche weitestgehend abgestellt. 2003 wurde als Input vorrangig Rindermist und Silage bzw. Futterreste verwendet. Für die letzten Versuche im Schlauch 13 und 15 kam nur frischer Rindermist zur Vergärung und bei S14 wurde neben Rindermist das Gärhilfsmittel MethaPlus 100 verwendet.

**Tabelle 4.1-1: Versuchszeiträume, Mengen und Substrate im Folienschlauch**

Schlauch	Befüllen	Beräumen	Liegezeit [Tage]	Menge [t]	Menge [m³]	Substrat
1	29.04.02	15.07.02	78	100	133	80 t Rindermist (geschätzt) 20 t Silage (geschätzt)
2	22.5.02	26.07.02	66	115	153	57 t Rindermist (alt) 57 t Rindermist (frisch)
3	03.07.02	16.09.02	76	150	200	75 t Rindermist (frisch) 75 t Rindermist (alt)
4	17.07.02	14.10.02	90	145	193	75 t Rindermist (frisch) 70 t Rindermist (alt)
5	02.08.02	30.10.02	90	202	269	101 t Rindermist (frisch) 101 t Rindermist (alt)
6	18.09.02	30.10.02	43*	160	213	112 t Rindermist (alt) 48 t Futterreste und Maissilage

Schlauch	Befüllen	Beräumen	Liegezeit [Tage]	Menge [t]	Menge [m³]	Substrat
7	16.10.02	20.01.03	52**	126	168	60 t Rindermist (frisch) 60 t Rindermist (alt) 6 t Sojaganzpflanzen
8	28.01.03	14.04.03	77	72	96	6 t Rindermist (frisch) 11 t Futterreste Impfmaterial aus S7
9	20.03.03	11.06.03	83	80	107	40 t Rindermist (frisch) 40 t Rindermist (alt, trocken, hoher Strohanteil)
10	02.04.03	08.09.03	160	110	147	72 t Rindermist (frisch) 38 t Silage
11	06.05.03	30.07.03	86	95	127	65 t Rindermist (alt) 30 t Anwelksilage
12	25.06.03	08.09.03	76	85	113	81 t Rindermist frisch) 4 t Futterreste
13	07.08.03	24.09.03	49	75	100	75 t Rindermist (frisch, feucht)
14	25.09.03	13.11.03	49	15	20	15 t Rindermist (frisch) Gärhilfsmittel MethaPlus 100
15	25.09.03	13.11.03	49	15	20	15 t Rindermist (frisch)

\* großer Sturmschaden

\*\* Messung am 6.12.02 eingestellt

## 4.2 Einfluss der Vorbehandlung des Substrates auf den Gärprozess

### 4.2.1 Mischung

In den Versuchen mit dem AG-BAG-Verfahren erfolgte als Vorbehandlung des Rohmaterials eine Durchmischung mit Hilfe eines Kranes. Die Durchmischung diente neben der gleichmäßigen Verteil-



lung der Komponenten auch der Auflockerung des Materials und damit der Luftzufuhr für die anschließende Vorrotte.

In unserem Versuch in Köllitsch wurde frischer und gelagerter Rindermist sowie Silage und Futterreste verwendet. Bei der alleinigen Vergärung von Mist ist eine grobe Mischung beider Komponenten ausreichend. Enthält das Substrat allerdings Pflanzenreste oder Silage, ist eine gute Vermischung der Komponenten unerlässlich. Sonst können sich leicht bei ungenügender Einmischung solcher Substrate versäuerte Zonen bilden, in denen lokale Hemmungen des Gärprozesses auftreten.

Bei unseren Versuchen konnte durch diese einfache Mischmethode mit dem Kran die Entstehung größerer, nicht angeimpfter Zonen vermieden werden. Durch die Rotor- und Dosierwalzen an der Befüllmaschine werden die Komponenten nochmals vermengt, bevor sie in den Folienschlauch gelangen. Die Mischung in dieser Form stellte eine ausreichende Homogenisierung sicher.

#### **4.2.2 Vorrotte**

Die ein- bis dreitägige Vorrotte an der freien Luft, der die Substrate im bisherigen Ablauf vor der Befüllung der Schläuche ausgesetzt waren, diente hauptsächlich der Selbsterwärmung des Materials.

Die Vorrotte hatte die größte Bedeutung für die Vergärungstemperatur im Schlauch, denn nur durch die vorherige Luftzufuhr konnte überhaupt so eine hohe Substrattemperatur erreicht werden. Ein zusätzlicher Aufschluss der Bestandteile für die Vergärung war in geringem Maße nur bei Stroh zu erwarten. Die Rinderexkreme sind sowieso mit methanogenen Bakterien versetzt, somit sind Futterreste und Exkreme im Allgemeinen gut für die Vergärung geeignet. Nach den bisherigen Erkenntnissen war die Vorrotte an der freien Luft für Rindermist in unseren Biogasversuchen in Köllitsch ausreichend, eine aktive Belüftung erwies sich als unnötig. Beim Einsatz größerer Silage- und Futterrestmengen ist eine aktive Belüftung während der Vorrotte sicher von Vorteil.

#### **4.3 Ermittlung der Inputmengen**

Außer bei Schlauch 1 wurden für alle Versuche die in Tabelle 4.1-1 angegebenen Mengen des Inputs mittels einer Fahrzeugwaage anhand von Stichproben ermittelt. Die Genauigkeit der Verwiegung ist bei Schlauch 2 allerdings als relativ gering einzuschätzen. Es kamen zwei verschiedene Radlader für die Befüllung zum Einsatz, deren Schaufelinhalt nur jeweils einmal bei 84 und 90 umgeschlagenen Schaufeln verwogen wurde. Diese Angaben können nicht als repräsentative Stichprobe gelten. Empfohlen wurde, mit jedem Radlader mindestens 10-mal auf die Waage zu fahren. Für die Schläuche 3 und 4, bei denen der Antransport mit einem Anhänger vorgenommen wurde, erfolgten fünf Verwiegungen bei insgesamt 13 Fahrten. In diesen Fällen kann von einem ausreichend genauen Ergebnis ausgegangen werden.

Bei Schlauch 5 wurde ein Schlauch mit größerem Durchmesser verwendet, so dass mehr Substrat eingefüllt werden konnte. Hier wurde sogar bei jeder Fahrt das Frischmassegewicht ermittelt. Schlauch 8 wurde am 28.1.2003 gelegt und wird als Start eines „Winterprojektes“ gesehen.

Für die Folgeversuche 9 bis 15 wurden Probewiegungen der Schaufeln durchgeführt und die Schaufeln für die Mengenerfassung gezählt. Die Schläuche 14 und 15 wurden am selben Tag gelegt und hatten eine Liegedauer von 49 Tagen. In beiden Schläuchen wurden 15 t frischer Rindermist gelagert. Allerdings wurde dem Material im Schlauch 14 das Gärhilfsmittel MethaPlus 100 in einer Dosierung von 400 g/400 l Wasser zugegeben. Das Gärhilfsmittel wurde mit einem Mixer in warmem Wasser gelöst und mit einer Gießkanne aufgebracht.

#### **4.4 Messwerverfassung**

Es erfolgte Aufbau und Erprobung eines vorher entworfenen Messkonzeptes, bei dem Mitarbeiter der BTU Cottbus und der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) verschiedene Prozessparameter erfassten.

Die eingebaute Messtechnik, insbesondere die Flügelradsonden, wurden vor Beginn der Praxisversuche im Labor des Lehrstuhls Abfallwirtschaft der BTU Cottbus ausgiebigen Tests mit Druckluft unterzogen, mit denen die Funktion der konzipierten Messanordnung überprüft wurde. Diese Tests verliefen erfolgreich, konnten allerdings nicht alle realen Betriebsbedingungen nachbilden. Die Auswertung der ersten in Köllitsch gewonnenen Messergebnisse offenbarte bereits einige Probleme mit der Messtechnik (siehe Kapitel 4.7). So kam es nach längerer Betriebszeit immer wieder zu einer Fehlfunktion des Messprogramms. Der Durchmesser der Flügelradsonden war zu Beginn des Projektes für einen größeren Gasdurchsatz konzipiert. Zu vermuten ist hier eher ein Zusammenspiel mehrerer Faktoren bzw. die Überlagerung mehrerer Effekte. Es hat sich gezeigt, dass durch die Sogwirkung des laufenden BHKWs die Strömungsgeschwindigkeit in der Messstrecke erhöht und so von der Messanordnung meistens erfasst wurde.

Um die erforderliche Strömungsgeschwindigkeit ständig erzeugen zu können, ist der Einbau einer Pumpe (z. B. einer Membranpumpe) mit geringer Leistung in der Sammelleitung zum Gasspeicher zu empfehlen. Allerdings müsste auch hier ein Abschalten bei entstehendem Unterdruck auf der Seite der Schlauchfermenter vorgesehen werden, um die Pumpe nicht gegen einen immer größer werdenden Unterdruck arbeiten zu lassen, wenn wenig Gas entsteht.

Um dem vermuteten Problem der Hemmung der Flügelradsonden durch Kondenswasser zu begegnen, sind unterschiedliche Veränderungen denkbar, deren Ziel eine weitgehende Kondensation des im Gas mitgeführten Wasserdampfes vor der Messstrecke sein muss.

Für die Versuche 2003 wurde die Software des Computers überarbeitet und modernisiert. Im Verlauf der Versuche kam es jedoch immer wieder zu Ausfallzeiten, in denen keine brauchbaren

Messwerte gewonnen werden konnten. Strömungsgeschwindigkeit und Druck sowie Biogas- und Substrattemperatur wurden für jeden Schlauchfermenter getrennt aufgezeichnet.

Ein wesentlicher Vorteil der verwendeten Messanordnung war, dass sie eine durchgehende Erfassung einer Vielzahl von Parametern, zum Teil separat für jeden Folienschlauch, erlaubt. Bedingt durch die kurzen Messabstände entstanden sehr große Datenmengen, die einerseits zwar eine genaue zeitliche Verfolgung von Änderungen der Betriebszustände erlaubten, andererseits aber auch den Zeitaufwand für die Auswertung beträchtlich erhöhten. Ein schnelles Eingreifen und Reagieren bei Störungen war deshalb nahezu unmöglich. Außerdem lagen die aufbereiteten Daten in der Regel erst ein bis zwei Wochen nach den Messungen vor, so dass es nur schwer realisierbar war, erkannte Mängel und Erfahrungen aus einem Versuch bei den nächsten Schläuchen zu berücksichtigen. Deshalb wäre für ähnlich organisierte Projekte eine Auswertung vor Ort (die Daten wurden an der BTU Cottbus umgerechnet) oder eine konsequentere Nutzung vorhandener Möglichkeiten zur schnelleren Datenübertragung, z. B. per E-Mail, erforderlich.

Leider erwiesen sich sowohl der Messrechner bzw. die verwendete Software als auch Teile der Messinstrumente als recht störanfällig. Die zeitweiligen Fehlfunktionen des Messprogramms waren nur durch Eingriffe des Personals vor Ort zu minimieren. Die Ausfälle konnten nach wie vor nicht einer speziellen Ursache zugeordnet werden. Denkbar sind hier sowohl Fehler am Rechner selbst als auch äußere Einflüsse. Weil die Ausfälle nicht zu einheitlichen Zeitpunkten auftraten, wird die Ermittlung eventueller Störeinflüsse zusätzlich erschwert.

#### **4.5 Gemessene Parameter**

Durch Projektmitarbeiter der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft wurden folgende Parameter gemessen:

##### *- Gasdurchsatz am BHKW*

Unmittelbar vor dem Gasmotor des BHKW wurde ein Gasbalgzähler eingebaut, der die vom BHKW verbrannte Menge Biogas erfasste. Er wurde einmal täglich abgelesen.

##### *- Gaszusammensetzung*

Die Gaszusammensetzung, insbesondere der Methangehalt, ist einer der wichtigsten Parameter zur Einschätzung des Prozessverlaufs. Erfasst wurden der Gehalt an CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>S im trockenen Gas mit dem Mehrgasmessgerät SR2-DO.

##### *- Betriebsstunden des BHKW*

Die Erfassung der Betriebsstunden des BHKW erlaubte Rückschlüsse auf die erzielten Laufleistungen und das Verschleißverhalten des Motors, z. B. aufgrund des im Biogas enthaltenen H<sub>2</sub>S. Die ins Netz eingespeiste Strommenge konnte mittels Zähler erst ab Januar 2003 gemessen werden. Bis dahin wurde die Stromerzeugung über die Betriebsstunden des BHKW abgeschätzt.

*- Stromabgabe in das öffentliche Netz*

Die erzeugte Strommenge wurde mit einem Stromzähler gemessen.

*- Wärmemenge, gemessen an Heizung und Notkühler*

Die vom BHKW an die Heizung der Fermenter bzw. Schläuche und den Notkühler abgegebenen Wärmemengen gaben Aufschluss über den Energiebedarf für die Beheizung der Fermenter. Zusammen mit der Messung der Temperaturen in den Schlauchfermentern konnte die Effektivität der installierten Bodenheizung bewertet werden.

*- Temperatur in den Folienschläuchen*

Die Temperatur der einzelnen Schläuche wurde in drei verschiedenen Messstellen und –tiefen (20, 60 und 100 cm) gemessen. Mit der Temperaturmessung im Innern eines Schlauches sollte überprüft werden, ob eine für die Prozesse der Biogasbildung günstige Temperatur herrscht und ob diese durch die Beheizung konstant gehalten werden kann. Somit erlaubte sie Rückschlüsse auf die Wirksamkeit von Heizung und Wärmedämmung.

*- Außentemperatur*

Sie erlaubte im begrenzten Umfang die Einschätzung von Witterungseinflüssen auf die Isolierung und Wärmeführung im Fermenter.

*- Kondensatmengen*

Die an den Messstrecken angebrachten Auffangbehälter für Kondenswasser wurden täglich geleert und die dort und am zentralen Kondensatabscheider anfallenden Flüssigkeitsmengen ermittelt. Aus diesen Mengen lassen sich Rückschlüsse auf den Feuchtegehalt des Gases ziehen.

Zwischen der Summe der Einzelmessungen an den Fermentern bzw. Schläuchen (BTU) und dem Gasdurchsatz am BHKW (Lfl) wurden erhebliche Differenzen festgestellt. Ursachen hierfür waren u. a. häufige Fehlfunktionen der zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit eingebauten Flügelradsonden und des Rechners zur Online-Registrierung der Messwerte.

Die Datenerfassung der Versuche von 2002 musste nach dem 06.12.02 eingestellt werden. Die Außentemperaturen waren unter den Gefrierpunkt gesunken und Schlauch 7 hatte im inneren eine Temperatur von 14,7 °C und im äußeren Bereich von 8° C, die Gasproduktion kam zum Erliegen. Im nächsten Jahr wurden die Versuche mit dem Schlauch 8 am 28.01.03 fortgesetzt und mit den Schläuchen 14 und 15 am 13.11.03 beendet.

Die zu Beginn des Abschnitts aufgeführten Messgrößen (Druck, Strömungsgeschwindigkeit sowie Biogas- und Substrattemperatur) wurden im Abstand von 30 Sekunden (s) erfasst und von einem Rechner gespeichert. Die verhältnismäßig kurzen Messabstände wurden aufgrund der sich rasch ändernden Strömungsgeschwindigkeiten des Gases durch die Flügelradsonden gewählt. Für die sonstigen Druck- und Temperaturmessungen wären auch deutlich längere Zeitabstände ausrei-

chend. Die Sicherung der Daten am Messrechner erfolgte anfangs aller drei bis vier Tage und wurde später täglich vorgenommen.

Für jeden Versuch bzw. Schlauch entstand im Rahmen der Auswertung eine Datei, die zwischen 2.500 und 3.000 Datensätze enthält. Die erhaltenen Messdaten wurden zuerst in weiteren Dateien in der Form komprimiert, dass z. B. Tagesmittelwerte gebildet wurden, aus denen die tägliche Gasproduktion ablesbar wurde. Die komprimierten Daten bildeten die Grundlage für die grafischen Darstellungen der Messergebnisse. Die online erfassten Daten wurden der LfL von der BTU Cottbus zur Verfügung gestellt und flossen in die Auswertungen ein.

Leider gingen durch unvorhergesehene Strom- und Rechnerausfälle mehrere Datensätze verloren und einige Datensätze konnten durch Fehlmessungen nicht ausgewertet werden.

Weil am Zähler keine Erfassung von Druck und Temperatur erfolgte, war am Gasbalgzähler eine Umrechnung in das Normvolumen nicht möglich. Deshalb wurde für die Ermittlung des Normvolumenstromes folgende thermische Zustandsgleichung idealer Gase verwendet. Die Formel zur Berechnung lautet:

$$Q_N = \frac{p_N \times Q}{T_N + T}$$

$Q_N$  Normvolumenstrom

$Q$  gemessener Volumenstrom

$p_N$  Normdruck (1.013,25 mbar = 1,01325 × 10<sup>5</sup> Pa)

$T_N$  Normtemperatur (273,15 K)

$T$  gemessene Temperatur des Gases

Streng genommen handelt es sich bei den gemessenen Komponenten des Biogases nicht um ideale Gase. Die Realgasfaktoren, die für die gegebenen Druck- und Temperaturverhältnisse berücksichtigt werden müssten, liegen für CH<sub>4</sub> und CO<sub>2</sub> allerdings äußerst nahe bei 1, so dass sie aus entsprechenden Diagrammen kaum genau abzulesen sind. Deshalb wurden sie hier gleich 1 gesetzt.

Die täglich gemessenen Werte der Gaszusammensetzung ermöglichen die Beurteilung des Energieinhalts des Biogases und damit die Bestimmung des Heizwertes. Der Heizwert erlaubt anhand der technischen Daten des BHKW eine Abschätzung, wie viel elektrische und thermische Energie aus dem gebildeten Biogas gewonnen werden kann und ist somit auch für die ökonomische Bewertung des Verfahrens von Bedeutung.

#### **4.6 Substratbeprobung von In- und Output**

Vor der Befüllung der Schläuche wurde von den Mitarbeitern der LfL Proben des zu vergärenden Substrates (Input) und zu Versuchsende nach dem Aufschneiden der Schläuche wiederum Proben vom vergorenem Substrat (Output) entnommen.

Für die Beurteilung der Inhaltsstoffe müssen zusätzlich die Umstände der Probenahme während der laufenden Befüllung oder Entleerung in Betracht gezogen werden. Die statistische Sicherheit, für die jeweils eine größere Anzahl Proben entnommen werden müsste, wurde nicht berechnet. Es konnten nur jeweils sehr kleine Mengen, allerdings aus mehreren antransportierten Anhängerladungen bzw. verschiedenen Bereichen des geöffneten Schlauches, entnommen und dann zu einer Gesamtprobe von etwa 5 kg Masse gemischt werden. Eine Probennahme während der Liegezeit war nicht möglich.

Die Proben vom In- und Output der einzelnen Schläuche wurden im Labor des Fachbereiches 8 in Leipzig-Möckern analysiert. Dabei wurden neben TS, oTS und pH-Wert, der Gehalt an Gesamt- und Ammoniumstickstoff, Gesamtphosphat und -kalium sowie die Konzentrationen der Schwermetalle Blei, Cadmium, Kupfer, Chrom, Nickel, Quecksilber und Zink bestimmt. Vor der Befüllung der Schläuche im Jahr 2002 erfolgte keine Messung der Substrattemperatur. Diese erfolgte erst 2003. Unmittelbar vor der Befüllung der Folienschläuche wurde mit einem digitalen Stabthermometer an mehreren Stellen die Substrattemperatur gemessen.

#### **4.7 Probleme während der Versuche**

Nach Beginn des Versuchs 3 (Schlauch 3) traten am betreffenden Schlauch einige Störungen auf, die nach den vorgefundenen Schäden und Zuständen sowie nach Auswertung der Messwerte nur den Schluss auf Eingriffe unbefugter Personen zuließen. So war das Ventil, in dem die Temperaturmessung angebracht war, mehrmals geöffnet und einmal sogar so beschädigt, dass es ausgetauscht werden musste. Hinzu kam ein offensichtlich über mehrere Tage unbemerkt gebliebener, geschlossener Absperrhahn zwischen Messstrecke und Gasspeicher.

Während des gesamten Versuchszeitraumes waren hohe Ausfälle des Messprogramms und andere technische und witterungsbedingte Ausfälle zu verzeichnen.

Ebenso hoch waren die Probleme mit dem BHKW und es wurden enorme Ausfallzeiten verzeichnet. Obwohl der zuständige Servicedienst sehr häufig angefordert wurde und Veränderungen an der Steuerung des BHKW etc. vornahm, wurden die Ausfallzeiten nur unbedeutend geringer. Ab dem 14.08.02 wurde das BHKW von einer anderen Firma betreut.

Auch für die Gaszusammensetzung konnten nicht durchgehend plausible Werte ermittelt werden, weil das Messgerät SR2-DO mehrfach unzuverlässig arbeitete, was auch durch zwischenzeitliche

Eichungen und den Austausch des Gerätes nicht vollkommen beseitigt werden konnte (siehe auch Punkt 5.4 Gaszusammensetzung).

Dass das Mehrgasmessgerät nicht ordnungsgemäß arbeitete, zeigt sich daran, dass an einigen Versuchstagen plötzlich ein starker Abfall sowohl des Methan- als auch des Kohlendioxidgehalts zu verzeichnen war, der die Messwerte zweifelhaft erscheinen ließ. Stellenweise wurde auch ein sprunghafter Anstieg des Gehalts an Schwefelwasserstoff registriert, von dem ebenfalls unklar ist, ob er den realen Verhältnissen entspricht oder auf fehlerhafte Messungen zurückzuführen ist.

#### **4.8 Technische Veränderungen während der Versuchsdurchführung**

Im Verlauf der Biogasversuche in Köllitsch wurden folgende technischen Veränderungen gegenüber dem Ausgangszustand vorgenommen:

- *Veränderungen an der AG-BAG-Maschine gegenüber der Schlauchsilierung:*

Entwicklung einer praxistauglichen Konstruktion zum Einlegen von drei Gasableitungen in den Schlauch während des Befüllungsprozesses (Halterungen und integrierte Tunnelführung)

- *Entwicklung des Heizsystems*

Austattung von Heizstäben verschiedener Materialien, Längen und Stärken auf Stabilität und Wärmeleitfähigkeit

- *Test der Temperaturführung in den Schläuchen mit verschiedenen Isoliermaterialien*

Ziel sollte sein, über den gesamten Schlauchquerschnitt eine möglichst konstante Temperatur im Bereich von 35 bis 38°C zu erreichen.

- *Entwicklung der Schlauchqualität*

Prüfung verschiedener Schlauchqualitäten - Dicke, Anzahl der Schichten, Farbkombinationen, verschiedene Zusatzstoffe - (siehe Literaturliste BAG Budissa)

- *Umbau der Flügelradsonden für eine bessere Messqualität*

Die Temperaturmessungen in den Schlauchfermentern deckten erhebliche Mängel am Temperaturverlauf im Substrat und an der Wirksamkeit der Heizung auf. So sollte als erstes die Temperaturführung optimiert werden. Dazu wurden erste, einfach zu verwirklichende Änderungen an der Heizung und Wärmedämmung vorgenommen:

- Installation einer externen Beheizung,
- Testung verschiedener Dämmmaterialien (Rockwool 8 cm und 15 cm, Nadel-, Rübenfließ, Luftpolsterfolie)
- Isolierung der Gas- und Wasserleitungen
- Wärmedämmung zum Boden mit Schotter, Gummimatten, Roofmate.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

### 5.1 Messung der Gasproduktion

Mit der beschriebenen Messanordnung konnte während der durchgeführten Versuche ein nach Schläuchen getrennter Verlauf der Gasproduktion ermittelt werden (BTU). Bei der Konzeption der Volumenstrommessungen konnte im Wesentlichen nur auf Angaben der BAG Budissa Agroservice GmbH, abgeleitet von den Veröffentlichungen des ATB Potsdam, zurückgegriffen werden, die pro Schlauchfermenter eine tägliche Biogasproduktion von etwa 200 m<sup>3</sup>/d erwartete, was einem durchschnittlichen Volumenstrom von etwa 8 m<sup>3</sup>/h entspricht. Allerdings waren hier durch den nicht durchgehenden Betrieb des Blockheizkraftwerkes (BHKW) erhebliche Schwankungen in beiden Richtungen zu erwarten, die durch den Messbereich vollständig mit erfasst werden müssen. In der Projektbeschreibung für das Versuchsvorhaben in Köllitsch wurde von einer Gasproduktion zwischen 1,5 und 2,5 m<sup>3</sup> pro m<sup>3</sup> Input und Tag im ersten Drittel und zwischen 1 und 1,5 m<sup>3</sup> pro m<sup>3</sup> Input und Tag im zweiten Drittel der Verweildauer ausgegangen. Zusammen mit den in Tabelle 4.1-1 aufgeführten Inputmassen wäre pro Schlauch mit einer täglichen Gasproduktion zwischen 115 und über 500 m<sup>3</sup> zu rechnen.

Am Gaszähler des BHKW wurde nur der Gesamtgasanfall aller Schläuche erfasst. Deshalb erfolgte die prozentuale Aufteilung des Gases auf die einzelnen Schläuche nach dem Gasanfall des von den Flügelradsonden gemessenen Gasstromes. Das Normgas wurde nach der Formel

$$Q_N = \frac{p_N \times Q}{T_N + T}$$

ermittelt (siehe auch Kapitel 4.5).

Interessant ist an dieser Stelle ein Vergleich der von den Flügelradsonden registrierten mit den am BHKW gemessenen Gasvolumina. Die insgesamt gemessene Gasmenge müsste größer sein als am BHKW, weil zu Beginn jedes Versuchs Gas mit noch geringem Methananteil hinter der jeweiligen Messstrecke in die Atmosphäre entlassen wurde. Letztendlich müssten aber ab dem Zuschalten der jeweiligen Schlauchfermenter zum Gasspeicher gleiche Gasmengen, zeitlich verzögert, auch am BHKW registriert werden. In der Praxis zeigte sich jedoch das Gegenteil, am Gasbalgzähler vor dem BHKW wurden vom Beginn der Versuche im April bis zum November 2002 Biogas in einer Menge von 12.170,971 Nm<sup>3</sup> registriert, an den Flügelradsonden dagegen nur 7528,568 Nm<sup>3</sup>. Ähnliche Ergebnisse wurden im Jahr 2003 erzielt (siehe Tabelle 4.1-1).



**Tabelle 5.1-1: Gegenüberstellung der Biogaserträge in VN[m³] gemessen an den Flügelradsonden und am Gasbalgenzähler vor dem BHKW**

Monat/ Jahr	Summe FRS VN[m³]	Summe Gasbalgenzähler VN[m³]	eingespeiste kWh
04/02	0	0	0
05/02	1278,450	1201,194	1441
06/02	1598,130	2031,490	2438
07/02	1875,439	3553,275	4264
08/02	1692,131	3885,089	4662
09/02	1002,714	1241,755	1490
10/02	81,152	96,683	116
11/02	0,552	161,484	194
<b>Summe 2002</b>	<b>7528,568</b>	<b>12170,971</b>	<b>**14605</b>
02/03	0*	368,575	294
03/03	0*	597,461	828
04/03	368,621	94,250	142
05/03	1610,437	939,669	1316
06/03	1795,326	2342,130	3593
07/03	2642,817	2140,895	2808
08/03	635,616	798,973	1076
09/03	86,508	0,000	20
10/03	43,505	135,876	225
11/03	3,594	21,743	32
<b>Summe 2003</b>	<b>7186,424</b>	<b>7439,572</b>	<b>10334</b>
<b>insgesamt</b>	<b>14714,992</b>	<b>19610,542</b>	<b>24939</b>

\*Einbau Flügelradsonden erst am 2.4.2003

\*\*errechnet

In den meisten Versuchsmonaten wurde mehr Gas am BHKW durchgesetzt, als in allen drei Messstrecken mit Flügelradsonden registriert wurden. Die Zahlenwerte sind aus folgenden Gründen jedoch nur bedingt vergleichbar:

Am Ausgang des Zählers kann bei laufendem BHKW örtlich von etwa 20 mbar Unterdruck gegenüber dem Atmosphärendruck ausgegangen werden, dieser entsteht durch die Saugwirkung des Motors. Das Normvolumen des registrierten Gases an den Flügelradsonden liegt dadurch bei einer angenommenen mittleren Gastemperatur von 20 °C etwa 10 % unter den am Zähler abgelesenen Werten. Die Temperatur des Gases ist allerdings abhängig von der Witterung (Außentemperatur)

und der vorherigen Verweilzeit im Gasspeicher. Bei Gastemperaturen unter 20 °C steigt die Genauigkeit, bei höheren Temperaturen nimmt sie dagegen ab.

Eine weitere Erklärung der unterschiedlichen Ergebnisse der Messung mit den Flügelradsonden und der Erfassung der Gasmenge am BHKW wäre, dass die Drehbewegung des Flügelrades durch an der Sonde kondensierendes Wasser oder durch im Biogas mitgeführte, sich absetzende Bestandteile (z. B. Schwefel oder Salze) gehemmt wurde.

## 5.2 Energiebilanz des BHKW

Die folgende Tabelle stellt die Energieströme des BHKWs dar.

**Tabelle 5.2-1: Monatliche Energiemengen 2002**

Monat	Betriebsstunden des BHKW	Energiegehalt des Gases	Verbrauch Notkühler	Verbrauch Heizungs-pumpe	Errechnete Stromein-speisung	Differenz/ Verluste
	h	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
05/02	59,23	6607	1800	1379	1441	1987
06/02	100,74	11190	2973	2299	2438	3480
07/02	188,52	19543	4917	3928	4264	6434
08/02	141,66	21368	4919	4077	4662	7710
09/02	48,56	6830	1368	1087	1490	2885
10/02	4,63	532	258	143	116	15
11/02	7,48	888	146	31	194	517
<b>Summe</b>	<b>550,82</b>	<b>66957</b>	<b>16381</b>	<b>12944</b>	<b>14605</b>	<b>23027</b>

In den Monaten Mai 2002 bis zum November 2002 erzielte das BHKW eine Laufleistung von 551 h. Dabei wurden laut Gaszähler am BHKW 12.981 m<sup>3</sup> Biogas oder 12.174 Nm<sup>3</sup> Normbiogas (siehe vorher erläuterte Umrechnung) mit einem durchschnittlichen Energiegehalt von etwa 5,5 kWh/Nm<sup>3</sup> verbrannt. Daraus ergibt sich ein Gesamtenergiegehalt von 66.957 kWh. Die Wärmeenergie wird, abgesehen von Wärmeverlusten an den Aggregaten, entweder in die Bodenheizung eingespeist oder über den Notkühler in die Umgebung abgegeben. Im genannten Zeitraum wurden an den Wärmemengenzählern für die Heizung und den Notkühler 16.381 kWh bzw. 12.944 kWh, zusammen also 29.325 kWh registriert. Das entspricht einem thermischen Wirkungsgrad des BHKW von 43,8 %.

Der elektrische Wirkungsgrad des BHKW wird vom Hersteller mit etwa 33 % angegeben. Aus der durchgesetzten Menge Biogas müssten demzufolge ca. 22.091 kWh Elektroenergie ins Netz eingespeist worden sein. Um die genannte Einspeisung zu erzielen, müsste das BHKW im Umkehr-

schluss über die knapp 551 h Laufzeit eine durchschnittliche elektrische Leistung von annähernd 40 kW erreicht haben und entspräche damit dem installierten BHKW. Weil aus Kostengründen vorerst kein Stromzähler installiert wurde, wurde die Strommenge berechnet.

Seit 2003 erfolgte die Messung der Stromeinspeisung mittels Stromzähler. Deshalb wurde anhand von mehreren Proberechnungen mit Daten von 2003 die Stromeinspeisung von 2002 ermittelt. Es wurden im Jahr 2002 14.605 kWh Elektroenergie ins Netz abgegeben. Das wiederum zeigt, dass bei 551 h Laufzeit des BHKW nur eine durchschnittliche elektrische Leistung von 26,5 kW erreicht wurde. Die niedrige elektrische Leistung ist auf den geringen Gasanfall zurückzuführen. Weil das BHKW im Teillastbereich gefahren wurde, wurde ein elektrischer Wirkungsgrad von nur 21,8 % erreicht. Die Differenz von Strom und Wärme zum Energiegehalt des Gases ist der Energieumwandlungsverlust.

Die folgende Grafik verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Gasanfall und Stromeinspeisung. Daraus konnte ein durchschnittlicher Wert von 1,2 kWh pro m<sup>3</sup> Biogas errechnet werden.

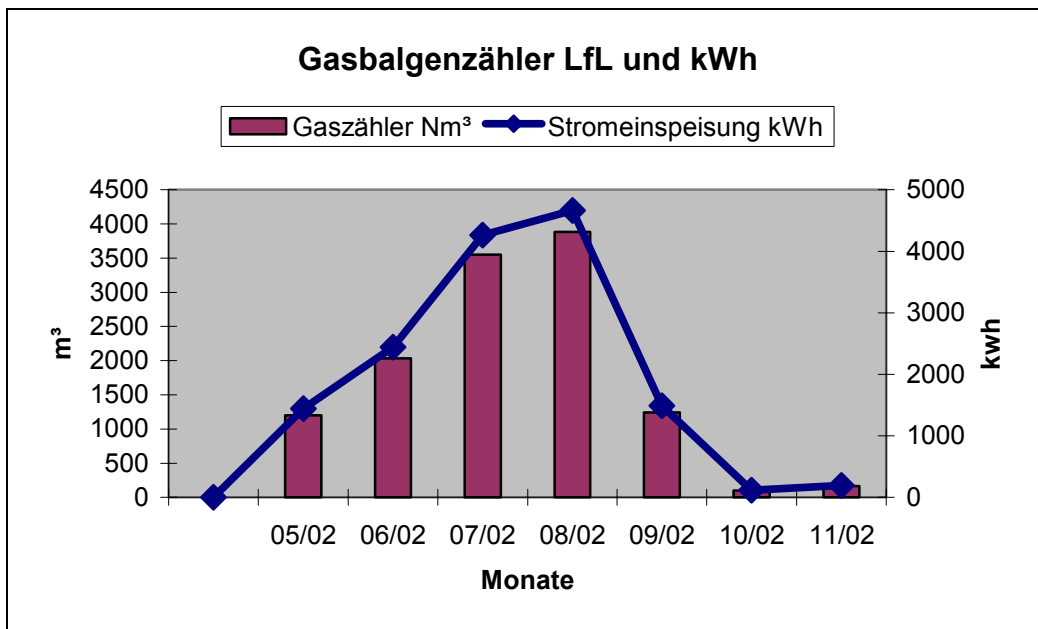
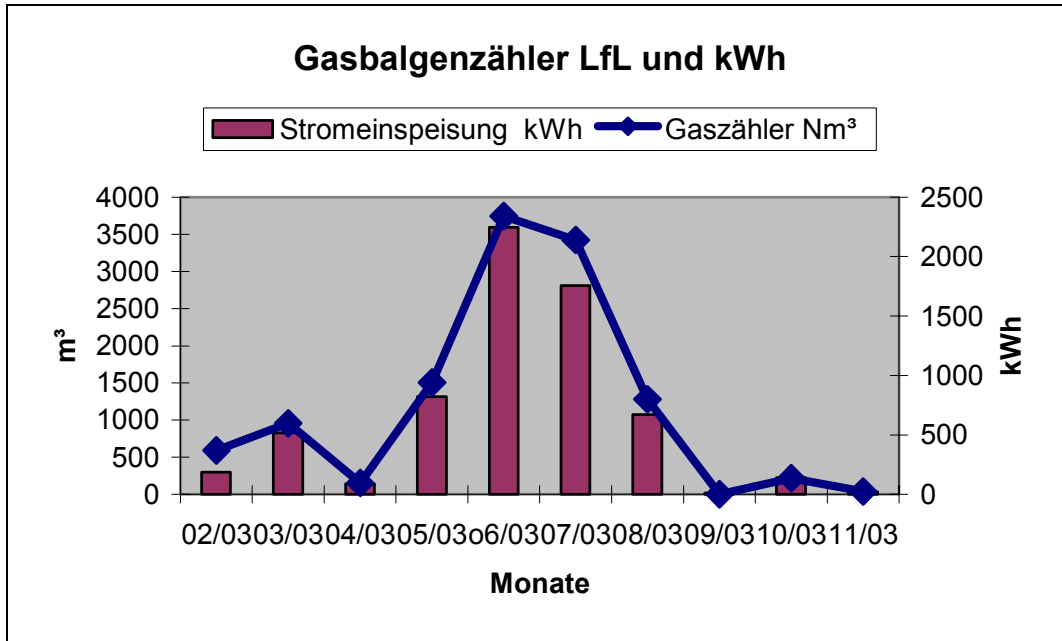


Diagramm 5.2-1: Gegenüberstellung des Gases am Gasbalgzähler und eingespeiste kWh 2002

**Tabelle 5.2-2: Monatliche Energiemengen 2003**

<b>Monat</b>	<b>Betriebs- stunden des BHKW</b>	<b>Energie- Gehalt des Gases</b>	<b>Verbrauch Notkühler</b>	<b>Verbrauch Heizungs- pumpe</b>	<b>Stromein- speisung</b>	<b>Differenz/ Verluste</b>
	<b>h</b>	<b>kWh</b>	<b>kWh</b>	<b>kWh</b>	<b>kWh</b>	<b>kWh</b>
<b>02/03</b>	14,06	2027	1096	248	294	389
<b>03/03</b>	25,21	3286	1280	971	828	207
<b>04/03</b>	4,61	518	75	112	142	189
<b>05/03</b>	44,66	5168	214	1907	1316	1731
<b>06/03</b>	123,26	12882	1777	3925	3593	3587
<b>07/03</b>	96,44	11775	1661	2794	2808	4512
<b>08/03</b>	38,03	4394	567	1238	1076	1513
<b>09/03</b>	0	0	0	0	20	-20
<b>10/03</b>	8,64	747	658	287	225	-423
<b>11/03</b>	1,1	120	211	56	32	-179
<b>Summe</b>	<b>356,01</b>	<b>40918</b>	<b>11538</b>	<b>7440</b>	<b>10334</b>	<b>11606</b>

Analog dazu wurde 2003 eine Laufzeit des BHKW von 356 h mit einem Durchsatz von 7.924 m<sup>3</sup> Biogas bzw. 7.440 Nm<sup>3</sup> Normbiogas ermittelt. Daraus ergibt sich ein Gesamtenergiegehalt von 40.920 kWh, beim thermischen Wirkungsgrad des BHKW von 50 % entstehen 20.460 kWh. In den Monaten Februar bis November 2003 wurden an den Wärmemengenzählern für die Heizung und dem Notkühler 18.978 kWh erfasst, das sind 46,4 % der Energie des Biogases. Aus der durchgesetzten Biogasmenge wurden 10.334 kWh ins Netz eingespeist. Das zeigt, dass bei einer durchschnittlichen Laufzeit des BHKW von nur 356 h eine elektrische Leistung von 29 kW erreicht wurde. Damit liegt sie weit unter den angegebenen 40 kW und den errechneten kW von 2002, ist aber in erster Linie auf geringe Gasmengen zurückzuführen. Der Wirkungsgrad des BHKW liegt bei nur 25,2 % und ist wiederum auf das Betreiben des BHKWs im Teillastbereich zurückzuführen.



**Diagramm 5.2-2: Gegenüberstellung des Gases am Gasbalgzähler und eingespeiste kWh 2003**

### 5.3 Gaserträge der einzelnen Schläuche

Die folgende Tabelle zeigt die Substratmengen, den Gehalt an organischer Trockensubstanz (oTS) sowie die Gasausbeuten der einzelnen Schläuche.

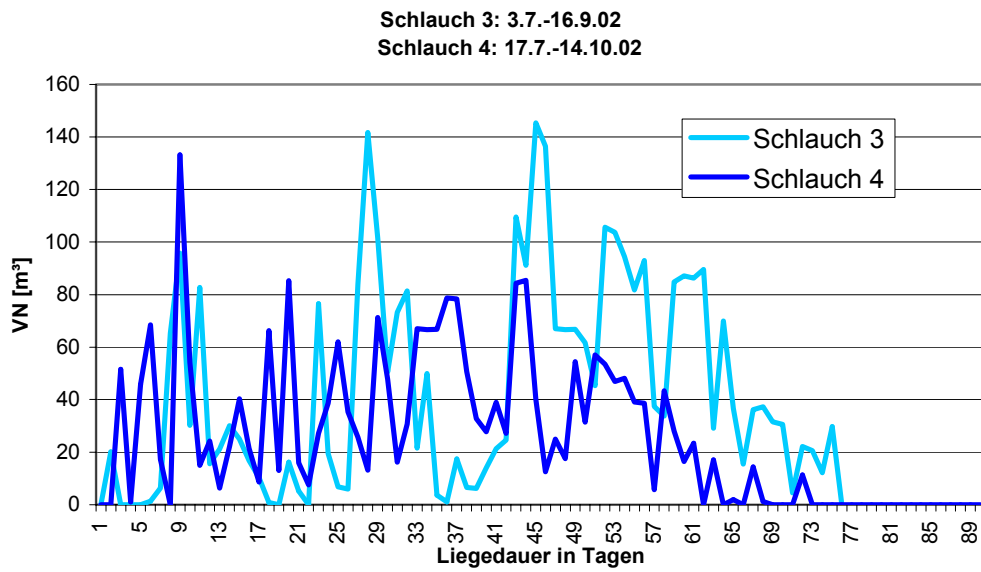
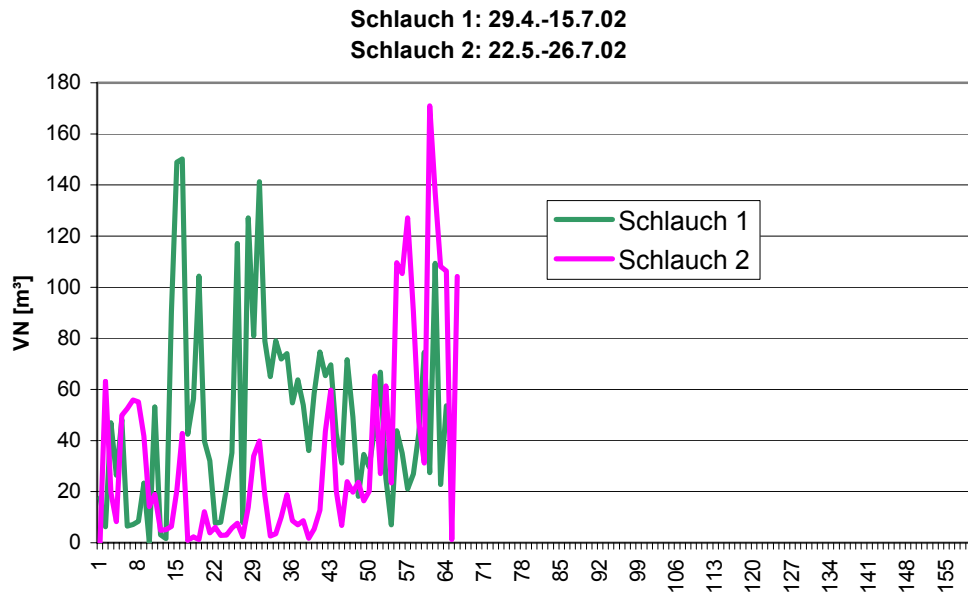
**Tabelle 5.3-1: Mengen und Gasausbeuten der einzelnen Siloschläuche**

Schlauch	Menge	Menge	TS	oTS	oTS	Gas- ausbeute	Gas- ausbeute
	t	m <sup>3</sup>	%	% in TM	kg	V <sub>N</sub> in m <sup>3</sup>	l/kg oTS
1	100	133	33,1	85,0	28135,00	3184,129	113,17
2	115	153	27,4	37,9	11942,29	2243,176	187,83
3	150	200	26,3	39,1	15424,95	3314,089	214,85
4	145	193	25,8	44,3	16572,63	2396,665	144,62
5	202	269	33,7	36,1	24574,74	754,164	30,69
6	160	213	31,5	43,7	22024,80	22,558	1,02
7	126	168	26,5	85,3	28481,67	257,166	9,03
8	72	96	25,5	85,4	15679,44	751,169	47,91
9	80	107	29,1	81,4	19949,92	311,057	16,41
10	110	147	23,7	77,5	20204,25	2730,896	135,16
11	95	127	30,9	72,1	21164,96	2670,956	126,20
12	85	113	34,3	68,8	20058,64	808,757	40,32
13	75	100	33,0	84,8	20988,00	9,092	0,43
14	15	20	24,8	86,6	3221,52	91,937	28,54
15	15	20	36,6	86,8	4765,32	65,682	13,78

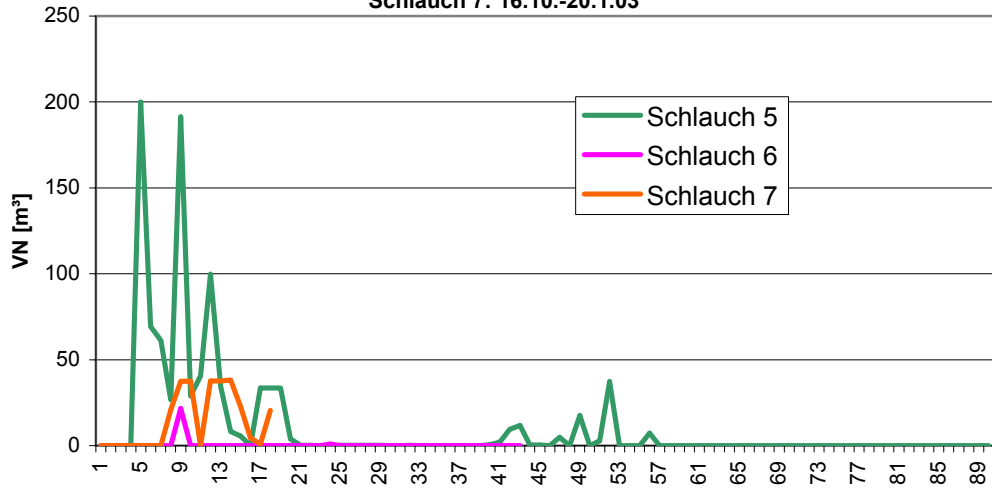
In den nachfolgenden Diagrammen wird der Verlauf der Gasentwicklung aller Schläuche 2002 und 2003 aufgezeigt. Die Diagramme zeigen den Normgasertrag in m<sup>3</sup> und die Liegedauer der einzelnen Schläuche.

Diagramme 5.3-1 bis 5.3-7:

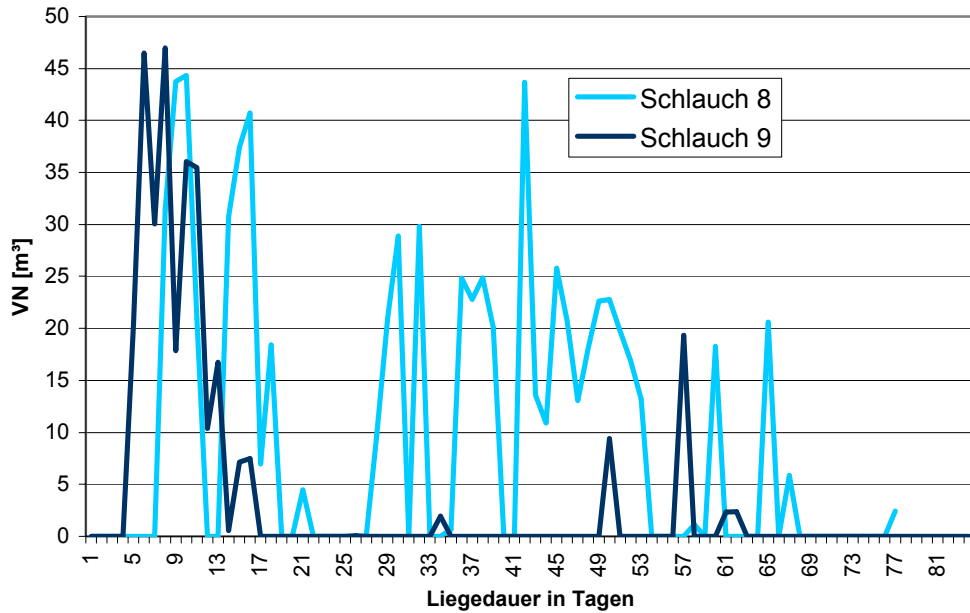
Verlauf der Gasentwicklung in allen Schläuchen



Schlauch 5: 2.8.-30.10.02  
 Schlauch 6: 18.9.-30.10.02  
 Schlauch 7: 16.10.-20.1.03

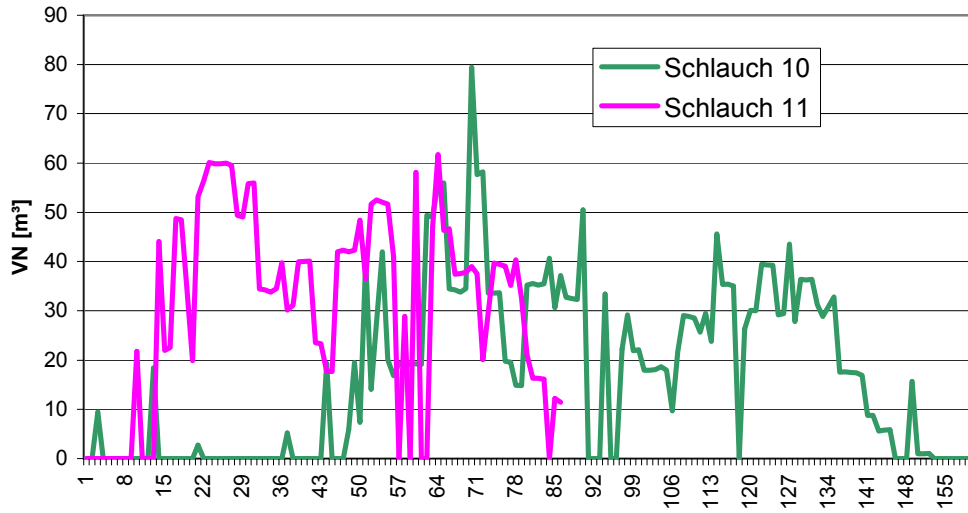


Schlauch 8: 28.1.-14.4.03  
 Schlauch 9: 20.3.-11.6.03

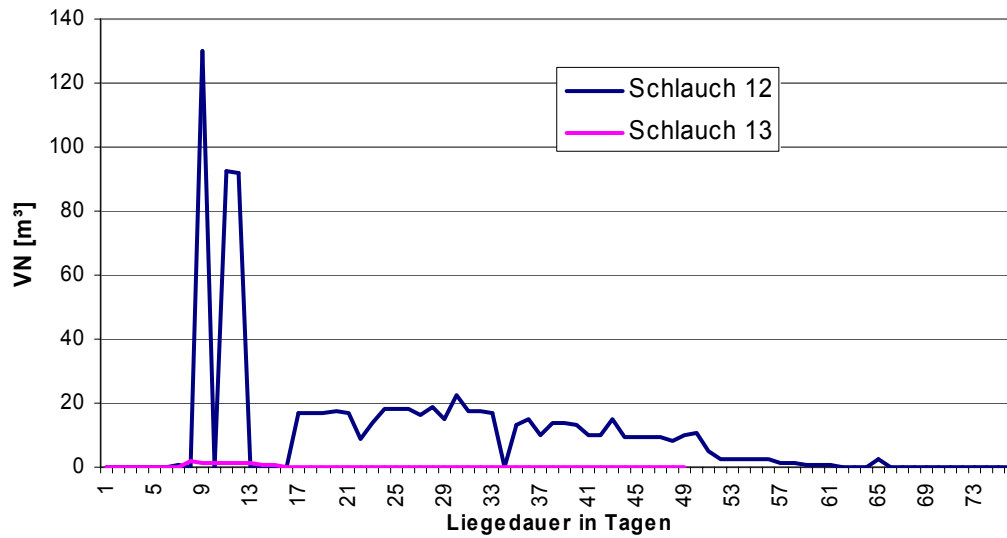




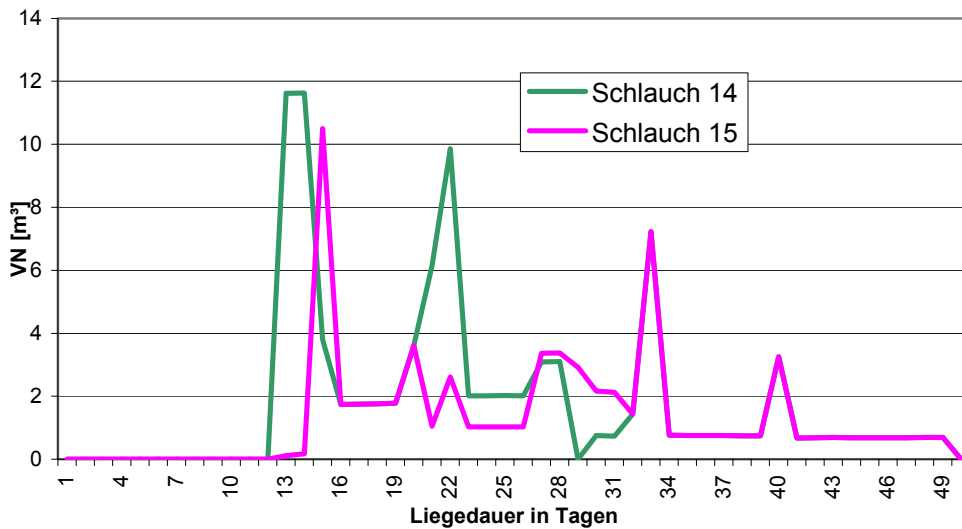
Schlauch 10: 2.4.-8.9.03  
 Schlauch 11: 6.5.-30.7.03



Schlauch 12: 25.6.-8.9.03  
 Schlauch 13: 7.8.-24.9.03



Schlauch 14: 25.9.-13.11.03  
 Schlauch 15: 25.9.-13.11.03



Die Diagramme zeigen die stark schwankenden Gaserträge nicht nur bei den einzelnen Schläuchen, auch der Gasertrag eines Schlauchs fällt oder steigt innerhalb weniger Tage abrupt. Diese ungleichmäßige Gasproduktion ist nur durch die Art der technischen Anlage zu erklären. Durch den Luftabschluss und durch das Einpressen des Substrates hat das Gas wenig Platz, es entstehen dann kleinere Gaslager im Schlauch, die bei einem bestimmten Gasdruck erst den Weg in das eigentliche Gaslager finden. Es lässt sich weiterhin feststellen, dass die erwarteten Gaserträge nur zu einem Bruchteil erreicht wurden.

**Tabelle 5.3-2: Übersicht über die Gasproduktion**

Schlauch	Menge m <sup>3</sup>	Gasproduktion im Substrat m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	Gasproduktion in oTS l/kg
1	133	23,94	113,17
2	153	14,66	187,83
3	200	16,57	214,85
4	193	12,42	144,62
5	269	2,80	30,69
6	213	0,11	1,02
7	168	1,53	9,03
8	96	7,82	47,91

Schlauch	Menge m <sup>3</sup>	Gasproduktion im Substrat m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	Gasproduktion in oTS l/kg
9	107	2,91	16,41
10	147	18,58	135,16
11	127	21,03	126,20
12	113	7,16	40,32
13	100	0,09	0,43
14	20	4,60	28,54
15	20	3,28	13,78

### Gasausbeute der einzelnen Schläuche

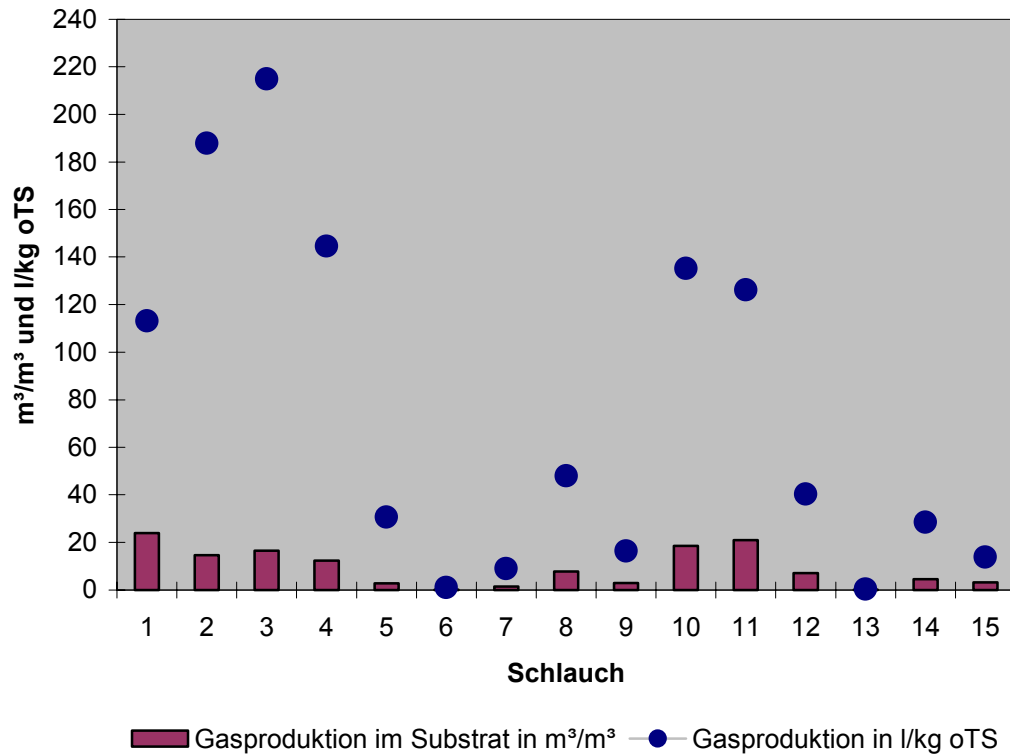


Diagramm 5.3-8: Gasausbeute in m<sup>3</sup> Gas je m<sup>3</sup> Substrat und in Litern je kg organischer Trockensubstanz

Auffällig ist bei allen Versuchen die stark schwankende Gasproduktion der einzelnen Schläuche, die auch bei störungsfreiem Betrieb des Messrechners (BTU) zu verzeichnen war. Wie sich durch Beobachtungen an der Anlage und durch Auswertung der Messwerte zeigte, lieferten die Flügelradsonden über längere Zeiträume nur Nullwerte, obwohl beim Öffnen des Ablasshahns unmittelbar hinter dem Messrohr praktisch immer ein deutlich fühlbarer Gasstrom vorhanden war.

Trotz der wesentlich höheren, am BHKW registrierten Gasmengen entsprachen auch diese bei weitem nicht den in der Projektbeschreibung angegebenen erwarteten Werten. Die größte Gasmenge wurde am BHKW am 10.8.2002 mit etwa 279 m<sup>3</sup>/d registriert. Zu dieser Zeit waren drei Versuche (Schläuche 4, 5 und 3) mit ca. 497 t (ca. 660 m<sup>3</sup>) Input in Betrieb. Das heißt, pro Fermenter wurde eine Gasproduktion von etwa 93 m<sup>3</sup>/d bzw. 0,42 m<sup>3</sup> pro m<sup>3</sup>/d Input erzielt, wenn eine etwa gleich große Gasproduktion in allen drei Schlauchfermentern unterstellt wird.

#### 5.4 Gaszusammensetzung

Die Entwicklung des Methan- und Kohlendioxydgehalts in den Versuchen entsprach weitestgehend den Erwartungen. Bereits nach einem Tag wurden 31 bis 39 Vol.- % Methan gemessen. Ähnlich schnell pegelte sich der Gehalt an CO<sub>2</sub> zwischen 40 und 55 Vol.- % ein. Der Sauerstoffanteil im Biogas war bereits in den ersten Tagen äußerst gering. In allen Versuchen wurden maximal 0,3 Vol.- % Sauerstoff im Biogas gemessen. Daran ist zu erkennen, dass sich das anaerobe Milieu im Schlauch sehr schnell eingestellt hat. Der im Substrat vorhandene Sauerstoff wird durch aerobe oder fakultativ anaerobe Mikroorganismen rasch verbraucht, sobald die Luftzufuhr unterbrochen wird.

**Tabelle 5.4-1: Durchschnittliche Biogaszusammensetzung**

(Berechnung erfolgt als Mittelwert von der Befüllung bis zur Beräumung)

Schlauch	CH <sub>4</sub> V- %	CO <sub>2</sub> V- %	O <sub>2</sub> V- %	H <sub>2</sub> S ppm
1	57,7	38,0	0,2	183,7
2	52,3	37,8	0,2	300,2
3	54,5	34,9	0,1	156,4
4	51,4	35,9	0,2	239,0
5	54,1	33,2	0,1	140,1
6	54,1	34,7	0,2	78,4
7	53,2	42,8	0,2	65,1
8	59,8	58,1	0,2	259,4
9	54,9	57,1	0,1	762,2
10	53,8	56,3	0,1	398,7
11	50,0	52,4	0,2	163,7

Schlauch	CH <sub>4</sub> V- %	CO <sub>2</sub> V- %	O <sub>2</sub> V- %	H <sub>2</sub> S ppm
12	45,9	56,4	0,1	137,1
13	42,1	57,0	0,2	613,8
14	64,0	49,6	0,3	267,0
15	63,8	50,7	0,3	214,3

Im Allgemeinen wird Biogas mit einem Methangehalt von 50 - 65 % bei einem Kohlendioxydgehalt zwischen 35 - 50 % erzeugt. Wie aus Tabelle 5.4-1 erkenntlich, wurden bei allen Versuchen relativ geringe Methanmengen gemessen. Der niedrigste CH<sub>4</sub>- Gehalt wurde im Schlauch 13 mit durchschnittlich 42,1 Vol.- % festgestellt; der höchste durchschnittlich gemessene CH<sub>4</sub>- Gehalt beim Schlauch 14 mit 64 %.

Weiterhin fällt auf, dass die ermittelten Methan- und Kohlendioxydwerte vor allem im Jahr 2003 bei über 100 % liegen. Dafür lassen sich mehrere mögliche Erklärungen finden:

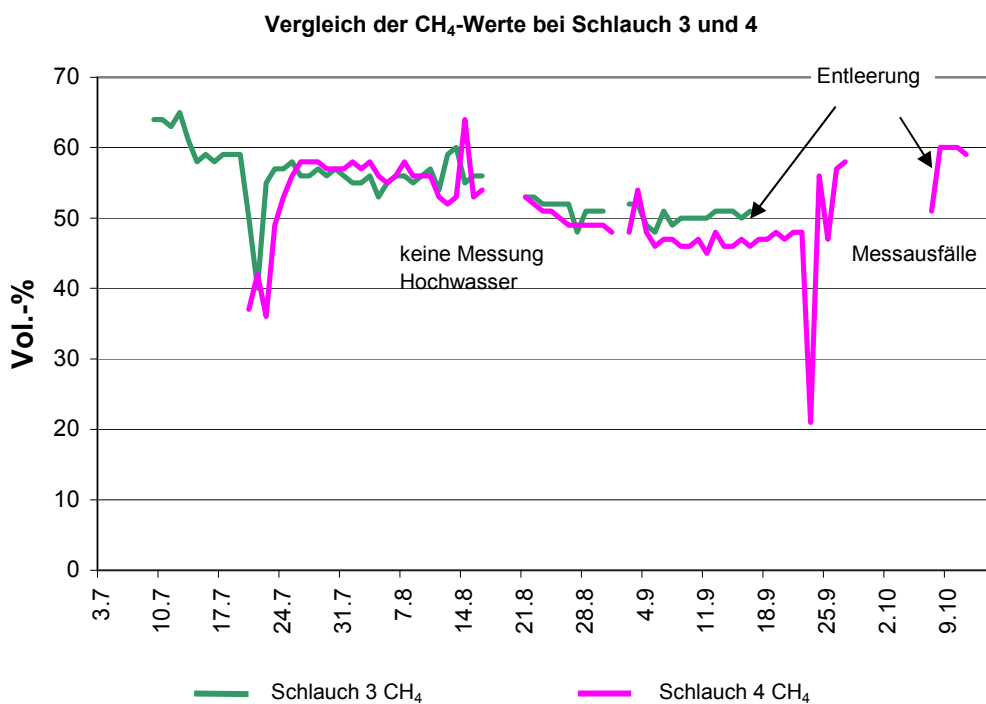
- Das verwendete Mehrgasmessgerät SR2-DO hätte wöchentlich nach dem Regelwerk für den Umgang mit Gasmessgeräten der Deutschen Vereinigung des Gas- und Wasserfachs e.V. (DVGW) mit Prüfgas direkt vor Ort geprüft werden müssen. Weil das nötige Prüfgas und die Technik fehlten, fand keine wöchentliche Justierung statt. Als die offensichtlich falschen Werte gemessen wurden, nahm man an, dass das Gerät wiederholt defekt sei. Deshalb wurde das Gasmessgerät mehrmals an die Firma zur Überprüfung bzw. Reparatur zurückgeschickt. Bei diesen Überprüfungen justierte die Herstellerfirma das Gasmessgerät.
- Der im Biogas vorkommende Schwefelwasserstoff beeinträchtigte die Genauigkeit der Messung.
- Das Gasmessgerät wurde an einem Ventil des Kugelhahns im Freien an den Folien-schläuchen angeschlossen. Wenn während des Messens die Sonde nicht ganz luftdicht abschließt, wird Luft mit angesaugt und das Messergebnis verfälscht.

Die im Biogas in geringfügigen Mengen vorhandenen Gase Schwefelwasserstoff und Ammoniak wirken sehr aggressiv und tragen zu Korrosionsschäden an Armaturen, Gaszählern, Brennern und Motoren bei. Der Gehalt an Schwefelwasserstoff erreichte in allen Versuchen unterschiedliche Werte. So wurden Werte von durchschnittlich 65 ppm (0,006 Vol- %) bis 614 ppm (0,06 Vol- %) gemessen. Das ist äußerst gering im Vergleich zur Nassfermentation. In allen Versuchen waren die Werte aber schnell stark rückläufig und pegelten sich meist auf Durchschnittswerte zwischen 65 und 300 ppm ein. In nur zwei Versuchen (Schläuche 9 und 13) lagen die Durchschnittswerte bei 760 bzw. 610 ppm.

Um den Verlauf der CH<sub>4</sub>- und H<sub>2</sub>S-Gehalte näher untersuchen zu können, wurden für nachfolgende Diagramme vier verschiedene Folienschläuche zum Vergleich ausgewählt, die annähernd die gleiche Inputmenge und Liegedauer aufwiesen. Dazu wurden die Schläuche 3 und 4 für das Jahr 2002 und für 2003 die Schläuche 11 und 12 ausgewählt.

2002

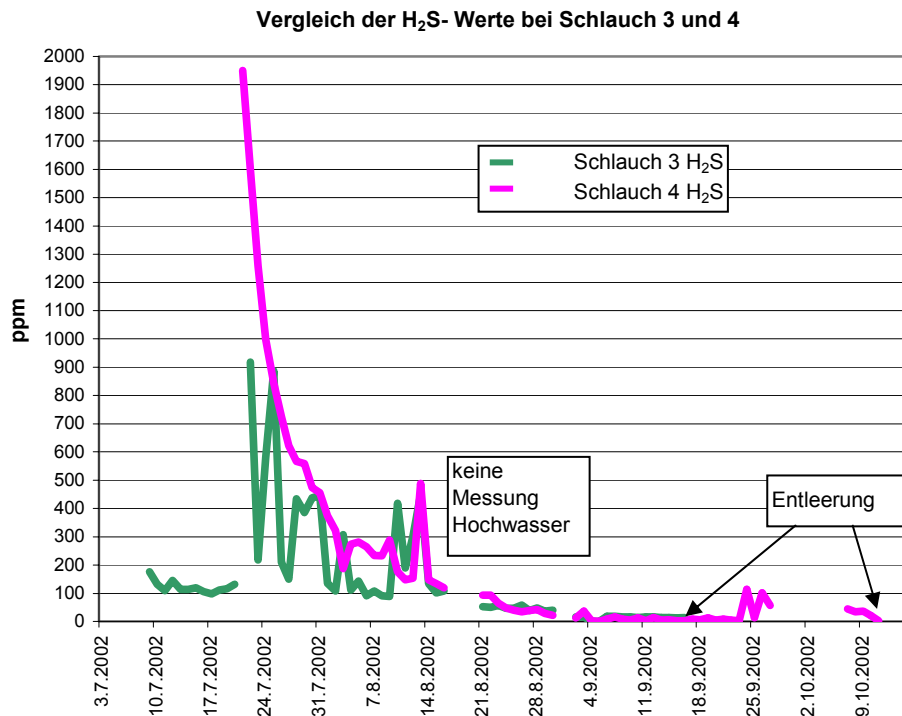
Der Schlauch 3 lag vom 3.7. - 16.9.02 und Schlauch 4 vom 17.7. - 14.10.02. Das Inputmaterial für beide Schläuche bestand aus frischem und altem Rindermist und betrug 150 t bzw. 145 t, die Liegezeit 76 und 90 Tage. Beide Schläuche zeigen einen ähnlichen Verlauf in der CH<sub>4</sub>-Ausbeute. Der Absturz der Gasausbeute Mitte Juli bei beiden Schläuchen ist nicht erklärbar. Es wird ein Messfehler vermutet.



**Diagramm 5.4-1: CH<sub>4</sub>-Gehalt in den Schläuchen 3 und 4 im Jahr 2002**

Beide Schläuche weisen ab 25.7.02 bis zur Einstellung der Messung wegen Hochwassers (17. - 20.8.02) einen ziemlich gleichmäßigen Verlauf der CH<sub>4</sub>-Gehalte auf. Sie liegen zwischen 52 und 60 Vol.-%. Mit der Wiederaufnahme der Messungen nach dem Hochwasser fielen die Methangehalte im Schlauch 4 stärker. Insgesamt erzeugten die beiden Folienschläuche ca. 3.300 m<sup>3</sup> bzw. 2.400 m<sup>3</sup> Biogas. Die Abstürze in der Methanerzeugung in den Zeiträumen vom

21. und 22. 7. sowie am 23.9.02 lassen sich nur mit Messfehlern erklären. In der Zeit vom 28.9. - 6.10.02 traten Messausfälle durch technische Probleme an den Messgeräten auf.



**Diagramm 5.4-2: H<sub>2</sub>S-Gehalt in den Schläuchen 3 und 4 im Jahr 2002**

Zu Beginn aller Versuche lagen die Werte von H<sub>2</sub>S hoch. Im Versuch 4 (siehe Diagramm 5.4-2) wurden zu Beginn H<sub>2</sub>S-Gehalte von 2.000 bis knapp 1.000 ppm (0,2 bzw. 0,1 Vol.- %) registriert, die sich nach kurzer Zeit reduzierten. Die H<sub>2</sub>S-Werte lagen im Schlauch 3 zu Beginn der Vergärung weit unter denen im Schlauch 4, schwankten aber stark, um sich dann bei einem Wert unter 100 ppm einzupegeln. Während des Hochwassers fielen die Messungen aus, die anderen Messausfälle liegen in Funktionsstörungen der Messgeräte begründet. Die unterbrochenen Linien und die extremen Schwankungen im Schlauch 3 kennzeichnen offensichtlich Fehler- oder zweifelhafte Messwerte.

### 2003

Der Schlauch 11 lag vom 6.5. - 30.7.03 (86 Tage Liegezeit) und Schlauch 12 vom 25.6. - 8.9.03 (76 Tage Liegezeit). Hier bestand das Inputmaterial aus Rindermist und Silage (95 t bzw. 85 t).

Vergleich CH<sub>4</sub>-Werte bei Schlauch 11 und 12

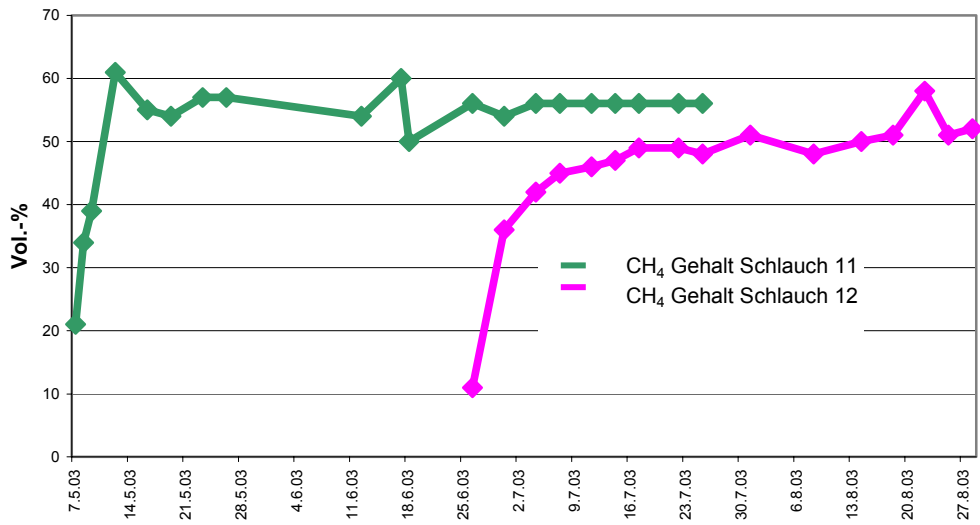
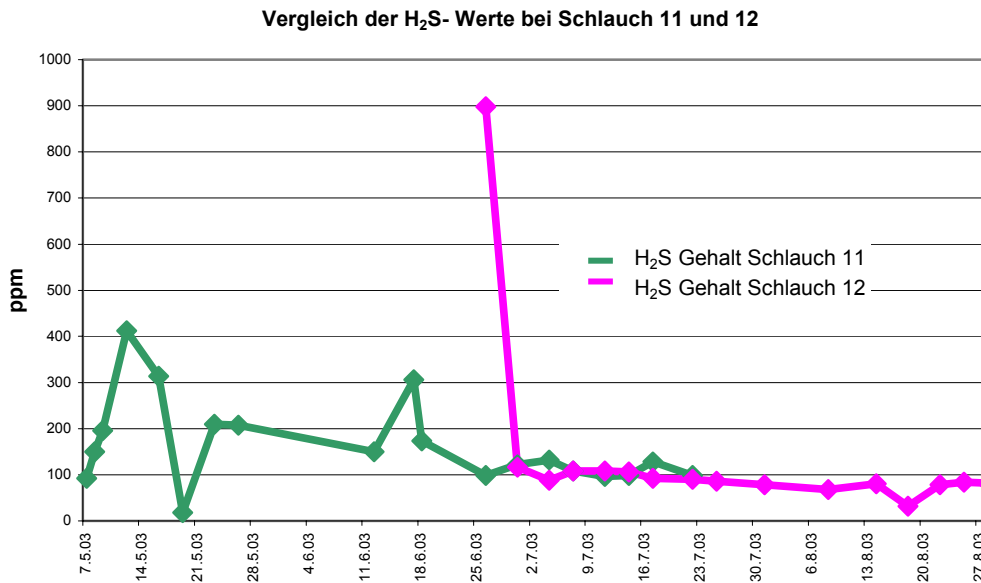


Diagramm 5.4-3: CH<sub>4</sub>-Gehalt in den Schläuchen 11 und 12 im Jahr 2003





**Diagramm 5.4-4: H<sub>2</sub>S-Gehalt in den Schläuchen 11 und 12 im Jahr 2003**

In diesen Versuchen wurde ein durchschnittlicher Methangehalt von knapp 55 Vol.- % ermittelt. Wird für Methan ein Heizwert von 35.880 kJ/Nm<sup>3</sup> unterstellt, ergibt sich ein Heizwert des Biogases von etwas über 19.700 kJ/Nm<sup>3</sup> bzw.  $\approx$  5,5 kWh/Nm<sup>3</sup>. Schwefelwasserstoff besitzt zwar ebenfalls einen Heizwert zwischen 23.500 und 28.150 kJ/Nm<sup>3</sup> (je nach Verbrennung zu SO<sub>2</sub> oder SO<sub>3</sub>), kann aber aufgrund seines äußerst geringen Volumenanteils im Biogas vernachlässigt werden. In den landwirtschaftlichen Praxisanlagen muss auf die Eliminierung des H<sub>2</sub>S großen Wert gelegt werden, weil er den Motor des BHKWs schädigt. In unseren Versuchen war das nicht notwendig, weil die Werte deutlich unter schädigenden Konzentrationen lagen.

Zu beachten ist bei der Auswertung der Messungen grundsätzlich, dass sie stets im trockenen Gas stattfinden. Der Volumenanteil des Wasserdampfes im Gas, der bei der Volumenstrommessung mit in den Messwert einfließt, bleibt also unberücksichtigt. Er verringert aber den wirklichen Heizwert des Biogases.

## 5.5 Einfluss der Substrateigenschaften

Die folgende Tabelle enthält eine Zusammenfassung der Substrateigenschaften.

**Tabelle 5.5-1: Laborergebnisse und sensorische Merkmale des Outputs**

Schlauch	Liege- dauer [d]	Sensorische Prüfung	oTS [% in TM]	C/N Ver- hältnis
1	78	geringer Gasgeruch, vereinzelt weiße Schwefelstellen sehr feuchtes Substrat	44,8	13,9
2	66	geringer Gasgeruch mäßig bis starker Ammoniakgeruch häufig weiße Schwefelstellen sehr feuchtes Substrat	40,4	12,0
3	76	mäßiger Gasgeruch starker Ammoniakgeruch häufig weiße Schwefelstellen sehr feuchtes Substrat geringe bis mäßige Feuchtigkeitsansammlung	41,0	13,8
4	90	geringer Gasgeruch Farbe schwarzbraun vereinzelt weiße Schwefelstellen feuchtes Substrat geringe Feuchtigkeitsansammlung	70,7	11,0
5	90	geringer Gasgeruch Farbe schwarzbraun häufig weiße Schwefelstellen sehr feuchtes Substrat (saftig) mäßige Feuchtigkeitsansammlung	68,1	10,6
6	43	geringer Gasgeruch Farbe dunkelbraun vereinzelt weiße Schwefelstellen trockenes Substrat geringe Feuchtigkeitsansammlung	62,7	11,1
7	52	geringer Gasgeruch Farbe schwarzbraun vereinzelt weiße und dunkelgrüne Stellen feuchtes Substrat geringe Feuchtigkeitsansammlung	70,9	13,0

Schlauch	Liege- dauer [d]	Sensorische Prüfung	oTS [% in TM]	C/N Ver- hältnis
8	77	geringer Gasgeruch geringer Ammoniakgeruch Farbe braun vereinzelt weiße Schwefelstellen sehr feuchtes Substrat sehr starke Feuchtigkeitsansammlung	87,4	18,0
9	83	mäßig bis starker Gasgeruch Farbe dunkelbraun vereinzelt weiße Schwefelstellen geringe Feuchtigkeitsansammlung trockenes Substrat	83,7	-
10	160	sehr starke Feuchtigkeitsansammlung sehr feuchtes, saftiges Substrat	66,4	13,3
11	86	säuerlicher Geruch (nach Silage) geringer Ammoniakgeruch enthaltene Silage grüne Farbe vereinzelt weiße Schwefelstellen geringe Flüssigkeitsansammlung	77,8	16,0
12	76	keine Flüssigkeitsansammlung trockenes Substrat	82,7	15,3
13	49	geringe Flüssigkeitsansammlung extrem trockenes Substrat	-	-
14	49	Farbe dunkelbraun weiße Schwefelstellen geringe Flüssigkeitsansammlung trockenes Substrat	79,2	29,6
15	49	Farbe dunkelbraun vereinzelt weiße Schwefelstellen geringe Flüssigkeitsansammlung trockenes Substrat	82,8	24,9

Von den Werten der Tabelle ausgehend, kann man weder von der Feuchtigkeit noch von der Liegedauer auf den Abbau an oTS schließen. Hier spielt vor allem die Temperatur im Schlauch eine große Rolle. Trotz der Verwendung gleicher Substrate schwankt das C:N-Verhältnis und auch weitere Eigenschaften deutlich. Weitere Laborergebnisse sind im Anhang ersichtlich.

Während der Auswertung der Proben und der Interpretationsgespräche mit den Kollegen des Labors des Fachbereichs Landwirtschaftliches Untersuchungswesen wurde deutlich, dass keinerlei Erfahrungen für eine Beprobung von Festmist vorliegen. Die Proben zeigen, dass das Material völlig inhomogen ist und man ein Vielfaches an Proben pro „Misthaufen“ auswerten müsste. Für eine Steigerung des Gasertrages hätte eine so umfangreiche Beprobung jedoch keine Verbesserung bewirkt. Auf Grund der Inhomogenität können keine Aussagen zum TS, zur oTS und zum pH-Wert getroffen werden.

### 5.5.1 Gehalt an Trockensubstanz und organischer Trockensubstanz

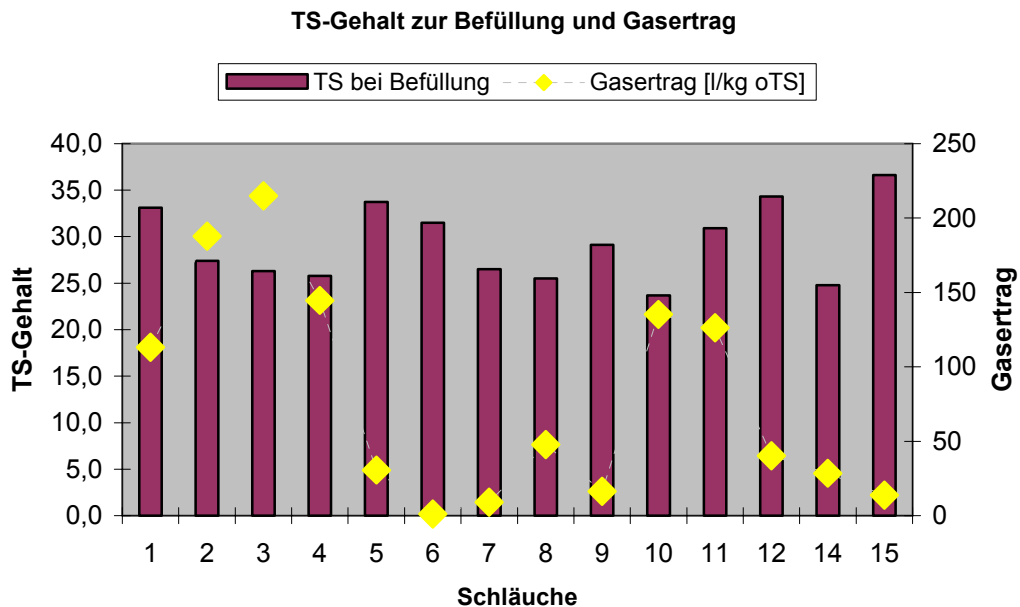
Ein hoher Gehalt an organischer Trockensubstanz im Ausgangsmaterial ist für eine erfolgreiche Vergärung entscheidend. Die organische Trockensubstanz wird während der Vergärung abgebaut. Der TS-Gehalt für die Trockenfermentation sollte im Substrat über 15 % liegen. Bei sehr trockenen Substraten sinkt die Gasausbeute, weil Feuchtigkeit fehlt. Bei landwirtschaftlichen Erzeugnissen einschließlich fester Wirtschaftsdünger schwankt der oTS-Gehalt in der Regel zwischen 70 und 90 %.

**Tabelle 5.5.1-1: TS- und oTS-Gehalte der Substrate bei der Befüllung und Entleerung der Folienschläuche**

(Schlauch 13 konnte nach der Entleerung nicht ausgewertet werden)

Schlauchnummer	Befüllung	Entleerung	Befüllung	Entleerung
	TS in %	TS in %	oTS in % d. TS	oTS in % d. TS
1	33,1	30,1	85,0	44,8
2	27,4	24,1	37,9	40,4
4	25,8	21,9	39,1	41,0
5	33,7	25,9	44,3	70,7
8	25,5	21,0	36,1	68,1
10	23,7	22,7	43,7	62,7
11	30,9	21,7	85,3	70,9
15	36,6	22,6	85,4	87,4
3	26,3	28,5	81,4	83,7
6	31,5	34,3	77,5	66,4
7	26,5	26,6	72,1	77,8
9	29,1	31,9	68,8	82,7
13	33,0	-	84,8	-
12	34,3	37,7	86,6	79,2
14	24,8	35,5	86,8	82,8

Es fällt auf, dass lediglich bei acht Schläuchen (die Werte sind in o. g. Tabelle grau unterlegt), der TS-Gehalt des Inputmaterials höher war als der des Outputs zur Entleerung. Aber nur bei vier Schläuchen (Zahlen fett und blau) haben die Laboruntersuchungen ergeben, dass die oTS im Input über der des Outputs liegt.



**Diagramm 5.5.1-1: TS-Gehalt bei der Befüllung und Gasertrag**

Um die Vergleichbarkeit der Daten künftiger Versuche besser zu gewährleisten, wäre eine genaue Dokumentation der Inputmassen und ihre Erfassung mit höherer statistischer Sicherheit erforderlich. Wünschenswert ist auch eine Verwiegung des Outputs, damit in Verbindung mit den Analysewerten der Abbau an Trockensubstanz und organischer Substanz quantifiziert werden kann. Diese Maßnahmen sind allerdings aufwendig und teuer.

### 5.5.2 pH-Wert

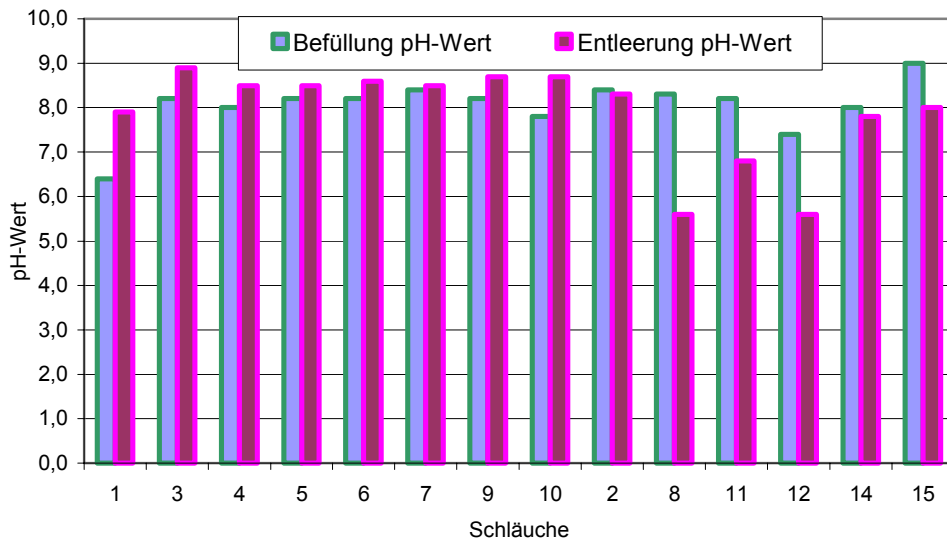
Der ideale pH-Wert sollte bei der Vergärung bei 7,6 liegen. In unseren Versuchen lagen die pH-Werte aller Schläuche zwischen 6,4 und 9,0 bei der Befüllung. Den optimalen pH-Wert verzeichneten nur die Schläuche 10 und 12.

**Tabelle 5.5.2-1: pH-Werte der Substrate bei der Befüllung und Entleerung der Folienschläuche**

(Schlauch 13 konnte nicht ausgewertet werden)

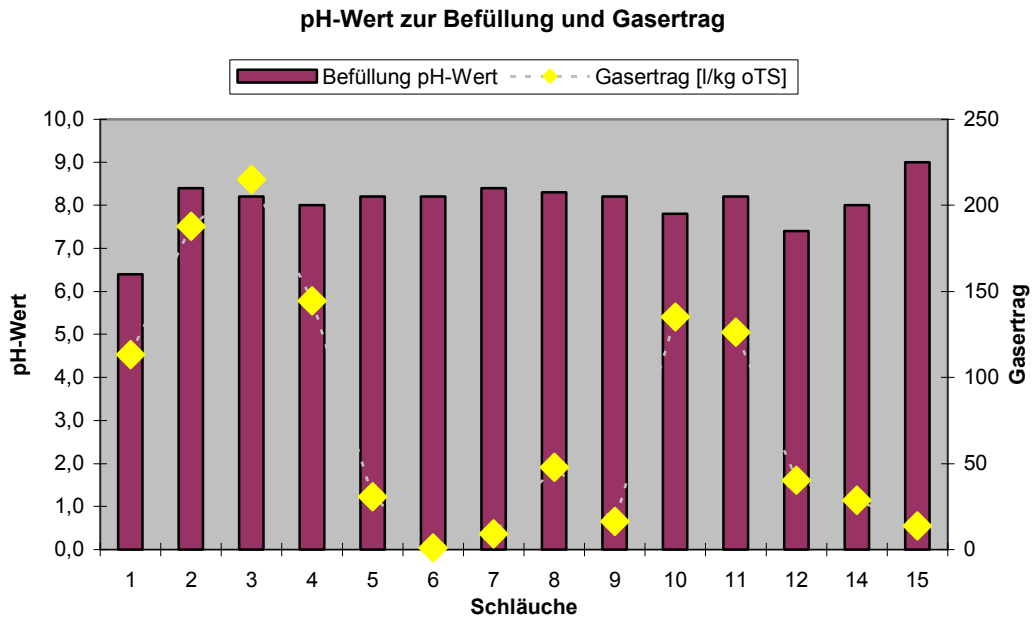
Nr.	pH-Wert	
	Befüllung	Entleerung
1	6,4	7,9
3	8,2	8,9
4	8,0	8,5
5	8,2	8,5
6	8,2	8,6
7	8,4	8,5
9	8,2	8,7
10	7,8	8,7
2	8,4	8,3
8	8,3	5,6
11	8,2	6,8
12	7,4	5,6
14	8,0	7,8
15	9,0	8,0

**pH-Wert zur Befüllung und Entleerung**



**Diagramm 5.5.2-1: pH-Werte zur Befüllung und Entleerung**

Bei acht Schläuchen liegt der pH-Wert bei der Befüllung niedriger als zur Entleerung. Bei sieben Schläuchen verhält es sich genau entgegengesetzt. Bei ebenfalls acht Schläuchen, die aber nicht mit den vorherigen identisch sind, ist zur Befüllung der Schläuche der TS-Gehalt höher als zur Entnahme.



**Diagramm 5.5.2-2: pH-Wert bei der Befüllung und Gasertrag**

In unseren Versuchen ist kein Zusammenhang zwischen dem pH-Wert zur Befüllung der Folien-schläuche und dem Gasertrag festzustellen.

### 5.5.3 Temperaturen und Kondensatmengen

Die Tabelle 5.5.3-1 zeigt neben der niedrigsten und höchsten Substrattemperatur die durchschnittliche Tagestemperatur während der Befüllung und die verwendeten Isoliermaterialien für die Schlauchoberfläche.

**Tabelle 5.5.3-1: Temperaturmessung am Substrat und Isolierung der Folienschläuche**

Schlauch	Niedrigste/ höchste Substrat-Temperatur vor Befüllung in °C	Außentemperatur am Tag der Befüllung	Isolierung der Schlauchoberfläche
1	nicht gemessen	9,2	Dämmwolle
2	nicht gemessen	19,8	Dämmwolle Abdeckfolie
3	nicht gemessen	19,6	Dämmwolle Abdeckfolie
4	nicht gemessen	18,9	Dämmwolle
5	nicht gemessen	19,9	Dämmwolle Abdeckfolie
6	nicht gemessen	14,0	Luftpolsterfolie
7	nicht gemessen	13,2	Dämmwolle
8	44 - 49 *	5,9	Dämmwolle, Abdeckfolie
9	61 -72	-1,5	Rübenfließ Luftpolsterfolie, Abdeckfolie
10	25 - 28	8,2	Rübenfließ Luftpolsterfolie, Abdeckfolie
11	25 - 45	21,5	Rübenfließ
12	46 - 48	13,3	Abdeckfolie
13	65 - 72	23,0	Rübenfließ
14	59 - 72	10,5	Rübenfließ, Abdeckfolie **
15	59 - 72	10,5	Rübenfließ, Abdeckfolie **

\* Temperatur des Impfmaterials: 13 - 15 °C

\*\* ab 13.10.03 permanente externe Beheizung

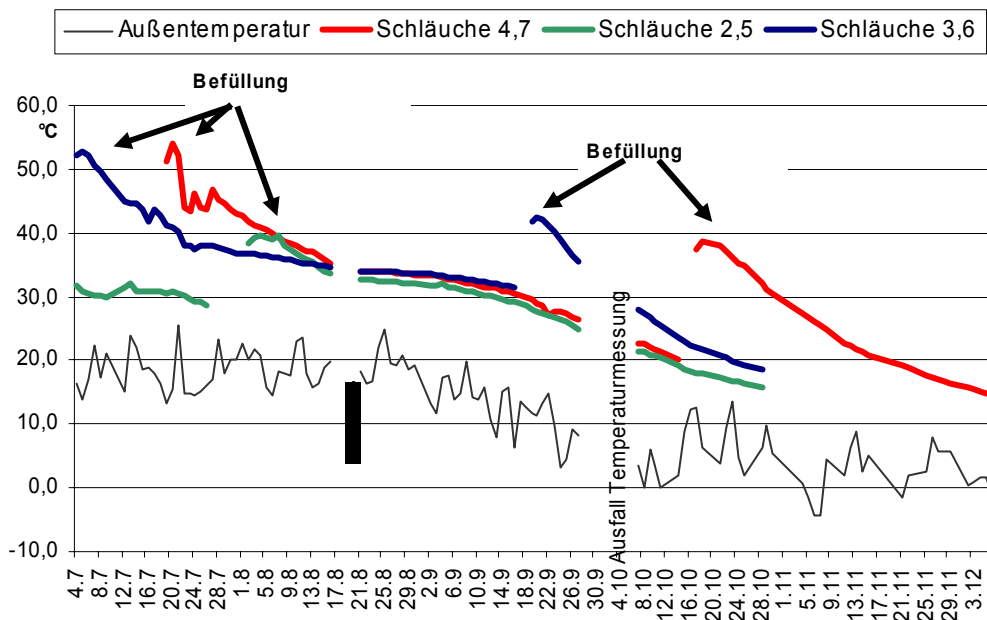
Das Substrat vom Schlauch 8 wurde mit Material aus Schlauch 7 mit einer Temperatur zwischen 13 und 15°C angeimpft (siehe auch 5.7 Winterprojekt). Ein Einfluss der Außentemperaturen am Tag der Befüllung der Folienschläuche auf die Substrattemperatur konnte nicht festgestellt werden.

Die Aufzeichnungen der Außentemperaturen sind für alle Versuche, außer Schlauch 1, durchgängig durchgeführt worden. Einige Messungen fehlen wegen des Hochwassers vom August im Jahr 2002 sowie durch organisatorische Probleme.



Im nachfolgenden Diagramm über die Temperaturmessung der verschiedenen Schläuche im Jahr 2002 zeigt sich, dass die Temperatur im gesamten Schlauchfermenter nur über einen relativ kurzen Teil der Versuchszeit im optimalen Bereich von 35 bis 38 °C lag. In den einzelnen Tiefen und Schichten des Schlauches wurden sehr unterschiedliche Temperaturen gemessen. Im äußeren Bereich wurde die niedrigste Temperatur gemessen. Die Unterschiede weisen darauf hin, dass das Substrat eine schlechte Wärmeleitfähigkeit besitzt.

Zu Beginn betrug die Temperatur, hervorgerufen durch die Vorrotte und die damit verbundene Selbsterwärmung, oftmals über 50 °C. Bis zum Erreichen des mesophilen Temperaturbereichs vergingen mehr als 20 Tage, so dass sich das Substrat über einen längeren Zeitraum im Bereich zwischen dem mesophilen und dem thermophilen Temperaturoptimum befand. Die gleichen Temperaturabläufe sind auch für 2003 zu verzeichnen.



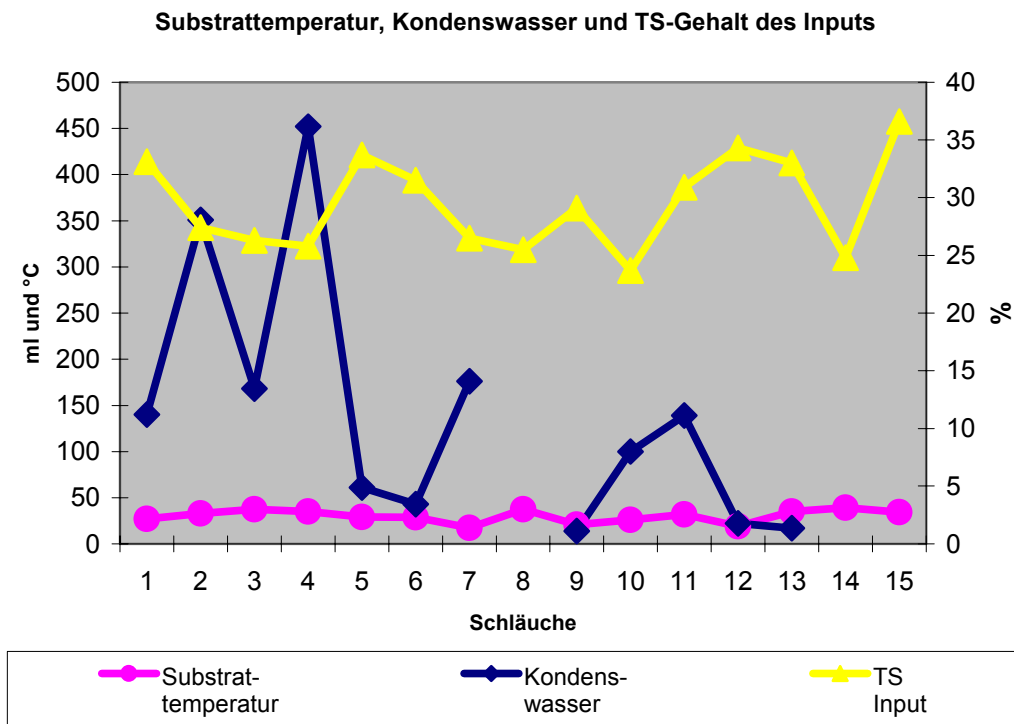
**Diagramm 5.5.3-1: Schlauch- und Außentemperaturmessungen 2002**

**Tabelle 5.5.3-2: Durchschnittliche Substrattemperaturen aller Schläuche**

Nr.*	Substrattemperatur Befüllung	nach 1 Woche	nach 4 Wochen	nach 6 Wochen	nach 8 Wochen	nach 10 Wochen	nach 12 Wochen
	von - bis	Durchschnittliche Substrattemperaturen					
1	nicht gemessen	-	-	-	-	27,3	-
2	nicht gemessen	43,1	35,4	34,0	30,8	-	-
3	nicht gemessen	50,9	40,2	36,0	34,1	33,0	-
4	nicht gemessen	49,0	41,0	34,2	32,6	29,4	23,0
5	nicht gemessen	38,8	33,5	32,8	27,5	20,9	17,7
6	nicht gemessen	40,7	27,5	12,9	-		
7	nicht gemessen	37,5	26,8	16,6	-		
8	44 - 49	49,4	42,6	41,1	38,4	31,7	
9	61 - 72	45,8	33,9	24,5	34,1	18,5	
10	25 - 28	26,5	20,4	17,5	17,8	22,6	
11	25 - 45	33,6	31,1	36,9	37,6	36,1	36,8
12	46 - 48	45,7	34,9	32,5	31,5	29,7	
13	65 - 72	51,1	37,8	26,9			
14	59 - 72	51,2	39,3	26,7			
15	59 - 72	45,5	33,4	23,6			

\* Schlauch-Nummer

Wie aus den Aufzeichnungen erkennbar wird, reicht die Beheizung und Isolierung des Folienschlauches nicht mal in den Sommermonaten aus, um das Temperaturniveau im mesophilen Bereich (36 - 40 °C) zu halten. In Abhängigkeit von der biologischen Aktivität im Folienschlauch kann es auch wieder zu einer Temperaturerhöhung kommen (Schlauch 9 und 11).



**Diagramm 5.5.3-2: Substrattemperatur in °C, Kondenswasseranfall in ml sowie der TS-Gehalt des Inputs in % bei allen Schläuchen**

Zu Beginn der Versuche gingen mit der höheren Temperatur erwartungsgemäß auch eine höhere Verdunstung von Wasser und eine verstärkte Kondensation einher, die sich parallel zur sinkenden Temperatur im Fermenter veränderte. Im 2. Versuchsjahr konnte das nicht so beobachtet werden. Eine entscheidende Rolle bei der Kondensation spielt auch die Isolierung der Rohrleitungen außerhalb des Schlauches. Zu Beginn der Versuche waren die Rohre noch nicht wärmeisoliert.

Die Ergebnisse der Temperaturmessungen in den Schläuchen zeigen, dass die verwendete Fußbodenheizung im Sinne einer Temperaturregelung im Substrat weitgehend wirkungslos blieb. Sie verzögerte lediglich die Abkühlung der Schlauchinhalte, konnte aber das Absinken unter 26 °C im gesamten Fermenterquerschnitt nicht verhindern.

Eine Wärmezufuhr zum Substrat erfolgt in der Regel nur über eine Heizung und/oder über eine wirksame Isolierung bereits erwärmten Materials. Die Wärmeabgabe erfolgte dagegen über zwei Wege, einerseits trotz der Isolierung über die Oberfläche der Folienschläuche an die Umgebung und andererseits mit dem abströmenden Biogas sowie der Verdunstung von Wasser. Mit Verringerung der Temperaturdifferenz zwischen Schlauchinnen- und -außentemperatur verringert sich auch

der Wärmestrom über die Oberfläche des Schlauches, so dass der Rückgang der Temperatur gebremst oder ganz aufgehalten wurde.

Die Wärmeverluste sollten durch die Heizung ausgeglichen werden, um die Temperatur in den Folienschläuchen konstant zu halten. Die wesentlichen Gründe für die fehlende Wirkung der Heizung waren ein offensichtlich schlechter Wärmeübergang von den Heizelementen über die dazwischen liegende Folie auf das Substrat und eine schlechte Wärmeleitung im Substrat selbst. Durch die mangelhafte Wärmeleitung und den nur in geringem Maße oder gar nicht vorhandenen konvektiven Wärmetransport wurde vermutlich nur die unterste Schicht des Substrats erwärmt, die Wärme aber sehr langsam an die weiter oben liegenden Bereiche abgegeben. Die Wärmeleitung des Materials und die Wärmeabgabe durch das feuchte Biogas sind Kenngrößen, die physikalisch bedingt sind und sich kaum beeinflussen lassen.

Eine Verbesserung kann somit nur über Änderungen der Isolierung erfolgen und die Vergrößerung der Wärmeübertragungsfläche, indem Heizelemente mit wesentlich größerer Breite eingesetzt werden. Um eine erhebliche Steigerung des im Umlauf befindlichen Volumens an Heizwasser zu vermeiden, könnten die Profile auch flacher ausgeführt werden als es derzeit der Fall ist.

Hohe Wärmeverluste sind auch an den Rohren zwischen BHKW und den Bodenheizungen zu erwarten, die sich durch den jahreszeitlich bedingten Rückgang der Umgebungstemperaturen noch erhöhten. Hier ist ebenfalls eine Wärmedämmung der Leitungen immer empfehlenswert. Weiterhin könnte eine wirksamere Isolierung der Schläuche einschließlich der Heizelemente zum Boden hin eine Verminderung der Verluste bewirken.

Die starke Erwärmung durch die Vorrotte und die sofortige Zuheizung ließen die Temperatur einiger Schläuche bis zu vier Wochen auf einem Niveau von über 40 °C halten. Es wäre sinnvoll, die Regelung der Heizung an eine ständige Überwachung der Temperatur im Fermenter zu koppeln und erst mit dem Heizen zu beginnen, wenn sich die Temperatur im Substrat dem Optimum des mesophilen Bereichs nähert (etwa bei Unterschreiten von 40 °C). An jedem Schlauch wurden Temperaturdaten in drei verschiedenen Tiefen und drei Schlauchabschnitten (täglich neun Werte pro Schlauch) gewonnen. Aufgrund des schlechten Wärmetransports ist hier ein erhebliches Temperaturgefälle vor allem vom Fermenterkern nach außen zu verzeichnen.

Im folgenden Diagramm wird der Temperaturverlauf des Substrates in drei Schläuchen (10, 11 und 12) im Zeitraum vom 2.4. - 8.9.03 dargestellt. An jedem Schlauch wurde die Substrattemperatur in einer Tiefe von 1 m gemessen. Es ist deutlich zu erkennen, dass wenige Tage nach Beginn der Vergärung die Substrattemperatur um ca. 10°C absinkt. Wenn sich die Außentemperatur im Sommer erhöht, steigt auch die Substrattemperatur im Fermenter wieder an. Im Winter dagegen sinkt die Temperatur im Substrat kontinuierlich.

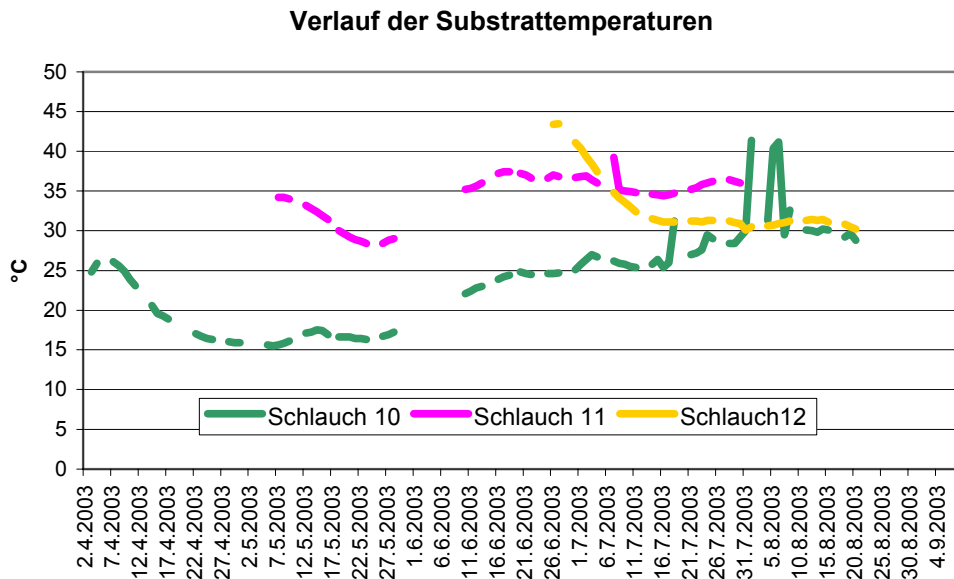


Diagramm 5.5.3-3: Temperaturverlauf im Substrat der Schläuche 10, 11 und 12

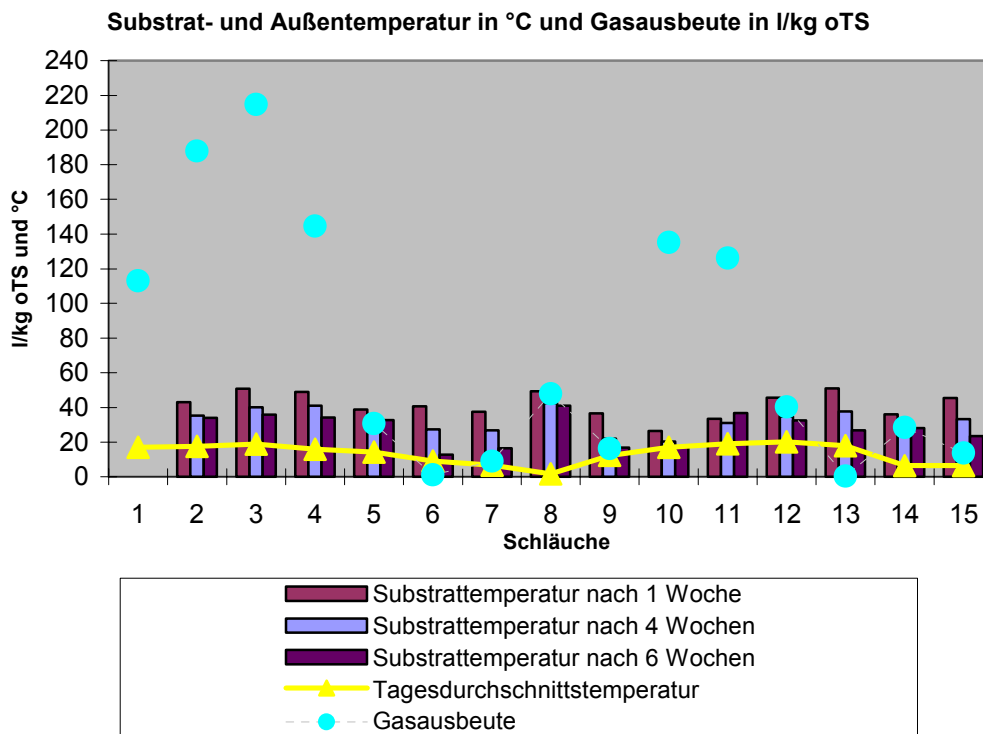
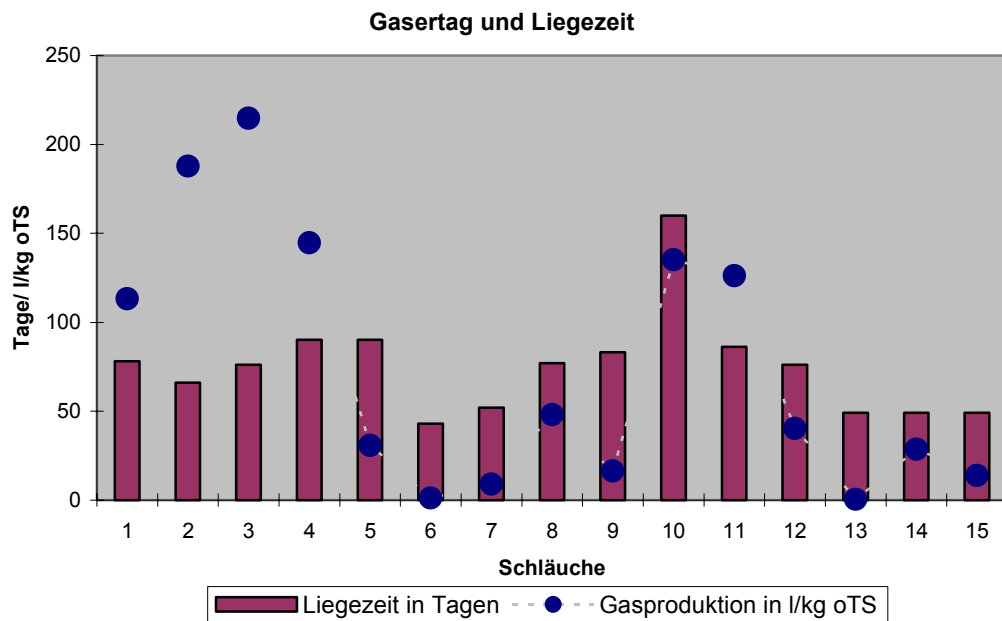


Diagramm 5.5.3-4: Substrat- und Außentemperatur sowie Gasausbeute in l/kg oTS für alle Schläuche

Am Schlauch 1 wurde die Schlauchtemperatur erst ab 20.6.02 gemessen. Die Grafik zeigt, dass bei allen Schläuchen, ausgenommen Schlauch 1 und Schlauch 11, die Substrattemperatur in den ersten zwei bis vier Wochen am höchsten liegt und danach absinkt. Eine Korrelation der Gasausbeute zur Außentemperatur ist erkennbar. Ein Zusammenhang zur Substrattemperatur ist kaum feststellbar. Das würde bedeuten, dass die Jahreszeit eine größere Bedeutung hat als die Substrattemperatur. Dieser Zusammenhang ist logisch jedoch nicht erklärbar.

#### 5.5.4 Verweildauer (Liegezeit des Schlauches)



**Diagramm 5.5.4-1: Gasertrag und Liegezeit**

Ein Zusammenhang zwischen Gasertrag und Liegezeit ist nicht eindeutig festzustellen. Es ist aber anzunehmen, dass eine Liegezeit von 70 bis 90 Tagen ausreichend ist. In einigen Fällen kommt auch nach 150 Tagen noch Gas.

#### 5.6 Verwendung des Gärhilfsmittels MethaPlus 100

Wie bereits erwähnt, wurden die Schläuche 14 und 15 am selben Tag unter gleichen Bedingungen mit dem gleichen Inputmaterial befüllt und hatten eine Liegedauer von 49 Tagen. Dem Schlauch 14 wurde das Gärhilfsmittel MethaPlus 100 zugegeben. Das Gärhilfsmittel ist ein Enzympräparat, welches die Aufspaltung der organischen Masse unterstützen soll. Wie geplant wurde durch den Einsatz von MethaPlus 100 auch eine höhere Gasproduktion ermittelt.

Die Temperatur des Gärsubstrates vor der Befüllung betrug in beiden Schläuchen zwischen 59 und 72°C. Beide Schläuche waren mit Rübenvlies mit einer Stärke von 6 - 7 mm isoliert und mit Abdeckfolie bedeckt. Beide Schläuche wurden ab dem 13.10.03 permanent extern beheizt.

Folgende Tabelle zeigt eine Zusammenstellung der wichtigsten Kriterien beider Schläuche.

**Tabelle 5.6-1: Vergleich der Schläuche S14 und S15**

<b>Kriterium</b>	<b>Maßeinheit</b>	<b>Schlauch 14</b>	<b>Schlauch 15</b>
Input		Rindermist (frisch)	Rindermist (frisch)
Menge	t	15	15
Gärhilfsmittel MethaPlus 100	g/l	400/400	-
Temperatur Input	°C	59-72	59-72
Liegedauer	Tage	49	49
TS bei Befüllung	%	24,8	36,6
TS bei Entleerung	%	35,5	22,6
oTS bei Befüllung	% in TM	86,6	86,8
oTS bei Entleerung	% in TM	79,2	82,8
pH-Wert bei Befüllung		8,0	9,0
pH-Wert bei Entleerung		7,8	8,0
Gasproduktion (V <sub>N</sub> )	m <sup>3</sup>	91,937	65,682
Gasproduktion im Substrat	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	4,60	3,28
Gasproduktion in oTS	l/kg	28,54	13,78
Kondenswasser		-	-
CH <sub>4</sub>	Vol- %	64,0	63,8
CO <sub>2</sub>	Vol- %	49,6	50,7
O <sub>2</sub>	Vol- %	0,3	0,3
H <sub>2</sub> S	ppm	267,0	214,3
Schlauchtemperatur nach 1 Woche Liegezeit	°C	51,2	45,5
2 Wochen Liegezeit	°C	39,3	33,4
3 Wochen Liegezeit	°C	26,7	23,6

Die Gasausbeuten beider Schläuche waren äußerst niedrig und bedürfen einer Erklärung. Deutlich zu erkennen ist der starke Temperaturabfall bereits in den ersten Tagen. Das bestätigt wiederum, dass die Isolierung mit Nadelflies den Außentemperaturen im Oktober und November nicht gerecht wurde. Beim Substrat ist auffällig, dass trotz des gleichen Materials deutliche Unterschiede in der Trockensubstanz und im pH-Wert gemessen wurden. Wie bereits vorn diskutiert, ist dies auf die Inhomogenität von Festmist und die nicht darauf abgestimmten Probenahmetechniken zurückzuführen.

In diesem Versuch hat der Einsatz des Gärhilfsmittels bei Schlauch 14 eine Ertragssteigerung gegenüber Schlauch 15 von etwa 30 % erbracht. Weil eine unterschiedliche Input-Trockensubstanz gemessen wurde, kann die Gasproduktion gemessen in l/kg oTS nicht für einen Vergleich herangezogen werden. Um gesicherte Ergebnisse über den Einsatz von Gärhilfsmitteln in der Trockenfermentation zu erzielen, sind deutlich mehr Versuche notwendig.

## **5.7 Winterprojekt**

Am 28.01.03 erfolgte die Befüllung eines Folienschlauches mit 72 t Gärs substrat, das sich aus 61 t Rinderfrischmist und 11 t Futterresten zusammensetzte. Das Inputmaterial wurde mit vergorenem Material vom Schlauch 7 versetzt. An diesem Tag gab es bei Temperaturen um die 5° C starken Dauerregen. Für den Schlauch 8 wurde ein externes Heizsystem mit einer Isolierung montiert. Die Heizung wurde an die Heizungsanlage der Milchviehanlage angeschlossen. Die Heizungsanlage musste permanent überwacht werden, weil während des Befüllvorgangs eine Undichtheit an den Flexschläuchen entstanden war, die Wasserverluste im Heizsystem verursachte. Leider konnte dieses Leck nicht während des laufenden Versuches repariert werden.

Zu allen vorherigen Versuchen wurden folgende Veränderungen vor Beginn der Schlauchbefüllung realisiert:

- Wärmedämmung zum Boden durch Dämmstoff „Roofmate“ 80 mm auf den Gummimatten
- Auslegen der Heizstäbe auf den Dämmstoffen
- Aufbringung einer 6 cm dicken Schotterschicht auf der Hälfte der Dämmstofffläche
- Beheizung des Schlauches ununterbrochen, extern
- Isolierung der Schlauchoberfläche mit bewährter Dämmwolle und Abdeckfolie





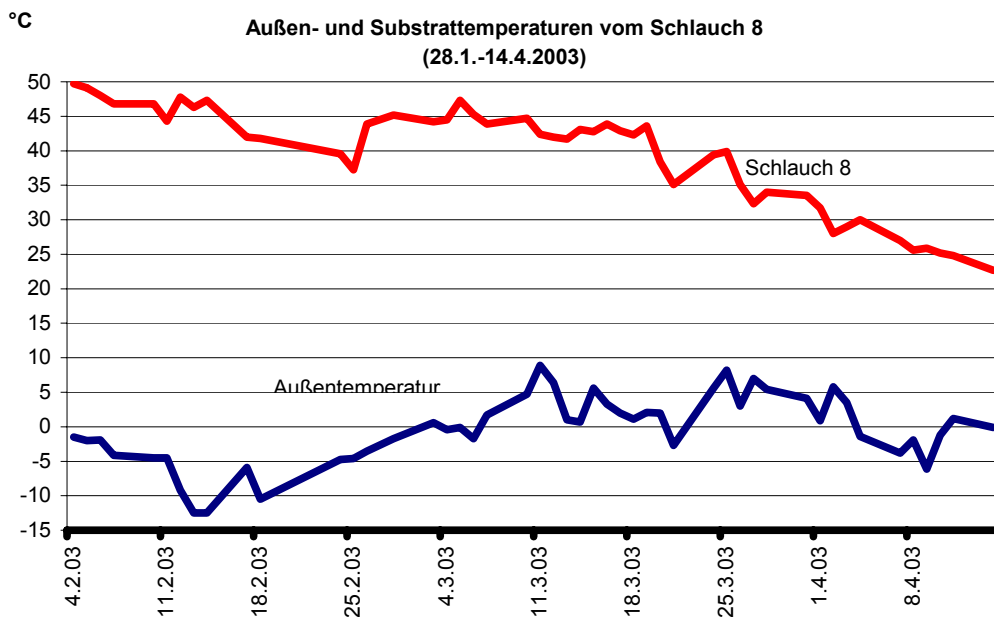
**Abbildung 5.7-1: Wärmedämmung mit Dämmstoff Roofmate**



**Abbildung 5.7-2: Wärmedämmung mit Dämmstoff Schotter**

Die Durchmischung des Gärmaterials erfolgte einen Tag vor dem Befüllen des Schlauches mit einem Radlader. Die Temperaturen im Miststapel kurz vor der Schlauchbefüllung lagen zwischen 44 und 49°C.

Nach vier Wochen Liegezeit wurden in Kernnähe (ca. 1 m Tiefe) immer noch 36 bis 44 °C gemessen, in den Randzonen in 20 bis 60 cm Tiefe bewegten sich die Temperaturen zwischen 20 und 34°C. Daraus kann man schließen, dass die hohe Ausgangstemperatur des Gärsubstrates gemeinsam mit der stark verbesserten Wärmedämmung zum Boden und der ununterbrochenen Beheizung des Schlauches zu einer enormen Verzögerung des Temperaturabfalls führten. Nach 10 Wochen Liegedauer wurden noch knapp 32°C gemessen.

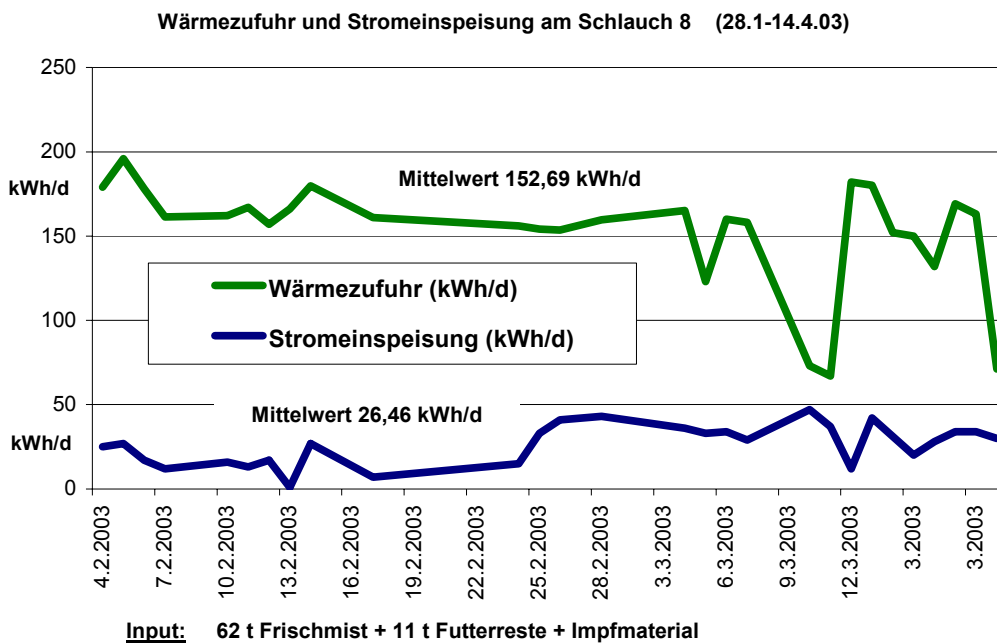


**Diagramm 5.7-1: Außen- und Substrattemperaturen von Schlauch 8**

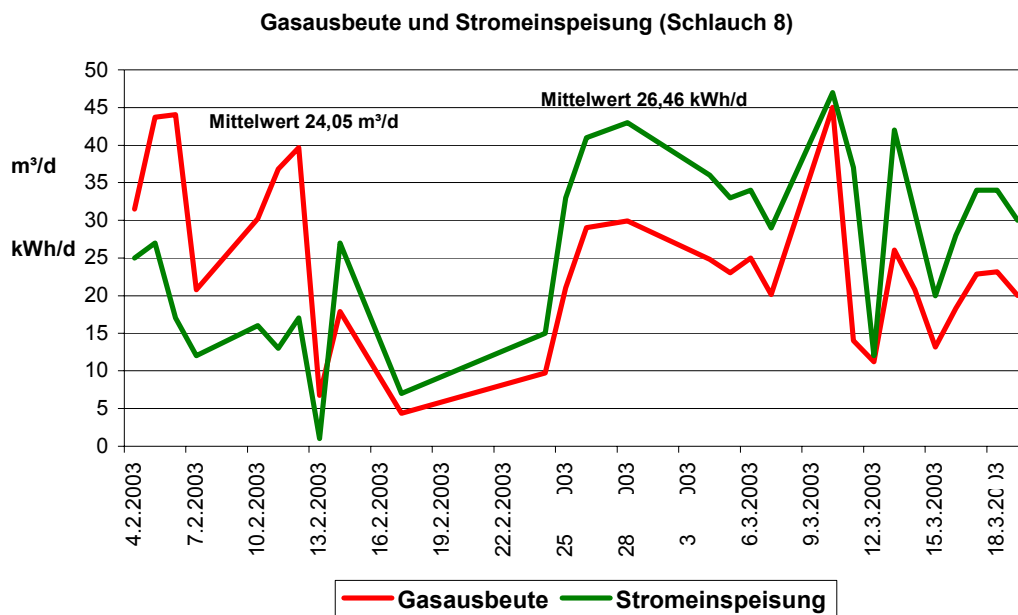
Die Umgebungstemperatur kühlte die Randbereiche stärker ab, die Isolierung war somit wiederum zu gering. Während der gesamten Liegezeit herrschten an 28 Tagen Außentemperaturen unter 0°C. Durch Störungen und Ausfall des BHKW und Krankheit der Mitarbeiter, worauf zeitweise mit Ablassen des Gases reagiert wurde, konnte nur eine unvollständige Messung der Gasausbeuten erfolgen. An störungsfreien Tagen ermittelten wir eine Gasproduktion von 0,3 bis 0,46 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>+d bzw. 30 bis 44 m<sup>3</sup> insgesamt pro Tag.

Die Qualität des Gases war gut, der Methangehalt lag zwischen 57 und 60%. Der Schwefelwasserstoffgehalt ist im Verlauf des Versuches unter 100 ppm gesunken. Die tägliche Stromeinspeisung lag im Durchschnitt bei 26,5 kWh/d (siehe Diagramm 5.7-2).

Die Gasausbeute war auch bei diesen Schläuchen äußerst niedrig, jedoch erreichten wir die höchste Gasausbeute in den Wintermonaten und zwar durch die durchgängig externe Beheizung und dicke Isoliermaterialien auf der Liegefläche des Schlauches. Wie allerdings in Diagramm 5.7-2 ersichtlich, war der Einsatz an Wärmeenergie deutlich höher als die erzeugte kWh Strom. Daraus wird deutlich, dass dieses Verfahren auf Grund der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Stallmistes und einer ungenügenden Isolierung um den Folienschlauch kein wirtschaftliches Verfahren für die Praxis werden kann. Gut isolierte Container (werden z. T. in der Praxis eingesetzt) könnten eine Alternative darstellen.



**Diagramm 5.7-2: Wärmezufuhr und Stromeinspeisung vom Schlauch 8**



**Diagramm 5.7-3: Gasausbeute und Stromeinspeisung vom Schlauch 8**

Während des Winterprojektes traten des öfteren Störungen an der Anlage auf. Stellvertretend werden hier einige genannt:

- am 31.01.03 Gaseinleitung in den Speicher (Methangehalt: 44%), Gasspeicher bereits nach wenigen Stunden gefüllt (jedoch keine Verbrennung, weil Kühlereinbau noch nicht erfolgte)
- Gasproduktion über das Wochenende 2./3.2.03 sehr stark, am Ende des Schlauches hatte sich ein straffes Gaspolster gebildet
- Kühlereinbau am 03.02.03, Startversuch BHKW gescheitert, Motor schaltet wegen „Über-temperatur“ aus
- Problemanalyse: interne Heizungspumpe muss in den Kreislauf integriert werden
- Fehlerbehebung am 04.02.03, Heizungspumpe integriert
- aufgrund der starken Gasansammlung kam es zu einem Überdruck am 06.02.03
- Folge: BHKW Motor sprang nicht an, manuelle Regelung
- zeitweise war kein Automatikbetrieb möglich, Gas konnte nur verbrannt werden, wenn Mitarbeiter vor Ort waren
- Probleme am Blockheizkraftwerk (BHKW)

Von Störungen war das Blockheizkraftwerk häufig betroffen. Die aufgetretenen Probleme waren gravierend. Hier sollen im Zusammenhang mit der Auswertung des Winterprojektes nur einige genannt werden:

- 06.02.03 Motor sprang nicht an; durch Überdruck im Gasspeicher wurde Gas über ein Ventil in die Außenluft abgelassen
- 06.02.03 Ausschalten wegen „Rückleistung“ (eine Meldung des BHKW), nach Fehlerbehebung Gasverbrennung möglich
- 13.02.03 Motor schaltete nach ca.10 min aus, Beginn von Auftauversuchen außerhalb und im BHKW, jedoch erfolglos; nach Startversuchen Beobachtung, dass das Ausschalten erfolgt, sobald Strom ins Netz eingespeist wird, genaue Fehlerursache nicht bekannt
- 14.02.03 Fehler: Ausfall eines Relais, Inbetriebnahme BHKW,
- 17.02.03 manueller Start, Laufzeit: ca.15 min, dann Abbruch ohne Fehlermeldung, mehre Neustarts, Feststellung: Amperemeter beim Start auf 100 A, innerhalb weniger Sekunden auf 20 A, dann Stillstand der Anlage,
- 18.02.03 manueller Start, kurze Laufzeit; Problem wie am 17.02., nach Fehlerbehebung (Ausfall des Motorschutzschalters) ist Gasverbrennung möglich, BHKW danach nur mit Teillast betrieben
- 26.02.03 Motorschutzschalter, Neustart
- 28.02.03 nach kurzer Laufzeit wird Motorschutzschalter aktiviert – Motor schaltet wieder ab
- 28.02.03 kein Gas vorhanden (Ventil bleibt über das Wochenende leicht geöffnet)
- 06.03.03 siehe 28.02.02, Neustart
- 10.03.03 Gasspeicher übervoll, großes Gaspolster am Ende des Schlauches, Motor springt nicht an, Einstellung über Startgas
- 12.03.03 Motorschutzschalter ausgefallen, abends Öffnung des externen Heizkreislaufes, da für die Nacht Frost vorhergesagt wurde extremer Wasserverlust an der Heizungsanlage
- 13.03.03 weiterhin extrem hohe Wasserverluste, aufgrund dessen wird auch am Wochenende nach der Anlage gesehen, Beheizung bis auf Widerruf an
- 19.03.03 Beheizung wird ausgestellt
- 21.03.03 starker Frost wird vorausgesagt, Beheizung an, BHKW auf Handbetrieb
- 24.03.03 Motorschutzschalter, Regelung über Startgas, externe Heizung vom Netz genommen, BHKW auf Automatik, BHKW läuft nicht, Motor schaltet wegen „Übertemperatur“ aus
- 04.04.03 wegen Frostgefahr wird alles ausgestellt, Ölradiator zum Beheizen an
- 07.04.03 teilweise Frost in den Leitungen, Kühler defekt
- 08.04.03 Kühlerausbau

- 11.04.03 Kühlereinbau, Kühlerleistung um 1/3 gemindert
- 14.04.03 Inbetriebnahme der Anlage
- 14.04.03 Beräumung des Winterschlauches

## 6 Betriebswirtschaftliche Aspekte

Für die Etablierung eines neuen Verfahrens am Markt ist die Wirtschaftlichkeit neben der technischen Reife der entscheidende Faktor. In diesem Kapitel sollen deshalb einige wirtschaftliche Betrachtungen erfolgen.

### 6.1 Kosten der Energieerzeugung im Folienschlauch

#### **Investitionskosten**

Eine der größten Investitionen, die für jede Biogasanlage notwendig sind, ist das BHKW, das in seiner Leistung an die zu erwartende Biogasmenge angepasst werden muss. Im Rahmen der Berechnungen werden dafür 1500 € Investitionskosten pro kW installierter elektrischer Leistung, einschließlich der Gas- und Wärmeanschlüsse sowie eines einfachen Gasspeichers, angesetzt. Ein BHKW mit 15 kW elektrischer Leistung ist für einen Gasertrag aus 17 Schläuchen im Jahr ausreichend. Die Kosten für den Anschluss der Biogasanlage an das Stromnetz müssen ebenfalls beachtet werden. Die Höhe hängt stark von den örtlichen Gegebenheiten ab und kann an dieser Stelle nicht in die Investitionskosten einfließen. Im Fall der Versuchsanlage in Köllitsch wurden durch das örtliche Energieversorgungsunternehmen lediglich pauschale Kosten in Höhe von 325 € plus Mehrwertsteuer geltend gemacht.

Wird das AG-BAG-System für die Biogaserzeugung neu im Betrieb eingeführt und soll die Befüllung in Eigenleistung erfolgen, muss eine Befüllmaschine angeschafft werden. Ein AG-BAGer vom Typ G 6000, der mit einem Radlader oder Bagger befüllt werden muss, kostet ca. 35.000 €. Die Eigenmechanisierung mit Silopresse lohnt sich in Anbetracht der hohen Investitionskosten für die Befüllmaschine nur für Betriebe, in denen große Mengen verarbeitet werden oder in denen die Technik auch zur Futtermittelkonservierung genutzt wird.

	<b>Investitionen:</b>	<b>Nutzungsdauer</b>
BHKW (15 kWh <sub>el</sub> )	22.500 €	6 a
Elektroenergieanschluss	vorhanden	
Silopresse G 6000	35.000 €	10 a
Heiz- Gas- und Elektroleitungen	5.500 €	8 a
Unterbodenbefestigung	vorhanden	
Messtechnik	2.000 €	4 a
<b>Investitionskosten gesamt</b>		<b>65.000 €</b>

### **Betriebskosten**

Zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit ist eine Reihe von Daten zu berücksichtigen. Dazu gehören die bereits beschriebenen Investitionskosten für Anlagentechnik und die laufend anfallenden Kosten für Arbeitskräfte und Betriebsstoffe.

Die Angaben zu den **Kosten für den Maschineneinsatz** beruhen auf Werten, die vom Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) herausgegeben werden. Alle Angaben zu Kosten, die direkt mit der Technik des AG-BAG-Verfahrens im Zusammenhang stehen, stammen von der BAG Budissa Agroservice GmbH. Für den Einsatz von Maschinen und Geräten wurden in allen Berechnungen die in Tabelle 6.1-1 aufgeführten Kosten zugrunde gelegt. Hierbei ist zu beachten, dass die festen Kosten auf der Basis einer vom KTBL vorgegebenen Nutzungsdauer der Maschinen basieren.

**Tabelle 6.1-1: Betriebskosten benötigter Maschinen und Geräte (nach KTBL)**

<b>Maschine/ Gerät</b>	<b>Größe</b>	<b>Kosten (gerundet)</b>	<b>Bemerkungen</b>
Radlader 1,5 m <sup>3</sup>	68 KW	14 €/h	einschließlich: 8 l/h DK
Traktor	75-92 KW	18,5 €/h	einschließlich 9,7 l/h DK
Anhänger	10 t Nutzlast	0,70 €/t	

DK = Dieselmotorkraftstoff

Die anzusetzenden Kosten für eine **Arbeitskraft** (Traktorist) betragen etwa 11 €/h (LfL) einschließlich aller Lohnnebenkosten. Neben den Arbeitszeiten die für die Beräumung und Befüllung (siehe Tab. 3.5-2 und 3.5-3) benötigt werden, muss täglich eine Kontrolle und Durchsicht sowie eine Sicherung von wichtigen Daten erfolgen. Für diese Arbeiten können täglich etwa 30 Minuten (einschließlich kurzer Wege) veranschlagt werden. Die Zeiten für **Reparaturen** dürfen nicht zu niedrig angesetzt werden. Weil viele Reparaturen im Versuch durch das Messsystem verursacht wurden bzw. durch technische Anfangsschwierigkeiten, sollen die Reparaturzeiten auch nicht überbewertet werden. Eine Stunde täglich über das ganze Jahr verteilt, ergibt wahrscheinlich ein realistisches Bild. Müssen die Reparaturen von einem Fremdbetrieb ausgeführt werden, verursacht das Arbeitskosten von mindestens 25 €/h. Für die Wartung des BHKWs werden in der Regel 0,01 € pro erzeugter kWh Strom an laufenden Kosten veranschlagt. Leistung und Laufzeit des eingesetzten BHKW ergeben sich aus der anfallenden Gasmenge und -zusammensetzung.

**Weitere Betriebskosten** sind die Ausgaben für die Folienschläuche und für die gesamten Abdeck- und Isoliermaterialien.

Es ergeben sich die folgenden Betriebskosten für die Energieerzeugung mittels Trockenfermentation im Folienschlauch:

**Tabelle 6.1-2: Betriebskosten der Schlauchfermentation**

<b>Kosten</b>	<b>pro Schlauch 40 m, 150 t in €</b>	<b>pro Jahr 17 Schläuche in €</b>
Verbrauch Schläuche	300	5100
Radlader (6 h, 14 €/h)	84	1428
Traktor Antrieb Presse (6 h, 18,5 €/h)	111	1887
Traktor Transport (12 h, 18,5 €/h)	222	3774
Anhänger Transport (150 t, 0,7 €/t)	210	3570
AK Befüllung, Beräumung (0,42 h/t, 11 €/h, 150 t)	693	11781
AK Reparatur, Wartung (1,5 h/d, 11 €/h)	352	5984
Abdeckung, Isolierung (mehrmalige Verwendung)	100	1700

Wird die von der BAG gebotene Möglichkeit genutzt, die Schläuche in Lohnarbeit befüllen zu lassen, fällt von den eben bezeichneten Kosten nur noch der Teil an, der zum An- und Abtransport des Substrats erforderlich ist. Die Kosten für die Befüllung selbst werden von der BAG nach Inputmasse berechnet. Sie betragen etwa 6 € pro t (900 € pro Schlauch) und enthalten bereits Kosten für den Schlauch, den Einsatz der Silopresse einschließlich des antreibenden Traktors, für das Bedienpersonal sowie für den Treibstoff. Die Investitionskosten werden deutlich geringer, weil keine Silopresse angeschafft werden muss.

## **6.2 Erlöse der Energieerzeugung im Folienschlauch**

Die jährlichen Erlöse werden hauptsächlich durch den Verkauf des erzeugten Stroms nach den Sätzen des EEG bestimmt. Bei einer Anlage mit einer installierten elektrischen Leistung bis 150 kW, der Vergärung von Mist und Silage sowie beim Trockenfermentationsverfahren werden ab dem 01.08.2004 19,5 Cent pro eingespeister kWh<sub>el</sub> gezahlt. Als Grundlage für die zu erzeugende Menge Elektroenergie wurden die am Gaszähler des BHKWs registrierten Gasmengen verwendet. Die Berechnung basiert auf der höchsten Gasausbeute von Schlauch 3. Darauf aufbauend wird pro Tonne Input eine Biogasproduktion von 0,4 m<sup>3</sup>/d (0,21 m<sup>3</sup>/kg oTS) mit einem Heizwert von 5,5 kWh/m<sup>3</sup> angesetzt. Der elektrische Wirkungsgrad des BHKWs beträgt etwa 33 %. Als Liegezeit für einen Schlauch werden acht Wochen (56 Tage) angenommen. Somit ergeben sich die Erlöse aus dem Stromverkauf pro Schlauch mit 150 Tonnen Substrat anhand folgender Rechnung:



Biogasausbeute	$56 \text{ d} \cdot 0,4 \text{ m}^3/\text{d}$ und $\text{t} \cdot 150 \text{ t}$	=	$3.360 \text{ m}^3$ pro Schlauch
Energiegehalt	$3.360 \text{ m}^3 \cdot 5,5 \text{ kWh/m}^3$	=	$18.480 \text{ kWh}$
Stromerzeugung	$18.480 \text{ kWh} \cdot \eta=0,33$	=	$6.098 \text{ kWh}$
Stromverkauf	$6.098 \text{ kWh} \cdot 0,195 \text{ €}$	=	$1.189 \text{ €}$ pro Schlauch

Etwa 25 % des Energiegehalts des Biogases werden nach bisherigen Erfahrungen am BHKW über den Notkühler als überschüssige Wärme abgegeben. Diese Wärmemenge stünde auch für eine anderweitige Verwendung zur Verfügung. Weil das BHKW nicht kontinuierlich im Einsatz war, stand keine ausreichende Wärme zur Verfügung, so dass keine Erlöse für eine Wärmenutzung erzielt werden konnten. Leider war die Wärmebilanz bei der Schlauchfermentation im Winter sogar negativ, so dass langfristig nicht mit überschüssiger Wärme bei diesem Fermentationstyp gerechnet werden kann.

Eine in der Nassvergärung schon oft angewendete Methode zur Steigerung des Gasertrages ist der Einsatz von Energiepflanzen, wie z. B. Maissilage, zur Kofermentation. Die für den Anbau notwendige Flächengröße richtet sich hierbei nach der Zahl der zu befüllenden Schläuche, die wiederum von der anfallenden Menge Mist bestimmt wird. Vor jeder Befüllung muss die Maissilage durch Mischung mit Mist angeimpft werden, dafür ist eine Arbeitszeit von drei Stunden für einen Radlader plus zugehöriger Arbeitskraft einzuplanen. Die Kosten für die Maissilage betragen etwa 25 bis 30 €/t.

### 6.3 Gesamtwirtschaftlichkeit

In einer Wirtschaftlichkeitsberechnung werden die Kapitalkosten, die sich aus den Investitionen errechnen, die Betriebskosten und die Erlöse zusammengeführt. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Wirtschaftlichkeit unter den Bedingungen in Köllitsch mit der besten Gasausbeute des Schlauches 3. Wie zu erkennen ist, kann unter den genannten Bedingungen, trotz EEG und Landesförderung von 30 %, keine Wirtschaftlichkeit erzielt werden.

**Tabelle 6.3-1: Wirtschaftlichkeitsberechnung der Trockenfermentation im Siloschlauch**

Einnahmen						
Elektroenergie						
Eigenbedarfsdeckung	0	kWh/Jahr		EUR/kWh	0	EUR
Stromverkauf an Dritte	0	kWh/Jahr		EUR/kWh	0	EUR
Stromeinspeisung	115.529	kWh/Jahr	0,1750	EUR/kWh	20.218	EUR
Technologiebonus	115.529	kWh/Jahr	0,02	EUR/kWh	2.311	EUR
Wärmeenergie						
bisheriger Wärmebedarf	0	kWh/Jahr		EUR/kWh	0	EUR
zusätzliche Wärmenutzung	0	kWh/Jahr		EUR/kWh	0	EUR
Wärmeenergieverkauf	0	kWh/Jahr		EUR/kWh	0	EUR
KWK-Bonus	0	kWh/Jahr	0,00	EUR/kWh	0	EUR
sonstiges						
Entsorgungseinnahmen		t/Jahr		EUR/t	0	EUR
Verkauf/Bewertung anderer Endprodukte					0	EUR
<b>Gesamteinnahmen/Jahr</b>					<b>22.528</b>	<b>EUR</b>
Kosten						
Investitionen der Anlage					65.000	EUR
dav. Fördermittel	30	% oder		EUR	19.500	EUR
Investitionen ohne Fördermittel					45.500	EUR
Abschreibung gesamt				%	5.906	EUR
Zinsbelastung - Eigenkapital		%			0	EUR
Zinsbelastung - Fremdkapital	6	%			1.365	EUR
Wartung und Betriebskosten		%	17459,00	EUR	17.459	EUR
Zündöl	0	l/a		EUR/l	0	EUR
Instandhaltung		%		EUR	0	EUR
Vollkosten der Kofermente				EUR	0	EUR
Arbeitskraft					17.765	EUR
Stromzukauf (Prozessenergie)		kwh		EUR/kWh	0	EUR
Versicherung	0,5	% oder		EUR	325	EUR
Gemeinkosten					1000,0	EUR
<b>Gesamtkosten/Jahr</b>					<b>43.820</b>	<b>EUR</b>
<b>Gewinn/Verlust</b>					<b>-21.292</b>	<b>EUR</b>

Eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit kann vor allem durch zwei Veränderungen erreicht werden:

- Steigerung des Gasertrages um das Doppelte (entspräche Literaturangaben)
- Verringerung der benötigten Arbeitszeit um ein Drittel.

Unter diesen Gesichtspunkten wird bereits eine leichte Wirtschaftlichkeit erreicht, wie Tabelle 6.3-2 zeigt. Doch auch hierbei ist mit dem niedrigen Gewinn nur eine geringe Rentabilität zu verzeichnen.

**Tabelle 6.3-2: Wirtschaftlichkeitsberechnung der Trockenfermentation im Siloschlauch mit verbesserter Gaserzeugung und geringeren AKh**

<b>Einnahmen</b>						
<b>Elektroenergie</b>						
Eigenbedarfsdeckung	0	kWh/Jahr		EUR/kWh	0	EUR
Stromverkauf an Dritte	0	kWh/Jahr		EUR/kWh	0	EUR
Stromeinspeisung	231.059	kWh/Jahr	0,1750	EUR/kWh	40.435	EUR
Technologiebonus	231.059	kWh/Jahr	0,02	EUR/kWh	4.621	EUR
<b>Wärmeenergie</b>						
bisheriger Wärmebedarf	0	kWh/Jahr		EUR/kWh	0	EUR
zusätzliche Wärmenutzung	0	kWh/Jahr		EUR/kWh	0	EUR
Wärmeenergieverkauf	0	kWh/Jahr		EUR/kWh	0	EUR
KWK-Bonus	0	kWh/Jahr	0,00	EUR/kWh	0	EUR
<b>sonstiges</b>						
Entsorgungseinnahmen		t/Jahr		EUR/t	0	EUR
Verkauf/Bewertung anderer Endprodukte					0	EUR
<b>Gesamteinnahmen/Jahr</b>					<b>45.057</b>	<b>EUR</b>
<b>Kosten</b>						
<b>Investitionen der Anlage</b>					65.000	EUR
dav. Fördermittel	30	% oder		EUR	19.500	EUR
Investitionen ohne Fördermittel					45.500	EUR
Abschreibung gesamt				%	5.906	EUR
Zinsbelastung - Eigenkapital		%			0	EUR
Zinsbelastung - Fremdkapital	6	%			1.365	EUR
Wartung und Betriebskosten		%	17.459	EUR	17.459	EUR
Zündöl	0	l/a		EUR/l	0	EUR
Instandhaltung		%		EUR	0	EUR
Vollkosten der Kofermente				EUR	0	EUR
Arbeitskraft					12.435	EUR
Stromzukauf (Prozessenergie)		kwh		EUR/kWh	0	EUR
Versicherung	0,5	% oder		EUR	325	EUR
Gemeinkosten					1000,0	EUR
<b>Gesamtkosten/Jahr</b>					<b>38.490</b>	<b>EUR</b>
<b>Gewinn/Verlust</b>					<b>6.566</b>	<b>EUR</b>

Die enormen Arbeitskosten zu senken, wird relativ leicht möglich sein, weil eine Versuchsanlage mehr an Arbeitszeit und Betreuung benötigt und bei „eingespielten“ Arbeitsprozessen wesentlich weniger Arbeitszeit in Anspruch genommen werden muss. Die Gaserträge auf das Doppelte des ohnehin schon besten Ergebnisses zu erhöhen, scheint jedoch mit diesem Verfahren durch die im Projekt genannten Bedingungen nicht möglich zu sein.

## 7 Zusammenfassung

Im Lehr- und Versuchsgut der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft wurde eine besondere Form der Trockenvergärung getestet.

Die Trockenfermentation bietet Landwirten, die als Wirtschaftsdünger ausschließlich Feststoffe besitzen, die Möglichkeit, diese in Strom und Wärme umzuwandeln und ihre Technologie (Erzeugung, Lagerung, Ausbringung der Wirtschaftsdünger) beizubehalten.

Mit der Versuchsanlage in Köllitsch sollte ein neues Verfahren der Energiegewinnung getestet werden. Völlig neu war dabei die Fermentation in einem isolierten und beheizten Folienschlauch. Das Verfahren arbeitet in Anlehnung an die Schlauchsilierung der Firma AG BAG Budissa GmbH und nutzt die gleiche Technik zur Erstellung der fertigen Schläuche.

Mit den geschaffenen politischen Rahmenbedingungen und den niedrigen Investitionskosten für dieses Verfahren schien eine günstige Möglichkeit für Diversifizierung in der Landwirtschaft zu bestehen.

Das Hauptaugenmerk der Untersuchungen richtete sich auf den Gasertrag und die Kosten des Verfahrens. Neben diesen wurden aber auch Gasqualität, Wärmebilanz und Substrateigenschaften untersucht. Während der 21-monatigen Laufzeit des Projektes wurden ständig technische Verbesserungen an der Anlage, eine bessere Wärmeversorgung des Substrates und veränderte Isolierungen des Schlauches vorgenommen.

Die verwendete Messtechnik musste für die Versuchsreihe erst optimiert und angepasst werden. Durch Ausfälle der Messtechnik konnten keine 100 %-ig vollständigen Messreihen erstellt werden. Die gemessenen Daten wurden in Datenbanken zusammengefasst, daraus wurden vergleichbare Mittelwerte gebildet. Viele Datenreihen wurden grafisch umgesetzt.

Innerhalb des Projektes wurde ersichtlich, dass das wirtschaftliche Ergebnis auf Grundlage der Daten aus den Versuchen für alle Betriebsgrößen deutlich negativ ist. Die Investition in das Verfahren ist damit selbst unter den Bedingungen des deutschen EEG und einer Landesförderung von 30 % unrentabel. Die anfallenden Kosten, die im Zusammenhang mit der Befüllung der Schläuche entstehen, werden durch die zu erzielenden Einnahmen aus dem Stromverkauf bei weitem nicht gedeckt. An Hand der aufgezeigten Berechnungen wird ersichtlich, dass die Rentabilität hauptsächlich von einer Größe, nämlich der Biogasproduktion, abhängt. Durch sie allein können Erlöse über den Stromverkauf realisiert werden. Andere Einflüsse, wie z. B. die richtige Anpassung der Leistung des BHKW an das Gasangebot, können zwar Einsparungen bei den Investitionskosten bedeuten, wirken sich jedoch nicht so gravierend auf das Ergebnis aus wie ein gesteigerter Gasertrag.

Gaserträge, die in der Literatur angegeben werden, konnten vor allem aus den folgenden Gründen nicht erreicht werden:

- Es konnte keine gleichmäßige Temperatur in den Schlauchfermentern erzeugt werden, weil
  - a) das feste Material wenig wärmeleitend ist
  - b) die Wärme nicht kontinuierlich zugeführt werden konnte
  - c) die Isolierung nicht ausreichte.
  
- Das Substrat war für einen Vergärungsprozess zu trocken (im Schlauch kann nicht perkuliert werden).
- Das Substrat konnte im Schlauchfermenter nicht gemischt werden.

Die Gasausbeuten lassen sich erhöhen durch Zumischen leicht abbaubarer Substanzen sowie durch Zugabe von Gärhilfsmitteln.

## 8 Literaturverzeichnis

- BAG Budissa Agroservice GmbH: „Verfahrensentwicklung und verfahrenstechnische Erprobung der Feststoffvergärung in Kunststoffschläuchen zur Einführung in Mietenkompostierungsanlagen für Bioabfälle“, Abschlussbericht zum Kooperationsprojekt
- KTBL Taschenbuch 2002-2003
- Müller, Heiko: „Anwendungsuntersuchungen zur Trockenvergärung am Beispiel der Schlauchvergärung im AG-BAG-System“, Diplomarbeit brandenburgische Technische Universität Cottbus
- Schütte, A.: Gülzower Fachgespräche, Band 15, „Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial“, 2000

9 Anhang

Tabelle 9-1: Schwermetalle im Gärsubstrat - Befüllung

Nr.	Gesamt-phosphat	Gesamt-kalium	Blei	Cad-mium	Kupfer	Chrom	Nickel	Queck-silber	Zink
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O							
	(% in TM)	(% in TM)	mg/kg TM						
1	1,01	3,22	2,33	0,41	18,6	2,13	1,57	0,05	100
2	2,5	3,38	11,8	0,47	88,2	6,29	3,81	0,08	483
3	1,35	3,78	17,9	0,52	32	11,9	4,48	0,13	166
4	1,01	5,59	3,01	0,42	23,9	1,36	1,54	0,04	107
5	1,67	3,49	9,47	0,73	34,3	9,89	3,96	0,1	179
6	1,24	4,62	0,95	0,32	36,8	3,32	4,78	0,07	150
7	1,01	3,18	6,67	0,28	15,1	1,56	2,39	0,03	88,8
8	1,63	3	1,17	0,19	62,1	2,73	2,3	0,04	233
9	1,3	3,12	0,81	0,23	21,4	1,89	2,14	0,05	116
10	1,59	3,1	3,47	0,4	23,7	3,95	2,93	0,07	118
11	0,74	2,43	7,8	0,46	32,7	6,7	5,19	0,07	852
12	0,98	3,52	7,93	0,23	19,1	7,62	4,95	0,05	107
13	1,19	4,08	1,73	0,26	14,8	1,84	1,88	0,05	77,6
14	0,85	3,44	0,91	0,15	35,3	2,04	1,96	0,04	162
15	0,55	3,77	0,03	0,13	29,3	1,28	1,07	0,05	96,9

**Tabelle 9-2: Schwermetalle im Gärsubstrat - Entleerung**

(Schlauch 13 konnte nicht ausgewertet werden)

Nr.	Gesamtphosphat P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Gesamtkalium K <sub>2</sub> O	Blei	Cadmium	Kupfer	Chrom	Nickel	Quecksilber	Zink
	(% in TM)	(% in TM)	mg/kg TM						
1	1,19	4,4	<0,01	0,42	24	3,8	4,99	0,05	107
2	1,56	4,39	7,95	0,39	33,7	3,82	0,54	0,06	201
3	1,56	4,36	0,58	0,32	28,2	5,34	4,07	0,09	124
4	1,19	5,59	4,53	0,38	26,4	2,8	0,62	0,05	122
5	1,15	4,3	8,3	0,38	22	4,78	2,26	0,06	102
6	1,42	3,66	12,6	0,55	28,4	12,1	4,44	0,12	142
7	1,58	3,44	7,8	0,46	32,7	6,7	5,19	0,07	852
8	1,23	2,75	0,19	0,13	24,4	1,69	1,3	0,03	101
9	1,47	2,9	1,85	0,24	54,4	1,94	3,61	0,04	289
10	1,72	4,72	5,6	0,38	41,1	6,07	4,56	0,06	216
11	0,69	2,59	3,7	0,21	12,5	4,15	3,27	0,06	58,5
12	1,28	4,27	1,15	0,23	27,1	2,92	2,74	0,04	86,3
14	1,05	4,92	8,77	0,12	12,8	36,8	12,3	0,03	83,7
15	0,64	4,48	3,09	0,1	31,6	9,32	4,08	0,01	248



**Tabelle 9-3: Nährstoffe im Gärsubstrat - Befüllung**

<b>Schlauch</b>	<b>TS</b>	<b>oTS</b>	<b>N ges.</b>	<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	<b>P</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>K</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>Mg</b>	<b>MgO</b>	<b>S</b>	<b>Ca</b>	<b>C/N-Verhältnis</b>
	%	% in TM	% in OS	% in OS	% in TM	% in TM	% in TM	% in TM	% in TM	% in TM	% in TM	% in TM	
1	33,1	85,0	0,80	0,25	-	1,01	-	3,22	-	-	-	-	-
2	27,4	37,9	0,78	0,19	-	2,50	-	3,38	0,60	-	-	-	13,3
3	26,3	39,1	0,79	0,22	-	1,35	-	3,78	0,45	-	-	-	13,0
4	25,8	44,3	0,64	0,21	-	1,01	-	5,59	0,40	-	-	-	17,9
5	33,7	36,1	0,85	0,24	0,73	1,67	2,91	3,49	0,44	0,73	-	-	14,3
6	31,5	43,7	0,78	0,27	0,54	1,24	3,85	4,62	0,36	-	-	-	17,6
7	26,5	85,3	0,65	0,20	0,44	1,01	2,65	3,18	0,36	0,60	-	-	20,3
8	25,5	85,4	0,74	0,23	0,71	1,63	2,50	3,00	0,43	0,71	-	-	17,1
9	29,1	81,4	0,84	0,20	0,57	1,30	2,60	3,12	0,35	0,58	0,25	1,34	16,3
10	23,7	77,5	0,88	0,15	0,69	1,59	2,58	3,10	0,38	0,63	0,34	1,44	12,1
11	30,9	72,1	0,38	0,12	0,32	0,74	2,02	2,43	0,27	0,45	0,21	0,73	34,0
12	34,3	68,8	0,73	0,45	0,43	0,98	2,93	3,52	0,31	0,53	0,28	0,88	18,7
13	33,0	84,8	1,21	0,25	0,52	1,19	3,40	4,08	0,24	0,40	0,28	0,66	13,4
14	24,8	86,6	0,58	0,13	0,37	0,85	2,87	3,44	0,36	0,60	0,25	0,99	21,5
15	36,6	86,8	0,78	0,25	0,24	0,55	3,14	3,77	0,32	0,53	0,26	0,75	23,6

**Tabelle 9-4: Nährstoffe im Gärsubstrat - Entleerung**

<b>Schlauch</b>	<b>TS</b>	<b>oTS</b>	<b>N ges.</b>	<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	<b>P</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>K</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>Mg</b>	<b>MgO</b>	<b>S</b>	<b>Ca</b>	<b>C/N- Verhältnis</b>
	%	% in TM	% in OS	% in OS	% in TM	% in TM	% in TM	% in TM	% in TM	% in TM	% in TM	% in TM	
1	30,1	44,8	0,97	0,31	-	1,19	-	4,40	0,41	-	-	-	13,9
2	24,1	40,4	0,81	0,20	0,68	1,56	3,66	4,39	0,39	-	-	-	12,0
3	28,5	41,0	0,85	0,28	0,68	1,56	3,63	4,36	0,34	-	-	-	13,8
4	21,9	70,7	0,82	0,22	0,52	1,19	4,66	5,59	0,31	0,51	-	-	11,0
5	25,9	68,1	0,97	0,39	0,50	1,15	3,58	4,30	0,34	0,56	-	-	10,6
6	34,3	62,7	1,13	0,28	0,62	1,42	3,05	3,66	0,37	0,61	-	-	11,1
7	26,6	70,9	0,84	0,29	0,69	1,58	2,87	3,44	0,66	1,10	-	-	13,0
8	21,0	87,4	0,59	0,19	0,54	1,23	2,29	2,75	0,31	0,51	0,24	1,07	18,0
9	31,9	83,7	0,81	0,17	0,64	1,47	2,42	2,90	0,41	0,68	-	-	-
10	22,7	66,4	0,66	0,23	0,75	1,72	3,93	4,72	0,64	1,06	0,39	2,14	13,3
11	21,7	77,8	0,61	0,15	0,30	0,69	2,16	2,59	0,20	0,33	0,31	0,77	16,0
12	37,7	82,7	1,18	0,41	0,56	1,28	3,56	4,27	0,31	0,88	0,31	0,87	15,3
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	35,5	79,2	0,55	0,13	0,46	1,05	4,10	4,92	0,32	0,53	-	-	29,6
15	22,6	82,8	0,42	0,10	0,28	0,64	3,73	4,48	0,24	0,40	-	-	24,9

## **Impressum**

**Herausgeber:** Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft  
August-Böckstiegel-Straße 1, 01326 Dresden  
**Internet:** [www.landwirtschaft.sachsen.de/lfl/publikationen](http://www.landwirtschaft.sachsen.de/lfl/publikationen)

**Autoren:** Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft  
Fachbereich Agrarökonomie, Ländlicher Raum  
Dr. Kerstin Jäkel; Christine Höhne; Kerstin Heilmann; Sabine Mau  
Telefon: 0341/4472-220  
Telefax: 0341/4472-314  
E-Mail: [kerstin.jaekel@fb3.lfl.smul.sachsen.de](mailto:kerstin.jaekel@fb3.lfl.smul.sachsen.de)

Budissa Agroservice Gesellschaft mbH  
Birnenallee 10  
02694 Malschwitz OT Kleinbautzen  
Katrín Duderstadt  
Telefon: 035932/35630  
Telefax: 035932/35656  
E-Mail: [katrin.duderstadt@ag-bag.de](mailto:katrin.duderstadt@ag-bag.de)

**Redaktion:** siehe Autoren

**Endredaktion:** Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft  
Birgit Seeber, Ramona Scheinert, Matthias Löwig  
Telefon: 0351/2612-345  
Telefax: 0351/2612-151  
E-Mail: [birgit.seeber@pillnitz.lfl.smul.sachsen.de](mailto:birgit.seeber@pillnitz.lfl.smul.sachsen.de)

**ISSN:** 1861-5988

**Redaktionsschluss:** August 2005

Für alle angegebenen E-Mail-Adressen gilt:  
Kein Zugang für elektronisch signierte sowie für verschlüsselte elektronische Dokumente

### **Verteilerhinweis**

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.