

Bestimmung der Anteile der Prozessenergie bei einer Biogasanlage

W. Göbel

Die Prozessenergie einer Biogasanlage ist im Winterhalbjahr recht hoch. Neben Menge und Temperatur der Frischgülle und neben der Isolationsstärke des Gärtraumes spielt der Wirkungsgrad der Heizung für die Höhe der Prozessenergie eine beachtliche Rolle. Auch die Heizleistungsverluste dürfen nicht übersehen werden. Der Strombedarf der Motoren für den Betrieb der Anlage fällt hingegen sehr bescheiden aus. Messungen an einer Biogasanlage im Winterhalbjahr 1981/82 und Berechnungen zeigten diese Zusammenhänge näher auf.

Berechneter und tatsächlicher Anteil an Prozessenergie stimmen selten überein, und es zeigt sich, dass in der Praxis häufig mehr als die in der Literatur genannten 20 bis 40% des produzierten Gases als Prozessgas wieder in die Anlage zurückfließen. Die Frage liegt deshalb nahe, ob die Planungsgrundlagen überhaupt ausreichen, um die benötigte Prozessenergie im voraus bestimmen zu können.

Das Untersuchungsziel bestand deshalb darin, aus Messungen der produzierten und der für den Betrieb der Anlage benötigten Gasmenge, der Gasqualität, der Menge und Temperatur der zufließenden Gülle, der Luft- und Betriebstemperatur sowie der Vor- und Rücklaufstemperatur sowohl die einzelnen Prozesswärmeanteile als auch den Heizungswirkungsgrad während eines Winterhalbjahres berechnen zu können.

Dabei wurden als Prozessenergie folgende Wärmeverluste erfasst:

- Verluste durch Transmissionswärme,
- Erwärmung der Frischgülle,
- Verluste durch Heizleitungen

Zur Prozessenergie gehört auch die Antriebsenergie für die Elektromotoren. Allerdings lässt sich diese Energie nur durch Einsatz einer mit Gas angetriebenen Wärmekraftkopplungsanlage durch Biogas direkt decken.

1. Anlagebeschreibung und Versuchsablauf

Die Biogasanlage erhält die Gülle aus einem Schweinestall von **600 Mastschweinen einer Käserei**. Einmal täglich wird mit wenigen Ausnahmen die volle Vorgrube von 1,6 m³ Gülle in den Gärraum gepumpt. Beim Öffnen der Schieber der Güllekanäle im Stall füllt sich die Vorgrube vornehmlich mit «dicker Ware», während die Harngülle überfließt.

Der **Gärraum** besteht aus einem 71 m³ fassenden alten Eisenbahn-Öltank von 6 mm starkem Stahlblech [Oberfläche 117 m²]. Er

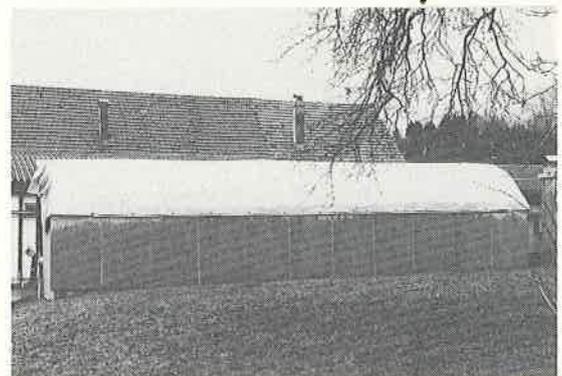


Abb. 1: Gesamtansicht der Biogasanlage, die aus einem alten Öltank der SBB erstellt ist.

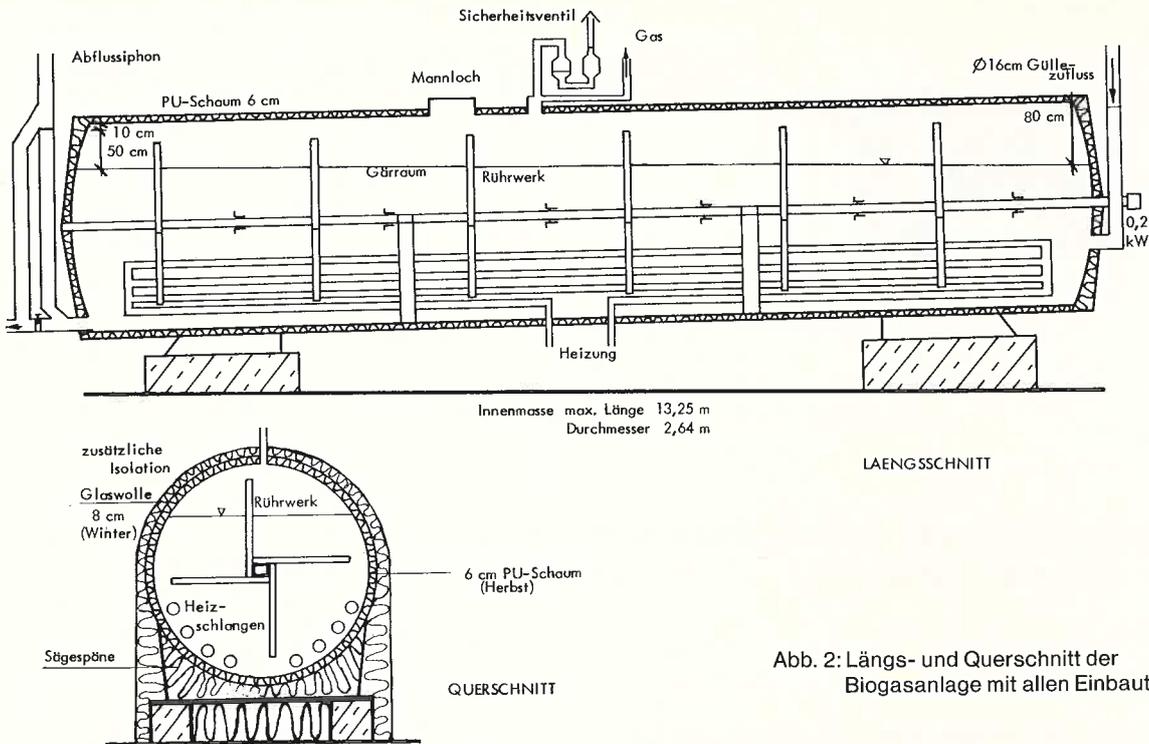


Abb. 2: Längs- und Querschnitt der Biogasanlage mit allen Einbauten.

ist mit Heizschlangen versehen und mit einer 6 cm starken PU-Schaumschicht isoliert, die mit Aluminiumblech abgedeckt ist [Abb. 1]. Es waren folgende zusätzliche Einbauten nötig: Ein **Rührwerk** mit einem Getriebemotor von 0,18 kW Stromaufnahme [Abb. 2], ein Sicherheitsventil, ein Gasent-

nahmerohr, ein Frischgülle-Zuflussrohr [Abb. 3] und ein Abflusssiphon [Abb. 4].

Das **Gas** wird, soweit es nicht zum Heizen des Fermenters benötigt wird, vollständig zur Bereitung von Warmwasser für die Käserei verwendet. Der Gasbrenner am Heizkessel in der Käserei springt bei einem Gasdruck von 50 mbar an und brennt, bis der Druck auf 10 mbar abfällt.

Der Druck wird im Tank in dem rund 15 m³ fassenden **Gassammelraum über der Gülle** aufgebaut [Abb. 2]. Der Besitzer spart dadurch einen Gasspeicher. Allerdings muss der Brenner wegen der geringen Speicherwirkung oft anspringen. Das Wandheizgerät [Durchlauferhitzer] zum Heizen des Fermenters wird von Hand eingeschaltet [Abb. 5]. Der Versuch lief von September 1981 bis Februar 1982. **Ende November 1981 wurde die Isolation des Fermenters wesentlich verstärkt.**

Der k-Wert des Fermenters wurde nach in den SIA-Normen angegebenen Zahlen und Formeln berechnet, wobei ein vereinfachter Rechenansatz, d.h. ohne Berücksichtigung der Wärme-Übergangswerte bei der stärkeren Isolation ab Dezember mehr brachte. Der k'-Wert von 0,23 W/m °C für die insgesamt 30 m langen Heizleitungen stammt aus einer EMPA-Tabelle.

Täglich erhobene Daten:

- Betriebstemperatur,
- durchschnittliche Lufttemperatur,
- produzierte Gasmenge,
- Prozessgasmenge



Abb. 3: Zuflusssiphon und Getriebemotor für das Rührwerk.

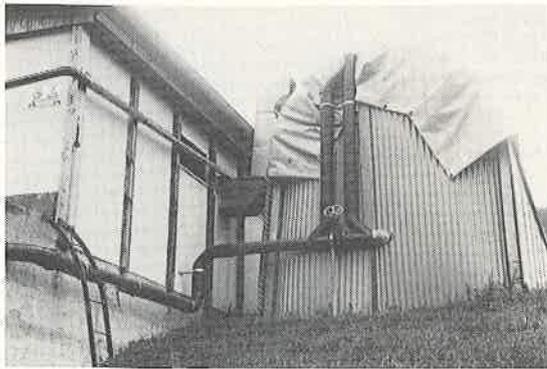


Abb. 4: Nördliche Stirnseite der Anlage mit Abflusssiphon.

Der Kohlendioxid-Gehalt [CO₂] des Gases [nach Orsat-Prinzip] und die Frischgülletemperatur wurden alle drei bis sieben Tage und die Vor- und Rücklauftemperatur der Heizung alle 14 Tage gemessen. Zweimal bestimmte man während der gesamten Untersuchungsdauer die Stromaufnahme und die Laufzeit aller Motoren sowie die Trokensubstanz der Gülle.

2. Rechenformeln

- Transmissionswärmeverlust:
 $E_T = 24 \cdot F \cdot k\text{-Wert} [t_B - t_L] / 1000$ [kWh/Tag] [1]
- Frischgülleerwärmung:
 $E_F = 1,16 \cdot Q_F [t_B - t_F]$ [kWh/Tag] [2]
- Heizleitungsverlust:
 $E_H = L \cdot k'\text{-Wert} \cdot Z [t_H - t_A] / 1000$ [kWh/Tag] [3]
- Veränderung der Betriebstemperatur:
 $E_B = 1,16 \cdot Q [t_{BE} - t_{BA}] / N$ [kWh/Tag] [4]

Die Betriebstemperatur berücksichtigt das Wärmespeichervermögen des Fermenterinhalt. Eine Erhöhung der Betriebstemperatur um nur 0,1° C zum Beispiel erfordert bei einem Fermenterinhalt von 56 m³ 6,5 kWh. Teilt man die Summe der vier Prozessenergieanteile durch den Energiegehalt des zum Heizen des Fermentes benötigten Biogases, so erhält man den Wirkungsgrad der Heizung.

$$\eta = [E_T + E_F + E_H + E_B] / E_G \quad [5]$$

- elektrische Energie:
 einphasig: $E_M = 0,22 \cdot I \cdot \cos \cdot Z$ [kWh/Tag] [6]
 dreiphasig: $E_M = 0,38 \cdot I \cdot 3 \cdot \cos \cdot Z$ [kWh/Tag] [7]

Es bedeuten:

- t_B = Betriebstemperatur in °C
- t_L = Lufttemperatur in °C
- t_F = Temperatur der Frischgülle in °C
- t_H = Heizleitungstemperatur in °C
- t_A = Leitungsumgebungstemperatur in °C
- t_{BA} = Betriebstemperatur am Anfang in °C
- t_{BE} = Betriebstemperatur am Ende in °C
- F = Fermenteroberfläche in m²
- Q_F = tägliche Zuflussmenge in m³
- Z = Laufzeit der Fermenterheizung bzw. der Motoren in h
- L = Leitungslänge in m
- Q = Fermenterinhalt an Gülle in m³
- N = Anzahl Tage
- η = Heizungswirkungsgrad
- E_G = Energiegehalt des Heizgases in kWh/Tag
- I = Stromstärke in A
- $\cos \varphi$ = Faktor der Wirkleistung, normal 0,8

Bei der Bestimmung der Gasqualität war – da lediglich der CO₂-Gehalt des Biogases gemessen wurde – zu beachten, dass Biogas ausser Methan als Energieträger neben CO₂ auch noch Wasserdampf und Spuren von Schwefelwasserstoff und anderer Gase von zirka 2 bis 3 % enthält.

Für den Normalkubikmeter Methan [0° C und 1013 mbar Luftdruck] gilt als unterer Heizwert 9,94 kWh. Da wir aber bei rund 20° C und 950 mbar Luftdruck [530 m ü. M.] und rund 30 mbar Betriebsüberdruck gemessen haben, enthält der gemessene Kubikmeter Methan nur 8,96 kWh Energie.

3.1 Messergebnisse

In Tabelle 1 sind die Tagesdurchschnitte je Monat aus allen Messungen an der Anlage angegeben.

Der gleich grosse Güllezuffluss während fast aller Monate von 1,6 m³/Tag rührt von der Grösse der Vorgrube her. **Die Frischgülletemperatur ist mit 15 bis 20° C gegenüber anderen Anlagen mit bis zu 5° C deshalb sehr hoch**, weil nur rund zehn Minuten vom Ziehen des ersten Schiebers im Stall bis zum Weiterpumpen der Gülle aus der Vorgrube vergehen. Gleich hoher Güllenzuffluss und gleich hohe Betriebstemperatur von rund 31,8° C führen **während sechs Monaten zu gleichmässiger Gasproduktion zwischen 49 bis 42 m³/Tag**.

Tabelle 1: Tagesdurchschnittswerte der Messungen.

Monat	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	Ø
Gülle in l/Tag	1600	1600	1600	1639	1600	1600	1606
Lufttemperatur °C	12,7	8,8	4,1	-0,4	-1,1	-0,2	4,0
Frischgülletemperatur	20	19	18	16	15	15	17
Betriebstemperatur	31,9	31,8	31,6	31,9	32,1	31,6	31,8
Gasproduktion m ³ /Tag	48,9	45,1	46,7	46,0	44,9	42,1	45,6
Prozessgasmenge m ³ /Tag	16,9	21,2	21,6	18,8	19,8	19,4	19,6

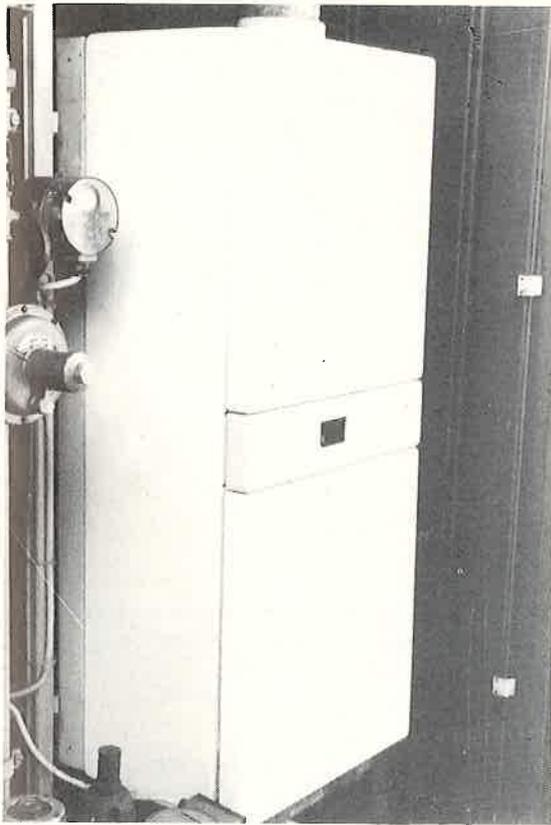


Abb. 5: Wandheizgerät [Vaillant].

3.2 Umgerechnete Ergebnisse und Prozessgasanteil

Tabelle 2 enthält die Energiegehalte der Gasproduktion und des gemessenen Prozessgases sowie den Prozessgasanteil an der Gasproduktion.

Da die Gaszusammensetzung sechs Monate lang fast gleich blieb, waren die durchschnittlichen täglichen Energieerträge auch ungefähr gleich. Dadurch wird der

Überblick über den Prozessenergieanteil, über die Höhe der einzelnen Prozessenergieanteile und über den Wirkungsgrad der Heizung erleichtert.

Mit Ausnahme des Septembers liegt der Prozessgasanteil im Vergleich zur Gasproduktion zwischen 41 und 47% überraschend hoch. Üblich sind 20 bis 40%. Mit 42 bis 49 m³ Gas je Tag haben 1,6 m³ Gülle [Tabelle 1] mit einem TS-Gehalt von 8 bis 9% ungefähr die Gasproduktion, die man erwartet, so dass der hohe Prozessenergieanteil nicht mit schlechter Gasproduktion zu begründen ist. Allerdings ist die Verweildauer [durchschnittliche Aufenthaltszeit der Gülle im Fermenter] mit 35 Tagen rund doppelt so hoch für Schweinegülle als Regel. So betrachtet liegt die Gasproduktion eher etwas unter dem zu erwartenden Durchschnitt.

Im Winter war die Isolationswirkung gegenüber dem Herbst verdoppelt (0,48 bzw. 0,23 W/m² °C). Deshalb war in den Herbstmonaten September bis November bei durchschnittlicher Lufttemperatur von 8,5° C die Prozessgasmenge im Durchschnitt gleich hoch wie in den Wintermonaten Dezember bis Februar bei durchschnittlicher Lufttemperatur von -0,6° C [Tabelle 1]. Mit anderen Worten, der Transmissionswärmeverlust wurde im Winter in dem Masse verringert, wie sich der Anteil für Frischgülleerwärmung durch tiefere Temperatur erhöhte.

3.3 Aus Temperatur- und Güllemengenmessungen errechnete Prozesswärmeanteile

In Tabelle 3 befinden sich die Ergebnisse der aus Temperatur- und Frischgüllezuflussmessungen errechneten Prozesswär-

Tabelle 2: Energiegehalt der Gasproduktion und des gemessenen Prozessgases und Prozessgasanteil.

Monat	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	Ø
% CO ₂	34	34	34	33	33	33	34
Energiegehalt kWh/m ³	5,6	5,6	5,6	5,7	5,7	5,7	5,7
Gasproduktion kWh/Tag	273,9	252,4	261,7	262,4	256,0	240,0	257,7
Prozessgas kWh/Tag	94,7	118,9	121,2	107,0	112,7	110,6	110,8
Prozessgasanteil %	35	47	46	41	44	46	43

Tabelle 3: Errechnete Prozessenergieanteile

Monat	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.
E _T kWh/Tag [%]	26,0 [53]	31,0 [53]	37,1 [55]	21,0 [39]	21,6 [39]	20,6 [38]
E _F kWh/Tag [%]	22,1 [45]	23,8 [41]	25,1 [38]	30,3 [56]	31,7 [57]	30,9 [57]
E _H kWh/Tag [%]	2,2 [4]	3,1 [5]	3,5 [5]	3,3 [6]	3,5 [6]	3,3 [6]
E _B kWh/Tag [%]	-1,2 [-2]	0,4 [1]	1,1 [2]	-0,2 [-1]	-0,8 [-2]	-0,7 [-1]
Σ E kWh/Tag	49,1 [100]	58,3 [100]	66,8 [100]	54,5 [100]	56,0 [100]	54,2 [100]

meanteile; in Klammern ist die Aufteilung in Prozent angegeben.

Der Anteil der Frischgüleeerwärmung an der Prozesswärme beträgt im Winter 57%. Der Anteil der Frischgüleeerwärmung ist damit im Winter knapp 1,5mal so hoch wie der Transmissionswärmeverlust. Dieses Verhältnis wurde durch die hohe Frischgüleeerwärmungstemperatur von über 15° C [Tabelle 1] und den verhältnismässig hohen TS-Gehalt von 8 bis 9% der Gulle erreicht (normal 4% bei 1 : 1-Verdünnung).

Umgekehrt wird dieses Verhältnis dadurch etwas verringert, dass durch den zu grossen Fermenter [siehe Bemerkungen über Verweildauer] die Wandfläche zu gross ist. Im Herbst war wegen der schlechteren Isolation der Anteil der Transmissionswärmeverluste gar höher als der Anteil aus Frischgüleeerwärmung [Abb. 6].

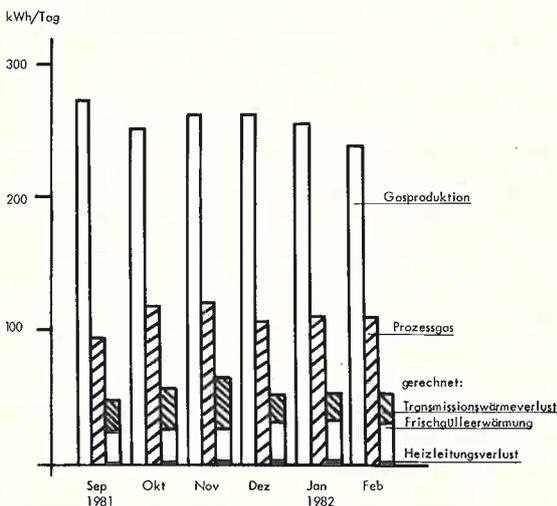


Abb. 6: Energieinhalt der Gasproduktion im Vergleich mit dem der Prozessgasmenge und mit aus Temperaturen und Frischgüleeerwärmung errechneten einzelnen Prozessenergieanteilen.

Der Heizleitungsverlust macht im Winter 6% der Prozesswärme aus, und das, obgleich die Heizstränge gänzlich isoliert und nicht sehr lang sind. Heizleitungsverluste dürfen auf keinen Fall übersehen werden, besonders wenn der Fermenter gut isoliert ist.

3.4 Wirkungsgrad der Heizung

Der Wirkungsgrad schliesst bei der Heizung folgende Verluste ein: Kessel, Stillstand und Zündflamme. Bei Wandheizgeräten wird mit Erdgas ein Wirkungsgrad von mehr als 75% erreicht. Bei Biogas waren bei dieser Biogasanlage die Tauscherlamellen aber immer stark verkrustet, selbst kurze Zeit nach

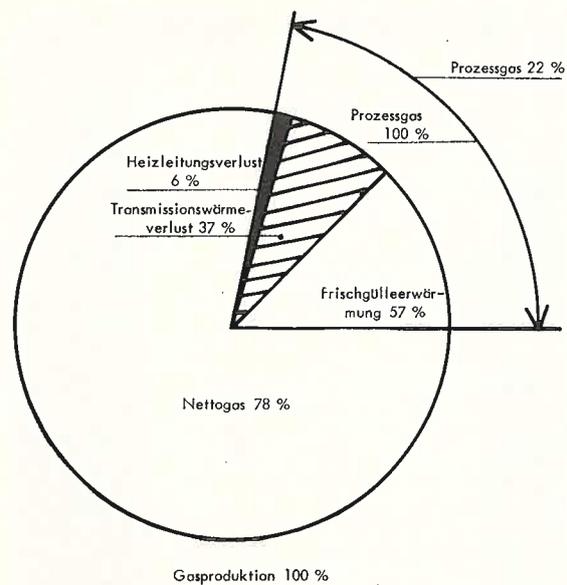


Abb. 7: Prozessgasbedarf der Biogasanlage im Jahresdurchschnitt mit der verbesserten Isolation und einem Heizungswirkungsgrad von 75%.

einer Reinigung. Zu niedrige Vorlauftemperaturen [55° C) führten zu Kondensatbildung und zu Korrosionen, wodurch der Wirkungsgrad stark reduziert wurde. In Tabelle 4 ist der Wirkungsgrad der Heizung angegeben (Formel [5]):

Erwartungsgemäss ist der **Wirkungsgrad der Heizung mit 49 bis 55% sehr niedrig.** Er erklärt den hohen Prozessgasanteil der Anlage. Das unterstreicht die Bedeutung einer geeigneten Heizung bei Biogasanlagen. Der höhere Wirkungsgrad im November von 55% [Tabelle 4] entspricht nicht ganz den Tatsachen, denn die Isolation wurde an mehreren Tagen gegen Ende November verbessert und war dann bereits wirksam, wurde aber bei der Berechnung der Transmissionswärmeverluste nicht berücksichtigt.

Tabelle 4: Wirkungsgrad der Heizung in %.

Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	Ø
52	49	(55)	51	50	49	51

3.5 Prozessgasanteil bei besserem Wirkungsgrad

Wenn der Wirkungsgrad der Heizung 75% anstatt 50% gewesen wäre, wie er im Normalfall zu erwarten ist, **so hätte selbst im Winter der Prozessgasanteil anstatt im Durchschnitt 44% [Tabelle 2] nur 29% ausgemacht.**

Um einen groben Überblick über den Prozessgasanteil der Anlage im Jahresdurch-

Tabelle 5: Mechanische Energie

Gerät	Spannung kV	Stromstärke A gemessen	Stromaufnahme kW angegebene	Stromaufnahme kW gerechnet	Laufzeit h/Tag	Stromverbrauch kWh/Tag
Heizungs- umwälzpumpe [Wandheizgerät]	0,22	0,57	0,05	0,10	bis 10	bis 1,0
Rührwerk	0,38	0,60	0,18	0,32	4,0	1,3
Güllepumpe	0,38	9,0	4,1	4,7	0,1	0,5
Total						kleiner 2,8

schnitt zu erhalten, geht man am besten von den Ergebnissen vom Monat Oktober aus, da sich dann die Lufttemperatur von 8,8° C [Tabelle 1] von der Jahresmitteltemperatur von 8,6° C kaum unterscheidet. Wenn man dabei den k-Wert wie in den Wintermonaten erreicht ansetzt und einen Heizungswirkungsgrad von 75% annimmt, was bei Heizkesseln üblich ist, so ergibt sich das in Abb. 7 dargestellte Resultat. **Danach liegt der Prozessgasanteil im Jahresdurchschnitt wegen der «dicken» Gülle und ihrer hohen Temperatur bei nur 22% der Gasproduktion, also an der unteren Grenze des in der Literatur genannten Bereiches.**

3.6 Mechanische Energie

Nach Tabelle 5 **benötigen die drei Stromabnehmer** dieser Biogasanlage – Umwälzpumpe, Rührwerk und Güllpumpe – nur 1,0, 1,3 und 0,5 kWh/Tag, total also **weniger als 3 kWh/Tag**. Damit ist der Strombedarf der Anlage sehr gering.

Überraschend ist der kleine Stromanteil der starken Güllpumpe, der mit der kurzen Laufzeit der Pumpe zusammenhängt. Die lange laufende Umwälzpumpe der Heizung benötigt mehr Strom als die Güllpumpe. Zu beachten ist auch, dass die aus der gemessenen Stromstärke errechnete Stromaufnahme in allen drei Fällen grösser ist als die angeschriebenen kW [bei der Umwälzpumpe sogar doppelt so gross]. Das liegt daran, dass der Wirkungsgrad von kleinen Motoren sehr schlecht ist. Man darf daher bei der Berechnung des Strombedarfes einer Biogasanlage nicht von den angeschriebenen kW ausgehen, die oft nur die abgegebene und nicht die aufgenommene Leistung bezeichnen.

4. Zusammenfassung

Die Untersuchung bestätigt, **dass in der Praxis bei Biogasanlagen oft höhere Prozessgasanteile als vorgesehen benötigt werden.** Bei dieser Anlage mussten bei durchaus normaler Gasproduktion im Herbst 42% und im Winter bei um das Doppelte verbesserter Isolationswirkung 44% als Prozessgas gegenüber 20 bis 40% aufgewendet werden.

Dieses Ergebnis überraschte, da **gute Voraussetzungen für einen geringen Prozessgasanteil** bestanden, nämlich **hoher Trockensubstanzgehalt von 8 bis 9% und hohe Temperatur der Frischgülle von 15 bis 20° C**. Das ungünstige Ergebnis konnte schliesslich auf den **geringen Wirkungsgrad des Wandheizgerätes von nur rund 50%** während der gesamten Untersuchungsdauer zurückgeführt werden.

Bei einem Wirkungsgrad von 75% und der im Winter erreichten Isolation hätte im Jahresverlauf der Prozessgasanteil nur rund 22% betragen müssen.

Aus der Untersuchung erkennt man auch, **dass einerseits für die Planung Güllemenge und -temperatur genau erhoben werden müssen, und dass andererseits monatliche Durchschnittswerte für die Berechnung ausreichen.** Auch dürfen Kältebrücken bei der Isolation des Fermenters und **Heizleitungsverluste** nicht übersehen werden, die bei guter Isolation und nicht allzu langen Leitungen bereits **6% des Prozessgases benötigen.**

Landwirtschaftliche Beratungszentrale, Maschinenberatung,
Telefon 052 - 33 19 21, 8307 Lindau.

Die «Blätter für Landtechnik» erscheinen monatlich und können auch in französischer Sprache unter dem Titel «Documentation de technique agricole» im Abonnement bei der FAT bestellt werden. Jahresabonnement Fr. 30.–, Einzahlung an die Eidg. Forschungsanstalt für Betriebswirtschaft und Landtechnik, 8355 Tänikon, Postcheckkonto 30 - 520. In beschränkter Anzahl können ferner Vervielfältigungen in italienischer Sprache abgegeben werden.