

- [6] Kaufmann, R.: Erhebungen an einem Güllewärmetauscher bei einer landwirtschaftlichen Biogasanlage. Forschungsanstalt Tänikon, Schweiz, Mai 1981.
- [7] Egger, K. u. R. Kaufmann: Verbesserung des Energiehaushaltes einer Biogasanlage mit Güllewärmetauscher. Blätter für Landtechnik, Nr. 224, Forschungsanstalt Tänikon, Schweiz, Mai 1983.
- [8] Mills, P.J.: Minimisation of energy input requirements of an anaerobic digester. Agricultural Wastes Bd. 1 (1979) Nr. 1, S. 57/66.
- [9] Fortschritte beim Biogas. KTBL-Schrift Nr. 285, Darmstadt 1983.
- [10] Bonfig, R.: Biogasanlage mit Wärmetauscher. Die landtechn. Zeitschrift dlz Bd. 31 (1980) Nr. 5, S. 728/33.
- [11] Steiner, M.: Verbesserung des Wärmehaushaltes einer Biogasanlage. Diplomarbeit, Inst. für Verfahrens- und Kältetechnik, ETH Zürich, Schweiz, Juni 1981.
- [12] Browen, A.: Studier av värmväxling mellan örötad och rötad gödsel. Jordbrukstekniska Institutet, Uppsala. In: Biogas från gödsel och slam. Rapport från Nordisk Seminarium I, Esbo, 1980.
- [13] Wenzlaff, R.: Erfahrungen mit Biogas im praktischen Betrieb. KTBL-Schrift Nr. 266, Darmstadt 1981.
- [14] •VDI-Wärmeatlas: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. 3. Aufl. 1977 und 4. Aufl. 1984, Düsseldorf: VDI-Verlag.
- [15] Orth, H.W.: Bestimmung von Kennzahlen zur Wärmeübertragung bei Flüssigmist. Grundl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 2, S. 47/50.
- [16] Sorge, W.: Experimentelle Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten von Substraten für Biogasanlagen bei laminarer Rohrströmung. Unveröff. Bericht, Institut für Technologie, FAL, 1982.
- [17] Orth, H.W. u. R. Ahlers: Wärmeübertragung bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen. In: 2. Fachgespräch Biogas, 1982, Institut für Technologie, FAL, 1983.
- [18] Nanzer, K.: Beheizungssysteme für Biogasfermenter. Inst. für Verfahrens- und Kältetechnik, ETH Zürich, Schweiz, 1979.
- [19] Smith, D.R., T.H. Greiner, R.J. Smith u. S.J. Marley: Characteristics of heat exchangers used on digesting beef-cattle-manure. In: Livestock waste — A renewable resource. Proc. 4th Int. Symp. on Livestock Wastes, 15./17. April 1980, Amarillo, Texas, USA, S. 101/104.
- [20] Smith, R.J.: Practicability of methan production from livestock wastes — state of the art. In: Livestock waste — A renewable resource. Proc. 4th Int. Symp. on Livestock Wastes, 15./17. April 1980, Amarillo, Texas, USA, S. 109/14.
- [21] Baader, W. u.a.: Die FAL-Versuchsbiogasanlage. Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 72 (1984).
- [22] •Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlamm-Untersuchung. Weinheim/Bergstr.: Verlag Chemie 1972.
- [23] •Kloss, R.: Planung von Biogasanlagen nach technisch-wirtschaftlichen Kriterien. München/Wien: Oldenbourg 1986.
- [24] Bollenrath, F.M.: Zum Wärmeübergang in Rührgefäßen an hochzähe newtonsche und nichtnewtonsche Substanzen. Diss. RWTH Aachen, 1977.

Biogas-Nutzung: Erfahrungen und Überlegungen

Von Rolf Ahlers und Heinz-Jürgen Ahlgrimm,
Braunschweig-Völkenrode*)

Mitteilung aus dem Institut für Technologie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode

Professor Dr.-Ing. Wolfgang Baader zum 60. Geburtstag

DK 631.862:628.336.6:662.767.1

Landwirtschaftliche Produkte, auch Rest- und Abfallstoffe aus der Verarbeitung und Verwertung, können in vielfältiger Weise genutzt werden. Eine der zahlreichen Nutzungsarten ist die Energiebereitstellung in der Form von Biogas. Für die Wirtschaftlichkeit des Biogaseinsatzes spielen Konstruktion und Betriebsweise des Biogasreaktors, aber auch die Art der Biogasnutzung eine

wichtige Rolle. Dies gilt auch für Anlagen und Verfahren, bei denen die Entsorgung Hauptaufgabe ist (z.B. Abwasserreinigung, Mülldeponierung) und Biogas als Nebenprodukt anfällt. Mit der Darstellung des Einsatzes von Biogas zum Betrieb von Gasmotor-Elektrogenerator-Aggregaten sowie der Hochdruckverdichtung und der Verbrennung werden Hinweise für Einsatzmöglichkeiten gegeben, wobei auch auf die gegebenenfalls erforderliche Reinigung des Biogases eingegangen wird. Überzogene Anforderungen, z.B. zum Schwefelgehalt, können die Wirtschaftlichkeit von an sich sinnvollen Biogasanlagen stark belasten.

*) Dipl.-Ing. R. Ahlers und Dipl.-Phys. Dr. rer. nat. H.-J. Ahlgrimm sind Mitarbeiter am Institut für Technologie (Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Baader) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

1. Einleitung

Das Entstehen von Biogas über den mikrobiellen Abbau organischer Substanz in einem feuchten anaeroben Milieu ist ein Prozeß, der schon so lange abläuft, wie es organisches Leben auf der Erde gibt. Im technischen Verfahren wird Biogas jedoch erst seit etwa hundert Jahren in nennenswerten Mengen gewonnen und nutzbringend verwendet. Entsprechend seiner Beschaffenheit wird Biogas (Faulgas, Klärgas, Deponiegas), das zudem noch bei niedrigem Druck anfällt, als Armgas bezeichnet. Die Technischen Regeln für die Gasbeschaffenheit [1] legen die Anforderungen für Brenngase im Bereich der öffentlichen Gasversorgung fest und enthalten keinen Hinweis auf Biogas. Für Deponie- und Klärgas erarbeitet der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) gegenwärtig eine Richtlinie.

Abhängig vom Faulsubstrat und der Verfahrensweise liegt der volumetrische Methangehalt im Biogas allgemein im Bereich 50 bis 70 %. Besonders zu berücksichtigen sind die Begleitgase, die einzeln oder in Kombination zumeist unerwünscht wirken. Kohlendioxid, nach Methan die zweitgrößte Komponente im Biogas, wird bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen normalerweise in Kauf genommen.

Der vol. Gehalt an Schwefelwasserstoff ist abhängig vom Faulsubstrat und mit Werten bis zu 0,5 % gemessen worden. Daneben ist auch mit Spuren anderer Gase zu rechnen. Ein deutlicher Anteil an Wasserdampf muß bei dem in wasserdampfgesättigter Atmosphäre anfallenden Biogas immer berücksichtigt werden. Insbesondere die Temperatur beeinflusst den Gehalt stark.

Beim Aufstellen der Energiebilanz einer Biogasanlage ist der Nutzen, als Energieinhalt des produzierten Biogases aus Gasmenge und Brennwert ermittelt, dem Aufwand in Form von Wärme- und Elektroenergie gegenüberzustellen. Mitunter werden die z.B. in der Einheit kWh vorliegenden Werte der verschiedenen Energieformen direkt verglichen. Um jedoch eine wirkliche Vergleichbarkeit zu erzielen, sind die Umwandlungswirkungsgrade zu berücksichtigen, z.B. für Strom aus Biogas mit $\eta_{el} \approx 0,25$ (s. Abschn. 2) und für Wärme aus Biogas mit $\eta_k \approx 0,75$ (s. Abschn. 4). Dieser Aufwand muß auf das dafür benötigte Biogas umgerechnet werden. Auch bei einzelnen Aggregaten, z.B. Verdichter für Biogas, ist die Antriebsenergie umzurechnen auf den Aufwand in Form von Biogas.

2. Biogas-Nutzung in einem Gasmotor-Elektrogenerator-Aggregat

2.1 Wärme und elektrische Energie

Bei der Verwertung von Biogas kann, wenn außer zur Bereitstellung von Wärme noch weitere Gasmengen verfügbar sind, auch die Erzeugung von elektrischer Energie eine wirtschaftliche Lösung darstellen. Nun wird beim Einsatz von Verbrennungsmotoren – so auch beim Antrieb von Elektrogeneratoren – die mit dem Brennstoff zugeführte Energie nicht nur in die gewünschte elektrische Energie, sondern zum überwiegenden Anteil in Wärme umgewandelt. Für die Wirtschaftlichkeit ist daher die Nutzung der zwangsläufig anfallenden Wärme geboten. Es sollte jedoch das Ziel sein, mit der aufwendigen Technik eines Stromaggregates einen möglichst großen Anteil elektrischer Energie zu produzieren. Wärme kann über Brenner und Heizkessel kostengünstiger erzeugt werden.

2.1.1 Zur Auslegung eines Aggregates

In Bild 1 ist mit dem Muscheldiagramm der Zusammenhang zwischen Motordrehzahl, abgegebener mechanischer Leistung und mechanischem Wirkungsgrad schematisch dargestellt. Bei direkter Kopplung von Gasmotor und Drehstrom-Elektrogenerator sind mit der vorgegebenen Netzfrequenz f nur bestimmte Drehzahlen möglich, bei denen mit unterschiedlicher Leistung gefahren werden kann.

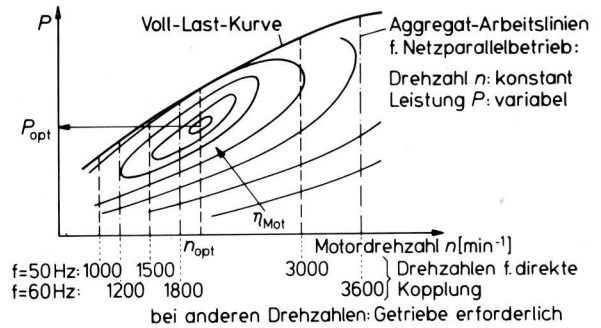


Bild 1. Kennfeld eines Gasmotors und Zuordnung der Drehzahlen beim Antrieb von Elektrogeneratoren (schematisch).

Ein Betrieb des Gasmotors beim Punkt des höchsten mechanischen Wirkungsgrades $\eta_{Mot,max}$ (bei der Drehzahl n_{opt} mit der Leistung P_{opt}) wird dabei auch den größtmöglichen Anteil elektrischer Energie erbringen.

Die Erzeugung von Drehstrom unterschiedlicher Frequenz – oder von Gleichstrom gegebenenfalls mit nachgeordnetem Wechselrichter – ist zwar möglich, schränkt jedoch die Verwendung ein bzw. erhöht den technischen Aufwand.

Für ein früher näher beschriebenes Gasmotor-Elektrogenerator-Aggregat [2], (technische Daten siehe Tafel 1) sind in Bild 2 Meßergebnisse dargestellt. Der Punkt des höchsten Anteils elektrischer Leistung liegt hier mit $\eta_{el} = 0,25$ bei Vollast des Motors (Drosselklappe des Gasmischers ganz geöffnet, vol. Methangehalt des Biogases etwa 60 %, $P = 24$ kW). Wird bei gleichbleibender Drehzahl durch teilweises Schließen der Drosselklappe die abgegebene elektrische Leistung auf die Hälfte herabgesetzt, so verringert sich der Anteil der elektrischen Leistung auf $\eta_{el} = 0,15$. Die übrige Energie (Anteil 0,85 – den Leistungsaufwand in Form von Biogas gleich 1 gesetzt) fällt in jedem Fall in Form von Wärme an. Davon kann entsprechend dem Bedarf im angeschlossenen Heizungssystem mehr oder weniger genutzt werden. Der hier verwendete Motor ist mit Wasserkühlung und Abgaswärmetauscher ausgerüstet. Aus diesen beiden Systemen konnte die im Bild angegebene Nutzwärmeleistung an das Heizungssystem der Biogasanlage abgegeben werden. Die übrige Wärme wurde mit dem Abgas, in Form von Strahlungswärme sowie über das Notkühlsystem als Konvektionswärme an die Außenluft abgegeben.

Otto-Gasmotor	
Nenn Drehzahl	3 100 min ⁻¹
Hubraum	1 600 cm ³
Verdichtung	12,5 : 1
Zündzeitpunkt	36 ... 38 °KW vor O.T.
Zündkerzen-Wärmewert	225
Getriebe	$i \approx 2,07$
Drehstrom-Synchrongenerator	
Nenn Drehzahl	$n = 1 500$ min ⁻¹
Spannung	$U = 230/440$ V
Leistung	$P = 24$ kW

Tafel 1. Technische Daten des Gasmotor-Elektrogenerator-Aggregates.

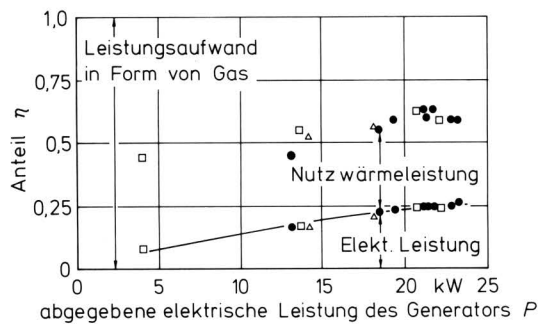


Bild 2. Leistungsbilanz eines Gasmotor-Elektrogenerator-Aggregates bei Biogasbetrieb.

2.1.2 Zum Einsatz eines Aggregates

Dem planenden Ingenieur obliegt es, das Energieangebot einer Biogasanlage soweit wie möglich nutzbar zu machen. Verbrauchsprofile für Wärme und elektrische Energie sind zu erheben bzw. zu prognostizieren und in Verbindung mit den Tarifstrukturen der in Frage kommenden Energieversorgungsunternehmen (für Elektrizität, Gas, Wärme) zu werten. So ergeben sich auch Randbedingungen wirtschaftlicher Art, die für den Einsatz generell, aber auch für die jeweilige Betriebsweise entscheidend sind.

2.1.3 Zur Betriebsweise eines Aggregates

Gegenwärtig betriebene Biogasanlagen im landwirtschaftlichen Bereich können je nach Baugröße, Substrat, Betriebsweise usw. täglich bis zu mehreren hundert m³ Biogas erzeugen. Für eine Gasproduktion von 400 m³/d und einen mittleren vol. Methangehalt von 60 %, entsprechend einem Brennwert $H_{o,n} = 6 \text{ kWh/m}^3$, beträgt die in dieser Biogasmenge enthaltene Energie 2400 kWh/d bzw. die Leistung 100 kW. Bei vollständiger Verstromung mit einem Anteil elektrischer Energie von $\eta_{el} = 0,25$ kann ein entsprechendes Aggregat 25 kW elektrische Leistung im Dauerbetrieb abgeben.

Sind solche Gasmengen nicht verfügbar, so kann zwischen Biogas und, sofern vorhanden, Erdgas mit automatischer Umschaltung gewechselt werden. Ist ein Dieselmotor mit Biogazuspeisung eingesetzt, erfolgt gegebenenfalls zeitweise reiner Dieselbetrieb. Meist wird jedoch allein Biogas zur Verfügung stehen, und bei kleineren Anlagen ist dann für Dauerbetrieb ein Aggregat unter 10 kW erforderlich. Für kleine Anlagen nachteilig ist, daß für eine gewählte Konfiguration von Generator und Verwendung der elektrischen Energie die Kosten für den Aufwand an Steuerung, Regelung und Überwachung nahezu unabhängig von der Aggregat-Baugröße sind.

Aufgrund von Recherchen ist festzustellen, daß lediglich größere Aggregate angeboten werden und daher abzuwägen ist, ob ein Dauer-Teilastbetrieb (bei höherem Wärmeanteil) oder ein Intervall-Betrieb (bei höchstem Anteil an elektrischer Energie) Vorteile bringt. Der Intervall-Betrieb kann sich beispielsweise am Wärmebedarf orientieren und sollte so eingerichtet sein, daß der Gasmotor in den Betriebspausen nicht vollständig auskühlt.

2.2 Betriebsicherheit

2.2.1 Startverhalten

Der Wassergehalt im Biogas kann bei kaltem Motor durch den Ansaugunterdruck zu Kondensation führen, das Vernässen der Zündkerzen und vergebliche Startversuche sind die Folge.

2.2.2 Beanspruchungen

Biogas hat mit seinem relativ hohen Kohlendioxidanteil einen gegenüber reinem Methan geringeren Brennwert. Die daraus resultierende geringere thermische Beanspruchung der Ventile kann sich je nach eingesetztem Motor (Werkstoffe, Verdichtung) günstig auf die Lebensdauer auswirken [3]. Die geringe oder fehlende Schmierfähigkeit des Biogases beansprucht jedoch die Ventile und Ventilsitze in besonderem Maße. Beispielsweise wurde eine Abnahme des Ventilspiels um 0,3 mm in 150 Betriebsstunden gemessen. Der Einsatz spezieller Werkstoffe und auch die Begrenzung der Kühlwassertemperatur auf maximal 70 °C können hier Abhilfe schaffen. Ablagerungen am Gewinde der Zündkerzen können beim Herausdrehen zu Beschädigungen am Zylinderkopf führen. Daher werden die Gewindegänge soweit abgedreht, daß sie nicht bis in den Brennraum hineinreichen.

2.2.3 Korrosion

Der im Biogas enthaltene Schwefelwasserstoff wirkt auf Buntmetalle stark korrodierend, gefördert durch die Gegenwart von Wasser. Das gleiche gilt auch für die bei der Verbrennung von Schwefelwasserstoff entstehenden Gase Schwefeldioxid bzw. Schwefeltrioxid. Auf die Problematik der Abgase wird in Abschn. 5.5 noch eingegangen.

Im Bereich außerhalb des Motors ist die Elektrik besonders gefährdet. Die Aggressivität der Umgebungsluft hängt von den jeweiligen Bedingungen am Aufstellungsort ab. Generelle Abhilfe läßt sich durch technische Maßnahmen schaffen, die hier stichwortartig zusammengestellt sind:

- Verwendung von Kabeln mit verzinnten Adern
- Adernanschlüsse nur löten oder schrauben, nicht stecken oder klemmen
- Relais und Anzeigeelemente im abgedichteten Schaltschrank anordnen
- Transistorzündung (Verteiler ohne mechanische Kontakte) verwenden
- Verteilerfinger (mit Drehzahlbegrenzer) aus nicht korrodierendem Material einsetzen.

Innerhalb des Motors tritt Buntmetall als Lagerwerkstoff auf, so für die Kurbelwelle, die Pleuel und die Kolbenbolzen. Ersatz durch nicht korrodierendes Material oder Oberflächenschutz (verbleite Lager) ist hier erforderlich.

2.2.4 Motorenöl

Der Motorhersteller oder -lieferant muß genaue Vorschriften über das zu verwendende Öl und über die Ölwechselkriterien angeben. Erforderlichenfalls sind die Kriterien (z.B. Total Base Number (TBN) minimal 3) über Analysen zu erarbeiten, um dem Betreiber dann eine Ölwechsellvorschrift, z.B. nach Betriebszeit, zu geben. Besonders gute Indikatoren für den Verschleiß sind Cu-, Fe- und Mn-Gehalte im Öl.

3. Hochdruck-Verdichtung von Biogas

3.1 Einsatzzweck von verdichtetem Biogas

Biogas fällt üblicherweise bei sehr geringem Überdruck (unter 50 mbar) und Temperaturen von 30–35 °C an und hat daher eine so geringe Energiedichte, daß es lediglich in stationären Anlagen genutzt wird. Ob und inwieweit Biogas zukünftig stärker für den mobilen Einsatz verwendet wird, läßt sich gegenwärtig nicht absehen. Über den Einsatz in Ackerschleppern wurde beispielsweise in [4] und [5] berichtet. Eine wesentliche Einflußgröße für den Einsatz in mobilen Verbrauchern ist die Menge des notwendigerweise in Hochdruck (HD)-Gasflaschen mitzuführenden Biogases. So beträgt die Energiedichte von verdichtetem Biogas (Vol. Gehalt 60 %

CH₄ und 40 % CO₂ bei 200 bar und 0 °C rund 2000 kWh/m³, gegenüber der Energiedichte von Dieseltreibstoff mit 10 700 kWh/m³. Bei einer Wertung dieser Vergleichszahlen ist aber noch die notwendige Verdichtungsarbeit für das Biogas zu berücksichtigen. Sie beträgt für das genannte Beispiel etwa 400 kWh/m³ in Form von Biogas, wobei angenommen ist, daß der Verdichter sinnvollerweise von einem Gasmotor angetrieben wird. Die bei der Verdichtung anfallende Wärme könnte genutzt werden.

Beim Einsatz von Biogas in mobilen Verbrauchern sind aber auch Gewicht und Raumbedarf der HD-Gasflaschen und der Armaturen zu berücksichtigen.

Die Verfahrensweise des Gasflaschen-Füllvorganges ist auch von der Gasproduktionsrate der Biogasanlage und vom Inhalt des Gasspeichers abhängig. So können die auf dem mobilen Verbraucher befindlichen HD-Gasflaschen in Betriebspausen erneut gefüllt oder im Wechselsystem gegen einen zweiten Satz von HD-Gasflaschen ausgetauscht werden.

3.2 Verdichtungsverhalten

Aus den Gleichungen von *Boyle, Mariotte* und *Gay-Lussac* ergibt sich für den Zusammenhang zwischen den thermischen Zustandsgrößen "idealer" Gase die Zustandsgleichung

$$p v = R T \quad (1)$$

mit *p* absoluter Druck, *v* spezifisches Volumen, *T* absolute Temperatur des Gases, *R* spezifische Gaskonstante. "Reale" Gase erfüllen diese einfache Gleichung genau nur bei unendlich kleinem Druck – und bis etwa 30 bar mit einer für viele Berechnungen ausreichenden Genauigkeit von ± 1–2 %, vorausgesetzt, daß die kritische Temperatur verhältnismäßig tief liegt. Bei höheren Drücken machen sich der Raumbedarf der Gasmoleküle und die zwischen ihnen wirkenden Kräfte bemerkbar, diese Abweichung vom idealen Verhalten wird durch Einführung der Kompressibilitätszahl

$$K = p v / (R T) \quad (2)$$

berücksichtigt. Während für "ideale" Gase *K* = 1 beträgt, sind für "reale" Gase die in Versuchen ermittelten von Temperatur und Druck abhängigen Werte für *K* aus Tabellen oder Kurven zu entnehmen, z.B. [6, 7]. Für Methan (CH₄) und Kohlendioxid (CO₂), die beiden größten Anteile im Biogas, ist dieser Zusammenhang in Bild 3 dargestellt.

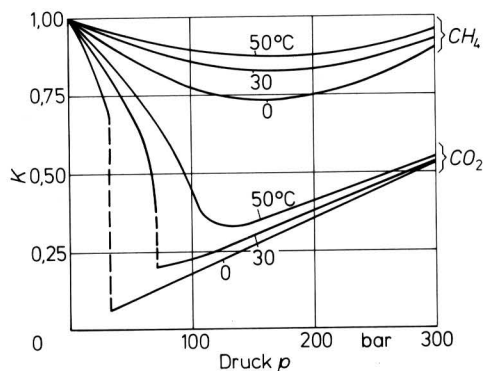


Bild 3. Kompressibilitätszahl $K = p v / (R T)$ für CH₄ und CO₂ als Funktion des Druckes; Temperatur als Parameter.

Für eine Beispielrechnung wird angenommen: 1 m³ Biogas, vol. bestehend aus 60 % CH₄ und 40 % CO₂ bei *p*₁ = 1 bar, soll verdichtet werden auf *p*₂₀₀ = 200 bar, 0 °C.

Aus Gl. (1) und (2) wird

$$v_{200} = \frac{K_{200} \cdot p_1 \cdot v_1}{p_{200}}$$

$$\text{CH}_4: v_{200} = \frac{0,75 \cdot 1 \cdot 0,6 \text{ m}^3}{200} = 0,00225 \text{ m}^3$$

$$\text{CO}_2: v_{200} = \frac{0,35 \cdot 1 \cdot 0,4 \text{ m}^3}{200} = 0,0007 \text{ m}^3$$

Somit nimmt 1 m³ Biogas verdichtet auf 200 bar bei 0 °C das Volumen von 2,95 l ein. In einer üblichen 50 l-Hochdruckflasche sind bei diesen Verhältnissen dann 17 m³ Biogas enthalten, bei gleichem Druck, jedoch 40 °C bzw. 50 °C aber nur 15,5 m³ bzw. 14,5 m³.

3.3 Energiedichte

Das Verdichtungsverhalten von Biogas ist, wie zuvor aufgezeigt, wesentlich durch die beiden größten Anteile – CH₄ und CO₂ – bestimmt. Deren Verdichtungseigenschaften (ausgedrückt durch die Kompressibilitätszahl) bewirken, daß bei höheren Drücken in einer Druckgasflasche mehr Biogas enthalten ist, als der Berechnung für "ideale" Gase entspricht. Zur Veranschaulichung der Energiedichte ist diese in Abhängigkeit von Methangehalt, Druck und Temperatur in Bild 4 dargestellt.

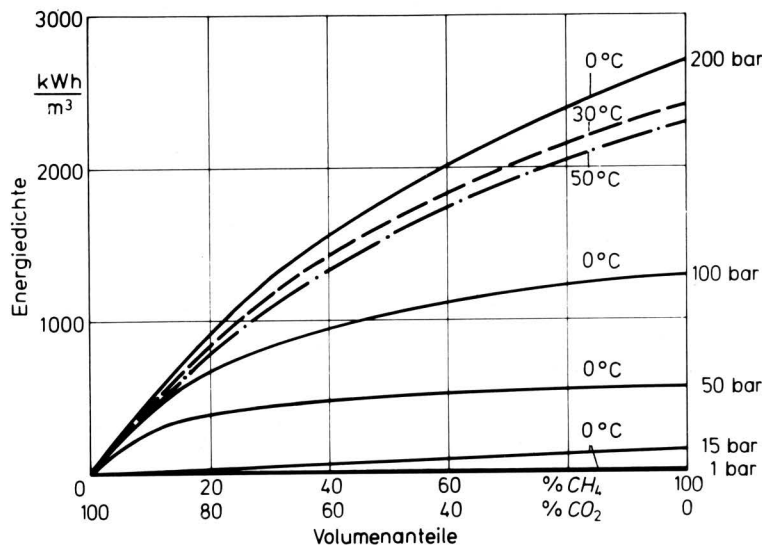


Bild 4. Energiedichte von unterschiedlich stark verdichtetem Biogas in Abhängigkeit vom Methananteil; Vergleichswert für Dieseltreibstoff: 10 700 kWh/m³.

3.4 Weitere Bestandteile im Biogas

Im Biogas kommen, auch in Spuren, weitere Gase und eventuell Aerosole vor. Für das zuvor beschriebene Verdichtungsverhalten blieben sie unbeachtet, für den konkreten Einsatzfall ist es jedoch erforderlich, sie zu berücksichtigen. Insbesondere sind diese weiteren Gase für die Zulassung von Druckgasflaschen für das Gasgemisch Biogas maßgebend. Gleichzeitig sind aber weitere einschlägige Vorschriften einzuhalten.

4. Verbrennung von Biogas

4.1 Wärmeerzeugung

Die einfachste und daher auch übliche Nutzung von Biogas ist dessen Verbrennung im ungereinigten Zustand zur Wärmeerzeugung.

gung. Nicht unproblematisch, wie sich nach längerer Betriebszeit von Wärmeerzeugern zeigt, ist das Entstehen von Ablagerungen im Feuerraum und in den Rauchgaszügen. Allein schon aus diesem Grund verdient ein Heizkessel mit größeren Durchgangsquerschnitten den Vorzug gegenüber einer Heiztherme, die auf hohe Effizienz bei sauberen Gasen ausgelegt ist. Um auch bei einem solchen Heizkessel noch einen möglichst hohen Wirkungsgrad η_K^* ($\eta_K \approx 0,75$ bei 60 °C Kesseltemperatur) zu erzielen, wird die Kesseltemperatur nicht höher als notwendig eingestellt. Bei niedrigen Kesseltemperaturen ist die Neigung zu Ablagerungen jedoch höher. Reinigungen sind etwa alle 1–2 Monate durchzuführen.

4.2 Emissionen

Das bei der Verbrennung entstehende Abgas enthält infolge des Schwefelwasserstoffgehaltes im Biogas auch einen Anteil Schwefeldioxid. Die einschlägigen Luftreinhaltevorschriften für die Verbrennung von Biogas in Feuerungsanlagen sind in **Tafel 2** zusammengestellt (siehe auch Abschn. 5.5).

Feuerungsanlage	Emissions-Vorschriften
– über 100 MW (wird von keiner biogasgefeuerten Anlage erreicht)	Großfeuerungsanlagen-Verordnung
– 10 MW bis 100 MW	TA-Luft Nr. 3.3.1.2.3 (bei einem Abgas mit 3 Vol.-% Sauerstoff): Staub max. 5 mg/m ³ Abgas Schwefeloxide max. 35 mg/m ³ Abgas (Schwefeldioxid und Schwefeltrioxid, angegeben als Schwefeldioxid)
– unter 10 MW (Bereich üblicher biogasgefeuerter Anlagen)	Vorschriften der 1. BImSchV, die allerdings bisher keine Emissionsvorschriften für Gasfeuerungen konkretisiert. Die Abgasverluste (= Energieverluste) sind begrenzt.

Tafel 2. Gültige Vorschriften zur Emissionsbegrenzung bei der Verbrennung von Biogas (d.i. sonstiges Gas im Sinne der Vorschriften) in Feuerungsanlagen [8, 9].

Für ein trockenes Biogas mit vol. Anteilen von 60 % CH₄, 39,7 % CO₂ sowie 0,3 % H₂S und mittelfeuchte Verbrennungsluft mit 80 % relativer Feuchte und 20 °C wird eine Verbrennungsberechnung durchgeführt. Mit einem gemessenen Bedarf von 7,9 m³ Luft pro m³ Biogas ergibt sich ein Luftverhältnis $\lambda = 1,35$. Der Ausstoß an Schwefelemissionen beträgt 1 150 mg SO₂/m³, bezogen auf trockenes Abgas. Für ein Biogas mit den vol. Anteilen 60 % CH₄, 39,9 % CO₂ sowie 0,1 % H₂S führt die gleiche Berechnung zu 380 mg SO₂/m³. Zum Vergleich ist die Schwefelemission für die Verbrennung von Heizöl EL mit einem grav. Schwefelgehalt von 0,3 % 520 mg SO₂/m³ trockenes Abgas.

Zur weiteren Bewertung sind die unterschiedlichen Brennwerte H₀ und Wirkungsgrade η_K für Biogas und Heizöl EL zu berücksichtigen. Für Biogas mit H_{0,n} = 6 kWh/m³ (bei 60 % CH₄), H₂S-Gehalt von 0,3 % bzw. 0,1 % und $\eta_K = 0,75$ ergibt sich für eine Heizungswasserwärmeleistung von 10 kW ein SO₂-Auswurf von 19 300 mg/h bzw. 6 400 mg/h. Bei der Verwendung von Heizöl EL mit 0,3 % S, H₀ = 12,6 kWh/kg und $\eta_K = 0,85$ beträgt der SO₂-Auswurf 5 600 mg/h bei gleicher Leistung.

*) η_K ist das Verhältnis der in Form von Wärme im Heizungswasser abgeführten Energie zur in Form von Biogas (mit Brennwert H_{0,n}) zugeführten Energie.

Der Schwefel im Biogas stammt aus dem natürlichen Kreislauf Pflanze-Ernährung-Dünger-Boden, so gehört Schwefel zu den Nähr-elementen, die von der Pflanze in größeren Mengen benötigt bzw. aufgenommen werden, die aber zumeist in ausreichender Menge im Boden vorhanden sind (u.a. auch herrührend aus der Verbrennung nicht regenerativer Energieträger). Schwefel ist als Bestandteil schwefelhaltiger Aminosäuren für die Pflanze unentbehrlich [10].

5. Reinigung von Biogas

5.1 Biogas-Inhaltsstoffe

Biogas fällt an als wasserdampfgesättigtes Mischgas mit den Hauptkomponenten Methan (CH₄) und Kohlendioxid (CO₂), daneben ist Schwefelwasserstoff (H₂S) enthalten. In Spuren können Ammoniak (NH₃) und Wasserstoff (H₂) weitere Bestandteile sein, auch kommen weitere schwefelhaltige Kohlenstoffverbindungen [11] vor, wie Merkaptane, Kohlenstoffoxisulfid (COS), Schwefelkohlenstoff (CS₂) und Thiophen (C₄H₄S), die ebenso wie H₂S geruchsintensiv sind. Begleitend treten auch gröbere und feinere Schwebstoffteilchen auf, die beim Gasaustritt aus der Flüssigkeitsoberfläche mitgerissen werden.

5.2 Erfordernis der Reinigung

Die im Biogas enthaltenen Begleitstoffe des Methans wirken einzeln oder in Kombination meist unerwünscht. Daher sind vielfach Reinigungsmaßnahmen erforderlich, **Tafel 3**, die Sicherheitsrisiken verhindern sollen. Ein Sicherheitsrisiko bedeutet z.B. H₂S, das toxisch wirkt, eine Minderung dieser Komponente bringt daneben auch geringere Emissionen im Verbrennungs-Abgas.

Der Aggressivität des ungereinigten Biogases kann durch Einsatz geeigneter Werkstoffe Einhalt geboten werden, andernfalls kann es bei Schäden zum Entweichen des brennbaren Gases und zu Gefahren kommen. Vielfach sollen auch für andere Zwecke gebaute Maschinen (z.B. Verbrennungsmotoren) ohne Umbau zur Nutzung von Biogas eingesetzt werden, dann ist zur Erzielung längerer Lebensdauer eine Reinigung unumgänglich.

Biogas-Nutzung für	Minderung des Gehaltes von			
	H ₂ S	CO ₂	H ₂ O	Schwebstoffen
Koch- und Backzwecke	ja	nein	nein	ja
Infrarotstrahlungsheizung	ja	nein	nein	ja
Warmwasserheizung (Heizkessel)	erwünscht	nein	nein	ja
stationäre Gasmotoren	fallweise	nein	nein	ja
mobilen Betrieb (Fahrzeuge)	ja	ja	ja	ja
Aufbereitung auf Erdgasqualität	ja	ja	ja	ja

Tafel 3. Erfordernis der Reinigung von Biogas; nach [12] mit Ergänzungen.

5.3 Abscheidung von Schwebstoffen

Für jedwelche Gasnutzung wird die Abscheidung von Schwebstoffen empfohlen [13], um ein Zusetzen von Armaturen und Rohrleitungen zu verhindern. Meist dürfte die Grobfiltration im Kiesfilter schon ausreichen, wie eine Aufstellung der in der EG betriebenen landwirtschaftlichen Biogasanlagen zeigt [14]. Der Einsatz von Feinfiltern (Glas-, Metallwolle) ist möglich, sie bedingen aber höheren Wartungsaufwand.

5.4 Abscheidung von Wasser

Das bei Betriebstemperaturen von Biogasreaktoren, zumeist 30 bis 35 °C, in wasserdampfgesättigtem Zustand anfallende Biogas kühlt bis zur Nutzung erheblich ab. Schon bei der Planung des Gasleitungssystems ist die durch Abkühlung bedingte Kondensation und auch die Gefahr des Einfrierens zu berücksichtigen. Die auftretenden Wassermengen sind aus den Kurven in Bild 5 abzuleiten. Wird eine Biogasmenge von 400 m³/d von 35 °C auf 10 °C abgekühlt, so fallen an Kondensat 12 kg/d an. Zweckmäßigerweise werden daher alle Gasleitungen mit Gefälle zu einem Kondensatablaß verlegt. In der Biogasanlage der FAL [2] strömt das Gas durch eine, auch zu anderem Zweck dienende Wasservorlage; Abkühlung und Auswaschung von Schwefelstoffen sind dabei erwünschte Nebeneffekte. Eine Entwässerung durch Abkühlung auf etwa 10 °C reicht für die übliche Art der Gasnutzung aus, wie für die Wärmeerzeugung durch Verbrennung und für Gasmotor-Betrieb.

Zur Verwendung im mobilen Betrieb, Hochdruckverdichtung vorausgesetzt, und für die Aufbereitung auf Erdgasqualität muß für die Entwässerung ein erheblich höherer Aufwand getrieben werden. Die Hochdruckspeicherung bedingt einen Taupunkt, der mindestens 10 °C unter der tiefsten Betriebstemperatur liegt, für die Erdgasqualitäten "L" und "H" muß er unterhalb von 0 °C liegen [15]. Dafür werden dann Sorptionsmittel wie Aluminiumoxid (Al₂O₃), Kalziumchlorid (CaCl₂) oder Silikagel bzw. flüssige Trocknungsmittel wie Ethylen- und Triethylenglykol eingesetzt.

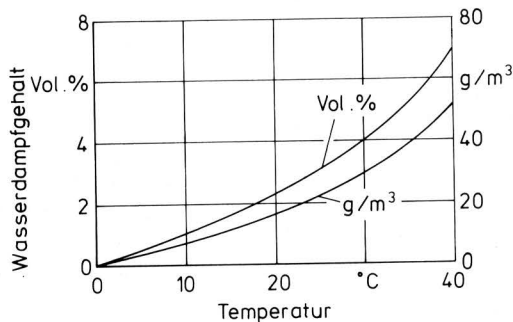
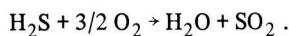


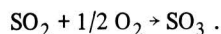
Bild 5. Wasserdampfgehalt im Biogas bei Sättigung und $p_{\bar{u}} = 50$ mbar in Abhängigkeit von der Temperatur.

5.5 Abscheidung von Schwefel

Neben der schon genannten Toxizität der Schwefelverbindungen im Biogas, H₂S hat einen MAK-Wert von 10 ppm, sind die korrosionsfördernden Wirkungen der Schwefelverbindungen im Verbrennungs-Abgas besonders zu beachten. Es bildet sich Schwefeldioxid nach der Beziehung



Das Schwefeldioxid kann bei Luftüberschuß weiter oxidiert werden:



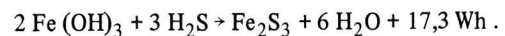
Mit Wasser bilden beide Gase die stark korrosiv wirkende schweflige Säure (H₂SO₃) bzw. Schwefelsäure (H₂SO₄). Mit ansteigendem Schwefel- und Wassergehalt des Biogases steigen auch Säure- und Wasserdampftaupunkt der Abgase, sie erzwingen höhere Abgastemperaturen und senken den Wirkungsgrad. Auch wenn durch die BImSchV und die TA-Luft bislang für viele Fälle noch keine Begrenzung der Schwefelgehalte vorgeschrieben ist (Tafel 2), so wird eine Abscheidung von Schwefel oft sinnvoll wegen der

- Reduktion der Toxizität und der Geruchsemissionen von Biogas

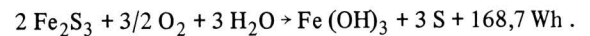
- Reduktion der Abgas-Emissionen
- Verringerung der Korrosionsgefahr durch H₂S bzw. durch die Schwefeloxide bzw. Säuren
- Einsatzmöglichkeit für weniger resistente Materialien
- geringeren Wartungs- bzw. Instandhaltungskosten.

Von den möglichen "Ent"-schwefelungsverfahren [11, 16], dieser Begriff wird meistens benutzt für Verfahren zur Minderung des Schwefelgehaltes, sind nur wenige bisher in der landwirtschaftlichen Praxis eingeführt [14]. Sofern erforderlich, wird vielfach bereits die Herabsetzung auf einen vol. H₂S-Gehalt unter 0,1 % genügen. Selektiv auf Schwefelwasserstoff wirken Oxidationsverfahren, während bei Adsorption an festen Stoffen (Aktivkohle, Zeolithe usw.) und über Absorption in Flüssigkeiten (z.B. Druckwasser-Waschverfahren) auch immer Teile des Nutzgases verlorengehen.

Geeignet für kleine Biogasanlagen, wie es die meisten landwirtschaftlichen sind, ist das Trockenreinigungsverfahren mit Eisenhydroxid (Luxmasse), pelletiert zu Durchmessern von 10–20 mm:



Die Aufnahmekapazität ist begrenzt, für 100 m³ Biogas mit vol. 0,35 % H₂S sind etwa 2 kg dieses Oxidationsmittels erforderlich, dann muß mit Luft regeneriert werden (was mehrfach möglich ist):



Die Wärmeentwicklung ist bei beiden Vorgängen zu beachten, es kann sonst Selbstentzündung erfolgen. Üblicherweise werden zwei großzügig bemessene Einheiten im Wechsel betrieben. Eine Variante ist der Betrieb einer Einheit, die laufend durch Zusatz von vol. 1–2 % Luft zum durchströmenden Biogas regeneriert wird. Die Beeinträchtigung bei der Nutzung des Biogases ist vernachlässigbar, jedoch muß der Luftzusatz bei Ausfall des Biogasdurchsatzes enden. Andernfalls könnte ein explosionsfähiges Gemisch entstehen, z.B. bei Methan-Luftgemischen mit vol. 5–15 % Methan [17]. Zu den Kosten des Trockenreinigungsverfahrens liegen Angaben vor [13, 16, 18], die Betriebskosten liegen bei 0,03 DM/m³ Biogas.

Es gibt weitere vielversprechende Möglichkeiten [16], doch fehlt zumeist noch eine praxisgerechte Erprobung oder die technologisch genaue Beschreibung (z.B. Einsatz von Eisenspänen zur Bindung von Schwefel).

5.6 Abscheidung von Kohlendioxid

Zumeist als inert angesehen, kann Kohlendioxid doch bei Anwesenheit von Wasser die Korrosion begünstigen. Ist eine Aufbereitung auf Erdgasqualität vorgesehen, so muß CO₂ entfernt werden.

Für landwirtschaftliche Biogasanlagen wird man den CO₂-Anteil kaum vermindern, obwohl Vorteile offenbar sind z.B.:

- Erhöhung des Heizwertes und
- Verringerung des zu speichernden Volumens (Kosteneinsparung).

Zum Stand der Technik gehört seit Jahrzehnten das großtechnisch eingesetzte Druckwasser-Auswaschverfahren [19]. Durch die unterschiedliche Löslichkeit in Wasser von Methan mit 0,0331 einerseits [20] sowie CO₂ mit 27fachem und H₂S mit 80fachem Wert andererseits können beide Komponenten zugleich entfernt werden. Das Waschwasser wird regeneriert und rezykliert.

Andere Verfahren der Absorption oder Adsorption sind möglich, aber derzeit wegen fehlender Notwendigkeit oder zu hoher Kosten in landwirtschaftlichen Biogasanlagen nicht im Einsatz.

6. Zusammenfassung

Gemessen am biologischen Vorgang der Biogasproduktion, in Biogasanlagen durch technische Maßnahmen gefördert, kann die Nutzung des Biogases vergleichsweise aufwendig sein. In Abhängigkeit von der Relation zwischen Anfall und Verbrauch, sowohl in bezug

auf die Menge wie auch den zeitlichen Verlauf, sind unterschiedliche Nutzungen zweckmäßig.

Mit den Themen Gasmotor-Elektrogenerator-Aggregat, Hochdruck-Verdichtung und Verbrennung werden Beispiele und Probleme verschiedener Einsatzmöglichkeiten dargestellt und die gegebenenfalls erforderliche Reinigung des Biogases erörtert. Sorgfältige planende Ingenieurarbeit im speziellen Fall muß zu einem betriebssicheren Gesamtkomplex Biogasanlage — Erzeugung und Verwendung — führen, der wenig Bedien- und Wartungsaufwand bedarf. Überzogene Forderungen, z.B. hinsichtlich einer Verminderung des Schwefelgehalts, können die Wirtschaftlichkeit von an sich sinnvollen Biogasanlagen stark belasten.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] DVGW-Arbeitsblatt G 260/1: Gasbeschaffenheit. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches eV, Eschborn, 1983.
- [2] Baader, W., H.-J. Ahlgrim, R. Ahlers u. W. Asendorf: Die FAL-Versuchsbiogasanlage. Landbauf. Völknerode, Sonderheft 72 (1984).
- [3] Held, W. u. A. König: Einsatz von Biogas als Kraftstoff für stationäre Motoren. In: 2. Fachgespräch Biogas (1982), Institut für Technologie der FAL.
- [4] Seifert, A.: Biogas als Kraftstoff für Motoren und Acker-schlepper. Landtechnik Bd. 10 (1955) Nr. 1, S. 29/31.
- [5] Büttner, S. u. K. Maurer: Traktor mit Biogasantrieb, Um-rüstung und erste Einsatzverfahren. Landtechnik Bd. 37 (1982) Nr. 6, S. 284/87.
- [6] •Dubbel (Hrsg.): Taschenbuch für den Maschinenbau. 14. Aufl. Berlin/Heidelberg/New York: Springer 1981.
- [7] •Landolt, H. u. R. Börnstein: Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik. 6. Aufl. Bd. II/1. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer 1950.
- [8] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immis-sions-Schutzgesetz (Technische Anleitung Luft — TA-Luft). In: GMBI (1986) Nr. 7, S. 95/143, geändert durch GMBI (1986) Nr. 11, S. 202.
- [9] 1. BImSchV, Erste Verordnung zur Durchführung des Bun-des-Immissions-Schutzgesetzes (Verordnung über Feuerungs-anlagen), in: St.Anz.HE (1975) Nr. 28, S. 1251/53.
- [10] •Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau. 10. Aufl. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag 1983.
- [11] Ashare, E., D.C. Augenstein, J.C. Young, R.J. Hossan u. G.L. Duret: Evaluation of systems for purification of fuel gas from anaerobic digestion. Dynatech Report Nr. 1268 (1978).
- [12] Jensen-Holm, C.: Biogas purification. In: Biomass Conver-sion. Berichtsband der Tagung Bioenergy '84, Göteborg, 1984.
- [13] Dohne, E.: Biogasverwertung, Biogasmotoren und Wirt-schaftlichkeit. GIT Fachzeitschrift Labor (1985) Nr. 12, S. 1241/55.
- [14] Demuyne, M. u. E.-J. Nyns (Hrsg.): Compendium biogas plants in Europe — a practical handbook. In: Solar Energy, R & D in European Community. Publication EU 9096, Unit of Bioengineering, Catholic University of Louvain, Belgien.
- [15] Schwefer, H.-J.: Verfahren zur Aufbereitung von Biogas in der Gasphase. In: VDI-Bericht Nr. 459, Energie aus Müll und Klärschlamm. Düsseldorf: VDI-Verlag 1982.
- [16] Braun, R.: Entwicklung eines rationellen Biogasentschwefe-lungsverfahrens. Zwischenbericht 1 (1982), Bundesministerium für Wissen-schaft und Forschung, Wien, Österreich.
- [17] •Nabert, K. u. G. Schön: Sicherheitstechnische Kennzahlen brennbarer Gase und Dämpfe. 2. erw. Aufl. (1963) mit 5. Nachtrag (Stand 1.6.80), Braunschweig: Deutscher Eich-verlag.
- [18] Schulz, H. u. A. Perwanger: Untersuchungen zur Verbesse-rung der Betriebssicherheit und Gasverwertung bei Biogas-anlagen in Bayern, Juni 1982 bis März 1983. Bericht zum Forschungsvorhaben des Bayerischen Staatsmi-nisteriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.
- [19] Kugel, G.: Aufbereitung von Klärgas (Biogas) am Beispiel des Gruppenklärwerkes I, Mönchengladbach-Neuwerk, des Niersverbandes. In: VDI-Bericht Nr. 459, Energie aus Müll und Klärschlamm. Düsseldorf: VDI-Verlag 1982.
- [20] •Kohlrausch, R. (Hrsg.): Praktische Physik Bd. I. Stuttgart: Teubner 1962.